

# IVW - Schriftenreihe Band 149

Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Kaiserslautern

---

**Vitalij Popow**

**Quantifizierung von Defekten in  
endlosfaserverstärkten Kunststoffen  
mit Hilfe der Amplituden- und Phasen-  
informationen im Rahmen der aktiven  
und passiven Thermografie**

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

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

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the Internet at <<http://dnb.dnb.de>>.

Herausgeber: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH  
Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer  
Erwin-Schrödinger-Straße 58  
Technische Universität Kaiserslautern  
67663 Kaiserslautern  
<http://www.ivw.uni-kl.de>

Verlag: Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH

Druck: pri-me Printservice & Medienservice  
Barbarossastraße 1  
67655 Kaiserslautern  
D-386

© Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern 2021

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1615-021X

ISBN: 978-3-944440-46-0

# **Quantifizierung von Defekten in endlosfaserverstärkten Kunststoffen mit Hilfe der Amplituden- und Phaseninformation im Rahmen der aktiven und passiven Thermografie**

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)**

genehmigte

**Dissertation**

von

Herrn

Vitalij Popow (M. Sc.)

aus Serenda

Tag der mündlichen Prüfung: 23. Juli 2021

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ulf Paul Breuer  
Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig



*für meine Familie*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) im Kompetenzfeld „Tailored and Smart Composites“ in den Jahren 2015 bis 2021.

An erster Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer für die enge fachliche Betreuung der Arbeit, das wertvolle und konstruktive Feedback und die stets ehrlichen Worte bedanken. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig für die Übernahme der Berichterstattung und das wertvolle Feedback, sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Tilmann Beck für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Vorgesetzten Dr. rer. nat. Martin Gurka für die zahlreichen Diskussionen, den wertvollen Input und die wissenschaftliche Betreuung bedanken. Darüber hinaus bedanke ich mich bei der gesamten Belegschaft des Instituts, insbesondere bei Martje Armbrrecht, Thorsten Becker, Yves Becker, Pia Eichert, Silke Fischer, Stefan Gabriel, Andreas Gebhard, Maurice Gilberg, Hermann Giertzsch, Benedikt Hannemann, Markus Hentzel, Moritz Hübler, Bai Cheng Jim, Max Kaiser, Andreas Klingler, Mark Kopietz, Tim Krooß, Manuel Kunzler, Ariane McCauley, Sebastian Nissle, Heidrun Plocharzik, Thomas Rief, Ilona Ryl, Ralf Schimmele, Florian Schimmer, Sebastian Schmeer, Florian Schimmer, Stefan Schmitt, Ralph Schneider, Kerstin Steidle, Rolf Walter, Bernd Wetzels und Harutyun Yagdjian. Ferner bedanke ich mich bei meinen Studien- und Abschlussarbeitern, sowie bei den wissenschaftlichen Hilfskräften, insbesondere bei Joshua Müller und Sarah Karazma. Besonders danken möchte ich meinem langjährigen Bürokollegen Benjamin Kelkel, mit dem ich zahlreiche unvergessliche Tage im Labor und auf internationalen Konferenzen erleben durfte. Ferner bedanke ich mich besonders bei Julia Vogtmann für die Unterstützung bei der Durchführung der Referenzmessungen. Bei Nathalie und Tobias Reichard möchte ich mich für das Korrekturlesen der Arbeit und die unterhaltsamen Querverweise zur Welt der Comics bedanken.

Den größten Dank möchte ich meiner Familie aussprechen. Meinen Eltern Lydia und Boris, sowie meinem Bruder Evgenij danke ich für die Motivation immer weiter zu machen – seit Beginn der Schulzeit bis zur Einreichung der Dissertation. Meiner Frau Dorota, sowie meinen Töchtern Mia und Zoe danke ich für das Vertrauen, die vielen unvergesslichen und liebevollen Momente, sowie die vielen bunten Bilder und Basteleien, die mir stets neue Kraft gegeben haben und das Vorhaben überhaupt erst ermöglichten.

Kaiserslautern, August 2021





# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis</b> . . . . .   | <b>I</b>  |
| <b>Kurzfassung</b> . . . . .  | <b>IV</b> |
| <b>Abstract</b> . . . . .   | <b>V</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .  | <b>VI</b> |
| <b>1 Einleitung</b> . . . . .   | <b>1</b>  |
| 1.1 Hintergrund und Motivation . . . . .  | 1         |
| 1.2 Begriffsdefinition . . . . .  | 3         |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> . . . . .   | <b>4</b>  |
| 2.1 Faserkunststoffverbunde . . . . .   | 4         |
| 2.1.1 Eigenschaften anisotroper Faserkunststoffverbunde . . . . .   | 5         |
| 2.1.2 Defekte in Faserkunststoffverbunden . . . . .   | 6         |
| 2.1.3 Herstellung realer und realitätsnaher Defekte . . . . .   | 10        |
| 2.2 Thermografie als Methode der zerstörungsfreien Prüfung . . . . .                                      | 12        |
| 2.2.1 Definition der zerstörungsfreien Prüfung . . . . .  | 12        |
| 2.2.2 Konvektion und konvektiver Wärmeübergang . . . . .  | 13        |
| 2.2.3 Grundlagen der Wärmestrahlung . . . . .   | 14        |
| 2.2.4 Kontaktlose Erfassung der Oberflächentemperatur . . . . .   | 15        |
| 2.2.5 Abgrenzung der Thermografie . . . . .   | 17        |
| 2.2.6 Unterteilung der Thermografie . . . . .   | 19        |
| 2.3 Passive Thermografie zur In-situ-Überwachung . . . . .  | 21        |
| 2.3.1 Quantifizierung von Schädigungen bei der mechanischen Prüfung                                       | 21        |
| 2.3.2 Quantifizierung von Impactschädigung bei ihrer Entstehung . . .                                     | 24        |
| 2.4 Aktive Thermografie zur Defektdetektion . . . . .   | 26        |
| 2.4.1 Optisch angeregte Lock-In Thermografie . . . . .  | 26        |
| 2.4.2 Impulsthermografie mit Puls-Phasen Auswertung . . . . .   | 27        |
| 2.4.3 Ortsaufgelöste Quantifizierung von Defekten . . . . .   | 30        |
| <b>3 Ziele und Vorgehensweise</b> . . . . .   | <b>36</b> |
| <b>4 Probenherstellung</b> . . . . .  | <b>38</b> |
| 4.1 Probenübersicht und Lagenaufbau . . . . .   | 38        |
| 4.2 Material und Materialeigenschaften . . . . .  | 40        |
| 4.3 Herstellung im Prepreg-Autoklav-Verfahren . . . . .   | 40        |
| <b>5 Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung von Defekten im Rahmen der aktiven Thermografie</b> . . . . . | <b>42</b> |

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 5.1      | Probengeometrie und -präparation . . . . .  | 42        |
| 5.2      | Experimentelle Untersuchung . . . . .   | 45        |
| 5.2.1    | Versuchsaufbau der Impulsthermografie . . . . .   | 45        |
| 5.2.2    | Auswertung mit Puls-Phasen Thermografie . . . . .   | 46        |
| 5.2.3    | Durchführung der lateral orts aufgelösten Quantifizierung . . . . .   | 47        |
| 5.2.4    | Referenzmessung am Röntgenmikroskop . . . . .   | 50        |
| 5.3      | Ergebnisse und Diskussion . . . . .   | 52        |
| 5.3.1    | Quantifizierung anhand der IR-Bilder . . . . .  | 52        |
| 5.3.2    | Quantifizierung anhand der Phasenbilder . . . . .   | 55        |
| 5.3.3    | Tiefenabhängigkeit des Messfehlers bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung . . . . .   | 59        |
| 5.4      | Zwischenfazit . . . . .   | 63        |
| <b>6</b> | <b>Zeitaufgelöste Quantifizierung von Schädigungen bei der quasi-statische Zugprüfung mit Hilfe der passiven Thermografie . . . . .</b> | <b>64</b> |
| 6.1      | Probengeometrie und -präparation . . . . .  | 64        |
| 6.2      | Experimentelle Untersuchung . . . . .   | 66        |
| 6.2.1    | Versuchsaufbau der quasi-statischen Zugbelastung mit passiver Thermografie . . . . .  | 66        |
| 6.2.2    | Auswertemethodik . . . . .  | 67        |
| 6.3      | Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der obersten Lage . . .  | 72        |
| 6.3.1    | Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                | 72        |
| 6.3.2    | Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                  | 74        |
| 6.3.3    | Visualisierung der gesamten Schädigung durch oberflächennahe Zwischenfaserbrüche . . . . .  | 75        |
| 6.4      | Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der zweiten und dritten Lage . . . . .   | 76        |
| 6.4.1    | Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                | 77        |
| 6.4.2    | Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                  | 77        |
| 6.4.3    | Visualisierung der gesamten Schädigung durch Zwischenfaserbrüche in der zweiten Lage . . . . .  | 78        |
| 6.5      | Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der vierten Lage . . . .   | 81        |
| 6.5.1    | Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                | 81        |
| 6.5.2    | Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse . . . . .                                  | 82        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.6      | Zwischenfazit . . . . .  | 82         |
| <b>7</b> | <b>Lateral orts aufgelöste und zeitaufgelöste Quantifizierung von Impactschädigungen mit Hilfe der passiven und aktiven Thermografie . . .</b> | <b>85</b>  |
| 7.1      | Probengeometrie und -präparation . . . . .   | 85         |
| 7.2      | Experimentelle Untersuchung . . . . .  | 86         |
| 7.2.1    | Versuchsaufbau der passiven Thermografie während der Schlagbeanspruchung . . . . .   | 86         |
| 7.2.2    | Auswertemethodik der passiven Thermografie . . . . .   | 87         |
| 7.2.3    | Versuchsaufbau der aktiven Thermografie vor und nach der Schlagbeanspruchung . . . . .   | 88         |
| 7.2.4    | Auswertemethodik der aktiven Thermografie . . . . .  | 88         |
| 7.2.5    | Referenzmessung mit Hilfe der Radiographie . . . . .   | 89         |
| 7.2.6    | Bestimmung der lateralen Defektgröße . . . . .   | 89         |
| 7.2.7    | Sonderfall: Bestimmung der lateralen Defektgröße bei Phasenbildern der passiven Thermografie . . . . .   | 91         |
| 7.3      | Ergebnisse und Diskussion . . . . .  | 93         |
| 7.3.1    | Quantifizierung anhand der Radiographie . . . . .  | 94         |
| 7.3.2    | Quantifizierung anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie . . . . .   | 94         |
| 7.3.3    | Quantifizierung anhand der Amplituden- und Phasenbilder der passiven Thermografie . . . . .  | 97         |
| 7.3.4    | Quantifizierung anhand der IR-Bilder der aktiven Thermografie . . . . .  | 103        |
| 7.3.5    | Quantifizierung anhand der Amplituden- und Phasenbilder der aktiven Thermografie . . . . .   | 104        |
| 7.4      | Gegenüberstellung der passiven und aktiven Thermografie . . . . .  | 106        |
| 7.5      | Zwischenfazit . . . . .  | 109        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung . . . . .</b>   | <b>111</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>  | <b>114</b> |
|          | <b>Abbildungsverzeichnis . . . . .</b>   | <b>129</b> |
|          | <b>Tabellenverzeichnis . . . . .</b>   | <b>137</b> |
|          | <b>Appendix . . . . .</b>  | <b>138</b> |
|          | <b>Publikationen und Konferenzbeiträge . . . . .</b>   | <b>153</b> |
|          | <b>Betreute studentische Arbeiten . . . . .</b>  | <b>155</b> |
|          | <b>Lebenslauf . . . . .</b>  | <b>156</b> |

## Kurzfassung

Der Einsatz kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) ist schon lange nicht mehr nur auf die Luft- und Raumfahrt begrenzt, sondern findet auch breite Anwendung in anderen Industriezweigen wie der Automobilbranche, der Sport- und Freizeitindustrie, der Medizintechnik und weiteren Branchen. Deswegen sind für diese Werkstoffe in der Produktion und in der Gebrauchsphase effiziente Prüfverfahren erforderlich. Die Akzeptanz der Industrie hinsichtlich eines Verfahrens zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ist im Wesentlichen von der Zuverlässigkeit und der Genauigkeit der quantitativen Angaben abhängig. Eine geeignete Methode zur Prüfung von Verbundwerkstoffen ist die Infrarot-Thermografie (IRT), eine optische und bildgebende Prüfmethode zur Erfassung der Oberflächentemperatur, die sich vor allem in den letzten Jahren stark weiterentwickelt hat. Aktuell verwendete Methoden zur zeitaufgelösten und lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten im Rahmen der IRT basieren auf der direkten Auswertung der aufgenommenen Infrarot-Bilder, was in Bezug auf die Empfindlichkeit gegenüber tieferliegenden Defekten und der Genauigkeit bei der Angabe der lateral Größe jedoch stark limitiert ist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der zeitaufgelösten und lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten in CFK unter Verwendung der passiven Thermografie während der Schädigungsentstehung sowie der aktiven Thermografie als unabhängige Inspektionsmethode. Das Potenzial der Quantifizierung anhand von Amplituden- und Phasenbildern der aktiven und passiven Thermografie wird mit den bekannten Methoden der Analyse der IR-Bilder verglichen. Hierfür werden drei voneinander unabhängige Anwendungsfälle verwendet: die aktive Thermografie zur ZfP an CFK Platten mit künstlichen Delaminationen in Form von Folien, die In-situ-Überwachung im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung unter Verwendung der passiven Thermografie und die Visualisierung von Impactschädigungen mit Hilfe der passiven und aktiven Thermografie. Die Genauigkeit der Quantifizierung ist vor allem von dem durch einen Defekt verursachten Kontrast abhängig, welcher durch die Auswertung der Amplituden- und Phasenbilder erheblich gesteigert wird. Die Angabe zur lateralen Defektgröße ist damit insgesamt genauer und ermöglicht auch die Quantifizierung tieferliegender Defekte. Auch die Beschreibung des Degradationsverhaltens kann durch Verwendung der Amplitudenbilder zuverlässiger umgesetzt werden, wobei Schädigungsereignisse im Rahmen der In-situ-Überwachung auch noch in der vierten Lage (in einer Tiefe von etwa 0,4 mm) visualisiert werden können. Bei der Visualisierung von Impactschädigungen kann sowohl die passive, als auch die aktive Thermografie verwendet werden, wobei die Auswertung der Amplituden- und Phasenbilder ebenso geeignet ist wie die der IR-Bilder.

## Abstract

The use of carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) is no longer limited to the aerospace industry, but is also widely common in other industries such as automotive, sports and leisure, medical technology and other markets. In this context, these materials require efficient testing technologies during production and during their service life. Industry acceptance of a non-destructive testing (NDT) method is largely dependent on the reliability and accuracy of quantitative data. A suitable method for testing composites is infrared thermography (IRT), an optical and imaging testing method for detecting surface temperature and which has undergone significant development, especially in recent years. Currently used methods for time-resolved and laterally spatially resolved quantification of defects in the context of IRT are based on direct evaluation of the acquired IR images, which is however significantly limited in sensitivity to deeper defects and accuracy in indicating lateral size.

The present work deals with time-resolved and laterally spatially resolved quantification of defects in CFRP using passive thermography during damage initiation and active thermography as an independent inspection method. The potential of quantification using amplitude and phase images of active and passive thermography is compared with known methods of analysis of IR images. Three independent use cases are used for this purpose: the active thermography for NDT on CFRP sheets with artificial delaminations in form of foils, the in-situ monitoring in the context of quasi-static tensile testing using passive thermography and visualization of impact damage using passive and active thermography. The accuracy of quantification depends mainly on the contrast caused by a defect, which is significantly increased by evaluating the amplitude and phase images. The information on lateral defect size is thus more accurate overall and also allows deeper defects to be quantified. The description of the degradation behavior can also be implemented more reliably by using the amplitude images, whereby damage events can still be visualized in the fourth layer (at a depth of about 0.4 mm) as part of in-situ monitoring. In the visualization of impact damage, both passive and active thermography can be used, with the evaluation of the amplitude and phase images being equally suitable as that of the IR images.

---

# Abkürzungsverzeichnis

## Abkürzungen (Teil 1)

---

| Abkürzung | Beschreibung  |
|-----------|---|
| 2D        | Zweidimensional   |
| 3D        | Dreidimensional   |
| AITM      | <i>engl.</i> Airbus Test Method   |
| ASTM      | <i>engl.</i> American Society for Testing and Materials                 |
| BVID      | <i>engl.</i> Barely-Visible Impact Damage                               |
| CNC       | <i>engl.</i> Computerized Numerical Control                             |
| DFT       | Diskrete Fourier-Transformation   |
| DIN       | Deutsches Institut für Normung  |
| DSC       | <i>engl.</i> Differential Scanning Calorimetry                          |
| EN        | Europäische Norm  |
| FEP       | Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer,<br>Fluorethylen-Propylen |
| FKV       | Faserkunststoffverbunde   |
| FFT       | <i>engl.</i> Fast Fourier-Transformation                                |
| FVG       | Faservolumengehalt  |
| FWHM      | <i>engl.</i> Full Width at Half Maximum                                 |
| HDF5      | <i>engl.</i> Hierarchical Data Format 5                                 |
| ISO       | <i>engl.</i> International Organization for Standardization             |
| IR        | Infrarot  |
| IRT       | Infrarot Thermografie   |
| IT        | Impulsthermografie  |
| L         | Links   |
| LIT       | Lock-In Thermografie  |
| LWIR      | <i>engl.</i> long-wavelength infrared, langes Infrarot                  |
| MD        | Multidirektional  |
| MWIR      | <i>engl.</i> mid wavelength infrared, mittleres Infrarot                |
| PPT       | Puls-Phasen Thermografie  |
| R         | Rechts  |
| RMS       | <i>engl.</i> Root Mean Square, Quadratisches Mittel                     |
| ROI       | <i>engl.</i> Region of Interest   |
| SNR       | <i>engl.</i> Signal-to-Noise Ratio                                      |
| SR        | <i>engl.</i> Sampling Rate, Aufnahmezeit                                |
| SWF       | Schwellwertfaktor   |

---

## Abkürzungen (Teil 2)

|     |                          |
|-----|--------------------------|
| UD  | Unidirektional           |
| ZfP | Zerstörungsfreie Prüfung |

## Lateinische Variablen (Teil 1)

| Zeichen                | Einheit                                   | Beschreibung   |
|------------------------|---|--|
| $a$                    | $\text{m}^2/\text{s}$                     | Temperaturleitfähigkeit                                    |
| $A$                    |   | Amplitude  |
| $A_u$                  | $\text{m}^2$                              | Übertragungsfläche   |
| $A_{def}$              | $\text{m}^2$                              | ermittelte Schädigungsfläche                               |
| $A_{real}$             | $\text{m}^2$                              | reale Schädigungsfläche                                    |
| $B$                    | $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$       | spektrale spezifische Ausstrahlung                         |
| $B_{real}$             | $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$       | spektrale spezifische Ausstrahlung eines realen Körpers    |
| $B_{schwarz}$          | $\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})$       | spektrale spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Körpers |
| $c_0$                  | $\text{m}/\text{s}$                       | Lichtgeschwindigkeit in Vakuum                             |
| $c_p$                  | $\text{J}/(\text{kg K})$                  | spezifische Wärmekapazität                                 |
| $d$                    | $\text{m}$                                | Defekttiefe  |
| $e$                    | $\text{J}/(\text{K m}^2 \sqrt{\text{s}})$ | Effusivität, Wärmeeindringkoeffizient                      |
| $f$                    | $\text{Hz}$                               | Frequenz   |
| $F$                    |   | Fouriertransformierte                                      |
| $h$                    | $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$          | Wärmeübergangskoeffizient                                  |
| $h_{Fall}$             | $\text{m}$                                | Fallhöhe   |
| $h_P$                  | $\text{J s}$                              | Planck'sche Wirkungsquantum                                |
| $k$                    | $\text{W}/(\text{m K})$                   | Wärmeleitfähigkeit   |
| $k_B$                  | $\text{J}/\text{K}$                       | Boltzmann'sche Konstante                                   |
| $m$                    |   | Index der Bildsequenz                                      |
| $N$                    |   | Länge des Auswertefensters                                 |
| $p$                    | $\text{bar}$                              | Autoklavendruck  |
| $S_{sig}$              |   | Signalbereich  |
| $\bar{S}_{sig}$        |   | Mittelwert im Signalbereich                                |
| $S_{ref}$              |   | Referenzbereich  |
| $\bar{S}_{ref}$        |   | Mittelwert im Referenzbereich                              |
| $S_{ref\_polynom}$     |   | Referenzbereich für Polynombildung                         |
| $S_{ref\_schwellwert}$ |   | Referenzbereich für Schwellwertermittlung                  |

## Lateinische Variablen (Teil 2)

| Zeichen                      | Einheit          | Beschreibung  |
|------------------------------|------------------|---|
| $\bar{S}_{ref\_schwellwert}$ |                  | Mittelwert im Referenzbereich für Schwellwertermittlung |
| $t$                          | s                | Zeit  |
| $t_0$                        | s                | Zeitverschiebung zwischen Blitzimpuls und Auswertung    |
| $t_{def}$                    | s                | Zeitpunkt des initialen Schädigung                      |
| $t_s$                        | s                | Startzeitpunkt  |
| $t_e$                        | s                | Endzeitpunkt  |
| $T$                          | K, °C            | Temperatur  |
| $T_0$                        | K, °C            | Anfangstemperatur                                       |
| $T_c$                        | K, °C            | Temperaturkontrast                                      |
| $T_W$                        | K, °C            | Temperatur des Festkörpers                              |
| $T_F$                        | K, °C            | Temperatur des Fluides                                  |
| $u$                          |                  | Frequenzinkrement                                       |
| $w$                          | m                | laterale Defektgröße                                    |
| $\dot{q}_W$                  | W/m <sup>2</sup> | Wärmestromdichte  |
| $Q$                          | J                | Wärme   |
| $\dot{Q}$                    | W                | Wärmestrom  |
| $\dot{Q}_A$                  | W                | absorbierter Wärmestrom                                 |
| $\dot{Q}_E$                  | W                | emittierter Wärmestrom                                  |
| $\dot{Q}_R$                  | W                | reflektierter Wärmestrom                                |
| $\dot{Q}_T$                  | W                | transmittierter Wärmestrom                              |
| $z$                          | m                | Entfernung  |



---

**Griechische Variablen**

---

| Zeichen        | Einheit           | Beschreibung                          |
|----------------|-------------------|---------------------------------------|
| $\alpha_A$     |                   | Absorptionsgrad                       |
| $\Delta$       |                   | Differenz                             |
| $\varepsilon$  |                   | Emissionsgrad                         |
| $\lambda$      | m                 | Wellenlänge                           |
| $\mu$          | m                 | thermische Eindringtiefe              |
| $\nu$          | m/s               | Ausbreitungsgeschwindigkeit           |
| $\rho_R$       |                   | Reflexionsgrad                        |
| $\rho$         | g/cm <sup>3</sup> | Dichte                                |
| $\rho_R$       |                   | Reflexionsgrad                        |
| $\sigma_{ref}$ |                   | Standardabweichung im Referenzbereich |
| $\tau_T$       |                   | Transmissionsgrad                     |
| $\varphi$      | rad               | Phase                                 |
| $\omega$       | 1/s               | Kreisfrequenz                         |

---



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Motivation

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) haben sich in den letzten Jahren zu einem der beliebtesten Leichtbaumaterialien entwickelt und werden in vielen Industriezweigen, wie z.B. der Luft- und Raumfahrt, dem Transportwesen, der erneuerbaren Energie und der Sportausrüstung eingesetzt [1, 2]. Das hohe Leichtbaupotenzial dieses Werkstoff ist vor allem auf die hohe Festigkeit und Steifigkeit in Kombination mit relativer geringer Dichte zurückzuführen, welche insbesondere durch die geschickte Ausnutzung der Anisotropie des Werkstoffs realisiert wird [2]. Allerdings weist dieser Werkstoff ein komplexes Schädigungs- und Versagensverhalten auf und ist vor allem gegenüber Schlagbeanspruchung sensibel [3]. Aufgrund dessen sind zuverlässige zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP) erforderlich, welche eine hinreichende Fehlerfreiheit von Bauteilen und Strukturen aus CFK sowohl im Rahmen der Produktherstellung als auch im Rahmen von Inspektionen gewährleisten können [4]. Eine bildgebende und zuverlässige Methode ist die Infrarot-Thermografie (IRT), die auf der Erfassung der Oberflächentemperatur basiert und im Rahmen der industriellen ZfP seit etwa 1950 bzw. 1960 Anwendung findet [4]. Im Vergleich zur üblicherweise eingesetzten Ultraschallprüfung ist bei der Thermografie kein Koppelmedium erforderlich und eine kontaktlose, schnelle und großflächige Erfassung der Oberflächentemperatur möglich [5]. Aus dieser kann wiederum auf die Beschaffenheit der untersuchten Struktur geschlossen werden. Die Interpretation der Messdaten und die Bestimmung der Defekteigenschaften ist aber vor allem bei tieferen Defekten schwierig, weshalb es notwendig ist vorhandene Methoden zur Quantifizierung zu verbessern und die Tiefenreichweite zu erhöhen, bspw. durch Verwendung der Amplituden- und Phasenbilder.

Die IRT kann sowohl passiv, bspw. im Rahmen der In-situ-Überwachung, als auch aktiv unter Verwendung externer Wärmequellen eingesetzt werden [6]. Dabei ist die qualitative Identifizierung von Defekten oft nicht mehr ausreichend. Stattdessen ist es immer öfter erforderlich, die vorliegenden Defekte zu quantifizieren und die Charakteristika, wie laterale Ausdehnung und Defekttiefe, anzugeben. Darauf aufbauend kann schließlich entschieden werden, ob eine weitere Verwendung des Bauteils möglich ist oder ob eine notwendige Reparatur durchgeführt werden muss, wie es bspw. die Airbus-Spezifikation AITM 6-0011 vorsieht [7]. Aber nicht nur die lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigung, sondern auch die zeitliche Beschreibung der Schädigungsentstehung und -fortschreitung ist zur Ausnutzung des vollen Potenzials des Materials im Rahmen der Materialcharakterisierung und -entwicklung von besonderem Interesse [3]. Die Akzeptanz der Industrie hinsichtlich angewandter ZfP-Verfahren hängt im Wesentlichen von der Zuverlässigkeit und der Genauigkeit

der quantitativen Angaben ab, weshalb diesbezüglich eine stetige Verbesserung notwendig ist [8].

Aktuelle Methoden zur zeitaufgelösten und lateral orts aufgelösten Quantifizierung basieren auf der direkten Verwendung der IR-Bilder, was sowohl hinsichtlich Tiefe als auch Genauigkeit stark limitiert ist. Dabei bietet die Auswertung und Quantifizierung anhand von Amplituden- und Phasenbildern die Möglichkeit, Schädigungsbereiche mit höherem Kontrast und höherer Zuverlässigkeit zu quantifizieren. Es muss allerdings die Wahl der richtigen Auswerteparameter berücksichtigt werden, und der zugrundeliegende Messfehler muss dem Anwender bekannt sein. Insbesondere bei der Verwendung von CFK aus Endlosfasern können durch die starke Anisotropie an dieser Stelle größere Abweichungen entstehen, die womöglich zu Fehlinterpretationen führen können. In der Literatur ist zur Quantifizierung von Verbundwerkstoffen anhand der Amplituden- und Phasenbilder nur wenig zu finden.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Darstellung und Erweiterung des Potentials der passiven und aktiven Thermografie zur lateral orts aufgelösten und zeitaufgelösten Quantifizierung von Defekten in kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen anhand von IR-Bildern, Amplituden- und Phasenbildern. Hierzu wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik zur Quantifizierung der Amplituden- und Phasenbilder der passiven und aktiven Thermografie ausgearbeitet und der Einfluss der Mess- und Auswerteparameter untersucht. Zudem wird, wo immer es möglich ist, der zugrunde liegende Messfehler diskutiert. Zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung werden dabei zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: die aus der Literatur bekannte *engl.* Full Width at Half Maximum Methode und eine auf einem Schwellwert basierende Methode. Neben der Quantifizierung künstlicher Delaminationen, welche durch die Einarbeitung dünner Folien mit genau definierten Maßen hergestellt werden, erfolgt die Quantifizierung auch an realen Schädigungen nach Schlagbeanspruchung während der Entstehung und im Rahmen der ZfP. Darüber hinaus wird die passive Thermografie zur Detektion von Zwischenfaser- und Faserbrüchen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung verwendet und das Degradationsverhalten beschrieben und diskutiert. Bei allen Versuchen erfolgt die Quantifizierung sowohl anhand der IR-Bilder, sowie der Amplituden- und Phasenbilder.

## 1.2 Begriffsdefinition

In diesem Kapitel werden die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Begriffe vorgestellt und auf die Stellen in der Arbeit sowie auf weiterführende Literatur verwiesen. Dieses Unterkapitel ist bewusst schlank gehalten und dient vor allem zum Nachschlagen der Begriffe.

### Faserkunststoffverbunde

Bei Faserkunststoffverbunden handelt es sich um einen Werkstoff aus mindestens zwei Komponenten: einer Kunststoffmatrix und darin eingebetteten Fasern [2]. Weitere Informationen sind in Kapitel 2.1 zu finden.

### Defekte

Bei einem Defekt handelt es sich nach [4] um eine Unstetigkeit des Bauteils, die aufgrund ihrer Form, Größe, Ausrichtung oder Lage die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils beeinträchtigt. Es kann zwischen herstellungsbedingten und nutzungsbedingten Defekten unterschieden werden [9]. Weitere Informationen sind in Kapitel 2.1.2 zu finden.

### Schädigungen

Schädigungen sind nutzungsbedingte Defekte, die nicht von Beginn an vorhanden sind und erst während der Nutzung durch lokale Überbeanspruchung oder durch Einwirkung von außen entstehen [9]. Auch bei Schädigungen handelt es sich um Unstetigkeiten im Bauteil, sodass sie als Defekte zu interpretieren sind [9]. Beispiele hierzu sind in Kapitel 2.1.2 zu finden.

### Passive Thermografie

Bei der Thermografie handelt es sich um die Messung der Oberflächentemperatur mit Hilfe einer IR-Kamera. Dabei wird nach DIN EN 16714-1 im Rahmen der passiven Thermografie nur der Wärmefluss, der im Prüfobjekt ohnehin vorhanden ist, verwendet. Eine externe Anregungsquelle wird nicht eingesetzt. Weitere Informationen sind in Kapitel 2.3 zu finden.

### Aktive Thermografie

Im Gegensatz zur passiven Thermografie wird bei der aktiven Thermografie zum Zwecke der Prüfung ein instationärer Wärmefluss im Prüfobjekt erzeugt [10]. Nach DIN EN 16714-1 wird dazu eine externe Energiequelle verwendet, die periodisch, einmalig oder dauerhaft das Prüfobjekt anregt. Näheres ist in Kapitel 2.4 zu finden.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen zu Faserkunststoffverbunden (FKV) und möglichen Schädigungsarten vorgestellt. Anschließend wird die Thermografie von anderen Methoden der zerstörungsfreien Prüfung abgegrenzt und deren physikalische Grundlagen beschrieben. Danach werden passive und aktive Thermografieverfahren sowie mögliche Auswertemethoden präsentiert. Dabei steht die im weiteren Verlauf der Arbeit eingesetzte Puls-Phasen-Thermografie im Vordergrund. Zuletzt werden die Möglichkeiten zur Quantifizierung von Defekten im Ort und in der Zeit vorgestellt und darauf aufbauend die Forschungsfragen dieser Arbeit abgeleitet.

### 2.1 Faserkunststoffverbunde

FKV bestehen aus mindestens zwei Komponenten: einer Matrix und darin eingebetteten Fasern. Die Fasern übertragen aufgrund ihrer hohen Festigkeit und Steifigkeit die Lasten und dienen in dem Werkstoffverbund als Verstärkungskomponente [2]. Hierbei können die Fasern als gerichtete Endlosfaser oder als mehr oder weniger regellos angeordnete Lang- oder Kurzfasern verwendet werden. Üblich ist die Verwendung von Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern, Naturfasern, Polyethylenfasern und Metallfasern [2]. Die Matrix sorgt dafür, dass die Fasern an den gewollten Positionen fixiert werden und ist damit für die Formgebung des Bauteils verantwortlich. Zudem schützt sie die Faser vor äußeren Einflüssen. Als Matrixsystem kann zwischen duroplastischen und thermoplastischen Matrixsystemen unterschieden werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Herstellverfahren einzelner Komponenten von Verbundwerkstoffen bietet [2]. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Betrachtung von kohlenstofffaserverstärkten Duroplasten aus Endlosfasern. Es handelt sich hierbei um eine der für die Industrie relevantesten Kombinationen, die gleichzeitig die Qualitätssicherung bzw. die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) aufgrund ihrer stark anisotropen Materialeigenschaften vor große Herausforderungen stellt.

Für die Herstellung von FKV gibt es unterschiedliche Verfahren, die sich je nach Anforderung und Geometrie des Bauteils unterscheiden. Es können bspw. das Pultrusionsverfahren, Wickelverfahren, Harzinjektionsverfahren, Pressverfahren oder die Autoklaventechnik eingesetzt werden [2, 3]. Letztere ermöglicht die Fertigung von Bauteilen mit nahezu beliebiger Geometrie in höchster Qualität, weshalb dieses bereits seit dem Jahr 1900 verfügbare Verfahren auch heute noch breite Anwendung findet und im Rahmen dieser Arbeit zur Herstellung von Proben verwendet wird [2].

### 2.1.1 Eigenschaften anisotroper Faserkunststoffverbunde

Bei endlosfaserverstärkten FKV handelt es sich um einen anisotropen und stark inhomogenen Werkstoff. Die Anisotropie ist zurückzuführen auf die Faser an sich, die in Faserrichtung komplett unterschiedliche Eigenschaften aufweist als quer dazu. Die gezielte Ausnutzung der anisotropen Eigenschaften ermöglicht hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei vergleichsweise geringer Dichte, weshalb FKV vor allem als Leichtbauwerkstoff eingesetzt werden. Weitere Vorzüge sind die hohe Flexibilität und der hohe Grad der Funktionsintegration [2]. Darüber hinaus weisen FKV auch einige nachteilige Eigenschaften auf, wie z.B. hohe Empfindlichkeit gegenüber Stoßbelastungen sowie der Umstand, dass die guten Materialeigenschaften des Werkstoffs im Wesentlichen von einer fehlerfreien Mikrostruktur abhängen. Defekte innerhalb des Materials, die aufgrund von Fehlern in der Produktion, falschem Handling im Betrieb oder Alterung entstehen, sind von außen oft nicht sichtbar, können aber zu fatalem Versagensverhalten führen [3]. Aus diesem Grund sind vollständige Prüfungen im Rahmen der Qualitätskontrolle und regelmäßige Inspektionen während der Nutzung erforderlich.

Bei der zerstörungsfreien Prüfung mit Infrarot-Thermografie (IRT) sind neben der Dichte die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitung von besonderem Interesse. Die spezifische Wärmekapazität beschreibt die Fähigkeit eines Materials, thermische Energie zu speichern und weist keine Richtungsabhängigkeit auf. Sie ist temperaturabhängig und kann mit Hilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (*engl.* Differential Scanning Calorimetry) bestimmt werden [11]. Die Wärmeleitung hingegen ist richtungsabhängig und basiert auf der gegenseitigen Beeinflussung benachbarter und in Kontakt stehender Moleküle [12]. Die pro Zeiteinheit übertragene Wärmemenge wird auch als Wärmestrom  $\dot{Q}$  bezeichnet und ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit  $k$ , dem Temperaturunterschied  $\Delta T$ , der Übertragungsfläche  $A_u$  sowie der Entfernung  $\Delta z$  und lässt sich nach dem Gesetz von Fourier durch

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = k \cdot A_u \cdot \frac{\Delta T}{\Delta z} \quad (2.1)$$

beschreiben [12].

Die Wärmeleitfähigkeit  $k$  ist nur im isotropen Fall ein Skalar und bildet im anisotropen Fall, wie z.B. bei FKV aus Endlosfasern, einen Tensor [13]. Dabei handelt es sich um eine temperaturabhängige und bei Flüssigkeiten und Gasen zusätzlich druckabhängige Materialkonstante, die beschreibt wie **gut** ein Material Wärme leiten kann [13]. Das Verhältnis der Wärmeleitfähigkeit  $k$  zu Dichte  $\rho$  und spezifischer Wärmekapazität  $c_p$  wird als Temperaturleitfähigkeit

$$a = \frac{k}{c_p \cdot \rho} \quad (2.2)$$

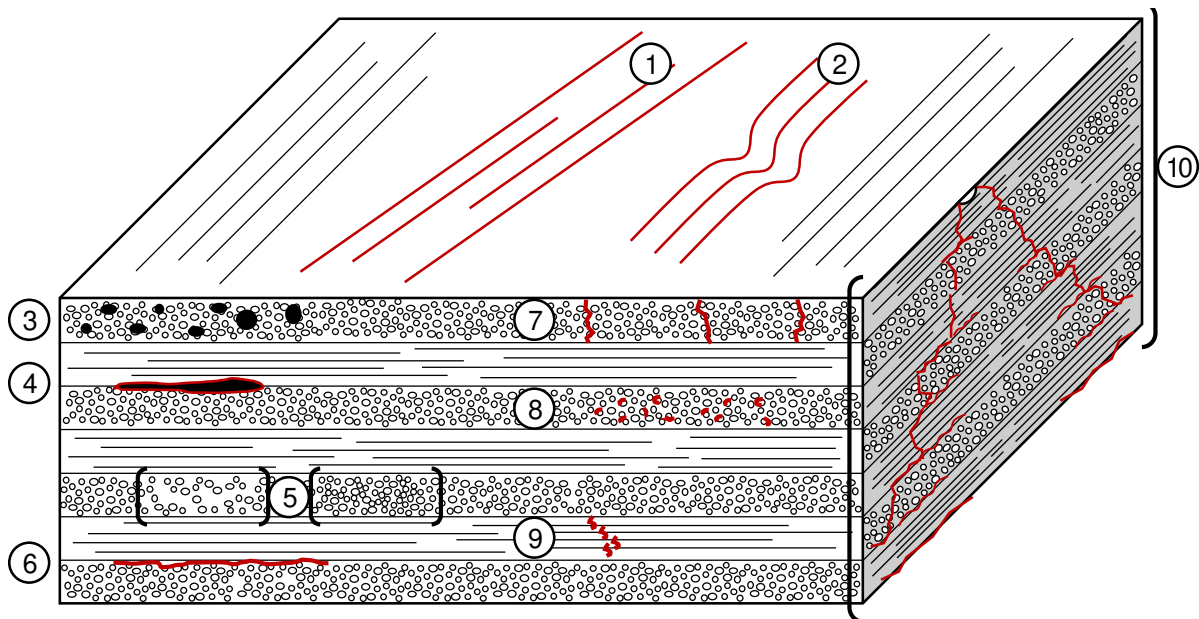
bezeichnet und ist ein Maß dafür, wie **schnell** sich die Temperatur innerhalb des Körpers ausbreitet [13, 14]. Bei der Prüfung von FKV unter Verwendung thermischer Methoden ist daher vor allem im instationären Fall die Temperaturleitfähigkeit, die allerdings von der Wärmeleitfähigkeit abhängt, von besonderem Interesse.

Der Transport der Wärmeenergie erfolgt bei Kunststoffen durch Schwingungen der Kettenmoleküle [15]. Im Vergleich zu Metallen, bei denen vor allem die freien Elektronen für den Energietransport verantwortlich sind [15], geschieht dies sehr langsam [16], weshalb Kunststoffe im Vergleich zu Metallen als gute Isolatoren einzuordnen sind [17]. Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit ist ein ausführlich behandeltes Themenfeld. Dabei ist die Bestimmung der lateralen Wärmeleitfähigkeit bzw. der Temperaturleitfähigkeit keineswegs trivial. Man unterscheidet zwischen stationären und instationären Methoden [18], die wiederum in Zeitbereichs- und Frequenzbereichsmethoden unterschieden werden können [19]. Die Bestimmung kann für isotrope Werkstoffe verschiedener Dicken durchgeführt werden. Dabei werden die Probengrößen in der Regel an den Versuchsaufbau angepasst und zur Vermeidung von lateralen Wärmeflüssen über die gesamte Fläche erwärmt. Im Gegensatz dazu erfolgt bei anisotropen und inhomogenen FKV stets ein lateraler Wärmefluss, sodass die Messungen bereits bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in Dickenrichtung lokal variieren können. Noch schwieriger wird die Bestimmung der lateralen Wärmeleitfähigkeit, da sich die Größe der hierfür verwendeten Proben an der maximalen Dicke des Prüfobjektes orientiert. Ansätze zur Berücksichtigung kleiner Probengrößen sind bspw. in [20] zu finden.

### **2.1.2 Defekte in Faserkunststoffverbunden**

Defekte sind nach [4] Unstetigkeiten des Bauteils, die aufgrund ihrer Form, Größe, Ausrichtung oder Lage die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils beeinträchtigen. Dabei kann es sich bei der Unstetigkeit um eine im Bauteil vorliegende Inhomogenität (herstellungsbedingt) oder um eine herbeigeführte Beschädigung mit inneren und/oder äußeren Schädigungen bzw. Schaden handeln (nutzungsbedingt) [9]. Je nach Art und Größe können diese einen Einfluss auf die Festigkeit von FKV haben und müssen daher zuverlässig detektiert werden können. Eine Auswahl typischer Defekte in FKV ist in Abbildung 2.1 anhand eines (0/90) Laminataufbaus dargestellt. Defekte in FKV können sich sowohl in ihrer Dimension und Ausprägung als auch in ihrer Detektierbarkeit unterscheiden. Dies ist u.a. abhängig vom Material, dem Lagenaufbau und der Dimension des Bauteils. Eine Übersicht über diese und weitere Schädigungsarten inklusive detaillierter Auflistung und Beschreibung ist zu finden in [9, 21].





### Herstellungsbedingte Defekte

1. Faserfehlausrichtung
2. Ondulation
3. Hohlräume und Porosität
4. Einschluss von Fremdkörpern
5. Abweichender Faservolumengehalt
6. Delamination

### Nutzungsbedingte Defekte

7. Zwischenfaserbrüche
8. Faser-Matrix-Ablösungen
9. Faserbrüche
10. Impactschädigung

Abb. 2.1: Auswahl herstellungs- und nutzungsbedingter Defekttypen in FKV am Beispiel eines (0/90) Laminates. In Anlehnung an [4, 22].

### Herstellungsbedingte Defekte

Bedingt durch den komplexen Herstellungsprozess von FKV können ungewollte Defekte eingebracht werden, wie z.B. Hohlräume und Porosität, Lagen- und Faserfehlausrichtung, Ondulationen, Einschluss von Fremdkörpern, abweichender Faservolumengehalt und Delaminationen, die beim Aushärten und Entformen des Bauteils entstehen können [2, 3, 7].

**Hohlräume und Poren** sind die häufigsten und kritischsten herstellungsbedingten Defekte bei FKV, da sie einen großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Materials haben können [9]. Bei Poren handelt sich um kleine Einschlüsse von Luft, die im Rahmen der Materialherstellung durch falsche oder nicht optimale Prozessparameter, wie z.B. Dauer, Temperatur, Druck oder mangelhaftes Vakuum [9], durch ausgasende Harzkomponenten, durch Hohlraumbildung während der Konsolidierung oder durch unvollständige Infiltrierung entstehen [21]. Dabei häufen sich kleinere Poren vor allem rund um die Faser an [23]. Größere Hohlräume hingegen entstehen u.a. bei zu geringen Verarbeitungsdrücken [23]. Aufgrund ihrer Relevanz müssen sie von den eingesetzten ZfP Methoden zuverlässig gefunden werden können.

Eine weitere kritische Defektart sind eingebrachte **Fremdkörper oder Einschlüsse** [4]. Als Beispiel können Reste von Folien, Abreißgewebe, Fusseln, Autoklavendichtmaterial oder manuell eingetragener Schmutz genannt werden. In Abhängigkeit von ihrer Größe und Position können diese bereits bei einer üblichen Belastung des Bauteils zu Delaminationen führen [4]. Fremdkörper und Einschlüsse, die eine gewisse Mindestgröße übersteigen, müssen daher im Rahmen der ZfP detektiert werden können.

Bei **Delaminationen** handelt es sich um eine Ablösung von mindestens zwei Schichten, wobei sich in der Zwischenschicht nach erfolgter Delamination in der Regel Luft befindet [4, 24]. Verursacht werden sie unter anderem durch Dehnung einzelner Schichten während einer plastischen Verformung. Als Initiator können kleinere Risse oder Einschlüsse dienen. Delaminationen können zu einer erheblichen Verringerung der Steifigkeit und Festigkeit von FKV-Laminaten führen und – sofern die Bauteilauslegung dafür nicht schadenstolerant genug ist – bei weiterer Belastung des Bauteils wachsen [21, 23], womit sie zu den kritischsten Defektarten gehören. Die Detektion von Delaminationen ist eine wichtige Anforderung an ein zuverlässiges ZfP Verfahren.

Weitere herstellungsbedingte Defekte sind die Lagen- und Faserfehlausrichtung, die Ondulation und der abweichende Faservolumengehalt. Sie werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Auch die Berechnung und Abschätzung der aus den Defekten resultierenden Folgen auf die Eigenschaften der FKV und der damit verbundenen Weiterverwendung der Bauteile (auch bekannt als *engl.* effects of defects) ist nicht Teil dieser Arbeit. Weiterführende Untersuchungen hierzu sind u.a. in [25–27] zu finden.

### **Nutzungsbedingte Defekte**

Nutzungsbedingte Defekte entstehen erst während der Nutzung durch lokale Überbeanspruchung oder durch Einwirkung von außen [28]. Sie sind nicht von Beginn an vorhanden und werden erst durch die Nutzung im Rahmen einer Beschädigung des Bauteils eingebracht, weshalb diese Art von Defekten auch als Schädigung oder Schaden interpretiert werden kann. Da es sich auch dabei um eine Unstetigkeit im Material handelt, die sich auf die Gebrauchstauglichkeit des Bauteils auswirken kann, sind sie ebenfalls als Defekte zu verstehen [4]. Die Schädigungsmechanismen, welche für die Initiierung der Schädigungsenstehung verantwortlich sind, hängen von den Umgebungsbedingungen und der Empfindlichkeit des verwendeten Materials ab [28]. Zu den Schädigungsmechanismen gehören u.a. statische Überlastung, Schlagbeanspruchung, Ermüdung, hygrothermische Effekte, Überhitzung, Blitzschlag

und Kriechen. Diese können in FKV zu Faser-Matrix-Ablösungen, Zwischenfaser- und Faserbrüchen, Delaminationen sowie Eindringen von Feuchtigkeit führen [9].

Häufig werden innere nutzungsbedingte Schädigungen an FKV durch **Schlagbeanspruchung** (*engl.* Impact) verursacht. Der von außen herbeigeführte Schlag führt zu elastischen und plastischen Verformungen, wobei infolge der Überbeanspruchung der Einzellagen eine Kombination aus Faser-Matrix-Ablösungen, Zwischenfaser- und Faserbrüchen und Delaminationen zu finden ist [29]. Es wird zwischen einer Schlagbeanspruchung mit niedriger und hoher Geschwindigkeit unterschieden (*engl.* low velocity impact und *engl.* high velocity impact) [29]. In vielen Fällen führt die Schlagbeanspruchung zu von außen sichtbaren Schädigungen, die bereits im Rahmen der Sichtprüfung zu erkennen sind. Im Falle kleinerer Schlagbeanspruchungen kann es allerdings zu inneren Schädigungen kommen, ohne dass diese von außen sichtbar werden [7]. Allerdings beeinflussen auch diese die Restfestigkeit und verkürzen die Lebensdauer des Werkstoffs [29]. Die Grenzen der gerade so sichtbaren Schädigungen ist als BVID (*engl.* Barely-Visible Impact Damage) definiert [9]. Eine detaillierte Übersicht über das Versagen von FKV wird unter anderem in [3, 9, 30] gegeben. Eine gute Übersicht zur Bruchmechanik und möglichen Versagensarten liefert [31].

Bei **Zwischenfaser- und Faserbrüchen** handelt es sich um Risse in der Matrix bzw. in der Faser. Bei Rissen handelt es sich nach [4] um eine Unterbrechung der Kontinuität im Material in Form einer schmalen flächigen Trennung. Sie breiten sich fast immer ausgehend von lokalen Fehlstellen aus und wachsen bei Überbeanspruchung [3]. Anders als in spröden Werkstoffen, wie z.B. Glasscheiben, wird der Riss in einem FKV an Fasergrenzen gestoppt und die Last auf umliegendes Material z.B. Fasern umverteilt [3]. Neben den Zwischenfaserbrüchen (Risse in der Matrix) und Faserbrüchen (Risse in der Faser) können sich **Faser-Matrix-Ablösungen** bilden, welche als Risse in der Grenzzone von Faser und Matrix zu verstehen sind [3]. Risse sind in der Regel eher klein und lokal, können aber bei Vorhandensein einer Schubspannung als Initiator für eine Delamination dienen [30].

***Zwischenfazit:*** *Die laterale Ausdehnung innerer Defekte in FKV ist von außen oft nicht sichtbar, hat aber einen wesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Struktur. Daher ist es erforderlich, diese Defekte zu detektieren und deren laterale Ausdehnung und Position anzugeben.*

### 2.1.3 Herstellung realer und realitätsnaher Defekte

Zur Validierung der eingesetzten ZfP Methoden ist es erforderlich, Versuchsprobekörper mit geeigneten Defekten zu versehen, die möglichst realitätsnah sind, sich zur Validierung der ZfP Methoden eignen und deren Größe sowie Position genau bekannt ist. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Potenzial der passiven und aktiven Thermografie gezeigt werden, weshalb nachfolgend der Fokus auf die dafür relevanten Defekte gelegt wird. Während die passive Thermografie eingesetzt wird, um Schädigungen bei ihrer Entstehung zu detektieren und zu beschreiben, bspw. bei der Entstehung von Zwischenfaserbrüchen, wird die aktive Thermografie zur Detektion bereits vorhandener Defekte, bspw. Delaminationen, eingesetzt. Nachfolgend werden die Möglichkeiten zur Herstellung der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Defekttypen Delaminationen, Zwischenfaserbrüche und Faserbrüche sowie Impactschädigungen beschrieben.

#### Delaminationen

Ein oft verwendeter Ansatz zur Herstellung exakt definierter Delaminationen ist die Einarbeitung von Flachbodenbohrungen (*engl.* flat bottom holes) mit definierter Restwandstärke auf der Rückseite des Prüfkörpers. Die Herstellung ist einfach und die reale Größe als auch Tiefe der künstlichen Delamination kann exakt vermessen werden. Allerdings ist diese Methode wegen der offenen Geometrie des Defektes nur bedingt als künstliche Delamination im Rahmen der Thermografieprüfung geeignet, da der Wärmefluss von der Realität abweicht und anders als bei der realen Schädigung nicht um den Defekt herum fließen kann [32]. Dies führt wiederum zu einem höheren *engl.* Signal-to-Noise Ratio (SNR) als das bei einer realen Delamination der Fall ist [33], weshalb die Eignung dieses Verfahrens kritisch zu hinterfragen ist [34]. Durch Verschließen der offenen Flachbodenbohrung mit einem entsprechenden Gegenstück kann dieser Ansatz verbessert werden [35]. Damit wird zwar der dreidimensionale Wärmefluss ermöglicht, allerdings bringt der Verbindungsbereich beider Gegenstücke eine bei realen Defekten nicht existierende Grenzfläche mit sich, die im Rahmen der ZfP berücksichtigt werden muss. Eine der am häufigsten verwendeten Methoden ist die Einbringung von Folien im Rahmen der Herstellung. Aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften sind Folien schwieriger zu detektieren als Luft, weshalb sie als künstliche Nachbildung einer sich lateral ausdehnenden Delamination verwendet werden können [24]. Zugleich eignet sich diese Methode zur Nachbildung von im Laminat eingeschlossene Fremdkörper, wobei davon auszugehen ist, dass die Unterschiede der thermischen Eigenschaften des Grundmaterials zu den materiellen Einschlüssen, z.B. Folienresten, Insekten oder Spänen der verarbeitenden Maschine, ähnlich oder größer sind als die der verwendeten Folien.

### **Zwischenfaserbrüche und Faserbrüche**

Die Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen und Faserbrüchen kann am einfachsten im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung realisiert werden, wie etwa in [36] gezeigt. In der Literatur werden darüber hinaus auch Einkerbungen verwendet, die als Initiator für einen Riss dienen [37]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Variation der Probengeometrie, wobei durch eine Verjüngung der Probe die Schädigung vor allem in dem Bereich des minimalen Querschnittes stattfinden soll [38] und u.a. in [39] verwendet wird. Kombiniert mit einer geschickten Wahl des Lagenaufbaus können die Bereiche der Schädigung exakt vorgegeben werden. Diese Art der Schädigungsnachbildung ist sehr nah an der realen Schädigung im finalen Bauteil, mit Ausnahme der offenen Kanten und der unter Umständen notwendigen Modifikation des Lagenaufbaus.

### **Impactschädigungen**

Eine Möglichkeit zur Herstellung nahezu realer Schädigungen ist die definierte Schlagbeanspruchung von außen, bspw. unter Verwendung eines Pendelschlagwerkes (Charpy Schlagprüfung nach ISO 179-1 bzw. ASTM D 6110) oder eines Fallturms (angelehnt an DIN 65561:1991-05). Dabei kann die Impactenergie und die Position der Schädigung exakt eingestellt werden. Bis auf wenige Abweichungen, wie etwa die Geometrie der Probe und des Impactors, dem Spannungszustand der Probe sowie den klimatischen Rahmenbedingungen bei der Durchführung der Versuche, entspricht die somit verursachte Schädigung am ehesten einer realen Schädigung infolge einer Schlagbeanspruchung im Betrieb. Nachteilig ist bei dieser Methode die Überlagerung mehrerer Schädigungsmechanismen (Zwischenfaserbrüche, Fasermatrixablösungen, Faserbrüche und Delaminationen) und die nahezu unkontrollierbare Ausbreitung der Schädigung in mehreren Lagen des FKV. Eine Beschreibung der Schädigungsentstehung und -fortpflanzung infolge einer Schlagbeanspruchung ist in [29] zu finden.

***Zwischenfazit:*** Die Beschaffenheit von FKV bietet von sich aus die Möglichkeit zur gezielten Einbringung realer und realitätsnaher Defekte. Künstliche Delaminationen können durch die Einarbeitung von Folien realisiert werden. Zwischenfaser- und Faserbrüche entstehen im Rahmen der quasi-statischen Belastung. Reale Impactschädigungen durch gezielte Schlagbeanspruchung können am Fallturm erzeugt werden.

## 2.2 Thermografie als Methode der zerstörungsfreien Prüfung

### 2.2.1 Definition der zerstörungsfreien Prüfung

Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) (*engl.* Non Destructive Testing) ist definiert als eine Untersuchung, eine Prüfung oder eine Bewertung, die an einem beliebigen Objekt durchgeführt werden kann, ohne dieses Objekt in irgendeiner Weise zu verändern oder zu modifizieren, mit dem Ziel der Detektion von Zuständen oder Diskontinuitäten, die sich auf die Verwendbarkeit oder Gebrauchstauglichkeit des Objekts auswirken können [4]. Der Fokus der ZfP liegt auf der Untersuchung und Überprüfung der inneren Integrität noch zu verwendender Bauteile und Strukturen [4].

Das Gegenteil der ZfP ist die zerstörende Prüfung. Dabei wird die Probe während der Versuchsdurchführung verändert oder sogar zerstört und kann anschließend nicht mehr verwendet werden [4]. Diese Art der Prüfung dient der Bestimmung chemischer, mechanischer und physikalischer Eigenschaften von Materialien, z.B. der Festigkeit. Auch im Rahmen der zerstörenden Prüfung kann der Einsatz zerstörungsfreier Prüfmethoden sinnvoll sein, bspw. um das Degradationsverhalten von Werkstoffen zu untersuchen. Man spricht dann von In-situ-Überwachung [40]. Die meisten eingesetzten Prüfmethoden funktionieren absolut passiv, d.h. ohne Einbringung zusätzlicher Energie und ohne Auswirkungen auf die zu prüfende Probe.

Eine wichtige Anforderung an ein ZfP-Verfahren ist es, fehlerhafte Bereiche mit einer definierten Mindestgröße im Bauteil zuverlässig zu erkennen [4]. Um eine Entscheidungen über die weitere Verwendung des Bauteils treffen zu können, ist es zudem erforderlich, die Größe und Position der gefundenen Schädigung genau zu bestimmen, wobei nicht nur der gesamte Fehlerbereich von Interesse ist, sondern auch seine Form (z.B. rund, quadratisch), seine Abmessungen (Durchmesser, Länge, Breite) und seine Position darüber entscheiden, ob das Bauteil repariert werden muss oder ob eine sichere Weiterverwendung noch gewährleistet ist.

Die ZfP soll auf der einen Seite zuverlässige und möglichst genaue Ergebnisse liefern, auf der anderen Seite soll sie schnell und kostengünstig sein. Dabei hängt der mit der ZfP verbundene Aufwand von der gewählten Prüfmethode und dem gewünschten Detaillierungsgrad ab, wobei derzeit die bloße Detektion von Defekten mit wenig Aufwand, die Quantifizierung nach der in dieser Arbeit verwendeten Definition mit mittlerem bis großem Aufwand und die finale Bewertung des Schadenseinflusses nur mit viel Aufwand zu realisieren sind [12]. Aufwand, Kosten und Detaillierungsgrad können jedoch durch die Kombination mehrerer sukzessiv, simultan oder nach Bedarf eskalierend eingesetzter Verfahren verbessert werden. Hierzu kann die Thermografie

einen Beitrag leisten.

Eine berührungslose und bildgebende Technik zur ZfP ist die Infrarot-Thermografie (IRT), die auf der Analyse der Oberflächentemperatur des zu inspizierenden Objekts basiert. Nachfolgend werden zunächst die Grundlagen der IRT vorgestellt und anschließend die IRT gegenüber anderen Methoden der ZfP abgegrenzt.

## 2.2.2 Konvektion und konvektiver Wärmeübergang

Neben der bereits in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Wärmeleitung existieren zwei weitere Mechanismen der Wärmeübertragung: die Konvektion bzw. der damit gekoppelte konvektive Wärmeübergang und die Wärmestrahlung [14]. Während die Relevanz der Konvektion bzw. des konvektiven Wärmeüberganges im Rahmen der ZfP nur eine geringe Rolle spielt, bildet die Wärmestrahlung die Grundlage für die kontaktlose Erfassung der Oberflächentemperatur [14], weshalb sie im nachfolgenden Kapitel 2.2.3 näher betrachtet wird.

Bei der Konvektion wird Energie innerhalb eines Fluides durch vorbeifließende Teilchen aufgenommen und abgetragen. Bei der Zwangskonvektion geschieht dies durch externe Herbeiführung der Strömung und bei freier Konvektion aufgrund von Temperatur- und Dichteunterschieden innerhalb des Fluides [14]. Im Rahmen der ZfP mit IRT wird das Prüfobjekt in der Regel von Luft umschlossen und durch diese abgekühlt [14].

Bei dem konvektiven Wärmeübergang handelt es sich um die Kombination von Wärmeleitung und Konvektion, wobei die in einem Körper vorhandene Energie zunächst über Wärmeleitungsprozesse in das Medium übertragen und dann dort durch Konvektion abgetragen wird [41]. Die sich auf diese Weise einstellende Wärmestromdichte  $\dot{q}_W$  lässt sich über den Temperaturunterschied zwischen Festkörper und Fluid, sowie den zugrundeliegenden Wärmeübergangskoeffizienten  $h$  berechnen:

$$\dot{q}_W = h \cdot (T_W - T_F) \quad (2.3)$$

wobei  $T_W$  die Temperatur des Festkörpers und  $T_F$  die Temperatur des Fluides beschreibt. Der Wärmeübergangskoeffizient ist abhängig von der Form des umströmten Körpers und den thermischen und hydrodynamischen Eigenschaften der Umgebung [14]. Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten wird ausführlich in [13, 14] behandelt und kann im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der relativ geringen Temperaturunterschiede bei der ZfP weitestgehend vernachlässigt werden.

### 2.2.3 Grundlagen der Wärmestrahlung

Im Vergleich zur Konvektion weist die Wärmestrahlung für die IRT eine höhere Bedeutung auf, weniger für die Abkühlung des Prüfobjektes, als für das Verständnis des Funktionsprinzips der kontaktlosen Temperaturerfassung. Die Entdeckung der Wärmestrahlung und damit der Ursprung der IRT geht auf ein von Friedrich Wilhelm Herschel (1738–1822) durchgeführtes Experiment zurück. Dieser untersuchte im Jahr 1800 die Temperatur des durch ein Prisma einfallenden Sonnenlichtes durch Anhalten eines Thermometers in das farbige Spektrum. Er beobachtete den Anstieg der Temperatur vom violetten Ende bis zum roten Ende des sichtbaren Spektrums und notierte seine Verwunderung über den weiteren Anstieg der Temperatur außerhalb des sichtbaren roten Bereichs (im Infraroten), woraus sich das Vorhandensein von Infrarotstrahlung und der damit verbundenen Übertragung von Energie ableiten lässt [42]. Der Energietransport durch elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 0,1 bis 1000  $\mu\text{m}$  wird als Wärmestrahlung, Temperaturstrahlung oder Radiation bezeichnet [14].

Wärmestrahlung wird nicht nur von der Sonne, sondern auch von Körpern (Festkörpern, Flüssigkeiten und manchen Gasen) mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes emittiert, wodurch sich deren innere Energie verringert [43]. Der Körper gibt Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung an seine Umgebung ab, d.h. er emittiert Strahlung ( $\dot{Q}_E$ ) und wird gleichzeitig von der Strahlung ( $\dot{Q}$ ) der in seinem Umfeld liegenden Körper getroffen. Diese auf einen Körper auftreffende Strahlung wird zu einem Teil absorbiert ( $\dot{Q}_A$ ), zu einem Teil transmittiert ( $\dot{Q}_T$ ) und zu einem Teil reflektiert ( $\dot{Q}_R$ ), wobei sich die innere Energie des Körpers durch den absorbierten Anteil erhöht [14]. Daraus lässt sich der Absorptionsgrad

$$\alpha_A = \frac{\dot{Q}_A}{\dot{Q}} \quad (2.4)$$

der Reflexionsgrad

$$\rho_R = \frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}} \quad (2.5)$$

und der Transmissionsgrad

$$\tau_T = \frac{\dot{Q}_T}{\dot{Q}} \quad (2.6)$$

bestimmen, wobei alle drei eine Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur  $T$  und Wellenlänge  $\lambda$  aufweisen [14].

Die spektrale spezifische Ausstrahlung eines Körpers  $B$  kann für einen ideal schwarzen Körper, bei dem die gesamte auftreffende Strahlung absorbiert wird, mit dem



Planck'schen Strahlungsgesetz beschrieben werden:

$$B(T, \lambda) = \frac{2\pi h_P c_0^2}{\lambda^5 \cdot \exp(h_P c_0 / \lambda T k_B - 1)} \quad (2.7)$$

Hier beschreibt  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum,  $h_P$  das Planck'sche Wirkungsquantum und  $k_B$  die Boltzmann'sche Konstante [14]. Durch die Messung der von einer Oberfläche emittierten Strahlung kann deren Temperatur ermittelt werden. Dabei ist auch das menschliche Auge, dessen Wahrnehmung im Wellenlängenbereich von 0,38 bis 0,78  $\mu\text{m}$  liegt, dazu in der Lage, die von einem Körper abgegebene Strahlung zu detektieren, allerdings erst bei höheren Temperaturen ab etwa 600  $^\circ\text{C}$  (abhängig von Oberflächenbeschaffenheit) [14]. Bekannte Praxisbeispiele für die Wahrnehmung emittierter Strahlung sind glühender Stahl, das heiße Cerankochfeld oder der Wolframdraht einer Glühbirne.

Schwarze Körper, wie sie für die Formel 2.7 angenommen werden, existieren nur theoretisch. In der Realität gibt es nur annähernd schwarze Körper, d.h. solche Körper die nahezu die gesamte Strahlung absorbieren. Das Verhältnis der emittierten Strahlung eines realen Körpers zur emittierten Strahlung eines ideal schwarzen Körpers wird als Emissionsgrad  $\varepsilon$  bezeichnet und ist ebenso wie der Absorptionsgrad  $\alpha_A$ , der Reflexionsgrad  $\rho_R$  und Transmissionsgrad  $\tau_T$  abhängig von der Temperatur  $T$  und der Wellenlänge  $\lambda$ :

$$\varepsilon = \frac{B_{real}}{B_{schwarz}} \quad (2.8)$$

Darüber hinaus ist der Emissionsgrad  $\varepsilon$  abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Im Falle inhomogener Werkstoffe kann die Oberflächenbeschaffenheit lokal stark variieren, sodass dies bei der Erfassung der Temperatur zu berücksichtigen ist. Durch die Verwendung von Emissionsklebeband, mattiertem Lacken oder Ruß kann ein definierter und bekannter Emissionsgrad eingestellt werden, sodass auch die Temperatur sonst reflektierender Oberflächen erfasst werden kann. Bei sich im Gleichgewicht befindenden Systemen entspricht nach dem Kirchhoff'schen Gesetz der Anteil der absorbierten Strahlung eines Körpers dem Anteil der emittierten Strahlung, wonach  $\alpha_A$  und  $\varepsilon$  gleich groß sind [14].

#### 2.2.4 Kontaktlose Erfassung der Oberflächentemperatur

Ein Großteil der elektromagnetischen Strahlung wird von der Erdatmosphäre absorbiert, sodass IR-Detektoren nur in einem der sogenannten Transmissionsfenster betrieben werden können, d.h. entweder im mittleren Infrarot (MWIR) zwischen 3 und 5  $\mu\text{m}$  oder im langwelligen Infrarot (LWIR) zwischen 8 und 14  $\mu\text{m}$  [44]. Dabei sind sowohl einzelne Pyrometer, die die Messung in nur einem einzelnen Punkt

ermöglichen, bis hin zu Arrays aus mehreren IR-Pixeln mit hoher Auflösungen von bis zu  $1920 \times 1536$  px denkbar [45]. Die erste IR-Kamera wurde um das Jahr 1950 für das US-Militär entwickelt. Kommerziell erwerbbar IR-Kameras kamen etwa 1983 auf den Markt, damals noch unhandlich, schwer und teuer [44].

Das Prinzip der Messung bei einer IR-Kamera basiert auf der Erfassung der auf den Detektor einfallenden Strahlung. Dabei können Photodetektoren und thermische Detektoren verwendet werden. Photodetektoren werden im MWIR betrieben, wo der thermische Kontrast höher ist als im LWIR. Damit ist die thermische Auflösung solcher Detektoren besser, sodass auch kleinere Temperaturunterschiede sichtbar werden [44]. Zudem lassen sich Photodetektoren mit höheren Aufnahmezeiten betreiben. Auf der anderen Seite müssen Photodetektoren zur Reduzierung des thermischen Rauschens auf Temperaturen unterhalb von 77 K gekühlt werden, was spezielle wartungsanfällige Kühlvorrichtungen erfordert [44]. Dies resultiert in einem deutlich höheren Preis solcher Geräte für Anschaffung und Wartung im Vergleich zu thermischen Detektoren. Als thermische Detektoren werden meist Mikrobolometer verwendet. Das Prinzip der Datenerfassung basiert auf der temperaturabhängigen Widerstandsänderung des Sensors. Zur Reduzierung des thermischen Rauschens müssen Mikrobolometer auf konstanter Temperatur gehalten werden, was in der Regel mit Hilfe eines Peltier Elementes erfolgt und deutlich einfacher und kostengünstiger aufgebaut ist als die Kühlung von Photodetektoren [44].

IR-Kameras werden zur qualitativen und quantitativen Erfassung von Temperaturen verwendet. Typische Einsatzgebiete sind die Medizin [46] und Veterinärmedizin [47] zur Detektion inneren Entzündungen oder Tumoren, das Bauwesen zur Detektion von Baumängeln und Kältebrücken [48], die Sicherheitsbranche zur Detektion von Personen [49], die großflächig angelegten Ermittlung der Körpertemperatur von Personen im Zuge der Bekämpfung von Pandemien z.B. an Flughäfen [45], die industrielle Prozessüberwachung [50] sowie die Qualitätssicherung und zerstörungsfreie Prüfung zur Detektion innerer und äußerer Defekte [51]. In manchen Fällen ist es erforderlich die exakte Oberflächentemperatur zu ermitteln, was nur unter Berücksichtigung des korrekten Emissionskoeffizienten und einer kalibrierten IR-Kamera möglich ist [52].

***Zwischenfazit:*** Die Oberflächentemperatur von Prüfobjekten kann mit einer IR-Kamera erfasst werden. Bei der Erfassung der Oberflächentemperatur spielt der Emissionskoeffizient, der von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig ist, eine zentrale Rolle. Materialien mit einer inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit sind daher prinzipiell schwieriger zu testen und erfordern ggf. das Aufbringen einer dünnen definierten Materialsicht.

### 2.2.5 Abgrenzung der Thermografie

Neben der Thermografie gibt es noch weitere Methoden der zerstörungsfreien Prüfung. Sie werden oft nach ihrem physikalischen Wirkprinzip unterschieden, bspw. in visuelle Prüfung, Ultraschallprüfung, Wirbelstromprüfung, Schallemissionsanalyse, Thermografieprüfung, Röntgenprüfung, etc., wobei oft auch eine Kombination mehrerer Verfahren zum Einsatz kommt [12]. Die Beschaffenheit und Dicke des untersuchten Materials sowie die Art der zu findenden Diskontinuität bestimmt die Auswahl geeigneter Prüfmethoden [53]. Bei allen Methoden der ZfP wird Energie, die aus dem Fertigungsprozess, aus einer Belastung oder von einer externen Quelle stammt, ins Bauteil eingebracht [12]. Meist müssen die Defektbereiche aufwändig aus den aufgenommenen Daten interpretiert werden. Je nach Verfahren ist allerdings auch die defektselektive Darstellung möglich, wobei ausschließlich die Defektbereiche angeregt werden [12]. Eine Auswahl der wichtigsten ZfP Verfahren ist in Tabelle 2.1 dargestellt.

Das älteste zerstörungsfreie Prüfverfahren ist die visuelle Prüfung, die ohne technische Hilfsmittel oder unter Hinzunahme hochauflösender Kamerasysteme durchgeführt werden kann [4]. Die wichtigste Prüfmethode in der Luft- und Raumfahrt ist die Ultraschallprüfung, die häufig auch als Referenzmethode eingesetzt wird [9, 54]. Sie liefert eine hohe Auflösung, ist aber zeitaufwändig und kompliziert in der Interpretation. Dabei handelt es sich um eine akustische Prüfmethode, bei der eine Ultraschallwelle das Bauteil durchläuft und an Grenzstellen und Defekten abgelenkt wird.

Eines der wichtigsten Prüfverfahren ist die Röntgenprüfung, die vor allem aus der Medizintechnik bekannt ist und in der Materialwissenschaft immer mehr an Bedeutung gewinnt [69]. Das Verfahren basiert auf der Durchstrahlung der Probe mit Röntgenstrahlen. Diese werden von einer Quelle emittiert, treffen dann auf die Probe, wo sie je nach Beschaffenheit des Materials (Dichte und Ordnungszahl) unterschiedlich abgeschwächt und anschließend vom Detektor erfasst werden. Am Detektor wird somit der Absorptions- bzw. Transmissionsanteil und damit die innere Beschaffenheit des Prüfobjektes abgebildet [4]. Neben der üblichen zweidimensionalen Abbildung (Radiographie), besteht die Möglichkeit zur dreidimensionalen Darstellung des Prüfkörpers. Hierzu werden mehrere Projektionen unter verschiedenen Beleuchtungswinkeln aufgenommen und anschließend zu einem Volumen rekonstruiert. In diesem Fall spricht man von Röntgentomographie bzw. Computertomographie [12]. Da durch eine Schädigung nicht zwangsläufig eine lokale Änderung der Dichte hervorgerufen wird, kann die Injizierung eines Kontrastmittels in den Schädigungsbereich sinnvoll sein. Hierzu wird bspw. Zinkjodid oder Bariumsulfat verwendet [12, 65]. Die radiografische Prüfung liefert auf der einen Seite eine gute Auflösung von bis zu  $10\ \mu\text{m}/\text{px}$ ,

Tab. 2.1: Auswahl der wichtigsten ZfP Methoden (in Anlehnung an [4, 12]).

| Verfahren                              | Prinzip  | Vorteil  | Einschränkungen   | Typische Defekte in FKV  |
|--|--|--|---|--|
| Visuelle Prüfung<br>[55–57]            | Analyse von transmittiertem oder reflektiertem Licht               | geringe Kosten, schnell                                      | nur oberflächennahe Defekte, ausreichend Beleuchtung erforderlich | oberflächennahe Delaminationen, Zwischenfaser- und Faserbrüche     |
| Ultraschallprüfung<br>[9, 54, 58]      | Ultraschallwelle die an Grenzflächen und Defekten reflektiert wird | hohe Auflösung, Tiefeninformation verfügbar, automatisierbar | Kopplungsmedium erforderlich, Problem bei komplexen Geometrien    | Delaminationen, Poren, Fremdkörper, Zwischenfaser- und Faserbrüche |
| Schallemissionsanalyse<br>[36, 40, 59] | Detektion einer mechanischen Welle infolge einer Schädigung        | volumensensitiv, geeignet zur Überwachung großer Strukturen  | Koppelmedium erforderlich, schwierige Signalinterpretation        | Delaminationen, Zwischenfaser- und Faserbrüche                     |
| Shearografie<br>[60–63]                | Oberflächenverformung bei Belastung aufgrund innerer Schädigung    | bildgebend, kontaktlos, automatisierbar                      | geringe Tiefenreichweite, Schädigung muss Verformung herbeiführen | innere Delaminationen, Poren, Fremdkörper                          |
| Röntgenprüfung<br>[64–66]              | Abschwächung transmittierter Röntgenstrahlung im Defektbereich     | hohe Auflösung, volumetrische Darstellung der Beschaffenheit | gefährliche Strahlung, maximale Tiefe hängt von Dichte ab         | Delaminationen, Poren, Fremdkörper, Zwischenfaser- und Faserbrüche |
| Thermografieprüfung<br>[51, 67, 68]    | Detektion von Temperaturunterschieden an der Oberfläche            | oberflächensensitiv, bildgebend, kontaktlos, automatisierbar | geringe Tiefenreichweite, hohe Qualifikation erforderlich         | Delaminationen, Poren, Fremdkörper, etc.                           |

auf der anderen Seite muss das Prüfobjekt zwischen Detektor und Quelle platziert werden, was die Größe des Bauteils einschränkt [12].

Im Fokus dieser Arbeit steht der Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreie Prüfmethode zur Quantifizierung von auftretenden und vorhandenen Defekten. Dabei bietet der Einsatz der Thermografie den Vorteil, dass es sich hierbei um eine kontaktlose und bildgebende Methode handelt, die in Echtzeit eingesetzt werden kann, die Beschaffenheit des untersuchten Prüfkörpers in keinsten Weise beeinträchtigt wird und während der Prüfung keine gefährliche Strahlung zum Einsatz kommt [44]. Auf der anderen Seite sind IR-Kamera immer noch relativ teuer und die Messungen können leicht durch Umgebungsbedingungen und variierende Probeneigenschaften beeinflusst werden, weshalb es erforderlich ist geschultes Personal für die Durchführung und Interpretation der Ergebnisse einzusetzen [52]. Gleichzeitig müssen die eingesetzten Auswertemethoden, die der Kontraststeigerung und Datenreduzierung dienen, robust gegenüber Einflüssen von außen bzw. Abhängigkeiten von der Probenbeschaffenheit ausgelegt sein. Eine weitere Herausforderung der IRT sind die geringe Tiefenreichweite bei isolierenden Werkstoffen und der starke laterale Wärmefluss bei inhomogenen und anisotropen Materialien, der die Bestimmung der lateralen Ausdehnung einer Schädigung erschwert und ab einer definierten Tiefe unmöglich macht [4]. Darüber hinaus ist die Detektion und Interpretation der im Rahmen der mechanischen Prüfung auftretenden thermischen Ereignisse schwierig. Diese sind nur kurz präsent und drohen in der großen Menge an Daten und dem nicht zu unterschätzenden Rauschniveau unterzugehen.

Die hier vorgestellte Übersicht zu vorhandenen ZfP Methoden ist nicht abschließend, sondern zeigt nur die wichtigsten Verfahren, die zur Prüfung von Verbundwerkstoffen verwendet werden können. Eine umfangreiche Darstellung, welche Methoden unter welchen Rahmenbedingungen vorteilhaft einzusetzen sind, ist in [70] zu finden. Zudem wird eine Bewertung der Verfahren hinsichtlich Eignung zur Detektion verschiedener Defekttypen in [21] vorgenommen.

### **2.2.6 Unterteilung der Thermografie**

Die Thermografie als Methode der ZfP lässt sich in passive und aktive Thermografie unterteilen [6]. Die Begriffsdefinition ist in DIN EN 16714-1 bzw. in Kapitel 1.2 zu finden. Während bei der passiven Thermografie nur der im Prüfobjekt ohnehin vorhandene Wärmefluss verwendet wird, wird bei der aktiven Thermografie mit Hilfe einer externen Energiequelle ein instationärer Wärmefluss im Prüfobjekt erzeugt.

Die IR-Kamera und die Anregungsquelle können dabei entweder auf der gleichen

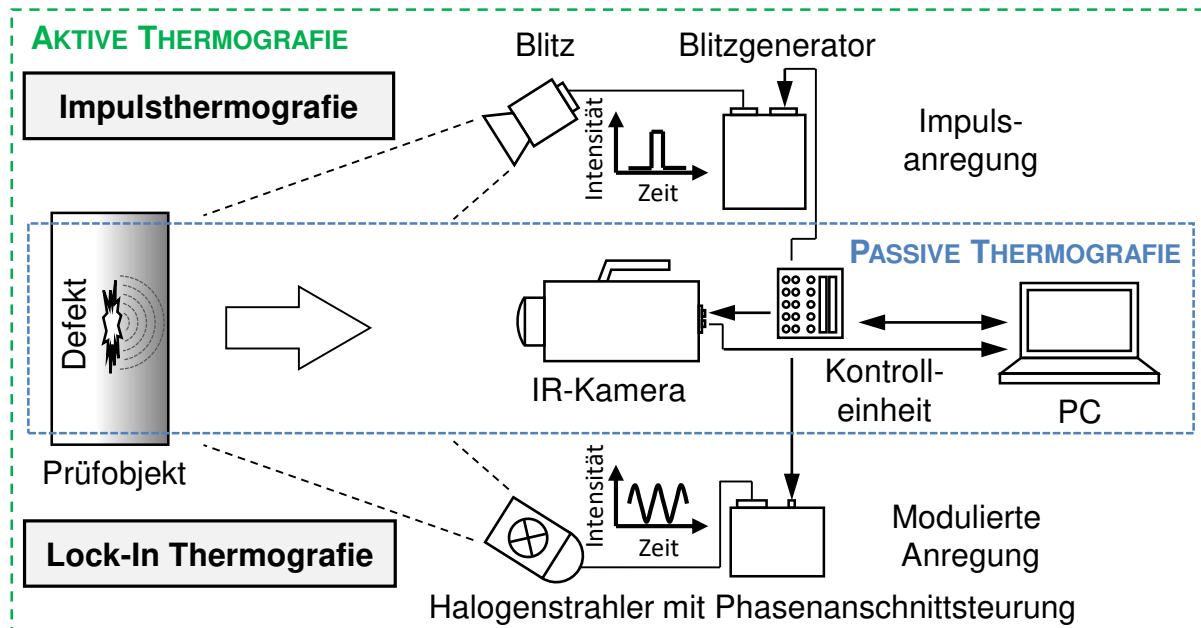


Abb. 2.2: Typischer Prüfaufbau der passiven und aktiven Thermografie (Lock-In Thermografie und Impulsthermografie) in Reflexionsanordnung.

Seite (in Reflexionsanordnung) oder auf gegenüberliegenden Seiten (in Transmissionsanordnung) platziert werden [71]. Dem gegenüber steht die innere Anregung der Defekte bzw. defektselektive Erwärmung durch Verwendung mechanischer Anregungsquellen, z.B. eines Schall- oder Ultraschallwandlers [72]. In Bezug auf die Anregungsart lassen sich drei klassische Auswertemethoden unterscheiden: Lock-In Thermografie (LIT) [73] für modulierte Anregung, Impulsthermografie (IT) [74] für Impulsanregung und Vibrothermografie für mechanische Anregung [75], wobei im Rahmen der ZfP die IT und die LIT die gängigsten Methoden der IRT sind [76]. Näheres zur aktiven Thermografie ist in Kapitel 2.4 zu finden.

Ein typischer Prüfaufbau der passiven und aktiven Thermografie ist in Abbildung 2.2 gezeigt. Weitere Informationen zur Durchführung der ZfP mit aktiver Thermografie können DIN 54192 und DIN EN 16714 entnommen werden. Eine Übersicht aktuell geltender Normen auf dem Gebiet der Thermografie ist in [77] zu finden.

**Zwischenfazit:** Die IRT bietet im Vergleich zu anderen Methoden der ZfP die Möglichkeit der schnellen, kontaktlosen und bildgebenden Prüfung, ist allerdings hinsichtlich Tiefenreichweite und Möglichkeiten zur Angabe der lateralen Ausdehnung von Defekten stark beschränkt, weshalb kontraststeigernde Auswertemethoden in Kombination mit innovativen Ansätzen zur Quantifizierung erforderlich sind.

## 2.3 Passive Thermografie zur In-situ-Überwachung

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel 2.2.6 gezeigt, kann die passive Thermografie zur In-situ-Überwachung eingesetzt werden, ohne dass dafür eine externe Wärmequelle benötigt wird. Dabei macht man sich zu Nutze, dass die von außen aufgebrachte mechanische Energie in der Probe wiederum in innere mechanische Energie in Form einer mechanischen Welle und in thermische Energie, die u.a. auf innere Reibungen zurückzuführen ist, umgewandelt wird [78]. Durch Wärmeleitungsprozesse wird diese thermische Energie an die Bauteiloberfläche transportiert und kann als lokale Temperaturveränderung detektiert werden, wie z.B. in [36, 39, 79] für Schädigungen während der quasi-statischen Zugprüfung von FKV gezeigt.

Bei Kunststoffen kann außerdem kurz vor Schädigungsentstehung eine lokale Veränderung der Temperatur beobachtet werden, was in der Literatur als thermoelastischer Effekt bezeichnet wird [65]. Dieser Effekt lässt sich über die Umkehrwirkung der thermischen Ausdehnung bei Erwärmung einer Probe beschreiben. Das Material verhält sich folglich analog zu einem Gas und kühlt unmittelbar vor Eintreten der plastischen Schädigung bei Zugbeanspruchung (Ausdehnung) ab und erwärmt sich entsprechend bei Druckbeanspruchung (Kompression) [65, 80, 81]. Dieser Effekt kann bei hinreichender Auflösung der Kamera mit Hilfe der passiven Thermografie visualisiert werden [82].

In der Literatur wird die passive Thermografie als In-situ-Verfahren bereits an einer Vielzahl von Materialien und Versuchsaufbauten angewendet. Nachfolgend wird eine Übersicht über den Einsatz bei der mechanischen Prüfung gegeben. Der Fokus liegt dabei auf der quasi-statischen-Zugbelastung und der Visualisierung von Impactschädigungen bei ihrer Entstehung.

### 2.3.1 Quantifizierung von Schädigungen bei der mechanischen Prüfung

Bei der mechanischen Prüfung entstehen Schädigungen in der Regel zeitlich und örtlich voneinander versetzt, sodass im Rahmen der Quantifizierung beides, die zeitliche und örtliche Variation der Schädigung, berücksichtigt werden muss. In Kombination mit teilweise sehr geringen Temperaturunterschieden und dem verhältnismäßig großem Rauschen der IR-Detektoren können Schädigungen schnell übersehen werden. Es ist daher erforderlich, innovative Auswerteverfahren einzusetzen und ihre Grenzen exakt zu bestimmen.

Im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung werden üblicherweise Materialeigen-

schaften wie Steifigkeit und Festigkeit bestimmt, indem die Probe einer kontrollierten, zunehmenden Belastung bis zum Versagen ausgesetzt wird [3]. Während duktile Werkstoffe wie Metalle sich mit zunehmender Belastung verformen, äußert sich die Degradation von Verbundwerkstoffen in Form von lokalen Zwischenfaserbrüchen, Faser-Matrix-Ablösungen und Faserbrüchen bevor die Probe endgültig versagt [3]. Für sicherheitsrelevante Anwendungen, bei denen ein Zwischenfaserbruch nicht toleriert werden kann, definiert das Auftreten des ersten Zwischenfaserbruchs die obere Belastungsgrenze [3]. Um das Potential des Werkstoffes noch weiter ausschöpfen zu können, ist es notwendig, das Schädigungsverhalten auch im Bereich zwischen Initialversagen und Endversagen zu beschreiben [3].

Mit der passiven Thermografie kann die Entwicklung der Risse in einem gewebeverstärkten Polymer sowie der Einfluss der Materialanisotropie auf das Wachstum der Schädigung und die Position des Defekts visualisiert werden [83]. Bei ausreichender Intensität des Signals kann die Visualisierung einer Schädigung bereits ohne weitere Nachbearbeitung erfolgen. Zur Verbesserung des Kontrastes kann hingegen auch die Verwendung geeigneter Filter sinnvoll sein, bspw. eines räumlich-medialen Filters zur Visualisierung der Wärmequelle [84]. Mit Hilfe des Mori-Tanaka-Homogenisierungsansatzes zur Bestimmung des Leitfähigkeitstensors bei Verbundwerkstoffen [85], kann zudem auch die Anisotropie der Verbundwerkstoffe berücksichtigt werden. Allerdings ist die Implementierung und Umsetzung des Filteransatzes ohne Kenntnis des genauen Zeitpunktes der Schädigung umfangreich, weshalb in weiterführenden Arbeiten die passive Thermografie mit der Schallemissionsanalyse kombiniert und die Wärmequellen entsprechend ihrem Entstehungszeitpunkt berechnet werden [36]. Dabei ergänzen sich die Verfahren Schallemissionsanalyse und passive Thermografie im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung sehr gut. Die Schallemissionsanalyse ist sehr sensitiv und volumetrisch, sodass damit der Zeitpunkt der Schädigungsentstehung sicher identifiziert werden kann, während die Thermografie zwar bildgebend, aber oberflächensensitiv ist. Diese Kombination ist gängig und wird bspw. in [36, 86, 87] praktiziert. Die Schädigung im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung tritt in der Regel impulsförmig auf, sodass die Auswertung der Messdaten üblicherweise an Einzelbildern der Thermografiesequenz erfolgt. Der dabei realisierbare Kontrast ist teilweise gering und die Visualisierung tieferer Schädigungen ist kaum umzusetzen. Ein Schädigungsereignis ist außerdem nur für einen kleinen Zeitraum sichtbar, bevor sich die Wärmeenergie im Material verteilt. Zudem muss im Rahmen der Auswertung mit großen Datenmengen umgegangen und die aufeinanderfolgenden und zeitlich versetzten Schädigungsereignisse jeweils einzeln dargestellt werden, was im Rahmen der Beschreibung des Degradationsverhaltens umfangreich und fehleranfällig ist. Um die Auswertung zu vereinfachen und um sicherzustellen,



dass alle Schädigungsereignisse erfasst werden, wurde in [79] und [88] eine Methodik vorgestellt, mit der es möglich ist, oberflächennahe Schädigungsereignisse, die aufgrund ihrer geringen Intensität unter Umständen in der großen Datenmenge untergehen könnten, im Frequenzbereich darzustellen. Der gesamte Datensatz wurde stückweise vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt und bei einer geeigneten Frequenz ausgewertet. Dabei war eine Verbesserung des SNR von 4,5 dB auf 14 dB möglich [79]. Um sicherzustellen, dass sämtliche Schädigungsereignisse erfasst werden, haben sich die Auswertefenster überschritten. Mit dieser Methode ist es möglich, die in einem Zeitfenster aufgetretenen Schädigungsereignisse in einem gemeinsamen Schädigungsbild zu visualisieren, das Degradationsverhalten zu beschreiben und eine zeitabhängige Rissdichte zu bestimmen. Durch die Kombination mit der Schallemissionsanalyse war es in [39] schließlich möglich, die Auswertung effizienter zu gestalten und nur zu den Zeitpunkten auszuwerten, zu denen eine Schädigung aufgetreten ist.

In anderen Arbeiten wurde durch Anwenden der Lock-In Auswertung (siehe Kapitel 2.4.1) das Wachstum der Rissflanke im Rahmen von Ermüdungsversuchen identifiziert, wie z.B. in [89] gezeigt. Dabei werden die periodische Belastung des Prüfobjektes ausgenutzt und die passiv aufgenommenen Thermografiedaten im Frequenzspektrum bei der Anregungsfrequenz ausgewertet. Dadurch werden der Kontrast der Temperaturschwankungen im Bereich der Rissentstehung erhöht und die Rissfront visualisiert. Diese Auswertemethode kann auch dazu verwendet werden, das Wachstum der Schädigung infolge einer Schlagbeanspruchung im Rahmen von Ermüdungsversuchen darzustellen [90] und die Ermüdungsgrenze von monolithischen Werkstoffen und Verbundwerkstoffen vorherzusagen [91].

Die Auswertung von Thermografiedaten aus der passiven In-situ-Überwachung im Frequenzbereich ist demnach nicht neu. Sie wird derzeit aber ausschließlich für moduliert angeregte Versuche eingesetzt (z.B. Ermüdungsversuche mit einer Belastung in einer definierten Frequenz). Impulsartige Erwärmungen aufgrund von Schädigungsereignissen werden in der Literatur, mit Ausnahme von [39, 79, 88], nicht im Frequenzbereich ausgewertet, obwohl der Kontrast der Schädigung dadurch erheblich gesteigert werden kann.

**Zwischenfazit:** *Die passive Thermografie eignet sich zur Visualisierung von Schädigungen im Rahmen der mechanischen Prüfung. Aktuelle Methoden sind allerdings umständlich, beschränken sich auf die Detektion oberflächennaher Schädigungen und bergen bei einer manuellen Auswertung die Gefahr, dass wichtige Informationen unentdeckt bleiben. Eine Auswertung impulsartiger*

*Schädigungsereignisse im Frequenzraum ist noch nicht durchgeführt worden.*

Der Einsatz der passiven Thermografie als Methode zur In-situ-Überwachung in Kombination mit der Auswertung im Frequenzraum bietet viel Potenzial, erfordert allerdings die Beantwortung folgender Forschungsfragen:

- Wie können lokal und zeitlich voneinander getrennte Schädigungsereignisse, die bspw. im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung auftreten, zusammengeführt und das Degradationverhalten im Frequenzraum visualisiert werden?
- Welche Parameter, z.B. für die Länge des Auswertefensters, müssen gewählt werden, um eine Schädigung zuverlässig zu detektieren und wie stark müssen diese Auswertefenster überlappen?
- Wo liegen die Grenzen bei der Visualisierung im Frequenzraum?

### **2.3.2 Quantifizierung von Impactschädigung bei ihrer Entstehung**

Im Gegensatz zur quasi-statischen Prüfung, bei der die Schädigungsereignisse sowohl zeitlich als auch lokal versetzt voneinander auftreten, bilden sich bei einer Schlagbeanspruchung Schädigungen in Form von Zwischenfaserbrüchen, Faser-Matrix-Ablösungen, Faserbrüchen und Delaminationen schlagartig in einem sehr kurzen Zeitraum aus und sind lokal überlagert in mehrerer Lagen eines geschichteten Laminats präsent [92]. Zur In-situ-Überwachung der Schädigungsentstehung kann bspw. die Schallemissionsanalyse eingesetzt werden [93]. Diese ist zwar sehr sensitiv, die direkte Darstellung der Schädigungsfläche ist damit aber nicht möglich [93]. Da während der Entstehung der Schädigung u.a. Wärmeenergie freigesetzt wird und sich diese in alle Richtungen verteilt und damit auch an die Oberfläche gelangt, kann zur In-situ-Überwachung die passive Thermografie eingesetzt werden [78]. Die dabei freigesetzte und detektierbare Energiemenge kann ausreichend sein, um eine ungefähre Kartierung der Schädigung zu ermöglichen [94]. In [95] wurde anhand eines FKV aus Glasfaser und Epoxidharz gezeigt, wie die thermische Signatur einer Schädigung sichtbar gemacht werden kann und damit zusätzliche Informationen zur Verfügung stehen, die bei der Materialcharakterisierung nützlich sein können. Der Ansatz wurde anschließend an duroplastischen [5, 82, 95–98] und thermoplastischen [82, 97, 98] Materialien eingesetzt. Damit ist es auch unter anderem möglich, den thermoelastischen Effekt, der für ein kurzzeitiges lokales Abkühlen der Probe sorgt, zu visualisieren [82]. Je nach Versuchskonfiguration, Probenmaterial und Schädigung können unterschiedliche charakteristische Temperaturverläufe beobachtet werden. So wurde in [78] gezeigt, dass sich Zwischenfaserbrüche und Faserbrüche in Form von linienartigen lokalen Erwärmungen und Delaminationen

in Form von großflächiger Erwärmung mit unregelmäßigen Konturen bemerkbar machen. Im Vergleich zu anderen Methoden, wie etwa der Impulsthermografie und der Ultraschallprüfung, stellt die passive Thermografie sogar mehr Informationen zu einer Schädigung zur Verfügung [94]. Unter anderem werden durch die direkte Visualisierung der Schädigungsfläche auch die in engem Kontakt stehenden Bereiche an der Rissfront sichtbar, die im Rahmen der aktiven Thermografie unter Umständen nicht zu detektieren sind [98]. Allerdings erfolgt die Visualisierung der Schädigung in allen oben genannten Publikationen stets direkt an IR-Bildern, weshalb beobachtet werden konnte, dass die scheinbare Größe der Schädigung mit zunehmender Zeit ansteigt [95]. Es ist demnach fraglich, wie groß die eigentliche Schädigung ist und zu welchem Zeitpunkt die Aufnahmen auszuwerten sind, um die reale Größe und Kontur der gesamten Schädigung abzubilden. Zudem setzt diese Methode der Visualisierung voraus, dass ausreichend Wärmeenergie freigesetzt wird und diese mit genügend Kontrast an der Oberfläche detektiert werden kann. Tieferliegende Delaminationen, in Fällen bei denen das Schädigungsverhalten vom Ideal abweicht, könnten demnach bei Auswertung der IR-Bilder unentdeckt bleiben.

Eine Alternative ist die Visualisierung der Schädigungsfläche im Frequenzraum, ähnlich wie es für die Ergebnisse der quasi-statischen Zugprüfung in Kapitel 2.3.1 bereits beschrieben wurde. Durch die Auswertung im Frequenzraum ist es möglich, nur die breitbandige Erwärmung durch das Schädigungsereignis zu visualisieren ohne dass das Rauschen der Kamera das Signal abschwächt. Zu dieser Methode konnten im Rahmen dieser Arbeit keine Publikationen gefunden werden, sodass die im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellte Methodik erstmals beschrieben wird.

***Zwischenfazit:*** Existierende Methoden zur Visualisierung der Impactschädigung mit Hilfe der passiven Thermografie basieren auf der Auswertung von IR-Bildern. Die scheinbare Schädigungsfläche variiert mit dem Zeitpunkt der Auswertung. Zudem erfordert diese Methode eine ausreichende Erwärmung des geschädigten Bereichs an der Oberfläche des Bauteils, weshalb nur oberflächennahe Schädigungen visualisiert werden können.

Daraus resultieren folgende sich auf die Quantifizierung von Schädigungen im Rahmen der Schlagbeanspruchung beziehende Fragen:

- Wie können die passiv aufgenommenen Thermografiedaten im Frequenzraum ausgewertet werden?
- Welche Vorteile bringt eine Visualisierung der Schädigungsfläche im Frequenzraum?

- Welche Parameter, z.B. für die Länge des Auswertefensters, müssen gewählt werden, um eine Schädigung zuverlässig zu detektieren und wie wirkt sich der laterale Wärmefluss auf die dargestellte Schädigungsfläche aus?
- Wo liegen die Grenzen bei der Visualisierung im Frequenzraum?

## 2.4 Aktive Thermografie zur Defektdetektion

Im Vergleich zur passiven Thermografie erfolgt bei der aktiven Thermografie eine Anregung des Prüfobjektes, wie bereits in Kapitel 2.2.6 gezeigt. Die wohl wichtigsten und am meisten eingesetzten Thermografiemethoden, optisch angeregte Lock-In Thermografie sowie die Impulsthermografie mit Puls-Phasen Auswertung, werden nachfolgend vorgestellt [32]. Dabei liegt der Fokus auf der im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Impulsthermografie mit Puls-Phasen Auswertung. Am Ende dieses Kapitels werden außerdem die Möglichkeiten zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten präsentiert.

### 2.4.1 Optisch angeregte Lock-In Thermografie

Die optisch angeregte Lock-In Thermografie (LIT) basiert auf einer modulierten Anregung des Prüfobjektes [73]. In der Regel werden hierfür leistungsstarke Halogenstrahler verwendet, die je nach Bedarf mit einem Filter versehen werden können. Durch die Absorption der Strahlung erwärmt sich das Prüfobjekt an der Oberfläche. Infolgedessen breitet sich im Prüfobjektinneren ein oszillierendes Temperaturfeld aus, welches aufgrund der wellenartigen Eigenschaften in der Literatur auch teilweise als thermische Welle bezeichnet wird [73]. Dieses oszillierende Temperaturfeld interagiert mit den im Prüfobjekt vorliegenden Inhomogenitäten und wird entsprechend reflektiert. Durch die kohärente Überlagerung des reflektierten Temperaturfeldes mit dem einfallenden Temperaturfeld entsteht die Information über die Schädigung [67]. Diese Überlagerung kann an der Prüfobjektoberfläche durch die Analyse der Amplituden- und Phaseninformation des Temperaturfeldes in Bezug zu einer Referenz an der Prüfobjektoberfläche visualisiert werden. Dabei hängt die thermische Eindringtiefe  $\mu$  des oszillierenden Temperaturfeldes von der Temperaturleitfähigkeit  $a$  und der gewählten Modulationsfrequenz bzw. Kreisfrequenz der periodischen Anregung  $\omega$  ab und kann über

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \cdot a}{\omega}} \quad (2.9)$$

beschrieben werden [67]. Demzufolge muss bei der LIT zur Untersuchung der gesamten Probendicke eine sequentielle Versuchsdurchführung mit unterschiedlichen Frequenzen erfolgen, was auf der einen Seite zwar eine hohe Tiefenreichweite mit hohem SNR ermöglicht, auf der anderen Seite aber lange Messzeiten erfordert.

## 2.4.2 Impulsthermografie mit Puls-Phasen Auswertung

Im Gegensatz zur Lock-In Thermografie wird bei der optisch angeregten Impulsthermografie die Änderung der Oberflächentemperatur eines Prüfobjekts nach impulsförmiger Anregung, z.B. durch eine Blitzlampe, mit einer IR-Kamera ausgewertet. Während bei der Lock-In Thermografie in der Regel mehrere Anregungs- und Auswerteperioden verwendet werden und die Frequenz in Abhängigkeit von der Inspektionstiefe variiert, erfolgt bei der Impulsthermografie eine einmalige Impulsanregung [51]. Der Wärmefluss im Prüfobjekt wird durch interne Grenzflächen, verursacht durch Defekte oder Einschlüsse, beeinflusst, sodass diese durch die Analyse der Temperaturverteilung auf der Oberfläche erkannt werden können [53]. Die Zuordnung der Tiefeninformation von Defekten erfolgt bei der Impulsthermografie über Laufzeitbestimmung [99].

Bei der Impulsanregung handelt es sich nach DIN 54192 um eine zeitlich kurze und intensive Anregung. Diese ist von der Stufenanregung, die über eine längere Zeit durchgeführt wird, abzugrenzen. In der Literatur existieren teilweise abweichende Begrifflichkeiten, z.B. in [8], weshalb an dieser Stelle darauf hingewiesen wird, dass die Definition nach DIN 54192 verwendet wird.

Unter der Annahme eines eindimensionalen Wärmeflusses in einer halb-unendlichen, homogenen, plattenförmigen Probe und eines Dirac-förmigen Wärmeimpulses, ergibt die Lösung des Fourier'schen Gesetzes der Wärmeleitung [100]

$$T(z, t, t_0) = T_0 + \frac{Q}{e \sqrt{\pi \cdot (t - t_0)}} \cdot \exp\left(-\frac{z^2}{4a \cdot (t - t_0)}\right) \quad (2.10)$$

wobei  $z$  die Tiefe,  $T_0$  die Anfangstemperatur,  $Q$  die absorbierte Wärmeenergie,  $e$  die Effusivität,  $a$  die Temperaturleitfähigkeit bzw. thermische Diffusivität des Materials und  $t_0$  die Zeitverschiebung zwischen dem Einsetzen des Blitzimpulses und dem Beginn der Datenaufzeichnung ist. Die Effusivität  $e$  ist auch als Wärmeeindringkoeffizient bekannt und lässt sich mit

$$e = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c_p} \quad (2.11)$$

berechnen [13]. Da bei der Thermografie nur die Oberflächentemperatur analysiert wird, kann Gleichung 2.10 für  $z = 0$  auf

$$T(0, t, t_0) = T_0 + \frac{Q}{e \sqrt{\pi \cdot (t - t_0)}} \quad (2.12)$$

vereinfacht werden. Der ideale Dirac-förmige Wärmeimpuls ist gleichbedeutend mit einer Erzeugung von thermischen Wellen im gesamten Frequenzspektrum [101]. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Temperaturfeldes kann demnach als eine Funktion

der Frequenz und der Temperaturleitfähigkeit des Materials angegeben werden. Für den isotropen Fall entspricht diese [101]

$$v = \sqrt{2 \cdot \omega \cdot a} \quad (2.13)$$

In der Praxis wird anstelle des idealen Dirac-Impulses ein nahezu rechteckiger Blitzimpuls verwendet. Oberflächennahe Defekte, deren thermische Eigenschaften sich von der Umgebung stark abheben, lassen sich bereits in den Temperaturkurven in Form von Temperaturunterschieden identifizieren. Für die Detektion tieferer Defekte bzw. im Falle eines schlechten Kontrastes des Defektbereiches zu seiner Umgebung, kann der Datensatz mit Hilfe von Auswertelgorithmen gefiltert und ausgewertet werden. Für die Auswertung der Rohdaten nach Impulsanregung stehen folgende Methoden zur Verfügung\*:

- Methoden des thermischen Kontrasts
  - Absolute Contrast [102]
  - Differential Absolute Contrast [103, 104]
  - Thermographic Signal Reconstruction [105, 106]
- Transformationsmethoden
  - Pulse Phase Thermography [51, 107]
  - Principal Component Thermography [108–110]
- Statistische Methoden
  - Higher Order Statistics [111, 112]

Die Puls-Phasen Thermografie bzw. Puls-Phasen Auswertung (*engl.* Pulse Phase Thermography (PPT)) ist die am häufigsten eingesetzte und praktikabelste Thermografiemethode [32]. Unter bestimmten Rahmenbedingungen liefert die PPT sogar ein höheres SNR als die LIT [76] und hat den wesentlichen Vorteil, dass sie einfacher und schneller durchgeführt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit wird für die ZiP die Impulsthermografie in Kombination mit der PPT Auswertung verwendet.

### **Puls-Phasen Thermografie**

Bei der Puls-Phasen Thermografie (PPT) werden innen liegende Defekte durch Betrachtung der Amplituden- und Phasenanteile des Temperaturfeldes an der Oberfläche in Bezug zur Referenz des Impulses visualisiert, weshalb eine Transformation der Rohdaten aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich erfolgt [102]. Dabei ist die

---

\*Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde die englische Bezeichnung der Methoden beibehalten

Hauptidee der PPT die gleichzeitige Untersuchung aller verfügbaren Frequenzen [113]. Im Vergleich zur alternativ verfügbaren LIT, bei der über die Modulationsfrequenz die Inspektionstiefe exakt eingestellt wird und das Bauteil in mehreren sequentiellen Versuchen untersucht wird [114], ist bei der PPT eine gleichzeitige Untersuchung aller Frequenzen und damit aller Inspektionstiefen mit nur einem Versuch möglich [115]. Eine nähere Untersuchung und Diskussion zu Gemeinsamkeiten und Unterschieden beider Methoden liefert [116].

Die Transformation vom Zeit- in den Frequenzbereich mittels Diskreter Fourier Transformation (DFT) wird pixelweise für den gesamten Stapel an Thermogrammen mit Hilfe von

$$F(u) = \Delta t \sum_{m=0}^{N-1} T(m\Delta t) \cdot e^{-j2\pi um/N} = \text{Re}(u) + \text{Im}(u) \quad (2.14)$$

durchgeführt, wobei  $u$  das Frequenzinkrement ( $u = 0, 1, \dots, N-1$ ),  $m$  den Index in der Bildsequenz im Zeitbereich,  $N$  die Gesamtzahl der Thermogramme in der Sequenz (auch als Sequenzlänge oder Auswertefenster bezeichnet) und  $\text{Re}(u)$  und  $\text{Im}(u)$  die Real- und Imaginäranteile von  $F(u)$  beschreiben [68].  $\Delta t$  definiert das Abtastintervall zwischen den Bildern und lässt sich über die Aufnahmezeit der Sequenz  $SR$  (engl. Sampling Rate) berechnen

$$\Delta t = \frac{1}{SR} \quad (2.15)$$

Aufgrund der Symmetrie der DFT ergibt die Anzahl der Frequenzwerte  $N/2$ , mit einer Frequenzauflösung von

$$\Delta f = \frac{SR}{N} \quad (2.16)$$

Damit lässt sich das Frequenzinkrement  $u$  in die Frequenz  $f$  mit

$$f = \Delta f \cdot u \quad (2.17)$$

umwandeln. Durch Einsetzen in Gleichung 2.14 kann wiederum die Amplitude und Phase mit

$$A(f) = \sqrt{\text{Re}(f)^2 + \text{Im}(f)^2} \quad (2.18)$$

und

$$\varphi(f) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(f)}{\text{Re}(f)} \right) \quad (2.19)$$

berechnet werden, wobei sich eine Inhomogenität in der Probe (ein Defekt) im Amplituden- oder im Phasenbild als Kontrast in Bezug auf einen Referenzbereich

bemerkbar macht. Die Verwendung der Phaseninformation im Rahmen der PPT bringt den Vorteil, dass dieser unabhängig vom Emissionsgrad der Probenoberfläche oder von einer eventuell ungleichmäßigen Beleuchtung während der Impulserwärmung ist und eine höhere Reichweite im Vergleich zur Verwendung der Amplitudeninformation bietet [117, 118].

Die resultierende Sequenz von Amplituden- oder Phasenbildern hängt demnach von der Länge des Auswertefensters  $N$  und der Aufnahmezeit  $SR$  des IR-Kamerasystems ab [51]. Die Parameter Frequenz  $f$  und Länge des Auswertefensters  $N$  sind demnach keine unabhängigen Parameter, sondern sind über die Aufnahmezeit  $SR$  und die Gleichungen 2.14, 2.16 und 2.17 verbunden. Demnach können höhere Frequenzen  $f$  bereits mit einer geringen Anzahl von Bildern  $N$  ausgewertet werden, während niedrigere Frequenzen  $f$  eine höhere Anzahl von Bildern  $N$  und damit längere Aufzeichnungszeiträume benötigen, jeweils unter der Annahme, dass die Aufnahmezeit  $SR$  als feststehend angesehen wird. Dabei ist zu beachten, dass Information der nicht abbildbaren Frequenzen auf die umliegenden Frequenzen verteilt wird.

Die Art der Auswertung der PPT hat große Ähnlichkeit zur LIT. Verglichen mit der LIT erfolgt die Durchführung und Auswertung der Messung bei der PPT jedoch um ein Vielfaches schneller, insbesondere weil die Untersuchung mehrerer Inspektionstiefen simultan erfolgt. Bei gleichbleibendem Energieeintrag sind die Ergebnisse der LIT und PPT miteinander vergleichbar [115]. Der Unterschied der Methoden liegt in der für die Energieeinbringung verfügbaren Zeit. Während bei der PPT kurze und leistungsstarke Impulse verwendet werden, erfolgt die Einbringung der Energie bei der LIT über die Zeit verteilt, sodass die pro Zeiteinheit eingebrachte Energiedichte deutlich geringer ausfallen kann [115].

***Zwischenfazit:*** *Optisch angeregte Impulsthermografie in Kombination mit der Puls-Phasen Auswertung eignet sich zur schnellen und zuverlässigen Detektion innenliegender Defekte dünnwandiger Verbundwerkstoffe, wobei die Phase weniger anfällig gegenüber ungleichmäßiger Energieeinbringung und materialbedingten Inhomogenitäten ist. Zur Optimierung der Ergebnisse, bspw. der Maximierung des Kontrastes oder der Minimierung der Abweichung zur realen Defektgröße, ist eine Variation der Auswerteparameter erforderlich.*

### **2.4.3 Ortsaufgelöste Quantifizierung von Defekten**

Aktuelle Methoden zur lateralen ortsaufgelösten Quantifizierung basieren auf der impulsförmigen Anregung und der Auswertung von IR-Bildern im Zeitbereich. Dabei ist das Hauptproblem der Quantifizierung im Ort der durch Defekte verursachte laterale



Wärmefluss im Bauteilinneren [101] und die damit verbundene Lösung des inversen Problems der Wärmeleitung. Ein inverses Problem liegt vor, wenn aus der gemessenen oder beobachteten Wirkung auf die Ursache geschlossen werden soll [119]. Im Falle der Größenbestimmung innenliegender Defekte mit Hilfe der Thermografie wird ein Temperaturunterschied an der Bauteiloberfläche beobachtet und auf die diesen Wärmefluss verursachende Wirkung, demnach die Geometrie der Schädigung, geschlossen [119]. Es findet ein nicht unerheblicher dreidimensionaler lateraler Wärmefluss statt, der durch die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften von Prüfobjekt und Schädigung verursacht wird [120]. Aus dem ursprünglich eindimensionalen Problem wird durch den lateralen Wärmefluss ein dreidimensionales Problem, welches dazu führt, dass der Randbereich der Schädigung verschwommen wirkt [35] und eine Fehleinschätzung der realen Größe verursacht [53]. Dieser Effekt ist auch als *engl.* edge effect bekannt und ist exemplarisch in Abbildung 2.3 dargestellt [101].

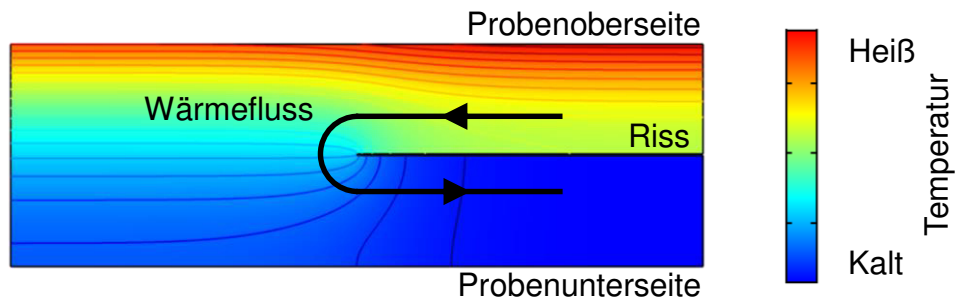


Abb. 2.3: Vereinfachte Darstellung des Wärmeflusses an einem Defekt nach einer impulsförmigen Anregung an der Probenoberseite. Numerische Berechnung an einem isotropen Material mit Comsol 5.5 [121] (in Anlehnung an [101]).

Im Vergleich zu anderen Materialien wie Metallen, homogenen oder glasfaserverstärkten Polymeren ist dieser laterale Wärmefluss besonders signifikant in kohlenstofffaserverstärkten FKV, wo die Wärmeleitfähigkeit in Faserrichtung deutlich größer ist als senkrecht dazu [33]. Im kritischsten Fall, einem unidirektionalen Laminat, ist die Wärmeleitfähigkeit des in dieser Arbeit verwendeten Materials bei Raumtemperatur in Faserorientierung (ca.  $7 \text{ W}/(\text{m K})$ ) etwa 9 mal höher als senkrecht dazu bzw. in Dickenrichtung (ca.  $0,8 \text{ W}/(\text{m K})$ ), wie in [122] gezeigt.

Für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung von Defekten existieren derzeit zwei verschiedene Methoden: die direkte Verwendung einzelner IR-Bilder und die iterative Rekonstruktion der Defektgeometrie im Rahmen einer numerischen Simulation. Die **Verwendung eines einzelnen IR-Bildes** aus dem Experiment nach Impulsanregung zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten wurde bereits 1994 in [101] vorgestellt und der theoretische Ansatz mit experimentellen Daten einer isotropen

Stahlprobe verglichen. Zur Bestimmung der Größe einer Schädigung wird dabei die laterale Verteilung der Oberflächentemperatur unter Anwendung der *engl.* Full Width at Half Maximum (FWHM) Methode verwendet. Die FWHM Methode wurde erstmals in [123] beschrieben. Bei dieser Methode wird der maximale Kontrast zwischen geschädigtem und intaktem Bereich ermittelt und die Positionen, bei denen das Profil die Hälfte des Kontrastes erreicht, als Randpunkte der Schädigung gesehen, vgl. Abbildung 2.4 (Methode B). Die Höhe des maximalen Kontrastes und der Zeitpunkt, zu dem dieser auftaucht, ist vor allem von der Größe und Tiefe des Defektes abhängig [124]. Alternativ zur Verwendung des halben maximalen Kontrastes im IR-Bild kann zur Größenbestimmung der maximale Temperaturgradient genutzt werden, vgl. Abbildung 2.4 (Methode D). Weiterhin kann der Abstand zwischen diesen Punkten direkt (Methoden B und D) oder alternativ der Abstand der Schnittpunkte der in diesen Punkten anliegenden Tangenten mit der Grundlinie als Randpunkte der Schädigung identifiziert werden (Methoden A und C). Einen Vergleich dieser Methoden wurde in [125] an kohlenstofffaserverstärkten Proben mit Flachbodenbohrungen durchgeführt. Dabei wurde gezeigt, dass der Zeitpunkt, zu dem die Größe der Defekte gemessen wird eine große Rolle spielt und die reale Größe insbesondere bei unbekanntem Defekten auf diese Weise nicht ermittelt werden kann. Die geringste Abweichung zur realen Schädigungsgröße hat Methode B, welche auf dem FWHM

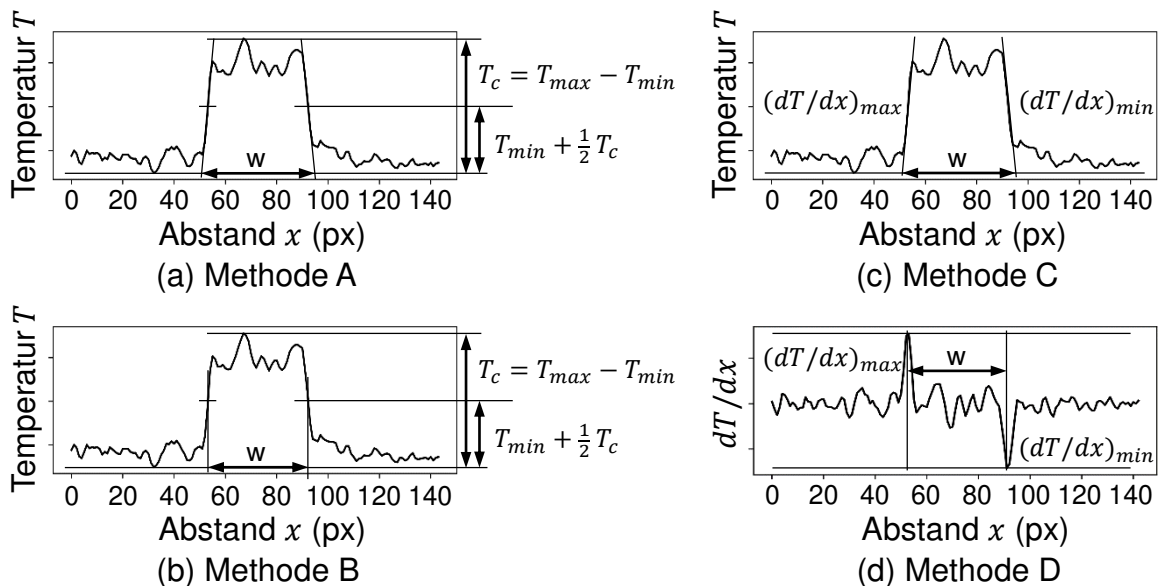


Abb. 2.4: Vier verschiedene Methoden zur Bestimmung der lateralen Defektgröße  $w$ . (a) Methode A: Abstand der Schnittpunkte der Tangenten bei der Hälfte des maximalen Kontrastes mit der Grundlinie, (b) Methode B: Abstand der Positionen des halben maximalen Kontrastes, (c) Methode C: Abstand der Schnittpunkte der Tangenten bei der maximalen Steigung mit der Grundlinie und (d) Methode D: Abstand der Positionen der maximalen Steigung.

Ansatz basiert, geliefert.

In einer weiteren Untersuchung wurden die in Abbildung 2.4 gezeigten Methoden auf Phasenbilder angewandt [126]. Auch dabei konnte mit Methode B die geringste Abweichung zur realen Schädigungsgröße beobachtet werden. Zudem wurde in [126] deutlich gezeigt, dass die scheinbare Größe der Schädigung von den gewählten Auswerteparametern abhängig ist und die Wahl der Parameter in Abhängigkeit von der Defekttiefe variiert werden muss. Die Art der Quantifizierung basiert auf der Bestimmung der Schädigungsgröße anhand einer einzelnen Schnittlinie, sodass eine Beschreibung der gesamten Schädigungsfläche nur durch vollständige Vermessung aller Profile erfolgen kann.

Eine Alternative ist die direkte Bestimmung der gesamten Defektgröße durch die Verwendung der *engl.* boundary trace method [127], wobei eine Linie um den Defekt gezogen und alle eingeschlossenen Pixel gezählt werden. Die Methode wird u.a. von [128] verwendet, führt jedoch zu einer Abweichung von bis zu 300 %, wobei der Fehler mit der Defekttiefe [127] zunimmt. Dabei wird zunächst das für die Quantifizierung verwendete Bild manuell ausgewählt sowie die Randspur manuell bestimmt, was subjektiv und schwierig zu reproduzieren ist und ein hohes Fehlerpotenzial aufweist [128]. Durch eine Kombination aus automatisierter Bestimmung der Randpunkte, z.B. nach der FWHM Methode, und Auswahl des Bildes mit der maximalen Temperaturdifferenz kann dies verbessert werden, wodurch der Fehler auf  $\pm 15\%$  reduziert werden kann [127]. Dabei sollte bei der Auswahl des auszuwertenden Bildes zur Reduzierung des lateralen Wärmeflusses das Bild, bei dem die Schädigung erstmalig sichtbar wird, verwendet werden [34, 68, 129].

Ein wesentliches Problem der vorgestellten Ansätze ist ihre Beschränkung auf oberflächennahe Defekte, da für die erfolgreiche Quantifizierung ein ausreichender Kontrast zwischen Defektbereich und Referenzbereich vorliegen muss und dieser Umstand bei tieferen Defekten unter Umständen nicht gegeben ist. Vor allem bei multiaxialen kohlenstofffaserverstärkten Laminaten, bei denen die Wärmeenergie schnell über eine große Fläche verteilt wird, sind diese Methoden auf die Untersuchung der obersten Lagen beschränkt [128]. Dabei gilt, dass die Nachweisempfindlichkeit in der Thermografie umgekehrt proportional zur Tiefe des Defekts ist und mit zunehmender Pulsintensität steigt [32]. Die Messgenauigkeit kann durch Anwendung der ersten Ableitung des Zeitsignals und anschließender Verwendung der FWHM Methode verbessert werden [35]. Mit dieser Methode wird sich wahrscheinlich auch die Tiefenreichweite erhöhen. Hierzu konnten im Rahmen dieser Arbeit keine wissenschaftlichen Untersuchungen gefunden werden.

Die Alternative zur Verwendung eines einzelnen IR-Bildes aus dem Experiment ist die **iterative Rekonstruktion der Defektgeometrie** im Rahmen einer numerischen Simulation. Dabei erfolgt zunächst eine grobe Annahme der Geometrie einer innenliegenden Schädigung und ein iteratives Abgleichen und Anpassen des numerischen Modells mit den experimentellen Messdaten. Die Ergebnisse dieser Methoden sind grundsätzlich genauer als die Verwendung einzelner Rohbilder, weshalb sich in den letzten Jahren viele Autoren damit beschäftigt haben, u.a. in [130, 131]. Ein großer Nachteil der Rekonstruktionsmethoden sind die langen Rechenzeiten, die mit zunehmender Komplexität der Defektgeometrie ansteigen. Durch Optimierungsprozesse und immer bessere Rechenleistungen können sie zwar verkürzt werden, sind aber immer noch vergleichsweise hoch, wie aktuelle Forschungsarbeiten zeigen [132]. In der Praxis kann dies durchaus problematisch sein und den Einsatz dieser Methode einschränken.

Darüber hinaus scheinen sich viele Publikationen mit der lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten mit Hilfe der IRT zu befassen, untersuchen dabei aber lediglich den Einfluss unterschiedlicher lateraler Defektgrößen auf ihre Detektierbarkeit unter Annahme isotroper Materialien [133] oder konzentrieren sich auf das Aspektverhältnis (Durchmesser/Tiefe) der Defekte unter Verwendung glasfaserverstärkter Proben mit nicht so stark ausgeprägter Anisotropie [99]. Andere präsentieren entweder analytische [24] oder numerische [134] Modelle zur Bestimmung optimaler experimenteller Parameter in Abhängigkeit von Größe und Tiefe von Defekten für eine verbesserte Detektierbarkeit, führen aber deren lateral orts aufgelöste Quantifizierung nicht durch. Zudem wird damit das a priori Wissen über die Beschaffenheit des zu detektierenden Defektes vorausgesetzt, was in der Praxis normalerweise nicht vorhanden ist.

In Kapitel 2.4.2 werden Methoden zur Verbesserung des SNR und der Tiefenreichweite vorgestellt. Während die qualitative Detektion mit PPT schnell und einfach ist, ist die quantitative Charakterisierung schwierig [115], da auch bei dieser Methode der laterale Wärmefluss für einen verschwommenen Randeffect sorgt, der sich je nach gewählter Parameterkombination unterschiedlich ausprägt [135]. In einer früheren Studie wurde der Einfluss der Sequenzlänge und der Startzeit für die DFT auf das resultierende SNR untersucht und gezeigt, dass die scheinbare Größe bei künstlichen Defekten signifikant variiert [136]. Das Anwenden der bewährten FWHM Methode im Anschluss an die Transformation mit PPT ohne Optimierung führt demnach auch bei dieser Methode zu einer Fehlinterpretation der realen Defektgröße. Es existieren bisher keine Arbeiten (mit Ausnahme der Publikation [126]), die den Einfluss der relevanten Parameter der PPT auf die Bestimmung der realen Schädigungsgröße in

kohlenstofffaserverstärkten FKV untersuchen. Demnach ist auch unklar, wie groß der Messfehler ist und wie dieser reduziert werden kann.

**Zwischenfazit:** *Gängige Methoden zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung von Defekten basieren auf der Auswertung von IR-Bildern, was die Reichweite der Tiefe einschränkt. Alternativ wird eine Rekonstruktion der Messergebnisse durchgeführt, was zeitintensiv und beschränkt bzgl. der Geometrie ist. Durch die Auswertung von Phasenbildern kann die Tiefenreichweite erhöht werden. Allerdings hängt die scheinbare laterale Ausprägung der Schädigung in den Phasenbildern von den gewählten Auswerteparametern ab. Zur Zeit existieren keine Arbeiten, die diesen Einfluss untersuchen und einen Messfehler angeben.*

Daraus resultieren folgende sich auf die lateral orts aufgelöste Quantifizierung von Defekten beziehende Fragen:

- Bis zu welcher Tiefe ist eine zuverlässige Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie nach erfolgter Transformation möglich?
- Welchen Einfluss haben die Mess- und Auswerteparameter der PPT auf die Bestimmung der lateralen Ausdehnung innenliegender Defekte?
- Wie groß ist die Messabweichung bei der lateralen Quantifizierung nach erfolgter Transformation?

### 3 Ziele und Vorgehensweise

Das überordnete Ziel dieser Arbeit ist die **Darstellung und Erweiterung des Potentials der passiven und aktiven Thermografie zur lateral orts aufgelösten und zeitaufgelösten Quantifizierung von Defekten in kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen anhand von IR-Bildern, Amplituden- und Phasenbildern.** Während die Quantifizierung anhand der IR-Bilder zum Stand der Technik gehört, wird im Rahmen dieser Arbeit das Vorgehen zur Quantifizierung mit Hilfe der Amplituden- und Phasenbilder neu erarbeitet. Dadurch soll künftig auch die lateral orts aufgelöste Quantifizierung tieferliegender Defekte im Rahmen der aktiven Thermografie sowie die Beschreibung der Degradation und die direkte Darstellung der gesamten Schädigungsfläche im Rahmen der passiven Thermografie ermöglicht werden.

Zur Darstellung des Potenzials der passiven und aktiven Thermografie und zur Ausarbeitung der Auswertemethodik anhand der Amplituden- und Phasenbilder werden nachfolgend drei Anwendungsfälle definiert, die gleichzeitig die weiteren Arbeitspakete und Kapitel dieser Arbeit darstellen:

**Versuch 1:** lateral orts aufgelöste Quantifizierung von Defekten an dünnwandigen Strukturbauteilen im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung mit aktiver Thermografie,

**Versuch 2:** lateral orts aufgelöste und zeitaufgelöste Quantifizierung von Schädigungsereignissen im Rahmen der In-situ-Überwachung mit passiver Thermografie während der quasi-statischen Zugprüfung und

**Versuch 3:** lateral orts aufgelöste und zeitaufgelöste Quantifizierung von Impactschädigungen im Rahmen der In-situ-Überwachung mit passiver Thermografie und im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung mit aktiver Thermografie.

Bei allen Versuchen erfolgt die Quantifizierung sowohl anhand der IR-Bilder, was weitestgehend dem Stand der Technik entspricht, als auch anhand der Amplituden- bzw. Phasenbilder. Für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung der künstlichen Delaminationen wird die FWHM Methode eingesetzt, die auf der Verwendung von Querschnittsprofilen basiert. Die Quantifizierung der Impactschädigungen erfolgt hingegen mit Hilfe eines Schwellwertverfahrens. Dieses basiert auf der Ermittlung einer Referenzgröße im Referenzbereich und der Betrachtung der davon abweichenden

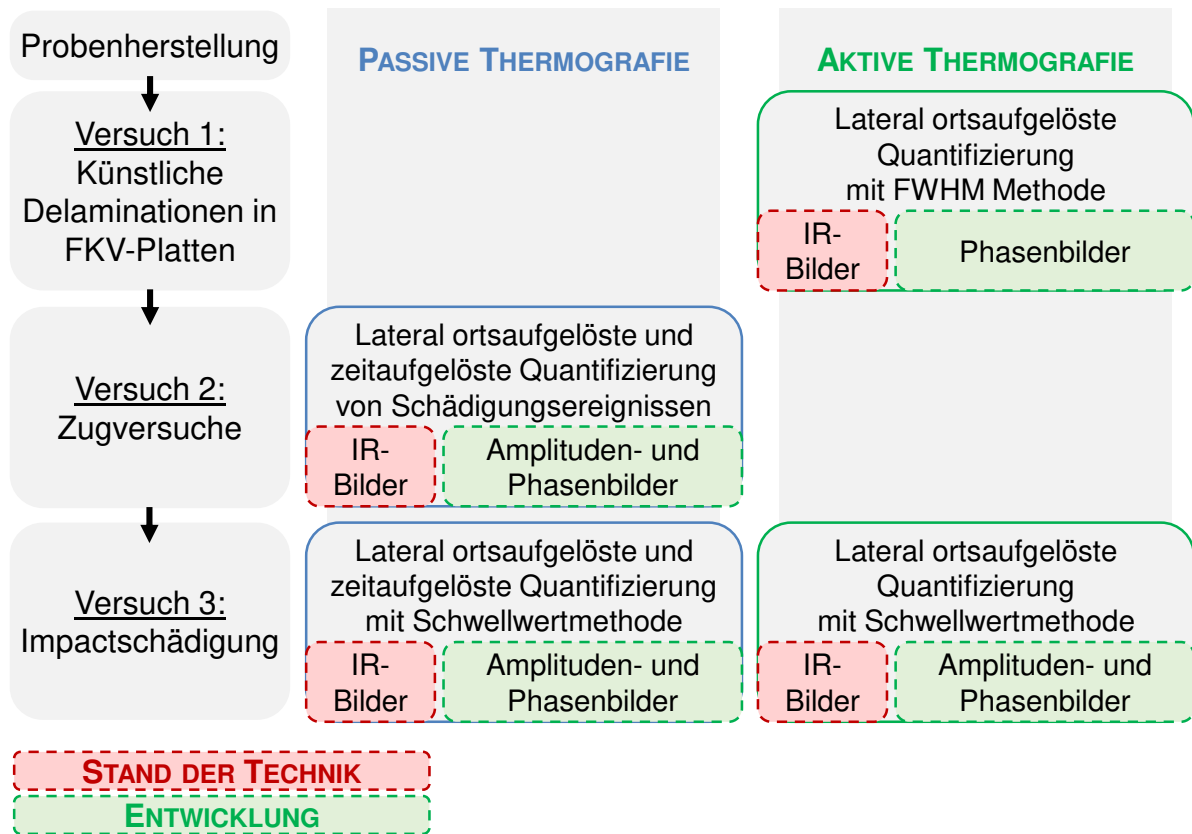


Abb. 3.5: Schematische Darstellung der Vorgehensweise.

Größen im Messbereich, welche als Schädigung interpretiert werden. Abbildung 3.5 zeigt schematisch die weitere Vorgehensweise.

Im nachfolgenden Kapitel 4 wird zunächst der bei allen drei Versuchen gleichbleibende Teil der Probenherstellung vorgestellt. In Kapitel 5 erfolgt anschließend die Untersuchung der lateral ortsaufgelösten Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie an dünnwandigen Strukturbauteilen mit definierten künstlichen Defekten, wobei Folien verwendet werden. Dabei wird der Einfluss der Mess- und Auswerteparameter auf die Messabweichung bei der lateral ortsaufgelösten Quantifizierung untersucht (**Versuch 1**). Anschließend erfolgt in Kapitel 6 die Untersuchung der Möglichkeiten zur lateral ortsaufgelösten und zeitlichen Quantifizierung der Schädigungsereignisse im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung unter Verwendung der passiven Thermografie (**Versuch 2**). Zuletzt wird in Kapitel 7 die passive und aktive Thermografie zur lateral ortsaufgelösten und zeitaufgelösten Quantifizierung von Impactschädigungen eingesetzt (**Versuch 3**).

## 4 Probenherstellung

In diesem Kapitel wird der allgemeingültige Teil der Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Proben beschrieben. Dabei wird zunächst das Material, die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Materialeigenschaften und die verwendeten Lagenaufbauten vorgestellt. Die versuchsspezifische Probenpräparation, wie z.B. die Einbringung künstlicher Defekte ist jeweils zu Beginn von Kapitel 5, 6 und 7 zu finden.

### 4.1 Probenübersicht und Lagenaufbau

Im Rahmen dieser Arbeit werden insgesamt drei verschiedene Probenarten und drei verschiedene Lagenaufbauten verwendet, vgl. Abbildung 4.6 und 4.7. Das Potenzial der lateral orts aufgelösten Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie wird an strukturellen Bauteilen mit definierten künstlichen Defekten ermittelt (**Versuch 1**). Eine der dafür verwendeten Platten ist in Abbildung 4.6 (a) dargestellt. Es werden hierfür zwei Lagenaufbauten verwendet. Zur Darstellung eines möglichst extremen Falls im Hinblick auf die Anisotropie wird ein unidirektionaler Lagenaufbau (UD)  $(0)_{13}$  verwendet, dargestellt in Abbildung 4.7 (a). Zusätzlich erfolgt die Untersuchung an einem aus der Luftfahrt bekannten multidirektionalen Lagenaufbau (MD)  $(45/-45/45/-45/90/0/\overline{90})_s$  [137], welcher in Abbildung 4.7 (b) dargestellt ist. Durch die Verwendung eines Abreißgewebes an der Ober- und Unterseite der Probe ist eine strukturierte Oberfläche erzeugt worden. Die Dicke der UD Probe beträgt  $1,59 \pm 0,02$  mm und der MD Probe  $1,51 \pm 0,02$  mm.

Im zweiten Schritt erfolgt die Detektion von realen Schädigungsereignissen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung (**Versuch 2**), wobei das Potenzial der passiven Thermografie durch die gezielte Erzeugung und Visualisierung von Zwischenfaserbrüchen und Faserbrüchen gezeigt wird. Dabei ist für die Ausarbeitung und Validierung der Methode wichtig, dass die Tiefenposition der Schädigung bekannt ist, weshalb ein vierlagiges Laminat mit dem Lagenaufbau  $(0/90)_s$  bzw.  $(90/0)_s$  verwendet wird. Damit ist es möglich, die Zwischenfaserbrüche gezielt in eine der äußeren bzw. in die inneren Lagen einzubringen. Die für diesen Versuch verwendeten taillierten Zugproben sind in Abbildung 4.6 (b) und der verwendete Lagenaufbau in Abbildung 4.7 (c) dargestellt. Zusätzlich zur passiven Thermografie erfolgt das Monitoring der Schädigungsereignisse mit Hilfe der Schallemissionsanalyse und der digitaler Bildkorrelation. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind nicht Teil dieser Arbeit und werden in [138] diskutiert. Aus Gründen der Kompatibilität zur Schallemissionsanalyse wurde die Oberfläche der Zugproben glatt gelassen, d.h. es wurde kein Abreißgewebe verwendet. Die Dicke der Proben beträgt  $0,53 \pm 0,01$  mm.



Im dritten Schritt wird die zeitaufgelöste und lateral orts aufgelöste Quantifizierung im Rahmen der passiven und aktiven Thermografie an realen Impactschädigungen durchgeführt (**Versuch 3**). Hierzu werden Proben in Anlehnung an den *engl.* Compression after Impact Versuch vorbereitet, siehe Abbildung 4.6 (c). Dabei kommt ausschließlich der multidirektionale Lagenaufbau zum Einsatz, siehe Abbildung 4.7 (b). Die Dicke der Proben beträgt  $1,70 \pm 0,01$  mm.

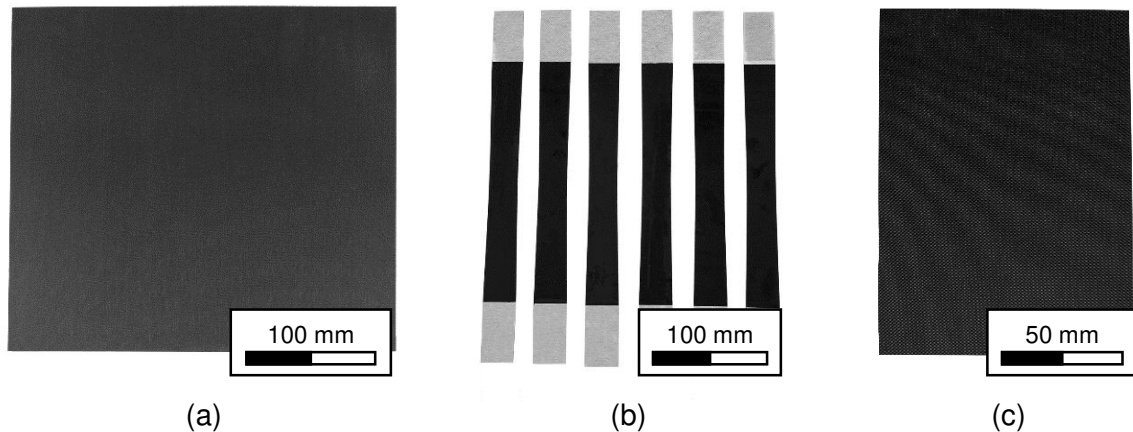


Abb. 4.6: (a) Platten mit innenliegenden künstlichen Defekten in Form von FEP-Folien (verwendet in Kapitel 5), (b) taillierte Zugproben für die quasi-statische Zugprüfung (verwendet in Kapitel 6) und (c) fehlerfreie Platten für die Einbringung von Impactschädigungen (verwendet in Kapitel 7).

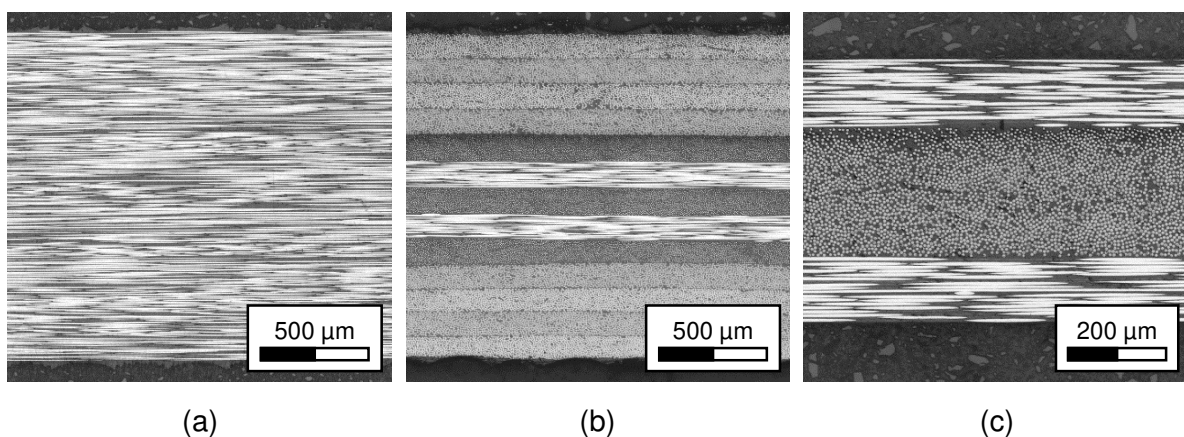


Abb. 4.7: Mikroskopieaufnahmen von verwendeten Lagenaufbauten. (a) Unidirektionaler Lagenaufbau  $(0)_{13}$  mit strukturierter Oberfläche (verwendet in Kapitel 5), (b) multidirektionaler Lagenaufbau  $(45/-45/45/-45/90/0/90)_s$  mit strukturierter Oberfläche (verwendet in Kapitel 5 und 7) und (c)  $(0/90)_s$  mit glatter Oberfläche an Unter- und Oberseite für die quasi-statische Zugprüfung (verwendet in Kapitel 6).

## 4.2 Material und Materialeigenschaften

Als Material wurde ein vorimprägniertes unidirektionales Halbzeug (Cycom 977-2-35-12kHTS-134-1500) der Firma Solvay [139] verwendet. Dieses besteht aus der Kohlenstofffaser Teijin Tenax HTS40 [140] und dem Epoxidharz Cycom 977-2 [141], welches als Matrixmaterial eingesetzt wird. Das Material wird u.a. für Primär- und Sekundärstrukturbauteile in der Luftfahrt (Rumpf, Seiten- und Höhenleitwerke, Klappen, etc.), für Raumstrukturen und für kryogene Behälter verwendet [141], was eine hohe Relevanz des Materials begründet. Zudem wurde es in zahlreichen Veröffentlichungen eingesetzt und charakterisiert [122, 142, 143], weshalb auf eine breite Datenbasis zurückgegriffen werden kann. Insbesondere die für das Verständnis der Wärmeleitungsprozesse erforderlichen thermischen Eigenschaften können [122] entnommen werden. Demnach beträgt die Wärmeleitfähigkeit  $k$  eines unidirektionalen Laminats in Faserrichtung etwa  $7 \text{ W}/(\text{m K})$  und senkrecht zur Faserrichtung etwa  $0,8 \text{ W}/(\text{m K})$  [122]. Weitere relevante Materialeigenschaften, wie Dichte  $\rho$ , Faservolumengehalt (FVG) und spezifische Wärmekapazität  $c_p$  sind in Tabelle 4.2 gezeigt. Die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  wurde unter Verwendung der Saphir-Methode an einer DSC (*engl.* Differential Scanning Calorimetry) nach der Norm DIN 51007 gemessen und im Bereich von 30 bis 50 °C ausgewertet. Dies entspricht in etwa dem Temperaturbereich, der bei der ZfP mit IRT realisiert wird. Die Bestimmung des FVG erfolgte unter Verwendung eines kalibrierten Mikroskops (Leica DM6000M) und der Software Leica Application Suite (Version 4.5). Schwankungen der Materialeigenschaften können vor allem auf die unterschiedlichen Positionen der Probenentnahme zurückgeführt werden.

Tab. 4.2: Gemessene Materialeigenschaften der verwendeten Proben.

| Eigenschaft                 | UD Platte<br>(Versuch 1) | MD Platte<br>(Versuch 1) | Zugproben<br>(Versuch 2) | Impactproben<br>(Versuch 3) |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,629 ± 0,002            | 1,633 ± 0,002            | 1,574 ± 0,004            | 1,588 ± 0,002               |
| FVG (%)                     | 61,05 ± 0,54             | 54,61 ± 3,32             | 53,60 ± 3,32             | 55,23 ± 6,72                |
| $c_p$ (J/(kg K))            | 929 ± 19                 | 864 ± 18                 | 919 ± 20                 | 966 ± 18                    |

## 4.3 Herstellung im Prepreg-Autoklav-Verfahren

Zur Sicherstellung einer hohen und reproduzierbaren Qualität wurde im Rahmen dieser Arbeit das Prepreg-Autoklav-Verfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren ist auch die Einarbeitung künstlicher Fehlstellen in Form von Folien möglich. Für die

Herstellung der Probekörper wurde das unidirektionale Halbzeug in  $300 \times 300 \text{ mm}^2$  große Stücke für Versuch 1 bzw. in  $600 \times 600 \text{ mm}^2$  große Stücke für die Versuche 2 und 3 geschnitten. Anschließend wurden die Lagen gemäß der Orientierung auf einer polierten und eingetrennten Edelstahlplatte platziert (Trennmittel Frekote 770-NC) und mit einer Edelstahlplatte abgeschlossen. Um es zu ermöglichen, die passive Thermografie mit der Schallemissionsanalyse zu kombinieren, wurden die Proben für den Versuch 2 ohne Abreissgewebe gefertigt. Damit kann die für eine gute Anbindung der Schallemissionssensoren erforderliche glatte Oberfläche gewährleistet werden. Bei den Proben für Versuch 1 und 3 wurde jeweils eine Lage Abreissgewebe Tygavac 60BR [144] zwischen den Edelstahlplatten und dem Laminat platziert. Die Lamine wurden anschließend in einem Vakuumsack (Druck:  $< 0,1 \text{ mbar}$ ) bei  $180 \text{ °C}$  und  $7 \text{ bar}$  für  $3 \text{ Stunden}$  im Autoklav ausgehärtet. Nähere Informationen zum typischen Aufbau in einem Autoklaven sind in [2, 7] zu finden. Der verwendete Autoklavenzzyklus unter Angabe von Temperatur  $T$  ( $\text{°C}$ ) und Autoklavendruck  $p$  (bar) in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  (min) ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

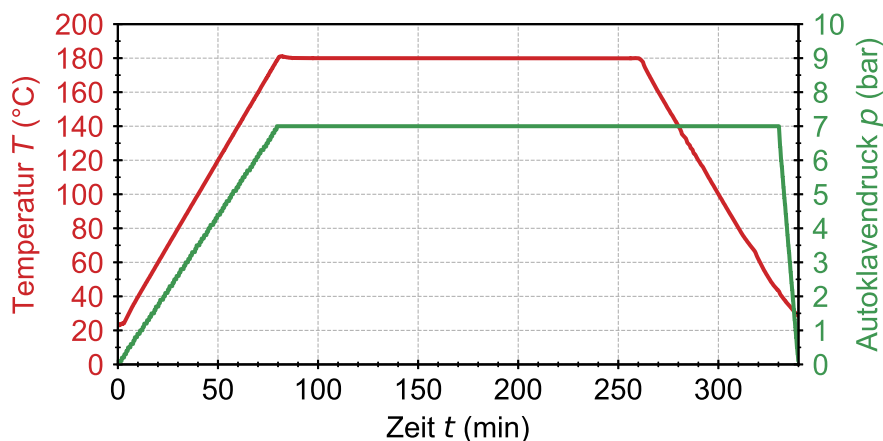


Abb. 4.8: Verwendeter Autoklavenzzyklus zur Herstellung der Proben im Prepreg-Autoklav-Verfahren. Die rote Kurve entspricht der Temperatur  $T$  ( $\text{°C}$ ) und die grüne Kurve dem Autoklavendruck  $p$  (bar), jeweils in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  (min) dargestellt.

## 5 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung von Defekten im Rahmen der aktiven Thermografie

In diesem Kapitel werden die Durchführung der Versuche zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung innenliegender Defekte an dünnwandigen Strukturbauteilen unter Verwendung der aktiven Thermografie beschrieben, die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Als aktive Thermografiemethode wird die Puls-Phasen Thermografie eingesetzt. Um den Einfluss auf die Quantifizierung zu untersuchen, wird in diesem Versuch eine automatisierte vollfaktorielle Auswertung der Ergebnisse durchgeführt. Im Fokus steht die Quantifizierung der Defekte anhand der Phasenbilder, welche eine deutlich höhere Tiefenreichweite im Vergleich zur herkömmlichen Quantifizierung anhand der unbearbeiteten IR-Bilder erwarten lässt. Problematisch ist dabei die Wahl der richtigen Parameter zur Reduzierung des Messfehlers. Am Ende dieses Kapitels werden die Ergebnisse mit der konventionellen Methode zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand von IR-Bildern verglichen. Teile der hier vorgestellten Ergebnisse werden in [126] vorgestellt und diskutiert.

### 5.1 Probengeometrie und -präparation

Das allgemeingültige Vorgehen der Probenherstellung im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 4 beschrieben. In diesem Kapitel wird die Einarbeitung definierter künstlicher Defekte vorgestellt. Für die Untersuchung der Möglichkeiten zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie ist es wichtig, die genauen Charakteristika der eingebrachten Schädigung, wie etwa die laterale Ausdehnung sowie die Position in der Tiefe, zu kennen. Aus diesem Grund werden Folieneinlagen aus Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer (FEP) mit einer Nenndicke von  $20\ \mu\text{m}$  zwischen den Schichten des Laminats eingearbeitet. Die Dichte  $\rho$  der FEP Folie beträgt etwa  $2,11\text{--}2,17\ \text{g/cm}^3$ , die Wärmeleitfähigkeit  $k$  beträgt  $0,195\ \text{W}/(\text{m K})$  und die spezifische Wärmekapazität  $c_p$  beträgt  $1172\ \text{J}/(\text{kg K})$  [145].

Um reproduzierbare Größen und saubere Kanten zu erhalten, wurden die Folien mit Hilfe von Klingen und Stempeln ausgestanzt und vor dem Einlegen mit einem kalibrierten Mikroskop (Leica DM6000M) vermessen. Abbildung 5.9 zeigt die drei Arbeitsschritte: (a) Ausstanzen der Folien, (b) Vermessen der lateralen Ausdehnung der Folien und (c) Einlegen der Folien während des Herstellungsprozesses zwischen den Laminatlagen. Die lateralen Größen der Folien inkl. Standardabweichungen sind in Tabelle 5.3 angegeben.

Die Auswahl der minimalen Defektgröße orientiert sich an der maximal zulässigen

Tab. 5.3: Tatsächliche Größe der in die Platten eingearbeiteten künstlichen Defekte (FEP-Folien). Die Größen wurde mit einem kalibrierten Mikroskop (Leica DM6000M) bestimmt.

| Art des künstlichen Defekts              | Gemessene laterale Größe in mm<br>(Länge oder Durchmesser) |
|--|--|
| Eckige Folie $6 \times 6 \text{ mm}^2$   | $6,20 \pm 0,05$  |
| Eckige Folie $10 \times 10 \text{ mm}^2$ | $10,20 \pm 0,06$   |
| Eckige Folie $15 \times 15 \text{ mm}^2$ | $15,18 \pm 0,06$   |
| Runde Folie 6 mm                         | $5,96 \pm 0,07$  |
| Runde Folie 10 mm                        | $10,18 \pm 0,14$   |
| Runde Folie 15 mm                        | $15,15 \pm 0,10$   |

Defektgröße in der Luftfahrt, wonach ein Defekt die laterale Ausdehnung von 6 mm in eine Richtung nicht übersteigen darf [146]. Zur Untersuchung des Einflusses der Defektgröße und zur Ermittlung der Detektionsgrenzen wurden zudem zwei weitere Defektgrößen 10 mm und 15 mm verwendet, jeweils in eckiger und runder Form. Als Positionierhilfe wurde eine Schablone eingesetzt. Die künstlichen Defekte wurden innerhalb einer Ebene versetzt voneinander positioniert, sodass sie möglichst weit auseinander liegen und damit eine gegenseitige Beeinflussung im interessierenden Messbereich ausgeschlossen werden kann. Die Positionen sind in Abbildung 5.10 dargestellt. Die verwendeten Folien sind aufgrund ihrer thermischen Eigenschaften

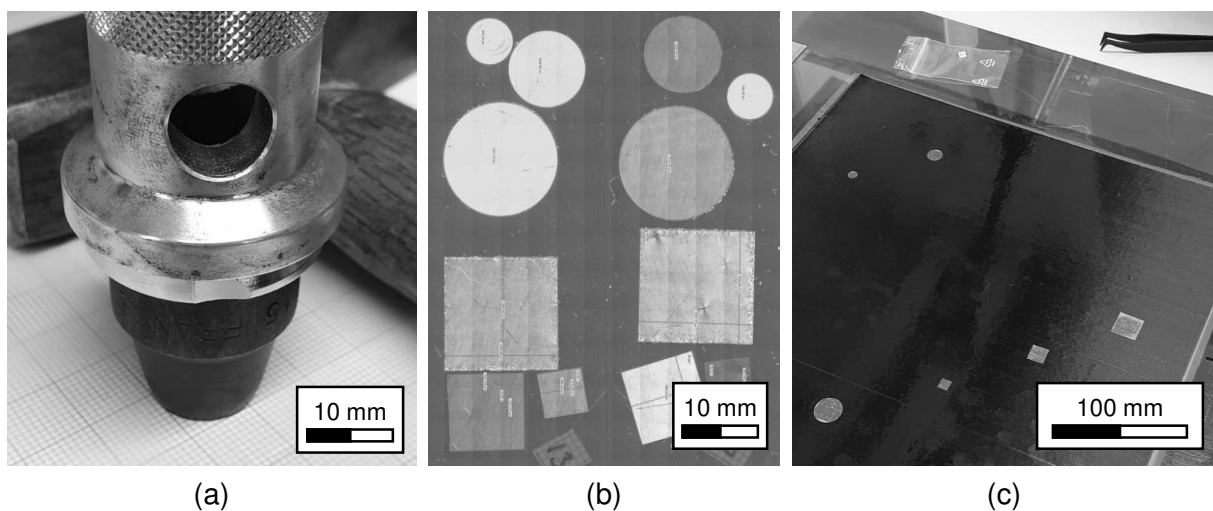


Abb. 5.9: (a) Stanzwerkzeug zum Ausstanzen der Folien. (b) Vermessen der Folien an einem kalibrierten Mikroskop. (c) Platzieren der Folien während des Herstellungsprozesses.

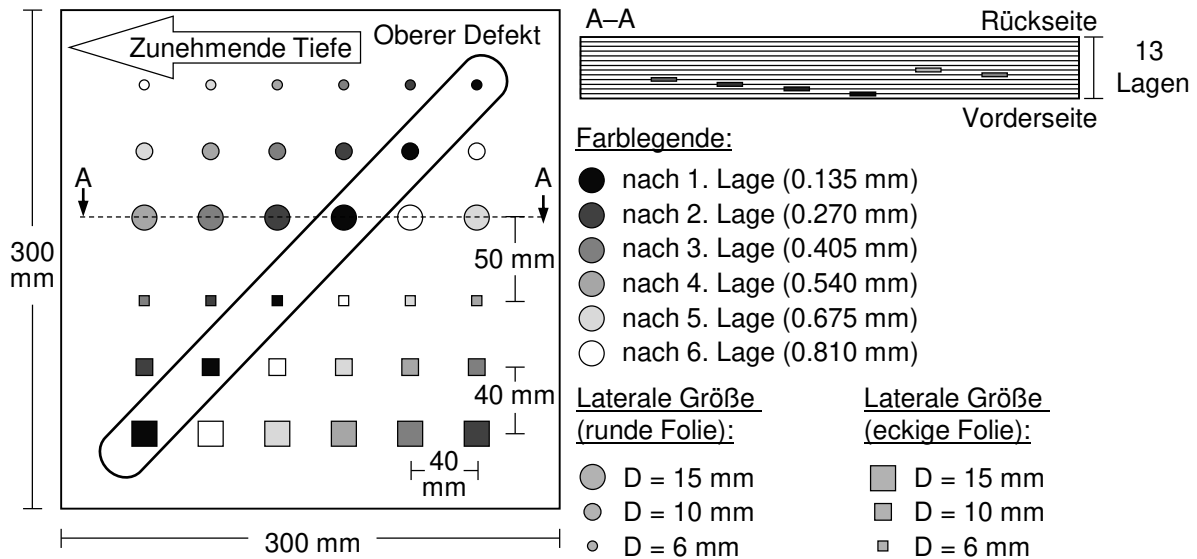


Abb. 5.10: Schematische Darstellung der Probengröße und der Lage von künstlichen Defekten aus FEP-Folieneinlagen in den Probekörpern. Dargestellt ist die Draufsicht (links) und Schnittdarstellung (rechts) zusammen mit den theoretischen Positionen, Formen und Größen.

schwieriger zu detektieren als Luft, weshalb sie zur künstlichen Nachbildung von Delaminationen verwendet werden können [24]. Durch diese Konfiguration stehen jeweils sechs Kombinationen von unterschiedlicher Form und Größe in zwölf verschiedenen Tiefen von jeder Seite zur Verfügung. Die Untersuchung dieser Arbeit beschränkt sich allerdings auf die Quantifizierung der Defekte, die nur bis zur sechsten Lage möglich ist. Eine Betrachtung der Rückseite wird an dieser Stelle daher nicht durchgeführt.

Nach dem Aushärten des Laminats wurden die zwei Proben (UD und MD) mit Hilfe einer Labortrennsäge unter Verwendung eines diamantbesetzten Sägeblattes auf das Endmaß  $275 \times 290 \text{ mm}^2$  zugeschnitten und anschließend bis zur Versuchsdurchführung bei  $23 \text{ °C}$  und  $50 \%$  relativer Luftfeuchtigkeit gemäß DIN EN ISO 291 gelagert. Vor Durchführung der Versuche wurde sichergestellt, dass die Änderung in der Masse an zwei aufeinander folgenden Tagen kleiner als  $0,01 \%$  ist. Die Dicke der UD Probe beträgt  $1,59 \pm 0,02 \text{ mm}$  mit einem Faservolumengehalt von etwa  $61,05 \pm 0,54 \%$  und die Dicke der MD Probe  $1,51 \pm 0,02 \text{ mm}$  mit einem Faservolumengehalt von etwa  $54,61 \pm 3,32 \%$ .

## 5.2 Experimentelle Untersuchung

### 5.2.1 Versuchsaufbau der Impulsthermografie

Für die Durchführung der Versuche wurde die Impulsthermografie in Reflexionsanordnung gemäß Abbildung 5.11 eingesetzt. Die Oberflächentemperatur wurde während des Versuchs mit einer IR-Kamera Image IR 9410 BI S der Firma InfraTec GmbH (Dresden, Deutschland) [147] mit einer geometrischen Auflösung von  $1280 \times 1024$  px und einer thermischen Empfindlichkeit von  $< 20$  mK durchgeführt. Es wurde ein 50 mm Teleobjektiv verwendet und die IR-Kamera in einem Abstand von 1320 mm vor der Probe platziert, woraus eine geometrische Auflösung von 0,27 mm/px resultiert. Zur Bestimmung der lateralen Auflösung wurden die äußeren Grenzen der Probe, deren Größe mit visuellen Messinstrumenten vermessen werden kann, als Referenz verwendet. Die Aufnahmezeit betrug 30 s, wobei ein Pretrigger von 0,1 s (18 Bildern) eingestellt wurde. Zur Datenerfassung wurde die kommerzielle Software IRBIS Professional der Firma InfraTec GmbH [147] eingesetzt. Die Daten wurden in dem Containerformat irb zur Verfügung gestellt.

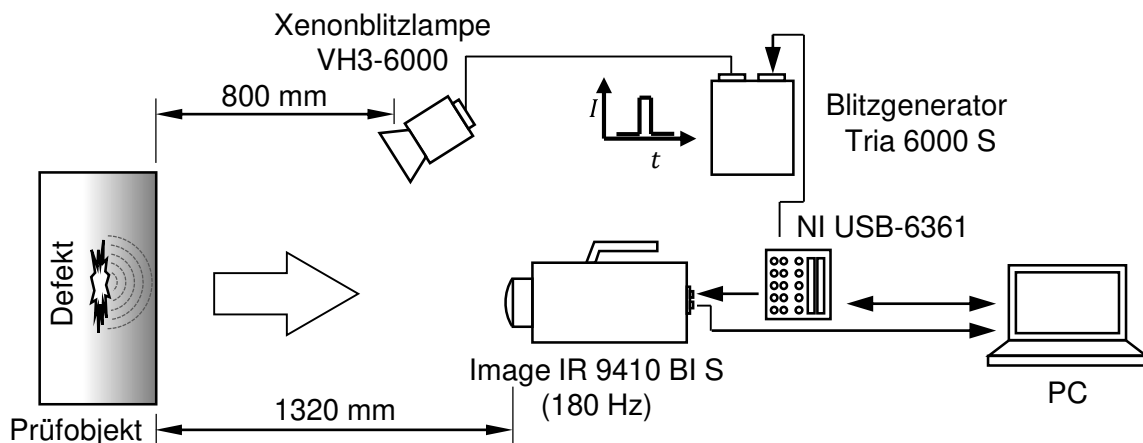


Abb. 5.11: Prüfaufbau der Impulsthermografie in Reflexionsanordnung.

Als thermische Anregungsquelle wurde eine leistungsstarke Xenonblitzlampe (VH3-6000) in Kombination mit einem Blitzgenerator (Tria 6000 S) der Marke HENSEL-VISIT GmbH & Co. KG [148] mit einer elektrischen Gesamtenergie von 6 kJ verwendet und etwa 800 mm vor der Probe in Reflexionsanordnung platziert. Die Messungen wurden in einem Labor bei einer Raumtemperatur von  $23$  °C durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde mit einem in der LabVIEW-Umgebung erstellten Programm gesteuert. Bei LabVIEW handelt es sich um eine von der Firma National Instruments [149] zur Verfügung gestellten Programmierumgebung. Zur externen Kommunikation wurde ein Controller NI USB-6361, ebenfalls von der Firma National Instruments [149], verwendet. Um eine konsistente Datenerfassung zu gewährleisten, wurde die IR-Kamera mit der An-

regungsquelle synchronisiert.

## 5.2.2 Auswertung mit Puls-Phasen Thermografie

Die in dieser Arbeit verwendeten Algorithmen sind (mit Ausnahme der Prüfstandsteuerung der aktiven Thermografie) vollständig in einer Python Umgebung in der Version 3.7 umgesetzt worden [150]. Dabei kamen u.a. die Pakete NumPy, Pandas und Matplotlib zum Einsatz.

Zur Realisierung eines einfachen und flexiblen Datenzugriffs, wurden die Rohdaten im ersten Schritt der Auswertung vom herstellereigenen irb Format in das frei verfügbare HDF5 Format [151] konvertiert. Dieses ist für das schnelle Speichern und Auslesen großer Datenmengen optimiert. Im Rahmen der Puls-Phasen Thermografie wurde das dreidimensionale Rohdaten-Array, bestehend aus  $x$ -Richtung,  $y$ -Richtung und Zeit  $t$ , pixelweise in den Frequenzbereich überführt, wobei die von Numpy zur Verfügung gestellte FFT Funktion verwendet wurde. Diese basiert auf [152] und ermöglicht eine effiziente und schnelle Berechnung der DFT. Die auf diese Weise extrahierten Amplituden- und Phasenwerte jedes Pixels wurden anschließend zu einem Stapel von Amplitudenbildern bzw. Phasenbildern zusammengesetzt. Der verwendete Algorithmus ist in Abbildung 5.12 schematisch dargestellt.

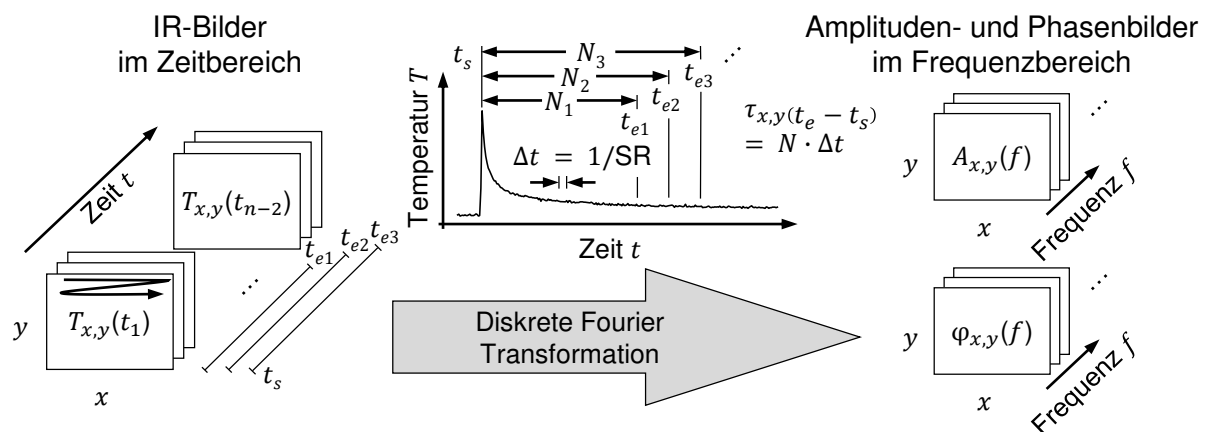


Abb. 5.12: Puls-Phasen Auswertung durch pixelweise Überführung der Zeitsignale in das Frequenzspektrum und Rekonstruktion zu Amplituden- und Phasenbildern. Die Länge des Auswertefensters  $N$  ist über den Endzeitpunkt  $t_e$  anpassbar.

Wie aus Kapitel 2.4 hervorgeht ist die Darstellung der Kanten ebenso wie der Kontrast der Schädigung abhängig von den gewählten Auswerteparametern, insbesondere von der Länge des Auswertefensters  $N$ . Um den Einfluss dieses Effekts in der Praxis zu untersuchen, wurde in diesem Kapitel die Länge des Auswertefensters  $N$ , welche



als Anzahl der Bilder angegeben wird, systematisch von 100 bis 1500 Bildern mit einem Intervall von 100 Bildern variiert. In Anlehnung an [68] wurde der Startzeitpunkt  $t_s$  konstant auf den Zeitpunkt gesetzt, bei dem die maximale Temperaturschwingung zu beobachten war. Für die Auswertung der Phasenbilder wurden alle resultierenden Frequenzen  $f$  von 0 bis 5 Hz berücksichtigt.

### 5.2.3 Durchführung der lateral orts aufgelösten Quantifizierung

Im Fokus dieses Kapitels steht die lateral orts aufgelöste Quantifizierung unter Verwendung der Phasenbilder. Zum Vergleich wird die konventionelle Quantifizierung anhand der IR-Bilder durchgeführt. Dabei wird jeder Defekt separat untersucht, weshalb der gesamte Datensatz zunächst in einzelne Bereiche, künftig als ROI (*engl.* Region of Interest) bezeichnet, aufgeteilt wird, die zentral um jeden Defekt herum angeordnet sind. Insgesamt sind pro Probe 36 ROI-Bereiche vorhanden, wobei jeder ROI aus  $147 \times 152$  px besteht, was etwa  $39,69 \times 41,04$  mm<sup>2</sup> entspricht. Im Vorfeld erfolgt eine Präparation der Daten wie in Schritt 1 und 2 beschrieben. Erst dann wird die Quantifizierung jedes ROI wie in Schritt 3 und 4 beschrieben durchgeführt. Das exemplarische Vorgehen wird nachfolgend anhand des Phasenbildes eines eckigen Defektes der Größe  $15 \times 15$  mm<sup>2</sup> in einer Tiefe von 0,27 mm in der UD Probe gezeigt. Die Quantifizierung anhand der IR-Bilder erfolgt komplett nach der gleichen Methodik, mit Ausnahme der in Kapitel 5.2.2 beschriebenen DFT, die in diesem Fall ausbleibt.

**1. Referenzfläche abziehen:** Um Umgebungseinflüsse, wie z.B. eine ungleichmäßige Erwärmung, zu beseitigen, wird in Anlehnung an [82] eine Referenzfläche von den Messdaten abgezogen, vgl. Abbildung 5.13. Während bei [82] die Auswertung im Zeitbereich erfolgt und damit ein IR-Bild eines früheren Zeitpunktes abgezogen werden kann, muss bei der Auswertung der Phasenbilder das Referenzbild erst erstellt werden. In Anlehnung an die Verwendung der Zernike Polynome zur Korrektur von Abbildungsfehlern [153] wird hierfür der defektfreie Randbereich des ROI mit einer Breite von 20 px verwendet und ein zweidimensionales Polynom zweiter Ordnung an die Messwerte des Randbereichs angenähert. Die resultierende Referenzfläche wird schließlich von den Messwerten subtrahiert. Damit hat jedes ROI und jede Parameterkombination eine eigene Referenzfläche, bei der nur noch der durch die Schädigung verursachte Kontrast heraussteht.

**2. Anwendung eines lateralen Filters:** Durch laterale Filterung sollen die Messergebnisse geglättet und das Rauschen reduziert werden, wobei sich hierfür u.a. der Einsatz eines Boxfilters eignet [154]. Demnach kommt ein Boxfilter der Größe  $3 \times 3$  px zum Einsatz, vgl. Abbildung 5.14. Alternativ können an dieser Stelle auch andere Filter, bspw. Medianfilter eingesetzt werden [155].

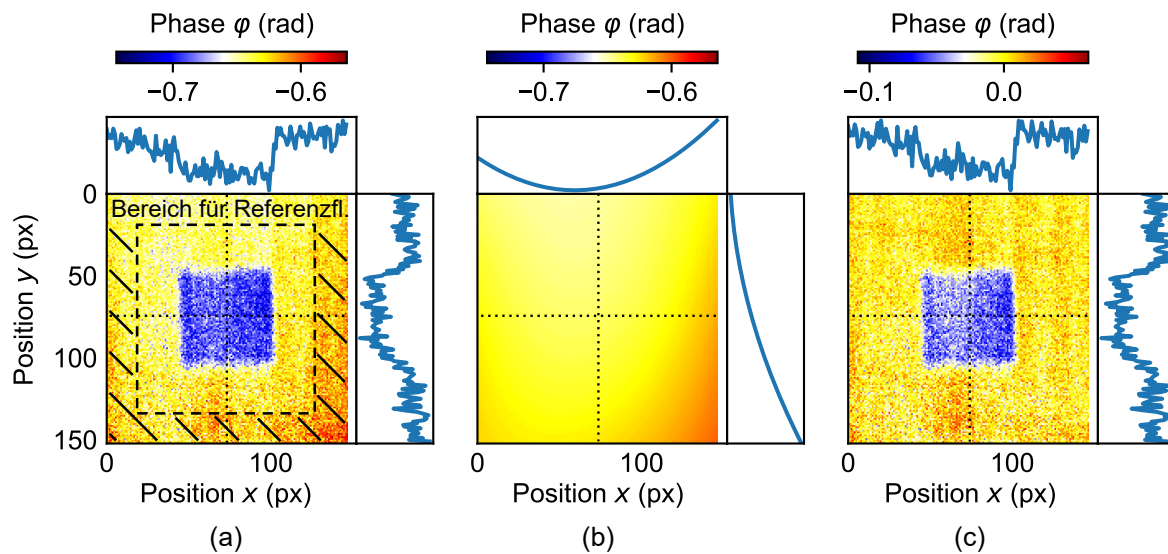


Abb. 5.13: Vorverarbeitung der Daten, vor der lateral orts aufgelösten Quantifizierung des Defektes. (a) Unbearbeitetes Phasenbild des ROI für  $f = 0,9$  Hz ( $N = 200$  Bilder), inkl. Darstellung der für die Referenzfläche verwendeten Messpunkte. (b) Referenzfläche ermittelt durch Anpassung einer zweidimensionalen Polynomfunktion an Referenzmesspunkte. (c) Differenz zwischen Messwerten und Referenzfläche.

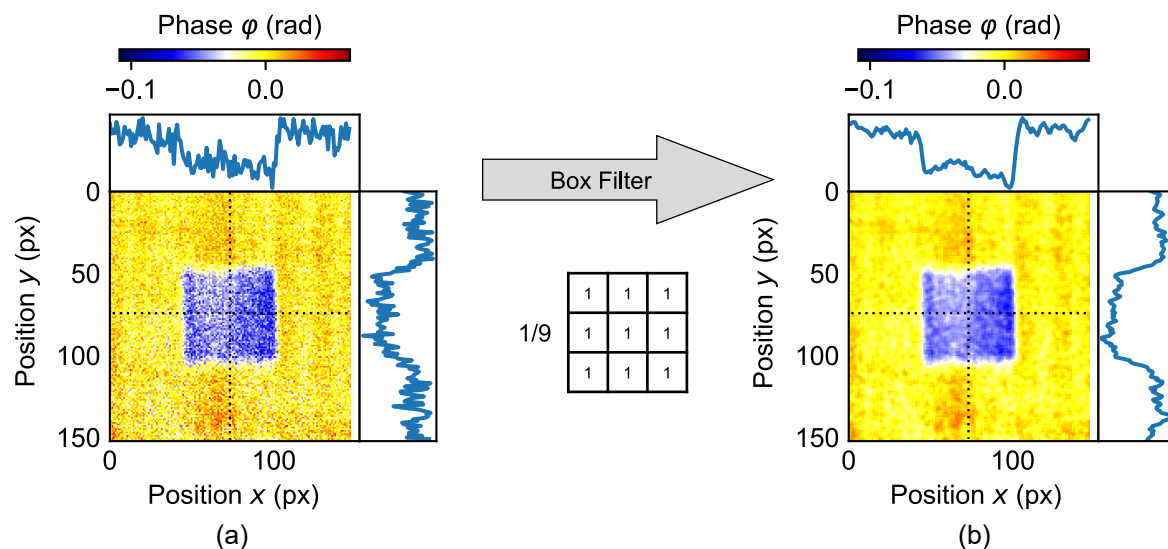


Abb. 5.14: Anwendung eines lateralen Box Filters. (a) Phasenbild nach Abzug der Referenzfläche. (b) Phasenbild nach Anwendung eines lateralen  $3 \times 3$  Box Filters.

**3. Bestimmung des SNR:** Anhand des gefilterten Phasenbildes erfolgt anschließend die Bestimmung des Kontrastes durch Ermittlung des SNR. Dabei wird für jedes ROI

das SNR nach folgender Gleichung berechnet[156]:

$$\text{SNR} = 20 * \log_{10} \left( \frac{|\bar{S}_{sig} - \bar{S}_{ref}|}{\sigma_{ref}} \right) \quad (5.20)$$

wobei  $\bar{S}_{sig}$  den Mittelwert im Signalbereich bzw. im Defektbereich beschreibt. Für die Ermittlung wird eine Fläche von  $6 \times 6$  px in der Mitte des Defekts analysiert.  $\bar{S}_{ref}$  beschreibt den Mittelwert und  $\sigma_{ref}$  die Standardabweichung im Referenzbereich, der als die äußeren 3 px des gesamten ROI Bereichs definiert ist. Die Bereiche sind in Abbildung 5.15 exemplarisch dargestellt. Bei der Berechnung wird keine Unterscheidung hinsichtlich Form und Größe der Defekte getroffen. Aus der Literatur geht hervor, dass Defekte nur detektiert werden können, wenn das SNR größer als 0 dB ist [52, 156]. Daher werden im Folgenden nur Datensätze berücksichtigt, bei denen das SNR oberhalb dieser Grenze liegt. Da in dem vorliegenden Versuch Defekte ab einer Tiefe von 0,81 mm aufgrund eines  $\text{SNR} < 0$  dB nicht detektierbar sind, wird die Auswertung nur von einer Seite durchgeführt (Vorderseite). Die Tiefenreichweite kann durch den Einsatz eines stärkeren Blitzgerätes erhöht werden.

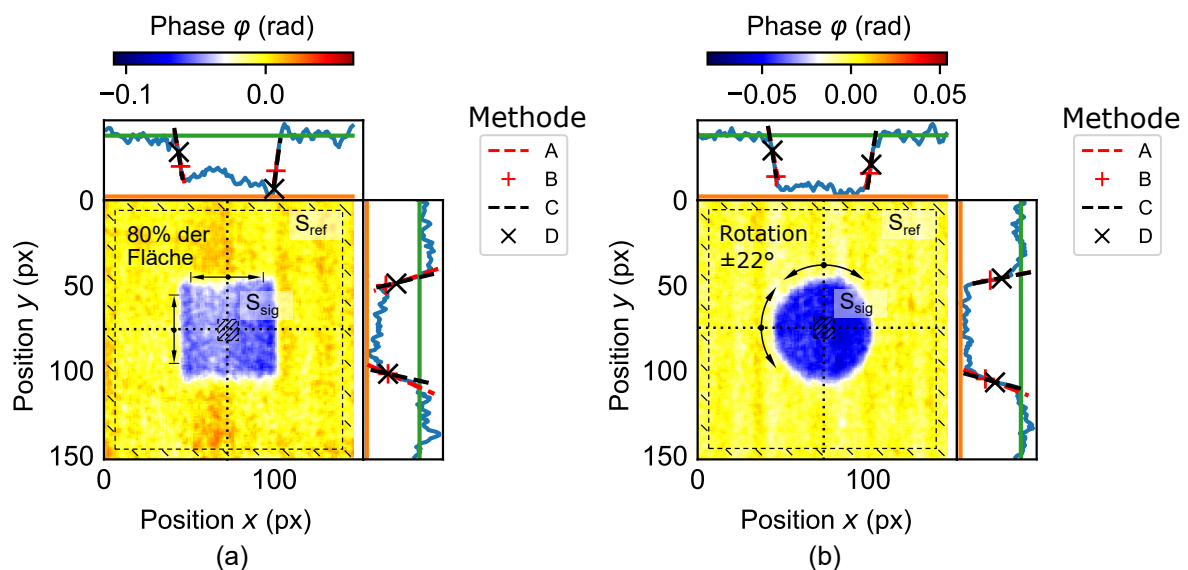


Abb. 5.15: Repräsentative Phasenbilder (a) eines quadratischen und (b) eines runden Defektes in der UD Probe, jeweils mit der Größe  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  in 0,27 mm Tiefe. Bestimmung des SNR durch Verwendung des Randbereiches  $S_{ref}$  und des Signalbereiches  $S_{sig}$ . Die laterale Größe wird anhand der Querschnittsprofile unter Verwendung der Methoden (A)–(D) ermittelt, wobei der Querschnitt bei eckigen Defekten verschoben wird und das Bild bei runden Defekten rotiert wird.

**4. Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung:** Die lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigung erfolgt anhand des Querschnittes der Phasenwerte (Profil). Zur

Bestimmung der lateralen Größe können die in Abbildung 2.4 gezeigten Methoden (A)–(D) verwendet werden. Da aus vorherigen Untersuchungen anhand von IR-Bildern [125] bzw. anhand von Phasenbildern [126] hervorgeht, dass jeweils Methode (B) die genauesten Ergebnisse liefert, wird im weiteren Verlauf der Arbeit ausschließlich diese verwendet. Um den Einfluss von Ausreißern zu reduzieren, werden jeweils mehrere Profile für die Berechnung der lateralen Größe herangezogen und die Ergebnisse gemittelt. Dabei wird zwischen eckigen und runden Defekten unterschieden. Bei eckigen Defekten wird der für die Quantifizierung verwendete Querschnitt jeweils pixelweise verschoben bis 80 % der Defektgröße (ausgehend von der Sollgröße der Folie) abgedeckt sind (siehe Abbildung 5.15 (a)). Anschließend erfolgt die Mittelwertbildung jeweils in  $x$ - und  $y$ -Richtung. Bei runden Defekten erfolgt zunächst die Messung des Durchmessers im Ausgangszustand, bevor das Bild in einem Winkel von  $\pm 22^\circ$  in Schritten von  $1^\circ$  rotiert wird (siehe Abbildung 5.15 (b)). Damit wird der Defekt zwar nicht exakt zur Faserorientierung bzw. senkrecht zur Faserorientierung vermessen, der Effekt der Vorzugsrichtung ist aber noch vorhanden. Analog zu den eckigen Defekten erfolgt auch hier die Mittelwertbildung für alle in  $x$ - und  $y$ -Richtung gemessenen Werte. Zur Vermeidung aller subjektiven Faktoren des Anwenders, erfolgt die Analyse der Daten und die Bestimmung der lateralen Größe vollautomatisiert.

Aus der vollfaktoriellen Analyse mit einer systematische Variation aller Parameter, wie

- Defektgröße (6/10/15 mm),
- Defektform (quadratisch/rund),
- Tiefenposition (0.135/0.27/0.405/0.54/0.675/0.81 mm),
- 326 individuelle Kombinationen der PPT-Parameter  $u$  und  $N$ , sowie
- Richtung (Höhe/Breite)

resultieren 23.472 verschiedene Kombinationen pro Probe, die im Rahmen der vollfaktoriellen Auswertung berücksichtigt werden. Allerdings kann nur ein kleiner Ausschnitt der Ergebnisse gleichzeitig sinnvoll dargestellt werden, weshalb in den folgenden Abschnitten einzelne Aspekte anhand bestimmter gegenseitiger Abhängigkeiten beleuchtet und diskutiert werden. Abschließend werden die Ergebnisse der Quantifizierung anhand der Phasenbilder mit den Ergebnissen der Quantifizierung anhand der IR-Bilder gegenübergestellt und diskutiert.

#### **5.2.4 Referenzmessung am Röntgenmikroskop**

Zur Bestimmung der realen Größe jedes einzelnen Defekts werden Referenzmessungen am Röntgenmikroskop durchgeführt. Durch die Einbringung der FEP-Folie

wird das Absorptionsverhalten des Materials im Defektbereich geändert. Durch diese Kontraständerung und durch den Phasenkontrast, der einen Effekt der Beugung der Röntgenstrahlung an Kanten beschreibt, werden die eingelegten Folien sichtbar. Zur Durchführung der Messungen wird das im Haus verfügbare Röntgenmikroskop von Zeiss Versa 520 (Oberkochen, Deutschland) verwendet [157]. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 5.16 (a) dargestellt. Die Röntgenquelle kann mit einer Beschleunigungsspannung im Bereich von 40 bis 160 kV und einer maximalen Leistung von 10 W betrieben werden. Ein Flat-Panel Detektor mit einer Auflösung von  $3064 \times 1928$  px wird verwendet. Für die Messungen wird eine Beschleunigungsspannung von 40 kV, eine Detektorleistung von 3 W, eine Belichtungszeit von 3 s, eine Mittelwertbildung über 10 Bilder und eine geometrische Vergrößerung von 1,416 gewählt, was in einer geometrischen Auflösung von  $0,0528 \text{ mm/px}$  resultiert. Um das lateral ungleichmäßige Emissions- und Absorptionsverhalten von Röntgenquelle und Röntgendetektor zu berücksichtigen, wird ein Referenzbild, welches ohne eingelegte Probe aufgenommen wird, mit dem Originalbild der Messung verrechnet. Zur Steuerung wird die Software Scout-and-Scan Control System Version 14 von Zeiss verwendet. Die manuelle Bestimmung der Defektgröße erfolgt durch laterale Vermessung der Probe mit Hilfe der kommerziell erwerbba- ren Software XRM Data Explorer Version 14. Dabei wird die Breite und Höhe der eckigen Folien bzw. der Durchmesser der runden Folien jeweils an drei Stellen vermessen, siehe Abbildung 5.16 (b). Der anschließend gebildete Mittelwerte wird als reale Defektgröße für den weiteren Verlauf dieser Arbeit verwendet. Für das in Abbildung 5.16 (b)

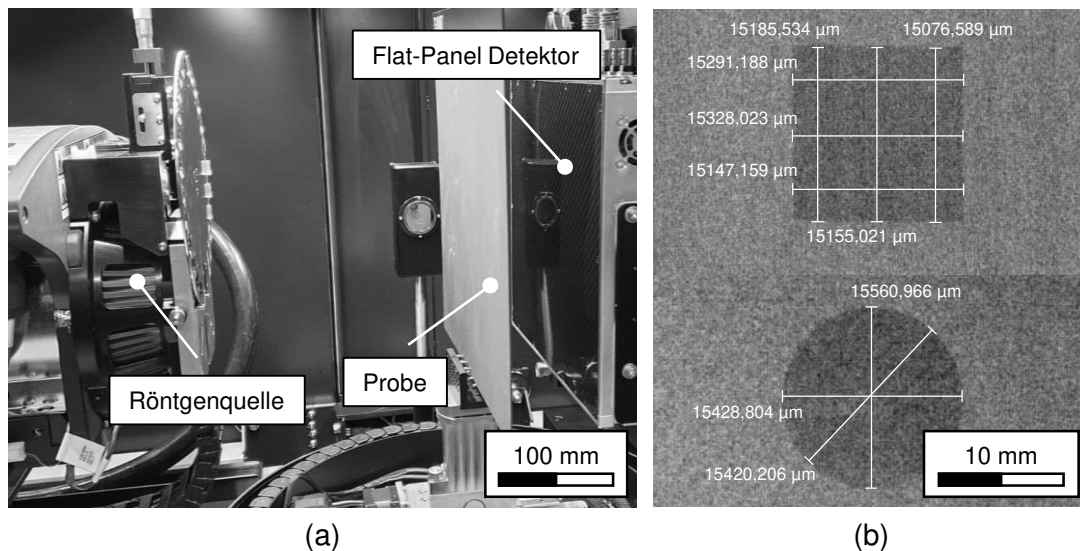


Abb. 5.16: (a) Referenzmessung am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520, (b) Manuelle Bestimmung der lateralen Größe anhand vom Transmissionsbild, beispielhaft dargestellt für einen eckigen Defekt der Größe  $15 \times 15 \text{ mm}$  und einen runden Defekt mit einem Durchmesser von  $15 \text{ mm}$  in einer multidirektionalen Platte.

gezeigte Beispiel ergibt sich für den runden Defekt als mittlerer Durchmesser  $15,470 \pm 0,064$  mm und für den eckigen Defekt  $15,255 \pm 0,078$  mm für die Breite und  $15,139 \pm 0,046$  mm für die Höhe. Die gebildeten Mittelwerte inkl. Standardabweichung für jeden einzelnen Defekt sind im Anhang in Tabelle A.4 für die UD Probe und in Tabelle A.5 für die MD Probe dargestellt. Diese werden für die weitere Analyse als individuelle Referenzwerte bei der Bestimmung der lateralen Defektgrößen verwendet.

### 5.3 Ergebnisse und Diskussion

Die nachfolgend gezeigten Ergebnisse hinsichtlich SNR und lateraler Größe der Defekte sind sowohl für die IR-Bilder aus dem Zeitbereich, als auch für die Phasenbilder aus dem Frequenzbereich absolut identisch entstanden und können somit miteinander verglichen werden.

#### 5.3.1 Quantifizierung anhand der IR-Bilder

Die Bestimmung der lateralen Größe anhand von IR-Bildern aus dem Zeitbereich gehört zum Stand der Technik und dient an dieser Stelle zum Vergleich. Weniger üblich ist das in Kapitel 5.2.3 beschriebene Subtrahieren der interpolierten Referenzfläche, welches vor allem dazu dient, die Inhomogenität der Wärmequelle auszugleichen. Für eine automatisierte Auswertung ist dies ebenso wichtig wie die Anwendung des lateralen Boxfilters, der dazu dient, die für die Quantifizierung verwendeten Profile zu glätten und damit lokale Ausreißer zu unterdrücken. Durch die anschließende Bildung der Mittelwerte sind die Aussagen statistisch abgesichert und damit allgemeingültiger als durch die Verwendung von Einzelmessungen.

In Abbildung 5.17 (oben) ist der Verlauf des SNR in Abhängigkeit von der Zeit am Beispiel für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier unterschiedlichen Tiefen in einem Bereich von 0,135 bis 0,54 mm für eine UD Probe dargestellt. Da für den Versuch eine Vorlaufzeit von 0,1 s eingestellt war, steigt das SNR erst nach diesem Zeitpunkt an. Der Zeitpunkt des maximalen SNR ist vor allem von der Charakteristik des Defektes abhängig und verschiebt sich mit zunehmender Tiefe zu späteren Zeitpunkten. In der mittleren und unteren Reihe von Abbildung 5.17 wird die Abweichung der gemessenen Breite (quer zur Faserorientierung) bzw. Höhe (parallel zur Faserorientierung) von ihrem realen Wert für die Methode (B) dargestellt:

$$\Delta \text{Breite}_{(B)} = \text{Breite}_{(\text{Messung } B)} - \text{Breite}_{(\text{Real})} \quad (5.21)$$

und

$$\Delta \text{Hoehe}_{(B)} = \text{Hoehe}_{(\text{Messung } B)} - \text{Hoehe}_{(\text{Real})}. \quad (5.22)$$

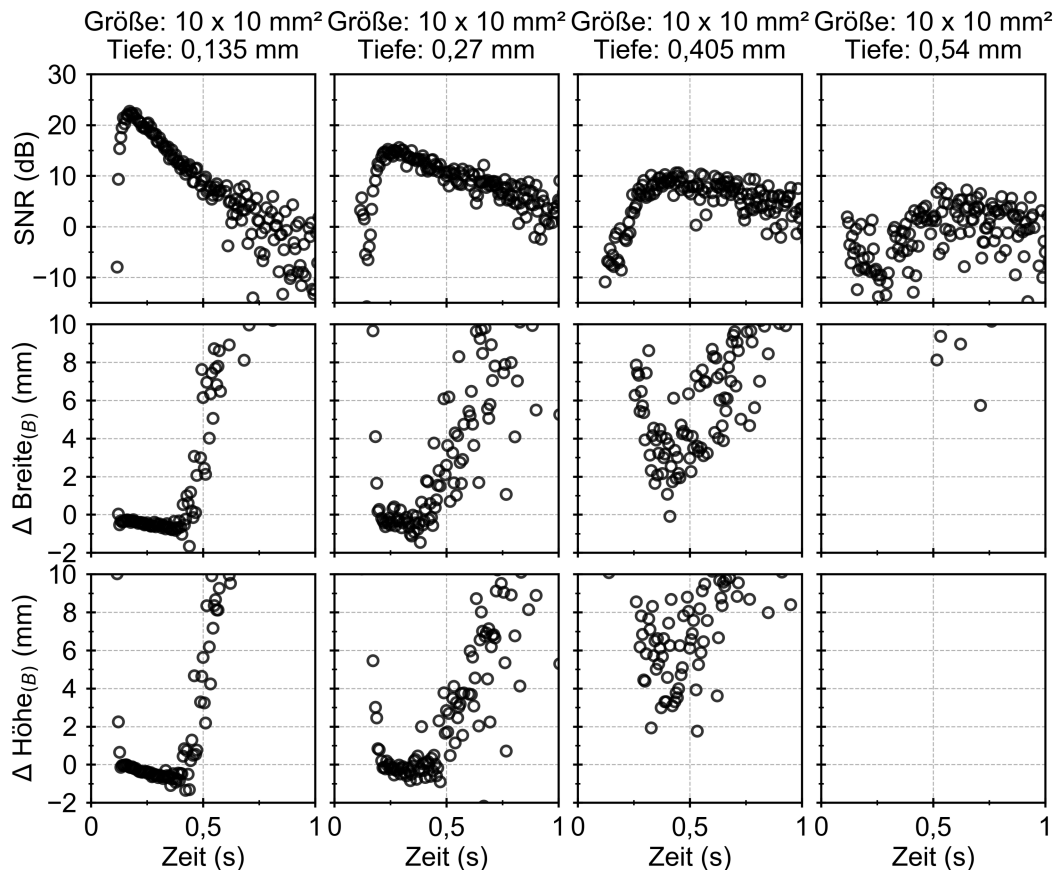


Abb. 5.17: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an IR-Bildern) in Abhängigkeit von der Zeit, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,54 mm für eine unidirektionale Probe (UD).

Zu sehen ist, dass eine zuverlässige Quantifizierung nur an oberflächennahen Defekten durchgeführt werden kann und die geringste Abweichung der lateralen Größe dabei zu einem frühen Zeitpunkt vorliegt. Anhand der mit der Zeit zunehmenden Abweichung bei der Größenbestimmung ist der Einfluss des lateralen Wärmeflusses, der in Faserrichtung größer ist als quer dazu, zu erkennen. Besonders deutlich ist dies bei dem oberflächennahen Defekt (bei 0,135 mm) zu beobachten. Die negative Steigung bei der Bestimmung der Höhe – entspricht der Bestimmung der Größe in Faserrichtung – ist größer als bei der Bestimmung der Breite, was auf die schnellere Wärmeausbreitung in Faserrichtung zurückzuführen ist. Es kann beobachtet werden, dass eine lateral orts aufgelöste Quantifizierung nach der in dieser Arbeit verwendeten Methode erst ab einem SNR von etwa 10 dB möglich ist. Dies sieht man auch in den Verläufen für einen Defekt in der Tiefe 0,27 mm bei etwa 0,2 s. Der Kontrast des Defektes zur defektfreien Umgebung ist zu diesem Zeitpunkt noch nicht groß genug, weshalb teilweise Punkte aus dem Referenzbereich als äußere Grenzen detektiert werden und damit die Größenbestimmung in diesem Bereich unmöglich machen.

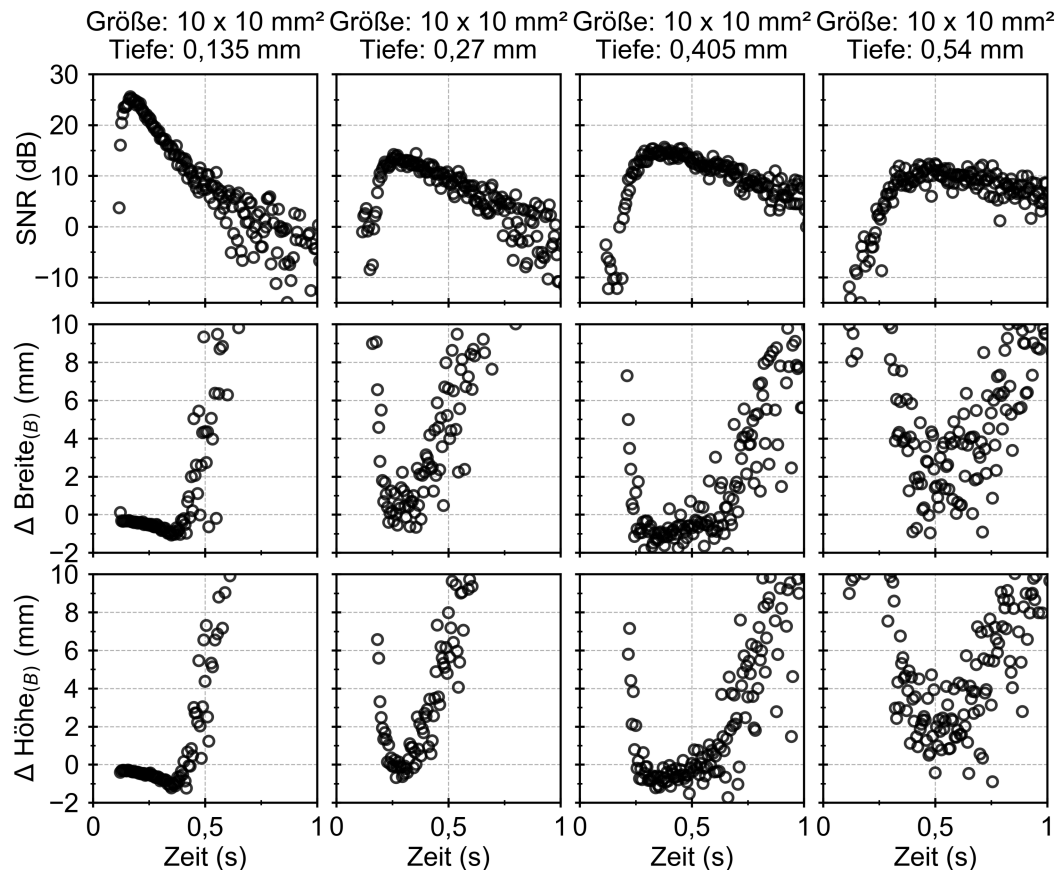


Abb. 5.18: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an unbearbeiteten IR-Bildern) in Abhängigkeit von der Zeit, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,54 mm für eine multidirektionale Probe (MD).

Insgesamt ist zu sehen, dass die laterale Größe nur bis zu einer Tiefe von 0,27 mm bestimmt werden kann.

Analog dazu ist auch bei der multidirektionalen Probe (MD), gezeigt in Abbildung 5.18, zu beobachten, dass die lateral orts aufgelöste Quantifizierung erst ab 10 dB möglich ist. Dargestellt sind die gleichen Größen und Tiefen der Defekte wie in Abbildung 5.17, allerdings für eine MD Probe. Der laterale Wärmefluss kann auch bei der MD Probe beobachtet werden, wobei die Abweichung bei der Größenbestimmung in beide Richtungen annähernd gleich ist und auf eine gleichmäßigere Verteilung der Wärme zurückzuführen ist. Auch hier kann bestätigt werden, dass zur Minimierung der Messabweichung eine lateral orts aufgelöste Quantifizierung möglichst früh, jedoch erst ab Überschreiten der Mindestgrenze von 10 dB durchgeführt werden sollte. Anders als bei der UD Probe kann die laterale Größe noch bei einer Defekttiefe von 0,405 mm bestimmt werden.



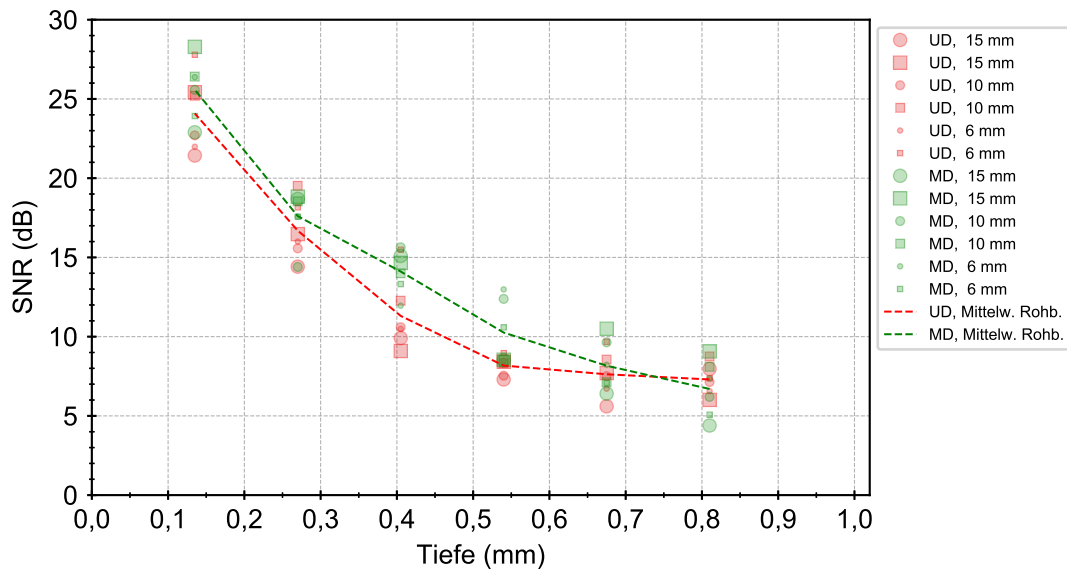


Abb. 5.19: Tiefenabhängigkeit des maximal erreichbaren SNR für eine UD und MD Probe gemessen an IR-Bildern. Die Form und Größe der Symbole korreliert mit der Form und Größe der Defekte. Die Mittelwerte aller zu einer Tiefe und Probe zugehörigen Messwerte (ohne Differenzierung von Form und Größe) wurden ermittelt und die Punkte mit einer gestrichelten Linie verbunden.

Abbildung 5.19 zeigt das maximal erreichbare SNR in Abhängigkeit von der Defekttiefe für die UD und MD Probe. Die punktierten Linien zeigen den Mittelwert des maximal erreichbaren SNR für jede Tiefe unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte. Der Verlauf ist für beide Proben ähnlich, wobei das SNR für die UD Probe tendenziell etwas niedriger ist, weshalb auch die Reichweite der möglichen lateral orts aufgelösten Quantifizierung geringer ausfällt. Die Grenze von 10 dB wird bei der UD Probe bei etwa 0,45 mm und bei der MD Probe erst bei 0,55 mm unterschritten.

### 5.3.2 Quantifizierung anhand der Phasenbilder

Das maximal erreichbare SNR sowie die scheinbare laterale Defektgröße in den Phasenbildern ist abhängig von dem verwendeten Lagenaufbau (UD oder MD), der Tiefe des Defektes im Material und von den gewählten Auswerteparametern Länge des Auswertefensters  $N$  und Frequenz  $f$ . Die Abhängigkeit ist in Abbildung 5.20 exemplarisch für den UD Fall anhand von einem runden Defekt mit dem Durchmesser 10 mm in vier verschiedenen Tiefen von 0,135 bis 0,81 mm dargestellt. Der Aufbau der Abbildung ist analog zu den Abbildungen 5.17 und 5.18, wobei auf der  $x$ -Achse die Frequenz  $f$  anstelle der Zeit  $t$  dargestellt ist. Zudem weichen die für die Darstellung gewählten Defekttiefen ab, da mit den Phasenbildern grundsätzlich tiefere Defekte analysiert werden

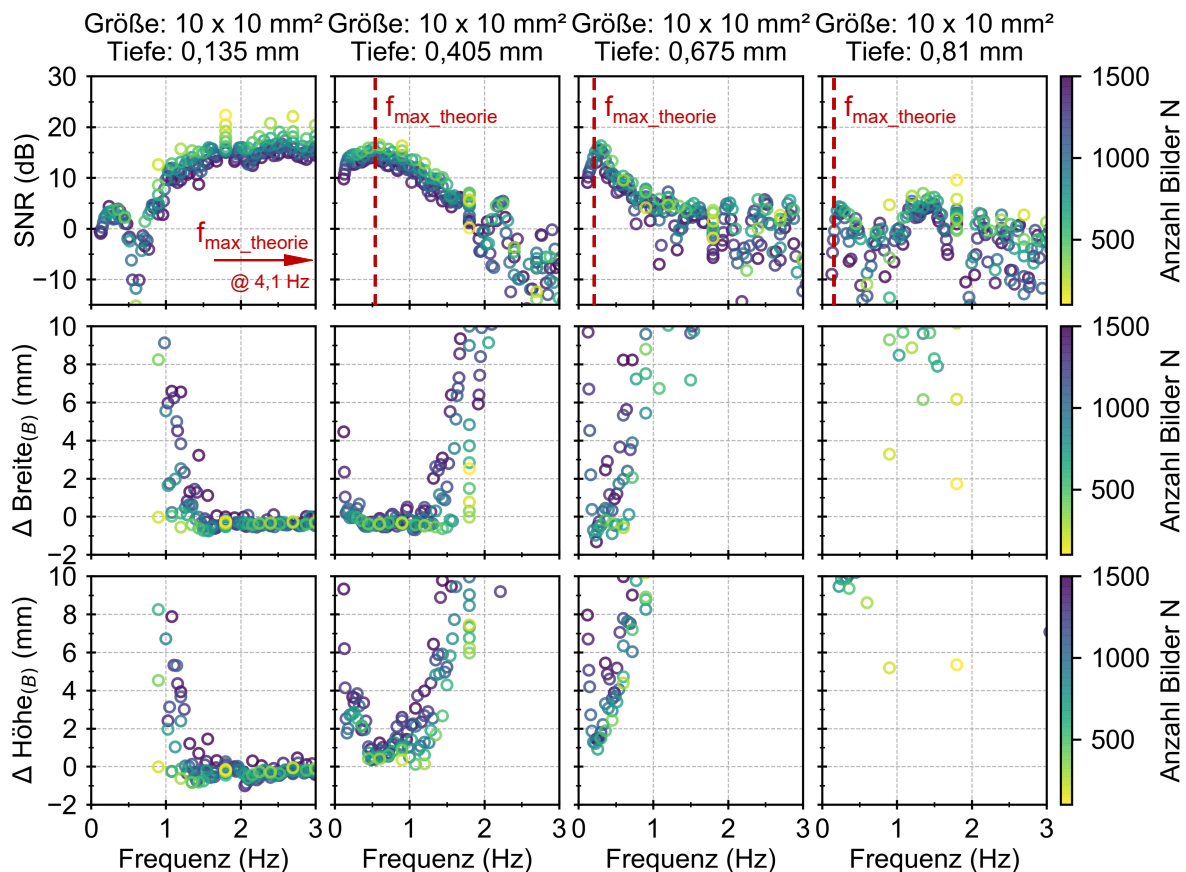


Abb. 5.20: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an Phasenbildern) in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ , beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,81 mm für eine UD Probe.

können. In der mittleren und unteren Reihe von Abbildung 5.20 wird die Abweichung der gemessenen Breite bzw. Höhe von ihrem theoretischen Wert für die Methode (B) analog zum oben beschriebenen Vorgehen nach den Formeln 5.21 und 5.22 dargestellt, wobei auch hier die Höhe parallel zur Faserorientierung und die Breite senkrecht zur Faserrichtung gemessen wurde. Der Frequenzbereich der Darstellung wurde auf 0–3 Hz begrenzt. Die theoretisch optimale Frequenz, bestimmt durch die thermische Diffusionslänge  $f_{max\_theorie} = a/(\pi \cdot d^2)$  (abgeleitet von Formel 2.9), ist für jede Defekt-tiefe  $d$  in den Diagrammen als gestrichelte Linie dargestellt. Analog dazu werden die Ergebnisse für die gleichen Defekte der MD Probe in Abbildung 5.21 dargestellt.

Aus den gezeigten Abbildungen lassen sich drei wichtige Erkenntnisse ableiten:

1. Die Genauigkeit der Größenbestimmung hängt, ähnlich wie die Nachweisbarkeit, auch bei der Verwendung der Phasenbilder eindeutig vom SNR ab. Eine ansatzweise genaue Bestimmung der lateralen Größe mit einem Fehler unter 1 mm ist nur ab einem SNR > 10 dB möglich, während die Grenze der Nachweisbarkeit eines Defektes bereits bei 0 dB liegt.

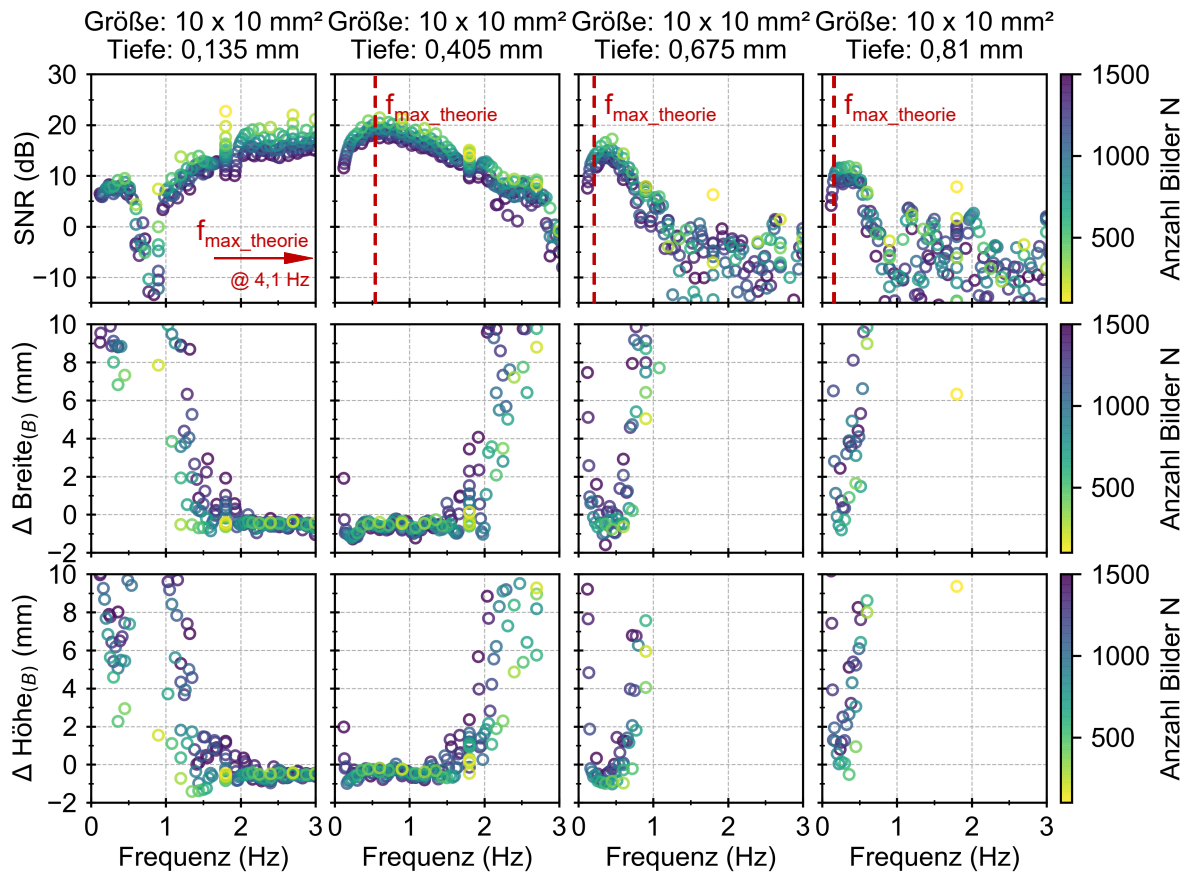


Abb. 5.21: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an Phasenbildern) in Abhängigkeit von der Frequenz, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,81 mm für eine MD Probe.

2. Der Einfluss des lateralen Wärmeflusses entlang der Faserorientierung ist deutlich sichtbar, insbesondere bei tieferen Defekten mit UD Lagenaufbau. Die Bestimmung der Breite (senkrecht zur Faserorientierung) ist aufgrund des geringeren lateralen Wärmeflusses wesentlich besser als die Bestimmung der Höhe. Dieser Effekt ist vor allem bei der UD Probe stark ausgeprägt, wo die Wärme in eine Vorzugsrichtung (in Faserrichtung) wegfließt. Im Gegensatz dazu ist der laterale Wärmefluss bei der MD Probe gleichmäßiger, weshalb auch der Effekt weniger stark ausgeprägt ist.
3. Bei höheren Frequenzen  $f$  und damit bei oberflächennahen Defekten ist die Auswertung bei einer kleineren Länge des Auswertefensters  $N$  vorteilhaft und führt zu einem höheren SNR. Gleichzeitig reduziert sich die Messabweichung bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass zur Reduzierung der Messabweichung das Bild mit dem maximalen SNR gewählt werden sollte. Im Falle der PPT ist dieses durch Anpassung der Länge des Auswertefensters  $N$  und der Auswertefrequenz  $f$  zu

erreichen. Die optimalen Parameterkombinationen werden im Rahmen dieser Arbeit für jeden ROI individuell bestimmt und werden im Anhang in Tabelle A.6 gezeigt. Innerhalb einer Defekttiefe sind die optimalen Parameter für die UD Probe für alle untersuchten Defekte annähernd gleich. Abweichungen sind nur bei Defekten in großer Tiefe zu beobachten, bei denen auch das SNR entsprechend klein ist ( $< 10$  dB). Bei der MD Probe sind in dem untersuchten Bereich insgesamt weniger Ausreißer zu beobachten, was vor allem auf den gleichmäßigeren Wärmefluss und das insgesamt höhere SNR zurückzuführen ist.

Eine Gegenüberstellung des maximal erreichbaren SNR in Abhängigkeit von der Tiefe ist für beide untersuchten Lagenaufbauten UD und MD in Abbildung 5.22 dargestellt. Ohne weitere Differenzierung hinsichtlich Form und Größe der Defekte, lässt sich mit Hilfe der linearen Regression deutlich erkennen, wie das SNR für die UD Probe schneller abnimmt und der für die Quantifizierung erforderliche Schwellwert von 10 dB für das SNR bereits bei einer Defekttiefe von ca. 0,8 mm unterschritten wird, während dies für die MD Probe erst bei etwa 1,0 mm der Fall ist. Dies resultiert aus dem deutlich größeren lateralen Wärmefluss entlang der Fasern, wobei der schnelle Temperaturausgleich zwischen dem Defekt und der umgebenden Referenzfläche insgesamt zu einem geringeren Kontrast führt. Vergleicht man die Ergebnisse mit dem SNR Verlauf

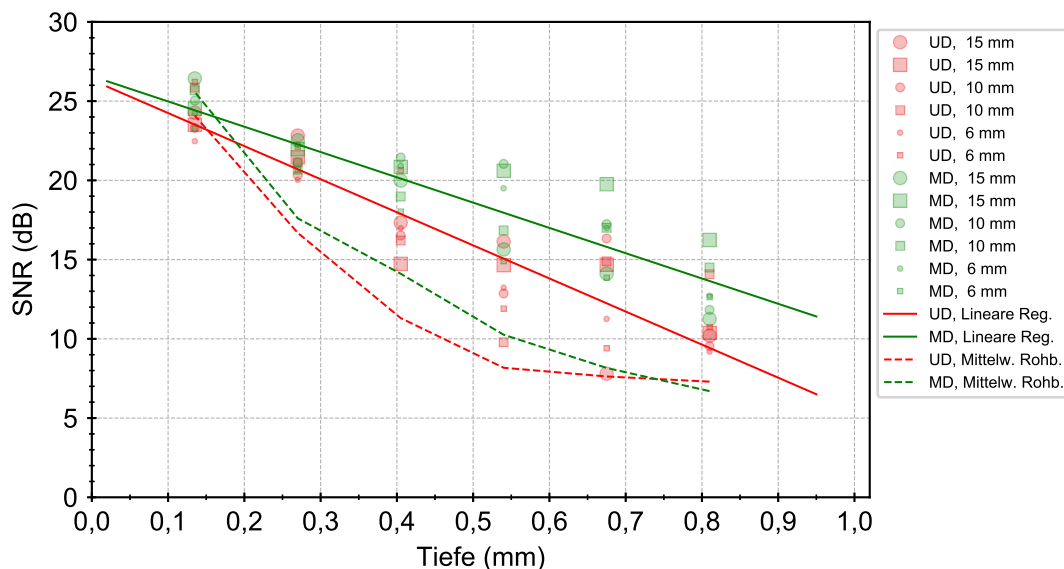


Abb. 5.22: Tiefenabhängigkeit des maximal erreichbaren SNR für eine UD und MD Probe gemessen an Phasenbildern. Die Form und Größe der Symbole korreliert mit der Form und Größe der Defekte. Für die lineare Regression wurden alle Messwerte, die zur jeweiligen Probe gehören berücksichtigt (ohne Differenzierung von Form und Größe). Zum Vergleich ist der Verlauf der Mittelwerte aus Abbildung 5.19 dargestellt.

der IR-Bilder, dargestellt als gestrichelte Linien in Abbildungen 5.22, ist eindeutig zu sehen, dass durch die Verwendung der Phasenbilder die Grenze der lateral orts aufgelösten Quantifizierung deutlich verschoben werden kann und eine zuverlässigere Quantifizierung auch von tieferen Defekten möglich ist. Eine weitere Verschiebung der Grenze ist durch Erhöhung des SNR bei tieferen Defekten denkbar, wobei dies durch Erhöhung der eingebrachten Energie realisiert werden kann.

### 5.3.3 Tiefenabhängigkeit des Messfehlers bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung

Unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte kann durch Angabe der Standardabweichung der resultierende Messfehler ausgedrückt werden. Hierzu ist in Abbildung 5.23 die Abweichung der gemessenen Breite bzw. Höhe von ihrem theoretischen Wert für die Methode (B) nach den Formeln 5.21 und 5.22 in Abhängigkeit von der Tiefe der Defekte für die UD Probe (links) und die MD Probe (rechts) dargestellt. Der Mittelwert und die Standardabweichung werden unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte gebildet und basieren demnach jeweils auf den Ergebnissen der sechs Defekte in der gleichen Tiefe. Es ist zu sehen, dass die systematische Abweichung (Position des Mittelwertes) sowie die Streuung der Messwerte bei beiden

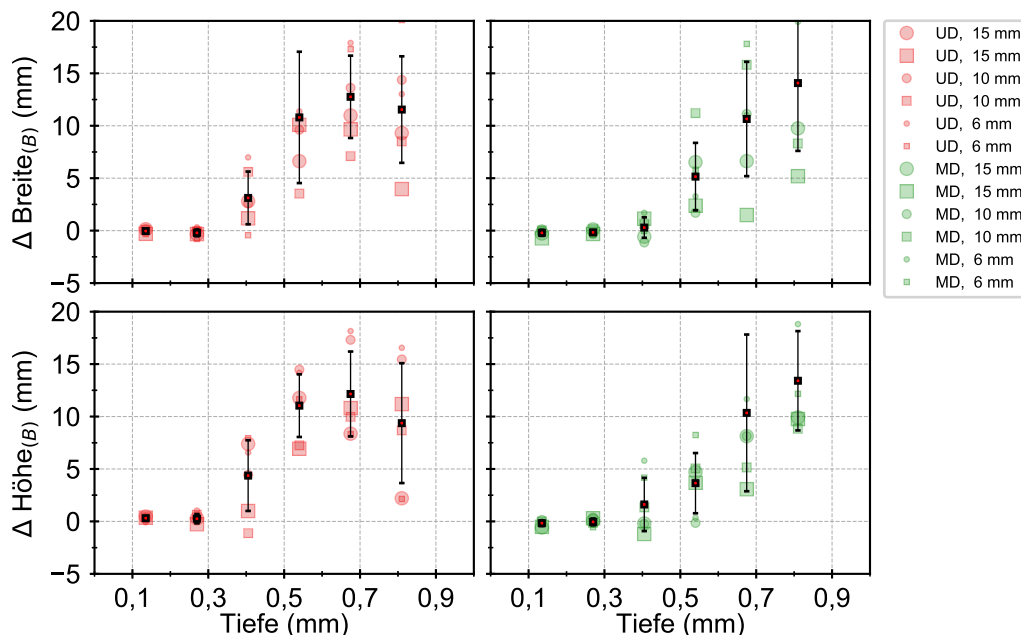


Abb. 5.23: Tiefenabhängigkeit der lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der IR-Bilder, basierend auf dem Bild mit dem maximalen SNR. Form und Größe der Symbole ist analog zu Form und Größe der Defekte. Mittlere Abweichung der Breite (oben) und Höhe (unten) nach den Formeln 5.21 und 5.22, jeweils inklusive Mittelwert und Standardabweichung über alle Messwerte (unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte).

Lagenaufbauten bis zu einer Tiefe von 0,27 mm unter 1 mm ist. Ab einer Defekttiefe von 0,405 mm nimmt sowohl die systematische Abweichung als auch die Streuung der Messwerte deutlich zu, wobei der Anstieg bei der UD Probe etwas früher und größer ist als bei der MD Probe. Eine zuverlässige Quantifizierung nach dieser Methode unter Verwendung der unbearbeiteten IR-Bilder kann demnach nur bis zu einer Tiefe von 0,27 mm durchgeführt werden.

Die für die Quantifizierung verwendeten Bilder mit dem maximalen SNR sind in Abbildung 5.24 für die UD Probe (a) und die MD Probe (b) dargestellt und verdeutlichen die Problematik der lateral orts aufgelösten Quantifizierung tieferer Defekte. Es ist anzumerken, dass die Darstellung eine Zusammensetzung der jeweils optimalen Bilder jedes ROIs ist und eine gemeinsame Skala nicht angegeben werden kann. Zudem sind die Bilder abweichend von der Realität angeordnet und der Größe bzw. Tiefe nach sortiert. Es ist zu erkennen wie der Kontrast mit zunehmender Tiefe abnimmt und eine Quantifizierung zunehmend erschwert wird.

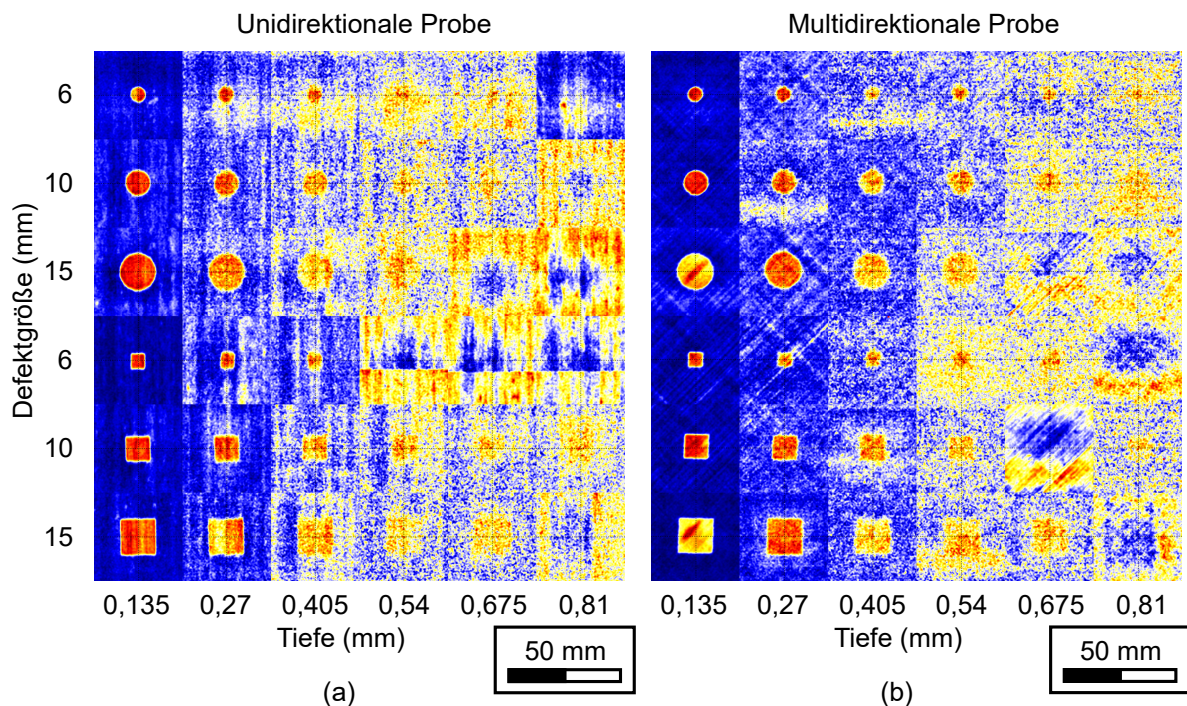


Abb. 5.24: Übersicht aller für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung verwendeten IR-Bilder für (a) die UD Probe und (b) die MD Probe. Es wird jeweils das Bild mit dem maximalen SNR verwendet. Die Bilder sind nach Größe und Tiefe sortiert und weichen von der Anordnung auf der Probe ab. Die Skalierung erfolgt jeweils je ROI-Bereich, weshalb eine allgemeingültige Z-Achse nicht angegeben werden kann.

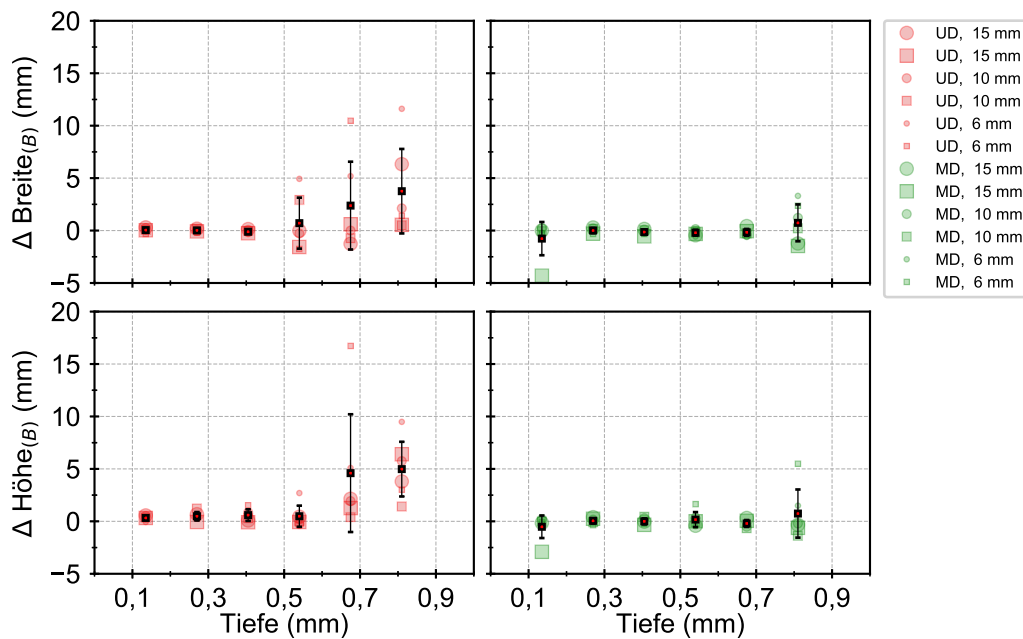


Abb. 5.25: Tiefenabhängigkeit der lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der Phasenbilder, basierend auf dem Bild mit dem maximalen SNR. Form und Größe der Symbole ist analog zu Form und Größe der Defekte. Mittlere Abweichung der Breite (oben) und Höhe (unten) nach den Formeln 5.21 und 5.22, jeweils inklusive Mittelwert und Standardabweichung über alle Messwerte (unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte).

Im Gegensatz zur Quantifizierung anhand der IR-Bilder liegt die systematische Abweichung bei der Bestimmung der lateralen Größe anhand der Phasenbilder bei der UD Probe bis zu einer Tiefe von 0,54 mm und bei der MD Probe sogar bis 0,81 mm unterhalb von 1 mm, dargestellt in Abbildung 5.25. Bei der UD Probe ist ab 0,54 mm ein starker Anstieg der Standardabweichung zu sehen, der zu einer Abweichung von ca. 5 mm in einer Tiefe von 0,81 mm führt. Als limitierender Faktor ist an dieser Stelle der laterale Wärmefluss zu identifizieren, der dafür sorgt, dass die Position des halben maximalen Kontrastes für Defekte ab einer Tiefe von ca. 0,7 mm nach außen gedrückt wird. Verglichen mit der UD Probe ist die systematische Abweichung im Fall der MD Probe im Allgemeinen kleiner und bleibt bis zu einer Tiefe von 0,81 mm unter 1 mm. Es ist zu beobachten, dass die Abweichung für große Defektgrößen (15 mm) eher negativ und nur für die kleinen Defektgrößen (6 mm) deutlich positiv ist. Große Defekte werden tendenziell unterschätzt, während kleine Defekte mit zunehmender Tiefe tendenziell überschätzt werden. Anders als bei der UD Probe wird hier die maximale Blitzleistung als limitierender Faktor identifiziert, die insgesamt für größeres Rauschen bei tieferen Defekten sorgt. Durch Erhöhung der Blitzleistung kann das SNR der tieferen Defekte erhöht und damit die Quantifizierungsgrenze zu tieferen Positionen verschoben werden.

Insgesamt ist festzustellen, dass der Anstieg der systematischen Abweichung bei den Phasenbildern zu größeren Tiefen zu sehen ist und weniger groß ausfällt als bei der Ermittlung anhand der IR-Bilder. Die lateral orts aufgelöste Quantifizierung von Defekten mit Hilfe der aktiven Thermografie sollte daher stets unter Verwendung der Phasenbilder durchgeführt werden. Es ist dabei zu beachten, dass die Ermittlung der optimalen Parameter je Material und Testkonfiguration einmalig anhand von Referenzproben ermittelt und für die Prüfung von Strukturbauteilen übernommen werden kann. Dabei sollte je Defekttiefe ein eigenständiger optimaler Parametersatz gewählt werden. Der daraus resultierende Messaufwand erhöht sich im Rahmen einer automatisierten Prüfung demnach nur geringfügig.

In Abbildung 5.26 sind die für die Quantifizierung verwendeten Phasenbilder mit dem maximalen SNR für die UD Probe (a) und die MD Probe (b) dargestellt. Analog zu Abbildung 5.24 handelt es sich auch bei diesem Bild um eine Zusammensetzung der jeweils optimalen Bilder jedes ROI, sodass keine gemeinsame Skala angegeben wer-

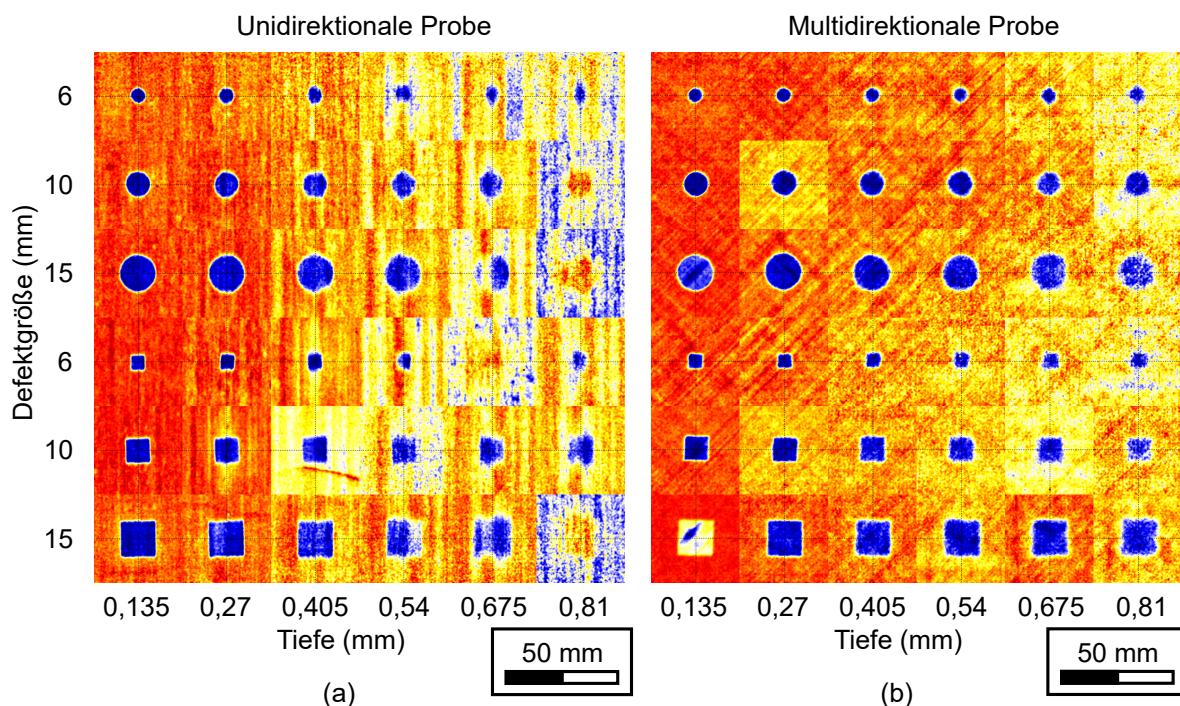


Abb. 5.26: Übersicht aller für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung verwendeten Phasenbilder für (a) die UD Probe und (b) die MD Probe. Es wird jeweils das Bild mit dem maximalen SNR verwendet. Die Parameter sind im Anhang in Tabelle A.6 angegeben. Die Bilder sind nach Größe und Tiefe sortiert und weichen von der Anordnung auf der Probe ab. Die Skalierung erfolgt jeweils je ROI-Bereich, weshalb eine allgemeingültige z-Achse nicht angegeben werden kann.



den kann. Es ist deutlich zu sehen, dass der durch Defekte verursachte Kontrast insbesondere bei der MD Probe auch bei tiefen Defekten noch relativ hoch ist und die Ränder klar identifiziert werden können, sodass eine lateral orts aufgelöste Quantifizierung durchgeführt werden kann. Damit wird das aus Abbildung 5.25 hervorgegangene Ergebnis bestätigt.

## 5.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde anhand von zwei Platten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (mit UD und MD Lagenaufbau) mit innenliegenden künstlichen Defekten, deren exakte Größe mit Hilfe eines Röntgenmikroskops vermessen wurde, die laterale Quantifizierung mit Hilfe der aktiven Thermografie durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass für eine zuverlässige lateral orts aufgelöste Quantifizierung ein SNR von mindestens 10 dB vorliegen muss. Die Quantifizierung anhand der unbearbeiteten IR-Bilder aus dem Zeitbereich ist damit nur bis zu einer Tiefe von 0,27 mm möglich. Wird stattdessen das Phasenbild für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung verwendet, verschiebt sich die Grenze für die UD Probe auf eine erreichbare Tiefe von 0,54 mm und für die MD Probe sogar auf 0,81 mm, wobei die Messabweichung zur realen Größe im Bereich von etwa  $\pm 1$  mm liegt. Tiefere Defekte können nur quantifiziert werden, wenn das SNR erhöht werden kann, bspw. durch Erhöhung der Blitzleistung. Bei der Auswertung der Phasenbilder reicht grundsätzlich ein SNR von 10 dB. Für eine optimale Quantifizierung mit der geringsten Abweichung zur realen Defektgröße sollten allerdings die optimalen Auswerteparameter (Länge des Auswertefensters  $N$  und Frequenz  $f$ ), die vor allem von der untersuchten Defekttiefe abhängen, verwendet werden.

## 6 Zeitaufgelöste Quantifizierung von Schädigungen bei der quasi-statische Zugprüfung mit Hilfe der passiven Thermografie

In diesem Kapitel wird eine Methode zur Visualisierung und Quantifizierung zeitlich verteilter Schädigungsereignisse im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung vorgestellt. Erste Ansätze dieser Methodik wurden bereits in [88] und [79] diskutiert. Eine Kombination mit der Schallemissionsanalyse wurde in [158] gezeigt, wobei die Auswertung der Thermografiedaten basierend auf den Zeitpunkten der mit der Schallemissionsanalyse identifizierten Ereignisse durchgeführt wurde. Im Gegensatz dazu wird nachfolgend eine Methode vorgestellt, bei der die Schädigungsereignisse auch ohne die Kombination mit der Schallemissionsanalyse zuverlässig detektiert werden können. Die in dieser Arbeit verwendeten Proben und Messungen sind im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes entstanden. Die Ergebnisse zur Kombination der Schallemissionsanalyse mit der digitalen Bildkorrelation werden in [138] diskutiert. Die Ergebnisse der passiven Thermografie werden nachfolgend vorgestellt.

### 6.1 Probengeometrie und -präparation

Das allgemeingültige Vorgehen der Probenherstellung im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 4 beschrieben. Die Proben für die quasi-statische Zugprüfung wurden nach der Herstellung der Platten an einer CNC Maschine entsprechend der Geometrie aus Abbildung 6.27 ausgefräst und die Kanten mit feinem Schleifpapier (Körnung 1200) bearbeitet.

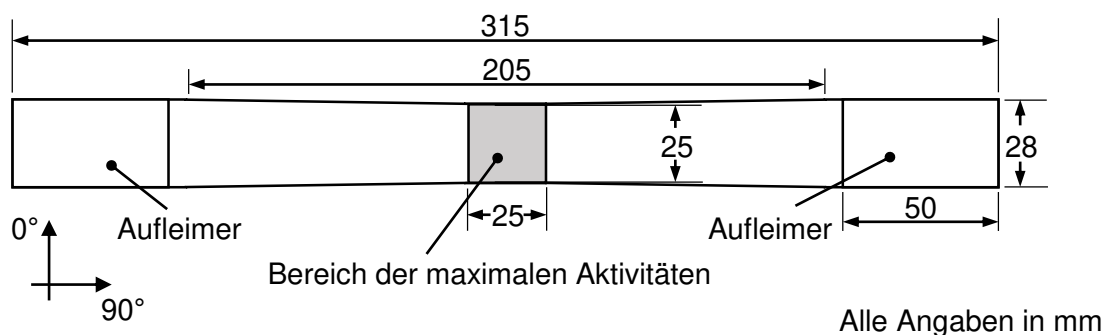


Abb. 6.27: Schematische Darstellung der Probengeometrie für die quasi-statische Zugprüfung. Alle Angaben sind mm dargestellt. Die Probendicke beträgt  $0,5304 \pm 0,0144$  mm.

Die Wahl der Geometrie basiert auf den Ergebnissen des AVK Arbeitskreises zur Standardisierung [38], wonach der Großteil der Schädigungen sowie das finale Versagen

der Probe im taillierten mittleren Bereich stattfinden soll. Die Zugprobe hat eine Länge von 315 mm und eine Breite von 28 mm im Klemmbereich und eine Breite von 25 mm im taillierten Bereich, wobei der Verlauf einer Bézier Kurve entspricht und sich über einen Bereich von 205 mm erstreckt. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der Fokus auf den mittleren Bereich der Probe, in dem die maximalen Aktivitäten zu erwarten sind, gelegt, siehe Abbildung 6.27. Zur Vermeidung eines frühzeitigen Versagens im Klemmbereich wurden die Proben lokal mit glasfaserverstärkten Aufleimern verstärkt (Lagenorientierung  $\pm 45^\circ$ , Dimension  $28 \times 50 \times 1 \text{ mm}^3$ ), wobei ein Zwei-Komponenten Epoxidkleber verwendet wurde. Um ein kontrolliert sprödes Versagen der Proben sicherzustellen, wurden die Proben vor Durchführung des Versuchs in einem Ofen bei  $105^\circ\text{C}$  für eine Dauer von 72 Stunden eingelegt und bis zur Versuchsdurchführung in einem Exsikkator gelagert.

Durch die Kombination von Probengeometrie und des vierlagigen Aufbaus der Lamine (vorgestellt in Kapitel 4.1), ist eine weitestgehend definierte Einbringung der Schädigung möglich. Die Durchführung der Versuche erfolgt in zwei Stufen. In Stufe 1 wurde die Probe so aus der Platte entnommen, dass die  $90^\circ$  Lage des Laminats außen lag und während der quasi-statischen Zugbelastung Zwischenfaserbrüche in den äußeren Lagen und Faserbrüche in den inneren Lagen auftraten, vgl. Abbildung 6.28 (a). In Stufe 2 wurde die Probe so entnommen und belastet, dass die Zwischenfaserbrüche in den inneren Lagen und die Faserbrüche in den äußeren Lagen auftraten, vgl. Abbildung 6.28 (b). In jeder Stufe wurden drei Proben getestet, von denen nachfolgend jeweils eine im Detail ausgewertet und diskutiert wird.

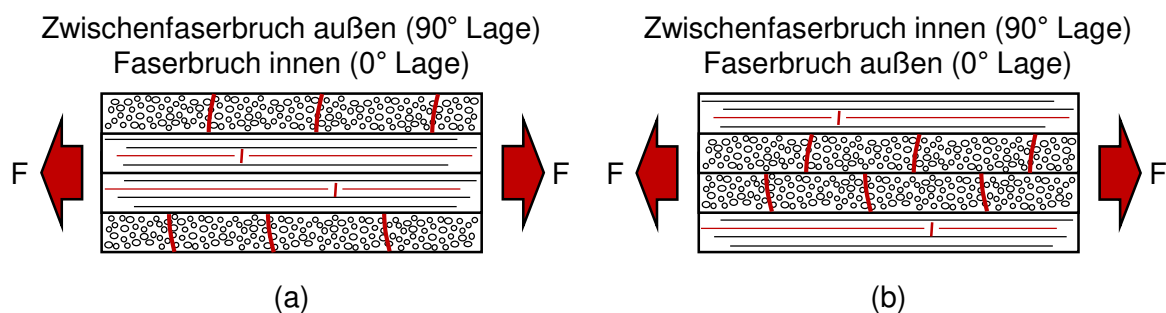


Abb. 6.28: Orientierung der Zugproben zur gezielten Schädigungseinbringung. (a) Stufe 1:  $90^\circ$  Lagen außen zur Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen in den äußeren Lagen und Faserbrüchen in den inneren Lagen. (b) Stufe 2:  $0^\circ$  Lagen außen zur Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen in den inneren Lagen und Faserbrüchen in den äußeren Lagen.

## 6.2 Experimentelle Untersuchung

### 6.2.1 Versuchsaufbau der quasi-statischen Zugbelastung mit passiver Thermografie

Die quasi-statische Zugbelastung wurde an einer Materialprüfmaschine der Marke Zwick (Modell 1474) realisiert. Der Abstand zwischen den hydraulischen Klemmen, welche für die Klemmung der Probe verwendet wurden, lag bei 215 mm. Für die Messung der Kraft wurde eine 100 kN Kraftmessdose verwendet. Die Dehnung der Probe wurde über die Wegaufnehmer der Maschine gemessen. Die Probe wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min gezogen.

Eine IR-Kamera Image IR 9410 BI S wurde zur Aufzeichnung der Oberflächentemperatur während des Versuchs eingesetzt. Ein Teleobjektiv (50 mm) wurde verwendet und die IR-Kamera wurde in einem Abstand von 500 mm vor der Probe positioniert. Der Bildausschnitt wurde so gewählt, dass die Oberflächentemperatur der Probe über zwei Edelstahlspiegel von beiden Seiten gleichzeitig aufgezeichnet werden konnte. Der Prüfaufbau ist schematisch in Abbildung 6.29 dargestellt. Zwei auf den Proben aufgebrachte Marker wurden zur Referenzierung der Position auf der Probe verwendet. Analog zu Kapitel 5 wurden zur Ermittlung der Auflösung bekannte

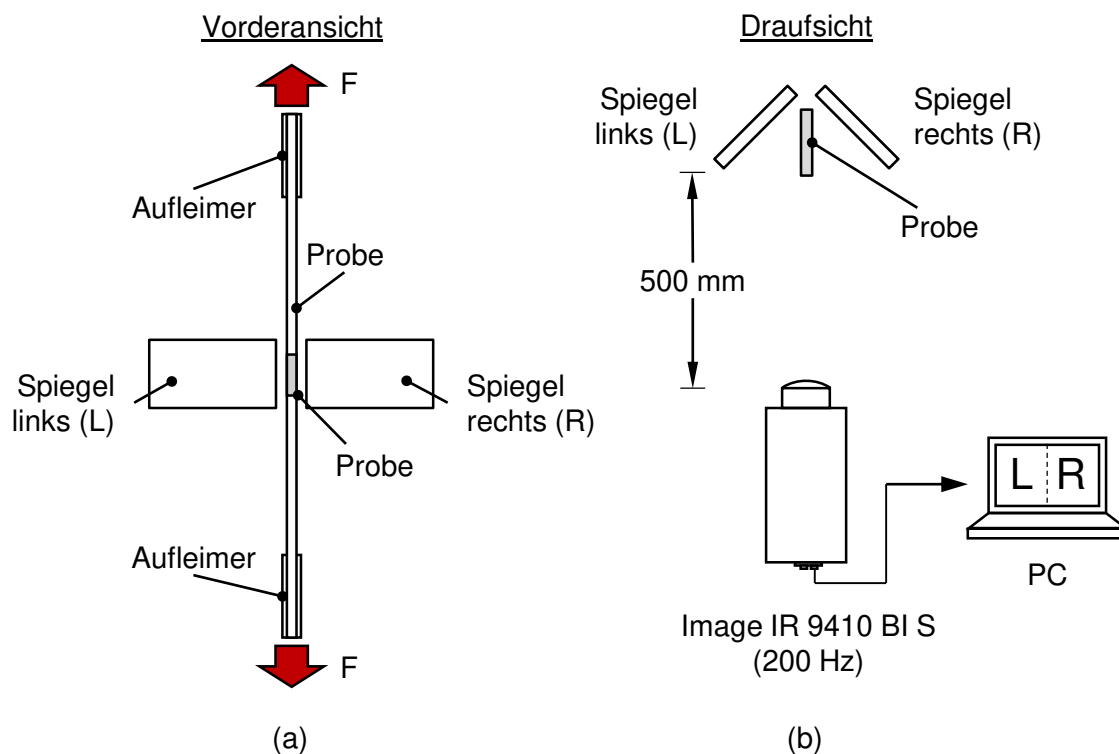


Abb. 6.29: Prüfaufbau der passiven Thermografie zur Detektion von Schädigungsereignissen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung (a) in der Vorderansicht und (b) in der Draufsicht.

Referenzgrößen, in diesem Fall die Breite der Probe und der Abstand zwischen den Positionsmarkern, verwendet. Daraus resultiert eine Auflösung von 0,106 mm/px. Eine Aufnahmerate SR von 200 Hz wurde eingestellt und die Startzeitpunkte von IR-Kamera und Prüfmaschine synchronisiert.

Da im Rahmen von den hier beschriebenen Versuchen die Schädigung zusätzlich mit Hilfe der Schallemissionsanalyse detektiert wurde, war eine kurzzeitige statische Vorbelastung der Proben bis zu einer Spannung von 10 bis 50 MPa unmittelbar vor Durchführung der Versuche erforderlich. Zudem wurde für die digitalen Bildkorrelation eine Lichtquelle verwendet, die für eine kontinuierlichen Erwärmung der Probe sorgte und auch in den Ergebnissen der IRT sichtbar ist.

### 6.2.2 Auswertemethodik

Im Rahmen von den hier beschriebenen Versuchen können je nach Probe und Konfiguration mehr als 50.000 Bilder erzeugt werden. Dies entspricht einer Versuchsdauer von 250 s. Im Vergleich dazu ist ein an der Oberfläche auftretendes Schädigungsereignis nur für wenige Millisekunden sichtbar und kann nur unter Betrachtung eines Differenzbildes visualisiert werden. Bereits nach 25 ms (entspricht bei der gewählten Konfiguration 5 Bildern) fällt der SNR einer oberflächennahen Schädigung unter die Schwelle von 10 dB und nach 100 ms (entspricht 20 Bildern) sogar unter 0 dB, womit der Defekt nicht mehr zu detektieren ist. Damit steht die Information für gerade mal 0,04 % der gesamten Versuchszeit zur Verfügung, wobei zusätzlich die laterale Position auf der Probe von Schädigung zu Schädigung variiert. Eine Beschreibung des gesamten Schädigungsbildes ist auf diese Weise demnach sehr aufwändig, fehleranfällig und auf die Detektion oberflächennaher Schädigungen beschränkt, weshalb nachfolgend beschriebene Auswertemethodik zum Einsatz kommt.

Vor Beginn der Auswertung wurden die Rohdaten zunächst in das frei verfügbare HDF5 Format konvertiert (analog zu Versuch 1 aus Kapitel 5). Dabei wurde zusätzlich der Bildbereich so zugeschnitten, dass die über die Edelstahlspiegel detektierte Oberflächentemperatur der Probe von der linken (L) und rechten (R) Seite nebeneinander dargestellt werden. Zudem wurde die laterale Verschiebung der Probe in Zugrichtung durch Verschieben des Auswertefensters anhand der Positionsmarker ausgeglichen. Das dreidimensionale Datenarray beinhaltet damit die Information über die detektierte Oberflächentemperatur  $T$  in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  für jede  $x$ - und  $y$ -Position von beiden Seiten der Probe und ist der Ausgangsdatensatz für die weitere Auswertung, die in zwei Schritten erfolgte. Im ersten Schritt wurde eine definierte Anzahl an Bildern  $N$ , auch als Auswertefenster bezeichnet, mit Hilfe der DFT pixelweise ins Frequenz-

spektrum überführt, sodass die Information des Bildstapels und insbesondere die durch eine Schädigung hervorgerufene Erwärmung der Oberfläche in den Amplituden- und Phasenbildern sichtbar werden. Analog zu Kapitel 5 wurde hierzu die von Numpy zur Verfügung gestellte FFT Funktion verwendet, die auf [152] basiert und eine effiziente und schnelle Berechnung der DFT ermöglicht. Im zweiten Schritt erfolgte die Identifizierung und Separierung lokaler Schädigungsereignisse. Anschließend wurde das Vorgehen für die übrigen Bildstapel mit gleicher Konfiguration wiederholt, bis der gesamte IR-Bildstapel verarbeitet war. Zuletzt erfolgte die Zusammenfassung der identifizierten Schädigungsereignisse zu einem Gesamtschädigungsbild der Probe. Auch die Darstellung der in einem definierten Zeitraum erfolgten Schädigung ist auf diese Weise möglich. Das allgemeine Vorgehen ist Abbildung 6.30 dargestellt.

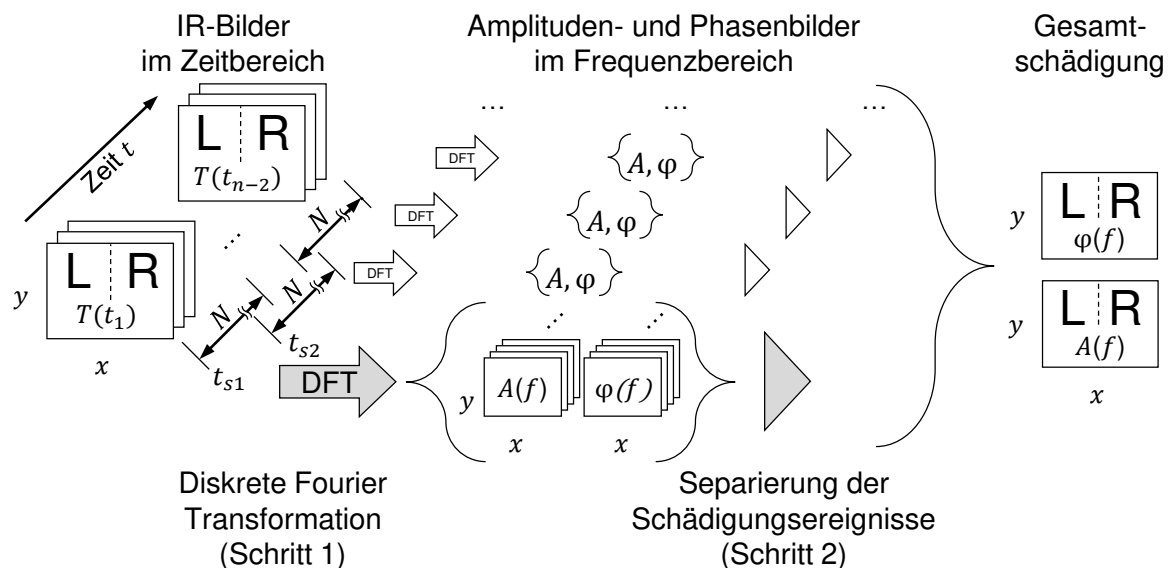


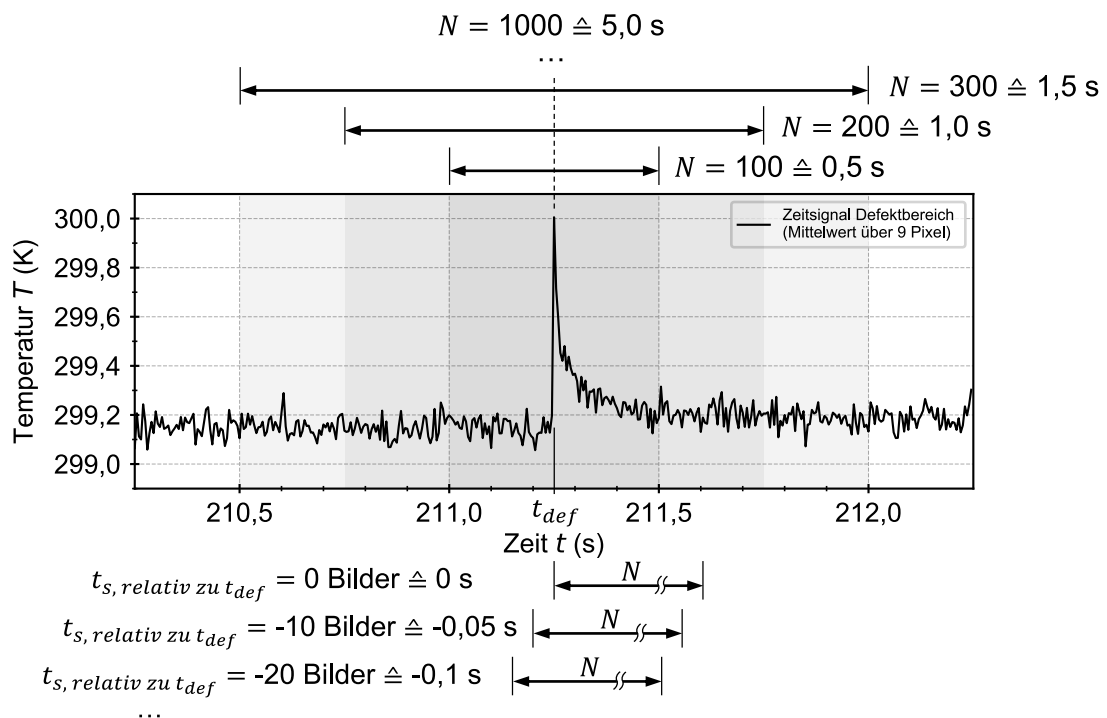
Abb. 6.30: Übersicht der Auswertemethodik. Systematische Verarbeitung kleinerer Stapel von IR-Bildern mit Hilfe der DFT, Identifizierung und Separierung der Schädigungsereignisse in den Amplituden- und Phasenbildern und Zusammensetzung zu einem Gesamtschädigungsbild.

### Schritt 1: Diskrete Fourier Transformation

Das Ergebnis der pixelweisen DFT ist maßgeblich von der Länge des Auswertefensters  $N$  sowie von der zeitlichen Position der Schädigung innerhalb eines Auswertefensters abhängig, was unter Umständen eine zeitliche Überlappung der Auswertefenster erfordert. Zudem stehen für die weitere Auswertung mehrere potenzielle Frequenzen zur Verfügung. Um den Auswerteaufwand zu reduzieren wird bei der Auswahl der optimalen Auswerteparameter die Maximierung der Länge des Auswertefensters  $N$  verfolgt. Zudem sollen die Überlappungsbereiche zwischen den zeitlich aufeinanderfolgenden Auswertefenstern minimiert bzw. vermieden werden. Auf der anderen Seite muss die Schädigung zuverlässig detektierbar und quantifizierbar sein, was nur möglich

ist wenn der Kontrast zur Referenzumgebung ausreichend groß ist. Als Maß für den Kontrast wird in diesem Abschnitt der Arbeit das SNR nach Formel 5.20 aus Kapitel 5 verwendet, wobei ein manuell gesetzter Bereich auf der Schädigungsfläche als Signal  $S_{sig}$  und ein großflächiger Bereich auf der gleichen Seite der Probe außerhalb der Schädigung als Referenzbereich  $S_{ref}$  gesetzt wird. Zur Ermittlung der minimalen und optimalen Auswerteparameter wird eine Parameterstudie durchgeführt und die Länge des Auswertefensters  $N$  systematisch von 10 bis 100 in Schritten von 10 Bildern bzw. von 100 bis 1000 in Schritten von 100 Bildern variiert, wobei der Zeitpunkt der Schädigungsentstehung jeweils in der Mitte gelassen wird. Das Vorgehen wird in Abbildung 6.31 (a) für ein beispielhaftes Schädigungsereignis gezeigt, wobei auf der  $x$ -Achse die Zeit  $t$  (s) und auf der  $y$ -Achse die Temperatur  $T$  (K) dargestellt ist. Der Temperaturverlauf ist über 9 px gemittelt. Durch die systematische Vergrößerung des Auswertefensters  $N$  verkleinert sich die Frequenzauflösung der Amplituden- und Phasenbilder bei gleichbleibender Aufnahmezeit  $SR$  gemäß Formel 2.16. Für die Identifizierung geeigneter Parameter wurden alle verfügbaren Frequenzen bis 10 Hz

- (a) Variation der Länge des Auswertefensters  $N$ , symmetrisch zum Zeitpunkt des Schädigungsereignisses  $t_{def}$



- (b) Variation der zeitlichen Position des Auswertefensters  $t_s$  (gemessen in Bildern) in Schritten von 10 Bildern in Bezug auf Zeitpunkt des Schädigungsereignisses  $t_{def}$

Abb. 6.31: Temperaturverlauf eines oberflächennahen Schädigungsereignisses. (a) Systematische Variation der Länge des Auswertefensters  $N$  und (b) systematische zeitliche Verschiebung des Auswertefensters in Bezug auf den Zeitpunkt des Schädigungsereignisses  $t_{def}$ .

berücksichtigt. Im Anschluss an die Variation der Länge des Auswertefensters  $N$  erfolgte die systematische zeitliche Verschiebung des Auswertefensters unter Beibehaltung einer festen Anzahl an Bildern  $N$ . Dies dient der Bestimmung der notwendigen Überlappungsgröße der Auswertefenster zueinander, vgl. Abbildung 6.31 (b). Ein beispielhaftes Bild eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs vor und nach der DFT ist in Abbildung 6.32 dargestellt, wobei links das IR-Bild im Zeitbereich gezeigt ist, auf dem die Schädigung das erste Mal zu sehen ist. Deutlich zu erkennen ist die großflächige Erwärmung der Probe, die durch eine externe Lichtquelle verursacht wurde und als Störquelle für die Thermografie zu identifizieren ist. Auf der rechten Seite von Abbildung 6.32 ist das Amplitudenbild bei 3,33 Hz (erstellt aus einem Bildstapel mit  $N = 60$  Bilder) und die Bereiche, die für die Bestimmung des SNR auf beiden Seiten der Probe verwendet werden, dargestellt. Als Signal  $S_{sig}$  wird ein  $3 \times 60$  px großer Bereich in der Mitte der sichtbaren Schädigung und als Referenz  $S_{ref}$  wird ein  $100 \times 60$  px großer Bereich außerhalb der sichtbaren Schädigung gesetzt. Analog dazu wird für die Parameterstudie tieferliegender Zwischenfaserbrüche aus Stufe 2 ein Bereich von  $3 \times 45$  px in der Mitte der sichtbaren Schädigung für  $S_{sig}$  gewählt. Die Größe des Referenzbereiches  $S_{ref}$  bleibt gleich. Die Ergebnisse der Parameterstudie, die an dem Beispiel aus Abbildung 6.32 erfolgt, werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert und für den gesamten Bildstapel bzw. die übrigen Proben des gleichen Lagenaufbaus (jeweils für Stufe 1 und Stufe 2 separat) verwendet.

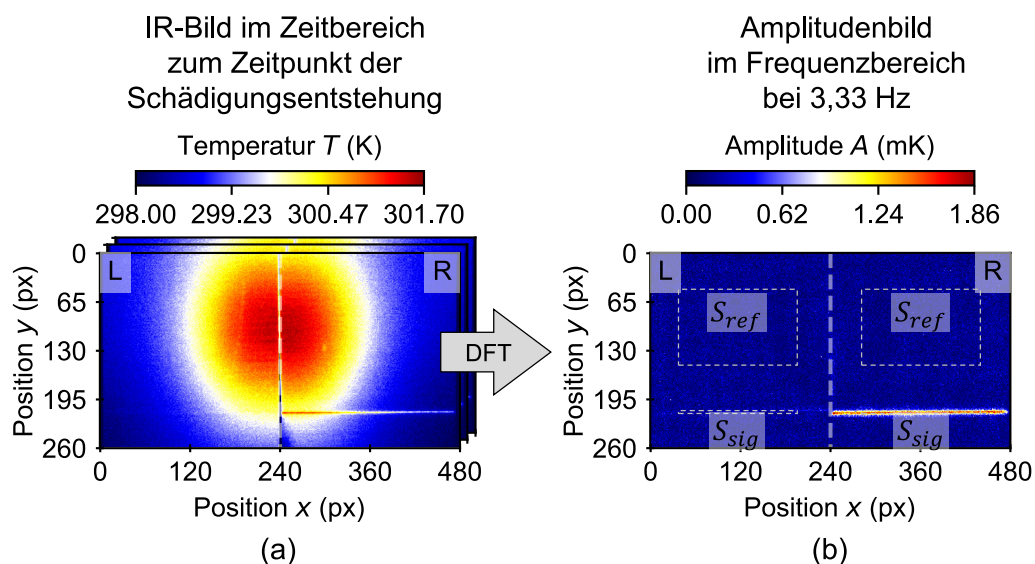


Abb. 6.32: Transformation des unbearbeiteten IR-Bildstapels (a) mit Hilfe der DFT (unter Verwendung der FFT) aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich (b). Dargestellt ist das Amplitudenbild bei 3,33 Hz, erstellt aus einem Bildstapel mit 60 Bildern inkl. der Bereiche, die für die Ermittlung des SNR verwendet werden ( $S_{sig}$  und  $S_{ref}$  symmetrisch für die linke (L) und rechte (R) Seite).



## Schritt 2: Separierung der Schädigungsereignisse

Im zweiten Schritt der Auswertung erfolgt die Identifizierung und Separierung der Schädigungsereignisse, welche notwendig ist, um die Gesamtschädigung über einen definierten Zeitraum darstellen zu können. Ohne diesen Schritt würde ein Aufsummieren der Amplitudenbilder dazu führen, dass die Schädigungen im Gesamtbild im Rauschen untergehen. Zur Identifizierung der Schädigungskonturen wurde das Bild zunächst mit einem Medianfilter der Größe  $5 \times 5$  px gefiltert. Damit werden sämtliche Ausreißer und potenzielle Pixelfehler eliminiert. Detaillierte Informationen zur Auswahl und Anwendung lateraler Bildfilter zur Identifizierung von Schädigungsereignissen sind in [84] zu finden. Anschließend wurde das quadratische Mittel RMS (*engl.* root mean square) des gefilterten Bildes ermittelt und basierend darauf ein Binärbild bzw. Maske erstellt. Dabei wurden alle Werte unterhalb des zweifachen quadratischen Mittels auf null und oberhalb dessen auf eins gesetzt werden. Durch Multiplikation der erstellten Maske mit dem auszuwertenden ungefilterten Amplitudenbild bleibt nur noch der Bereich der Schädigung übrig. Das Vorgehen ist in Abbildung 6.33 exemplarisch dargestellt.

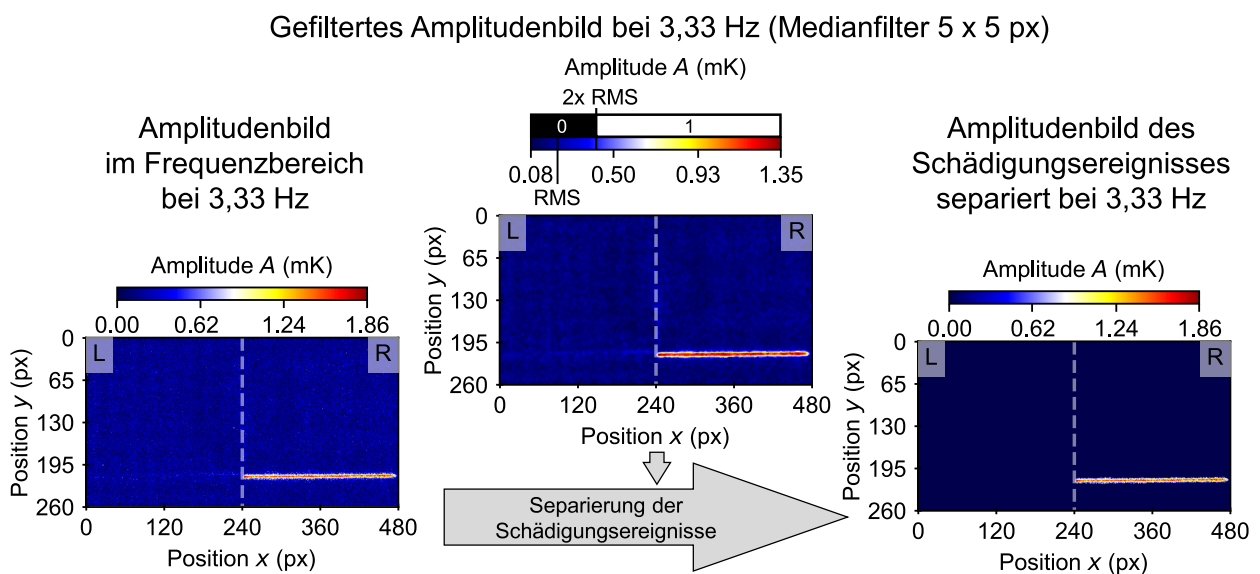


Abb. 6.33: Separierung der Schädigungsereignisse durch Filtern des Amplitudenbildes (Medianfilter  $5 \times 5$  px) und erstellen eines Binärbildes bzw. einer Maske mit Hilfe des doppelten RMS. Anschließende Separierung der Schädigungsereignisse durch Multiplikation des Amplitudenbildes mit der erzeugten Maske.

## 6.3 Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der obersten Lage

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Detektion von oberflächennahen Zwischenfaserbrüchen aus Stufe 1 der in Abbildung 6.28 gezeigten Konfiguration diskutiert.

### 6.3.1 Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse

Der Einfluss der Länge des Auswertefensters  $N$  auf das SNR wird anhand eines einzelnen oberflächennahen Zwischenfaserbruchs gezeigt und kann auf die übrigen Zwischenfaserbrüche in der obersten Lage übertragen werden. Abbildung 6.34 zeigt die Ergebnisse der Parameterstudie in dem Bereich von 100 bis 1000 Bildern. Auf der  $x$ -Achse wird die Frequenz  $f$  (Hz) und auf der  $y$ -Achse das SNR (dB) dargestellt. Die Anzahl der ausgewerteten Bilder bzw. die Länge des Auswertefensters  $N$  findet sich in der farblichen Kodierung der dargestellten Kreise wieder. Abbildung 6.34 zeigt auf der linken Seite das Ergebnis für die Amplitudenbilder und auf der rechten Seite für die Phasenbilder. Während das SNR bei den Amplitudenbildern Werte zwischen 0 und etwa 23 dB annimmt, liegt es bei den Phasenbildern im Bereich zwischen -10 und etwa 3 dB. Dies ist zurückzuführen auf die Methode zur Berechnung des SNR. Bei der Verwendung von Formel 5.20 fließt die Standardabweichung im defektfreien Referenzbereich  $\sigma_{ref}$  als Divisor in die Berechnung ein. Anders als bei der aktiven Thermografie, existiert bei der passiven Thermografie im defektfreien Bereich keine Veränderung der Temperatur und demnach keine Referenz für die Phase. Infolgedessen liegen die absoluten Phasenwerte zwischen  $-\pi$  und  $\pi$  und decken damit den gesamten möglichen Bereich ab, vgl. Abbildung 6.35 (b). Dies sorgt wiederum für eine vergleichsweise hohe Standardabweichung  $\sigma_{ref}$  und damit einhergehend für

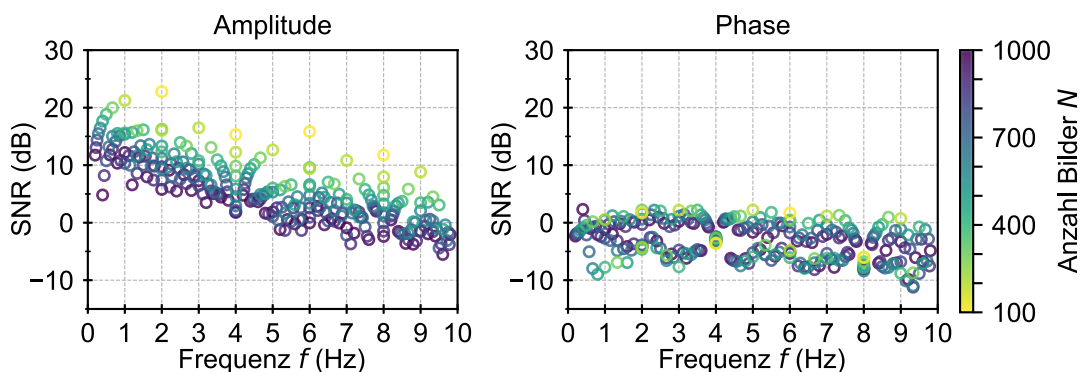


Abb. 6.34: SNR eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs in den Amplituden- bzw. Phasenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder  $N$  und der Frequenz  $f$ .

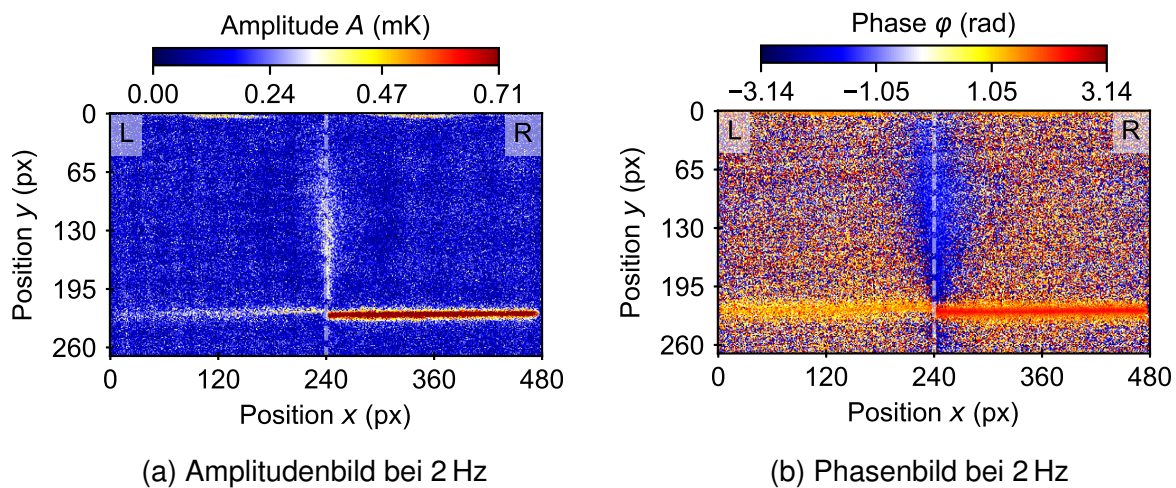


Abb. 6.35: Amplituden- und Phasenbild eines Zwischenfaserbruchs in der obersten Lage eines vierlagigen Laminats ( $f = 2$  Hz,  $N = 100$  Bilder).

ein sehr niedriges SNR. Obwohl die Phase im Vergleich zur Amplitude viel sensibler auf eine Änderung des Signals reagiert, ist die Verwendung der Phasenbilder für die Auswertung mit der hier vorgestellten Methode ungeeignet. Aus diesem Grund werden die Phasenbilder im weiteren Verlauf dieses Kapitels nicht weiter betrachtet. Eine Möglichkeit zur Auswertung der Phasenbilder der passiven Thermografie wird in Kapitel 7 vorgestellt und diskutiert.

Die Länge des Auswertefensters  $N$  hat einen großen Einfluss auf das SNR bei den Amplitudenbildern, wobei das SNR mit zunehmender Länge des Auswertefensters über alle Frequenzen hinweg abnimmt, zu sehen als violette Kreise in Abbildung 6.34. Das maximale SNR der Amplitudenbilder liegt bei 22,79 dB und wird bei einer Länge des Auswertefensters  $N = 100$  Bildern und bei der Frequenz  $f = 2$  Hz erreicht. Die Tendenz zeigt jedoch, dass das Optimum bei einer geringen Anzahl an Bildern und bei höheren Frequenzen zu erwarten ist. Aus dem vorangegangenen Kapitel 5 resultiert, dass für eine erfolgreiche Quantifizierung der Defekte ein SNR von mindestens 10 dB erforderlich ist. Dies wird auch schon in Abbildung 6.34 erreicht, weshalb eine Optimierung der Auswerteparameter nicht zwingend erforderlich ist und nur eine geringe Verbesserung mit sich bringt. Die Ergebnisse der Parameterstudie im Bereich von 10 bis 100 Bildern sind im Anhang in Abbildung A.78 zu finden. Daraus folgt, dass das maximale SNR von 22,92 dB bei einer Länge des Auswertefensters  $N = 60$  Bildern und einer Frequenz  $f = 3,33$  Hz liegt.

Wird die Anzahl der Bilder  $N$  konstant gehalten, kann ein abnehmendes SNR bei zunehmender Frequenz  $f$  beobachtet werden. Im Gegensatz dazu kann ein hohes

SNR auch bei hohen Frequenzen  $f$  erreicht werden, wenn die Anzahl der Bilder  $N$  entsprechend niedrig gewählt wird. Die Information der umliegenden nicht abbildbaren Frequenzen geht an dieser Stelle nicht verloren, sondern wird auf die abgebildeten Frequenzen umverteilt. Auf diese Weise ist ein SNR von 22 dB für Schädigungen an der Oberfläche auch bei 10 und 20 Hz zu erreichen. Die Erwärmung der Probe durch die externe Lichtquelle ist bei niedrigen Frequenzen bis 1 Hz zu beobachten, weshalb für die weitere Auswertung höhere Frequenzen ab etwa 2 Hz zu bevorzugen sind. In Prüfaufbauten ohne größere Störfaktoren kann es ggf. sinnvoll sein, auch niedrigere Frequenzen zu analysieren und damit auch tieferliegende Defekte zu visualisieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Auswertung bei 2 Hz ausreichend ist, wobei das Auswertefenster  $N$  im Bereich zwischen 100 und 300 Bildern gewählt werden sollte, um ein ausreichendes SNR zu erreichen und gleichzeitig möglichst wenig Bildstapel auswerten zu müssen.

### **6.3.2 Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse**

Im zweiten Teil der Parameterstudie wurde der Einfluss des Zeitpunktes, zu dem die Schädigung innerhalb des Auswertefensters auftritt, untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.36 dargestellt, wobei wie in Abbildung 6.34 auf der  $y$ -Achse das SNR in dB und in der farblichen Kodierung der Kreise die Anzahl der ausgewerteten Bilder  $N$  dargestellt ist. Für die Auswertung wurden, basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 6.3.1, vier Längen des Auswertefensters  $N$  gewählt: 60 Bilder, was der optimalen Länge zur Generierung des maximalen SNR entspricht, sowie 100, 200 und 300 Bilder, was entsprechend die Anzahl der auszuwertenden Bildstapel verringert und damit praktikabler ist. Auf der  $x$ -Achse ist der Startzeitpunkt  $t_s$  relativ zum Zeitpunkt der Schädigung  $t_{def}$  dargestellt. Um die Vergleichbarkeit zum ersten Teil der Parameterstudie herzustellen, wird als Einheit an dieser Stelle die Anzahl von Bildern statt  $s$  verwendet. Dabei beträgt das Zeitintervall zwischen zwei Bildern 0,005 s. Das SNR wurde bei 2 Hz (bzw. bei 3,33 Hz im Falle von  $N = 60$  Bilder) ermittelt.

Es ist eine Schwankung des SNR um etwa  $\pm 3$  dB für alle vier untersuchten Längen der Auswertefenster zu sehen, sofern das Schädigungsereignis innerhalb des Auswertefensters liegt. Der größte Abfall des SNR ist jeweils zu beobachten, wenn der Startzeitpunkt  $t_s$  des Auswertefensters maximal weit weg liegt, das Schädigungsereignis allerdings noch einschließt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Schädigungsereignis zum Ende des Auswertefensters noch nicht vollständig abgeklungen ist und das Signal damit nicht im Ganzen abgebildet wird. Dies erklärt auch den eher sanften Abfall des SNR wenn das Auswertefenster in die entgegengesetzte Richtung verschoben wird

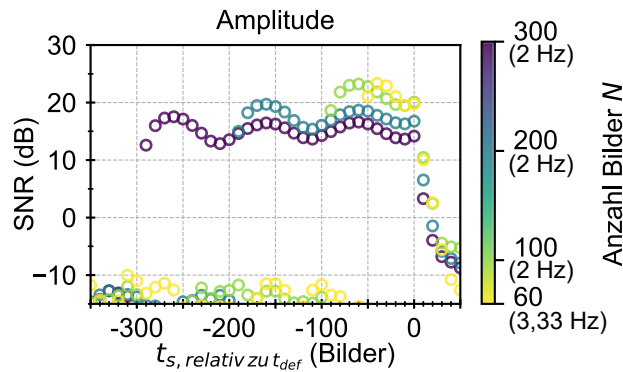


Abb. 6.36: Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der ersten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema.

(+10 bzw. +20 Bilder). In diesem Fall fließt das noch abklingende Signal in die Auswertung ein. Da die für die Quantifizierung erforderlichen 10 dB in allen Konfigurationen innerhalb der Länge der Auswertefenster erreicht werden, ist es nicht notwendig, diese überlappend anzuordnen.

### 6.3.3 Visualisierung der gesamten Schädigung durch oberflächennahe Zwischenfaserbrüche

Im vorangegangenen Kapitel wurde ermittelt, dass zur Detektion oberflächennaher Zwischenfaserbrüche (Stufe 1) die Auswertung der Amplitudenbilder bei 2 Hz ausreichend ist, wobei die Länge des Auswertefensters  $N$  zwischen 100 und 300 Bilder betragen sollte. Optional kann auch bei 60 Bildern ausgewertet werden, was das höchste SNR bringt. Eine zeitliche Überlappung der Auswertefenster ist nicht notwendig (siehe Kapitel 6.3.2). Abbildung 6.37 zeigt die in dem gesamten Zeitraum identifizierten Schädigungen mit unterschiedlichen Längen für die Auswertefenster: (a)  $N = 60$  Bilder, (b)  $N = 100$  Bilder, (c)  $N = 200$  Bilder und (d)  $N = 300$  Bilder.

Es ist zu sehen, dass größere Schädigungen (Zwischenfaserbrüche über die komplette Breite) mit allen Konfiguration detektiert werden können, mittlere Schädigungen (Zwischenfaserbrüche bis 5 mm Länge) können zwar mit allen Konfigurationen detektiert werden, aber die Konturen können bei (d) nur schwer abgebildet werden. Kleinere Schädigungen (Zwischenfaserbrüche bis 2 mm Länge) sind am besten mit (a) und (b) zu detektieren und sind bei (d) nicht zu sehen.

Zusammenfassend kann für die Länge des Auswertefensters  $N$  die Verwendung von 100 Bildern empfohlen werden, wobei eine Überlappung der Auswertefenster zueinander nicht notwendig ist. Dadurch ist die Bearbeitung zwar umfangreicher als bei der

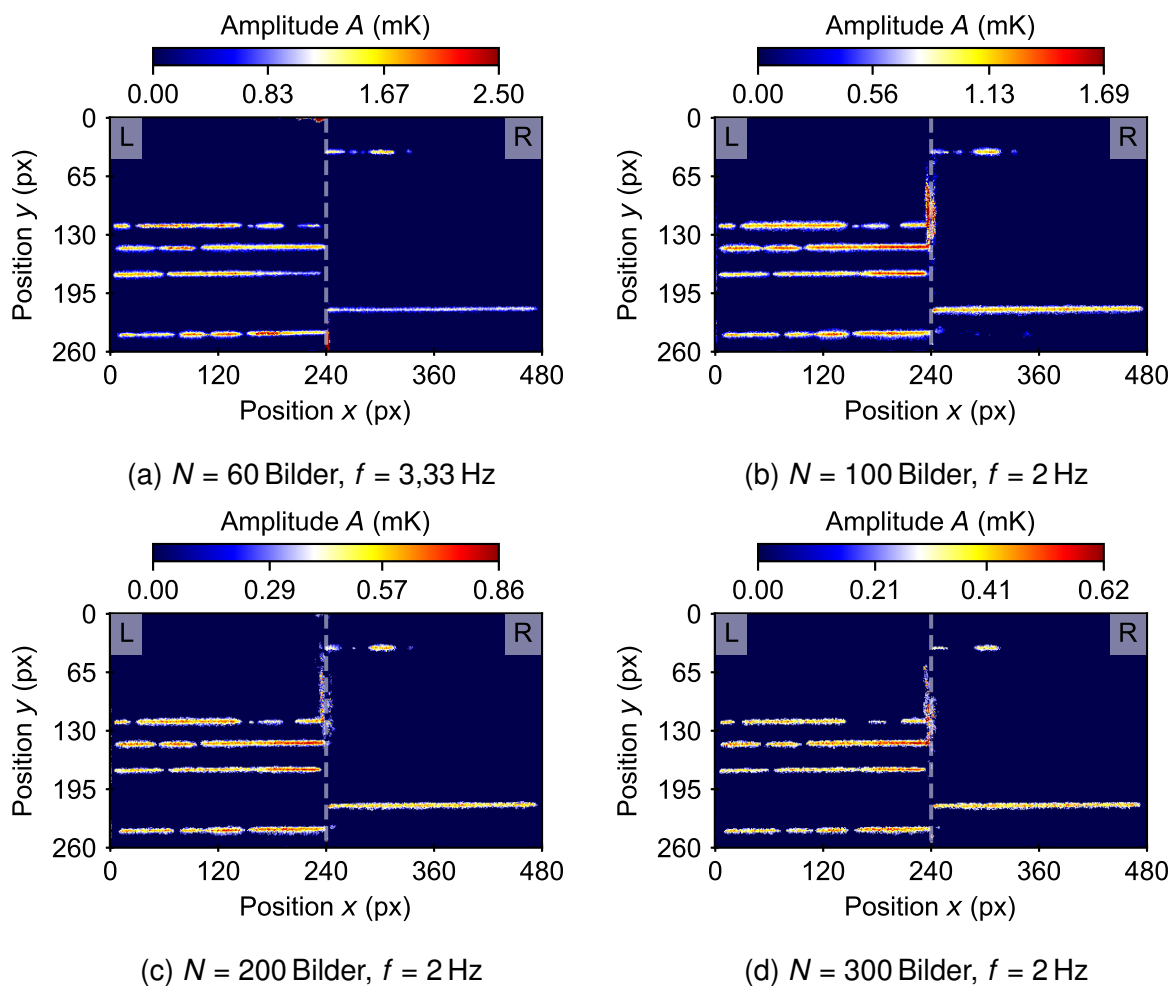


Abb. 6.37: Darstellung aller anhand der Amplitudenbilder identifizierten Schädigungsereignisse auf der linken (L) und rechten (R) Seite der Probe bei vier verschiedenen Konfigurationen.

Verwendung von 300 Bildern, allerdings scheint dies der beste Kompromiss zwischen Genauigkeit der Methode und Praktikabilität zu sein.

## 6.4 Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der zweiten und dritten Lage

Analog zum vorangegangenen Kapitel werden nachfolgend die Ergebnisse zur Detektion tieferliegender Zwischenfaserbrüche aus Stufe 2 der in Abbildung 6.28 gezeigten Konfiguration diskutiert. Während oberflächennahe Schädigungen aus Stufe 1 selten exakt gegenüberliegen, sind innen liegende Zwischenfaserbrüche aus Stufe 2 in der Regel in der gesamten Probendicke zu beobachten, weshalb eine separate Behandlung von Vorder- und Rückseite nicht notwendig ist. Nähere Informationen hierzu sind in Kapitel 6.4.3 zu finden.

### 6.4.1 Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse

Die Ergebnisse der Parameterstudie sind in Abbildung 6.38 dargestellt. Das maximale SNR von 19,4 dB liegt bei 0,5 Hz (ermittelt bei  $N = 400$  Bilder). Das maximal erreichbare SNR ist damit nur etwas kleiner als das maximal erreichbare SNR eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs aus Stufe 1 der Untersuchung. Die Auswertefrequenz ist nicht zu verwechseln mit der Modulationsfrequenz, die im Rahmen der Lock-In Thermografie verwendet wird und eingestellt werden müsste, um die entsprechende Untersuchungstiefe zu realisieren. In diesem Fall wäre eine Frequenz  $f$  von etwa 30 Hz notwendig, um die thermischen Diffusionslänge  $\mu = 0,133$  mm zu realisieren. Stattdessen spiegelt die Auswertefrequenz zum einen das Signal der Erwärmung und zum anderen den lateralen Wärmefluss innerhalb der Probe wieder. Das plötzlich auftretende Schädigungsereignis setzt schlagartig eine definierte Menge an Wärmeenergie frei, die sich anschließend material- und richtungsabhängig verteilt.

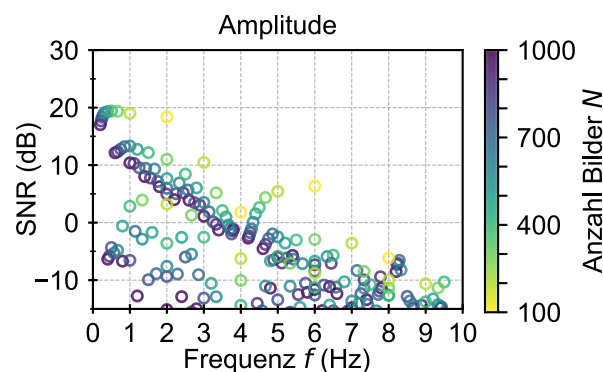


Abb. 6.38: SNR eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten Lage in den Amplitudenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder  $N$  und der Frequenz  $f$ .

### 6.4.2 Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse

Anders als bei oberflächennahen Zwischenfaserbrüchen, wo die freigesetzt Wärmeenergie zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Schädigung innerhalb des Auswertefensters einen SNR oberhalb von 10 dB liefert, hat der Zeitpunkt des Zwischenfaserbruchs der zweiten Lage innerhalb des Auswertefensters einen Einfluss auf das SNR. In Abbildung 6.39 ist dies für die Längen des Auswertefensters  $N = 300, 400$  und  $500$  Bilder bzw. für die Frequenzen  $f = 0,4, 0,5$  und  $0,6$  Hz dargestellt. Bei den Amplitudenbildern liegen jeweils etwa 75 % der Messwerte (in Abhängigkeit von der Länge des Auswertefensters) oberhalb von 10 dB. Um alle Zwischenfaserbrüche zuverlässig und mit ausreichendem SNR detektieren zu können ist es daher erforderlich die Auswertefenster mindestens 25 % überlappen zu lassen. Bei einer Länge des Auswertefensters

von 400 Bildern ist demnach eine Überlappung von mindestens 100 Bildern erforderlich.

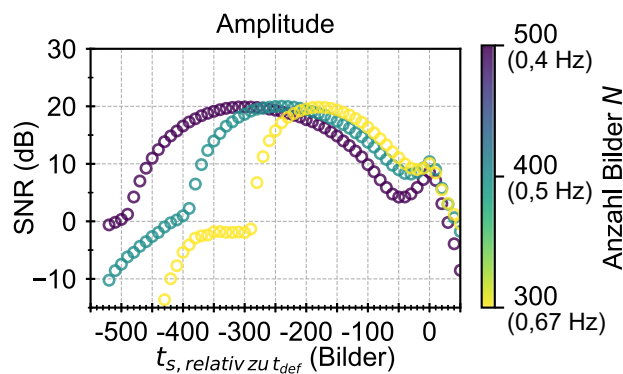


Abb. 6.39: Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten bzw. dritten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema.

#### 6.4.3 Visualisierung der gesamten Schädigung durch Zwischenfaserbrüche in der zweiten Lage

Während oberflächennahe Zwischenfaserbrüche in den unbearbeiteten IR-Bildern mit etwas Aufwand gefunden werden können, sind sie ab der zweiten Lage nicht mehr ohne Weiteres zu detektieren. Wie in Abbildung 6.40 (a) gezeigt, ist ein Zwischenfaserbruch in der zweiten Lage in den IR-Bildern nicht direkt zu sehen. Erst durch Verwenden eines Referenzbildes (aufgenommen etwa 0,1 s vorher), welches von den Messwerten abgezogen wird, kann die Schädigung, wenn auch nur schwach, sichtbar gemacht werden. Dargestellt ist dies in Abbildung 6.40 (b).

Das SNR der Schädigung beträgt in diesem Bild lediglich 4,27 dB. Insgesamt ist die Schädigung in 15 Bildern mit einem SNR von mindestens 0 dB zu sehen. Eine Steigerung des SNR auf 11,12 dB bzw. auf 14,37 dB kann durch Anwenden eines Medianfilters der Größe  $3 \times 3$  px bzw.  $5 \times 5$  px in Anlehnung an [84] erreicht werden. Die gefilterten Differenzbilder sind in Abbildung 6.40 (c) und (d) dargestellt. Auch wenn das SNR auf diese Weise über etwa 25 Bilder oberhalb von 10 dB verbleibt, ist die Art der Auswertung umfangreich und fehleranfällig, womit Schädigungsereignisse in der großen Menge an Daten untergehen könnten.

Verglichen damit ist die Auswertung der Amplitudenbilder relativ einfach und liefert ein SNR von 19,4 dB der gleichen Schädigung, und das auch ohne weitere Filterung. Im Phasenbild macht sich die durch eine Schädigung verursachte Temperaturerhöhung



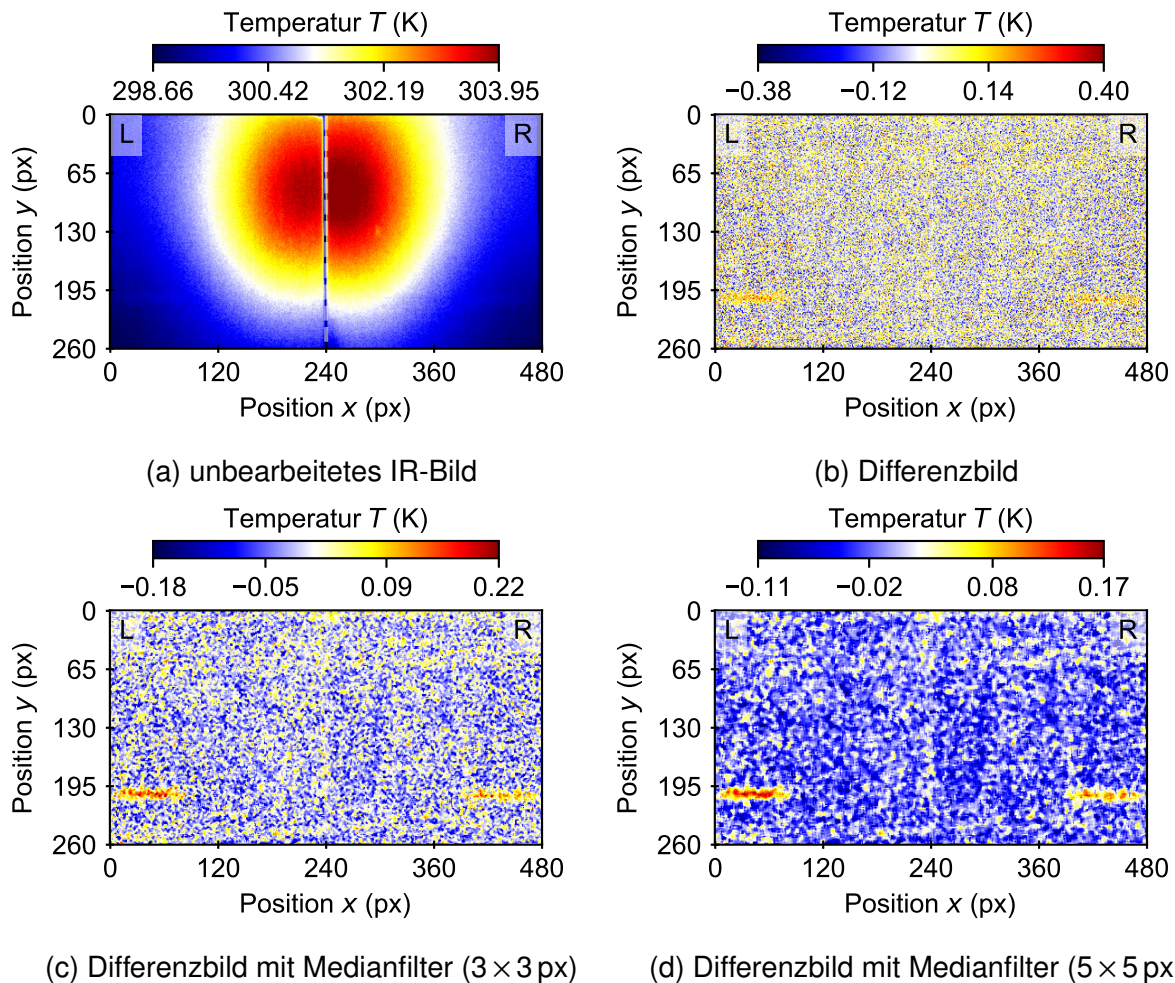


Abb. 6.40: Dargestellt ist das unbearbeitete IR-Bild (a), die Differenzbild nach Abzug des Referenzbildes (aufgenommen etwa 0,1 s vorher) (b), sowie das Differenzbild gefiltert mit einem Medianfilter der Größe  $3 \times 3$  px (c) bzw.  $5 \times 5$  px (d) zum Zeitpunkt, wenn das SNR maximal ist (etwa 0,04 s bzw. 8 Bilder nach dem Zeitpunkt der Schädigungsentstehung).

durch gleichbleibende Phasenwerte über Regionen bemerkbar. Das Amplituden- und Phasenbild ist in Abbildung 6.41 dargestellt. Das SNR innen liegender Zwischenfaserbrüche wie in Abbildung 6.41 gezeigt, fällt nur etwas geringer aus als das SNR außen liegender Zwischenfaserbrüche (z.B. aus Abbildung 6.33). Allerdings werden die Konturen des Schädigungsbereiches verhältnismäßig schlecht dargestellt, was auf den lateralen Wärmefluss innerhalb der Probe und die geringen Temperaturunterschiede zurückzuführen ist. Die Separierung der einzelnen Schädigungsereignisse ist damit etwas schwieriger als bei den äußeren Zwischenfaserbrüchen, kann aber dennoch nach der gleichen Methodik durchgeführt werden.

In Abbildung 6.42 (a) sind alle anhand der Amplitudenbilder identifizierten Schädigungsereignisse der Probe dargestellt (ermittelt bei  $N = 400$  Bilder und  $f =$

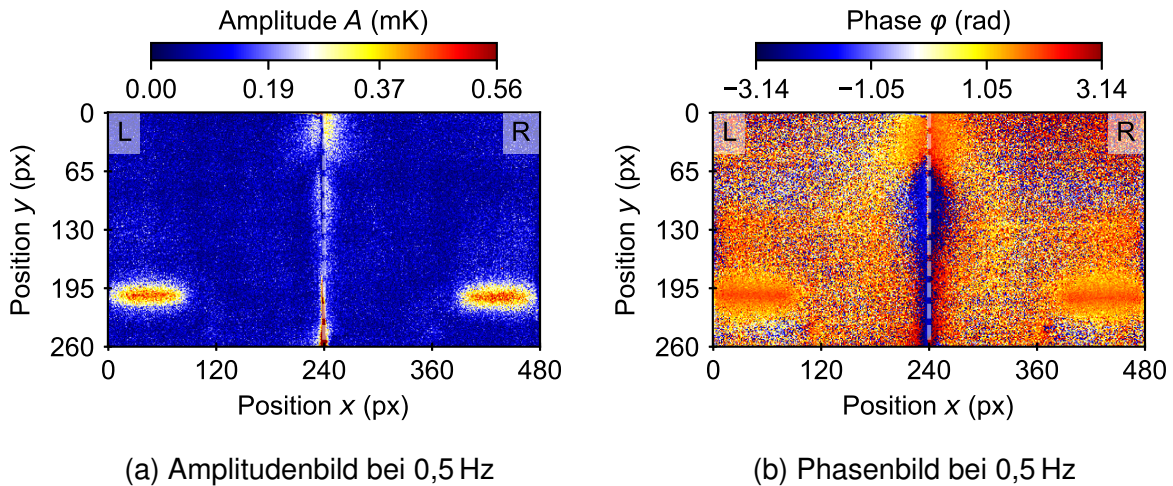


Abb. 6.41: Amplituden- und Phasenbild eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten und dritten Lage eines vierlagigen Laminats ( $f = 0,5$  Hz,  $N = 400$  Bilder).

0,5 Hz). Aufgrund der im Vergleich zu Stufe 1 tiefer liegenden Schädigungen, ist eine Auswertung bei tiefen Frequenzen notwendig. Dies führt im Umkehrschluss dazu, dass die Erwärmung der Probe durch die externe Lichtquelle im Amplitudenbild sichtbar ist, dargestellt als dunkelroter Bereich in der Mitte von Abbildung 6.42 (a). Weiterhin ist die Symmetrie der Schädigungsentstehung zu sehen. Nahezu alle identifizierten Zwischenfaserbrüche sind auf beiden Seiten der Probe sichtbar, was darauf hindeutet, dass die Zwischenfaserbrüche mittig stattfinden und sich über beide inneren Lagen ausbreiten. Diese Annahme wird durch die Mikroskopieaufnahme in Abbildung 6.42 (b) anhand einer beispielhaften Probe aus Stufe 2 belegt. Es ist zudem zu beobachten, dass innenliegende Schädigungen selten über die komplette Probenbreite wachsen und sich

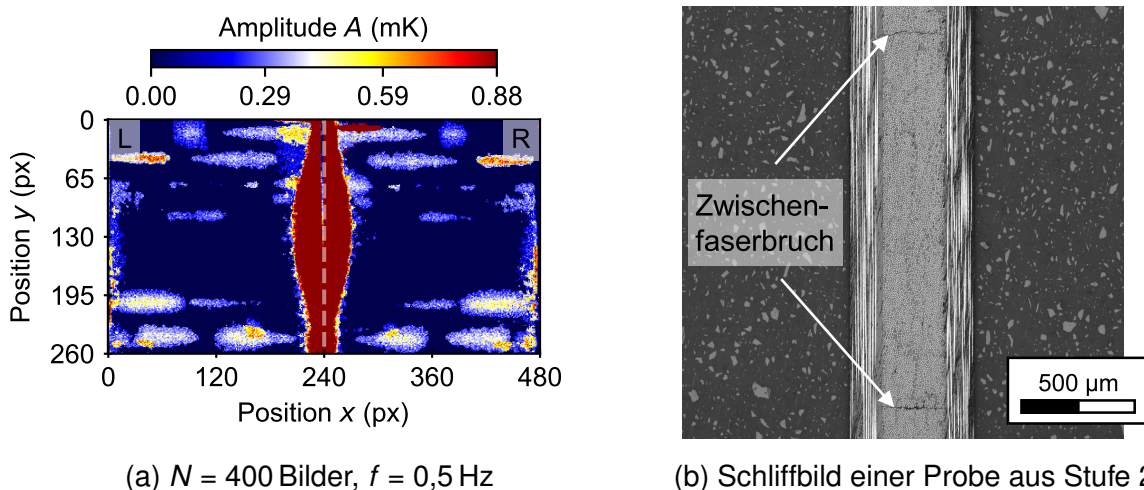


Abb. 6.42: (a) Kumulative Darstellung aller identifizierter Schädigungen in der zweiten und dritten Lage eines vierlagigen Laminats. (b) Schlibbild einer Probe aus Stufe 2 mit Zwischenfaserbrüchen in beiden mittleren Lagen des Laminats.

stattdessen immer wieder mittelgroße Risse (4 bis 8 mm) bilden, was auf die Beschaffenheit des Materials zurückzuführen ist. Die passive Thermografie in Kombination mit der hier beschriebenen Auswertemethodik ist damit durchaus in der Lage, Zwischenfaserbrüche in der zweiten Lage zuverlässig zu detektieren und damit nähere Informationen über das Degradationsverhalten eines Werkstoffs zu geben.

## 6.5 Ergebnisse und Diskussion zu Schädigungen in der vierten Lage

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Detektion von Zwischenfaserbrüchen in der vierten Lage diskutiert. Hierzu wird Stufe 1 der in Abbildung 6.28 gezeigten Konfiguration verwendet (90°-Lagen befinden sich auf der Außenseite der Probe).

### 6.5.1 Einfluss der Länge des Auswertefensters und der Frequenz auf das SNR der Schädigungsereignisse

Die durch einen oberflächennahen Zwischenfaserbruch freigesetzte Wärmeenergie ist nicht nur direkt an der Oberfläche sichtbar (Seite R aus Abbildung 6.35), sondern kann auch auf der Rückseite detektiert werden. Dies ist allerdings nicht in den IR-Bildern, sondern nur in den Amplituden- und Phasenbildern bei niedrigen Frequenzen zu beobachten. Das SNR auf der Rückseite der Probe (Seite L aus Abbildung 6.35) ist für die Amplitudenbilder in Abbildung 6.43 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das SNR die erforderliche 10 dB Grenze übersteigt, wobei mindestens  $N = 200$  Bilder für die Auswertung gewählt werden müssen. Das maximale SNR von 12,67 dB wird bei der Frequenz  $f = 0,4$  Hz (ermittelt bei  $N = 500$  Bilder) erreicht. Damit lässt sich festhalten, dass ein oberflächennaher Zwischenfaserbruch, wie er in Stufe 1 der Versuche erzeugt wurde, auch auf der Rückseite nach drei Lagen identifiziert werden kann. Dies entspricht einer Tiefe von etwa 0,4 mm.

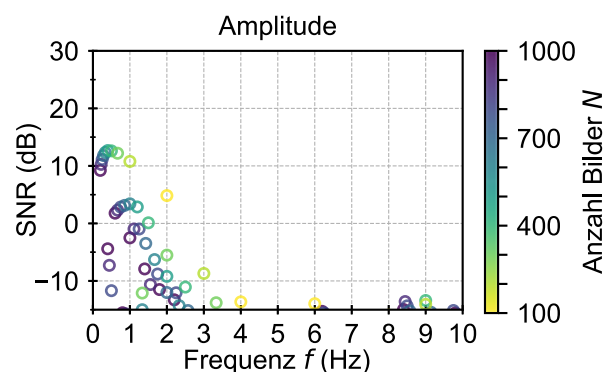


Abb. 6.43: SNR eines Zwischenfaserbruchs in der vierten Lage in den Amplitudenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder  $N$  und der Frequenz  $f$ .

### 6.5.2 Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse

Wie aus Abbildung 6.43 hervorgeht, ist die durch einen Zwischenfaserbruch verursachte Erwärmung auch auf der Rückseite der Probe sichtbar. Ein ausreichendes SNR wird allerdings erst bei tieferen Frequenzen  $f$  und dementsprechend langen Auswertefenstern  $N$  erreicht, weshalb nachfolgend Bildstapel der Länge 300, 400 und 500 Bilder verwendet werden, um den Einfluss des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR der Schädigungsereignisse von der Rückseite zu untersuchen (siehe Abbildung 6.44). Anders als bei der Untersuchung der Vorderseite übersteigt das SNR nicht durchgehend die Grenze von 10 dB, sondern zeigt einen parabelförmigen Verlauf. Das maximale SNR wird jeweils erreicht, wenn der Zeitpunkt der Schädigungsentstehung in der Mitte des Auswertefensters liegt. Der Bereich, in dem das SNR in den Amplitudenbildern die Grenze von 10 dB übersteigt, beschränkt sich auf etwa 40 bis 50 % der Länge des Auswertefensters, weshalb zur vollständigen und optimalen Detektion tieferer Schädigungen eine Überlappung der Auswertefenster notwendig ist und entsprechend etwa 50 bis 60 % der Länge des Auswertefensters  $N$  betragen sollte. Da eine in der vierten Lage detektierte Schädigung bei der untersuchten Konfiguration auf eine oberflächennahe Schädigung auf der gegenüberliegenden Seite zurückzuführen ist, wird auf eine separate Extrahierung der Schädigungen verzichtet. Künftige Forschungsarbeiten könnten hier ansetzen und die Grenzen der Methodik ausarbeiten und weitere Methoden zur Erweiterung der Tiefenreichweite untersuchen.

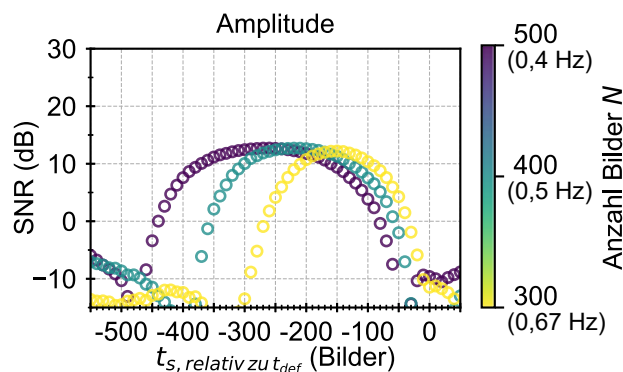


Abb. 6.44: Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der vierten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema.

## 6.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel der Arbeit wurde eine Methode zur Detektion von Schädigungen in faserverstärkten Kunststoffen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung vorgestellt,

welche auf der passiven Thermografie in Kombination mit der DFT basiert. Eine wichtige Voraussetzung der Thermografie ist die im Rahmen der Schädigungsentstehung freigesetzte Wärmeenergie, die an der Oberfläche detektierbar sein muss. Die Untersuchungen in diesem Kapitel erfolgten an kohlenstofffaserverstärkten Proben, bestehend aus vier Lagen, die so angeordnet sind, dass Zwischenfaserbrüche je nach Konfiguration in den äußeren oder inneren Lagen aufgetreten sind. Im Vergleich zu anderen Auswertemethoden der passiven Thermografie werden die Schädigungsereignisse nicht direkt in den IR-Bildern visualisiert, sondern der Datensatz zunächst abschnittsweise ins Frequenzspektrum überführt. Dies hat den Vorteil, dass je nach Inspektionstiefe und Konfiguration bis zu 400 mal weniger Bilder nach Schädigungen durchsucht werden müssen und das SNR der Schädigungen insgesamt gesteigert wird. Damit wird die automatisierte Auswertung auch für kleinere und tieferliegende Defekte, die in den IR-Bildern sonst kaum sichtbar sind, ermöglicht. Durch abschnittsweise Zusammenfassung separierter Schädigungsereignisse ist es möglich, das Degradationsverhalten im Frequenzraum zu visualisieren.

Eine Parameterstudie wurde durchgeführt, um den Einfluss der Länge des Auswertefensters  $N$  und der Frequenz  $f$  auf das SNR der Schädigungen aufzuzeigen. Zudem wurde über die Verschiebung des Auswertefensters der Einfluss des zeitlichen Versatzes auf das SNR untersucht und die Größe der erforderlichen Überlappung der Auswertefenster ermittelt. Es wurde gezeigt, dass für die Detektion oberflächennaher Defekte eine Länge des Auswertefensters  $N = 100$  Bilder gewählt werden kann und die Schädigungen anhand der Amplitudenbilder bei der Frequenz  $f = 2$  Hz ausgewertet werden sollten. Ein zeitlicher Versatz der Auswertefenster ist nicht notwendig. Zur zuverlässigen Detektion von Schädigungen in der zweiten Lage (0,133 mm) ist die Auswertung bei der Frequenz  $f = 0,5$  Hz mit einer Länge des Auswertefensters  $N = 400$  Bilder erforderlich. Zudem mussten die Auswertefenster überlappend angeordnet werden, wobei einer Überlappung von 100 Bildern ausreichend ist, um ein konstantes SNR über 10 dB zu erreichen. Schädigungen in der dritten Lage konnten nicht visualisiert werden, da diese in der Probe jeweils symmetrisch auftreten und demnach von der Schädigung der zweiten Lage überlagert werden. Schädigungen in der vierten Lage, demnach auf der Rückseite der Probe, sind mit einer Frequenz  $f = 0,4$  Hz und einer Länge des Auswertefensters  $N = 500$  Bilder am besten zu visualisieren.

Nicht detektiert wurden in diesem Zusammenhang Faserbrüche. Dies ist auf den frühzeitigen Abbruch der Messung zurückzuführen, der notwendig war, um das Equipment, welches für die Schallemissionsanalyse eingesetzt wurde, zu schützen. Weiterführende Untersuchungen könnten die Grenzen der Methodik, sowie den Einfluss des Materials und der Faserorientierung untersuchen. Zudem könnte die Implementie-

rung einer Auswerterroutine für die Phasenbilder die Tiefenreichweite des Verfahrens erheblich erhöhen. Weiterhin könnten Versuche bis zum Totalversagen der Proben durchgeführt werden, um die Detektierbarkeit der Faserbrüche zu untersuchen.

## **7 Lateral orts aufgelöste und zeitaufgelöste Quantifizierung von Impactschädigungen mit Hilfe der passiven und aktiven Thermografie**

Impactschädigungen haben sowohl im Rahmen der Materialcharakterisierung, als auch während der Verwendung von FKV eine hohe Relevanz, weshalb sie im Rahmen dieser Arbeit als praxisrelevantes Beispiel näher betrachtet werden. Dabei wird die passive Thermografie als In-situ-Überwachungsmethode während der Schädigungsentstehung eingesetzt und die Schädigung im Zeitbereich und im Frequenzbereich lateral orts aufgelöst quantifiziert. Zudem werden Möglichkeiten zur zeitaufgelöste Quantifizierung, d.h. der Beschreibung des Schädigungsfortschritts anhand der IR-Bilder, Amplituden- und Phasenbilder diskutiert. Anschließend erfolgt die Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie unter Verwendung der Impulsthermografie mit PPT Auswertung. Zur Bestimmung der realen Schädigungsfläche wird als Referenzmethode die Radiographie eingesetzt. Die lateral orts aufgelöste Quantifizierung erfolgt für alle Methoden nach dem gleichen vollautomatisierten Prinzip. Eine gesonderte Methode ist nur für die Phasenbilder der passiven Thermografie notwendig. Der in Kapitel 5 verwendete Ansatz zur Bestimmung der lateralen Defektgröße anhand von Querschnittsprofilen ist zur Quantifizierung von Impactschädigungen, die sich über mehrere Lagen des Materials ausbreiten, nicht geeignet. Stattdessen wird ein Schwellwertverfahren vorgestellt, welches auf der Ermittlung von Referenzgrößen in einem zuvor definierten Referenzbereich basiert und unabhängig von der Bearbeitungsmethoden angewandt werden kann.

### **7.1 Probengeometrie und -präparation**

Das allgemeingültige Vorgehen der Probenherstellung im Rahmen dieser Arbeit wird in Kapitel 4 beschrieben. Nach der Herstellung wurden die Proben mit Hilfe einer Labortrennsäge unter Verwendung eines diamantbesetzten Sägeblattes jeweils auf das Endmaß  $150 \times 100 \text{ mm}^2$  zugeschnitten. Anschließend wurden die Proben zur Sicherstellung der Defektfreiheit mit Impulsthermografie in Reflexionsanordnung mit PPT Auswertung analog zum Aufbau in Kapitel 5, sowie mit Ultraschall in Hilfsreflektorkonfiguration geprüft, bevor die Proben bei  $23 \text{ °C}$  und  $50 \%$  relativer Luftfeuchtigkeit gemäß DIN EN ISO 291 bis zur Versuchsdurchführung gelagert wurden. Vor Durchführung der Versuche wurde sichergestellt, dass die Massenänderung an zwei aufeinander folgenden Tagen kleiner als  $0,01 \%$  ist. Für die Versuche standen neun Proben zur Verfügung, die alle aus der gleichen Probenplatte entnommen wurden.

## 7.2 Experimentelle Untersuchung

Die Quantifizierung der Impactschädigungen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mit Hilfe der passiven und aktiven Thermografie, sowie der Radiographie, welche als Referenzmethode eingesetzt wird. Daher wird jeder Versuchsaufbau zunächst separat vorgestellt und anschließend in Kapitel 7.2.6 das methodenübergreifende Vorgehen zur Quantifizierung vorgestellt. Die Auswertung wird in Python 3.7 unter Verwendung der Pakete NumPy, Pandas, Matplotlib, Scipy und OpenCV realisiert.

### 7.2.1 Versuchsaufbau der passiven Thermografie während der Schlagbeanspruchung

Die gezielte Einbringung einer Schlagbeanspruchung erfolgte in Anlehnung an die Normen DIN EN 6038 und AITM1-0010 an einem hauseigenen Fallturm. Ein runder Impaktor mit einem Durchmesser von 16 mm wurde eingesetzt. Die Masse des gesamten Schlittens betrug 4,74 kg. Zur Aufzeichnung der Kraft wurde eine 100 kN Kraftmessdose verwendet. Die Geschwindigkeit des Schlittens unmittelbar vor dem Aufprall wurde mit einem Laservibrometer OFV-525 der Firma Polytec[159] und einem Umlenkspiegel direkt am Schlitten gemessen. Zur Vermeidung eines wiederholten Aufpralls wurde eine Fangvorrichtung eingesetzt. Die gewünschte Schädigungsenergie wurde über die Fallhöhe  $h_{Fall}$  des Schlittens eingestellt. Als Zielgrößen wurden 5 J, 7 J und 10 J verwendet und jeweils drei Proben geschädigt. Zur Ermittlung der tatsächlichen Schädigungsenergie wurde die Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Aufprall verwendet. Da im Rahmen dieser Untersuchung vor allem die reale Schädigungsfläche von Interesse ist, werden die gemessenen Schädigungsenergien im Anhang in Tabelle A.7 dargestellt und finden im weiteren Verlauf der Auswertung keine weitere Beachtung.

Die Oberflächentemperatur der Rückseite wurde über einen Edelstahlspiegel mit einer IR-Kamera Image IR 9410 BI S mit einem Teleobjektiv (50 mm) aufgezeichnet. Der Abstand zwischen Probenoberfläche und Kamera betrug etwa 850 mm. Der Aufbau ist in Abbildung 7.45 (a) und (b) dargestellt. Die Auflösung der aufgenommenen IR-Bilder wurde anhand von bekannten Referenzgrößen ermittelt, wobei die inneren Maße der Probenhalterung verwendet wurden, und beträgt 0,2368 mm/px. Die IR-Kamera wurde mit der Steuerung des Fallturms synchronisiert und mit einer Aufnahmezeitrate SR von 800 Hz betrieben.



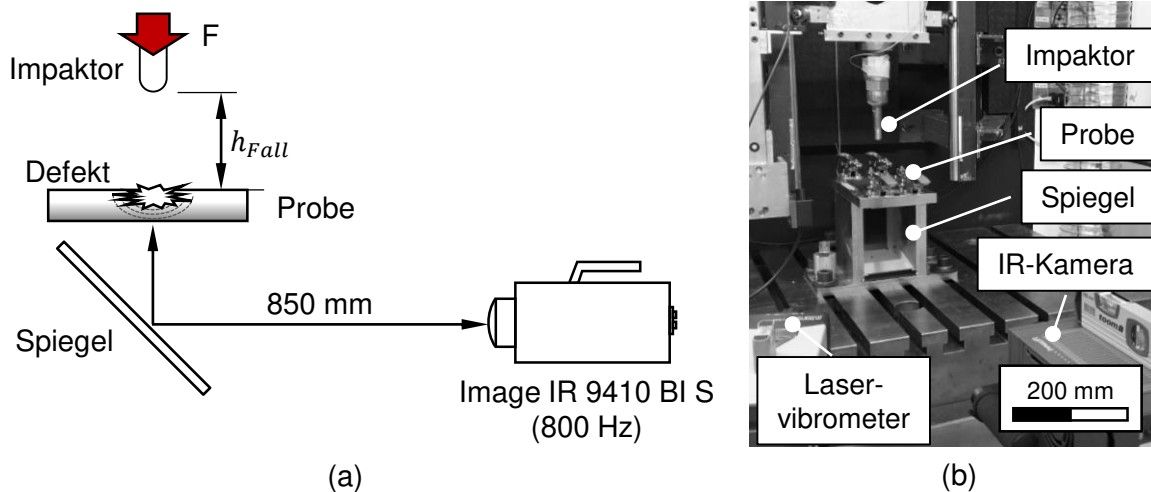


Abb. 7.45: (a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit passiver Thermografie während der Schädigungseinbringung, (b) Foto des Versuchsaufbaus am Fallturm.

## 7.2.2 Auswertemethodik der passiven Thermografie

Analog zu Kapitel 5 und 6 wird auch hier zunächst die aufgenommene Sequenz in das frei verfügbare HDF5 Format konvertiert bevor eine weitere Verarbeitung durchgeführt wird. Anders als bei der quasi-statischen Zugprüfung aus Kapitel 6, wo die Schädigungsereignisse zeitlich und örtlich verteilt auftreten und die passive Thermografie zur zeitlichen und örtlichen Beschreibung der Degradation eingesetzt wird, erfolgt die Schädigung aufgrund einer Schlagbeanspruchung innerhalb kürzester Zeit zentral in der Mitte des Probekörpers. Von primärem Interesse ist die Ermittlung der gesamten Schädigungsfläche und die Beschreibung der Degradation. Die Quantifizierung der Schädigung erfolgt bei der passiven Thermografie anhand der IR-Bilder in einem Zeitfenster von 0 bis 3 s, sowie anhand der Amplituden- und Phasenbilder. Um den Einfluss der Länge des Auswertefensters  $N$  zu untersuchen, wurde diese auf 500, 1000 und 1500 Bilder gesetzt. Aus der Diskussion in Kapitel 6 geht hervor, dass eine systematische Verschiebung des Auswertefensters nicht notwendig ist, sofern der Startzeitpunkt des Schädigungsereignisses vollständig berücksichtigt wird. Daher wird auf eine Variation des Startzeitpunktes  $t_s$  an dieser Stelle verzichtet und der Startzeitpunkt so gewählt, dass der Zeitpunkt der ersten Temperaturerhöhung aufgrund des Schädigungsereignisses  $t_{impact}$  im Auswertefenster eingeschlossen ist. Abbildung 7.46 zeigt das schematische Vorgehen und die systematische Variation der Länge des Auswertefensters  $N$ . Für die Quantifizierung der lateralen Defektgröße (beschrieben in Kapitel 7.2.6 und 7.2.7) werden neben den IR-Bildern auch die Amplituden- und Phasenbilder verwendet.

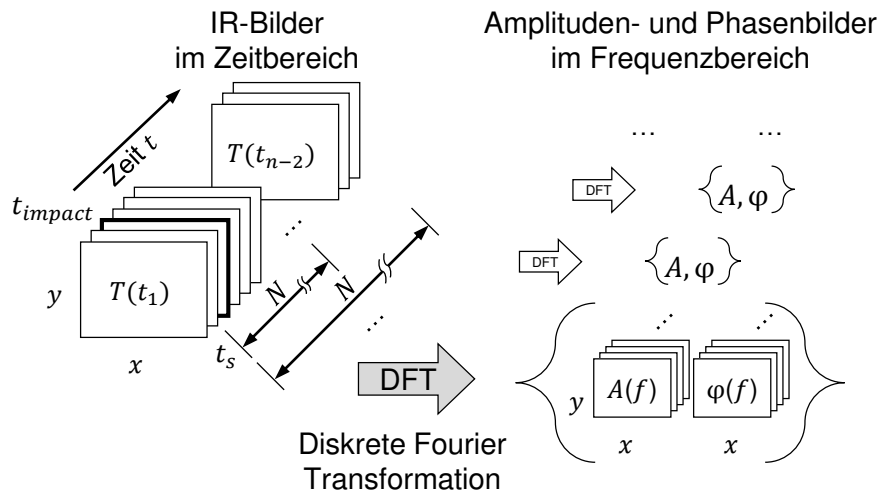


Abb. 7.46: Übersicht der Auswertemethodik. Systematische Variation der Länge des Auswertefensters  $N$  bei der Transformation der IR-Bilder mit Hilfe der DFT.

### 7.2.3 Versuchsaufbau der aktiven Thermografie vor und nach der Schlagbeanspruchung

Die aktive Thermografie an den Impactproben erfolgt komplett identisch zu Kapitel 5, weshalb an dieser Stelle darauf verzichtet wird, den schematischen Aufbau zu zeigen. Die genaue Auflösung wird auch hier anhand bekannter Referenzgrößen bestimmt und beträgt  $0,211 \text{ mm/px}$ . Die Abtastrate  $SR$  wurde auf  $180 \text{ Hz}$  belassen. Die Aufnahmezeit betrug  $30 \text{ s}$ , mit einem Pretrigger von  $0,1 \text{ s}$ . Die Xenonblitzlampe wurde bei voller Leistung betrieben und in einem Abstand von etwa  $800 \text{ mm}$  vor der Probe in Reflexionsanordnung platziert. Die Messungen erfolgten in einem Labor bei einer Raumtemperatur von  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die Proben wurden jeweils von der dem Einschlag abgewandten Seite getestet.

### 7.2.4 Auswertemethodik der aktiven Thermografie

Auch die PPT-Auswertung orientiert sich an Kapitel 5. Lediglich die Länge des Auswertefensters  $N$  wird basierend auf der Diskussion aus Kapitel 5.3 konstant auf  $1500$  Bildern belassen. Demnach sollte zwar für eine optimale Darstellung der Defektgröße tiefenabhängig die Länge des Auswertefensters  $N$  variiert werden, da diese allerdings gering ausfällt und der Fokus an dieser Stelle auf der Gegenüberstellung der Methoden zur Quantifizierung liegt, wird nachfolgend auf eine Variation der Länge des Auswertefensters  $N$  verzichtet. Auch bei der aktiven Thermografie erfolgt die Quantifizierung der lateralen Defektgröße (beschrieben in Kapitel 7.2.6) sowohl anhand der IR-Bilder, als auch der Amplituden- und Phasenbilder.

### 7.2.5 Referenzmessung mit Hilfe der Radiographie

Die Ermittlung der realen Schädigungsfläche  $A_{real}$  nach Schlagbeanspruchung wurde im Rahmen dieser Versuchsreihe wie bereits in Kapitel 5 am Röntgenmikroskop durchgeführt. Da die durch Schlagbeanspruchung verursachte Schädigung keine Änderung der Dichte verursacht hat, ist das Absorptionsverhalten im Bereich der Schädigung demnach in etwa so groß wie das der Umgebung. Um den Kontrast zwischen Schädigungsbereich und intaktem Bereich zu steigern, wurde ein Kontrastmittel injiziert. Hierzu wurden die Proben in Anlehnung an [160] für 24 Stunden in eine Lösung aus 250 g Zinkjodid, 80 ml destilliertem Wasser, 80 ml Isopropanol und 1 ml Netzmittel (Tetenal Mirasol 2000) bei Raumtemperatur eingelegt. Zwischen dem Entnehmen der Proben und der Durchführung der Messung wurden die Proben bei Raumtemperatur gelagert. Für die Aufnahmen wurde auch hier das Röntgenmikroskop von Zeiss Versa 520 mit dem Flat-Panel Detektor verwendet. Die Messungen wurden mit einer Beschleunigungsspannung von 40 kV, einer Detektorleistung von 3 W, einer Belichtungszeit von 3 s, einer Mittelwertbildung über 10 Bilder und einer geometrischen Auflösung von 0,019 mm/px aufgenommen. Zur Berücksichtigung des lateral ungleichmäßigen Emissions- und Absorptionsverhaltens von Röntgenquelle und Röntgendetektor, wurde auch hier ein Referenzbild mit dem Originalbild der Messung verrechnet. Für die Bestimmung der Schädigungsfläche  $A_{real}$  wurde das Absorptionsbild verwendet. Neben der automatisierten Quantifizierung, welche in Kapitel 7.2.6 beschrieben wird, erfolgte aufgrund der hohen Relevanz der Referenzmessung darüber hinaus eine zusätzliche Quantifizierung durch manuelles Freistellen des Schädigungsbereiches.

### 7.2.6 Bestimmung der lateralen Defektgröße

Grundsätzlich kann zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung die in Kapitel 2.4.3 vorgestellte und in Kapitel 5 umgesetzte FWHM Methode eingesetzt werden, wobei die Quantifizierung anhand eines Querschnittsprofils durchgeführt wird und stark vom maximalen Kontrast abhängig ist. Dies kann wiederum zu einer Fehleinschätzung bei Schädigungen mit komplexer dreidimensionaler Geometrie führen. Anstelle der FWHM Methode wird daher in diesem Kapitel ein Verfahren umgesetzt, welches auf der dynamischen Ermittlung eines Schwellwerts basiert. Das schrittweise Vorgehen wird nachfolgend erläutert und am Beispiel eines IR-Bildes der passiven Thermografie bei 0,1 s nach der Schädigungseinbringung für die 10 J Probe in Abbildung 7.48 dargestellt.

**1. Referenzfläche abziehen:** Zur Berücksichtigung einer ggf. ungleichmäßigen Erwärmung durch die externe Wärmequelle wurde im ersten Schritt der Bearbeitung eine Referenzfläche von den eigentlichen Messwerten abgezogen. Dieser Bearbei-

tungsschritt betrifft nur die IR-Bilder, Amplituden- und Phasenbilder der aktiven Thermografie. Die Referenzfläche wurde, wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, basierend auf den Messwerten im Randbereich der Probe (mit einer Breite von 20 px) für jedes Bild individuell ermittelt. Der gewählte Referenzbereich  $S_{ref\_polynom}$  ist in Abbildung 7.47 dargestellt. Basierend darauf wurde ein zweidimensionales Polynom an die Messwerte des Randbereiches angenähert und die sich somit ergebende Fläche schließlich von den Messwerten subtrahiert. Näheres zu diesem Vorgehen ist in Kapitel 5 beschrieben.

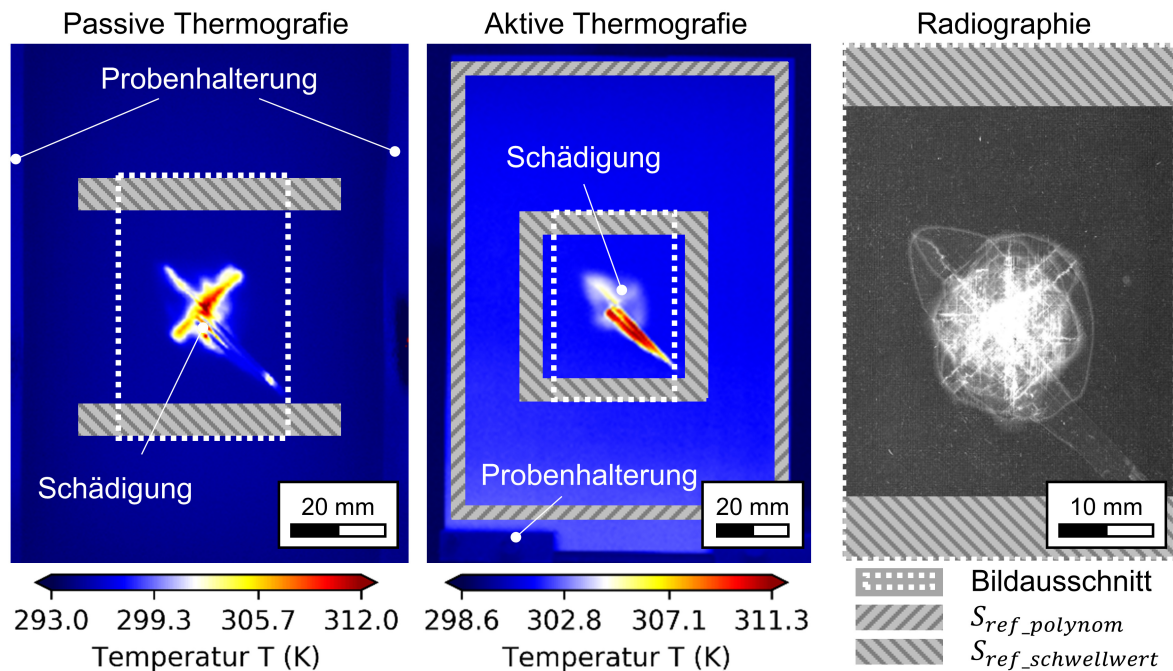


Abb. 7.47: Gesetzte Referenzbereiche bei der passiven Thermografie, der aktiven Thermografie und der Radiographie.

**2. Lateraler Medianfilter:** Im zweiten Schritt der Auswertung wurde zur Eliminierung von Ausreißern ein lateraler Medianfilter auf das in Abbildung 7.48 (a) dargestellte Ursprungsbild angewendet. Die Größe des Filters wurde dabei auf  $5 \times 5$  px (bei Radiographie auf  $20 \times 20$  px) gesetzt. Weitere Informationen zum Einsatz des Medianfilters sind in [155] zu finden. Abbildung 7.48 (b) zeigt das gefilterte Bild.

**3. Dynamischer Schwellwert:** Basierend auf dem gefilterten Bild wurden im Referenzbereich der Probe  $S_{ref\_schwellwert}$ , welcher in Abbildung 7.47 dargestellt ist, der für die Schwellwertermittlung erforderliche Mittelwert  $\bar{S}_{ref\_schwellwert}$  und die Standardabweichung  $\sigma_{ref}$  der Verteilung bestimmt. Dabei wurde der Referenzbereich  $S_{ref\_schwellwert}$  so gewählt, dass Störeinflüsse aus der Umgebung, bspw. ungleichmäßige Erwärmung durch die Wärmequelle oder ein Temperaturgradient im Bereich der Probeneinspannung, minimiert werden. Die gewählten Referenzbereiche sind in Abbildung 7.47 für die passive und aktive Thermografie sowie für die Radiographie dargestellt. Im Anschluss wurden alle Werte, die sich innerhalb

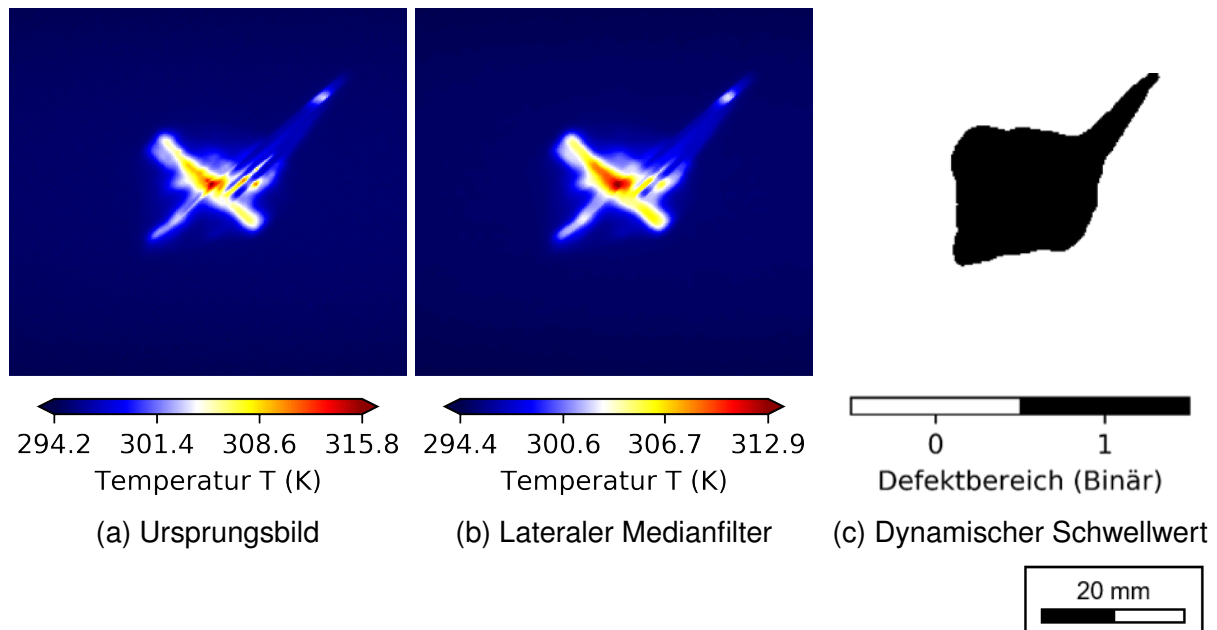


Abb. 7.48: Vorgehen bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung mit Hilfe des dynamischen Schwellwerts. Beispielhaft dargestellt anhand eines IR-Bildes der passiven Thermografie ( $t = 0,1$  s, SWF = 4).

des Bereiches von  $\bar{S}_{ref\_schwelle} \pm SWF \cdot \sigma_{ref}$  befinden, auf null gesetzt. Alle Werte außerhalb dieses Bereiches wurden als Bereich der Schädigung identifiziert und auf eins gesetzt. Der Schwellwertfaktor SWF beschreibt dabei den Multiplikator, mit dem  $\sigma_{ref}$  multipliziert wird. Im Rahmen der Auswertung wurde SWF im Bereich von 2 bis 10 in Zwischenschritten variiert. Bei der Auswertung der Ergebnisse der Radiographie wird SWF = 2 verwendet. Zum Finden und Füllen der Konturen werden die Funktionen *threshold* und *findContours* von OpenCV verwendet [161]. Der auf diese Weise ermittelte Defektbereich ist in Abbildung 7.48 (c) dargestellt (SWF = 4).

**4. Zuschnitt auf Zielgröße:** Im letzten Schritt der Auswertung erfolgt der Zuschnitt der Bilder auf eine einheitliche Größe von  $56 \times 35$  mm<sup>2</sup>. Die Größe des Zuschnittes orientiert sich am kleinsten zur Verfügung stehenden Bildausschnitt. Im konkreten Fall sind dies die Bilder der Radiographie. Der Bereich des Zuschnittes wird so gewählt, dass die Schädigung mittig auf dem Bild positioniert ist. Die Fläche der Schädigung wird schließlich durch Multiplikation der im Bildbereich liegenden und als Schädigung identifizierten Pixel mit der jeweils geltenden Auflösung ermittelt.

### 7.2.7 Sonderfall: Bestimmung der lateralen Defektgröße bei Phasenbildern der passiven Thermografie

Einen Sonderfall stellt die lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigung anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie dar. Im Vergleich zur aktiven

Thermografie, bei welcher der Zeitpunkt der Erwärmung als Referenzzeitpunkt der Phase dient, gibt es bei der passiven Thermografie keinen solchen über die gesamte Probe geltenden Referenzzeitpunkt. Die Erwärmung findet bei der passiven Thermografie nur lokal und zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt. Dies führt dazu, dass in den Bereichen, in denen keine Veränderung der Temperatur aufgrund der Schlagbeanspruchung stattfindet, lediglich ein Phasenrauschen im Bereich von  $-\pi$  bis  $\pi$  zu sehen ist. Im Gegensatz dazu stellt sich im Bereich der Schädigung über mehrere Pixel ein gleichbleibender Phasenwert ein, der vom Zeitpunkt der Schädigungsentstehung und der untersuchten Frequenz abhängig ist. Da die gesamte Schädigung nicht zu einem einzelnen Zeitpunkt, sondern über einen kurzen Zeitraum verteilt auftritt und sich die freigesetzte Wärmeenergie infolge von Wärmeleitungsprozessen innerhalb der Probe ausbreitet, können mehrere Bereiche jeweils gleichbleibender Phasenwerte vorhanden sein. Die Phasenwerte im Bereich der Schädigung können je nach Zeitpunkt der Entstehung Werte zwischen  $-\pi$  und  $\pi$  annehmen. Da dies auch dem Wertebereich im Referenzbereich entspricht, kann das in Kapitel 7.2.6 beschriebene Vorgehen zur Quantifizierung nicht angewendet werden. Stattdessen wird für die Phasenbilder der passiven Thermografie eine davon abweichende Methode eingesetzt, die nachfolgend beschrieben wird. Dabei wird angenommen, dass sich im Bereich der Schädigung über mehrere Pixel ein in etwa gleichbleibender Phasenwert (in der Größenordnung von  $\pi/12$ ) einstellt und alles was nicht als Phasenrauschen zu identifizieren ist, dem Bereich der Schädigung zugeordnet wird.

**1. Separate Betrachtung und Filterung einzelner Phasenbereiche:** Im ersten Schritt der Auswertung erfolgt die Aufteilung des Messbereiches zwischen  $-\pi$  und  $\pi$  in 12 gleich große Intervalle. Anschließend werden die Phasenwerte innerhalb der Intervalle jeweils einzeln betrachtet und weiterverarbeitet. Abbildung 7.49 (a) zeigt exemplarisch das Vorgehen für ein Phasenbild der passiven Thermografie bei  $f = 16$  Hz. Durch das Anwenden eines lateralen Medianfilters auf die zu einem Intervall gehörenden Einzelbilder werden Ausreißer unterdrückt und die Einzelwerte im defektfreien Umgebungsbereich eliminiert. Die über einen größeren Bereich gleichbleibenden Phasenwerte bleiben erhalten. Zum Einsatz kommt an dieser Stelle ein Medianfilter der Größe  $5 \times 5$  px. Anschließend werden die daraus resultierenden Bilder wieder übereinander gelegt, sodass weitestgehend nur noch der Schädigungsbereich zu sehen ist.

**2. Lateraler Median- und Boxfilter, sowie Binarisierung des Defektbereichs:** Im zweiten Schritt der Auswertung wird das Bild zunächst binarisiert, indem alle als Defektbereich identifizierten Phasenwerte auf eins gesetzt werden. Die Zwischenergebnisse der Auswertung sind in Abbildung 7.49 (b) dargestellt. Trotz Anwendung des late-

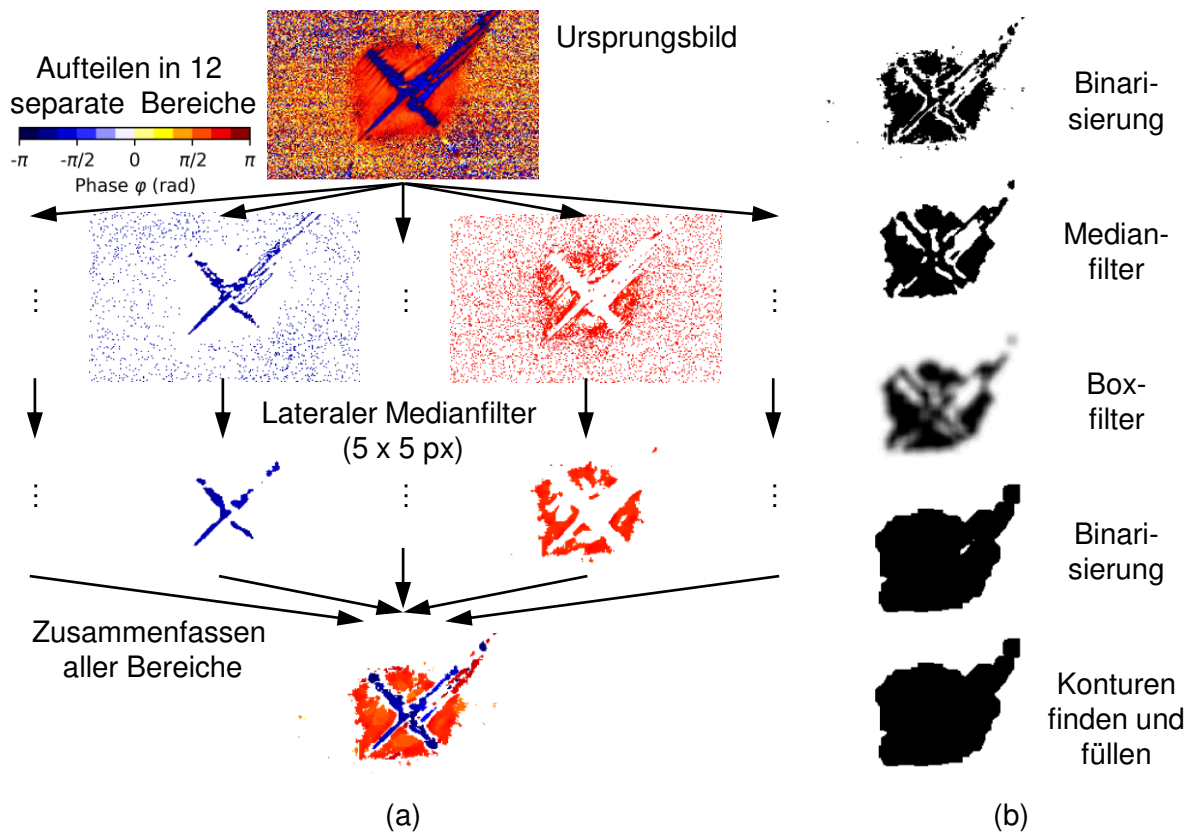


Abb. 7.49: Vorgehen bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung an den Phasenbildern der passiven Thermografie aufgeteilt in zwei Schritte: (a) separate Betrachtung und Filterung einzelner Phasenbereiche und (b) Nachbearbeitung und Separierung der Gesamtschädigung. Beispielhaft dargestellt anhand eines Phasenbildes der passiven Thermografie bei  $f = 49,6$  Hz.

ralen Medianfilters in Schritt 1 können nach wie vor kleinere Bereiche des Rauschens bestehen bleiben. Diese können durch wiederholte Anwendung eines Medianfilters mit der Größe  $5 \times 5$  px weitestgehend eliminiert werden. Durch die separate Verarbeitung der Phasenwerte und die zweifache laterale Filterung entstehen allerdings Leerstellen innerhalb des Defektbereiches, welche durch Anwendung eines lateralen Boxfilters der Größe  $10 \times 10$  px in Kombination mit einer weiteren Binarisierung zusammengefasst werden können. Im letzten Schritt werden unter Anwendung der Funktionen *threshold* und *findContours* von OpenCV [161] Konturen gefunden und gefüllt, sowie das Bild auf die einheitliche Größe von  $56 \times 35$  mm<sup>2</sup> zugeschnitten.

### 7.3 Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Quantifizierung der Schädigung mit Hilfe der Radiographie, sowie der passiven und aktiven Thermografie jeweils für eine repräsentative 5 J, 7 J und 10 J Probe vorgestellt und diskutiert. Die Ergebnisse zu den übrigen Proben sind im Anhang in den Abbildungen A.79 bis A.84 dargestellt. Auf die

Ergebnisse der ZiP vor der Schädigungseinbringung wird nicht weiter eingegangen, da keine nennenswerten Defekte vorgefunden wurden.

### 7.3.1 Quantifizierung anhand der Radiographie

Die Radiographie dient im Rahmen dieses Kapitels als Referenzmethode zur Bestimmung der tatsächlichen Schädigungsfläche, weshalb die damit ermittelte Größe nachfolgend auch als reale Schädigungsfläche  $A_{real}$  bezeichnet wird. Das dabei verwendete Absorptionsbild liefert in der Regel einen ausreichenden Kontrast um die automatisierte Methode zur Bestimmung der Schädigungsfläche anzuwenden. Lediglich im Randbereich der Schädigung kann es zu Fehlinterpretationen kommen. Darüber hinaus werden durch die automatisierte Methode teilweise Bereiche außerhalb der Schädigung erfasst, die aber offensichtlich nicht als solche zu interpretieren sind. Durch die manuelle Korrektur der lateral orts aufgelösten Quantifizierung kann im weiteren Verlauf der Arbeit die reale Schädigungsfläche  $A_{real}$  berücksichtigt werden. In Abbildung 7.50 ist zu sehen, dass zwischen der automatisierten Methode (rote Konturlinie) und der manuellen Korrektur (grüne Konturlinie) kaum Unterschiede vorhanden sind. Eine größere Abweichung ist nur bei der 10 J Probe zu beobachten.

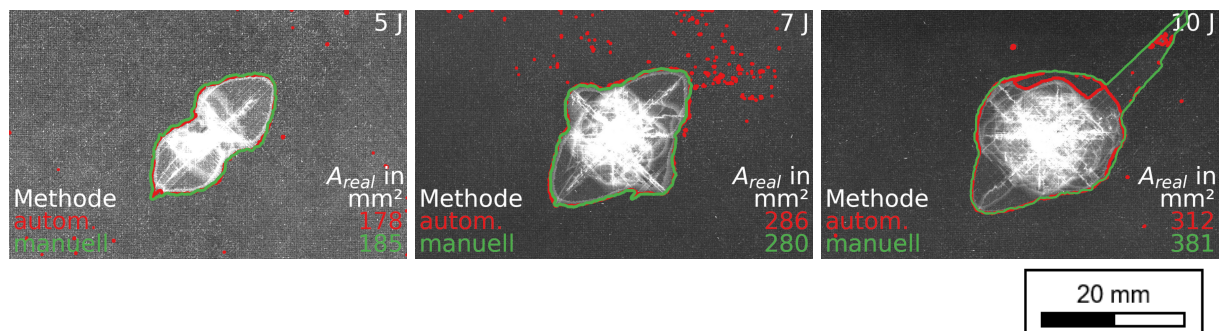


Abb. 7.50: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{real}$  anhand der Radiographie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) mit Hilfe der automatisierten Methode (rote Konturlinie, SWF = 2) und der manuellen Korrektur durch den Benutzer (grüne Konturlinie).

### 7.3.2 Quantifizierung anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie

Eine manuelle Quantifizierung der IR-Bilder ist aufgrund der großen Anzahl nicht umsetzbar. Stattdessen werden nachfolgend ausschließlich die Ergebnisse der automatisierten Quantifizierung gezeigt. Basierend auf den passiv aufgenommenen IR-Bildern kann die Schädigungsfläche  $A_{def}$  zu jedem verfügbaren Zeitpunkt bestimmt werden. In Abbildung 7.51 ist die ermittelte Fläche in Abhängigkeit von der Zeit für die drei Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) dargestellt. Die farbliche Kodierung der dargestellten Kurven entspricht dem SWF. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird



die gleiche Farbkodierung verwendet. Die mit der Radiographie ermittelte reale Schädigungsfläche  $A_{real}$  wird als schwarze Linie dargestellt.

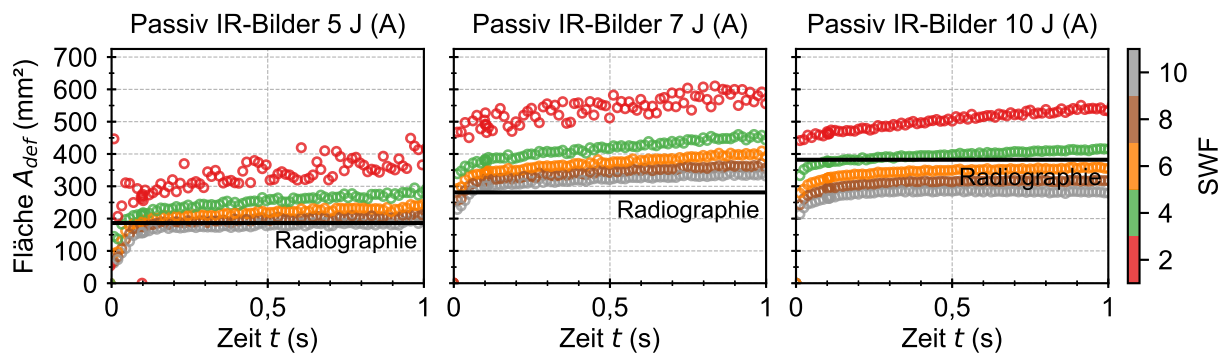


Abb. 7.51: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A).

Zu Beginn des Versuchs ist bei allen untersuchten Proben ein lokales Abkühlen aufgrund des thermoelastischen Effekts zu beobachten. Dieser hat allerdings keine Relevanz für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigung, weshalb nachfolgend nicht weiter darauf eingegangen wird. Zudem ist die dadurch hervorgerufene Temperaturveränderung gering und nur lokal zu beobachten, weswegen die lateral orts aufgelöste Quantifizierung dieses Bereiches nicht praktikabel ist. Direkt im Anschluss an die lokale Abkühlung ist die Temperaturerhöhung durch die Schädigungsentstehung und ein deutlicher und steiler Anstieg der detektierten Schädigungsfläche  $A_{def}$  zu erkennen. In dem Anfangszeitraum bildet sich die Schädigung noch aus und die dabei freigesetzte Wärmeenergie wird an die Oberfläche geleitet. Kurz darauf entspricht die ermittelte Schädigungsfläche  $A_{def}$  der realen  $A_{real}$ . Die Auswahl des Zeitpunktes bzw. des IR-Bildes ist bei der Quantifizierung entscheidend, kann aber ohne a priori Wissen über die reale Fläche der Schädigung nur schwer identifiziert werden. Zudem ist der Zeitpunkt bei den drei untersuchten Proben unterschiedlich. Zur Darstellung der realen Schädigungsgröße muss außerdem der SWF variiert werden. Ab dem Zeitpunkt, an dem die ermittelte Schädigungsfläche  $A_{def}$  mit der realen  $A_{real}$  übereinstimmt, nimmt diese kontinuierlich zu. Dies ist auf den lateralen Wärmefluss zurückzuführen.

In Abbildung 7.52 sind die Schädigungsbilder inkl. der ermittelten Schädigungsfläche  $A_{def}$  zu drei Zeitpunkten dargestellt. Bei 0,01 s ist die reale Schädigungsfläche noch nicht überall vollständig abgebildet. Ungefähr bei 0,1 s sind die Konturen weitestgehend erkennbar und entsprechen von der Form her in etwa der realen Schädigungsfläche. Die Quantifizierung anhand der passiven IR-Bilder ist um diesen Zeitpunkt herum am besten. Bereits bei 1 s nach Schädigungseinbringung wird die

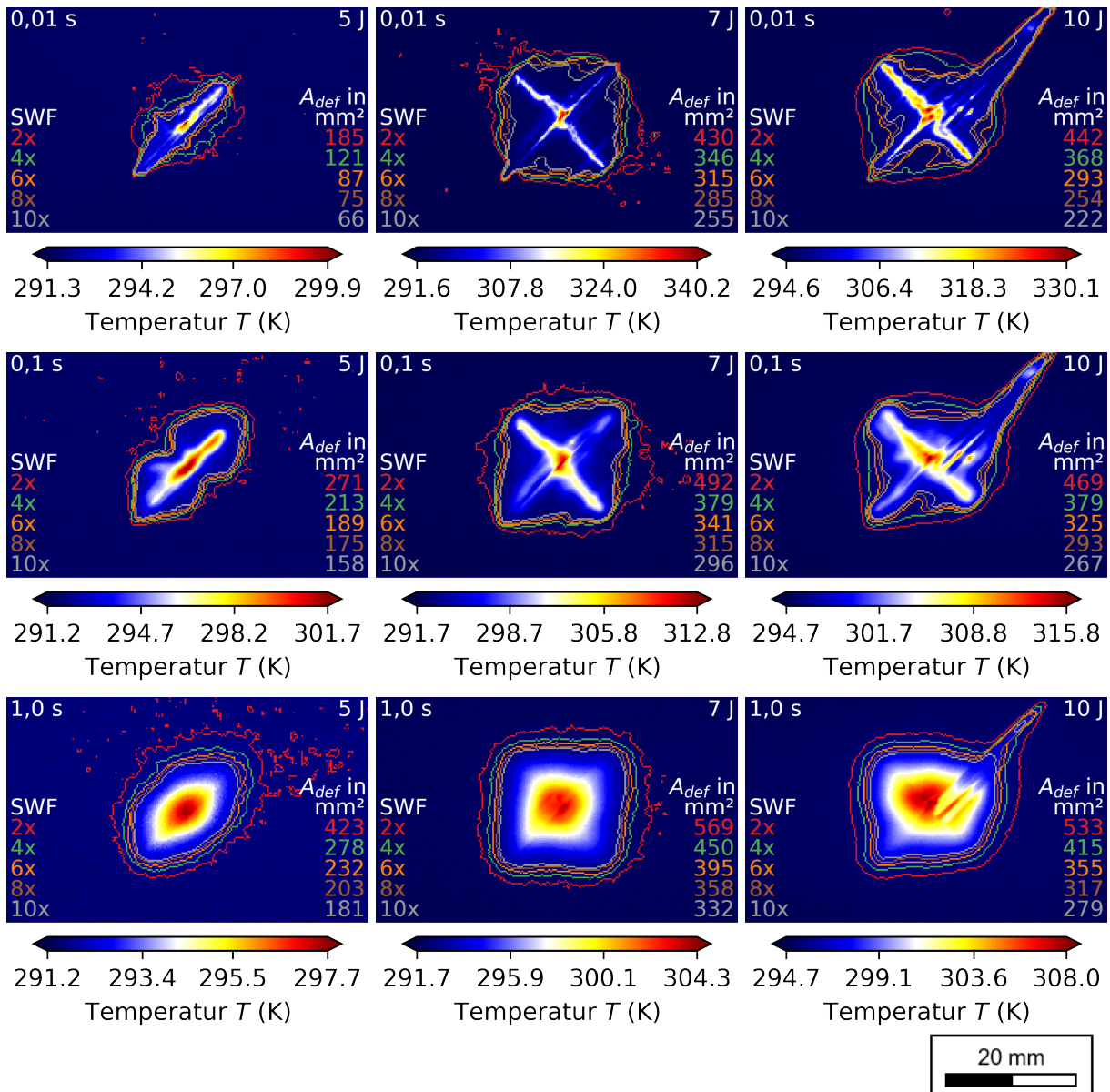


Abb. 7.52: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

eigentliche Schädigungsfläche durch den lateralen Wärmefluss nur noch verschwommen dargestellt.

Durch die Variation von SWF kann die Empfindlichkeit der automatisierten Methode zur Quantifizierung entsprechend eingestellt werden. Ein zu niedrig gewählter SWF führt dazu, dass unter Umständen auch Rauschen als Schädigungsfläche interpretiert wird. Ein zu hoch gewählter SWF führt im Umkehrschluss dazu, dass der Schwellwert zu hoch eingestellt ist und dies in einer geringen Empfindlichkeit resultiert. Unter der Annahme einer Normalverteilung werden durch  $SWF = 2$  nur rund 95,5% aller Werte des Referenzbereiches als Rauschen identifiziert [162]. Dies führt wiederum dazu,

dass fälschlicherweise Bereiche des Rauschens als Schädigung erkannt werden. Ab  $SWF = 3$  werden bereits 99,73 % berücksichtigt. Die Interpretation der roten Konturen und Kurven ist daher mit Vorsicht durchzuführen.

### 7.3.3 Quantifizierung anhand der Amplituden- und Phasenbilder der passiven Thermografie

Mit Hilfe der DFT wird eine Auswertung der Daten im Frequenzbereich ermöglicht, was bereits in Kapitel 5 gezeigt wurde. In Abbildung 7.53 und 7.56 wird die anhand der Amplituden- und Phasenbilder ermittelten Schädigungsfläche  $A_{def}$  in Abhängigkeit von der Frequenz im Bereich von 0 bis 250 Hz gezeigt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt identisch zu Abbildung 7.51. Allerdings wird zusätzlich die Länge des Auswertefensters  $N$  variiert.

#### Quantifizierung der Amplitudenbilder

Aus dem Verlauf der Kurven lassen sich für die Quantifizierung anhand der Amplitudenbilder drei markante Bereiche identifizieren:

**0–30 Hz:** In diesem Bereich wird bei niedrigen Frequenzen die Schädigungsfläche  $A_{def}$  stark überbewertet. Diese nimmt mit zunehmender Frequenz ab und erreicht gegen Ende des Bereiches die reale Schädigungsfläche  $A_{real}$ . Abgebildet wird hier vor allem der laterale Wärmefluss, weshalb die Schädigung auch größer erscheint als sie in Wirklichkeit ist. Dennoch ist die reale Form der Schädigung bereits hier zu erkennen, wie in Abbildung 7.54 für 1,6 Hz und  $N = 500$  Bilder dargestellt.

**30–100 Hz:** In diesem Bereich nimmt die gemessene Schädigungsfläche  $A_{def}$  mit zunehmender Frequenz weiterhin ab, allerdings mit einer geringeren Steigung, sodass sich ein kleines Plateau im Kurvenverlauf einstellt. Die Größe der gemessenen Schädigungsfläche  $A_{def}$  entspricht in diesem Bereich am ehesten der Größe der realen Schädigungsfläche. Die Ausprägung des Plateaus hängt stark von der Größe und der Geometrie der Schädigung ab. So ist dieses bei der 5 J Probe kaum zu sehen und nur bei  $SWF = 6$  zu erahnen. Trotz der übereinstimmenden Größe der Schädigungsfläche weicht die Geometrie der Schädigung von der Realität etwas ab. Wie in Abbildung 7.54 für 75,2 Hz und  $N = 500$  Bilder dargestellt, werden vor allem die innen liegenden Kurvenradien nur schwach abgebildet.

**100–250 Hz:** Im dritten Bereich wird die abfallende Steigung wieder größer. Die in diesem Bereich dargestellte Schädigung entspricht in etwa der Schädigung direkt an Probenoberfläche, welche teilweise nach außen offen ist. Ein leichter Anstieg ist zum Ende des Bereiches bei der 7 J Probe zu beobachten. Zur Bestimmung der gesamten

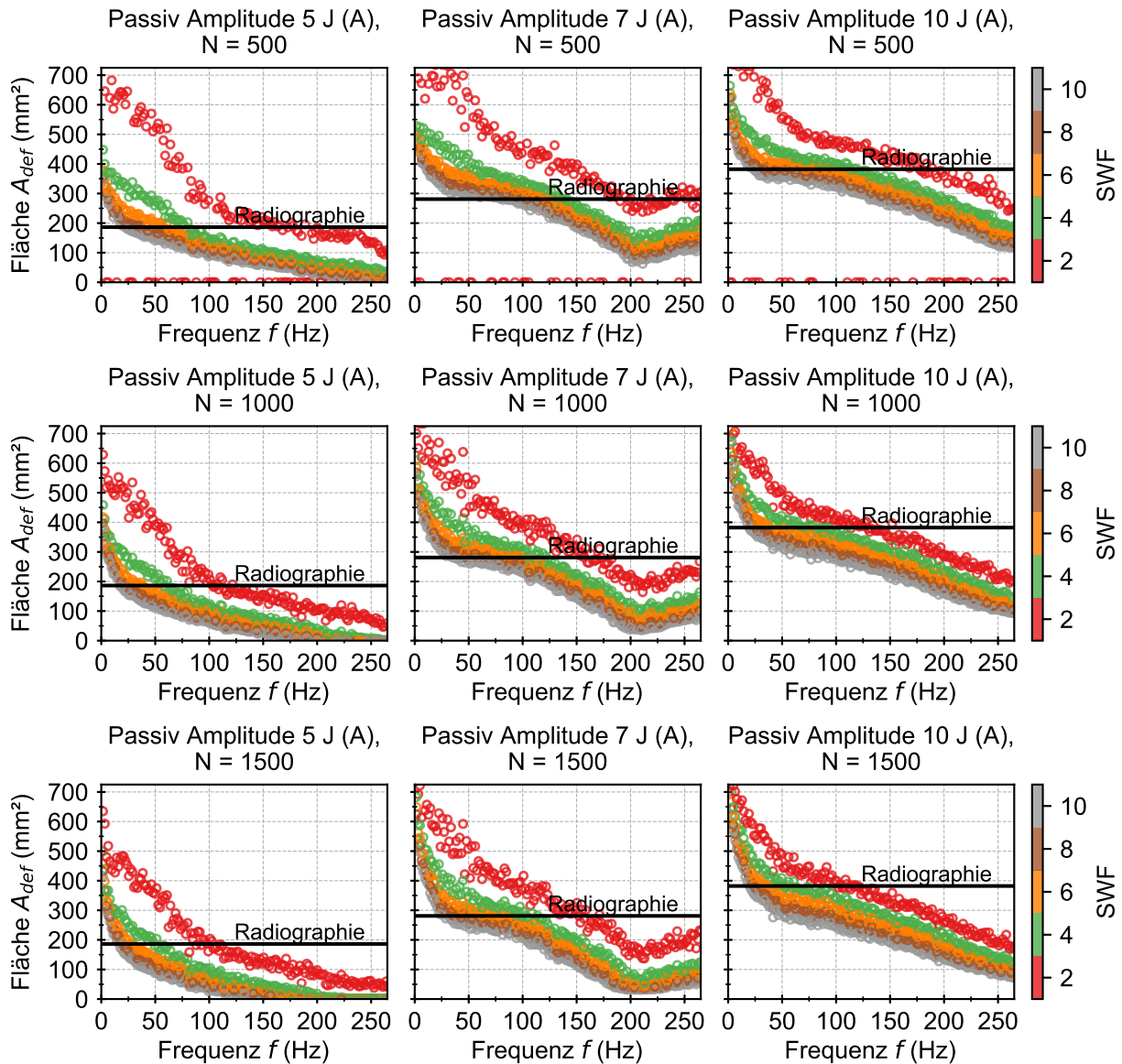


Abb. 7.53: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500, 1000$  und  $1500$  Bilder).

Schädigungsfläche ist dieser Frequenzbereich ungeeignet.

Eine Variation der Länge des Auswertefensters  $N$  führt in dem betrachteten Bereich nur zu einer kleinen Veränderung der Kurvenverläufe. Das beschriebene Plateau im Bereich von 30 bis 100 Hz ist vor allem bei  $N = 500$  Bilder am besten ausgeprägt. Insgesamt kann beobachtet werden, dass sich die ermittelte Schädigungsfläche  $A_{def}$  mit zunehmender Länge des Auswertefensters  $N$  systematisch nach unten verschiebt. Dies liegt vor allem daran, dass sich der Kontrast zum einen bedingt durch die feinere Auflösung der Frequenz und zum anderen durch die Hinzunahme überflüssiger Datenpunkten, die weniger zum eigentlichen Signal und mehr zum Rauschen beitragen, verschlechtert. Vor allem Randzonen des Schädigungsbereiches bleiben auf diese

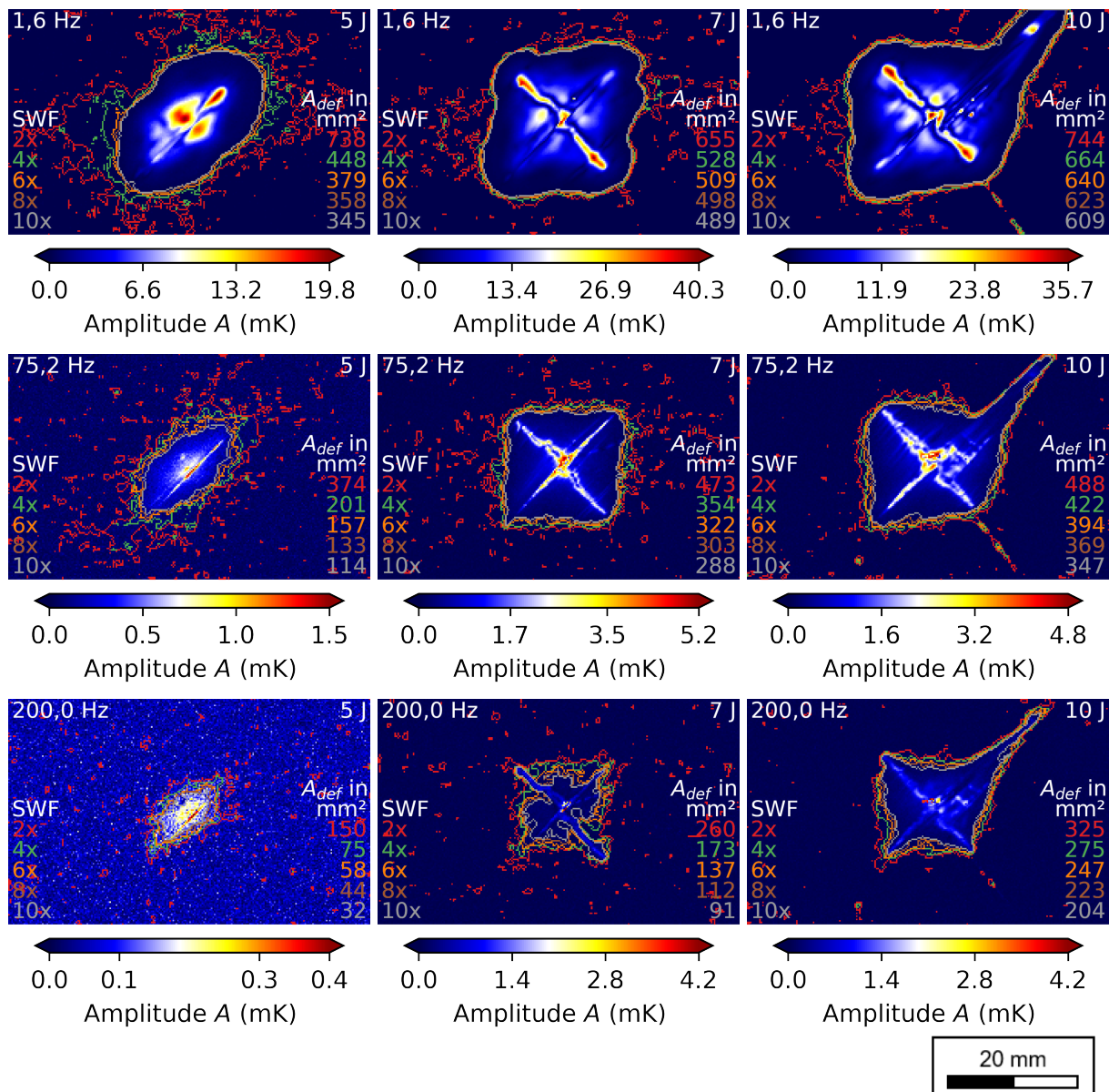


Abb. 7.54: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500$  Bilder).

Weise unterhalb des Schwellwerts und werden nicht als Schädigung identifiziert. Dies ist in Abbildung 7.55 beispielhaft für die Amplitudenbilder bei  $f = 75,2$  Hz und  $N = 500$ , 1000 und 1500 Bilder dargestellt.

Die Größe der in Abbildung 7.54 und 7.55 dargestellten Amplitude beschreibt die zur jeweiligen Frequenz gehörende Temperaturerhöhung und ist in mK angegeben. Vor allem die Bereiche, in denen die Probe aufgerissen ist und sich demnach offensichtliche Faserbrüche ereignet haben, weisen eine hohe Amplitude auf. Im Gegensatz dazu ist die Amplitude in den offensichtlich delaminierten Bereichen, vergleichsweise klein.

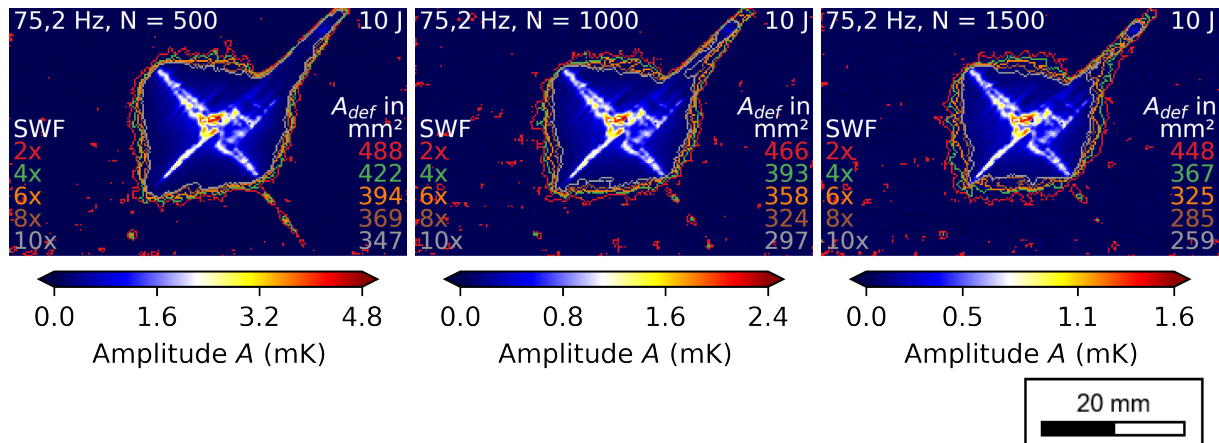


Abb. 7.55: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Probe 10 J aus Charge (A) bei  $f = 75,2$  Hz für  $N = 500$ , 1000 und 1500 Bilder.

### Quantifizierung der Phasenbilder

Die anhand der Phasenbilder ermittelten Kurvenläufe der Schädigungsfläche  $A_{def}$ , welche in Abbildung 7.56 dargestellt sind, zeigen in ihrer Grundstruktur einen ähnlichen Verlauf wie die Kurvenverläufe der Amplitudenbilder. Ein wesentlicher Unterschied ist das deutlich besser ausgeprägte Plateau, welches bei den Phasenbildern zwischen 40 bzw. 50 Hz und 90 bzw. 100 Hz liegt. Der Bereich des Plateaus ist zwar kleiner, die abfallende Steigung ist dafür aber deutlich flacher. Wie auch bei den Amplitudenbildern ist das Plateau bei der 5 J Probe nicht vorhanden. Die systematische Überbewertung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  ist in diesem Bereich vor allem auf die zur Quantifizierung verwendete Methode zurückzuführen. Dabei kann im Randbereich der Schädigung eine Mischung aus Rauschen und teilweise gleichbleibender Phasenwerte beobachtet werden, z.B. in Abbildung 7.57 für die Phasenbilder bei 75,2 Hz. Zudem wird durch die Anwendung des Boxfilters der Randbereich zwangsläufig nach außen verlagert und die Probe künstlich vergrößert. Auf der anderen Seite ist der laterale Boxfilter erforderlich, um die Leerstellen innerhalb des Schädigungsbereiches zu füllen, die sich durch die separate Verarbeitung der Phasenwerte und die Anwendung des lateralen Medianfilters ergeben. Eine alternative Herangehensweise zur Quantifizierung könnte den systematischen Messfehler reduzieren und eine genauere Angabe der Schädigungsfläche  $A_{def}$  ermöglichen.

Der Bereich von 0 bis 40 Hz ist für die Bestimmung der Schädigungsfläche ungeeignet, da hier vor allem der laterale Wärmefluss abgebildet wird. Im Gegensatz dazu werden ab 100 Hz vor allem oberflächennahe Schädigungen dargestellt. Beispielhafte Phasenbilder zu jedem der vorgestellten Bereiche sind in Abbildung 7.57 dargestellt.

Mit zunehmender Länge des Auswertebereichs  $N$  nimmt die ermittelte Schädigungs-

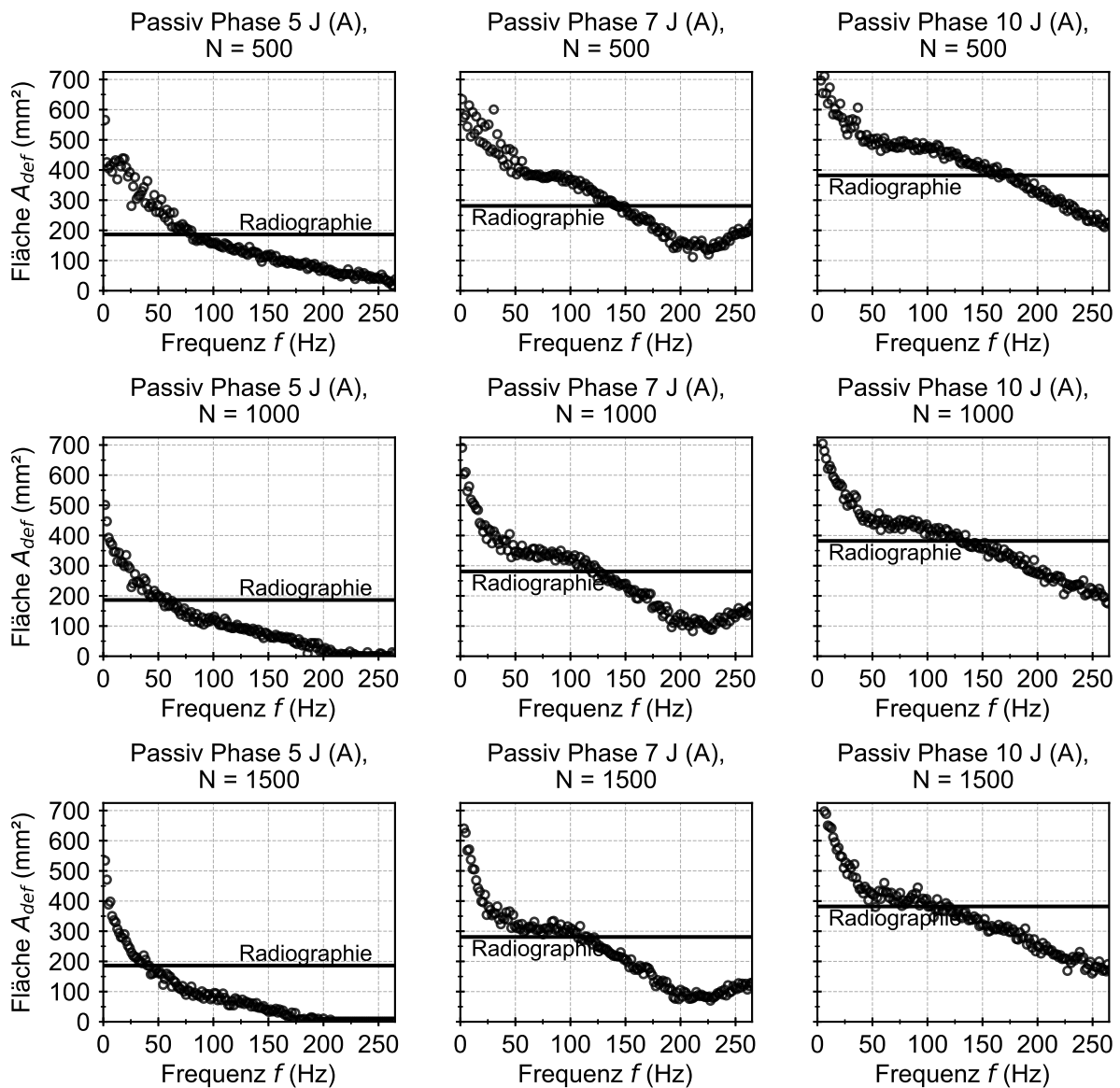


Abb. 7.56: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500, 1000$  und  $1500$  Bilder).

fläche systematisch ab. Auch hier führt die Auswertung von Datenpunkten, die keine zusätzliche Information über die Schädigung bringen, dazu, dass Teile des Schädigungsbereiches nicht als solche identifiziert werden. In Abbildung 7.58 ist dies beispielhaft für Phasenbilder bei 75,2 Hz und  $N = 500, 1000$  und  $1500$  Bilder dargestellt.

Grundsätzlich beziehen sich Phasenwerte stets auf einen Referenzzeitpunkt. Im Falle der aktiven Thermografie ist dies der Zeitpunkt der initialen Erwärmung der Oberfläche, welcher üblicherweise gleichzeitig der Anfang des Auswertefensters ist. Bei der passiven Thermografie gibt es keine über die gesamte Schädigungsfläche gleichbleibende Erwärmung von außen. Der Referenzzeitpunkt bezieht sich auf

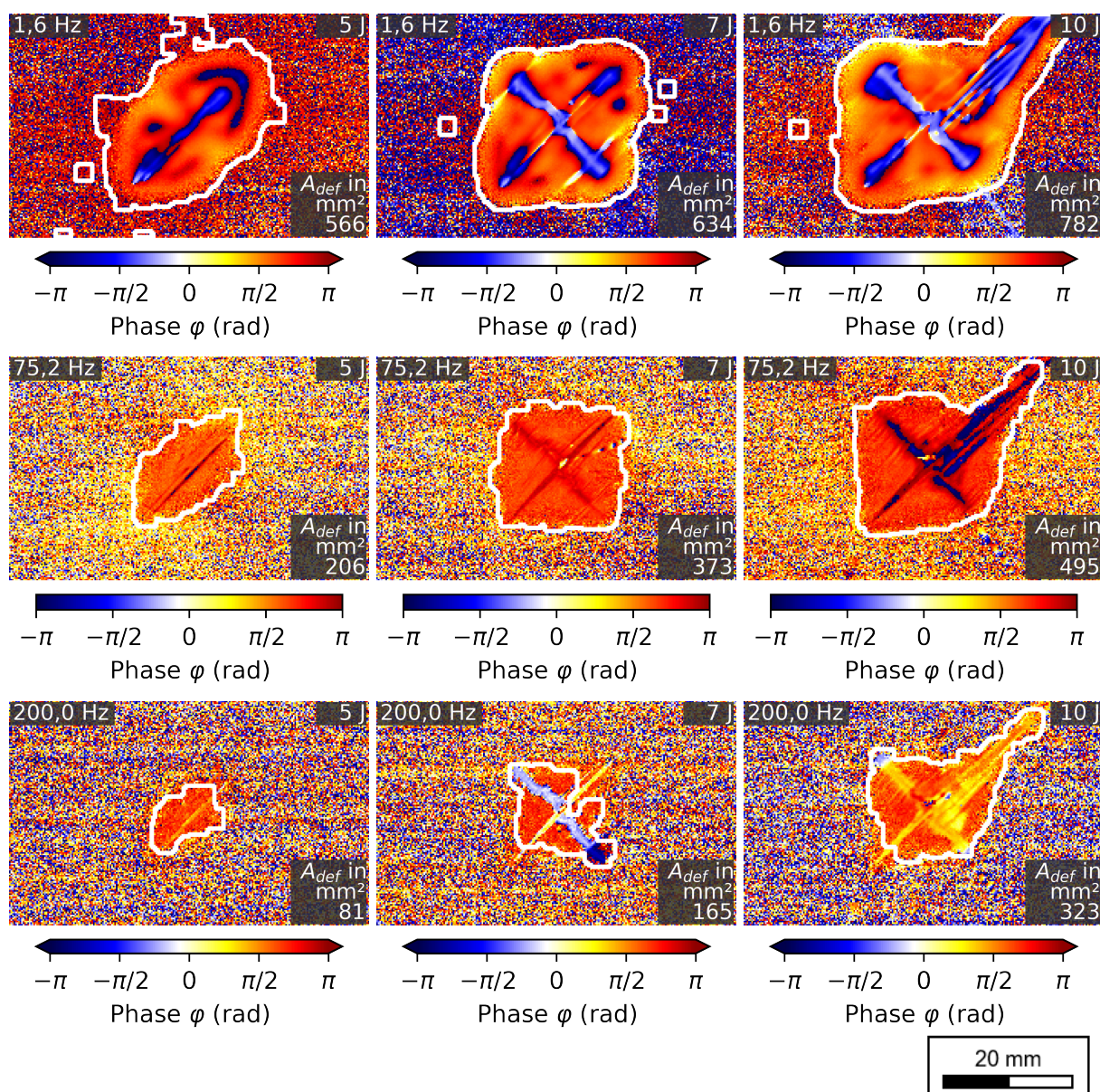


Abb. 7.57: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500$  Bilder).

die erstmals beobachtete Erwärmung durch die Entstehung der Schädigung. Die Phase kann in Abhängigkeit von der Position auf der Probe und dem Zeitpunkt der Schädigungsentstehung durchaus variieren und Werte zwischen  $-\pi$  und  $\pi$  annehmen. Bereiche gleichbleibender Phasenwerte sind als zusammenhängende Schädigungsbereiche bzw. als Schädigungsbereiche, die in einem zeitlichen Abstand von  $1/f$  sichtbar wurden, zu identifizieren. Die Angabe eines exakten Zeitpunktes der Entstehung in Abhängigkeit von den absoluten Phasenwerten erfordert weiterführende Untersuchungen. Ein validiertes Modell kann dabei helfen, die Reihenfolge der Schädigungsentstehung, sowie das Ausmaß der jeweiligen Schädigung zu beschreiben und ggf. unterschiedliche Mechanismen der Schädigungsentstehung von-



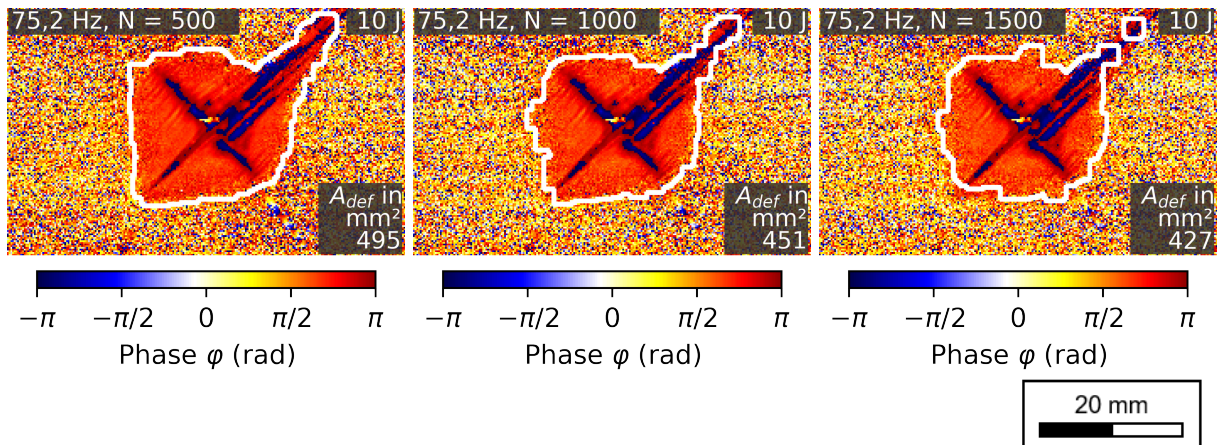


Abb. 7.58: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Probe 10 J aus Charge (A) bei  $f = 75,2$  Hz für  $N = 500$ , 1000 und 1500 Bilder.

einander zu trennen.

### 7.3.4 Quantifizierung anhand der IR-Bilder der aktiven Thermografie

Die Ergebnisse zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der IR-Bilder der aktiven Thermografie sind in Abbildung 7.59 zu sehen. Der Zeitpunkt  $t = 0$  s entspricht in diesem Fall dem Beginn der Messung. Der Blitzimpuls erfolgt demnach bei 0,1 s.

Es ist zu sehen, dass die ermittelte Fläche der Schädigung zu Beginn der Messung noch zunimmt. In diesem Zeitraum stellt sich an der Probenoberfläche der durch Wärmeleitungsprozesse verursachte Kontrast ein. In Abhängigkeit von der Tiefe der maximalen, nicht vollständig überlagerten Delamination kann der Zeitpunkt bis zum Erreichen der maximalen Ausprägung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  variieren. Bei allen hier gezeigten Proben ist das Maximum der scheinbaren Schädigungsfläche  $A_{def}$  bei

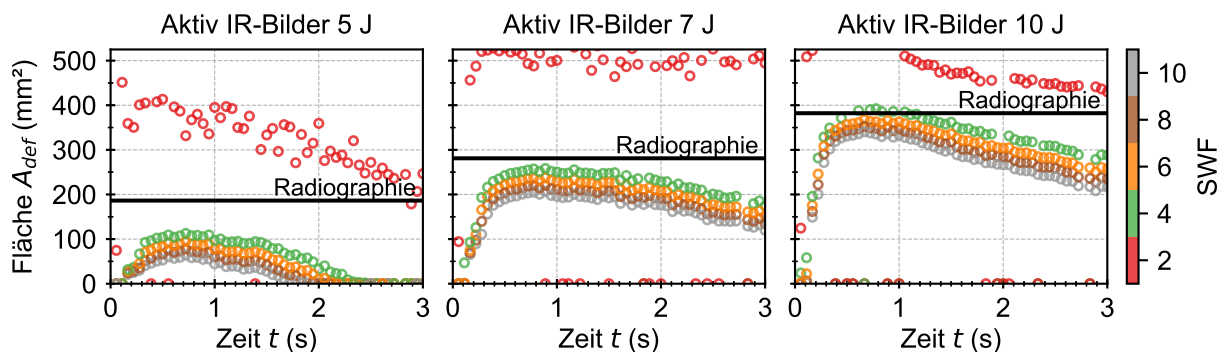


Abb. 7.59: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A).

etwa 0,7 s erreicht. Ab diesem Zeitpunkt nimmt die Schädigungsfläche  $A_{def}$  bedingt durch Wärmeleitungs- und Abkühlprozesse wieder ab. Insgesamt wird die Fläche bei der 5 J und 7 J Probe etwas unterschätzt, während sie bei der 10 J Probe relativ gut passt. Dabei kann die rote Kurve (SWF = 2) wie in den vorhergehenden Abschnitten weitestgehend ignoriert werden, da diese neben der realen Schädigungsfläche auch Zonen aus den intakten Bereichen einschließt. Dies wird vor allem in Abbildung 7.60 deutlich. Stattdessen sollte für die Auswertung SWF = 4 verwendet werden, da hier die geringste Abweichung zu beobachten ist. Die Geometrie der Schädigung bei 0,7 s entspricht weitestgehend der realen Geometrie, auch wenn die ermittelte Größe von der realen Größe bei den Proben 5 J und 7 J etwas abweicht. Bei einer Quantifizierung zu späteren Zeitpunkten, z.B. bei 1,5 s kann die Form der Schädigung zwar noch zu erkennen sein, bedingt durch den lateralen Wärmefluss verschwimmen allerdings die Randbereiche und die Quantifizierung wird ungenau.

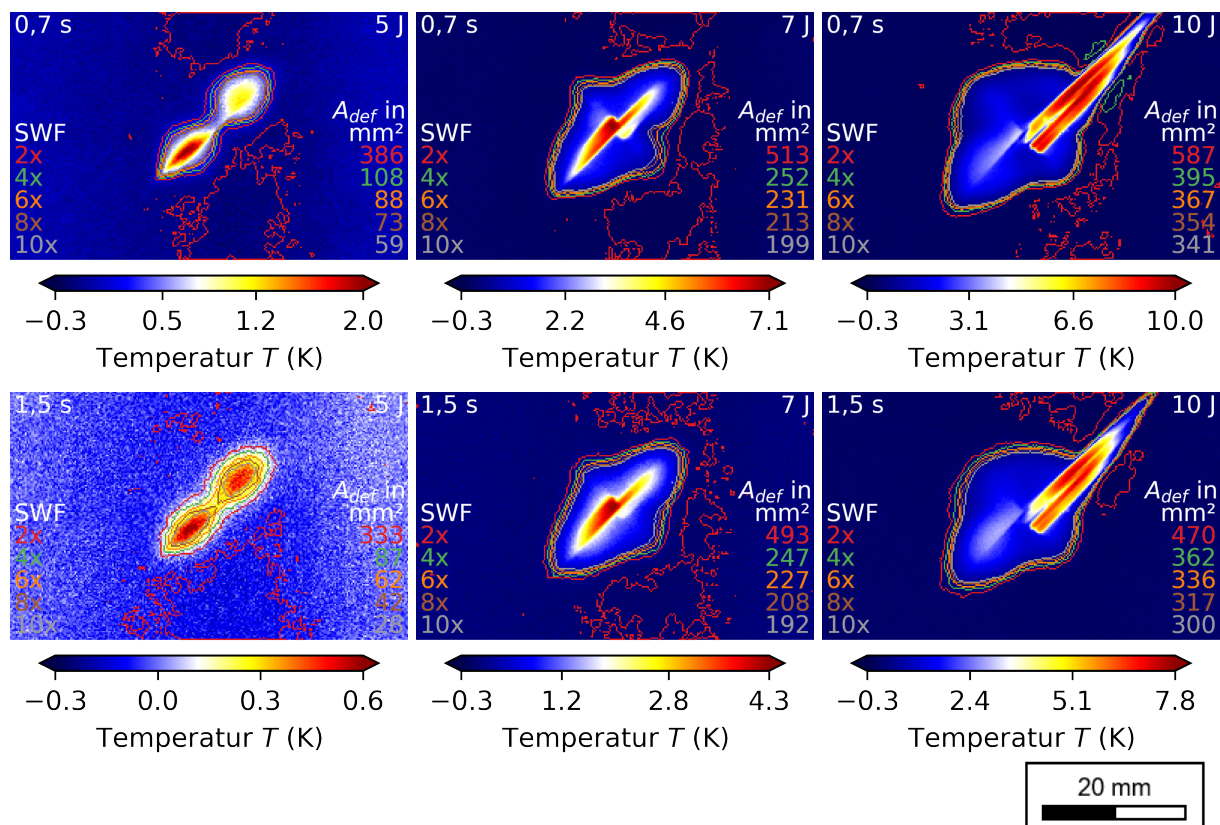


Abb. 7.60: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

### 7.3.5 Quantifizierung anhand der Amplituden- und Phasenbilder der aktiven Thermografie

Die Ergebnisse zur lateral ortsaufgelösten Quantifizierung nach erfolgter PPT Auswertung sind in Abbildung 7.61 für die Amplituden- und Phasenbilder dargestellt. Eine

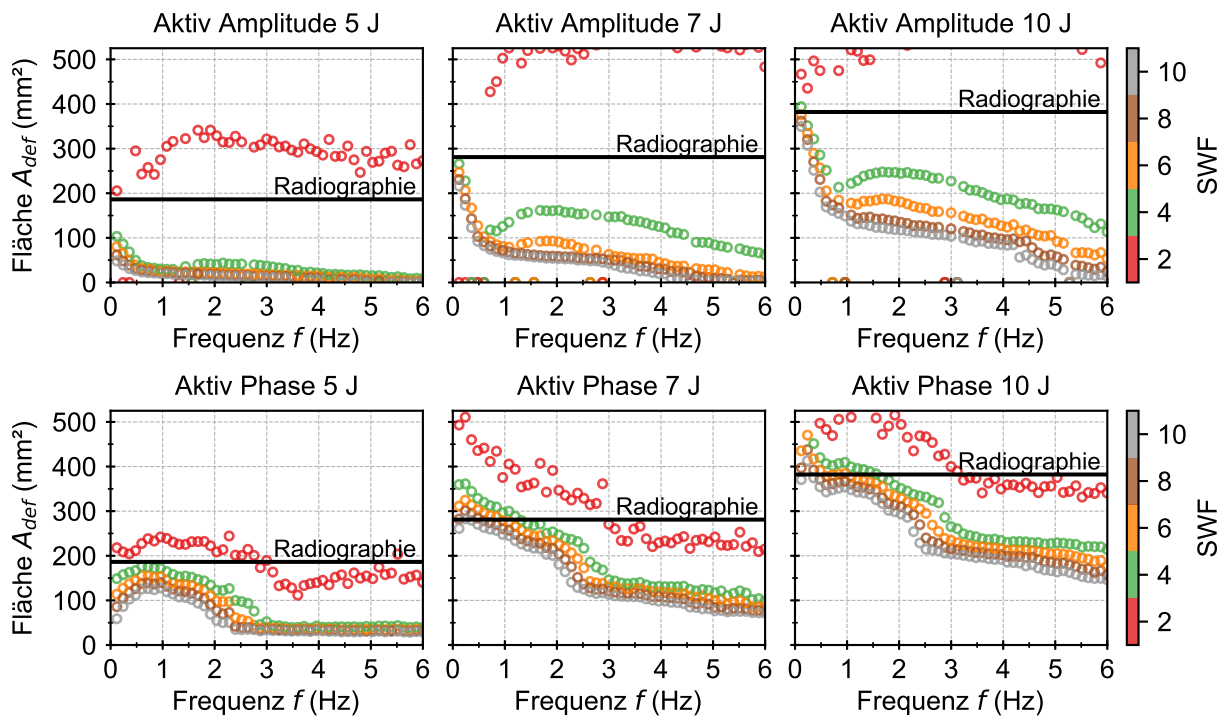


Abb. 7.61: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplituden- und Phasenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$  Bilder).

Auswahl der dazugehörigen Beispielbilder ist in den Abbildungen 7.62 und 7.63 zu finden.

Eine Bestimmung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder ist bei der hier gewählten Konfiguration nur bei der niedrigsten Frequenz, die in diesem Fall bei 0,12 Hz liegt, sinnvoll. Die dazu gehörenden Amplitudenbilder sind in Abbildung 7.62 dargestellt. Sowohl für die 7 J Probe, als auch für die 10 J Probe entspricht die ermittelte Schädigungsfläche  $A_{def}$  (mit  $SWF = 4$ ) in etwa der realen  $A_{real}$ . Lediglich bei der 5 J Probe ist eine größere Abweichung von etwa 45 % nach unten zu beobachten. Die Form der Schädigungen wird aber bei allen Proben entsprechend der Realität wiedergegeben. Eine Quantifizierung bei höheren Frequenzen bildet nicht die gesamte Schädigungsfläche ab, sondern zeigt vor allem die oberflächennahen Schädigungen, wie in Abbildung 7.62 bei 1,56 Hz zu sehen ist.

Im Gegensatz dazu wird bei der Auswertung der Phasenbilder bei 0,12 Hz vor allem der laterale Wärmefluss abgebildet. Die laterale Schädigungsfläche  $A_{def}$  scheint am besten bei etwa 0,96 Hz zu sein. Bei höheren Frequenzen wird ähnlich wie bei den Amplitudenbildern vor allem die oberflächennahe Schädigung abgebildet. Abbildung 7.63 zeigt Phasenbilder der aktiven Thermografie bei 0,12 Hz, 0,96 Hz und 3,84 Hz.

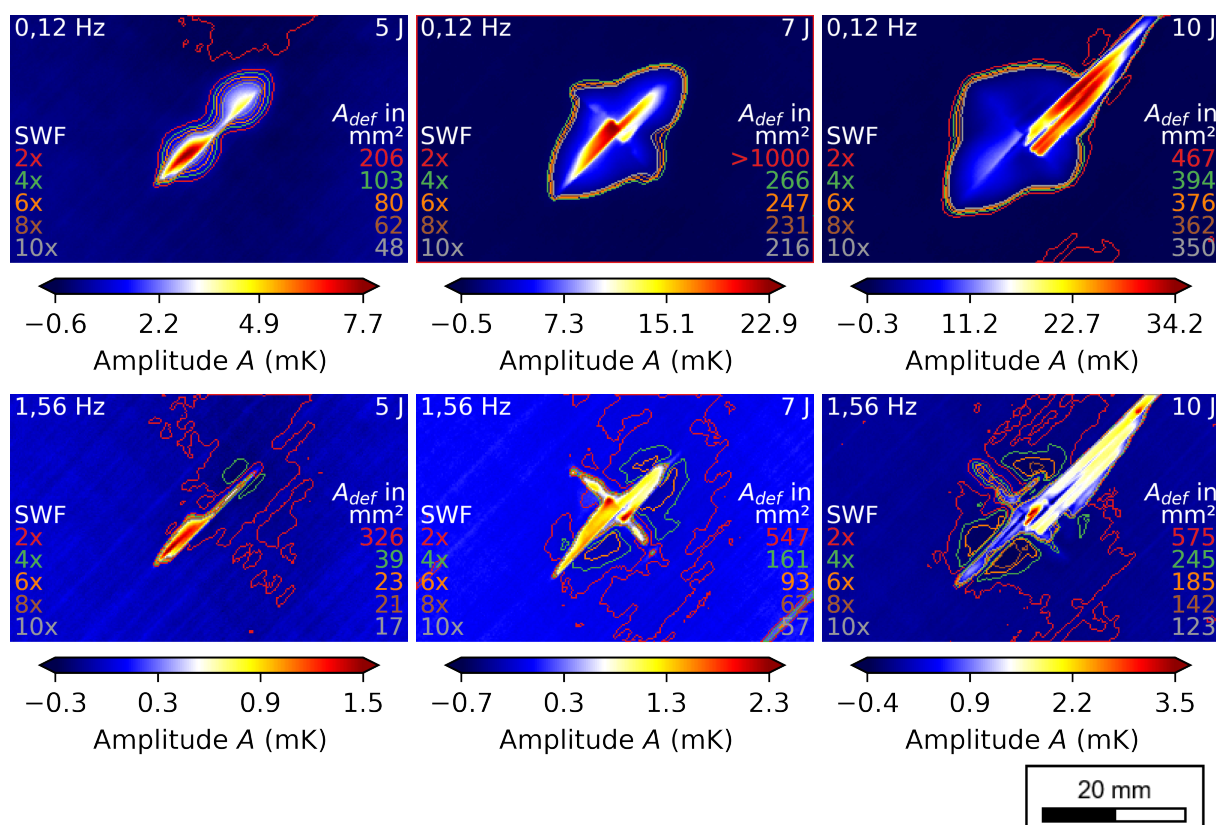


Abb. 7.62: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der aktiven Thermografie mit PPT Auswertung für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$  Bilder).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Schädigungsfläche  $A_{def}$  der größeren Schädigungen sowohl bei den IR-Bildern, als auch bei den Amplituden- und Phasenbildern der aktiven Thermografie in etwa mit der realen Schädigungsfläche  $A_{real}$  aus Abbildung 7.50 übereinstimmt. Eine größere Abweichung ist allerdings bei der kleineren Schädigung zu beobachten. Hier wird die Schädigung in Bezug auf Form und Größe am besten im Phasenbild dargestellt.

## 7.4 Gegenüberstellung der passiven und aktiven Thermografie

In Abbildung 7.64 sind die Ergebnisse der Quantifizierung für alle neun untersuchten Proben in einem Balkendiagramm gegenübergestellt. Die schwarzen Balken zeigen die mit Hilfe der Radiographie ermittelte Schädigungsfläche  $A_{real}$ , die im Rahmen dieser Arbeit als reale Fläche angenommen wird. Die blauen bzw. grünen Balken zeigen die mit Hilfe der passiven bzw. aktiven Thermografie ermittelte Schädigungsfläche  $A_{def}$ . Über den Farbton wird weiterhin zwischen der Auswertung anhand der IR-Bilder, Amplituden- oder Phasenbilder unterschieden. Für die Auswertung wurden die in den jeweiligen Absätzen als geeignet interpretierten Parameter gewählt. Eine

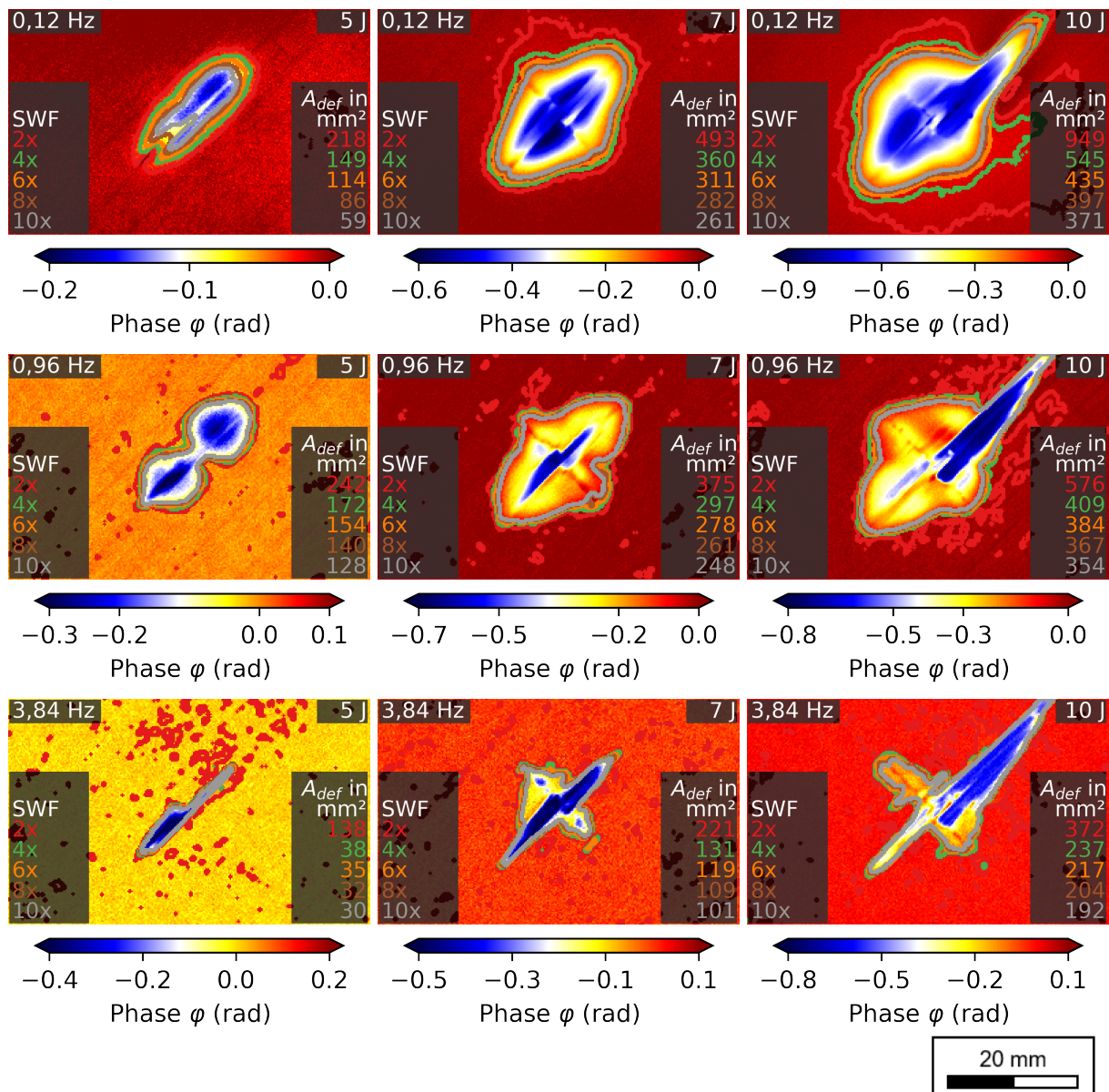


Abb. 7.63: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der aktiven Thermografie mit PPT Auswertung für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$  Bilder).

Optimierung der Auswerteparameter, wie etwa in Kapitel 5 und Kapitel 6, wurde nicht durchgeführt.

Bei den gewählten Auswerteparametern wird die Schädigungsfläche  $A_{def}$  bei der passiven Thermografie meist etwas überschätzt und bei der aktiven Thermografie meist etwas unterschätzt. Insgesamt wird aber deutlich, dass die anhand der drei Proben aus Charge (A) vorgestellte Tendenz auch bei den übrigen sechs Proben aus Charge (B) und (C) beobachtet werden kann. Die mittlere prozentuale Abweichung, welche jeweils anhand der Proben mit gleichbleibender Schädigungsenergie ermittelt wurde, ist in Abbildung 7.65 dargestellt. Die Abweichungen sind vor allem bei den

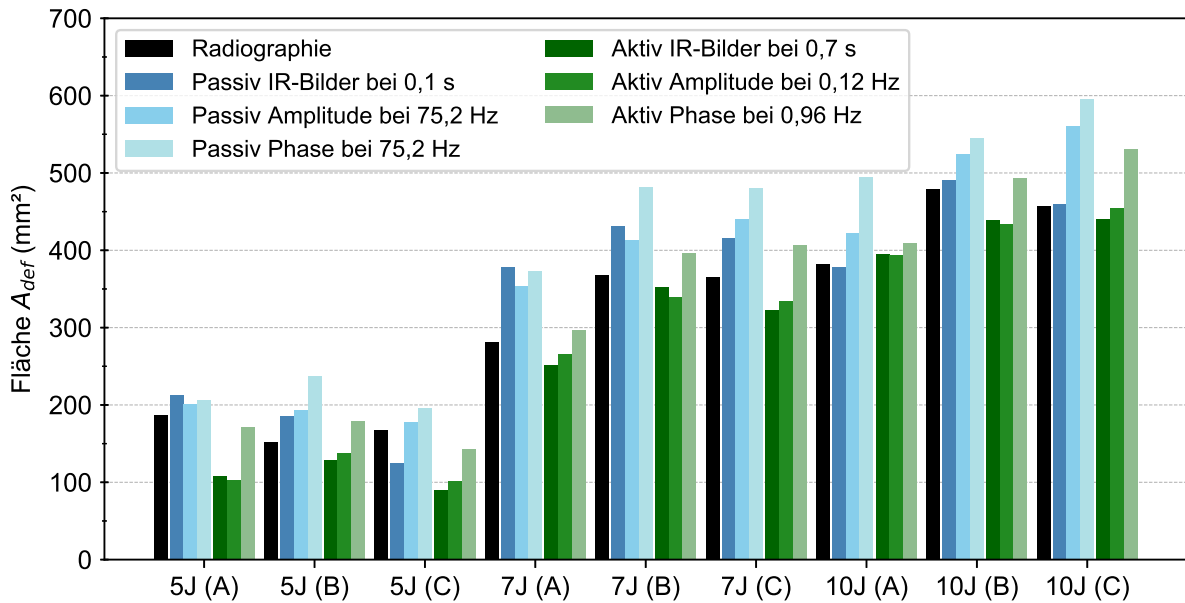


Abb. 7.64: Gegenüberstellung der Quantifizierung anhand der Radiographie, sowie der passiven und aktiven Thermografie jeweils für drei Proben bei 5 J, 7 J und 10 J.

5 J Proben, wo die Schädigungsfläche  $A_{real}$  vergleichsweise klein ist, am größten und nimmt mit zunehmender Schädigungsenergie und damit einhergehend mit einer größeren Schädigungsfläche  $A_{real}$  ab. Am kleinsten ist die Abweichung bei der Ver-

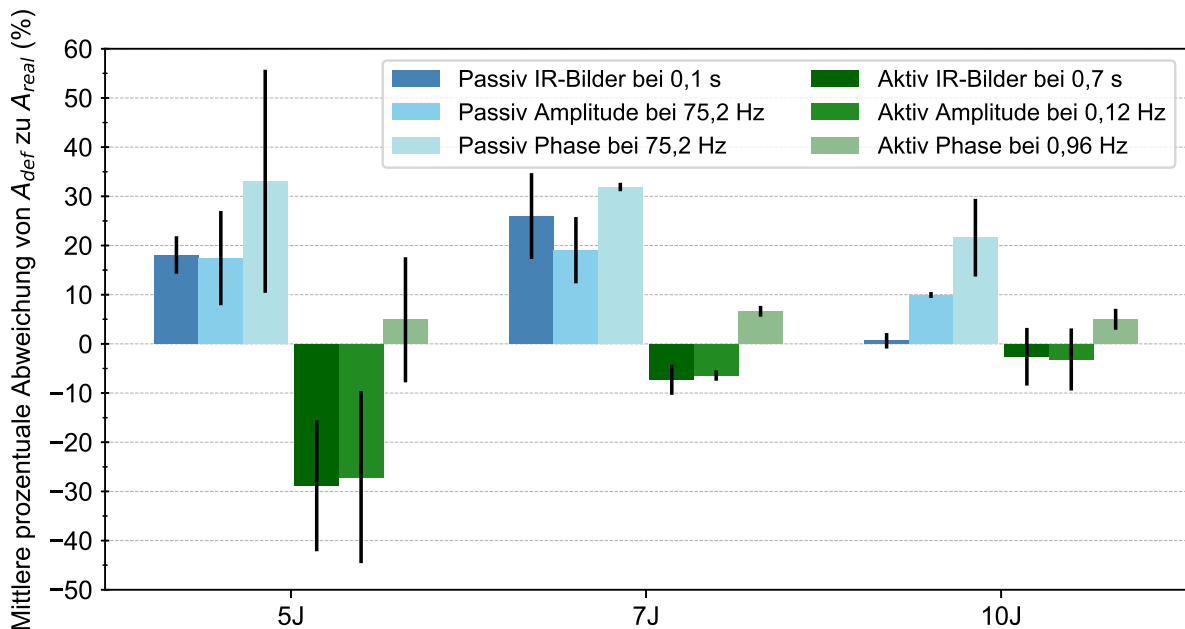


Abb. 7.65: Mittlere prozentuale Abweichung von  $A_{def}$  zu  $A_{real}$ , ermittelt anhand der passiven und aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus drei Chargen.

wendung der Phasenbilder der aktiven Thermografie, wobei unter Berücksichtigung aller Proben eine mittlere Abweichung von etwa  $3,7 \pm 9,6\%$  zu beobachten ist. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass eine laterale Quantifizierung vor allem bei größeren Schädigungen genaue Ergebnisse liefert.

Gegenüber der aktiven Thermografie bietet der Einsatz der passiven Thermografie die Möglichkeit, einzelne Zwischenfaserbrüche an der Probenoberfläche zu visualisieren, dies allerdings nur anhand der IR-Bilder oder bei Verwendung kleiner Auswertefenster  $N$ . Darüber hinaus ist diese Methode direkt im Rahmen der Schlagbeanspruchung umsetzbar und es bedarf keiner weiteren Prüfung im Anschluss. Zudem gibt die Höhe der Amplitude eine Information über die lokal freigesetzte Wärmeenergie, die vor allem im Rahmen der Materialentwicklung und -auslegung interessant sein kann. Ebenso ist es möglich, aus den ermittelten Phasenwerten die zeitliche Abfolge der Schädigungsentstehung abzuleiten und diese Information im Rahmen von *engl.* effects of defects Untersuchungen weiter zu verwenden. Im Gegensatz dazu wird in erster Linie die Form der Schädigung bei der aktiven Thermografie besser dargestellt. Je nach Anforderung der Quantifizierung kann demnach die direkt umsetzbare passive Thermografie oder die sequenziell durchzuführende aktive Thermografie eingesetzt werden.

## 7.5 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden neun Proben mit real eingebrachten Schädigungen aufgrund von Schlagbeanspruchung mit drei verschiedenen Verfahren Radiographie, passiver Thermografie und aktiver Thermografie untersucht. Die lateral orts aufgelöste Quantifizierung erfolgte automatisiert mit Hilfe eines dynamischen Schwellwerts, welcher auf der Ermittlung des Mittelwerts und der Standardabweichung im ungeschädigten Bereich basiert. Die Auswertung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  erfolgte anhand der IR-Bilder, Amplituden- und Phasenbilder der passiven und aktiven Thermografie. Als Referenz wurde die mit Hilfe der Radiographie ermittelte reale Schädigungsfläche  $A_{real}$  verwendet. Die Angabe eines Wertes zur Darstellung des Kontrastes, z.B. SNR, war an dieser Stelle nicht sinnvoll, da die Schädigungen anders als die künstlichen Schädigungen aus Kapitel 5 über mehrere Tiefen verteilt sind und damit nicht über den gesamten Bereich die gleiche Intensität aufweisen.

Es konnte beobachtet werden, dass eine lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  mit Hilfe der passiven Thermografie bereits mittels IR-Bildern erfolgen kann. Dabei ist die Wahl des richtigen Zeitpunktes entscheidend. Ohne a priori Wissen über die reale Schädigungsfläche ist dies nur schwer umzusetzen. Mit Hilfe der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) war es möglich, die Messinformation

pixelweise in das Frequenzspektrum zu überführen. Die auf diese Weise erstellten Amplitudenbilder der passiven Thermografie im Bereich von 30 bis 100 Hz eignen sich an dieser Stelle für die Quantifizierung größerer Schädigungen besser, wobei die Größe der Schädigung und deren Form nahezu realitätsgetreu abgebildet wird. Kleinere Schädigungen sind damit eher schwer abzubilden. Alternativ können auch die Phasenbilder verwendet werden, wobei im Vergleich zu den Amplitudenbildern eine systematische Überbewertung zu beobachten ist. Ein wesentlicher Vorteil der Auswertung der Amplituden- und Phasenbilder ist die Möglichkeit der Darstellung der Schädigungstiefe. Zur Reduzierung der Messabweichung sollte die Länge des Auswertefensters  $N$  nicht zu groß gewählt werden. Für die in dieser Arbeit verwendete Kombination aus Material und Schädigungsenergie sind 500 Bilder optimal. Der laterale Wärmefluss wird in den Amplituden- und Phasenbildern vor allem bei niedrigen Frequenzen bis etwa 30 Hz bzw. 40 Hz sichtbar.

Bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  mit Hilfe der aktiven Thermografie werden bei Verwendung der IR-Bilder mit der maximalen Ausprägung kleinere Schädigungen tendenziell unterschätzt, während größere Defekte vergleichsweise gut dargestellt werden. Auch die Form der Schädigung entspricht hier am ehesten der Realität. Ebenso gute Ergebnisse liefert die Quantifizierung anhand der Amplituden- und Phasenbilder nach erfolgter PPT Auswertung. Die Schädigungsfläche  $A_{def}$  wird bei größeren Defekten am besten bei Amplitudenbildern niedriger Frequenz dargestellt, während für kleinere Defekte eher die Phasenbilder zu verwenden sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die passive als auch die aktive Thermografie zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  verwendet werden können. Ein wesentlicher Vorteil der passiven Thermografie ist allerdings, dass damit auch ggf. auftretenden Zwischenfaserbrüche außerhalb des eigentlichen Schädigungsbereiches identifiziert werden können. Diese Schädigungen sind aufgrund ihrer geringen Größe im Rahmen der aktiven Thermografie kaum zu visualisieren. Zudem kann mit Hilfe der passiven Thermografie die Abfolge der Schädigungsentstehung beschrieben und visualisiert werden.



## 8 Zusammenfassung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind aus vielen Industriezweigen wie der Luft- und Raumfahrt, dem Transportwesen, der erneuerbaren Energie und der Sport- und Freizeitausrüstung kaum noch wegzudenken. Dabei weisen sie neben einem hohen Leichtbaupotenzial auch ein komplexes Schädigungs- und Versagensverhalten auf. Insbesondere bei Schlagbeanspruchung kann es zu inneren Schädigungen kommen, die von außen oft nicht sichtbar sind. Zur Detektion von Defekten, die im Rahmen der Herstellung oder während der Nutzung entstehen, sind zerstörungsfreie Prüfverfahren erforderlich. Neben der qualitativen Erfassung sind auch zuverlässige quantitative Angaben zu Größe und Position der Defekte notwendig. Vor allem bei der Entscheidung über die weitere Verwendung oder sofortige Reparatur müssen die Charakteristika der Defekte möglichst exakt bekannt sein. Eine berührungslose und bildgebende Methode zur zuverlässigen Erfassung von Defekten ist die Infrarot-Thermografie (IRT), die auf der Erfassung der Oberflächentemperatur basiert. Die IRT kann passiv zur In-situ-Überwachung der Schädigungsentstehung und -fortschreitung, auch aktiv zur Detektion bereits vorhandener Defekte verwendet werden. Die Quantifizierung im Rahmen der IRT basiert in der Regel auf der Auswertung von IR-Bildern, was die Genauigkeit und die Tiefenreichweite der Quantifizierung stark limitiert. Im Zuge dessen kann der durch Defekte verursachte Kontrast durch den Einsatz von Auswertalgorithmen gesteigert und damit die Reichweite der Quantifizierung erhöht werden. Da das Erscheinungsbild, bspw. das Amplituden- oder Phasenbild nach Puls-Phasen Auswertung im Wesentlichen von den Eigenschaften des Materials und von der Wahl der Auswerteparameter abhängt, muss der zugrundeliegende Messfehler untersucht und berücksichtigt werden.

Das Ziel dieser Arbeit war demnach die Darstellung und Erweiterung des Potentials der passiven und aktiven Thermografie zur lateral orts aufgelösten und zeitaufgelösten Quantifizierung von Defekten in kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen anhand von IR-Bildern, Amplituden- und Phasenbildern. Die Quantifizierung mittels IR-Bildern entspricht weitestgehend dem Vorgehen aus der Literatur. Die Erarbeitung der Methodik und die Untersuchung des Einflusses der Mess- und Auswerteparameter auf den zugrundeliegenden Messfehlern bei Verwendung der Amplituden- und Phasenbilder wurde in dieser Arbeit erstmalig beschrieben und diskutiert. Zur lateral orts aufgelösten Quantifizierung wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: die aus der Literatur bekannte *engl.* Full Width at Half Maximum (FWHM) Methode und eine auf einem Schwellwert basierende Methode.

Anhand von künstlichen Delaminationen, die durch die Einarbeitung dünner Folien mit genau definierten Maßen in den Größen 6 mm, 10 mm und 15 mm in runder und

eckiger Form hergestellt wurden, konnte gezeigt werden, dass für eine zuverlässige lateral orts aufgelöste Quantifizierung im Rahmen der aktiven Thermografie das SNR zwischen Defekt- und Umgebungsbereich mindestens 10 dB betragen muss. Damit ist eine Quantifizierung mit Hilfe der FWHM Methode anhand der IR-Bilder nur bis zu einer Defekttiefe von 0,27 mm möglich, wobei die Abweichung bei der Größenbestimmung innerhalb von  $\pm 1$  mm lag. Durch die Anwendung der Puls-Phasen Auswertung konnte der Kontrast des Defektbereiches entsprechend erhöht werden und ermöglichte eine Quantifizierung der Defekte bis zu 0,54 mm in einem unidirektionalen Laminat und bis zu 0,81 mm in einem multidirektionalen Laminat. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass zur Minimierung des Messfehlers die Länge des für die Transformation verwendeten Auswertefensters  $N$  und die Auswertefrequenz  $f$  tiefenabhängig variiert werden muss. Trotz der Möglichkeit, auch tiefere Defekte zu quantifizieren, war es nicht möglich, die künstlichen Defekte in allen Tiefen des untersuchten typischen Laminataufbaus (bis etwa 1,6 mm) zu identifizieren.

Ferner wurde in dieser Arbeit das Potenzial der passiven Thermografie zur Detektion von Zwischenfaser- und Faserbrüchen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung aufgezeigt. Dabei wurde der gesamte Datensatz zunächst mit Hilfe der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) abschnittsweise in das Frequenzspektrum überführt und die Quantifizierung anhand der resultierenden Amplitudenbilder durchgeführt. Es wurde gezeigt, dass die Länge des für die DFT verwendeten Auswertefensters  $N$  bei Zwischenfaserbrüchen in der obersten Lage  $N = 100$  Bilder, in der zweiten Lage  $N = 400$  Bilder und in der vierten Lage  $N = 500$  Bilder betragen sollte. Um zu gewährleisten, dass die für die zuverlässige Detektion erforderlichen 10 dB erreicht werden, müssen sich die Auswertefenster bei tieferliegenden Defekten überlappen. Durch eine Separierung und anschließende Zusammenführung einzelner Schädigungsereignisse, kann die Degradation und die Rissdichte zu jedem Zeitpunkt im Versuch angegeben werden.

Eine Gegenüberstellung der lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der passiven und aktiven Thermografie wurde am Beispiel realer Schädigungen nach Schlagbeanspruchung durchgeführt. Es konnte herausgestellt werden, dass die Ermittlung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  bereits mit Hilfe der passiven Thermografie und unter Verwendung der IR-Bilder durchgeführt werden kann, wobei die Wahl des richtigen Zeitpunktes entscheidend und ohne a priori Wissen über die reale Schädigungsfläche  $A_{real}$  nur schwer zu ermitteln ist. Alternativ können auch hier die Amplituden- und Phasenbilder nach erfolgter DFT verwendet werden. In Abhängigkeit von der Auswertefrequenz variiert die scheinbare Größe der Schädigung. Je nach Frequenz  $f$  werden bspw. der laterale und durch den Defekt verursachte Wärmefluss, die realen Konturen der Schädigung oder die oberflächennahen und teilweise nach

---

außen offenen Schädigungen dargestellt. Als geeignet konnte der Auswertebereich zwischen 30 und 100 Hz identifiziert werden. Ähnlich gute Ergebnisse wurden mit der aktiven Thermografie erzielt. Insbesondere die Darstellung der Form war bei der Verwendung der aktiven Thermografie besser, und das sowohl bei den IR-Bildern, als auch bei den Amplituden- und Phasenbildern. Im direkten Vergleich konnte gezeigt werden, dass bei optimalen Auswerteparametern die passive Thermografie zu einer Überschätzung und die aktive Thermografie zu einer Unterschätzung der Defektgröße führt.

Mit dem in dieser Arbeit gezeigten Vorgehen ist es nun möglich, durch die Verwendung der Amplituden- und Phasenbilder auch tieferliegende Defekte im Rahmen der aktiven Thermografie lateral orts aufgelöst zu quantifizieren, die Degradation des Materials bei der quasi-statischen Zugprüfung zu beschreiben und dabei auch tieferliegende Schädigungsereignisse zu visualisieren sowie die realen Schädigungsgröße infolge einer Schlagbeanspruchung mit Hilfe der In-situ-Überwachung direkt während des Versuchs zu bestimmen. Künftige Arbeiten könnten durch Erhöhung der Blitzleistung oder durch Anwendung alternativer Auswertemethoden die Möglichkeiten zur Verbesserung der Tiefenreichweite im Rahmen der aktiven Thermografie untersuchen. Zudem sollte geprüft werden, inwiefern die Defektquantifizierung mit Hilfe der passiven Thermografie noch weiter verbessert werden kann und welchen Einfluss das Material und die verwendete Faserorientierung haben. Dazu sollte untersucht werden, wie sich aus den ermittelten Phasenwerten einzelne Schädigungsmechanismen separieren und sich dadurch die Schädigungsentstehung und -fortschreitung noch besser beschreiben lassen.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Sauer und M. Kuhnel, "Composites Market Report 2019," *Carbon Composites, Augsburg, Germany*, 2019.
- [2] M. Neitzel, P. Mitschang und U. Breuer, *Handbuch Verbundwerkstoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*, 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014.
- [3] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Aufl. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [4] C. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [5] C. Meola, S. Boccardi, G. Carlomagno, N. Boffa, E. Monaco und F. Ricci, "Non-destructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics," *Composite Structures*, Jg. 134, S. 845–853, 2015. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.119.
- [6] B. Wiecek, "Review on thermal image processing for passive and active thermography," in *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Bd. 1, 2005, S. 686–689. doi: 10.1109/IEMBS.2005.1616506.
- [7] U. P. Breuer, *Commercial Aircraft Composite Technology*. Springer, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-31918-6.
- [8] C. Maierhofer, R. Krankenhagen, M. Röllig, S. Hosseini, T. Heckel, M. Gaal, F. Schadow, D. Brackrock, M. Gower, M. Lodeiro und G. Baker, "Quantitative Bewertung künstlicher und natürlicher Fehler in Faserverbundwerkstoffen mit aktiver Thermografie und Ultraschall," in *DGZfP-Jahrestagung 2017*, Koblenz, 2017.
- [9] R. Smith, "Composite defects and their detection," in *Materials Science and Engineering*, 3. Aufl., Ramsey: EOLSS Publishers Co Ltd, 2009, S. 103–143.
- [10] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, J.-M. Piau, S. Guibert, A. Bendada und X. P. Maldague, "Active infrared thermography techniques for the nondestructive testing of materials," in *Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, World Scientific, 2007, S. 325–348.
- [11] M. J. O'Neill, "Measurement of Specific Heat Functions by Differential Scanning Calorimetry," *Analytical Chemistry*, Jg. 38, Nr. 10, S. 1331–1336, 1966. doi: 10.1021/ac60242a011.
- [12] M. Perterer, "Schadensidentifikation und -bewertung von CFK-Bauteilen mittels phasenmodulierter Thermographie," Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.

- 
- [13] H. D. Baehr und K. Stephan, *Wärme- und Stoffübertragung*, 8., aktualisierte Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-36558-4.
- [14] W. Polifke und J. Kopitz, *Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden*, 2., aktualisierte Auflage. Pearson Deutschland GmbH, 2009.
- [15] S. Klein, "Einfluss der Mikrostruktur auf die Wärmeleitfähigkeit mehrphasiger Stähle," Dissertation, Ruhr Universität Bochum, Bochum, 2017.
- [16] G. Menges, E. Haberstroh, W. Michaeli und E. Schmachtenberg, *Menges Werkstoffkunde Kunststoffe*, 6., vollständig überarbeitete. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2011.
- [17] M. Grundler, T. Reich, T. Derieth und A. Heinzl, "Entwicklung von Hochwärmeleitfähigen Polymer-Compounds," Duisburg, 2013.
- [18] W. A. Fischer und W. Ertmer, "Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit," in *Die Untersuchung des Wärmeinhalts, der Wärmeleitfähigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit von Schmelzkalk*, Springer, 1967, S. 40–67.
- [19] D. Zhao, X. Qian, X. Gu, S. A. Jajja und R. Yang, "Measurement Techniques for Thermal Conductivity and Interfacial Thermal Conductance of Bulk and Thin Film Materials," *Journal of Electronic Packaging*, Jg. 138, Nr. 4, 2016. doi: 10.1115/1.4034605.
- [20] M. Hu, D. Yu und J. Wei, "Thermal conductivity determination of small polymer samples by differential scanning calorimetry," *Polymer Testing*, Jg. 26, Nr. 3, S. 333–337, 2007. doi: 10.1016/j.polymeresting.2006.11.003.
- [21] H. Towsyfyfan, A. Biguri, R. Boardman und T. Blumensath, "Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures," *Chinese Journal of Aeronautics*, Jg. 33, Nr. 3, S. 771–791, 2020. doi: 10.1016/j.cja.2019.09.017.
- [22] M. Rheinfurth, "Geführte Ultraschallwellen zur Bewertung der Schadensakkumulation in Faser-Kunststoff-Verbunden," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [23] X. Li, "Eddy current techniques for non-destructive testing of carbon fibre reinforced plastic (CFRP)," Dissertation, The University of Manchester (United Kingdom), Manchester, 2012.
- [24] W. Bai und B. S. Wong, "Evaluation of defects in composite plates under convective environments using lock-in thermography," *Measurement Science and Technology*, Jg. 12, Nr. 2, S. 142–150, 2001. doi: 10.1088/0957-0233/12/2/303.

- [25] T. Joffre, A. Miettinen, E. L. Wernersson, P. Isaksson und E. K. Gamstedt, "Effects of defects on the tensile strength of short-fibre composite materials," *Mechanics of Materials*, Jg. 75, S. 125–134, 2014. doi: 10.1016/j.mechmat.2014.04.003.
- [26] G. Seon, A. Makeev, Y. Nikishkov und E. Lee, "Effects of defects on interlaminar tensile fatigue behavior of carbon/epoxy composites," *Composites Science and Technology*, Jg. 89, S. 194–201, 2013. doi: 10.1016/j.compscitech.2013.10.006.
- [27] J. W. Nelson, T. W. Riddle und D. S. Cairns, "Effects of defects in composite wind turbine blades—Part 1: Characterization and mechanical testing," *Wind Energy Science*, Jg. 2, S. 641–652, 2017. doi: 10.5194/wes-2-641-2017.
- [28] C. Soutis, "Carbon Fiber Reinforced Plastics in Aircraft Construction," *Materials Science and Engineering: A*, Jg. 412, Nr. 1-2, S. 171–176, 2005. doi: 10.1016/j.msea.2005.08.064.
- [29] S. Patil, D. M. Reddy und M. Reddy, "Low velocity impact analysis on composite structures – A review," in *Advances in Mechanical Design, Materials and Manufacture: Proceedings of the First International Conference on Design, Materials and Manufacture (ICDEM 2018)*, Bd. 1943, Karnataka, India, 2018, S. 020 009. doi: 10.1063/1.5029585.
- [30] H. M. Deuschle, "3D Failure Analysis of UD Fibre Reinforced Composites: Puck's Theory within FEA," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2010.
- [31] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, 4. Aufl. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [32] D. P. Almond und S. G. Pickering, "An analytical study of the pulsed thermography defect detection limit," *Journal of Applied Physics*, Jg. 111, S. 093510, 2012. doi: 10.1063/1.4704684.
- [33] C. Maierhofer, M. Röllig, M. Gower, M. Lodeiro, G. Baker, C. Monte, A. Adibekyan, B. Gutschwager, L. Knazowicka und A. Blahut, "Evaluation of Different Techniques of Active Thermography for Quantification of Artificial Defects in Fiber-Reinforced Composites Using Thermal and Phase Contrast Data Analysis," *International Journal of Thermophysics*, Jg. 39, Nr. 5, S. 61, 2018. doi: 10.1007/s10765-018-2378-z.
- [34] M. Saintey und D. P. Almond, "Defect sizing by transient thermography II: A numerical treatment," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Jg. 28, Nr. 12, S. 2539–2546, 1995. doi: 10.1088/0022-3727/28/12/023.

- 
- [35] W. Guo, L. Dong, H. Wang, F. Feng, Z. Xing, R. Ma, H. Shao, Z. Gao, B. Wang und J. Yang, "Size estimation of coating disbands using the first derivative images in pulsed thermography," *Infrared Physics & Technology*, Jg. 104, S. 103–106, 2020. doi: 10.1016/j.infrared.2019.103106.
- [36] V. Munoz, B. Valès, M. Perrin, M. Pastor, H. Weleman, A. Cantarel und M. Karama, "Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 85, S. 68–75, 2016. doi: 10.1016/j.compositesb.2015.09.011.
- [37] L. Cheng und G. Y. Tian, "Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic (CFRP) materials using pulsed eddy current thermography," *IEEE Sensors Journal*, Jg. 11, Nr. 12, S. 3261–3268, 2011. doi: 10.1109/JSEN.2011.2157492.
- [38] S. Schmeer, D. Scheliga und F. Mischo, "A New Approach in Tensile Testing of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics (cFRTP) for Enabling Broader Material Application in Industrial Sector," in *ISO Plenary Meeting TC 61 Plastics*, Daejeon Korea, 2017.
- [39] B. Kelkel, V. Popow und M. Gurka, "Inline quantification and localization of transverse matrix cracking in cross-ply CFRP during quasi-static tensile testing by a joint event-based evaluation of acoustic emission and passive IR thermography," *Composites Science and Technology*, Jg. 190, S. 108–113, 2020. doi: 10.1016/j.compscitech.2020.108013.
- [40] M. G. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, Ser. Springer Series in Materials Science. Cham: Springer International Publishing, 2016, Bd. 242. doi: 10.1007/978-3-319-30954-5.
- [41] H. Schlichting und K. Gersten, *Grenzschicht-Theorie*, 10., überarbeitete Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, 804 S. doi: 10.1007/3-540-32985-4.
- [42] W. Herschel, "XIV. Experiments on the Refrangibility of the invisible Rays of the Sun," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Nr. 90, S. 284–292, 1800. doi: 10.1098/rstl.1800.0015.
- [43] M. F. Modest, *Radiative Heat Transfer*, 3. Aufl. Academic Press, 2013. doi: 10.1016/C2010-0-65874-3.
- [44] R. Gade und T. B. Moeslund, "Thermal cameras and applications: A survey," *Machine Vision and Applications*, Jg. 25, Nr. 1, S. 245–262, 2014. doi: 10.1007/s00138-013-0570-5.
- [45] M. Glück und A. Kipp, "Thermografie-Anwenderkonferenz Forschung & Entwicklung," (Online-Konferenz), 2020.

- [46] B. Lahiri, S. Bagavathiappan, T. Jayakumar und J. Philip, "Medical applications of infrared thermography: A review," *Infrared Physics & Technology*, Jg. 55, Nr. 4, S. 221–235, 2012. doi: 10.1016/j.infrared.2012.03.007.
- [47] S. I. Rekant, M. A. Lyons, J. M. Pacheco, J. Arzt und L. L. Rodriguez, "Veterinary applications of infrared thermography," *American Journal of Veterinary Research*, Jg. 77, Nr. 1, S. 98–107, 2016. doi: 10.2460/ajvr.77.1.98.
- [48] A. R. Al-Kassir, J. Fernandez, F. Tinaut und F. Castro, "Thermographic study of energetic installations," *Applied Thermal Engineering*, Jg. 25, Nr. 2-3, S. 183–190, 2005. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2004.06.013.
- [49] C. Corsi, "Infrared: A Key Technology for Security Systems," in *Sensors*, F. Baldini, A. D'Amico, C. Di Natale, P. Siciliano, R. Seeber, L. De Stefano, R. Bizzarri und B. Andò, Hrsg., Ser. Lecture Notes in Electrical Engineering, New York, NY, 2014, S. 37–42. doi: 10.1007/978-1-4614-3860-1\_6.
- [50] H. Krauss, C. Eschey und M. Zaeh, "Thermography for monitoring the selective laser melting process," in *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012, S. 999–1014.
- [51] X. Maldague und S. Marinetti, "Pulse phase infrared thermography," *Journal of Applied Physics*, Jg. 79, Nr. 5, S. 2694–2698, 1996. doi: 10.1063/1.362662.
- [52] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda und F. G. Bulnes, "Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing," *Sensors*, Jg. 14, Nr. 7, S. 12305–12348, 2014. doi: 10.3390/s140712305.
- [53] C. Ibarra Castanedo, "Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: Depth retrieval with the phase," Dissertation, Université Laval, Laval, 2005.
- [54] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, 5. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1986. doi: 10.1007/978-3-662-10909-0.
- [55] S. Adden und P. Horst, "Stiffness degradation under fatigue in multiaxially loaded non-crimped-fabrics," *International Journal of Fatigue*, Jg. 32, Nr. 1, S. 108–122, 2010. doi: 10.1016/j.ijfatigue.2009.02.002.
- [56] H.-P. Ortwein, "Eine transparente Deckschicht als visueller Indikator für die Risentwicklung in CFK," Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2016.
- [57] K. Schiebold, *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Eindringprüfung*, 1. Aufl. Springer Vieweg, 2014. doi: 10.1007/978-3-662-43809-1.
- [58] R. Lerch, G. Sessler und D. Wolf, *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*, 1. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-49833-9.



- 
- [59] D. Aggelis, N.-M. Barkoula, T. Matikas und A. Paipetis, "Acoustic structural health monitoring of composite materials: Damage identification and evaluation in cross ply laminates using acoustic emission and ultrasonics," *Composites Science and Technology*, Jg. 72, Nr. 10, S. 1127–1133, 2012. doi: 10.1016/j.compscitech.2011.10.011.
- [60] A. Ettemeyer, "Shearografie - ein optisches Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung," *tm-Technisches Messen*, Jg. 58, S. 247–252, JG 1991. doi: 10.1524/teme.1991.58.jg.247.
- [61] P. Menner, "Zerstörungsfreie Prüfung von modernen Werkstoffen mit dynamischen Shearografie-Verfahren," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [62] Z. Liu, J. Gao, H. Xie und P. Wallace, "NDT capability of digital shearography for different materials," *Optics and Lasers in Engineering*, Jg. 49, Nr. 12, S. 1462–1469, 2011. doi: 10.1016/j.optlaseng.2011.04.006.
- [63] Y. Y. Hung, "A speckle-shearing interferometer: A tool for measuring derivatives of surface displacements," *Optics Communications*, Jg. 11, Nr. 2, S. 132–135, 1974. doi: 10.1016/0030-4018(74)90200-4.
- [64] R. Crane, D. Hagemaijer und R. Fassbender, "Radiographic Inspection of Composites," in *Comprehensive Composite Materials*, Elsevier, 2000, S. 321–344. doi: 10.1016/B0-08-042993-9/00078-4.
- [65] G. Riegert, "Induktions-Lockin-Thermografie: ein neues Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [66] C. Sauerwein und M. Simon, "Anwendungen der 3D-Computertomographie in Entwicklung und Forschung," in *DGZfP-Jahrestagung 2002*, 2002.
- [67] D. Wu, "Lockin-Thermographie für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung und Werkstoffcharakterisierung," Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1996.
- [68] C. Ibarra-Castaneda und X. Maldague, "Pulsed phase thermography reviewed," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Jg. 1, Nr. 1, S. 47–70, 2004. doi: 10.3166/qirt.1.47-70.
- [69] S. C. Garcea, "X-ray computed tomography of polymer composites," *Composites Science and Technology*, Jg. 156, S. 305–319, 2018. doi: 10.1016/j.compscitech.2017.10.023.
- [70] A. J. Brunner, I. Jerjen, M. Plamondon, R. Furrer und J. Neuenschwander, "Röntgen-Mikrotomografie, Ultraschall und Thermographie für die Charakterisierung von Defekten in GFK- und CFK-Verbundwerkstoffen und -Elementen," in *DACH-Jahrestagung 2015*, Salzburg, 2015.

- [71] C. Thiemann, "Methode zur Konfiguration automatisierter thermografischer Prüfsysteme," Dissertation, Technische Universität München, München, 2016.
- [72] C. Ibarra-Castanedo, J.-M. Piau, S. Guilbert, N. P. Avdelidis, M. Genest, A. Bendada und X. P. V. Maldague, "Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures," *Research in Nondestructive Evaluation*, Jg. 20, Nr. 1, S. 1–31, 2009. doi: 10.1080/09349840802366617.
- [73] G. Busse, D. Wu und W. Karpen, "Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography," *Journal of Applied Physics*, Jg. 71, Nr. 8, S. 3962–3965, 1992. doi: 10.1063/1.351366.
- [74] J. Milne und W. Reynolds, "The non-destructive evaluation of composites and other materials by thermal pulse video thermography," in *Thermosense VII: Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control*, International Society for Optics and Photonics, Bd. 520, 1985, S. 119–122. doi: 10.1117/12.946141.
- [75] K. Reifsnider, E. G. Henneke und W. Stinchcomb, "The Mechanics of Vibrothermography," in *Mechanics of Nondestructive Testing*, Boston, MA: Springer, 1980, S. 249–276. doi: 10.1007/978-1-4684-3857-4\_12.
- [76] K. Chatterjee, S. Tuli, S. G. Pickering und D. P. Almond, "A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques," *NDT & E International*, Jg. 44, Nr. 7, S. 655–667, 2011. doi: 10.1016/j.ndteint.2011.06.008.
- [77] C. Maierhofer und M. Ziegler, "Neue Normen und Richtlinien für die Thermografie in der zerstörungsfreien Prüfung," in *Thermographie-Kolloquium 2017*, Berlin, 2017.
- [78] Y. Li, A.-B. Ming, H. Mao, G.-F. Jin, Z.-W. Yang, W. Zhang und S.-Q. Wu, "Detection and Characterization of Mechanical Impact Damage Within Multi-Layer Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminate Using Passive Thermography," *IEEE Access*, Jg. 7, S. 27 689–27 698, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2902195.
- [79] V. Popow und M. Gurka, "Passive Thermography for Detection of Damaging Events during Quasi-Static Tensile Testing," *Key Engineering Materials*, Jg. 809, S. 581–586, 2019. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.809.581.
- [80] W. Bergmann, *Werkstofftechnik 1: Struktureller Aufbau von Werkstoffen - Metallische Werkstoffe - Polymerwerkstoffe - Nichtmetallisch-anorganische Werkstoffe*, 7., neu bearbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2013.

- 
- [81] E. Kordatos, D. Aggelis und T. Matikas, "Monitoring mechanical damage in structural materials using complimentary NDE techniques based on thermography and acoustic emission," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 43, Nr. 6, S. 2676–2686, 2012. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.12.013.
- [82] C. Meola, S. Boccardi, N. Boffa, F. Ricci, G. Simeoli, P. Russo und G. Carlomagno, "New perspectives on impact damaging of thermoset- and thermoplastic-matrix composites from thermographic images," *Composite Structures*, Jg. 152, S. 746–754, 2016. doi: 10.1016/j.compstruct.2016.05.083.
- [83] J. Montesano, H. Bougherara und Z. Fawaz, "Application of infrared thermography for the characterization of damage in braided carbon fiber reinforced polymer matrix composites," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 60, S. 137–143, 2014. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.12.053.
- [84] B. Valès, V. Munoz, H. Weleman, M.-L. Pastor, B. Trajin, M. Perrin, A. Cantarel und M. Karama, "Heat source estimation in anisotropic materials," *Composite Structures*, Jg. 136, S. 287–296, 2016. doi: 10.1016/j.compstruct.2015.09.050.
- [85] T. Mori und K. Tanaka, "Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions," *Acta Metallurgica*, Jg. 21, Nr. 5, S. 571–574, 1973. doi: 10.1016/0001-6160(73)90064-3.
- [86] M. Naderi, A. Kahirdeh und M. Khonsari, "Dissipated thermal energy and damage evolution of Glass/Epoxy using infrared thermography and acoustic emission," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 43, Nr. 3, S. 1613–1620, 2012. doi: 10.1016/j.compositesb.2011.08.002.
- [87] C. Goidescu, H. Weleman, C. Garnier, M. Fazzini, R. Brault, E. Péronnet und S. Mistou, "Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 48, S. 95–105, 2013. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.11.016.
- [88] V. Popow, B. Kelkel und M. Gurka, "Passive impulse thermography during quasi-static tensile tests of fiber reinforced composites," in *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018)*, Gothenburg, 2018.
- [89] M. Rahammer, W. Adebahr, R. Sachse, S. Gröninger und M. Kreutzbruck, "Crack growth monitoring at CFRP bond lines," in *42nd Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE*, Minneapolis, Minnesota, 2016, S. 120 018. doi: 10.1063/1.4940603.

- [90] C. Garnier, B. Lorrain und M.-L. Pastor, "Impact damage evolution under fatigue loading by InfraRed Thermography on composite structures," in *EPJ Web of Conferences*, EDP Sciences, Bd. 6, 2010, S. 42 020. doi: 10.1051/epjconf/20100642020.
- [91] E. Kordatos, K. Dassios, D. Aggelis und T. Matikas, "Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission," *Mechanics Research Communications*, Jg. 54, S. 14–20, 2013. doi: 10.1016/j.mechrescom.2013.09.005.
- [92] A. Maier, R. Schmidt, B. Oswald-Tranta und R. Schledjewski, "Non-Destructive Thermography Analysis of Impact Damage on Large-Scale CFRP Automotive Parts," *Materials*, Jg. 7, Nr. 1, S. 413–429, 2014. doi: 10.3390/ma7010413.
- [93] M. Saeedifar, M. A. Najafabadi, D. Zarouchas, H. H. Toudeshky und M. Jalalvand, "Clustering of interlaminar and intralaminar damages in laminated composites under indentation loading using Acoustic Emission," *Composites Part B: Engineering*, Jg. 144, S. 206–219, 2018. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.028.
- [94] R. Krankenhagen, C. Maierhofer, M. Röllig, T. Heckel, D. Brackrock und M. Gaal, "Charakterisierung von Impactschäden während und nach der Belastung mit thermografischen Verfahren und mit Ultraschall," in *DGZfP Jahrestagung 2018*, 2018.
- [95] C. Meola und G. M. Carlomagno, "Impact damage in GFRP: New insights with infrared thermography," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 41, Nr. 12, S. 1839–1847, 2010. doi: 10.1016/j.compositesa.2010.09.002.
- [96] C. Meola, G. M. Carlomagno und F. Ricci, "Monitoring of impact damage in Carbon Fibre Reinforced Polymers," in *11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography (QIRT 2012)*, Napoli, Italy, 2012. doi: 10.21611/qirt.2012.374.
- [97] C. Meola und G. M. Carlomagno, "Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects," *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 67, S. 1–11, 2014. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2013.12.010.
- [98] C. Meola, S. Boccardi, G. Carlomagno, N. Boffa, F. Ricci, G. Simeoli und P. Russo, "Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography," *NDT & E International*, Jg. 85, S. 34–42, 2017. doi: 10.1016/j.ndteint.2016.10.004.

- 
- [99] X. Li, Z. Zeng, J. Shen, C. Zhang und Y. Zhao, "Rectification of depth measurement using pulsed thermography with logarithmic peak second derivative method," *Infrared Physics & Technology*, Jg. 89, S. 1–7, 2018. doi: 10.1016/j.infrared.2017.12.002.
- [100] J. B. J. Baron Fourier, *The Analytical Theory of Heat*. The University Press, 1878. doi: 10.1017/CB09780511693205.
- [101] D. P. Almond und S. K. Lau, "Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Jg. 27, Nr. 5, S. 1063–1069, 1994. doi: 10.1088/0022-3727/27/5/027.
- [102] X. Maldague, *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*, 1. Aufl. Wiley New York, 2001.
- [103] M. Klein, A. Bendada, M. Pilla, C. Ibarra-Castanedo und X. Maldague, "Enhancing Infrared Images Contrast for Pulsed Thermography," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT Council, 2008. doi: 10.21611/qirt.2008.08\_02\_03.
- [104] M. Pilla, M. Klein, X. Maldague und A. Salerno, "New Absolute Contrast for pulsed thermography," in *Proceedings of the 2002 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT Council, 2002. doi: 10.21611/qirt.2002.004.
- [105] S. M. Shepard, "Advances in pulsed thermography," in *Thermosense XXIII*, International Society for Optics and Photonics, Bd. 4360, Orlando, FL, 2001, S. 511–515. doi: 10.1117/12.421032.
- [106] S. M. Shepard, J. R. Lhota, B. A. Rubadeux, D. Wang und T. Ahmed, "Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences," *Optical Engineering*, Jg. 42, Nr. 5, S. 1337–1343, 2003. doi: 10.1117/1.1566969.
- [107] X. Maldague, F. Galmiche und A. Ziadi, "Advances in pulsed phase thermography," *Infrared Physics & Technology*, Jg. 43, Nr. 3-5, S. 175–181, 2002. doi: 10.1016/S1350-4495(02)00138-X.
- [108] C. Ibarra-Castanedo, D. González, F. Galmiche, X. P. Maldague und A. Bendada, "Discrete signal transforms as a tool for processing and analyzing pulsed thermographic data," in *Defense and Security Symposium*, J. J. Miles, G. R. Peacock und K. M. Knettel, Hrsg., Orlando (Kissimmee), FL, 2006, S. 620–614. doi: 10.1117/12.660226.
- [109] N. Rajic, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures," *Composite Structures*, Jg. 58, Nr. 4, S. 521–528, 2002.

- [110] S. Marinetti, E. Grinzato, P. Bison, E. Bozzi, M. Chimenti, G. Pieri und O. Salvetti, "Statistical analysis of IR thermographic sequences by PCA," *Infrared Physics & Technology*, Jg. 46, Nr. 1-2, S. 85–91, 2004. doi: 10.1016/j.infrared.2004.03.012.
- [111] F. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. Conde, J. Lopez-Higuera und X. Maldague, "Automatic data processing based on the skewness statistic parameter for subsurface defect detection by active infrared thermography," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT Council, 2008. doi: 10.21611/qirt.2008.12\_16\_16.
- [112] F. J. Madruga, C. Ibarra-Castanedo, O. M. Conde, J. M. López-Higuera und X. Maldague, "Infrared thermography processing based on higher-order statistics," *NDT & E International*, Jg. 43, Nr. 8, S. 661–666, 2010. doi: 10.1016/j.ndteint.2010.07.002.
- [113] X. P. Maldague, *Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [114] D. Wu und G. Busse, "Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials," *Revue générale de thermique*, Jg. 37, Nr. 8, S. 693–703, 1998.
- [115] C. Ibarra-Castanedo und X. P. Maldague, "Pulsed Phase Thermography Inversion Procedure using Normalized Parameters to Account for Defect Size Variations," in *Procedures of SPIE, Thermosense XXVII Vol. 5782*, International Society for Optics and Photonics, Bd. 5782, 2005, S. 334–341. doi: 10.1117/12.596602.
- [116] C. Maierhofer, R. Krankenhagen, M. Röllig und P. Myrach, "Quantitative Fehlstellencharakterisierung mit Puls- und Lock-in-Thermografie mit optischer Erwärmung," in *Thermographie-Kolloquium 2017*, 2017.
- [117] G. Busse, "Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal," *Applied Physics Letters*, Jg. 35, Nr. 10, S. 759–760, 1979. doi: 10.1063/1.90960.
- [118] A. Rosencwaig und G. Busse, "High-resolution photoacoustic thermal-wave microscopy," *Applied Physics Letters*, Jg. 36, Nr. 9, S. 725–727, 1980. doi: 10.1063/1.91646.
- [119] D. Nortershauser und P. Millan, "Resolution of a three-dimensional unsteady inverse problem by sequential method using parameter reduction and infrared thermography measurements," *Numerical Heat Transfer: Part A: Applications*, Jg. 37, Nr. 6, S. 587–611, 2000. doi: 10.1080/104077800274109.

- 
- [120] Y. Hung, Y. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu und P. Chung, "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Jg. 64, Nr. 5-6, S. 73–112, 2009. doi: 10.1016/j.mser.2008.11.001.
- [121] "Comsol Multiphysics GmbH." (2021), Adresse: <https://www.comsol.de/> (besucht am 16.02.2021).
- [122] R. Joven, R. Das, A. Ahmed, P. Roozbehjavan und B. Minaie, "Thermal properties of carbon fiber-epoxy composites with different fabric weaves," in *Conference: Conference: SAMPE International Symposium Proceedings, at Charleston, SC, 2012*, S. 14.
- [123] G. C. Wetsel und F. A. McDonald, "Resolution and definition in photothermal imaging," *Journal of Applied Physics*, Jg. 56, Nr. 11, S. 3081–3085, 1984. doi: 10.1063/1.333891.
- [124] S. Quek und D. P. Almond, "Defect detection capability of pulsed transient thermography," *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Jg. 47, Nr. 4, S. 4, 2005. doi: 10.1784/insi.47.4.212.63153.
- [125] V. Popow und M. Gurka, "Determination of depth and size of defects in carbon-fiber-reinforced plastic with different methods of pulse thermography," in *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Bd. 10599, 2018. doi: 10.1117/12.2296564.
- [126] V. Popow und M. Gurka, "Full factorial analysis of the accuracy of automated quantification of hidden defects in an anisotropic carbon fibre reinforced composite shell using pulse phase thermography," *NDT & E International*, Jg. 116, S. 102359, 2020. doi: 10.1016/j.ndteint.2020.102359.
- [127] J. R. Brown und H. Hamilton, "Heating Methods and Detection Limits for Infrared Thermography Inspection of Fiber-Reinforced Polymer Composites," *ACI Materials Journal*, Jg. 104, Nr. 5, S. 481, 2007.
- [128] J. Tashan, R. Al-Mahaidi und A. Mamkak, "Defect size measurement and far distance infrared detection in CFRP-concrete and CFRP-steel systems," *Australian Journal of Structural Engineering*, Jg. 17, Nr. 1, S. 2–13, 2016. doi: 10.1080/13287982.2015.1116177.
- [129] J. Krapez und D. Balageas, "Early detection of thermal contrast in pulsed stimulated infrared thermography," in *2nd Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, Bd. 94, 1994, S. 1994–039. doi: 10.21611/qirt.1994.039.
- [130] W. Karpen, M. Jöchen und U. Netzelmann, "Numerical filters as a tool for defect characterization in pulsed thermography," *Journal de Physique IV (Proceedings)*, Jg. 125, S. 531–533, 2005. doi: 10.1051/jp4:2005125123.

- [131] B. Oswald-Tranta, "Comparative study of thermal contrast and contrast in thermal signal derivatives in pulse thermography," *NDT & E International*, Jg. 91, S. 36–46, 2017. doi: 10.1016/j.ndteint.2017.06.005.
- [132] J.-Q. Zhang, H. Qi, S.-B. Liu, Z.-T. Niu, X.-Y. Yu und Y.-T. Ren, "Research on Modulated Thermal Wave Radar Imaging Technique for Photothermal Properties of Semi-transparent Materials," *International Journal of Thermophysics*, Jg. 41, Nr. 5, S. 63, 2020. doi: 10.1007/s10765-020-02645-4.
- [133] E. D'Accardi, D. Palumbo, R. Tamborrino und U. Galietti, "A Quantitative Comparison among Different Algorithms for Defects Detection on Aluminum with the Pulsed Thermography Technique," *Metals*, Jg. 8, Nr. 10, S. 859, 2018. doi: 10.3390/met8100859.
- [134] H. Fernandes, H. Zhang, A. Figueiredo, C. Ibarra-Castanedo, G. Guimaraes und X. Maldague, "Carbon fiber composites inspection and defect characterization using active infrared thermography: Numerical simulations and experimental results," *Applied Optics*, Jg. 55, S. D46–D53, 1. Dez. 2016. doi: 10.1364/AO.55.000D46.
- [135] J. Sun, "Analysis of Data Processing Methods for Pulsed Thermal Imaging Characterisation of Delaminations," *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Jg. 10, Nr. 1, S. 9–25, 2013.
- [136] V. Popow, L. Budesheim und M. Gurka, "Comparison and evaluation of different processing algorithms for the nondestructive testing of fiber-reinforced plastics with pulse thermography," *Materials Testing*, Jg. 60, Nr. 6, S. 607–613, 2018. doi: 10.3139/120.111193.
- [137] B. Hannemann, "Multifunctional metal-carbon-fibre composites for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures," Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2018.
- [138] B. Kelkel, "On the influence of source depth and source-to-sensor distance on the acoustic emission signatures of damaging events in cross-ply carbon fibre-reinforced plastics," Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2020.
- [139] "Solvay GmbH." (2020), Adresse: <https://www.solvay.de/> (besucht am 08.10.2020).
- [140] "Teijin Carbon – Tenax® Filamentgarn." (2020), Adresse: <https://www.tejincarbon.com/de/produkte/tenaxr-kohlenstofffaser/tenaxr-filamentgarn?r=1> (besucht am 05.10.2020).
- [141] "CYCOM 977-2." (2020), Adresse: <https://www.solvay.com/en/product/cycom-977-2> (besucht am 05.10.2020).



- 
- [142] S. Heimbs, S. Heller, P. Middendorf, F. Hähnel und J. Weiße, “Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling,” *International Journal of Impact Engineering*, Jg. 36, Nr. 10-11, S. 1182–1193, 2009. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2009.04.006.
- [143] A. Jumahat, C. Soutis, F. R. Jones und A. Hodzic, “Fracture mechanisms and failure analysis of carbon fibre/toughened epoxy composites subjected to compressive loading,” *Composite Structures*, Jg. 92, Nr. 2, S. 295–305, 2010. doi: 10.1016/j.compstruct.2009.08.010.
- [144] “Tygavac Advanced Materials, Ltd.” (2021), Adresse: <https://www.tygavac.co.uk/> (besucht am 28.01.2021).
- [145] “CHEMFILM High Performance Films — Specialty Films Saint-Gobain.” (2021), Adresse: <https://www.films.saint-gobain.com/products/chemfilm> (besucht am 28.01.2021).
- [146] *AITM6-0011 - Non Destructive Inspection of Composite Parts*.
- [147] “Infratec GmbH.” (2020), Adresse: <https://www.infratec.de/> (besucht am 08.10.2020).
- [148] “HENSEL-VISIT GmbH & Co. KG.” (2020), Adresse: <https://visit.hensel.eu/> (besucht am 08.10.2020).
- [149] “National Instruments Corp.” (2020), Adresse: <https://www.ni.com/de-de.html> (besucht am 08.10.2020).
- [150] “Python Software Foundation.” (2020), Adresse: <https://www.python.org/> (besucht am 08.10.2020).
- [151] “The HDF Group.” (2020), Adresse: <https://www.hdfgroup.org/> (besucht am 08.10.2020).
- [152] J. W. Cooley und J. W. Tukey, “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series,” *Mathematics of Computation*, Jg. 19, Nr. 90, S. 297–301, 1965.
- [153] R. J. Noll, “Zernike polynomials and atmospheric turbulence,” *Journal of the Optical Society of America*, Jg. 66, Nr. 3, S. 207–211, 1976. doi: 10.1364/JOSA.66.000207.
- [154] K. He, J. Sun und X. Tang, “Guided Image Filtering,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Jg. 35, Nr. 6, S. 1397–1409, 2012. doi: 10.1109/TPAMI.2012.213.
- [155] S. Baumann und M. Gnisia, “Identifikation und Behandlung von Ausreißern in Flugbetriebsdaten für Machine Learning Modelle,” in *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018*, 2018.

- [156] P. Albendea, F. Madruga, A. Cobo und J. López-Higuera, "Signal to noise ratio (SNR) comparison for pulsed thermographic data processing methods applied to welding defect detection," in *Proceedings of the 2010 International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, QIRT Council, 2010. doi: 10.21611/qirt.2010.004.
- [157] "Carl Zeiss AG." (2020), Adresse: <https://www.zeiss.de> (besucht am 02.12.2020).
- [158] B. Kelkel, V. Popow und M. Gurka, "Combining acoustic emission with passive thermography to characterize damage progression in cross-ply CFRP laminates during quasi-static tensile loading," in *12th European Conference on Non-Destructive Testing, Gothenburg, Schweden*, Bd. 11, 2018.
- [159] "Polytec GmbH." (2020), Adresse: <https://www.polytec.com/> (besucht am 29.12.2020).
- [160] B. Yu, R. Bradley, C. Soutis, P. Hogg und P. Withers, "2D and 3D imaging of fatigue failure mechanisms of 3D woven composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Jg. 77, S. 37–49, 2015. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.06.013.
- [161] "OpenCV." (2021), Adresse: <https://opencv.org/> (besucht am 03.01.2021).
- [162] K. Eden und H. Gebhard, "Häufigkeitsverteilung," in *Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik: Messen - Auswerten - Darstellen Protokolle - Berichte - Präsentationen*, 2. Aufl., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 141–151. doi: 10.1007/978-3-658-06114-2.

# Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Auswahl herstellungs- und nutzungsbedingter Defekttypen in FKV an Beispiel eines (0/90) Laminates. . . . .   | 7  |
| 2.2  | Typischer Prüfaufbau der passiven und aktiven Thermografie (Lock-In Thermografie und Impulsthermografie) in Reflexionsanordnung. . . . .   | 20 |
| 2.3  | Typischer Prüfaufbau der passiven und aktiven Thermografie (Lock-In Thermografie und Impulsthermografie) in Reflexionsanordnung. . . . .   | 31 |
| 2.4  | Defekttypen in FKV . . . . .   | 32 |
| 3.5  | Schematische Darstellung der Vorgehensweise . . . . .  | 37 |
| 4.6  | (a) Platten mit innenliegenden künstlichen Defekten in Form von FEP-Folien (verwendet in Kapitel 5), (b) taillierte Zugproben für die quasi-statische Zugprüfung (verwendet in Kapitel 6) und (c) fehlerfreie Platten für die Einbringung von Impactschädigungen (verwendet in Kapitel 7). . . . .   | 39 |
| 4.7  | Mikroskopieaufnahmen von verwendeten Lagenaufbauten. (a) Unidirektionaler Lagenaufbau $(0)_{13}$ mit strukturierter Oberfläche (verwendet in Kapitel 5), (b) multidirektionaler Lagenaufbau $(45/-45/45/-45/90/0/\overline{90})_s$ mit strukturierter Oberfläche (verwendet in Kapitel 5 und 7) und (c) $(0/90)_s$ mit glatter Oberfläche an Unter- und Oberseite für die quasi-statische Zugprüfung (verwendet in Kapitel 6). . . . . | 39 |
| 4.8  | Verwendeter Autoklavenzyklus zur Herstellung der Proben im Prepreg-Autoklav-Verfahren. Die rote Kurve entspricht der Temperatur $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) und die grüne Kurve dem Autoklavendruck $p$ (bar), jeweils in Abhängigkeit von der Zeit $t$ (min) dargestellt. . . . .  | 41 |
| 5.9  | (a) Stanzwerkzeug zum Ausstanzen der Folien. (b) Vermessen der Folien an einem kalibrierten Mikroskop. (c) Platzieren der Folien während des Herstellungsprozesses. . . . .  | 43 |
| 5.10 | Schematische Darstellung der Probengröße und der Lage von künstlichen Defekten aus FEP-Folieneinlagen in den Probekörpern. Dargestellt ist die Draufsicht (links) und Schnittdarstellung (rechts) zusammen mit den theoretischen Positionen, Formen und Größen. . . . .  | 44 |
| 5.11 | Prüfaufbau der Impulsthermografie in Reflexionsanordnung. . . . .  | 45 |
| 5.12 | Puls-Phasen Auswertung durch pixelweise Überführung der Zeitsignale in das Frequenzspektrum und Rekonstruktion zu Amplituden- und Phasenbildern. Die Länge des Auswertefensters $N$ ist über den Endzeitpunkt $t_e$ anpassbar. . . . .   | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 5.13 Vorverarbeitung der Daten, vor der lateral orts aufgelösten Quantifizierung des Defektes. (a) Unbearbeitetes Phasenbild des ROI für $f = 0,9$ Hz ( $N = 200$ Bilder), inkl. Darstellung der für die Referenzfläche verwendeten Messpunkte. (b) Referenzfläche ermittelt durch Anpassung einer zweidimensionalen Polynomfunktion an Referenzmesspunkte. (c) Differenz zwischen Messwerten und Referenzfläche. . . . .   | 48 |
| 5.14 Anwendung eines lateralen Box Filters. (a) Phasenbild nach Abzug der Referenzfläche. (b) Phasenbild nach Anwendung eines lateralen $3 \times 3$ Box Filters. . . . .   | 48 |
| 5.15 Repräsentative Phasenbilder (a) eines quadratischen und (b) eines runden Defektes in der UD Probe, jeweils mit der Größe $15 \times 15 \text{ mm}^2$ in $0,27$ mm Tiefe. Bestimmung des SNR durch Verwendung des Randbereiches $S_{ref}$ und des Signalbereiches $S_{sig}$ . Die laterale Größe wird anhand der Querschnittsprofile unter Verwendung der Methoden (A)–(D) ermittelt, wobei der Querschnitt bei eckigen Defekten verschoben wird und das Bild bei runden Defekten rotiert wird. . . . . | 49 |
| 5.16 (a) Referenzmessung am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520, (b) Manuelle Bestimmung der lateralen Größe anhand vom Transmissionsbild, beispielhaft dargestellt für einen eckigen Defekt der Größe $15 \times 15$ mm und einen runden Defekt mit einem Durchmesser von $15$ mm in einer multidirektionalen Platte. . . . .   | 51 |
| 5.17 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an IR-Bildern) in Abhängigkeit von der Zeit, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von $10$ mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von $0,135$ bis $0,54$ mm für eine unidirektionale Probe (UD). . . . .  | 53 |
| 5.18 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an unbearbeiteten IR-Bildern) in Abhängigkeit von der Zeit, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von $10$ mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von $0,135$ bis $0,54$ mm für eine multidirektionale Probe (MD). . . . .   | 54 |
| 5.19 Tiefenabhängigkeit des maximal erreichbaren SNR für eine UD und MD Probe gemessen an IR-Bildern. Die Form und Größe der Symbole korreliert mit der Form und Größe der Defekte. Die Mittelwerte aller zu einer Tiefe und Probe zugehörigen Messwerte (ohne Differenzierung von Form und Größe) wurden ermittelt und die Punkte mit einer gestrichelten Linie verbunden. . . . .   | 55 |

|  |    |
|--|----|
| 5.20 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an Phasenbildern) in Abhängigkeit von der Frequenz $f$ , beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,81 mm für eine UD Probe. . . .   | 56 |
| 5.21 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen (ermittelt an Phasenbildern) in Abhängigkeit von der Frequenz, beispielhaft gezeigt für einen runden Defekt mit einem Durchmesser von 10 mm in vier verschiedenen Tiefen im Bereich von 0,135 bis 0,81 mm für eine MD Probe. . . . .  | 57 |
| 5.22 Tiefenabhängigkeit des maximal erreichbaren SNR für eine UD und MD Probe gemessen an Phasenbildern. Die Form und Größe der Symbole korreliert mit der Form und Größe der Defekte. Für die lineare Regression wurden alle Messwerte, die zur jeweiligen Probe gehören berücksichtigt (ohne Differenzierung von Form und Größe). Zum Vergleich ist der Verlauf der Mittelwerte aus Abbildung 5.19 dargestellt. . .                            | 58 |
| 5.23 Tiefenabhängigkeit der lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der IR-Bilder, basierend auf dem Bild mit dem maximalen SNR. Form und Größe der Symbole ist analog zu Form und Größe der Defekte. Mittlere Abweichung der Breite (oben) und Höhe (unten) nach den Formeln 5.21 und 5.22, jeweils inklusive Mittelwert und Standardabweichung über alle Messwerte (unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte). . . . .    | 59 |
| 5.24 Übersicht aller für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung verwendeten IR-Bilder für (a) die UD Probe und (b) die MD Probe. Es wird jeweils das Bild mit dem maximalen SNR verwendet. Die Bilder sind nach Größe und Tiefe sortiert und weichen von der Anordnung auf der Probe ab. Die Skalierung erfolgt jeweils je ROI-Bereich, weshalb eine allgemeingültige Z-Achse nicht angegeben werden kann. . . . .                          | 60 |
| 5.25 Tiefenabhängigkeit der lateral orts aufgelösten Quantifizierung anhand der Phasenbilder, basierend auf dem Bild mit dem maximalen SNR. Form und Größe der Symbole ist analog zu Form und Größe der Defekte. Mittlere Abweichung der Breite (oben) und Höhe (unten) nach den Formeln 5.21 und 5.22, jeweils inklusive Mittelwert und Standardabweichung über alle Messwerte (unter Vernachlässigung von Form und Größe der Defekte). . . . . | 61 |

|   |    |
|---|----|
| 5.26 Übersicht aller für die lateral orts aufgelöste Quantifizierung verwendeten Phasenbilder für (a) die UD Probe und (b) die MD Probe. Es wird jeweils das Bild mit dem maximalen SNR verwendet. Die Parameter sind im Anhang in Tabelle A.6 angegeben. Die Bilder sind nach Größe und Tiefe sortiert und weichen von der Anordnung auf der Probe ab. Die Skalierung erfolgt jeweils je ROI-Bereich, weshalb eine allgemeingültige z-Achse nicht angegeben werden kann. . . . . | 62 |
| 6.27 Schematische Darstellung der Probengeometrie für die quasi-statische Zugprüfung. Alle Angaben sind mm dargestellt. Die Probendicke beträgt $0,5304 \pm 0,0144$ mm. . . . .   | 64 |
| 6.28 Orientierung der Zugproben zur gezielten Schädigungseinbringung. (a) Stufe 1: $90^\circ$ Lagen außen zur Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen in den äußeren Lagen und Faserbrüchen in den inneren Lagen. (b) Stufe 2: $0^\circ$ Lagen außen zur Erzeugung von Zwischenfaserbrüchen in den inneren Lagen und Faserbrüchen in den äußeren Lagen. . . . .  | 65 |
| 6.29 Prüfaufbau der passiven Thermografie zur Detektion von Schädigungsereignissen im Rahmen der quasi-statischen Zugprüfung (a) in der Vorderansicht und (b) in der Draufsicht. . . . .  | 66 |
| 6.30 Übersicht der Auswertemethodik. Systematische Verarbeitung kleinerer Stapel von IR-Bildern mit Hilfe der DFT, Identifizierung und Separierung der Schädigungsereignisse in den Amplituden- und Phasenbildern und Zusammensetzung zu einem Gesamtschädigungsbild. . . . .   | 68 |
| 6.31 Temperaturverlauf eines oberflächennahen Schädigungsereignisses. (a) Systematische Variation der Länge des Auswertefensters $N$ und (b) systematische zeitliche Verschiebung des Auswertefensters in Bezug auf den Zeitpunkt des Schädigungsereignisses $t_{def}$ . . . . .  | 69 |
| 6.32 Transformation des unbearbeiteten IR-Bildstapels (a) mit Hilfe der DFT (unter Verwendung der FFT) aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich (b). Dargestellt ist das Amplitudenbild bei 3,33 Hz, erstellt aus einem Bildstapel mit 60 Bildern inkl. der Bereiche, die für die Ermittlung des SNR verwendet werden ( $S_{sig}$ und $S_{ref}$ symmetrisch für die linke (L) und rechte (R) Seite). . . . .  | 70 |
| 6.33 Separierung der Schädigungsereignisse durch Filtern des Amplitudenbildes (Medianfilter $5 \times 5$ px) und erstellen eines Binärbildes bzw. einer Maske mit Hilfe des doppelten RMS. Anschließende Separierung der Schädigungsereignisse durch Multiplikation des Amplitudenbildes mit der erzeugten Maske. . . . .   | 71 |

|   |    |
|---|----|
| 6.34 SNR eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs in den Amplituden- bzw. Phasenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder $N$ und der Frequenz $f$ . . . . .  | 72 |
| 6.35 Amplituden- und Phasenbild eines Zwischenfaserbruchs in der obersten Lage eines vierlagigen Laminats ( $f = 2$ Hz, $N = 100$ Bilder). . . . .  | 73 |
| 6.36 Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der ersten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema. . . . .   | 75 |
| 6.37 Darstellung aller anhand der Amplitudenbilder identifizierten Schädigungsereignisse auf der linken (L) und rechten (R) Seite der Probe bei vier verschiedenen Konfigurationen. . . . .   | 76 |
| 6.38 SNR eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten Lage in den Amplitudenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder $N$ und der Frequenz $f$ . . . . .  | 77 |
| 6.39 Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten bzw. dritten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema. . . . .   | 78 |
| 6.40 Dargestellt ist das unbearbeiteten IR-Bild (a), die Differenzbild nach Abzug des Referenzbildes (aufgenommen etwa 0,1 s vorher) (b), sowie das Differenzbild gefiltert mit einem Medianfilter der Größe $3 \times 3$ px (c) bzw. $5 \times 5$ px (d) zum Zeitpunkt, wenn das SNR maximal ist (etwa 0,04 s bzw. 8 Bilder nach dem Zeitpunkt der Schädigungsentstehung). . . . . | 79 |
| 6.41 Amplituden- und Phasenbild eines Zwischenfaserbruchs in der zweiten und dritten Lage eines vierlagigen Laminats ( $f = 0,5$ Hz, $N = 400$ Bilder). . . . .   | 80 |
| 6.42 (a) Kumulative Darstellung aller identifizierter Schädigungen in der zweiten und dritten Lage eines vierlagigen Laminats. (b) Schliffbild einer Probe aus Stufe 2 mit Zwischenfaserbrüchen in beiden mittleren Lagen des Laminats. . . . .   | 80 |
| 6.43 SNR eines Zwischenfaserbruchs in der vierten Lage in den Amplitudenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder $N$ und der Frequenz $f$ . . . . .  | 81 |
| 6.44 Auswirkung des zeitlichen Versatzes des Auswertefensters auf das SNR eines Zwischenfaserbruchs in der vierten Lage. Die Darstellung erfolgt ausgehend von dem bei Position 0 gelegenen Schädigungsereignis nach dem in Abbildung 6.31 dargestellten Schema. . . . .  | 82 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.45 (a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit passiver Thermografie während der Schädigungseinbringung, (b) Foto des Versuchsaufbaus am Fallturm. . . . .  | 87  |
| 7.46 Übersicht der Auswertemethodik. Systematische Variation der Länge des Auswertefensters $N$ bei der Transformation der IR-Bilder mit Hilfe der DFT. . . . .  | 88  |
| 7.47 Gesetzte Referenzbereiche bei der passiven Thermografie, der aktiven Thermografie und der Radiographie. . . . .   | 90  |
| 7.48 Vorgehen bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung mit Hilfe des dynamischen Schwellwerts. Beispielhaft dargestellt anhand eines IR-Bildes der passiven Thermografie ( $t = 0,1$ s, SWF = 4). . . . .  | 91  |
| 7.49 Vorgehen bei der lateral orts aufgelösten Quantifizierung an den Phasenbildern der passiven Thermografie aufgeteilt in zwei Schritte: (a) separate Betrachtung und Filterung einzelner Phasenbereiche und (b) Nachbearbeitung und Separierung der Gesamtschädigung. Beispielhaft dargestellt anhand eines Phasenbildes der passiven Thermografie bei $f = 49,6$ Hz. . . . . | 93  |
| 7.50 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{real}$ anhand der Radiographie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) mit Hilfe der automatisierten Methode (rote Konturlinie, SWF = 2) und der manuellen Korrektur durch den Benutzer (grüne Konturlinie). . . . .  | 94  |
| 7.51 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A). . . . .   | 95  |
| 7.52 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. . . . .  | 96  |
| 7.53 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500, 1000$ und $1500$ Bilder). . . . .   | 98  |
| 7.54 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500$ Bilder). . . . .  | 99  |
| 7.55 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Probe 10 J aus Charge (A) bei $f = 75,2$ Hz für $N = 500, 1000$ und $1500$ Bilder. . . . .  | 100 |
| 7.56 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500, 1000$ und $1500$ Bilder). . . . .   | 101 |



|  |     |
|--|-----|
| 7.57 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 500$ Bilder). . . . .                        | 102 |
| 7.58 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Probe 10 J aus Charge (A) bei $f = 75,2$ Hz für $N = 500, 1000$ und $1500$ Bilder. . . .    | 103 |
| 7.59 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A). . . . .   | 103 |
| 7.60 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) zu unterschiedlichen Zeitpunkten. . . . .              | 104 |
| 7.61 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplituden- und Phasenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$ Bilder). . . . .        | 105 |
| 7.62 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der aktiven Thermografie mit PPT Auswertung für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$ Bilder). . . . . | 106 |
| 7.63 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der aktiven Thermografie mit PPT Auswertung für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus Charge (A) ( $N = 1500$ Bilder). . . .       | 107 |
| 7.64 Gegenüberstellung der Quantifizierung anhand der Radiographie, sowie der passiven und aktiven Thermografie jeweils für drei Proben bei 5 J, 7 J und 10 J. . . . .   | 108 |
| 7.65 Mittlere prozentuale Abweichung von $A_{def}$ zu $A_{real}$ , ermittelt anhand der passiven und aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus drei Chargen. . . . .   | 108 |
| A.66 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 6 mm (UD-Probe).   | 139 |
| A.67 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 6 mm (MD-Probe).   | 139 |
| A.68 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 10 mm (UD-Probe).  | 140 |
| A.69 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 10 mm (MD-Probe).  | 140 |
| A.70 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 15 mm (UD-Probe).  | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| A.71 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 15 mm (MD-Probe).  | 141 |
| A.72 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $6 \times 6 \text{ mm}^2$ (UD-Probe). . . .   | 142 |
| A.73 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $6 \times 6 \text{ mm}^2$ (MD-Probe). . . .   | 142 |
| A.74 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (UD-Probe). .   | 143 |
| A.75 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $10 \times 10 \text{ mm}^2$ (MD-Probe). .   | 143 |
| A.76 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $15 \times 15 \text{ mm}^2$ (UD-Probe). .   | 144 |
| A.77 SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe $15 \times 15 \text{ mm}^2$ (MD-Probe). .   | 144 |
| A.78 SNR eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs in den Amplituden- bzw. Phasenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder $N$ im Bereich von 10 bis 100 Bildern und der Frequenz $f$ im Bereich von 0 bis 30 Hz. . . . . | 148 |
| A.79 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                                  | 149 |
| A.80 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                           | 150 |
| A.81 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                               | 150 |
| A.82 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der IR-Bilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                                   | 151 |
| A.83 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Amplitudenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                            | 151 |
| A.84 Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche $A_{def}$ anhand der Phasenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C). . . . .                                | 152 |

## Tabellenverzeichnis

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Auswahl der wichtigsten ZfP Methoden (in Anlehnung an [4, 12]). . . . .   | 18  |
| 4.2 | Gemessene Materialeigenschaften der verwendeten Proben. . . . .   | 40  |
| 5.3 | Tatsächliche Größe der in die Platten eingearbeiteten künstlichen Defekte (FEP-Folien). Die Größen wurde mit einem kalibrierten Mikroskop (Leica DM6000M) bestimmt. . . . . | 43  |
| A.4 | Reale Defektgrößen der UD-Probe gemessen am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über drei Messungen.                                   | 145 |
| A.5 | Reale Defektgrößen der MD-Probe gemessen am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über drei Messungen.                                   | 146 |
| A.6 | Optimale Parameter (Anzahl Bilder $N$ , Frequenz $f$ in Hz) für Defekte in unterschiedlichen Tiefen für die UD-Probe und die MD-Probe. . . . .                              | 147 |
| A.7 | Gemessene Schädigungsenergien im Rahmen der Fallturmversuche. Ermittelt anhand der Geschwindigkeiten unmittelbar vor dem Einschlag.   | 149 |

## Appendix

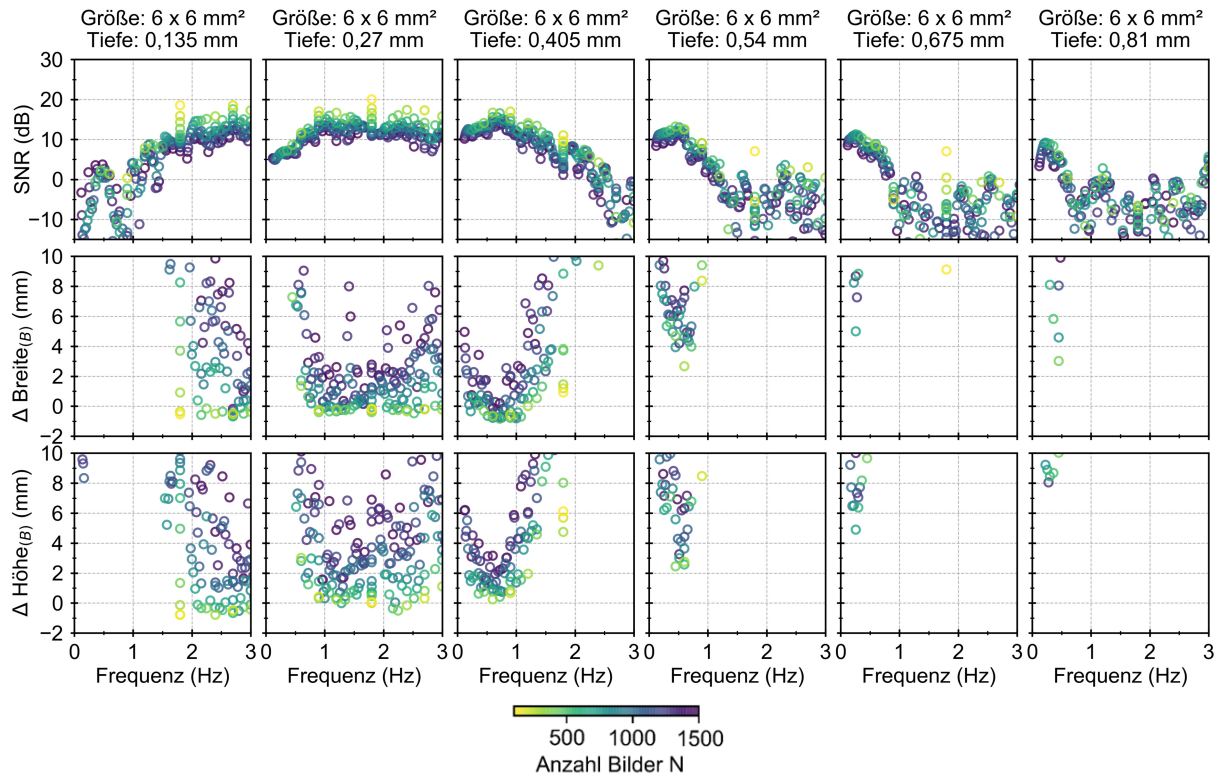


Abb. A.66: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 6 mm (UD-Probe).

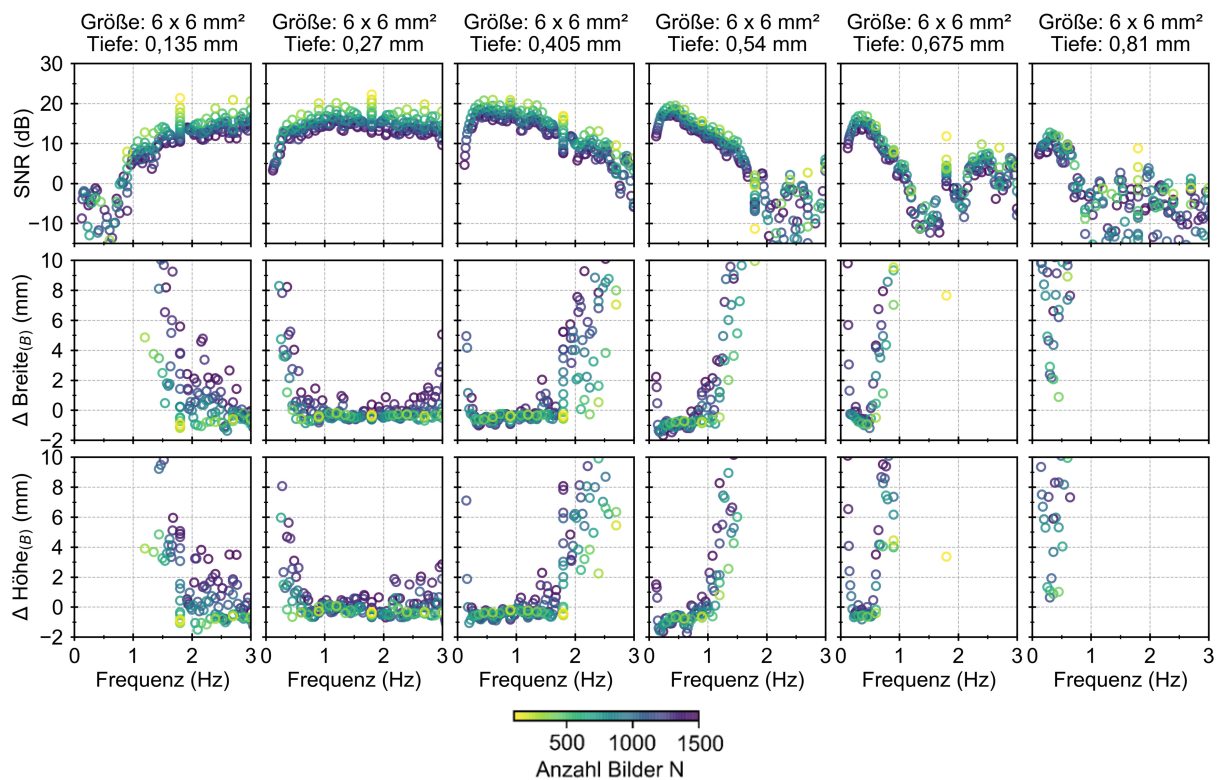


Abb. A.67: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 6 mm (MD-Probe).

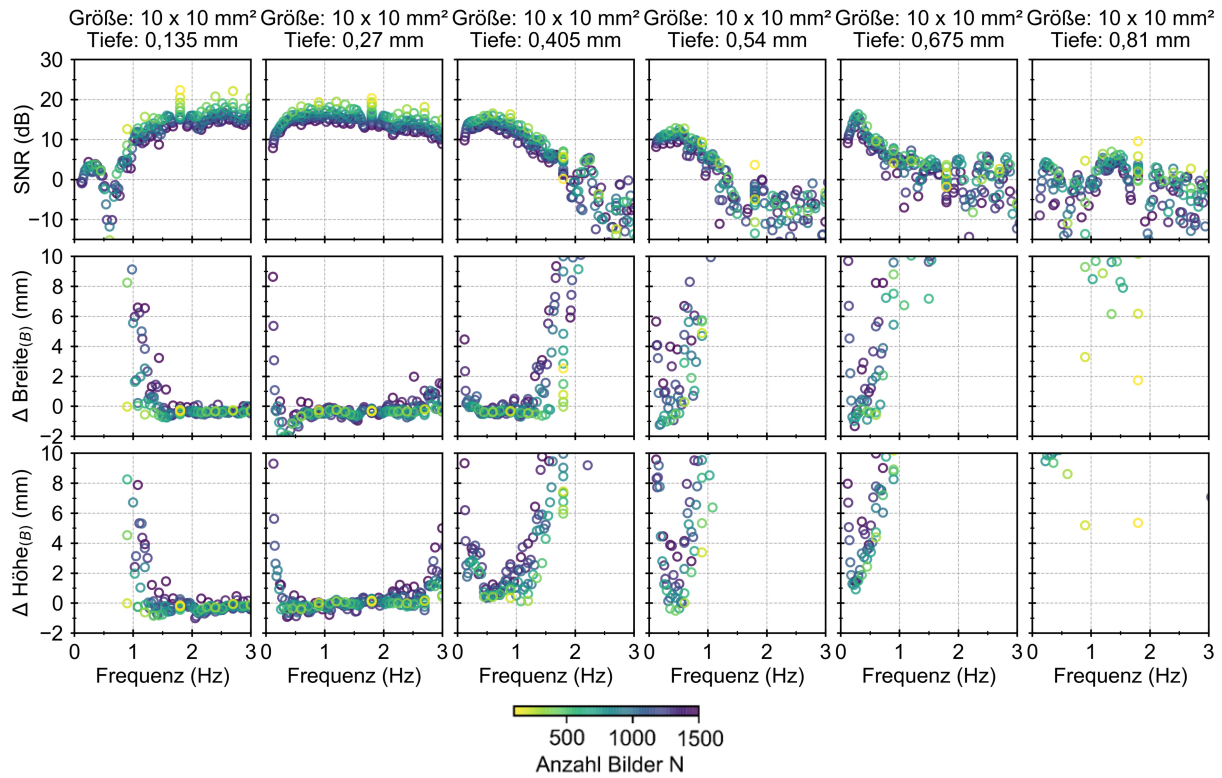


Abb. A.68: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 10 mm (UD-Probe).

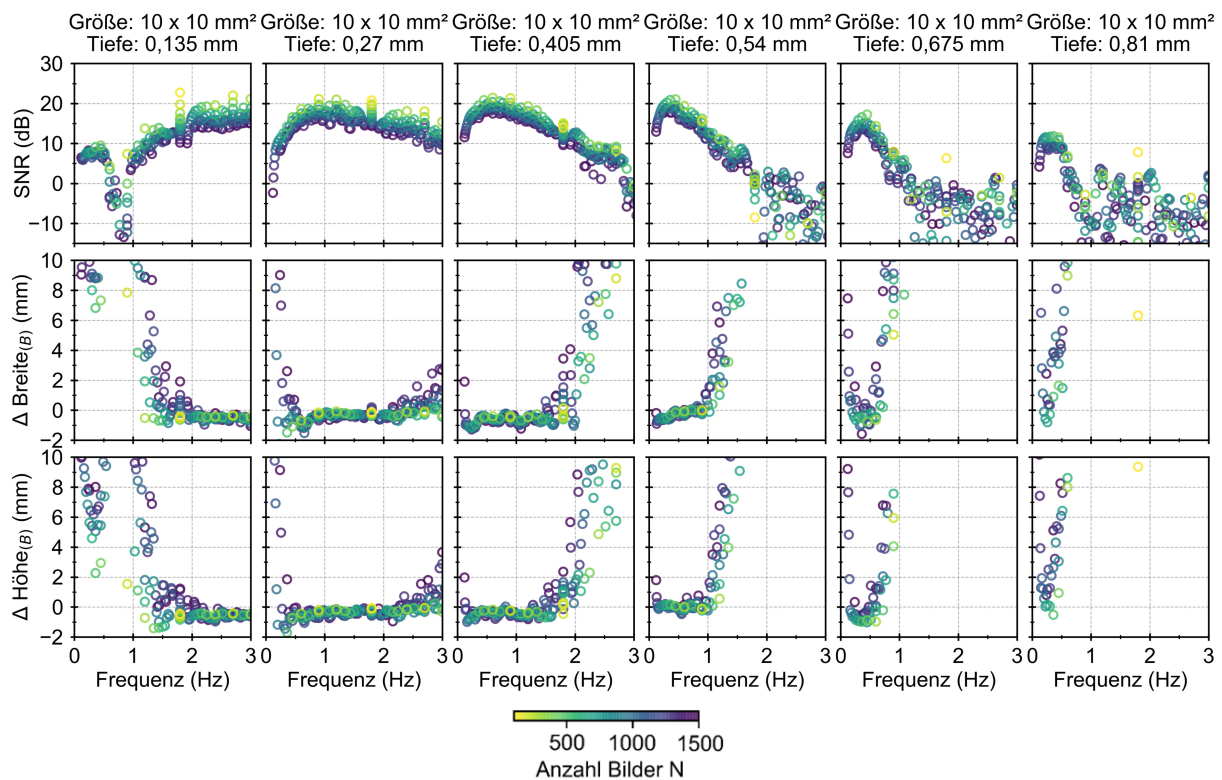


Abb. A.69: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 10 mm (MD-Probe).

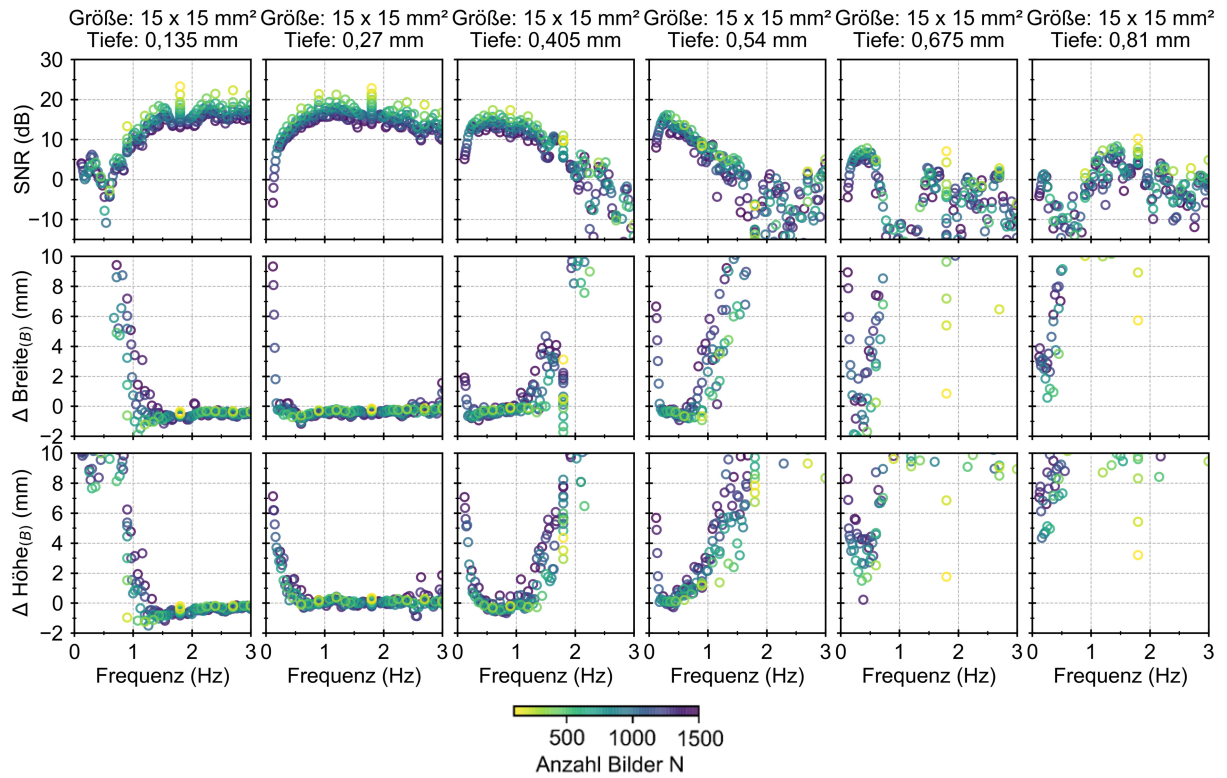


Abb. A.70: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 15 mm (UD-Probe).

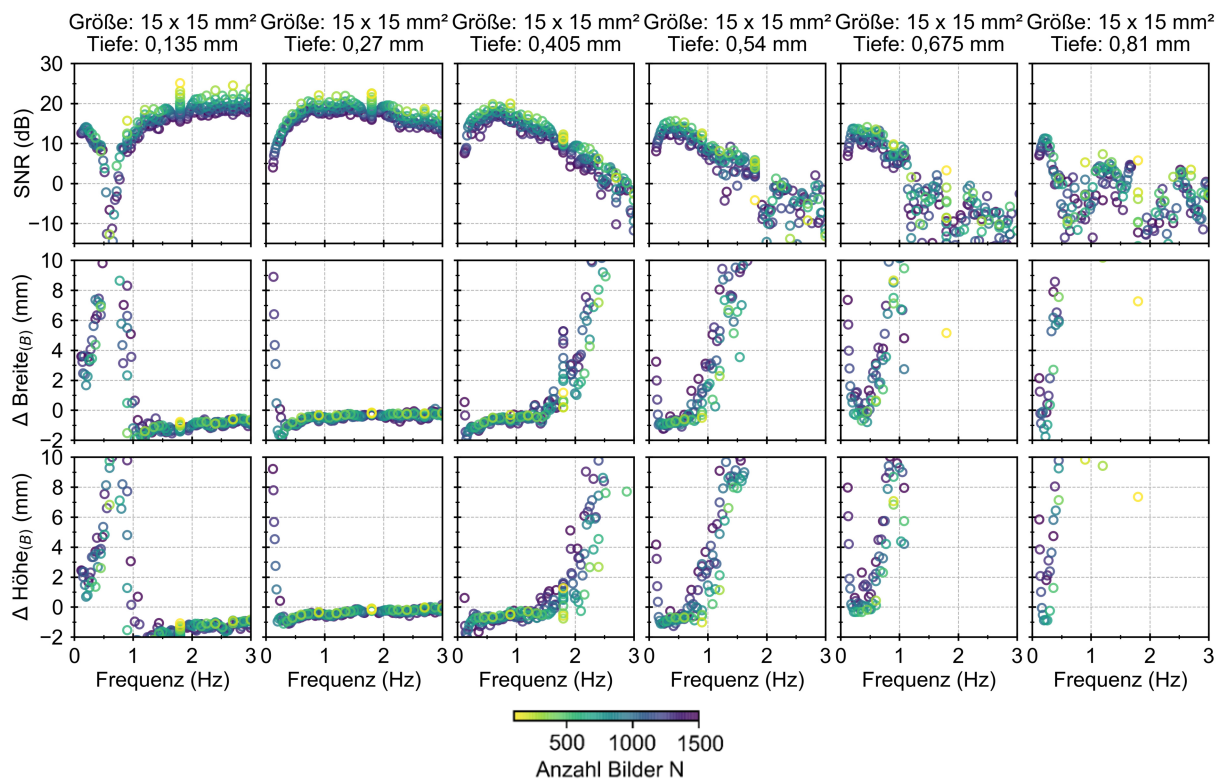


Abb. A.71: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen runden Defekt mit dem Durchmesser 15 mm (MD-Probe).

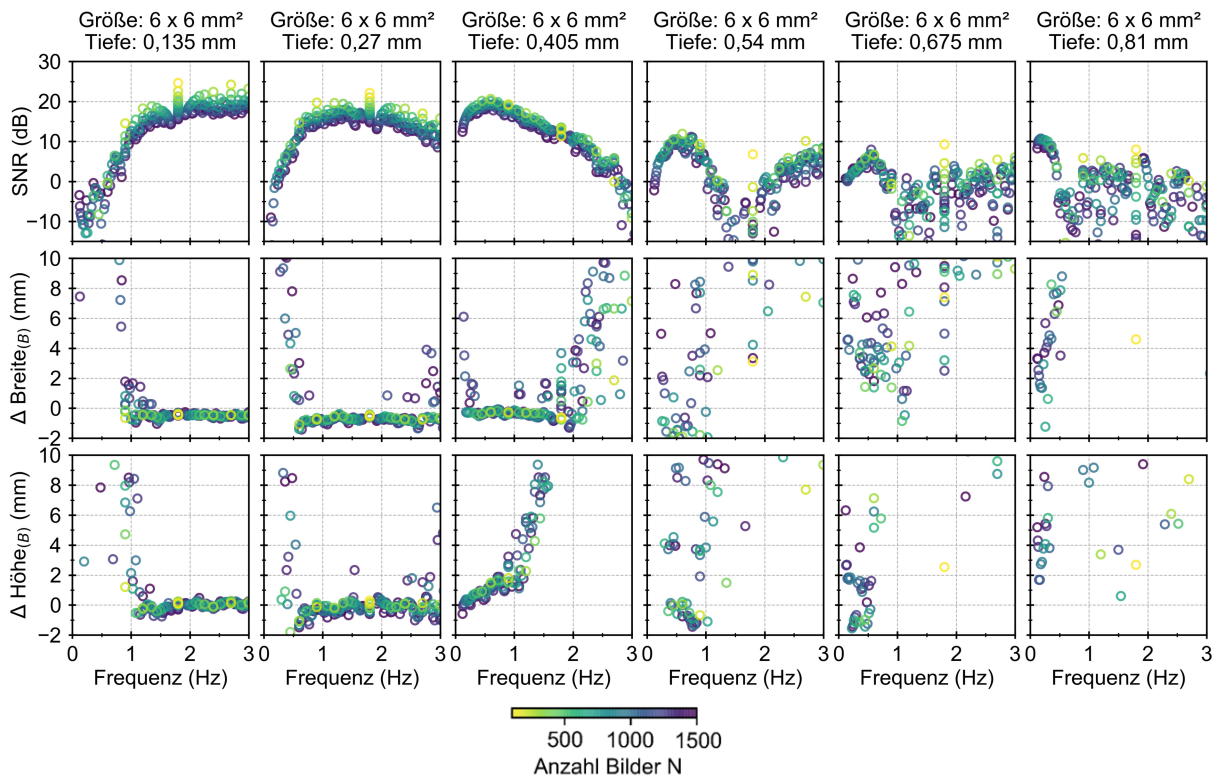


Abb. A.72: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  (UD-Probe).

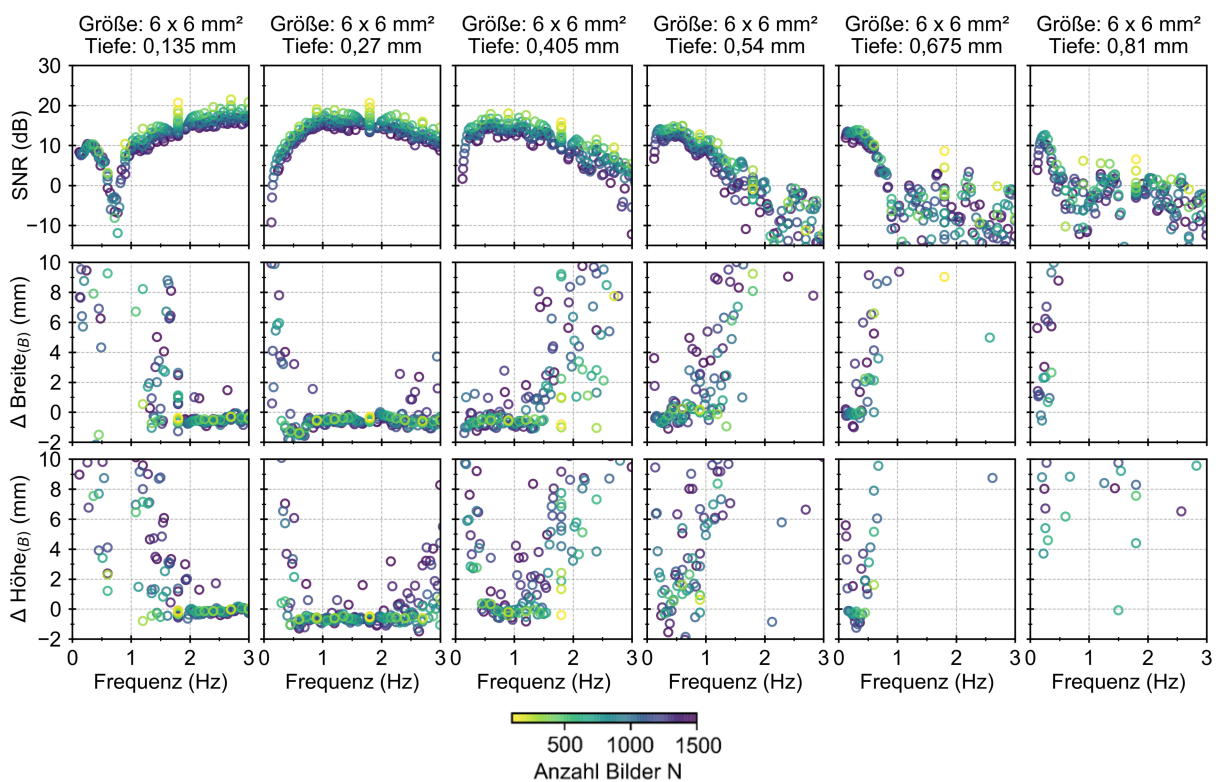


Abb. A.73: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  (MD-Probe).



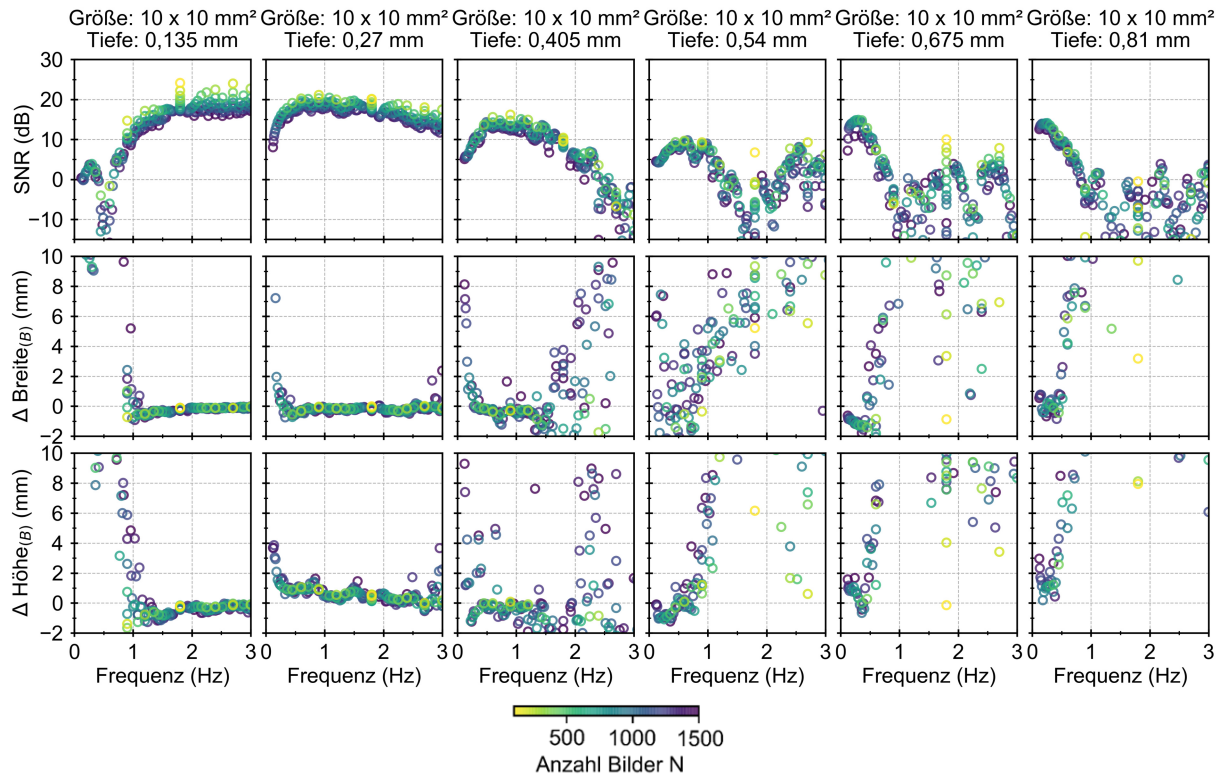


Abb. A.74: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  (UD-Probe).

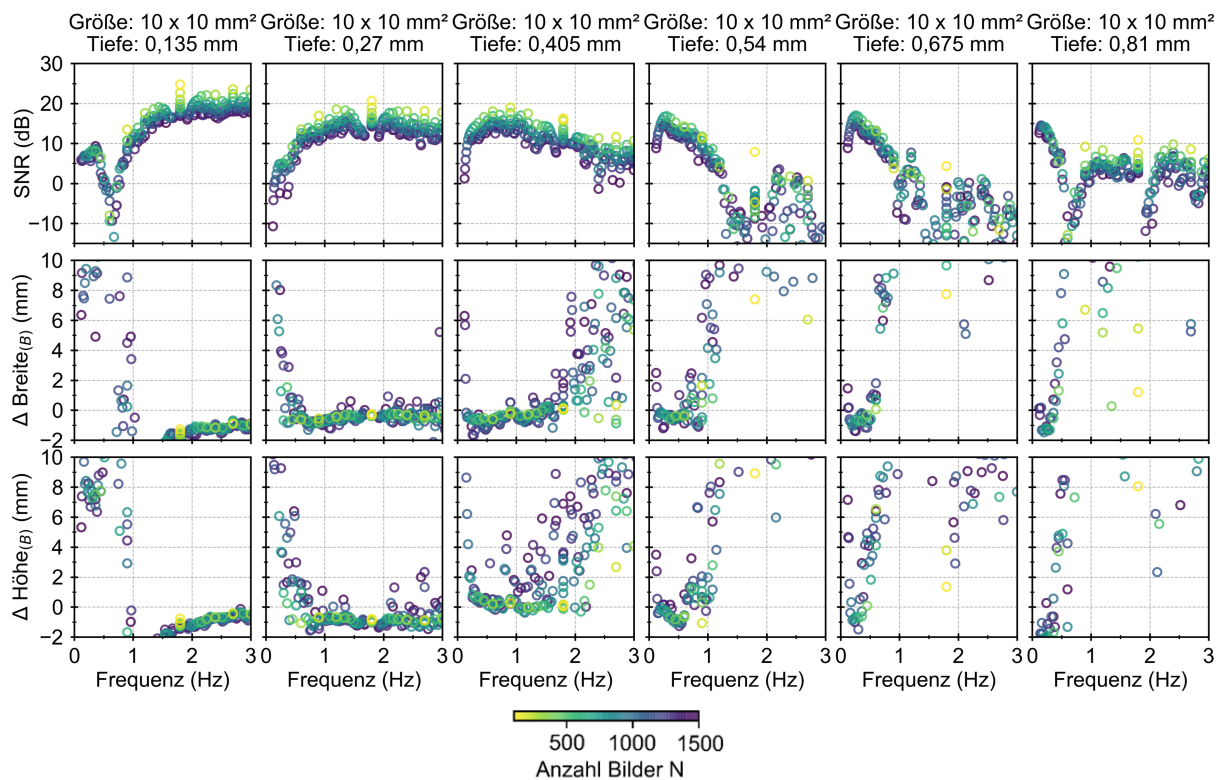


Abb. A.75: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  (MD-Probe).

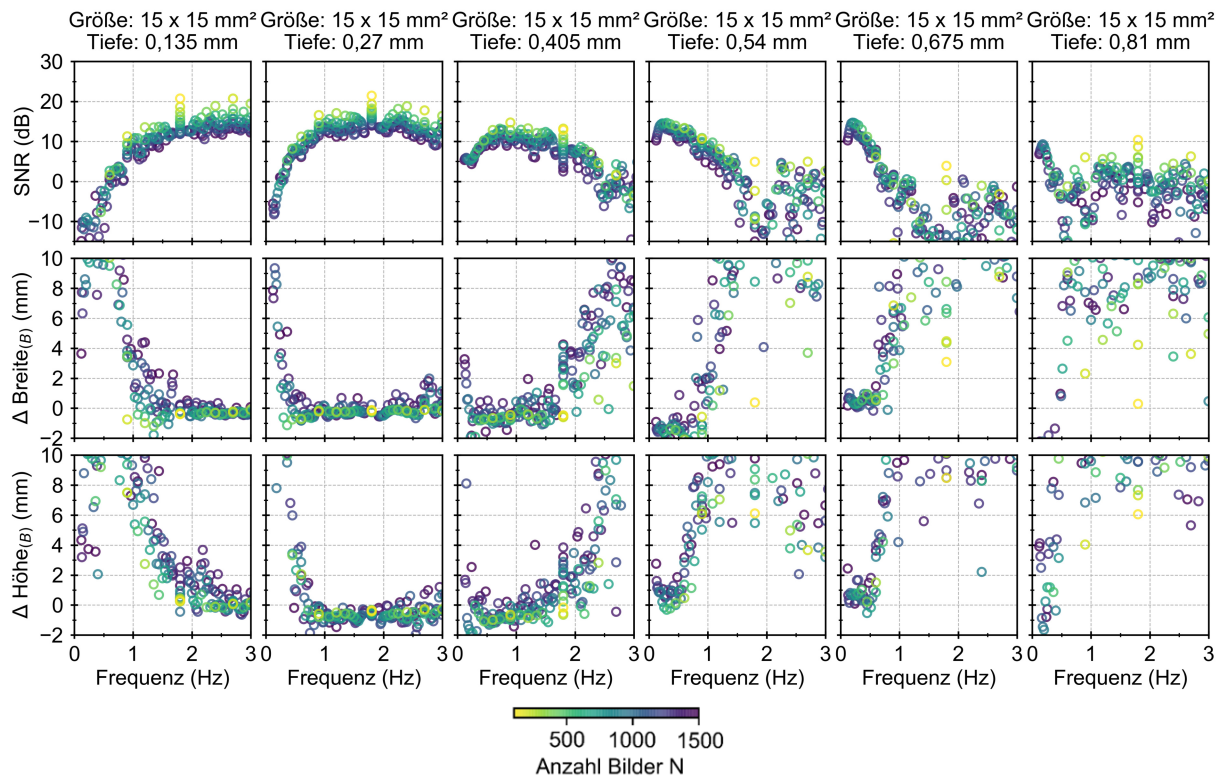


Abb. A.76: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  (UD-Probe).

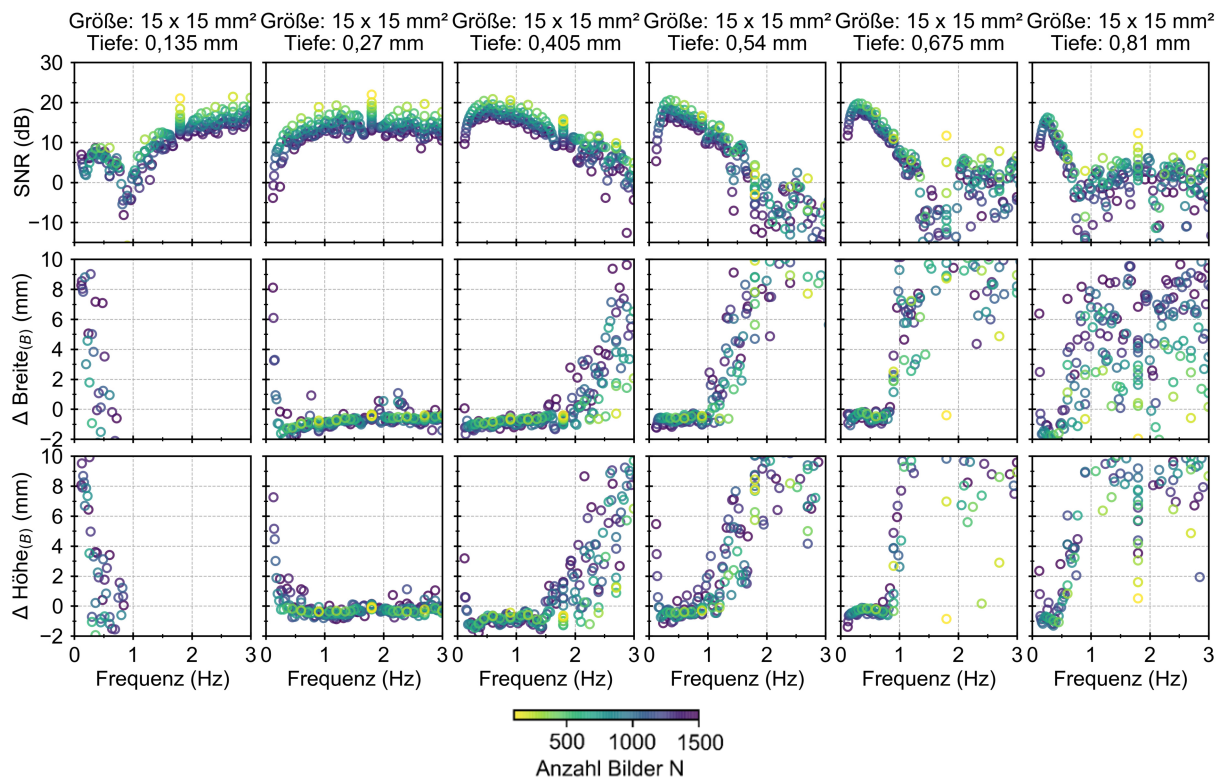


Abb. A.77: SNR und laterale Defektgröße in zwei Richtungen ermittelt an Phasenbildern für einen eckigen Defekt der Größe  $15 \times 15 \text{ mm}^2$  (MD-Probe).

Tab. A.4: Reale Defektgrößen der UD-Probe gemessen am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über drei Messungen.

| Lagenaufbau,<br>Form, Tiefe (mm) |       | Mittelwert (mm)<br>für Größe 6 mm | Mittelwert (mm)<br>für Größe 10 mm | Mittelwert (mm)<br>für Größe 15 mm |
|----------------------------------|-------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| rond                             | 0,135 | 6,26 ± 0,02                       | 10,49 ± 0,04                       | 15,54 ± 0,10                       |
|                                  | 0,270 | 6,19 ± 0,08                       | 10,35 ± 0,08                       | 15,34 ± 0,05                       |
|                                  | 0,405 | 6,22 ± 0,13                       | 10,46 ± 0,09                       | 15,39 ± 0,06                       |
|                                  | 0,540 | 6,25 ± 0,17                       | 10,25 ± 0,15                       | 15,33 ± 0,03                       |
|                                  | 0,675 | 6,19 ± 0,06                       | 10,44 ± 0,07                       | 15,44 ± 0,08                       |
|                                  | 0,810 | 6,26 ± 0,02                       | 10,40 ± 0,07                       | 15,61 ± 0,07                       |
| eckig Breite                     | 0,135 | 6,13 ± 0,09                       | 10,10 ± 0,05                       | 15,09 ± 0,09                       |
|                                  | 0,270 | 6,25 ± 0,01                       | 10,22 ± 0,11                       | 15,07 ± 0,03                       |
|                                  | 0,405 | 6,01 ± 0,04                       | 10,26 ± 0,03                       | 15,20 ± 0,09                       |
|                                  | 0,540 | 6,15 ± 0,03                       | 10,40 ± 0,03                       | 15,37 ± 0,01                       |
|                                  | 0,675 | 6,06 ± 0,02                       | 10,55 ± 0,08                       | 15,16 ± 0,05                       |
|                                  | 0,810 | 6,02 ± 0,01                       | 10,30 ± 0,01                       | 15,26 ± 0,10                       |
| eckig Höhe                       | 0,135 | 6,03 ± 0,07                       | 10,33 ± 0,04                       | 15,09 ± 0,05                       |
|                                  | 0,270 | 6,00 ± 0,03                       | 10,33 ± 0,04                       | 15,31 ± 0,06                       |
|                                  | 0,405 | 6,05 ± 0,02                       | 10,23 ± 0,06                       | 15,56 ± 0,02                       |
|                                  | 0,540 | 6,04 ± 0,01                       | 10,29 ± 0,03                       | 15,25 ± 0,03                       |
|                                  | 0,675 | 6,03 ± 0,02                       | 10,06 ± 0,03                       | 15,63 ± 0,08                       |
|                                  | 0,810 | 6,31 ± 0,04                       | 10,32 ± 0,04                       | 15,34 ± 0,03                       |

Tab. A.5: Reale Defektgrößen der MD-Probe gemessen am Röntgenmikroskop Zeiss Versa 520. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert über drei Messungen.

| Lagenaufbau,<br>Form, Tiefe (mm) |       | Mittelwert (mm)<br>für Größe 6 mm | Mittelwert (mm)<br>für Größe 10 mm | Mittelwert (mm)<br>für Größe 15 mm |
|----------------------------------|-------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| rund                             | 0,135 | 6,20 ± 0,01                       | 10,48 ± 0,07                       | 15,52 ± 0,02                       |
|                                  | 0,270 | 6,28 ± 0,11                       | 10,36 ± 0,08                       | 15,49 ± 0,16                       |
|                                  | 0,405 | 6,20 ± 0,05                       | 10,50 ± 0,06                       | 15,47 ± 0,06                       |
|                                  | 0,540 | 6,22 ± 0,09                       | 10,29 ± 0,17                       | 15,29 ± 0,09                       |
|                                  | 0,675 | 6,27 ± 0,02                       | 10,36 ± 0,05                       | 15,50 ± 0,07                       |
|                                  | 0,810 | 6,40 ± 0,20                       | 10,31 ± 0,07                       | 15,53 ± 0,08                       |
| MD<br>eckig Breite               | 0,135 | 6,10 ± 0,06                       | 10,46 ± 0,06                       | 15,38 ± 0,40                       |
|                                  | 0,270 | 5,97 ± 0,06                       | 10,45 ± 0,10                       | 15,17 ± 0,09                       |
|                                  | 0,405 | 6,22 ± 0,08                       | 10,28 ± 0,04                       | 15,28 ± 0,11                       |
|                                  | 0,540 | 5,88 ± 0,03                       | 10,21 ± 0,04                       | 15,29 ± 0,05                       |
|                                  | 0,675 | 5,98 ± 0,05                       | 10,33 ± 0,04                       | 15,20 ± 0,06                       |
|                                  | 0,810 | 6,04 ± 0,01                       | 10,04 ± 0,06                       | 15,26 ± 0,08                       |
| eckig Höhe                       | 0,135 | 5,97 ± 0,09                       | 10,17 ± 0,04                       | 15,36 ± 0,13                       |
|                                  | 0,270 | 6,16 ± 0,03                       | 10,72 ± 0,20                       | 15,39 ± 0,06                       |
|                                  | 0,405 | 5,96 ± 0,01                       | 10,20 ± 0,06                       | 15,32 ± 0,03                       |
|                                  | 0,540 | 6,02 ± 0,06                       | 10,23 ± 0,05                       | 15,44 ± 0,07                       |
|                                  | 0,675 | 6,03 ± 0,01                       | 10,01 ± 0,04                       | 15,32 ± 0,03                       |
|                                  | 0,810 | 6,10 ± 0,06                       | 10,44 ± 0,04                       | 15,14 ± 0,05                       |

Tab. A.6: Optimale Parameter (Anzahl Bilder  $N$ , Frequenz  $f$  in Hz) für Defekte in unterschiedlichen Tiefen für die UD-Probe und die MD-Probe.

| Lagenaufbau,<br>Form, Tiefe (mm) |       | $N; f$<br>für Größe 6 mm | $N; f$<br>für Größe 10 mm | $N; f$<br>für Größe 15 mm |              |
|----------------------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|
| UD                               | rund  | 0,135                    | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz |
|                                  |       | 0,270                    | 100; 1,80 Hz              | 200; 0,90 Hz              | 100; 1,80 Hz |
|                                  |       | 0,405                    | 300; 0,60 Hz              | 200; 0,90 Hz              | 200; 0,90 Hz |
|                                  |       | 0,540                    | 300; 0,60 Hz              | 1100; 0,65 Hz             | 600; 0,30 Hz |
|                                  |       | 0,675                    | 100; 3,60 Hz              | 600; 0,30 Hz              | 900; 0,20 Hz |
|                                  |       | 0,810                    | 1000; 0,18 Hz             | 700; 0,26 Hz              | 100; 1,80 Hz |
|                                  | eckig | 0,135                    | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz |
|                                  |       | 0,270                    | 100; 1,80 Hz              | 100; 1,80 Hz              | 100; 1,80 Hz |
|                                  |       | 0,405                    | 200; 0,90 Hz              | 300; 0,60 Hz              | 300; 0,60 Hz |
|                                  |       | 0,540                    | 400; 0,45 Hz              | 400; 0,45 Hz              | 600; 0,30 Hz |
|                                  |       | 0,675                    | 700; 0,26 Hz              | 600; 0,30 Hz              | 400; 0,45 Hz |
|                                  |       | 0,810                    | 800; 0,22 Hz              | 100; 1,80 Hz              | 100; 1,80 Hz |
| MD                               | rund  | 0,135                    | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz |
|                                  |       | 0,270                    | 100; 1,80 Hz              | 100; 1,80 Hz              | 100; 1,80 Hz |
|                                  |       | 0,405                    | 200; 0,90 Hz              | 200; 0,90 Hz              | 300; 0,60 Hz |
|                                  |       | 0,540                    | 300; 0,60 Hz              | 600; 0,30 Hz              | 500; 0,36 Hz |
|                                  |       | 0,675                    | 600; 0,30 Hz              | 700; 0,26 Hz              | 600; 0,30 Hz |
|                                  |       | 0,810                    | 700; 0,26 Hz              | 1200; 0,15 Hz             | 700; 0,26 Hz |
|                                  | eckig | 0,135                    | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz              | 100; 3,60 Hz |
|                                  |       | 0,270                    | 100; 1,80 Hz              | 200; 0,90 Hz              | 200; 1,80 Hz |
|                                  |       | 0,405                    | 300; 0,60 Hz              | 300; 0,60 Hz              | 200; 0,90 Hz |
|                                  |       | 0,540                    | 400; 0,45 Hz              | 400; 0,45 Hz              | 400; 0,45 Hz |
|                                  |       | 0,675                    | 500; 0,36 Hz              | 400; 0,45 Hz              | 400; 0,45 Hz |
|                                  |       | 0,810                    | 600; 0,30 Hz              | 500; 0,36 Hz              | 800; 0,22 Hz |

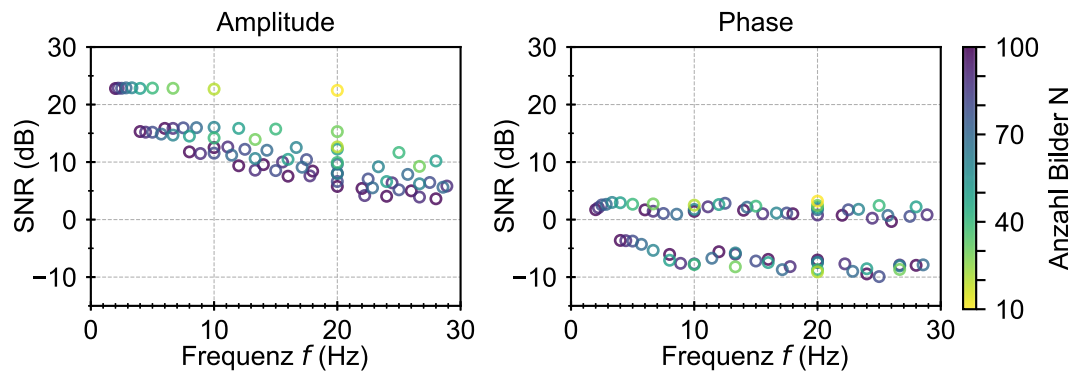


Abb. A.78: SNR eines oberflächennahen Zwischenfaserbruchs in den Amplituden- bzw. Phasenbildern in Abhängigkeit von der Anzahl der Bilder  $N$  im Bereich von 10 bis 100 Bildern und der Frequenz  $f$  im Bereich von 0 bis 30 Hz.

Tab. A.7: Gemessene Schädigungsenergien im Rahmen der Fallturmversuche. Ermittelt anhand der Geschwindigkeiten unmittelbar vor dem Einschlag.

| Charge | Zielgröße 5 J | Zielgröße 7 J | Zielgröße 10 J |
|--------|---------------|---------------|----------------|
| (A)    | 5,05 J        | 7,01 J        | 9,48 J         |
| (B)    | 5,33 J        | 7,01 J        | 9,76 J         |
| (C)    | 4,98 J        | 6,93 J        | 9,67 J         |

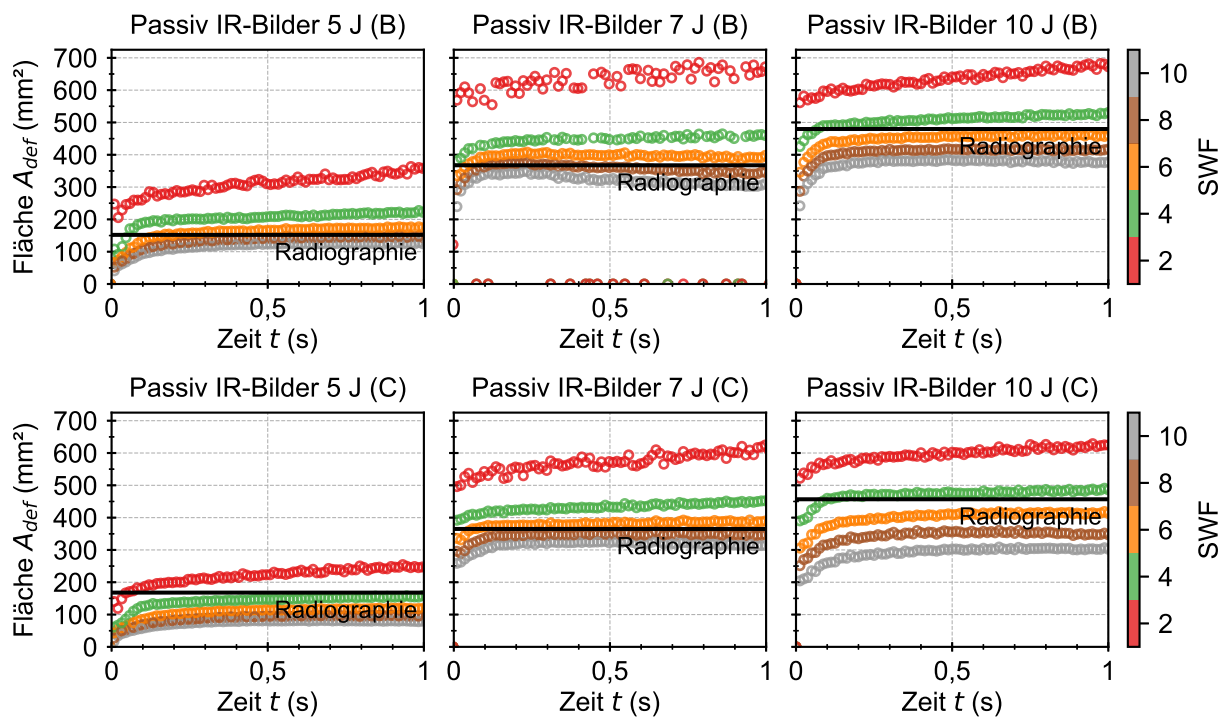


Abb. A.79: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).

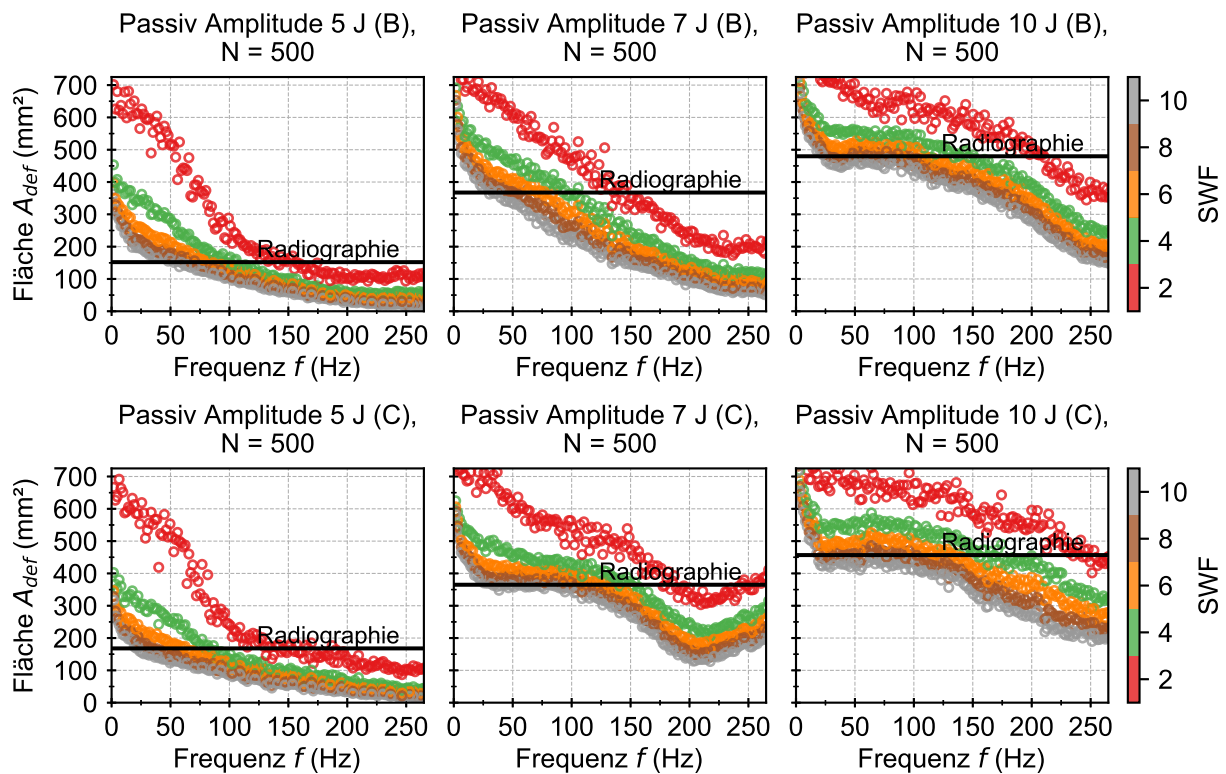


Abb. A.80: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).

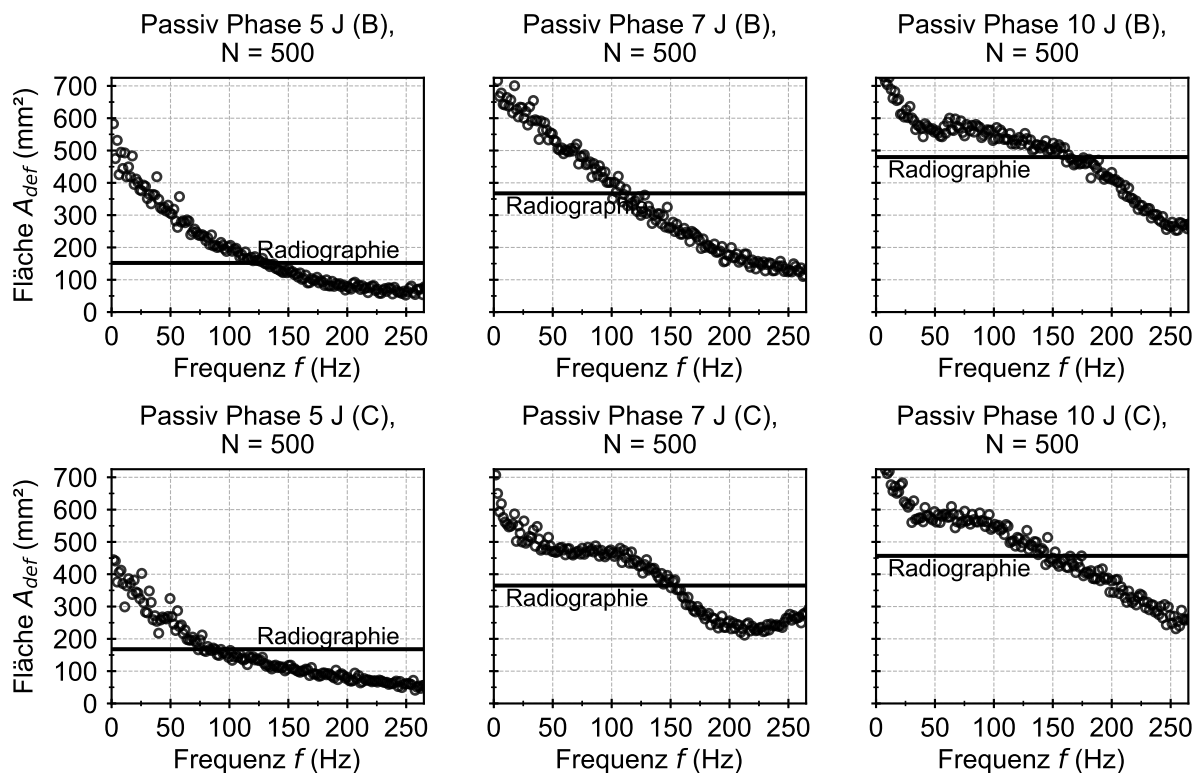


Abb. A.81: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der passiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).



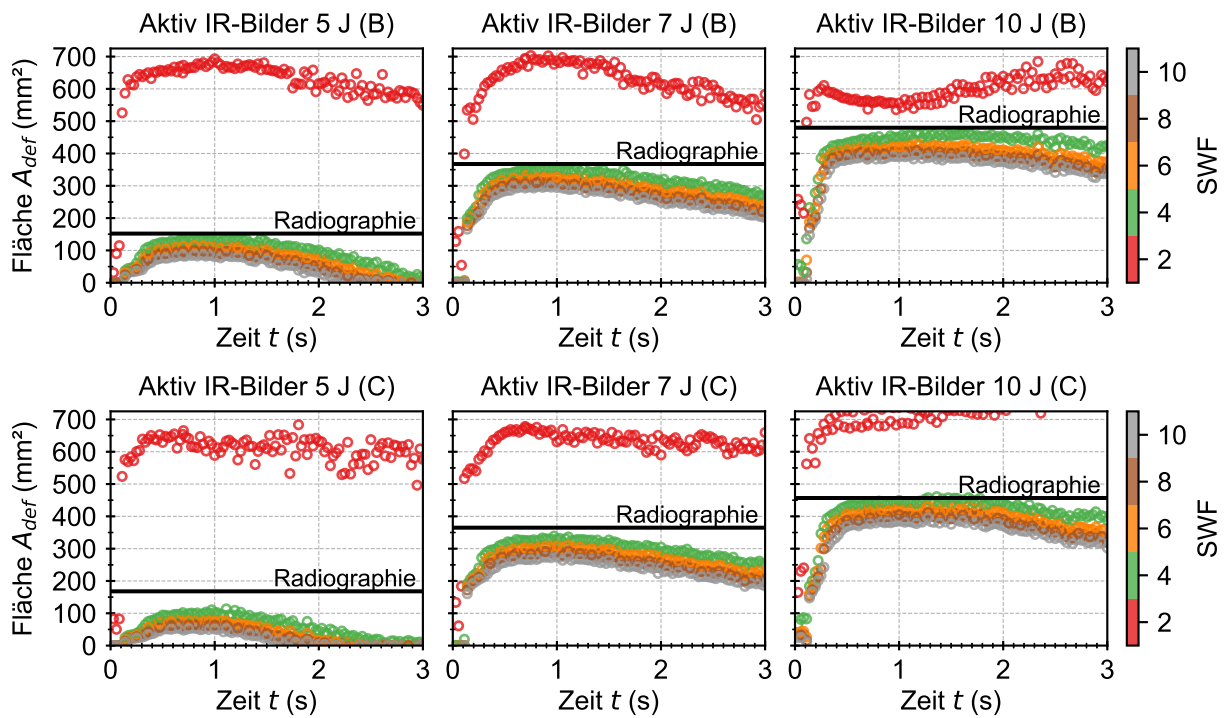


Abb. A.82: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der IR-Bilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).

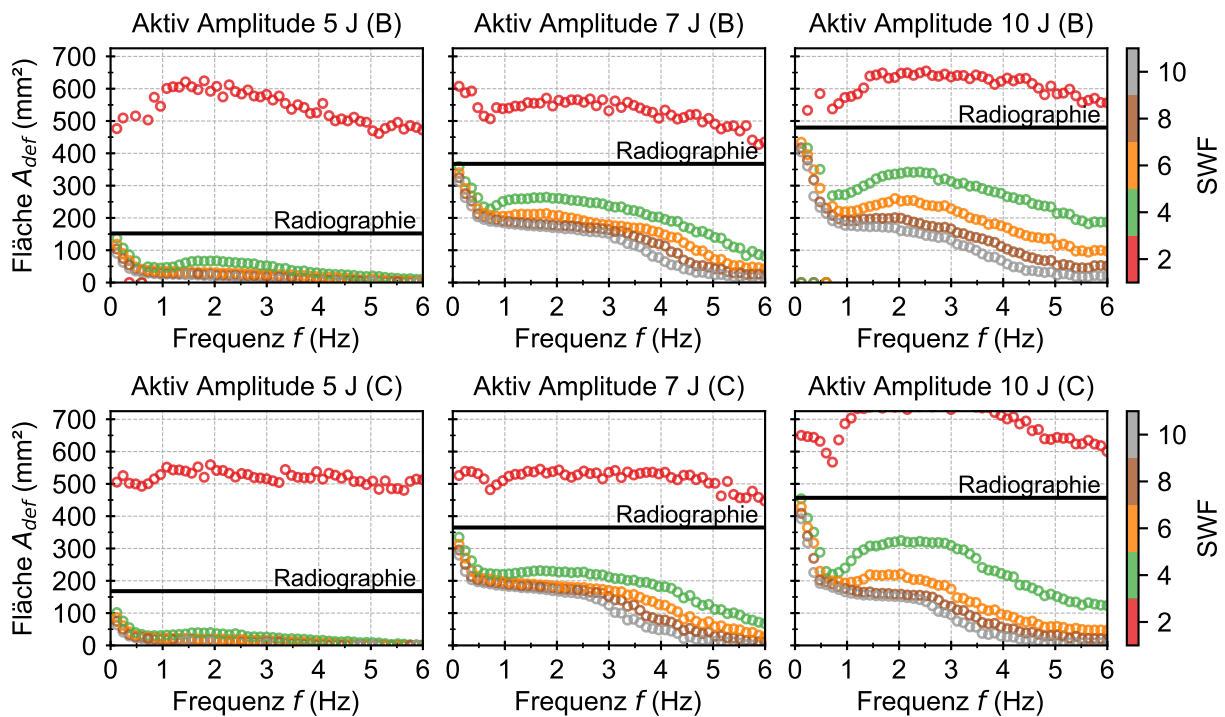


Abb. A.83: Lateral ortsaufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Amplitudenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).

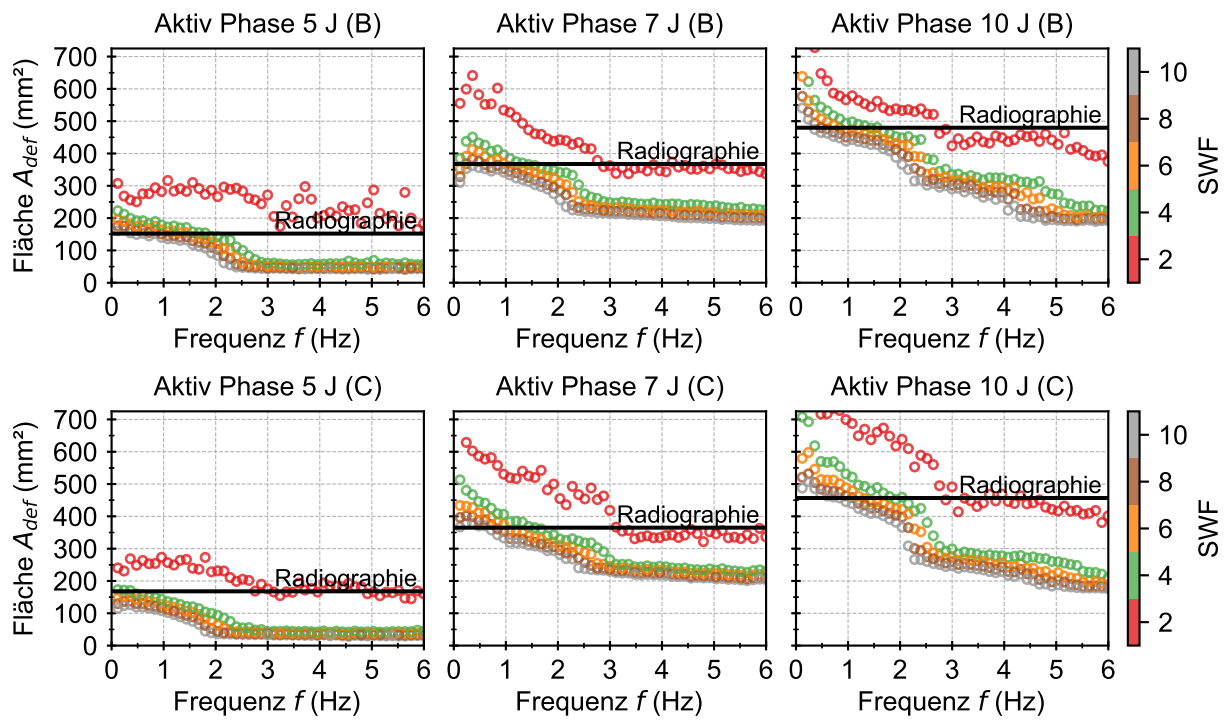


Abb. A.84: Lateral orts aufgelöste Quantifizierung der Schädigungsfläche  $A_{def}$  anhand der Phasenbilder der aktiven Thermografie für die Proben 5 J, 7 J und 10 J aus den Chargen (B) und (C).

## Publikationen und Konferenzbeiträge

1. Popow, V., Budesheim, L., Gurka, M.: *Zerstörungsfreie Prüfung von faserverstärkten Kunststoffen mittels Impuls-Thermographie – Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener Auswertelgorithmen*. Thermographie-Kolloquium 2017 (DGZfP IRT-2017), Berlin, 28.-29. September 2017
2. Popow, V., Gurka, M.: Determination of depth and size of defects in carbon-fiber-reinforced plastic with different methods of pulse thermography. *Nondestructive Characterization and Monitoring of Advanced Materials, Aerospace, Civil Infrastructure, and Transportation XII; International Society for Optics and Photonics*, 10599:105990, März 2018
3. Popow, V., Budesheim, L., Gurka, M.: Comparison and evaluation of different processing algorithms for the nondestructive testing of fiber-reinforced plastics with pulse thermography. *Materials Testing*, 60(6):607-613, Juni 2018
4. Popow, V., Kelkel, B., Gurka, M.: *Passive impulse thermography during quasi-static tensile tests of fiber reinforced composites*, 12<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT-2018), Gothenburg, Sweden, 11.-15. Juni 2018
5. Kelkel, B., Popow, V., Gurka, M.: *Combining acoustic emission with passive thermography to characterize damage progression in cross-ply CFRP laminates during quasi-static tensile loading*, 12<sup>th</sup> European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT-2018), Gothenburg, Sweden, 11.-15. Juni 2018
6. Popow, V., Gurka, M.: Possibilities and limitations of active thermography methods for investigation of composite materials using NDT simulations. *SPIE 10973, Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0*, 109730K, März 2019
7. Popow, V., Gurka, M., Müller, J.: *Korrelation zerstörungsfreier Thermografieprüfung und zerstörender Bauteilprüfung mit dem realen Schädigungsbild von komplexen FKV-Metall-Hybridbauteilen*. DGZfP Jahrestagung 2019 (DGZfP-2019), Friedrichshafen, 27.-29. Mai 2019
8. Popow, V., Gurka, M.: *Passive thermography for detection of damaging events during quasi-static tensile testing*, 22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde (DGM-2019), Kaiserslautern, 26.-28. Juni 2019
9. Popow, V., Gurka, M.: *Passive thermography for detection of damaging events during quasi-static tensile testing*, *Key Engineering Materials*, 809:581-586, Juni 2019

10. Kelkel, B., Popow, V., Gurka, M.: Inline quantification and localization of transverse matrix cracking in cross-ply CFRP during quasi-static tensile testing by a joint event-based evaluation of acoustic emission and passive IR thermography. *Composites Science and Technology*, 190:108013, April 2020
11. Popow, V., Gurka, M.: Full factorial analysis of the accuracy of automated quantification of hidden defects in an anisotropic carbon fibre reinforced composite shell using pulse phase thermography. *NDT & E International*, 116:102359, Dezember 2020

## Betreute studentische Arbeiten

1. Kaub, Christopher: *Nachbildung realitätsnaher Fehler in kohlenstofffaser-verstärkten Kunststoffen*, Studienarbeit, IVW Bericht 17-020, 05/2017
2. Budesheim, Lars: *Aufbau einer modularen Messumgebung zur zerstörungsfreien Prüfung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mittels Impuls-Thermographie - Gegenüberstellung und Bewertung gängiger Auswertalgorithmen*, Masterarbeit, IVW Bericht 17-042, 08/2017
3. Schitz, Robert: *Aufbau einer Messumgebung zur Prüfung induktions- und laser-geschweißter Bauteile mittels Lock-In Thermografie*, Studienarbeit, IVW Bericht 17-075, 02/2018
4. Schellenberger, Dominik: *Einfluss verschiedener Füllstoffe auf das thermische Verhalten polymerer Verbundwerkstoffe*, Projektarbeit, IVW Bericht 19-008, 02/2019
5. Müller, Joshua: *Korrelation der zerstörungsfreien Prüfung mittels Thermografie und der realen Schädigungsfläche mit den mechanischen Kennwerten der Bauteilprüfung von induktions- und lasergefügten Hybridbauteilen*, Masterarbeit, IVW Bericht 19-017, 04/2019

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

---

|              |               |
|--------------|---------------|
| Name         | Vitalij Popow |
| Geburtsort   | Serenda       |
| Nationalität | deutsch       |

### Berufliche Praxis

---

|                   |  |
|-------------------|--|
| 09/2015 – aktuell | Leibniz-Institut für Verbundwerkstoffe GmbH,<br>Wissenschaftlicher Mitarbeiter   |
| 02/2013 – 08/2013 | Audi Vertriebsbetreuungsgesellschaft mbH,<br>Praktikum   |
| 08/2012 – 11/2012 | ThyssenKrupp AG,<br>Praktikum  |
| 10/2011 – 02/2013 | Technische Universität Kaiserslautern<br>Lehrstuhl für Maschinenelemente & Getriebetechnik<br>Wissenschaftliche Hilfskraft |
| 07/2008 – 09/2009 | Wehrdienst   |

### Bildungsweg

---

|                   |  |
|-------------------|--|
| 10/2013 – 06/2015 | Technische Universität Kaiserslautern<br>Studium der Wirtschaftswissenschaften<br>Fachrichtung Maschinenbau<br>Master of Science   |
| 10/2009 – 03/2014 | Technische Universität Kaiserslautern<br>Studium der Wirtschaftswissenschaften<br>Fachrichtung Maschinenbau<br>Bachelor of Science |
| 07/2005 – 06/2008 | Berufliches Oberstufengymnasium<br>Willi-Graf Schule, St. Ingbert  |
| 07/1999 – 06/2005 | Erweiterte Realschule<br>Schmelzerwaldschule, St. Ingbert  |
| 07/1996 – 06/1999 | Wiesentalschule, St. Ingbert   |