

# **Nichtlinearer Ultraschall zur Charakterisierung von Ermüdungsschäden während der Hochfrequenz-Beanspruchung von C-Faser- Kunststoffverbunden**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades des  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

vorgelegt von

**Dipl.-Ing. Thomas Benedikt Helfen**

angefertigt an der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III  
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften  
der Universität des Saarlandes.



Saarbrücken

2014

---

Tag des Kolloquiums: 07.11.2014

Dekan: Prof. Dr. Dirk Bähre

Berichtersteller: Priv. Doz. Dr.-Ing. Ute Rabe  
Prof. Dr. C. Motz

Vorsitz: Prof. Dr. W. Possart

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. J. Schmitt

## Kurzfassung

Die Auslegung von Bauteilen aus carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erfolgt immer noch konservativ mit einem hohen Sicherheitsfaktor, da bis heute das Wissen bezüglich des Ermüdungsverhaltens solcher Materialien unvollständig ist. In dieser Arbeit wird das Hochfrequenzermüdungsverhalten eines kommerziell erhältlichen CFK überwacht und analysiert. In einem 3-Punkt-Biegeversuch wurden die Proben mit einer Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20,26$  kHz bei einem Projektpartner ermüdet. Die Schwingungsanregung bei der Beanspruchungsfrequenz wird simultan zur zerstörungsfreien Ultraschall-Überwachung des Ermüdungsprozesses verwendet (Online-Charakterisierung). Die gemessenen Ultraschallzeitsignale werden mit den spektralen Analyseverfahren Fourier-, Kurzzeit-Fourier- und Hilbert-Huang-Transformation ausgewertet und analysiert.

Im Ausgangszustand sowie nach der Beanspruchung erfolgt eine zerstörungsfreie Materialcharakterisierung (Offline-Charakterisierung). Oberflächennahe Fehler werden mittels optischer Mikroskopie untersucht. Zur inneren Fehlerlokalisierung im mm-Bereich findet die Ultraschallfehlerprüfung Verwendung. Zur Detektion von Rissen im  $\mu\text{m}$ -Bereich wird die Röntgencomputertomografie eingesetzt. Die Korrelation der Ergebnisse liefert Hinweise zu Art und Zeitpunkt der Entstehung von Ermüdungsschäden. Ein wahrscheinlicher Schadensablauf bei der Ermüdung lässt sich mit Hilfe der Online-Signale und der Offline-Prüfung rekonstruieren.

## Abstract

Carbon fibre reinforced plastics (CFRP) are still applied conservatively, with a high safety factor, due to the limited knowledge regarding their fatigue behaviour. In this work, the very high cycle fatigue behaviour of a commercially available CFRP is experimentally studied and analysed. The samples were fatigued by a project partner using 3-point bending test machine with a loading frequency of  $f = 20,26$  kHz. The vibration at the loading frequency is used simultaneously for non-destructive ultrasonic monitoring of the fatigue process (Online-Characterisation). The recorded ultrasonic time signals are analysed and evaluated by Fast-Fourier, Short-Time Fourier and Hilbert-Huang transform.

At the initial state and after loading, the samples are characterized using non-destructive testing techniques (Offline-Characterisation). Defects at the surface are examined by optical microscopy. Ultrasonic testing is used for the localisation of defects in the sample volume in the millimetre range. In order to detect cracks in the micrometre range, X-ray computed tomography is used. The correlation of the results provides evidence of the type and of the chronologz of the appearance of fatigue defects during the mechanical loading. A likely damage process is proposed on the basis of the online-signals and the offline testing results.

## Résumé

Actuellement, les composites renforcés par des fibres de carbone (CRFC) sont encore utilisés avec un haut facteur de sécurité en raison du niveau de connaissance limité de leur comportement en fatigue. Dans le travail présenté ici, le comportement en fatigue à haute fréquence d'un composite CRFC commercial est contrôlé et analysé. Les échantillons sont soumis à une flexion 3-points avec une fréquence de sollicitation de  $f = 20,26$  kHz. La fréquence de sollicitation est utilisée simultanément comme fréquence des ultrasons pour l'analyse non destructive effectuée lors de l'expérience de fatigue (caractérisation online). Le signal détecté est analysé en utilisant les méthodes de traitements des signaux de la transformée de Fourier, de la transformée de Fourier à court terme et de la transformée de Hilbert-Huang.

Avant et après le test de fatigue, les échantillons sont caractérisés par des méthodes non destructrices (caractérisation offline). Les défauts proches de la surface sont analysés par un microscope optique. Des ultrasons sont utilisés afin de localiser les défauts internes dans le domaine du millimètre. Afin de permettre la détection de défauts de l'ordre de grandeur du micromètre, la tomographie informatique par rayons X est employée. La corrélation des résultats permet de fournir des principes concernant le type et l'apparition des défauts. Les caractérisations online et offline permettent de poser des hypothèses sur le déroulement de l'apparition des dommages lors de l'expérience de fatigue.

## Danksagung

In meiner Danksagung wird es mir nun kaum möglich sein, alle namentlich zu nennen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Aber eins kann ich versichern, ohne Eure vielseitige Unterstützung wäre die Arbeit nicht so geworden, wie sie nun vor Euch liegt.

Frau Priv. Doz. Dr.-Ing. Ute Rabe, Ihnen möchte ich meinen besonderen Dank aussprechen. Für die anregenden Diskussionen, die stets engagierte Unterstützung sowie für die jederzeit mögliche Erreichbarkeit bin ich Ihnen in hohem Maße dankbar und ich hätte mir keine bessere Doktormutter wünschen können.

Für die Übernahme des Zweitgutachtens möchte ich Herrn Prof. Dr. Christian Motz meinen Dank aussprechen.

Während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IZFP erfuhr ich große Unterstützung durch Frau Dr. rer. nat. Sigrun Hirsekorn. Aufgrund der vielen durchgeführten Fachdiskussionen mit Ihnen konnte ich mein Wissen ausbauen und danke Ihnen für Ihr Engagement.

Im Hinblick auf meine Zeit am Fraunhofer IZFP möchte ich mich auch bei allen Mitarbeitern, insbesondere aus der Abteilung "Grundlagen der ZfP" bedanken. Die mir entgegengebrachte Hilfsbereitschaft in wissenschaftlichen und technischen Fragen, die gute Zusammenarbeit und nicht zuletzt das hervorragende Arbeitsklima lassen mich gerne an diese Zeit zurückdenken.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Projektpartnern vom Lehrstuhl für Werkstoffkunde von der Technischen Universität Kaiserslautern bedanken.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern, die mich in allen Fragen meines Lebens unterstützen und mir das Studium ermöglicht haben. Einen besonderen Dank dafür, dass Sie immer das Beste für meinen Bruder und mich tun und alles Erdenkliche bereit sind, dafür zu geben. Meiner gesamten Familie danke ich für die Unterstützung und den Rückhalt.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Freunden für die Unterstützung, womit sie mir stets zur Seite standen und mich aufgemuntert haben.

Zum Abschluss möchte ich der wichtigsten Person in meinem Leben meinen Dank aussprechen, Cécile, für Deine Hilfe, Verständnis, Geduld und Liebe danke ich dir von Herzen.

Thomas Benedikt Helfen

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>V</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>VI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Prüfsysteme zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden .....</b>	<b>4</b>
<b>3 Ermüdungsvorgänge in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden: Überblick und Charakterisierung .....</b>	<b>7</b>
3.1 Herstellung und Aufbau von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen .....	7
3.1.1 Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitril-Fasern .....	8
3.1.2 Eingesetzte Matrixsysteme in CFK-Verbunden.....	8
3.1.3 Lagenaufbau von CFK-Halbzeugen.....	9
3.2 Schädigungsmechanismen in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden.....	12
3.2.1 Schädigungsmechanismen in UD-Gelegen .....	13
3.2.2 Schädigungsmechanismen in 2 D-Geweben .....	17
3.2.3 Einfluss der Faser-Matrix Grenzschicht auf das Ermüdungsverhalten .....	22
3.2.4 Zusammenfassung der Schadensmechanismen in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden .....	26
3.3 Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Fehler- und Materialcharakterisierung von Ermüdungsschäden in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden.....	27
3.3.1 Ultraschallprüfung von CFK Strukturen .....	28
3.3.2 Röntgencomputertomografie.....	29
3.3.3 Resonanzspektroskopie .....	30
3.4 Spektralanalyseverfahren zur Ermittlung von zeitlichen Änderungen in Ultraschallzeitsignalen .....	31
3.4.1 Fourier-Transformation .....	31
3.4.2 Hilbert-Huang-Transformation (HHT) .....	32
<b>4 Experimenteller Aufbau und Realisierung der Hochfrequenz-Ermüdungsuntersuchungen .....</b>	<b>34</b>

---

4.1	Die 3-Punkt-Biege-Ermüdungsanlage.....	34
4.2	Werkstoff für die VHCF-Untersuchungen.....	37
4.2.1	Probenmaterial und struktureller Aufbau.....	37
4.2.2	Charakterisierung des Probenmaterials.....	38
4.2.3	Probenauslegung.....	43
4.3	Ablauf der Ermüdungsuntersuchungen.....	45
4.3.1	Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung im Ausgangszustand.....	45
4.3.2	Erfassung und Auswertung von Ultraschallsignalen während eines Ermüdungsexperiments.....	48
4.3.3	Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung nach der Beanspruchung.....	50
4.3.4	Zusammenfassung und Fazit.....	54
<b>5</b>	<b>Analyse der zeitlichen Schädigungsentwicklung in C-Faser-2D-Geweben im VHCF-Bereich.....</b>	<b>56</b>
5.1	Ergebnisse der zerstörungsfreien Offline-Untersuchungen von drei beanspruchten CF-PPS-Proben.....	56
5.2	Ergebnisse der Online-Überwachung von drei ausgesuchten CF-PPS-Proben.....	60
5.3	Zusammenfassung zur Analyse der Ultraschallzeitsignale.....	82
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>84</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>96</b>
7.1	Nomenklatur der Proben.....	96
7.2	Zusammenstellung der Probendaten.....	96
7.3	Berechnung der Zyklenzahl.....	99
7.4	Berechnung der Amplitudenenergie.....	99
7.5	Offline Charakterisierung - Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik.....	99
7.6	Klirrfaktorverläufe als Funktion der Beanspruchungszyklen.....	110

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1.	Schematischer Faseraufbau von Kohlenstofffasern; a) regellose, b) unidirektionale Kurzfasern und c) unidirektionale Endlosfasern.....	9
Abbildung 3-2.	Schematischer Aufbau a) eines 2D-Gewebes mit Körper-2/2-Struktur und Carbonfasern in $0^\circ$ sowie $90^\circ$ Richtung, b) einer Elementarzelle eines orthogonalen 3D-Gewebes.....	10
Abbildung 3-3.	Schematischer Aufbau einer 2D Gewebeeinheitszelle mit einer Schichtdicke $h$ [mm], einer Rovinghöhe $h_a$ [mm], einer Rovingbreite $a$ [mm] und einer Maschenöffnung $M$ [mm].....	10
Abbildung 3-4.	Schematischer Aufbau eines 2D Gewebes mit der Probenlänge $L$ [mm] und einer Rovinglänge $L_R$ [mm] .....	11
Abbildung 3-5.	Schematische Darstellung der Stapelanordnungen eines Gewebes a) fluchtend (ohne Versatz) b) geschachtelt (mit Versatz).....	11
Abbildung 3-6.	Schematischer Aufbau von 2D-Geweben mit a) Leinwand-, b) Körper- und c) Atlasbindung; grau = Kettfäden, schwarz = Schussfäden.....	12
Abbildung 3-7.	Schematische Darstellung einer Lage eines $0^\circ$ unidirektionalen Laminates $[0]$ .....	13
Abbildung 3-8.	Schematische Darstellung eines dreilagigen multiaxialen UD-Laminates $[0,90,0]$ .....	13
Abbildung 3-9.	Schematische Darstellung eines transversalen Risses (rot) in einem multiaxialen Laminat $[0, 0, 90, 90]_s$ verursacht durch Zugbeanspruchung .....	14
Abbildung 3-10.	Schematische Darstellung von a) sekundären Rissen verursacht durch transversale Risse in der Nähe einer tragenden Faser, b) Verlauf der Schadensentwicklung von sekundären Rissen nach [Soutis, 00] in einem multiaxialen Laminat $[0, 0, 90, 90]_s$ .....	15
Abbildung 3-11.	Schematische Darstellung von (1) primären (transversalen) , (2) sekundären sowie (3) tertiären (interlaminaren) Rissen in einem multiaxialen Laminat $[0, 0, 90, 90]_s$ .....	16
Abbildung 3-12.	Schematische Darstellung der Schadensentwicklung in einem $[0/90/0/90/0]$ UD-Gelege unter niederfrequenter (ca. 5 Hz) zyklischer Zugschwellbeanspruchung .....	17
Abbildung 3-13.	Schematische Darstellung eines interlaminaren Risses in einer polymerreichen Zone verursacht durch eine Pore unter Zugbeanspruchung am Beispiel eines Leinwandgewebes .....	18
Abbildung 3-14.	Schematische Darstellung der Schadensentwicklung von CFK-Leinwandgeweben unter quasi-statischer-Zugbeanspruchung, a) Ausgangszustand, b) und c) während der Beanspruchung, nach [Naik, 03], $\theta$ entspricht dem Ondulationsgrad vor und $\theta'$ nach der Beanspruchung, $h'$ der Schichtdicke und $a'$ der Rovingbreite nach der Beanspruchung .....	19
Abbildung 3-15.	Schematische Darstellung von intralaminaren Rissen verursacht durch dynamische Zugschwell Beanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe.....	20

Abbildung 3-16. Schematische Darstellung von intralaminaren Rissen und Meta-Delaminationen verursacht durch dynamische Zugschwellbeanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe .....	21
Abbildung 3-17. Schematische Darstellung der Entstehung eines interlaminaren Risses (grün) aufgrund der Verbindung zweier Meta-Delaminationen benachbarter Gewebeneinheitenzellen verursacht durch dynamische Zugschwellbeanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe .....	21
Abbildung 3-18. Schematische Darstellung einer flächigen Delamination verursacht durch die Kopplung von intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen .....	22
Abbildung 3-19. Schematische Darstellung von Faser-Matrix-Ablösungen a) Adhäsionsbruch, b) Grenzschichtbruch und c) Kohäsionsbruch .....	23
Abbildung 3-20. Schematische Darstellung der Rissöffnungszone an der Grenzfläche Faser- Matrix unter Zug- und Druckbeanspruchung nach [Gamstedt, 99] ..	26
Abbildung 3-21. Schematischer Aufbau einer a) Impuls-Echo-Messung sowie b) Transmissionsmessung .....	28
Abbildung 3-22. Schematischer Aufbau einer Röntgencomputertomografiemessung mit Strahlenquelle, drehendem Manipulator, Prüfobjekt sowie Flächendetektor .....	29
Abbildung 3-23. Allgemeiner schematischer Messaufbau der akustischen Resonanzanalyse: Die Probe (6) ist in zwei Punkten gelagert (Loslager) (7) und wird mit einem Impulsgeber (8) mechanisch, durch einen einzelnen Schlag angeregt. Die resultierende Schwingung wird vom Signalaufnehmer / Mikrofon (5) erfasst und nach anschließender Signalverstärkung (3) mit Hilfe eines Computers analysiert (4). Die gemessene Frequenz wird auf der Anzeige (1) dargestellt. Die Auswertung erfolgt mittels geeigneter Software (2), in Anlehnung an DIN EN ISO 12680-1:2007 .....	30
Abbildung 3-24. a) Prinzip der Zeitfensterzerlegung eines nicht stationären Zeitsignals und b) erhaltenem Kurzzeit-Fourier-Spektrum nach [Giurgiutiu, 08] .....	32
Abbildung 3-25. Flussdiagramm mit der Funktionsweise der Hilbert-Huang Transformation .....	33
Abbildung 4-1. a) Neuentwickeltes Prüfsystem für Wechselbiegebeanspruchung in Kombination mit zerstörungsfreier Online-Überwachung zur Bewertung beginnender und fortschreitender Werkstoffermüdung; Standort: Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern; Bild aus [DFG, 13] .....	35
Abbildung 4-2. a) Schematischer Aufbau der 3-Punkt-Biegemaschine mit Thermografie-Kamera zur Temperaturüberwachung, Laservibrometer und Mikrofon zur Online-Überwachung der Oberflächenschwingung und Schallabstrahlung der Probe während eines Beanspruchungszyklus; b) schematisch gezeichnete Ultraschallpulse (schwarz) bei einer Pulsdauer von 100 ms und einem Puls-Pause-Verhältnis von 1:20, resultierende maximale Probenerwärmung während eines Ultraschallpulses (rot) .....	36
Abbildung 4-3. Optische Bilder einer CF-PPS Probe a) an der Oberfläche und b) an der Stirnfläche, Herstellerbezeichnung: Tepex ® dynalite 207-C22/50% (Bond Laminates GmbH), Matrix: Polyphenylensulfid PPS (Thermoplast), orthotroper Lagenaufbau, 2D-Gewebe Köper-(2/2)-	

	Struktur, Dichte $\rho = 1,54 \text{ g/cm}^3$ , Dicke $d = 4 \text{ mm}$ , Oberflächengewicht $200 \text{ g/cm}^3$ .....	38
Abbildung 4-4.	a) Elastizitätstensor in Matrixschreibweise für eine orthotrope Materialsymmetrie b) CF-PPS Probe mit Koordinatensystem .....	39
Abbildung 4-5.	a) CF-PPS Probe mit Koordinatensystem und US-Prüfkopf b) Gemessene Transversale Laufzeitgeschwindigkeiten durch 360 - Drehung eines Prüfkopfs entlang der 3-Richtung .....	40
Abbildung 4-6.	a) Schematischer Aufbau zur Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten mit Hilfe der Resonanzspektroskopie; b) Frequenzspektrum einer CF-PPS Probe mit den Maßen $180 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , die Längsachse der Probe ist in Faserrichtung orientiert. ....	41
Abbildung 4-7.	Optische Aufnahme einer CF-PPS-Probe für die Hochfrequenzermüdungsuntersuchung mit einer ausgelegten Geometrie von $L = 33,5 \text{ mm}$ , $b = 15 \text{ mm}$ , $d = 4 \text{ mm}$ mit einer Resonanzfrequenz des 1. transversalen Biegemode bei $f = 20,26 \text{ kHz}$ .....	44
Abbildung 4-8.	a) Validierung der Probenauslegung mittels 3D-Laservibrometrie. Überzeichnete Probenauslenkung in y-Richtung, Messung durch den Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern [DFG, 13]. ....	44
Abbildung 4-9.	a) Optische Aufnahme einer CF-PPS-Probe im Ausgangszustand mit einer Länge $L = 33,5 \text{ mm}$ , Breite $b = 15 \text{ mm}$ und einer Dicke $d = 4,06 \text{ mm}$ ; b) Schematische Skizze der Perspektive des Ultraschall-B-Bilds und Ultraschall C-Bilds; c) Ultraschall B-Bild sowie d) Ultraschall C-Bild der CF-PPS-Probe mit der Seriennummer 1-1-1-32 im Ausgangszustand (Probe 1).....	46
Abbildung 4-10.	a) Computertomografie (CT) Bild in der 1-3 Ebene (vgl. Abbildung 4-4) und b) 1-2 Ebene (vgl. Abbildung 4-4) ungefähr in der Probenmitte; c) Frequenzspektrum des 1. transversalen Biegemodes der resonanzspektroskopischen Untersuchung der CF-PPS-Probe mit der Seriennummer: 1-1-1-32 im Ausgangszustand (Probe 1).....	47
Abbildung 4-11.	Ultraschall-Zeitsignal einer CF-PPS-Probe (Seriennummer: 1-1-1-32) während eines Beanspruchungszyklus nach $N = 2 \times 10^7$ Zyklen gemessen mit einem a) Laservibrometer und b) Mikrofon; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = Freies Ausschwingen des Systems [ $>63 \text{ ms}$ ] .....	49
Abbildung 4-12.	a) Verzerrtes Laservibrometer-Zeitsignal einer CF-PPS-Probe aufgrund kleinster Probenverschiebung in den Auflagern während eines Beanspruchungszyklus ( $N = 3 \times 10^7$ Zyklen); b) CF-PPS-Probeneroberfläche mit schematisch eingezeichnetem Laserpunkt zur Visualisierung einer kritischen Laserposition, die zu einer möglichen Verzerrung des Laservibrometer-Zeitsignals führen kann.....	50
Abbildung 4-13.	a) CF-PPS-Probe (Probe 1) nach der Beanspruchung mit Einkerbungen, rote Linie = Messweg zur Bestimmung der Sonotrodeneinkerttiefe, grüne Linie = Messweg zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit; b) Tiefenprofil der Einkerbung durch die Sonotrode; c) Tiefenprofil einer unbeschädigten Oberfläche, d) CF-PPS-Probe nach der Beanspruchung mit Auflagereinkerbungen, rote Linie = Messweg zur Bestimmung der linken Auflagereinkerttiefe, grüne Linie = Messweg zur Bestimmung	

	der rechten Auflagereinkerbtiefe; e) Tiefenprofil der linken Auflager; f) Tiefenprofil der rechten Auflagereinkerbung .....	51
Abbildung 4-14.	a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall-C-Bild, c) Computertomografiebild (Auflösungsgrenze 9 $\mu\text{m}$ ) in der 1-3-Ebene und d) 1-2--Ebene einer beanspruchten CF-PPS-Probe (Seriennummer: 1-1-1-32, Probe 1) nach $N = 4 \times 10^8 (= N_f)$ Beanspruchungszyklen.....	52
Abbildung 4-15.	Lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante einer beanspruchten CF-PPS-Probe mit der Seriennummer 1-1-1-32 (Probe 1) nach $N = 4 \times 10^8 (= N_f)$ Beanspruchungszyklen a) Probenseitenkante (Rückseite, Auflagereinkerbungen oben, Sonotrodeneinkerbung unten) b) Vergrößerung des grünen Bereichs aus a) mit einer Vielzahl unterschiedlicher Ermüdungsfehler, c) Vergrößerung des schwarzen Bereichs aus b) mit intra-, interlaminaren Rissen und Meta-Delaminationen; d) Vergrößerung des roten Bereichs aus c) mit einem interlaminaren Riss; e) Vergrößerung des grünen Bereichs aus c) mit einem intralaminaren Riss (senkrechter Riss) und einer Meta-Delamination (waagerechter Riss); f) Vergrößerung des violetten Bereichs aus c) mit intralaminaren Rissen (Risswachstum in polymerreiche Gebiete) .....	53
Abbildung 4-16.	Lichtmikroskopische Aufnahme der Seitenkante einer beanspruchten CF-PPS-Probe (Seriennummer 1-1-1-32) nach $N = 4 \times 10^8 (= N_f)$ Beanspruchungszyklen; Vergrößerung aus Abbildung 4-15 b, blau gestrichelte Linien = intralaminare Risse, rot gestrichelte Linie = Meta-Delaminationen in Gewebeeinheitszelle (1) und (2), grün gestrichelte Linie Verbindungsrisse zwischen zwei Meta-Delaminationen.....	54
Abbildung 5-1.	(Probe 2): a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall C-Bild, c) Computertomografiebild (ungefähr Probenmitte) in der 1-3 Ebene; d) 1-2 Ebene und e) lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante (Rückseite mit Auflagereinkerbungen oben) nach $N = 1,4 \times 10^7 (= N_f)$ Beanspruchungszyklen. Der rote Pfeil zeigt auf den Bereich mit Delaminationen. ....	58
Abbildung 5-2.	(Probe 3) a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall C-Bild, c) Computertomografiebild (ungefähr Probenmitte) in der 1-3 Ebene; d) 1-2 Ebene und e) Lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante (Rückseite mit Auflagereinkerbungen oben) nach $N = 3,3 \times 10^8 (= N_f)$ Beanspruchungszyklen.....	59
Abbildung 5-3.	(Probe 1) Fourier-Spektrum berechnet aus den Zeitsignalen des Laservibrometers (blau) und des Mikrofons (grün) nach $N = 2 \times 10^4$ , $N = 2 \times 10^7$ , $N = 2 \times 10^8$ und $N = 4 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen .....	62
Abbildung 5-4.	(Probe 1) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen der Fourier-Spektren des Laservibrometer- (blau) und des Mikrofon-Zeitsignals (grün). Die Punkte (1) – (4) in der Abbildung beziehen sich auf die in Abbildung 5-3 gezeigten Spektren. ....	64
Abbildung 5-5.	(Probe 1) Kurzzeit-Fourier-Transformationesspektren von Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonszeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 2 \times 10^4$ , $N = 2 \times 10^7$ , $N = 2 \times 10^8$ und $N = 4 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen mit entsprechenden gemessenen Amplituden-Zeit-Signalen; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-	

	Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$ ms].....	66
Abbildung 5-6.	(Probe 1) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen als Funktion eines Beanspruchungszyklus berechnet aus den Short-Time-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-5; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$ ms].....	68
Abbildung 5-7.	(Probe 1) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und den Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 2 \times 10^4$ , $N = 2 \times 10^7$ , $N = 2 \times 10^8$ und $N = 4 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$ ms].....	70
Abbildung 5-8.	(Probe 2) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus den harmonischen Frequenzen (siehe Formel 5-1) der Fourier-Spektren des Laservibrometers- (blau) und Mikrofon-Zeitsignals (grün) mit drei ausgewählten Frequenzspektren (1), (2) und (3).....	71
Abbildung 5-9.	(Probe 2) Kurzzeit-Fourier-Transformationesspektren (Probe 2) von Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 2 \times 10^4$ , $N = 2 \times 10^7$ , $N = 2 \times 10^8$ und $N = 4 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen mit entsprechenden gemessenen Amplituden-Zeit-Signalen; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [83 ms], ③ = aktive Dämpfung [19 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>69$ ms].....	73
Abbildung 5-10.	(Probe 2) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit berechnet aus den Kurzzeit-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-9; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [83 ms], ③ = aktive Dämpfung [19 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>69$ ms].....	74
Abbildung 5-11.	(Probe 2) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und den Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 5,7 \times 10^6$ , $N = 5,1 \times 10^7$ und $N = 1,3 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$ ms].....	75
Abbildung 5-12.	(Probe 3) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus den harmonischen Frequenzen der Fourier-Spektren des Laservibrometer- (blau) und Mikrofon-Zeitsignals (grün) mit drei ausgewählten Frequenzspektren (1), (2) und (3).....	77
Abbildung 5-13.	(Probe 3) Kurzzeit-Fourier-Transformationesspektren (Probe 2) von Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 8,3 \times 10^5$ , $N = 1,67 \times 10^8$ und $N = 2,3 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen mit entsprechenden gemessenen Amplituden-Zeit-Signalen; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude	

---

	[93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>64 ms].....	78
Abbildung 5-14.	(Probe 3) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit berechnet aus den Kurzzeit-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-13; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>64 ms] .....	80
Abbildung 5-15.	(Probe 3) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach $N = 8,3 \times 10^5$ , $N = 1,67 \times 10^8$ und $N = 2,3 \times 10^8$ Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>64 ms] .....	81

## Abkürzungsverzeichnis

$a$	Fadenbreite [mm]
$a'$	Fadenbreite nach der Beanspruchung [mm]
$b$	Breite [mm]
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CF-PPS	Carbonfaser Polyphenylensulfid
HHT	Hilbert-Huang-Transformation (engl. Hilbert-Huang Transform)
$d$	Dicke [mm]
$f$	Frequenz [Hz]
$f_0$	Beanspruchungsfrequenz [Hz]
$f_n$	Harmonische Frequenz [Hz]
$f_s$	Subharmonische Frequenz [Hz]
F	Feinheit (Fäden) [mm]
FFT	Schnelle Fourier-Transformation (engl. Fast-Fourier Transform)
$h$	Laminatschichtdicke [mm]
$h'$	Laminatschichtdicke nach der Beanspruchung
PPS	Polyphenylensulfid
$L$	Länge [m]
$L_R$	Länge eines Rovings [mm]
$M$	Maschenöffnung [mm]
$n$	Fadenzahl [1/cm]
$N$	Beanspruchungszyklenanzahl []
$N_0$	Impulsnummer []
$N_f$	Bruchlastspielzahl []
PPS	Polyphenylensulfid
$R$	Spannungsverhältnis [] (Quotient aus Unter- und Oberspannung)
STFT	Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. Short-Time Fourier Transform)
$t$	Zeit [s]
$t_p$	Pulszeit [s]

$T$	Temperatur [°C]
$\theta$	Ondulationsgrad [°]
$\theta'$	Ondulationsgrad nach der Beanspruchung[°]
$\sigma_a$	Beanspruchungsamplitude [MPa]
$\sigma_U$	Unterspannung [Pa]
$\sigma_o$	Oberspannung [Pa]
US	Ultraschall
zfP	Zerstörungsfreie Prüfverfahren
$V_f$	Faservolumenanteil [m <sup>3</sup> ]
VHCF	Hochfrequenzermüdung (engl. Very High Cycle Fatigue)
$w$	Auflagerabstand [m]
$W$	Welligkeit (Ondulation) [%]
$\omega$	Kreisfrequenz [Hz]

# 1 Einleitung

Der Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) als Werkstoff in Leichtbauanwendungen hat in den letzten Jahren aufgrund steigender Energiekosten stark zugenommen. In der Luftfahrt-, Automobil-, Windenergieindustrie finden diese wegen ihrer hohen Steifigkeit sowie Festigkeit einen regen Absatz. Jedoch sind zyklisch hochbeanspruchte CFK Strukturen mit einer geforderten Lebensdauer von mehr als 30 Jahren und von mehr als  $10^9$  Lastzyklen immer noch konservativ ausgelegt. Dies liegt an dem unzureichenden Wissensstand bezüglich des Ermüdungsverhaltens. Aus Sicherheitsgründen wird nicht das gesamte Potential dieses Werkstoffs ausgenutzt. Des Weiteren besteht die Nachfrage nach zerstörungsfreien Prüfmethoden, mit deren Hilfe der Produktionsprozess und das fertige Bauteil in der Anwendung überwacht werden kann. Hierbei sollen Fehler in Form von Polymeransammlungen, Faserondulationen, Delaminationen, Alterungserscheinungen sowie Ermüdungsschäden aller Art detektiert werden.

In einem Gemeinschaftsprojekt zwischen dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK) der Technischen Universität Kaiserslautern, dem Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung der Universität des Saarlandes und dem Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken wurde ein 3-Punkt-Biegeversuch in Kombination mit zerstörungsfreien Online-Prüfverfahren zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von CFK-Proben jenseits von  $10^8$  Beanspruchungszyklen, d. h. im Very High Cycle Fatigue (VHCF) Bereich entwickelt. VHCF-Ergebnisse wurden zum ersten Mal in einer Veröffentlichung von Rabe et al. gezeigt [Rabe, 12].

Kleine Balkenproben werden zwischen zwei stationären Auflagern positioniert. Eine statische Vorspannung wird in der Mitte der Längsachse auf die Proben aufgebracht, um diese während des Ermüdungsexperiments zu fixieren. Eine Ultraschallschwingung bei einer Frequenz von  $f = 20,26$  kHz wird mit Hilfe einer Sonotrode, auch bezeichnet als Beanspruchungseinheit, erzeugt. Eine Infrarotkamera überwacht die Temperatur an der Probe. Zusätzlich wird die Temperatur an drei kritischen Stellen, welche die Kontaktpunkte zwischen Probe und Auflager sowie Probe und Sonotrode sind, aufgezeichnet. Um eine unzulässige Erwärmung der Proben zu vermeiden, wird mit einem Puls-Pause Zyklus gearbeitet. Der Zyklus wird mit Hilfe der Infrarotkamera festgelegt, um eine Schädigung der CFK-Proben zu verhindern. Eine Pulszeit von  $t = 100$  ms und eine Pulspause von  $t = 2000$  ms wurde bei einer Pulsamplitude von ca.  $40 \mu\text{m}$  gewählt. Hierdurch wird eine effektive Prüffrequenz von ca.  $0,9$  kHz realisiert. Bei zusätzlicher Kühlung mit getrockneter Druckluft kommt es während eines Pulses nur zu einer Temperaturerhöhung von  $\Delta T = 5$  K.

Diese Arbeit zeigt, dass die durch die Sonotrode aufgebrachte hochfrequente Ultraschallschwingung nicht nur als zyklische Beanspruchung genutzt werden kann, um die Probe zu ermüden, sondern auch als Prüfsignal um den Ermüdungsfortschritt in-situ zu überwachen.

Während der Ermüdung wird die Oberflächenschwingung mit Hilfe eines Einpunkt-Laservibrometers sowie die Schallabstrahlung der Probe mittels eines breitbandigen Mikrofons aufgezeichnet (Online-Charakterisierung). Die ermittelten Signale werden mittels unterschiedlicher Signalanalyseverfahren wie der schnellen Fourier-Transformation (FFT), der Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) und der Hilbert-Huang-Transformation (HHT) untersucht.

Auswertung und Interpretation der Online-Überwachungsergebnisse werden mittels zerstörungsfreier Prüfmethode unterstützt. Hauptsächlich finden vor und nach der Beanspruchung Ultraschalltechniken, Röntgencomputertomografie- sowie Mikroskopieverfahren Verwendung. Lineare Ultraschalltechniken (B-, C-Bild) und Computertomografieaufnahmen visualisieren die Mikrostruktur und zeigen Defekte wie zum Beispiel offene Risse, Delaminationen oder Polymeransammlungen auf. Die erhaltenen Erkenntnisse erlauben genauere Aussagen über Art und dem Zeitpunkt der Entstehung von Ermüdungsschäden in hochfrequent beanspruchten CFK-Strukturen.

Im Anschluss an die Einleitung werden die in der Literatur bekannten niederfrequenten Prüfsysteme (bis  $f = 100$  Hz) zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden vorgestellt. In Anlehnung an bereits existierende Hochfrequenzprüfsysteme ( $f = 20$  kHz) zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Metallen wird das Grundprinzip der hier verwendeten hochfrequenten Ultraschallermüdungsmaschine für Kohlenstofffaserkunststoffverbunde erläutert. Das anschließende Kapitel gibt eine Einführung in den Aufbau, die Herstellung und die Schädigungsmechanismen von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden. Abhängig vom Lagenaufbau treten unterschiedliche Schädigungsmechanismen in unidirektionalen und 2D-Geweben auf. Zusätzlich wird der Einfluss der Faser-Matrix-Grenzschicht diskutiert, die maßgeblich die Leistungsfähigkeit eines Verbundes gegenüber Ermüdungsschäden bestimmt. Gleichzeitig werden zerstörungsfreie Prüfverfahren vorgestellt, die zur Fehlerprüfung und Charakterisierung von Ermüdungsschäden eingesetzt werden. Die Grundlagen der Fourier und Hilbert-Huang Transformation werden am Ende dieses Kapitels diskutiert. Im Kapitel „Experimenteller Aufbau und Realisierung der Hochfrequenzermüdungsuntersuchungen“ werden der Aufbau, die Voruntersuchungen sowie ein Versuchsablauf der VHCF-Untersuchungen gezeigt. Vor dem Start der Versuchsreihe wird das Probenmaterial hinsichtlich seiner dynamischen elastischen Materialeigenschaften untersucht. Die Probengeometrie, die Dichte sowie die elastischen Eigenschaften beeinflussen die Resonanzfrequenzen der Probe im Schwingersystem. Die genannten Parameter müssen so gewählt werden, dass der erste transversale Biegemode unter 3-Punkt Biegebeanspruchung bei der Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit liegt. Nach den Voruntersuchungen erfolgt die Beschreibung des Ablaufs der Ermüdungsuntersuchungen in dem Ultraschallprüfsystem mit kombi-

nierten zerstörungsfreien Onlineprüfmethoden. Im Ausgangszustand und während der Beanspruchungspausen werden die Proben zerstörungsfrei charakterisiert (Offline-Charakterisierung). Dies dient zur Analyse der Schädigungen und dem Verständnis der Ermüdungsmechanismen in CFK-Proben. Die Messdaten der Offline-Charakterisierung geben keinen Hinweis auf den Zeitpunkt der Rissentstehung. Aus diesem Grund werden die Ultraschallsignale der Online-Überwachung mit den Messdaten der Offline-Charakterisierung in Kapitel 5 korreliert. Dies soll weitere Informationen hinsichtlich der Art und dem Zeitpunkt der Entstehung von Ermüdungsschäden während der Beanspruchung liefern. Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick auf noch bestehende Probleme und notwendige Untersuchungen.

## 2 Prüfsysteme zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden

Konventionelle Ermüdungseinrichtungen arbeiten mit einer Beanspruchungsfrequenz von  $f = 5$  Hz, d. h. Experimente mit einer Zyklenzahl von  $N = 10^9$  würden mehr als 6,3 Jahre benötigen. Beispielhaft sind hier die Arbeiten von Couillard et al. zu nennen, in denen spezielle Ermüdungstestvorrichtungen mit einem kontinuierlichen Biegezyklus von 3 Hz vorgestellt werden [Couillard, 01]. Weitere Untersuchungen unternahmten Pandita et al., die unter Zugschwellbeanspruchung 2D-Gewebe mit einer Frequenz von  $f = 0,5$  Hz bis 10 Hz beanspruchten. Es wurden Lastspielzahlen bis  $N = 10^6$  realisiert [Pandita, 04]. In der Arbeit von Hosoi et al. [Hosoi, 11] konnte die Beanspruchungsfrequenz unter Zugschwellbeanspruchung bis auf  $f = 100$  Hz erhöht werden. Hierdurch war es möglich, bis in Regionen von nahezu  $N = 10^9$  Lastzyklen zu gelangen.

Um die Anzahl von benötigten Lastzyklen in vertretbaren Zeiten zu realisieren, sind Ultraschallermüdungsanlagen die Methode der Wahl. Wird eine Probe bei einer Frequenz von  $f = 20$  kHz beansprucht, sind  $N = 10^9$  Lastzyklen in weniger als 2 Tagen erreicht. Jedoch weisen CFK-Strukturen aufgrund der Polymermatrix ein starkes Dämpfungsverhalten auf, welches sich während der Ermüdung bei 20 kHz in einer unzulässigen Erwärmung auswirkt. Aus diesem Grund werden während der Ermüdung Kühlpausen benötigt. Diese verringern die eigentliche Testfrequenz um den Faktor 10 auf 2 kHz. Trotzdem werden  $N = 10^9$  Lastzyklen in weniger als einer Woche erreicht.

Ultraschallermüdungsmaschinen sind vor allem für die Untersuchung von Metallen bekannt. Zur Erzeugung hoher Beanspruchungsamplituden im Versuchsstand arbeitet das System in Eigenresonanz. Ein Hauptbestandteil des Versuchsaufbaus ist hierbei der Generator, der das sinusförmige Hochspannungsanregungssignal erzeugt. Des Weiteren finden ein piezoelektrischer Konverter, welcher das elektrische Signal in eine mechanische Beanspruchung transformiert, sowie ein Booster, welcher die Schwingung verstärkt, Verwendung. Dabei bedeutet die Abstimmung in Resonanzfrequenz, dass alle Komponenten ihr Maximum der Schwingungsamplitude bei einer definierten Frequenz erreichen. Der Großteil der in der Literatur bekannten Geräte arbeitet bei einer Beanspruchungsfrequenz von 20 kHz. Die zu untersuchende Probe muss in einem engen Kontakt zur Maschine stehen, damit eine effiziente Übertragung der Ultraschallwellen durch den Kontaktpunkt Maschine / Probe erfolgen kann. Ein wesentlicher Punkt ist hierbei die Tatsache, dass die Geometrie der Probe so gewählt sein muss, dass diese selbst die gleiche Eigenresonanz wie das Schwingersystem hat. Der Hauptteil der Hochfrequenzermüdungsversuche wurde unter Zug- / Druckbeanspruchung durchge-

führt. Hierbei dienen taillierte zylindrische Körper, bei denen die Schwingung in longitudinaler Richtung erfolgt, als Versuchsproben.

Wenige Autoren berichten von alternativen Versuchsaufbauten, bei denen 3-Punkt-Ultraschall-Biegemaschinen Verwendung finden. Hierbei ist die Probe ein Balken mit rechteckigem Querschnitt, der zwischen zwei Auflagern fixiert ist, wie in einem statischen 3-Punkt-Biegeversuch. Die Beanspruchungseinheit ist mit einem Ultraschallgenerator verbunden, der eine dynamische Beanspruchung erlaubt. Hoffelner [Hoffelner, 80] untersuchte das Ermüdungsrisswachstum von eingekerbten zyklisch beanspruchten Legierungen auf Nickel- und Aluminiumbasis unter 3-Punkt-Biegebeanspruchung bei einer Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20$  kHz. Reß et al. [Reß, 12] untersuchten das zyklische Ermüdungsverhalten von mehrschichtigen Elektrobauteilen bei  $f = 37$  kHz. Xue et al. [Xue, 07] präsentierte Ermüdungsergebnisse von TiAl-Legierungen unter 3-Punkt-Biegebeanspruchung bis  $N = 10^{10}$  Zyklen mit einer Prüffrequenz von  $f = 20$  kHz.

3-Punkt-Biegeversuche eignen sich hervorragend für CFK Werkstoffe, da Balkenproben leichter aus Platten hergestellt werden können als zylindrische Probekörper. Obwohl das Dämpfungsverhalten von CFK-Materialien höher ist als das von Metallen, konnte kürzlich gezeigt werden, dass Proben einer definierten Geometrie in Eigenresonanzschwingung ange-regt werden können. Die Schwingungsmoden können klar den dazugehörigen Eigenresonanzfrequenzen zugeordnet werden [Backe, 12].

In einem klassischen Ermüdungsexperiment wird die Bruchlastspielzahl  $N_f$  einer Probe aufgezeichnet und als Funktion der maximalen Beanspruchung in einem Wöhlerdiagramm aufgetragen [Ehrenstein, 06]. Nach dem Versagen wird die Bruchfläche der Probe untersucht. Jedoch wurden in den letzten Jahren verschiedenste Arten von in-situ Messverfahren entwickelt, bei denen der aktuelle Zustand der Probe im Ermüdungsexperiment überwacht wird. Die weitverbreitetste Form der Überwachung ist hierbei die Überprüfung der Probenstirnflächen auf Risse mit Hilfe von mikroskopischen Lichtbildkameras. Beispiele finden sich in den Veröffentlichungen [Stelzer, 12; Zhang, 12].

Weber et al. brachten an den beiden Stirnflächen der Proben eine Silberbeschichtung auf, mit deren Hilfe sie einen konstanten Strom von 10 mA durch die Probe leiten konnten. Kam es während des Biegeermüdungsexperiments zu einem Abfall der Biegesteifigkeit, konnte dies durch eine Zunahme des inneren Widerstands der Fasern gemessen werden [Weber, 01]. Ein weiteres in-situ Messverfahren ist die Akustische Emission. Ermüdungsschäden, wie zum Beispiel Risse in der Matrix, erzeugen bei Entstehung und Fortschritt in der Probe vorübergehende Wellen. Pandita et al. [Pandita, 01] werteten diese Informationen aus, indem Sie die Amplitude sowie die Anzahl der Ereignisse pro Lastzahl auftrugen. Hierbei konnten verschiedene Stadien von Schäden detektiert werden, die zum schlussendlichen Versagen des Bauteils führten.

Kumar et al. zeigten, dass Ermüdungsschäden in Aluminiumgusslegierungen mittels nichtlinearer Ultraschalltechnik charakterisiert werden können [Kumar, 10]. Sie analysierten den nichtlinearen Anteil des Rückkopplungssignals im geschlossenen Regelkreis der Ultraschallermüdungseinrichtung.

Bevor das Ultraschall-Hochfrequenzprüfsystem mit kombinierter zerstörungsfreier Online-Überwachung vorgestellt wird, werden die grundlegenden Parameter, die die Leistungsfähigkeit eines CFK-Bauteils beeinflussen und sich durch Ermüdung ändern, diskutiert. Zusätzlich erfolgt eine Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Offline-Charakterisierung und der Funktionsweise der hier verwendeten Spektralanalyseverfahren.

### **3 Ermüdungsvorgänge in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden: Überblick und Charakterisierung**

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen der Herstellung sowie der Aufbau von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen erläutert. Die Herstellung von CFK Bauteilen ist ein sehr komplexer Prozess und ist anfällig für die Entstehung von Fehlern in Form von Einschlüssen, Dekohäsionen und Ondulation. Diese Produktionsfehler sind für das beschleunigte Ermüdungsversagen eines Bauteils mitverantwortlich. Der Lagenaufbau sowie die Anordnung der Fasern bestimmen die mechanischen Eigenschaften sowie die Art und den Ablauf der Schädigungsentwicklung. Aus diesem Grund ist es essentiell, den Schädigungsablauf im Detail für ein UD-Gelege sowie ein 2D-Gewebe zu verstehen. Die Art der mechanischen Beanspruchung, i. e. quasi-statisch oder dynamisch, beeinflusst zusätzlich diesen Ablauf. Die Detektion und Charakterisierung von Ermüdungsschäden erfolgt durch zerstörungsfreie Prüfmethoden. Diese Methoden erlauben eine Beschreibung der Ermüdungsvorgänge in verschiedenen Schadensstadien. Um die Ermüdungsentwicklung zusätzlich online überwachen zu können, werden gemessene Ultraschall-Zeitsignale mittels verschiedener Signalauswerteverfahren analysiert. Die ermittelten Informationen sollen dazu dienen, den hochfrequenten Ermüdungsprozess zu erforschen und zu verstehen.

#### **3.1 Herstellung und Aufbau von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen**

Kohlenstofffaserkunststoffverbunde vereinen die positiven Eigenschaften von zwei Materialien. Die Fasern besitzen eine hohe Steifigkeit sowie Festigkeit und übertragen die Lasten. Dementsprechend übernimmt die Matrix die Aufgabe des Schutzes der Fasern gegenüber äußeren Einflüssen und dient gleichzeitig zur Fixierung der Fasern. Die Grenzschicht zwischen Faser und Matrix, auch Interphase genannt, dient als Kraftübermittler. CFK-Werkstoffe sind witterungs- sowie korrosionsbeständig, haben eine geringe thermische Ausdehnung, ein hohes Energieabsorptionsvermögen und gute Dämpfungseigenschaften [Schlimbach, 04]. Es gibt verschiedene Verfahren um Kohlenstofffasern herzustellen. Als Grundaustgangsstoff finden vermehrt strukturell vorgeformte hochmolekulare Materialien Verwendung. Als Beispiele sind hier organische Fasern oder Pech zu nennen. Heutzutage werden überwiegend C-Fasern aus Polyacrylnitril (PAN) Fasern hergestellt.

### 3.1.1 Herstellungsprozess von Kohlenstofffasern aus Polyacrylnitril-Fasern

In diesem Abschnitt wird der Herstellungsprozess von C-Fasern am Beispiel von PAN-Fasern beschrieben. Im ersten Schritt erfahren die PAN-Fasern eine chemische Stabilisierung. Hierfür werden diese unter Luft bei Temperaturen zwischen  $T = 180\text{ °C}$  und  $T = 300\text{ °C}$  im gestreckten Zustand oxidiert. Die Streckung ist notwendig, um ein Zusammenziehen der Fasern zu verhindern. Die Stabilisierung dient der Kohlenstoffanreicherung, der sich ein weiterer Prozessschritt, die Carbonisierung, anschließt. Die Carbonisierung erfolgt bei Temperaturen zwischen  $T = 300\text{ °C}$  und  $T = 1500\text{ °C}$ . Dabei verändert sich das thermoplastische Polyacrylnitril in eine nichtplastische, zyklische Struktur, die der hohen Temperatur während des Prozessschrittes widersteht. Hierbei verliert die Faser ca. 50 Gew.-% und der relative Kohlenstoffanteil ist von 68 Gew.-% bei reinem PAN auf 92 Gew.-% angewachsen. Ist ein höherer Kohlenstoffgehalt gewünscht, wie zum Beispiel für hochzugfeste (C-Gehalt: 92 bis 96 Gew.-%), hochmodulige (C-Gehalt: bis 99 Gew.-%), bis ultra hochmodulige (C-Gehalt: größer 99 Gew.-%) Fasern, erfolgt ein weiterer Prozessschritt unter inerter Atmosphäre bei  $T > 2000\text{ °C}$ , die sogenannte Graphitisierung. Der letzte Prozessschritt ist durch die hohen Temperaturen sehr kostenintensiv und findet daher nur selten statt. Typische PAN Fasern besitzen bei einem Kohlenstoffgehalt von 92 Gew.-% einen E-Modul von  $E = 240\text{ GPa}$ . Eine einzelne Kohlenstofffaser hat einen Durchmesser von ca.  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Zusammengefasst bilden viele unverdrehte Einzelfasern ein Faserbündel, auch bezeichnet als Roving. Die Anzahl der Einzelfasern wird in Vielfachen von Tausenden, abgekürzt mit (k), angegeben. Eine 3k-Ausführung bedeutet, dass ein Roving aus 3000 Einzelfasern besteht [Chung, 94; Karger Kocsis, 04].

### 3.1.2 Eingesetzte Matrixsysteme in CFK-Verbunden

Als Matrixmaterialien finden überwiegend duroplastische, sowie thermoplastische Polymere Verwendung, wobei die Duroplaste den Markt noch dominieren [Skrna-Jakl, 09]. Beide Polymertypen haben Vor- und Nachteile in den physikalisch-chemischen Eigenschaften, in der Verarbeitung sowie in der Anwendung. Duroplastische Polymere entstehen durch eine chemische Reaktion von Harzen. Nach ihrer Aushärtung sind diese nicht mehr verformbar. Sie bilden ein dreidimensionales Netzwerk über kovalente Bindungen. Diese sind irreversibel und lassen keine spätere Umformung zu, was nur ein unter Umweltgesichtspunkten schwieriges Recycling zulässt. Der typische Glasübergang von Duroplasten liegt oberhalb der Raumtemperatur. Aus diesem Grund haben sie eine hohe Wärmeform- und Chemikalienbeständigkeit und eine geringe Neigung zum Kriechen. Als typische Polymere dieser Gruppe sind die Polyester- und Vinylesterharze, Phenolharze und Epoxidharze zu nennen [Elias, 96].

Matrizen aus thermoplastischem Polymer werden überwiegend in nichtstrukturellen Bauteilen in der Automobilbranche verwendet. Ihr großer Vorteil besteht darin, dass sie bereits vor der Bauteilverarbeitung vollständig polymerisiert sind. Damit ist der Herstellungsprozess ein rein physikalischer Ablauf. Zur Formfertigung wird die Matrix aufgeschmolzen und nach vollen-

der Formgebung abgekühlt. Durch das Fehlen von chemischen Reaktionen im Formgebungsprozess können kurze Taktzeiten und damit hohe Stückzahlen realisiert werden. In der Anwendung bedeutet dies aber auch, dass bei Erreichen der Schmelztemperatur ein Fließen der Bauteilmatrix beginnt und somit ein rapider Abfall der mechanischen Eigenschaften des CFK-Verbundes einsetzt. Typische thermoplastische Kunststoffe sind Polypropylen, Polyethylenterephthalat, sowie die Hochleistungspolymere, Polyetheretherketon sowie Polyphenylensulfid [Skrna-Jakl, 09].

### 3.1.3 Lagenaufbau von CFK-Halbzeugen

Bei der Herstellung von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden wird bei der Faserauswahl zwischen sogenannten Kurz-, Lang- und Endlosfasern unterschieden. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3-1 zu sehen. Über Kurzfasern wird im Allgemeinen gesprochen, wenn die Länge der einzelnen Kohlenstofffaser in der Größenordnung ihrer Durchmesser liegt [Matthews, 99]. Es wird hierbei nicht von Partikeln gesprochen. Dabei kann die Anordnung regellos (Abbildung 3-1a) und unidirektional (Abbildung 3-1b) in der Laminebene verteilt sein. Bei Kurzfasern übernimmt die Matrix die Hauptlast und bestimmt dadurch vorrangig die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs. Daher werden Kurzfasern vor allem in Anwendungen mit geringen mechanischen Beanspruchungen verwendet, wie z.B. im Bootsbau. Demgegenüber werden endlosfaserverstärkte Verbunde (Abbildung 3-1 c) durchgehend mit Fasern verstärkt. Dabei besteht die Möglichkeit, die Faserorientierung der Einzelschichten zu der folgenden Schicht zu variieren. Man unterscheidet zwischen sogenannten  $0^\circ$  unidirektionale (UD) Lamine (jede Schicht besitzt die gleiche Faserorientierung), Kreuzverbunde ( $90^\circ$  Drehung der Faserorientierung der jeweiligen Schichten) sowie Multidirektionale Lamine (freie Faserorientierung der jeweiligen Schichten). In Faserrichtung werden die mechanischen Eigenschaften von der Faser bestimmt. Senkrecht zur Faserrichtung bestimmt die Matrix das mechanische Verhalten. Aus diesem Grund werden vermehrt multidirektionale Lamine eingesetzt.

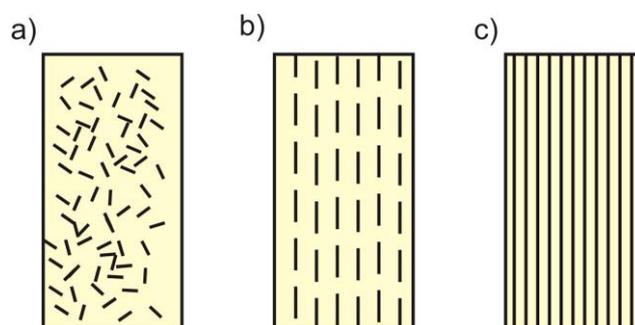


Abbildung 3-1. Schematischer Faseraufbau von Kohlenstofffasern; a) regellose, b) unidirektionale Kurzfasern und c) unidirektionale Endlosfasern

Wird ein Verbundwerkstoff in vielen verschiedenen Richtungen mechanisch beansprucht, und nicht allein in Faserrichtung, würde das strukturelle Versagen bevorzugt an einer Faser-Matrix-Schnittstelle auftreten. Aus diesem Grund wurden faserverstärkte Strukturen entwickelt, bei denen eine hohe Verbindungssteifigkeit zwischen angrenzenden Faserebenen vorhanden ist. Als Ergebnis wurden zweidimensionale- (siehe Abbildung 3-2 a) sowie dreidimensionale Gewebe (siehe Abbildung 3-2 b) hergestellt.

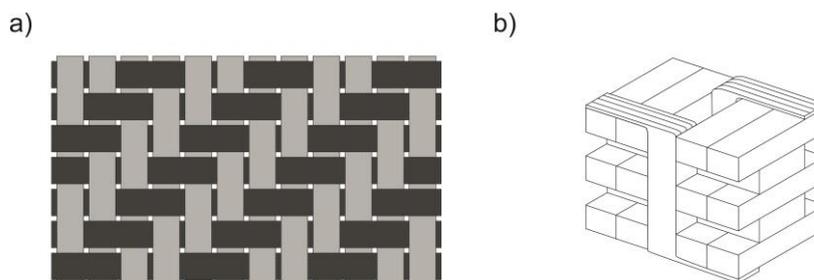


Abbildung 3-2. Schematischer Aufbau a) eines 2D-Gewebes mit Körper-2/2-Struktur und Carbonfasern in 0° sowie 90° Richtung, b) einer Elementarzelle eines orthogonalen 3D-Gewebes

Gegenüber unidirektionalen Gelegen haben Gewebe einen größeren Widerstand im Fall von Aufprallschäden und Ermüdung, eine höhere Bruchzähigkeit und ein ausgezeichnetes Formanpassungsvermögen für komplexe geometrische Strukturen. Die verwendete Gewebestruktur hängt maßgeblich vom Anwendungsfall ab. Wichtige Herstellungsparameter, die die mechanischen Eigenschaften bestimmen, sind die Feinheit der einzelnen Fäden  $F$  [mm], die Maschenöffnung  $M$  [mm] des Rovings, die Fadenzahl  $n$  [1/cm], die Rovingbreite  $a$  [mm], die Rovingdicke  $h_a$  [mm] die Laminatschichtdicke  $h$  [mm] sowie die Welligkeit  $W$  [%] auch bezeichnet als Ondulation. Der Aufbau einer 2D-Gewebeeinheit zelle ist in Abbildung 3-3 zu sehen.

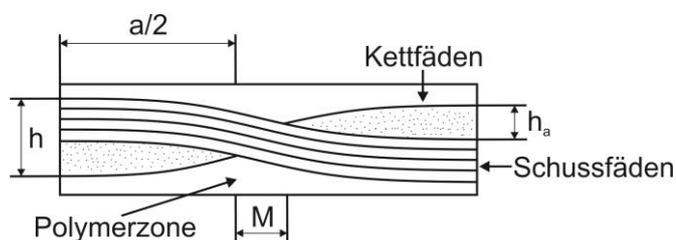


Abbildung 3-3. Schematischer Aufbau einer 2D Gewebeeinheit zelle mit einer Schichtdicke  $h$  [mm], einer Rovinghöhe  $h_a$  [mm], einer Rovingbreite  $a$  [mm] und einer Maschenöffnung  $M$  [mm]

Die Welligkeit ist definiert als die prozentual auf die Probenlänge bezogene Differenz zwischen Rovinglänge  $L_R$  - und Probenlänge  $L$  [Naik, 03]. Bei einer Zunahme der Maschenöffnung  $M$  des Rovings kommt es zu einer Abnahme der Fadenzahl  $n$ , des Faservolumenanteils  $V_f$  [m<sup>3</sup>] und damit zu einer Abnahme der Festig- sowie Steifigkeit des Verbundes.

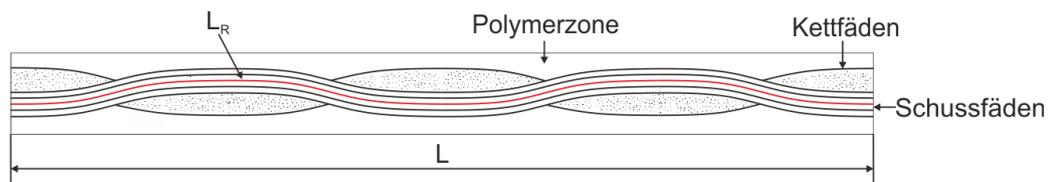


Abbildung 3-4. Schematischer Aufbau eines 2D Gewebes mit der Probenlänge  $L$  [mm] und einer Rovinglänge  $L_R$  [mm]

Eine Gewebeeinheit zelle besteht aus drei Struktureinheiten, den Kett-, den Schussfäden sowie der reinen Polymerzone. Die Kett- und Schussfäden können abhängig vom Ondulationsgrad als äquivalentes UD-Laminat angenommen werden. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich in Geweben wie auch bereits bei unidirektionalen Gelegen durch den Lagenaufbau variieren. Zusätzlich zur Ausrichtung der Lagen kann die Stapelanordnung geändert werden. Hierdurch ist es möglich, eine fluchtende (Abbildung 3-5 a) oder eine geschachtelte Anordnung (Abbildung 3-5 b) einzustellen. Der Versatz kann hierbei in Kett- oder Schussfadenrichtung erfolgen.

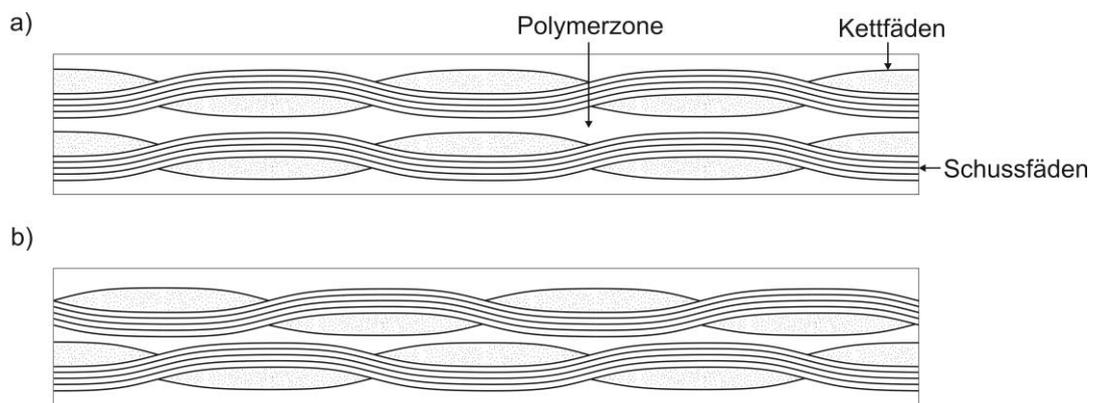


Abbildung 3-5. Schematische Darstellung der Stapelanordnungen eines Gewebes a) fluchtend (ohne Versatz) b) geschachtelt (mit Versatz)

Bei der geschachtelten Stapelanordnung wird der Anteil an polymerreicher Zone deutlich verringert. Dies ermöglicht die Anzahl einzelner Lagen bei konstant bleibender Gewebedicke zu erhöhen. Damit erhöht sich der Faservolumenanteil, und bessere mechanische Eigenschaften werden erreicht [Naik, 03].

Bei 2D-Geweben wird die Faserstruktur durch die rechtwinklige Verflechtung von regelmäßig angeordneten Kett- und Schussfäden erzeugt. Allgemein gebräuchlich sind drei Webarten: Leinwand-, Köper- und Atlasbindung (siehe Abbildung 3-6).

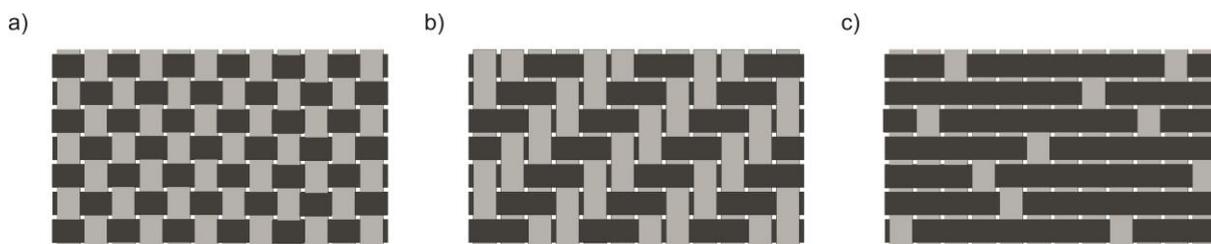


Abbildung 3-6. Schematischer Aufbau von 2D-Geweben mit a) Leinwand-, b) Körper- und c) Atlasbindung; grau = Kettfäden, schwarz = Schussfäden

Bei der Leinwandbindung (Abbildung 3-6 a) sind die Flächen sehr eng gebunden, d. h. der Abstand zwischen den Kreuzungspunkten ist sehr gering. Dadurch ist das Gewebe schiebefest und lässt sich beim Einarbeiten in eine Form nicht so leicht verziehen. Nachteilig wirkt sich die große Anzahl von Kreuzungspunkten und damit einhergehende Welligkeit auf die Druck- und Ermüdungsfestigkeit aus. Zusätzlich nimmt der Volumenanteil der reinen Polymerzone zu. Um diese Nachteile zu umgehen, verwendet man bei hoch beanspruchten Bauteilen Körper- (Abbildung 3-6 b) und Atlasbindungen (Abbildung 3-6 c). Bei einer Körperbindung verlaufen zwei oder drei Kettfaserbündel und bei einer Atlasbindung bis zu sieben Kettfaserbündel über die Schussfaserbündel [Schürmann, 07]. Aufgrund der geringen Faserwelligkeit weisen Körper- sowie Atlasgewebe eine hohe Ermüdungsfestigkeit sowie gute mechanische Eigenschaften auf [Skrna-Jakl, 09]. Ergänzende Informationen auch zu 3D-Gewebe können zum Beispiel in dem Buch „Handbuch Verbundwerkstoffe“ nachgelesen werden [Neitzel, 04].

### 3.2 Schädigungsmechanismen in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden

Wie im Abschnitt zuvor beschrieben, nehmen der Aufbau und die Struktur der Kohlenstofffasern nicht nur Einfluss auf das mechanische Verhalten sondern auch auf die Schädigungsentwicklung und das Ermüdungsverhalten. Hierdurch ist es notwendig, die Schädigungsmechanismen für UD-Gelege sowie 2D-Gewebe getrennt zu betrachten. Quasi-statische oder dynamische Beanspruchung führt zusätzlich zu einem veränderten Schadensbild. Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten hat die Leistungsfähigkeit der Faser-Matrix-Grenzschicht. Verbesserte Adhäsionskräfte führen unter anderem zu einer erhöhten Lebensdauer. Nicht zu vernachlässigen sind auch Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur, UV-Strahlung, (etc.), die zu einer Schädigung und damit einer herabgesetzten Lebensdauer von CFK-Bauteilen führen. Des Weiteren nehmen Parameter wie Beanspruchungsfrequenz, Mittelspannung und Beanspruchungsamplitude Einfluss auf die Ermüdung.

### 3.2.1 Schädigungsmechanismen in UD-Gelegen

#### 3.2.1.1 Schadensentwicklung unter uniaxialer quasi-statischer Zugbeanspruchung

Die Versagenskriterien eines CFK-Werkstoffs werden maßgebend von der Struktur und den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Verbundes bestimmt. Bei  $0^\circ$  unidirektionalen Gelegen (Abbildung 3-7) besitzt das Laminat die besten mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung, jedoch reichen schwache Scherbelastungen aus, um das Laminat in senkrechter Richtung zu brechen. Der E-Modul von UD-Gelegen in Faserrichtung bei Verwendung typischer PAN Fasern beträgt ca. 240 GPa. Demgegenüber kann der E-Modul senkrecht zur Faserrichtung nur eine hundertfach niedrigere Steifigkeit von ca. 5 GPa aufweisen.

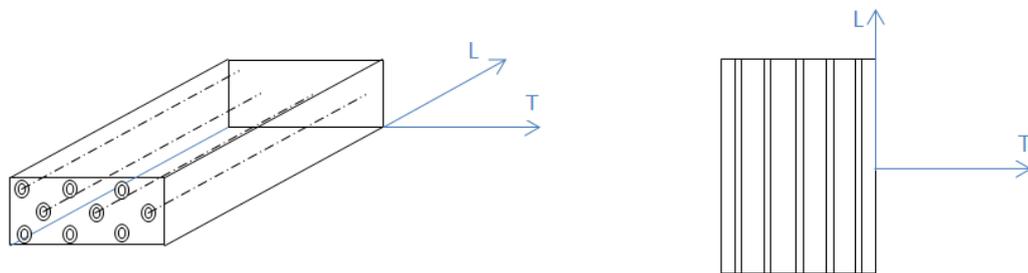


Abbildung 3-7. Schematische Darstellung einer Lage eines  $0^\circ$  unidirektionalen Laminates [0]

Um die mechanischen Eigenschaften des Laminates zu verbessern, werden an Stelle von  $0^\circ$  unidirektionalen Schichten auch multiaxiale Schichten (Abbildung 3-8) mit unterschiedlichen Orientierungen verwendet. Durch die Variation des Lagenaufbaus wird der Widerstand gegenüber der Ermüdung und dem Versagen des Bauteils deutlich erhöht, da die Fasern mit höherer Wahrscheinlichkeit in kleineren Winkeln zur Beanspruchungsrichtung orientiert sind [Curtis, 87]. Die dünne Grenzfläche zwischen zwei Faserlagen, bestehend aus Polymeransammlungen stellt hierbei eine Schwachstelle dar (Abbildung 3-8) [Gyekenyesi, 98]. Durch spannungsinduzierte Kriechvorgänge kann es zu einem langsamen Entstehen von Matrixrisen kommen [Harris, 03a]. Des Weiteren nimmt die Häufigkeit produktionsprozessbedingter Einschlüsse und Poren an dieser Stelle zu. Aus diesem Grund breiten sich Risse im Fall eines Aufpralls oder erhöhter Schubkräfte in dieser Region aus [Curtis, 87].

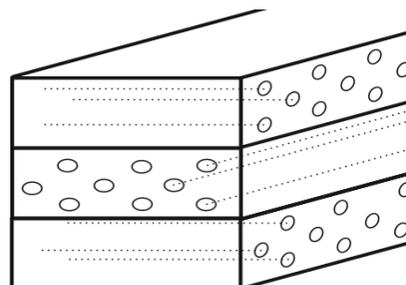


Abbildung 3-8. Schematische Darstellung eines dreilagigen multiaxialen UD-Laminates [0,90,0]

Im Falle eines Zugversuchs in Faserrichtung sind aufgrund der geringen mechanischen Eigenschaften der Matrix ( $E \approx 5 \text{ GPa}$ ) vermehrt Risse quer durch die Lagedicke sowie senkrecht zur Beanspruchungsrichtung zu beobachten (Abbildung 3-9). Diese Art von Fehler wird als transversaler Riss bezeichnet. Diese Risse erscheinen bei statischer Last bis zum einem Drittel der Mindestzugfestigkeit und verursachen eine 10-prozentige Abnahme der Steifigkeit des Werkstoffes gegenüber dem Ausgangszustand [Reifsnider, 90].

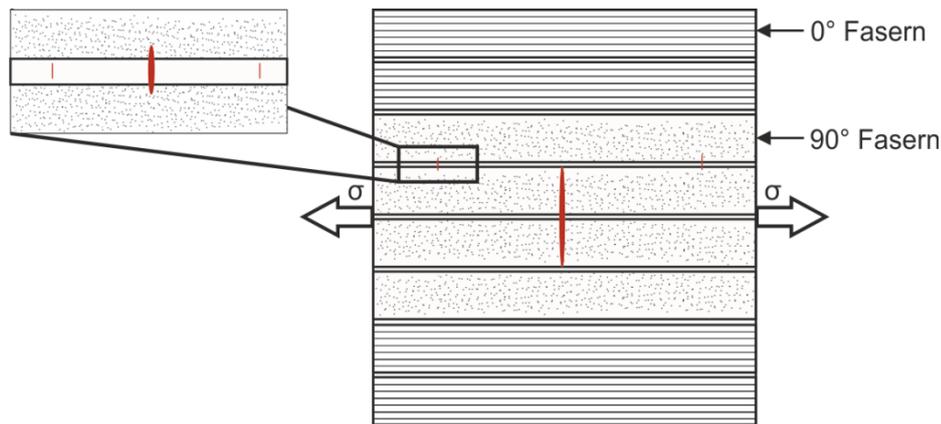


Abbildung 3-9. Schematische Darstellung eines transversalen Risses (rot) in einem multiaxialen Laminat  $[0, 0, 90, 90]_s$  verursacht durch Zugbeanspruchung

Bei den transversalen Rissen, die durch Faser-Matrix-Ablösungen entstanden sind, handelt es sich um keine schweren Schäden im CFK-Verbund. Jedoch sind diese der Ursprung von sekundären Rissarten, die zum Versagen des Bauteils führen. Faserbrüche treten mit fortschreitender Beanspruchung an den tragenden Faserbündeln auf (Abbildung 3-10 a). Lokalisierte Spannungserhöhung an den transversalen Rissen führen zu einer plastischen Verformungszone, die in der Matrix einen Kohäsionsbruch bewirkt. Im weiteren Ermüdungsverlauf entwickelt sich ein Grenzschichtbruch mit weiterer Faser-Matrix-Ablösung, der letztendlich zum Bruch einer einzelnen Faser (sekundäre Risse) und zum Versagen der Tragkraft des Faserbündels führt (Abbildung 3-10 b) [Soutis, 00]. Diese Art von Rissen entsteht an allen Orten, an denen Spannungsspitzen vorhanden sind. Zusätzlich können Fabrikationsfehler oder Aufprallschäden diesen Vorgang begünstigen.

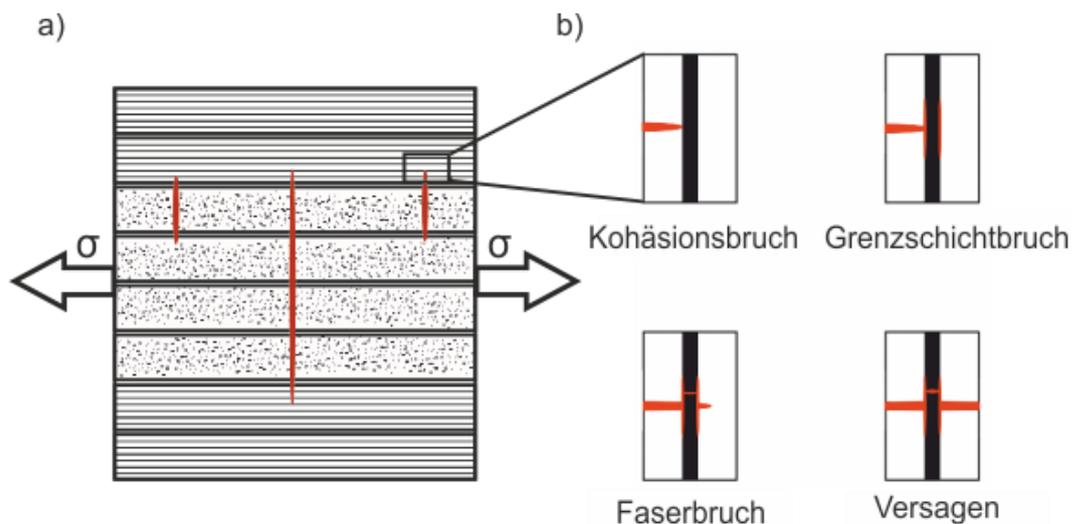


Abbildung 3-10. Schematische Darstellung von a) sekundären Rissen verursacht durch transversale Risse in der Nähe einer tragenden Faser, b) Verlauf der Schadentwicklung von sekundären Rissen nach [Soutis, 00] in einem multiaxialen Laminat  $[0, 0, 90, 90]_s$

Im Anschluss treten Risse parallel zur tragenden Faserrichtung auf. Dieser tertiäre Schädigungsmechanismus (siehe Abbildung 3-11) wird auch als interlaminarer Riss bezeichnet und tritt aufgrund von örtlichen Spannungserhöhungen auf, die durch Dekohäsion verursacht wurden. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit solcher Risse sehr gering ist, stellen diese keine akute Gefahr für das Bauteil dar. Mikroskopiebilder zeigen, dass solche Risse in großer Anzahl homogen in der Polymermatrix verteilt sind [Reifsnider, 90]. Wenn sich jedoch primäre (transversale Risse) sowie sekundäre Risse treffen, entstehen große lokale Spannungsfelder. Diese bilden sich dann zu einer lokalen, delaminierten Region (Delamination) aus, die im Riss des tragenden Faserbündels und dem Versagen des gesamten Bauteils resultiert.

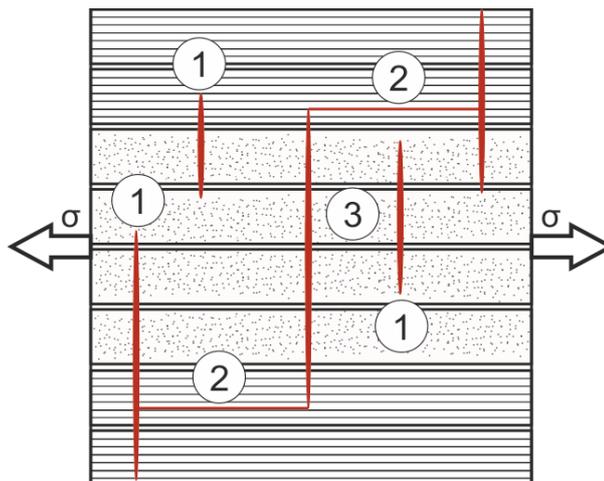


Abbildung 3-11. Schematische Darstellung von (1) primären (transversalen) , (2) sekundären sowie (3) tertiären (interlaminaren) Rissen in einem multiaxialen Laminat  $[0, 0, 90, 90]_s$

In der Anwendung treten nicht nur quasi-statische sondern auch dynamische Beanspruchungen auf, die zu einem veränderten Schadensbild führen. Im folgenden Abschnitt werden die Schädigungsmechanismen im Fall einer uniaxialen zyklischen Zugschwellbeanspruchung genauer betrachtet.

### 3.2.1.2 Schadensentwicklung unter uniaxialer Zugschwellbeanspruchung

Das Ermüdungsverhalten von UD-Gelegen unter niederfrequenter, zyklischer Beanspruchung (ca. 5 Hz) ist schematisch in Abbildung 3-12 zu sehen. Die hauptsächlich auftretenden Schädigungsmechanismen während dynamischer Ermüdungsbeanspruchung sind Matrixrisse, Grenzschichtbrüche, Delaminationen und Faserrisse. Mikrorisse in der Polymermatrix, auch als transversale Risse bezeichnet, treten bereits im Frühstadium der Ermüdung auf (Abbildung 3-12 b 1.). Die Risse entstehen entlang der Fasern senkrecht zur Beanspruchungsrichtung. Mit zunehmender Zyklenzahl nimmt die Rissdichte zu, bis es zu einer Kopplung von transversalen Rissen durch die Erzeugung von interlaminaren Rissen kommt (Abbildung 3-12 b 2.). Das Risswachstum dauert an, bis eine Sättigung und ein Gleichgewicht im Volumen erreicht sind. Hierbei erfolgt eine Spannungsumverteilung im Verbund, die die Entstehung von neuen Rissen stark begrenzt. In der Literatur wird dieses Stadium als sogenannter „characteristic damage state“ (CDS), charakteristischer Schadenszustand bezeichnet [Naik, 03].

Bei weiterer Beanspruchung treten Faser-Matrix-Ablösungen auf (Abbildung 3-12 b 3.). Die neuentstandenen Ablösungen verbinden sich mit den bereits vorhandenen Rissen und erzeugen weitere Schadensformen. Delaminationen entstehen vermehrt in der Nähe von freien Kanten an der Oberfläche und im Inneren an interlaminaren Rissen. Bei weiterer Ermüdung wachsen die Delaminationen entlang der Lagen in Beanspruchungsrichtung.

Bei weiterer Beanspruchung kommt es zu ersten Faserbündelrissen. Das Brechen von vereinzelt Fasern kann bereits vorab geschehen, wenn schwächere Fasern mit einer geringeren Steifigkeit im Verbund vorhanden sind. Zusätzlich können erhöhte Spannungskonzentrationen in polymerreichen Zonen aufgrund von Matrixrissen oder Grenzschichtablösungen diesen Prozess beschleunigen.

Im späteren Verlauf kommt es zu einem plötzlichen Spannungsanstieg im Verbund, der einen Sprödbruch des gesamten Verbundes verursacht (Abbildung 3-12 b 4.).

Verschiedene Schadensmechanismen laufen mehr oder weniger parallel ab. Matrixrisse tragen jedoch im Frühstadium dominant zum Fortschritt der Schädigung bei. Delaminationen treten im mittleren Bereich auf. Das Versagen des Bauteils wird letztendlich durch den plötzlichen Anstieg der kritischen Spannung durch die Anhäufung der unterschiedlichen Schadensarten hervorgerufen [Naik, 03].

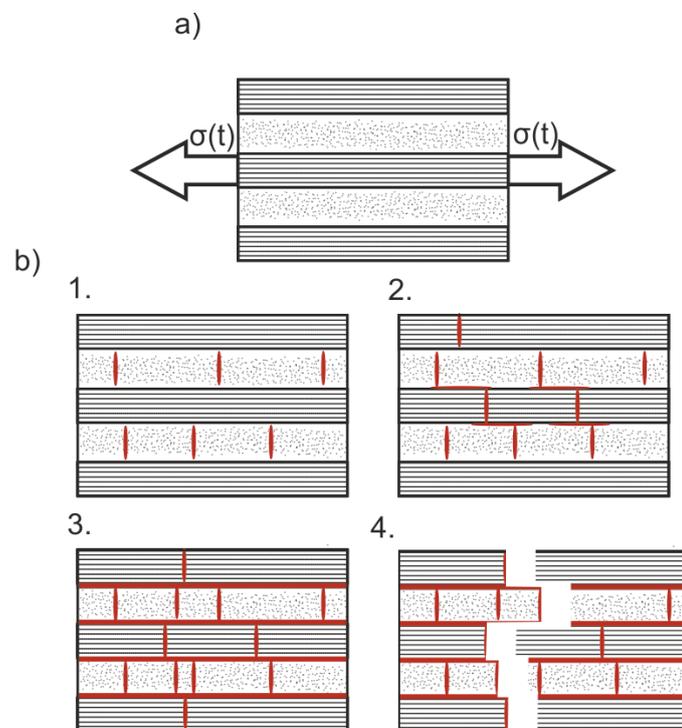


Abbildung 3-12. Schematische Darstellung der Schadensentwicklung in einem [0/90/0/90/0] UD-Gelege unter niederfrequenter (ca. 5 Hz) zyklischer Zugschwellbeanspruchung

### 3.2.2 Schädigungsmechanismen in 2 D-Geweben

Unidirektionale sowie multidirektionale UD-Gelege besitzen die besten mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung. Jedoch werden diese vermehrt durch 2D-Gewebe ersetzt, da diese unter anderem ein besseres Formanpassungsvermögen sowie einen höheren Widerstand gegenüber Aufprallschäden besitzen. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 beschrieben, ist der strukturelle Aufbau von 2D-Geweben anders als der von UD-Gelegen. Nicht nur die verwebte Struktur,

sondern auch die polymerreichen Zonen sorgen für ein verändertes Schädigungsverhalten von Geweben gegenüber Gelegen. Im folgenden Unterkapitel werden die Schädigungsmechanismen in 2D-Geweben genauer diskutiert. Wie bereits bei den UD-Gelegen beschrieben, beeinflusst die Art der Beanspruchung auch das Ermüdungsverhalten. Aus diesem Grund wird im ersten Teil die Schadensentwicklung unter uniaxialer quasi-statischer Zugbeanspruchung beschrieben, um anschließend den Schadensverlauf unter zyklischer dynamischer Zug-schwellbeanspruchung besser zu verstehen.

### 3.2.2.1 Schadensentwicklung unter uniaxialer quasi-statischer Zugbeanspruchung

Bedingt durch den strukturellen Aufbau von 2D-Geweben entstehen Zonen von Polymeragglomerationen, in denen keine C-Fasern vorhanden sind. Der Volumenanteil dieser reinen Polymerzone hängt maßgeblich vom Gewebeaufbau ab. Leinwandgewebe besitzen einen größeren Anteil polymerreicher Zonen als Atlasgewebe. Zusätzlich beeinflusst die Art der Stapelanordnung den Faservolumenanteil (siehe Kapitel 3.1.3). Eine geschachtelte Anordnung verringert den Volumenanteil der polymerreichen Zonen gegenüber einer fluchtenden Stapelanordnung.

Bereiche von Polymeragglomerationen haben aufgrund der fehlenden Fasern eine deutlich herabgesetzte Festigkeit sowie Steifigkeit. Zusätzlich sind durch die hohe Viskosität der Matrix beim Herstellungsprozess dort vermehrt Poren aufzufinden (Abbildung 3-13) [Boudot, 12]. Die hierdurch verursachten Innenspannungen aufgrund des Abkühlungsvorgangs erleichterten die Initiierung von interlaminaren Rissen.

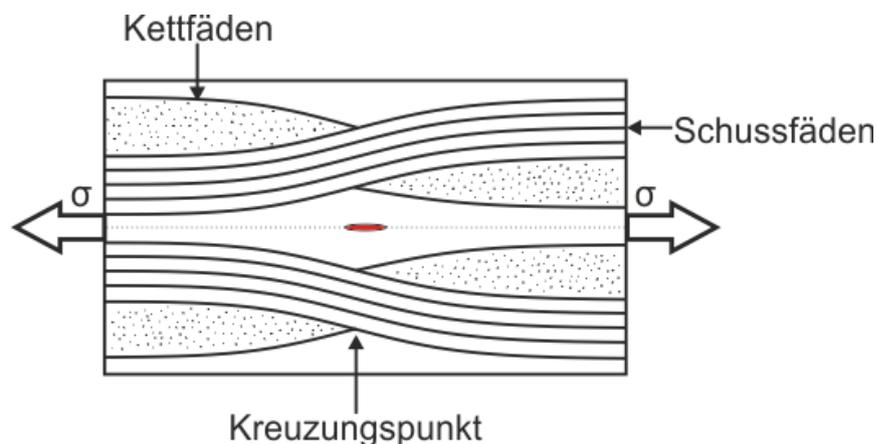


Abbildung 3-13. Schematische Darstellung eines interlaminaren Risses in einer polymerreichen Zone verursacht durch eine Pore unter Zugbeanspruchung am Beispiel eines Leinwandgewebes

Im Fall eines uniaxialen quasi-statischen-Zugversuchs entlang der Schussfadenrichtung können Fehler in allen Bereichen der Gewebeeinheitszelle auftreten (siehe Abbildung 3-14). Die auftretende Fehlerabfolge ist zufällig. Laut Naik [Naik, 03] gibt es zwei mögliche Schadensentwicklungsverläufe. Im ersten Fall (Abbildung 3-14 b) entstehen in den Schussfäden inner-

halb der Kreuzungspunkte zwischen den Kettfaser- und Schussfaserbündeln longitudinale Faserablösungen. Im Kettfaserbündel entstehen transversale intralaminare Risse senkrecht zur Beanspruchungsrichtung. Die ersten transversalen Risse entstehen am spitz zulaufenden Kettfaserbündel, wie in Abbildung 3-14 b zu sehen. Mit zunehmender Beanspruchung entstehen weitere transversale Risse in Richtung der Mitte eines Kettfaserbündels. Kommt es zu transversalen Rissen im Schussfaserbündel, so steht das Bauteil kurz vor dem Versagen. Transversale Risse im Kettfaserbündel sowie longitudinale Risse im Schussfaserbündel sorgen lediglich für eine leichte Reduktion der Steifigkeit. Mit zunehmender statischer Last im Gewebe kommt es zu einer Streckung der Schussfäden. Dies hat zur Folge, dass eine Abnahme der Schichtdicke  $h$  und des Ondulationsgrads  $\theta$  eintritt. Daher kommt es bei der Streckung der Schussfäden zu einer leichten Steigerung der Steifig- sowie Festigkeit des Verbundes [Daggumati, 13].

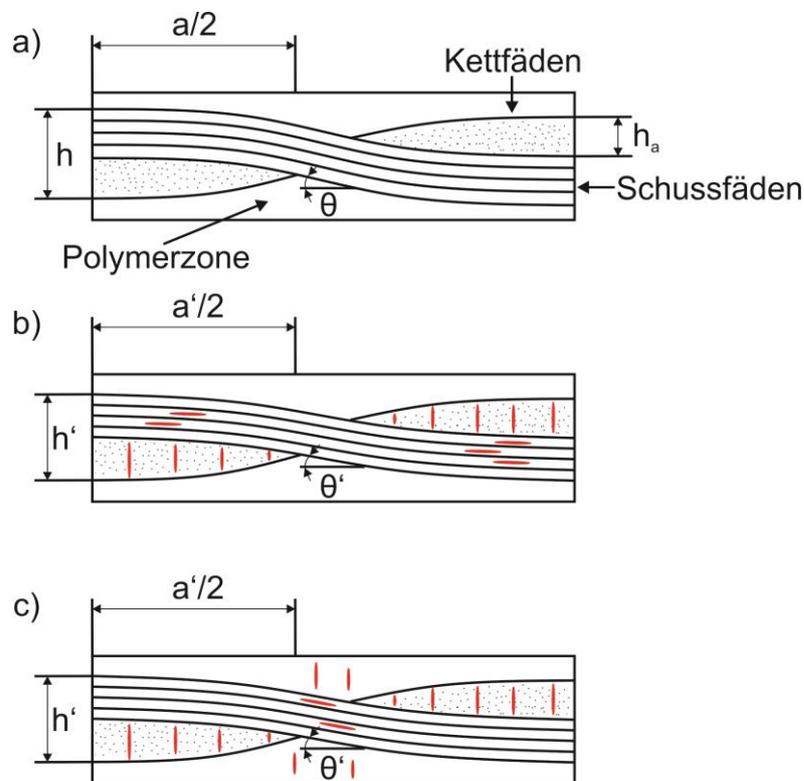


Abbildung 3-14. Schematische Darstellung der Schadensentwicklung von CFK-Leinwandgeweben unter quasi-statischer-Zugbeanspruchung, a) Ausgangszustand, b) und c) während der Beanspruchung, nach [Naik, 03],  $\theta$  entspricht dem Ondulationsgrad vor und  $\theta'$  nach der Beanspruchung,  $h'$  der Schichtdicke und  $a'$  der Rovingbreite nach der Beanspruchung

Im Bereich der Maschenöffnung (siehe Gewebeeinheit zelle in Abbildung 3-3) fehlt der Kettfaden. In diesem Fall können wie bereits in den Kreuzungspunkten von Kett- und Schussfaserbündel aufgrund von Zug- oder Scherkräften longitudinale Faserablösungen auftreten (Abbildung 3-14 c). In diesem Bereich nimmt die reine Polymerzone entscheidend Einfluss

auf das mechanische Verhalten des Verbundes. Hierbei können auch Fehler in dieser Zone entstehen. Der monolithische Charakter der Gewebereinheitszelle geht verloren, d. h. Kett- und Schussfaserbündel können getrennt betrachtet werden. Auch in diesem Fall wird das Versagen des Gewebes durch das Reißen von tragenden Schussfäden verursacht.

Laut Naik [Naik, 03] beeinflusst die Geometrie der Gewebereinheitszelle das Auftreten verschiedener Schadensabläufe. Der Schadenszustand, wie in Abbildung 3-14 b gezeigt, tritt vor allem bei Geweben mit einer großen Rovingbreite  $a$  und einer geringen Schichtdicke  $h$  auf. Demgegenüber tritt der zweite Fall, zu sehen in Abbildung 3-14 c, bei einer kleinen Rovingbreite  $a$  und einer großen Schichtdicke  $h$  auf.

### 3.2.2.2 Schadensentwicklung unter uniaxialer Zugschwellbeanspruchung

In den Arbeiten von Daggumati et al. [Daggumati, 13] wurde das Ermüdungsverhalten eines 2D-Gewebes mit Atlasbindung und Polyphenylensulfid-Matrix bei niederfrequenter (5 Hz) zyklischer Zugschwellbeanspruchung ( $R = 0,5$ ) untersucht. Die maximal auftretende Spannung betrug 500 MPa. Dies entspricht 69 % der Mindestzugfestigkeit  $R_m$  des Materials.

Nach bereits 1000 Zyklen wurden intralaminare Risse im Kettfaserbündel festgestellt. Schematisch ist dieses Schadensbild im Fall eines Leinwandgewebes in Abbildung 3-15 zu sehen.

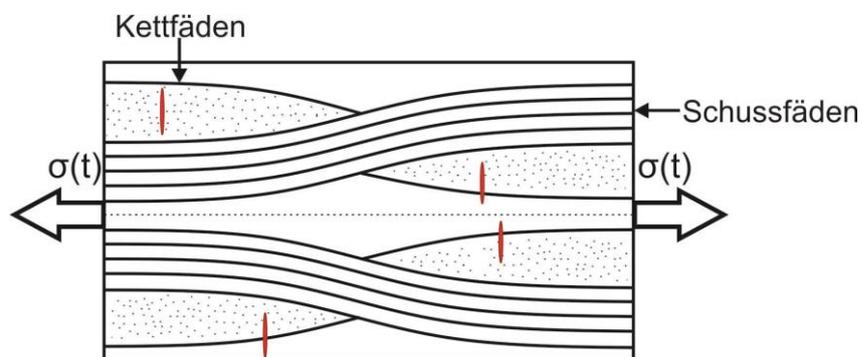


Abbildung 3-15. Schematische Darstellung von intralaminaren Rissen verursacht durch dynamische Zugschwell Beanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe

Im weiteren Ermüdungsverlauf nimmt die Anzahl der intralaminaren Risse zu, und diese wachsen vom Inneren des Kettfaserbündels in Richtung von Polymeransammlungen oder in Richtung der Schussfäden. Beim Erreichen der Schussfäden erzeugen intralaminare Risse sogenannte Meta-Delaminationen (Abbildung 3-16). Diese Schadensform tritt innerhalb einer Gewebereinheitszelle auf. Die Kopplung von intralaminaren Rissen kann zu einer Spannungserhöhung an der Grenzfläche zwischen einem einzelnen Schussfaden und der Matrix führen. Aufgrund der stark lokal konzentrierten Spannung kann es an der Randzone der Schussfäden zum Brechen tragender Fasern kommen. Dies geschieht jedoch nur selten. Im Allgemeinen führen intralaminare Risse sowie Meta-Delaminationen nur zu einem leichten Abfall der Steifigkeit. Daggumati et al. haben diese Steifigkeitsdegradation mittels Zugversuchen ge-

messen. Im Ausgangszustand betrug der E-Modul 59 GPa, und nach einigen 1000 Zyklen war er auf 57,5 GPa abgefallen. Bezogen auf den Ausgangszustand ergibt sich damit eine Verringerung um etwa 3%.

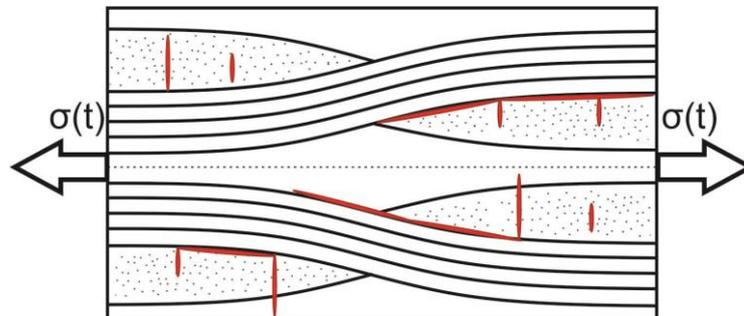


Abbildung 3-16. Schematische Darstellung von intralaminaren Rissen und Meta-Delaminationen verursacht durch dynamische Zugschwellbeanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe

Im späteren Verlauf entstehen zusätzliche interlaminare Risse (siehe Abbildung 3-17). Diese breiten sich senkrecht zwischen zwei Gewebeeinheitszellen aus.

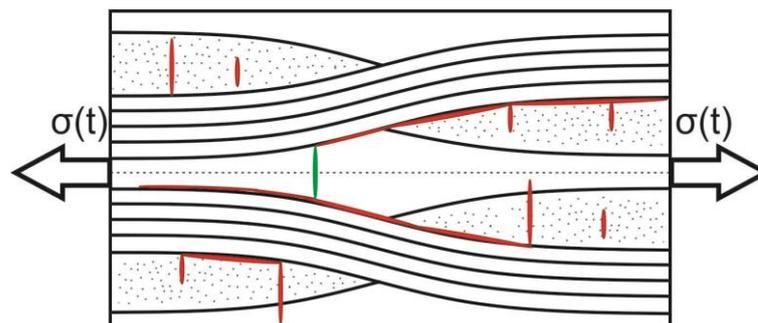


Abbildung 3-17. Schematische Darstellung der Entstehung eines interlaminaren Risses (grün) aufgrund der Verbindung zweier Meta-Delaminationen benachbarter Gewebeeinheitszellen verursacht durch dynamische Zugschwellbeanspruchung (5 Hz) in einem 2D-Gewebe

Findet eine Kopplung zwischen intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen statt, entstehen große flächige Delaminationen (siehe Abbildung 3-18). Diese führen wiederum zu erhöhten Spannungskonzentrationen an den tragenden Fasern, die zum Bruch eines Schussfaserbündels und zum Versagen eines Bauteils führen können.

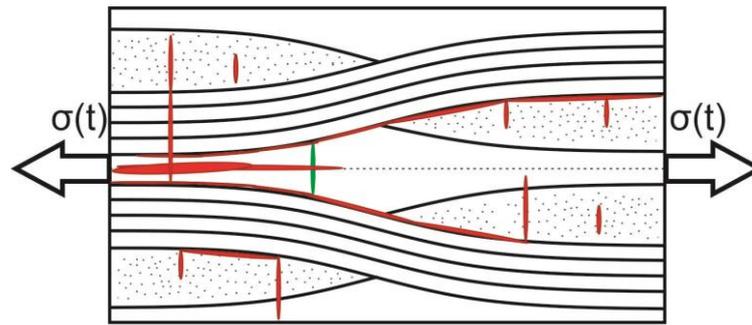


Abbildung 3-18. Schematische Darstellung einer flächigen Delamination verursacht durch die Koppelung von intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen

Bei der Erhöhung der maximalen Spannung auf über 500 MPa (69 % der Mindestzugfestigkeit  $R_m$ ) bei konstanter Beanspruchungsfrequenz von 5 Hz konnten Daggumati et al. im Schadensablauf keine Unterschiede erkennen. Longitudinale Faserablösungen in den Schussfaserbündeln, wie sie unter quasi-statischer Zugbeanspruchung auftreten, konnten bei zyklischer Belastung nicht identifiziert werden.

Der Geometrieinfluss der Gewebeeinheitszelle auf das Schadensbild wurde in den Arbeiten von Daggumati et al. [Daggumati, 13] nicht untersucht. Es ist davon auszugehen, dass die Maschenöffnung, die Rovingbreite  $a$  und die Schichtdicke  $h$  auch unter dynamischer Beanspruchung den Schadensverlauf beeinflussen. Der Erkenntnisstand diesbezüglich in der Literatur ist jedoch noch sehr gering.

### 3.2.3 Einfluss der Faser-Matrix Grenzschicht auf das Ermüdungsverhalten

Nicht nur der strukturelle Aufbau eines CFK Halbzeuges ist entscheidend für die widerstandsfähigkeit gegenüber Ermüdungsschäden. Eine erhöhte Haftfähigkeit der Matrix an der einzelnen Faser kann die Lebensdauer eines CFK- Bauteils deutlich erhöhen. Zusätzlich nimmt der Herstellungsprozess Einfluss auf die Mikrostruktur und die Rissinitiierung in der Matrix. Die Verteilung von kristallinen und amorphen Gebieten in der Matrix kann den Verlauf eines Risses in der Matrix beeinflussen. Zusätzlich kann die Diffusion von Feuchtigkeit in die Matrix zu einem veränderten Relaxations- und Kriechverhalten führen. Die Kombination von großen Beanspruchungsamplituden und hohen Feuchtigkeitsgehalten kann zu einem veränderten Schadensbild führen. Eine große Beanspruchungsfrequenz führt zu einer erhöhten Reibung an der Faser-Matrix Grenzschicht und beeinflusst damit das einsetzende Risswachstum. Ein weiterer wesentlicher Parameter, der Einfluss auf die Ermüdung nimmt, ist das Spannungsverhältnis  $R$  der mechanischen Beanspruchung. Eine reine Zugbeanspruchung verursacht eine große Rissöffnungszone bei gleichzeitig geringer Spannungskonzentration an der Faser-Matrix-Grenzfläche. Demgegenüber erzeugt eine reine Druckspannung eine kleine Rissöffnungszone an der einzelnen Faser mit einer hohen lokalisierten Spannungskonzentration.

on [Galiotis, 03]. Alle zuvor genannten Einflussparameter werden im folgenden Kapitel genauer erörtert.

### 3.2.3.1 Einfluss der Adhäsionskräfte

Die Lebensdauer eines Verbundes hängt maßgeblich von den Adhäsionskräften zwischen Faser und Matrix ab. In den Arbeiten von Drzal et al. [Drzal, 93; Galiotis, 03] konnte aufgrund von verbesserten Adhäsionskräften eine erhöhte Lebensdauer bei niederfrequenten dynamischen Versuchen unter Druckbeanspruchung festgestellt werden. Hohe Adhäsionskräfte können zusätzlich spröde Grenzschichten erzeugen und damit zu einer Verstärkung der einzelnen Faser führen. Durch verbesserte Adhäsion wurden sogenannte „Microbuckling“ Effekte verhindert, die unter Druckspannungen entstehen können.

In der Klebtechnik unterscheidet man zwischen Adhäsions-, Grenzschicht- und Kohäsionsbruch. Ist die Klebeverbindung zwischen Adhäsiv und Adhärent extrem schwach, kommt es zu einer vollständigen Trennung der Verbindungspartner (Abbildung 3-19 a). Allerdings ist dieser Bruch nur theoretisch vorstellbar, da in Wirklichkeit Polymerpartikel an der Faser haften bleiben. Dies wird als Grenzschichtbruch bezeichnet (Abbildung 3-19 b). Ist die Adhäsivkraft stärker als die Kohäsionskraft, kommt es zu einem Riss im Polymer. In diesem Fall wird von einem Kohäsionsbruch gesprochen (Abbildung 3-19 c).

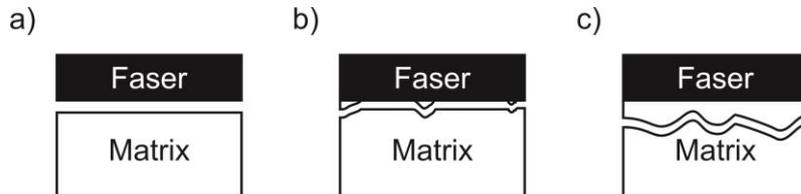


Abbildung 3-19. Schematische Darstellung von Faser-Matrix-Ablösungen a) Adhäsionsbruch, b) Grenzschichtbruch und c) Kohäsionsbruch

Die Oberflächenbehandlung und die aufgetragenen Haftvermittler nehmen eine wichtige Rolle im Klebverbund ein. In multiaxialen Verbunden konnten Song und Otani [Song, 97; Galiotis, 03] feststellen, dass hohe Grenzflächenkräfte effektiv die Entstehung und das Wachstum von Rissen verhindern.

Eine standardisierte Oberflächenbehandlungsmethode von Kohlenstofffasern ist das elektrische Anodisieren. Hierbei werden zusätzliche Sauerstoffatome an der Oberfläche angebracht, die eine chemische Adsorption der Matrix erlauben. Zusätzlich können verschiedene Haftvermittler auf die Faser aufgebracht werden, um eine Erhöhung der Klebkraft zu erreichen.

Deng und Ye berichteten, dass oberflächenbehandelte Kohlenstofffasern mit guten Adhäsionseigenschaften deutlich bessere Ermüdungseigenschaften unter hohen Spannungen besitzen als solche Fasern ohne Oberflächenbehandlung. Es zeigte sich jedoch, dass diese Verbes-

serung der Adhäsionskräfte bei kleinen Spannungen eine untergeordnete Rolle spielt [Deng, 99; Galiotis, 03].

Zusätzlich wird die Lebensdauer von CFK-Werkstoffen durch die Aushärtetemperatur, Herstellungsdauer, Kühlrate, sowie Auslagerungszeit während des Produktionsprozesses beeinflusst. Polymere, vor allem Thermoplaste, reagieren empfindlich auf den Herstellungsablauf. Ein großer kristalliner Anteil in der Polymermatrix wirkt sich positiv auf die elastischen Eigenschaften aus [Bergmann, 08]. Jedoch ist nicht nur alleine die Kristallinität entscheidend, sondern auch die Struktur, Verteilung und Größe der kristallinen Strukturen. Bei Thermoplasten bilden sich Strukturen die Malteserkreuzen ähneln. Diese werden als Sphärolite bezeichnet. Je geringer die Kühlrate, desto größer werden die Sphärolite. Ye et al. untersuchten den Einfluss der Sphärolitgröße auf das Bruchverhalten. Durch die Änderung des Herstellungsablaufs konnten sie bei  $0^\circ$  unidirektionalen Glasfaserkompositen mit Polypropylenmatrix (GF-PP) Sphärolite mit einer Größe von  $10\ \mu\text{m}$  bis zu  $200\ \mu\text{m}$  Durchmesser bei gleichbleibendem Kristallinitätsgrad erzeugen. Das mechanische Verhalten und das Bruchverhalten änderten sich aufgrund der unterschiedlichen Morphologie dabei deutlich. Unter einer quasi-statischen Zugbeanspruchung zeigten Ye et al., dass in matrixreichen Gebieten mit kleinen Sphäroliten große plastische Verformungen stattfanden. Dagegen wurde eine glatte ebene Kohäsionsbruchstelle bei großen Sphäroliten mit geringerer Bruchzähigkeit festgestellt. Nahe der Faser verlief der Riss entlang der Grenzfläche Faser/Matrix, in den matrixreichen Gebieten zwischen den Sphäroliten. Die Autoren sprechen in diesem Zusammenhang vom intersphärolitischem Risswachstum [Ye, 95]. In den Arbeiten von Bureau et al. [Bureau, 02; Galiotis, 03] wurde zusätzlich das Ermüdungsverhalten ( $f = 5\ \text{Hz}$ ,  $R = 0,1$ ) von  $0^\circ$ -unidirektionalen Glasfaserkompositen (GF-PP) untersucht. Sie zeigten, dass der amorphen Phase in der Matrix eine Schlüsselrolle zukommt, da in diesen Bereichen das Risswachstum während der Ermüdung einsetzt. Unter normalen Prozessbedingungen (Formgebungstemperatur  $T = 200\ ^\circ\text{C}$ , Haltezeit  $t = 5\ \text{min}$ , Kühlrate  $\Delta T = 10\ \text{K} / \text{min}$ ) konnten amorphe Phasen mit hohen kohäsiven Kräften zwischen den Sphäroliten im inter-sphärolitschen Bereich erzeugt werden. Ermüdungsriss entstanden in der Nähe der Grenzschicht zwischen Faser und Matrix in den inter-sphärolitschen Bereichen. Der Widerstand gegen die Ausbreitung von interlaminaeren Ermüdungsrissen ist hierbei am größten. Im Fall von langsamen Kühlraten ( $\Delta T = 0,5\ \text{K} / \text{min}$ ) entstanden große amorphe Regionen, die nur schwache kohäsive Kräfte zwischen den Sphäroliten ausbilden. Der Widerstand gegenüber Ermüdungsrissen nahm hierdurch deutlich ab.

### 3.2.3.2 Umwelteinflüsse

Hohe Temperaturen, Feuchtigkeit, Säuren, Basen, Salze, Feuer und UV-Strahlung führen zu einer Schädigung des Werkstoffs [Neitzel, 04]. In der Realität treten diese Effekte in Kombination auf und führen zu einer Verschlechterung der physikalischen Eigenschaften des Verbundes, sowie einer Grenzschichtschwächung zwischen Faser und Matrix.

Feuchtigkeit beeinflusst das Kriech- und Relaxationsverhalten, führt zu Eigenspannungen, erzeugt einen osmotischen Druck und zersetzt die Polymermatrix und beschleunigt so die Ermüdung und verkürzt damit die Lebensdauer. Von der Oberfläche aus entstehen Feuchtigkeitsschäden die durch große lange Risse parallel zur freien Oberfläche sichtbar werden. Die Schadensart hängt maßgeblich von der mechanischen Beanspruchung ab. Bei geringer mechanischer Beanspruchung sind die Schäden durch chemische Reaktionen gering, während unter großen Beanspruchungen beschleunigtes, spannungsinduziertes Risswachstum einsetzt. Risse, Leerräume, selbst Mikrorisse ziehen Feuchtigkeit an und speichern diese. Die Kohlenstofffasern verhalten sich relativ immun gegenüber der Feuchtigkeit. In der Matrix kann es aufgrund von Feuchtigkeit zu einer Plastifizierung, zur Hydrolyse und zum Adhäsionsversagen zwischen Faser und Matrix kommen [Böer, 13]. Besitzen Polymere ein geringes Wasseraufnahmevermögen wie zum Beispiel Polyphenylensulfid, sind diese Effekte nicht zu erwarten [Bond Laminates].

Liao et al. [Liao, 99; Galiotis, 03] untersuchten die Umwelteinflüsse auf das Langzeitermüdungsverhalten von gezogenen Glasfaserkompositen mit einer Polyvinylester Matrix. Sie konnten zeigen, dass nur unter extremen Umwelteinflüssen (hohe Temperatur  $T > 75$  °C sowie Lagerung in Wasser und Salzwasser) ein starker Abfall der mechanischen Eigenschaften einsetzte. Dieser Effekt korreliert mit einer verkürzten Lebensdauer im Ermüdungsexperiment. Demgegenüber konnte kein starker Abfall der Steifigkeit von bei Raumtemperatur in Wasser gelagerten Proben festgestellt werden.

Das zyklische thermische Ermüdungsverhalten eines multiaxialen Laminates  $[0_2/90_3/0_2]$  bestehend aus einer thermoplastischen Polyetheretherketon-Matrix (CF-PEEK) wurde in der Arbeit von Kobayashi et al. untersucht [Kobayashi, 03]. In ihren Untersuchungen zeigten sie, dass hohe periodisch auftretende thermische Temperaturwechsel ( $T_{\min} = -196$  °C bis  $T_{\max} = 150$  °C) vor allem transversale Risse erzeugen. Die Risse entstanden zuerst an der freien Oberfläche und wuchsen danach in die Probe hinein.

### 3.2.3.3 Art der Ermüdungsbeanspruchung

Der Einfluss der Grenzschicht auf das Ermüdungsverhalten wurde bereits in den obigen Abschnitten genauer beschrieben. Jedoch spielt auch die Art und Weise, wie die Ermüdungsbeanspruchung aufgebracht wird, eine Rolle. Parameter wie Frequenz, Mittelspannung, Amplitude, Beanspruchungsrichtung sowie Probengeometrie beeinflussen das Ermüdungsverhalten und damit das Schadensbild maßgebend.

In den Arbeiten von Gao und Zhou [Gao, 99; Galiotis03] wurde gezeigt, dass die Reibung der Grenzschicht eine wichtige Rolle bei der Faser-Matrix-Ablösung und dem damit einsetzenden Risswachstum spielt. Mit zunehmender Reibung kommt es zu einer größeren Ablösungsgeschwindigkeit. Des Weiteren untersuchten Nayfeh et al. [Nayfeh, 99; Harris], den Einfluss der Beanspruchungsfrequenz auf das Ermüdungsverhalten. Es zeigte sich, dass bei konstanter

Beanspruchungsamplitude mit zunehmender Frequenz eine Versteifung sowie ein Anstieg der Spannung im Material einsetzen.

Das Verhältnis  $R$  zwischen der Zug- und Druckspannung beeinflusst zudem das Rissausbreitungsverhalten und damit den Widerstand gegenüber der Ermüdung. Gamstedt et al. [Gamstedt, 99] untersuchten dies an uni- sowie multiaxialen Glasfaserepoxydlegegen. Unter zyklischer Zugschwellbeanspruchung wurde eine geringere Schwächung des Verbundes erhalten als unter zyklischer Zug-Druckbeanspruchung. Lamine, die Fasern senkrecht zur Beanspruchungsrichtung besitzen, degradieren schneller unter zyklischer Zug-Druckbeanspruchung als unter zyklischer Zugschwellbeanspruchung. Dies liegt an der schnelleren Ablösung der Matrix an der Faser aufgrund einer stärker lokalisierten Rissspannung unter einer globalen Druckbeanspruchung (siehe Abbildung 3-20).

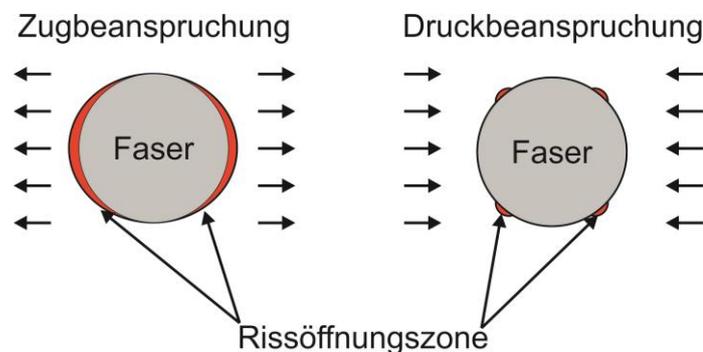


Abbildung 3-20. Schematische Darstellung der Rissöffnungszone an der Grenzfläche Faser- Matrix unter Zug- und Druckbeanspruchung nach [Gamstedt, 99]

### 3.2.4 Zusammenfassung der Schadensmechanismen in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden

Die Versagensart eines CFK-Bauteils hängt von vielen unterschiedlichen Einflüssen ab, die einzeln oder in Kombination auftreten. Die unterschiedliche Verarbeitung der Fasern und Anordnung in der Matrix führt zu unterschiedlichen Schadensabläufen. Bei UD-Gelegen sieht das endgültige Schadensbild identisch aus. Der Schadensablauf unterscheidet sich bei quasi-statischer oder dynamischer Beanspruchung. Bei quasi-statischer Beanspruchung ist ein definierter Schadensablauf zu erkennen. Durch das Aufeinandertreffen von primären und sekundären Rissen entstehen große lokale Spannungsfelder. Diese bilden sich zu einer lokal delaminierten Region aus, die zum Riss der tragenden Fasern und zum Versagen des Bauteils führt. Im Gegensatz hierzu ergibt sich bei dynamischer Beanspruchung ein anderer Ablauf der Schadensentstehung. Aufgrund eines plötzlichen Anstiegs einer kritischen Spannung setzt unter dynamischer Beanspruchung eine Kombination von Schadensmechanismen ein. Diese Kombination ist für das Reißen tragender Fasern und direkt anschließendem Sprödbbruch verantwortlich.

Der Schadensablauf in 2D-Geweben unterscheidet sich deutlich von dem eines UD-Geleges. Der Aufbau einer Gewebeeinheitszelle nimmt Einfluss auf den zu erwartenden Ablauf der Schädigung. Unter quasi-statischer Zugbeanspruchung treten zuerst longitudinale Faserablösung der Schussfäden gefolgt von intralaminaren Rissen in den Kettfaserbündeln auf. Das Versagen des Bauteils erfolgt durch das Reißen von tragenden Schussfasern. Eine dynamische Beanspruchung lässt die ersten Risse im Kettfaserbündel entstehen (intralaminare Risse). Diese wachsen vom Inneren des Kettfaserbündels in Richtung von Polymeransammlungen oder in Richtung der Schussfäden. Erreichen intralaminare Risse die Schussfäden entstehen sogenannte Meta-Delaminationen. Verbinden sich zwei Meta-Delaminationen zweier unterschiedlicher Gewebeeinheitszellen bildet sich ein interlaminares Riss. Durch die Kopplung von intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen entstehen große flächige Delaminationen. Das Versagen des Bauteils erfolgt durch das Reißen von tragenden Schussfasern. Longitudinale Ablösungen entlang der Schussfäden sind nicht zu beobachten.

Der Widerstand eines CFK-Bauteils gegenüber der Ermüdung hängt maßgebend von der Leistungsfähigkeit der Faser-Matrix-Grenzschicht ab. Hohe Adhäsionskräfte wirken versteifend und verhindern das Entstehen von Faser-Matrix-Ablösungen. Zusätzlich ist es möglich, den Widerstand gegenüber der Ausbreitung von interlaminaren Rissen in der Matrix durch das gezielte Einstellen einer Mikrostruktur zu erhöhen. Umwelteinflüsse wie Feuchtigkeit, Temperatur etc. können das Ermüdungsverhalten negativ beeinflussen.

Beanspruchungsfrequenz, Amplitude, Spannungsverhältnis, etc. haben zusätzlich Auswirkung auf das Ermüdungsverhalten. In der Literatur gibt es hingegen nur wenige Informationen über den Einfluss dieser Parameter. Bekannt ist jedoch, dass eine größere Beanspruchungsfrequenz zu einer zusätzlichen Versteifung im Material führen kann. Des Weiteren entstehen unter Druckbeanspruchung an der Faser-Matrix Grenzfläche kleinere Rissöffnungszone, in denen eine erhöhte Spannungskonzentration erzeugt werden kann. Diese Spannungserhöhung ist für eine schnellere Rissinitiierung in der Matrix verantwortlich.

### **3.3 Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Fehler- und Materialcharakterisierung von Ermüdungsschäden in Kohlenstofffaserkunststoffverbunden**

In der Regel ist davon auszugehen, dass in CFK-Bauteilen bereits im Ausgangszustand Fehler vorhanden sind. Diese können durch den Herstellungsprozess oder die unsachgemäße Handhabung des Bauteils während der Weiterverarbeitung entstehen. Der Großteil der hierbei entstehenden Fehler sind ungefährlich und werden schon in der konstruktiven Auslegung berücksichtigt. Jedoch können große Fehler wie Delaminationen, Faserrisse etc. zu einem frühzeitigen, katastrophalen Versagen des Bauteils führen. Ob ein Fehler ein CFK-Bauteil ungeeignet für den späteren Einsatz werden lässt, hängt von mehreren Parametern wie zum Beispiel der Art, Größe und Position des Fehlers ab. Aus diesem Grund ist es wichtig, Fehler

zu detektieren, deren Art festzustellen und damit die Qualität des Bauteils gewährleisten zu können. Zerstörungsfreie Prüfverfahren (zFP) erlauben die Untersuchung und Charakterisierung von Bauteilen ohne diese zu beschädigen. Hierbei kann zwischen sogenannten lokalen Prüftechniken, die einen Einblick ins Innere des Prüfobjekts erlauben, sowie globalen Prüftechniken, die eine Auskunft über den allgemeinen Zustand der Probe geben, unterschieden werden. Wichtige Vertreter für lokale Prüftechniken sind der Ultraschall und die Röntgencomputertomografie. Für die globale qualitative Abschätzung des Bauteilzustands ist die Resonanzspektroskopie ein Beispiel.

### 3.3.1 Ultraschallprüfung von CFK Strukturen

Ultraschall ist eine der weitverbreitetsten Techniken für die zerstörungsfreie Detektion sowie Untersuchung von Ermüdungsschäden in CFK Bauteilen. Die zwei meist verwendeten Verfahren sind die Impuls–Echo- sowie die Transmissionsmessung (siehe Abbildung 3-21).

Bei der Impuls–Echo-Messung (siehe Abbildung 3-21 a) sendet ein Ultraschallprüfkopf mit Hilfe eines Koppelmediums eine Ultraschallwelle durch das zu untersuchende Prüfobjekt. An der Rückwand wird der Schall durch die Änderung der spezifischen akustischen Impedanz reflektiert. Die zurücklaufende Welle wird mit dem Sendeprüfkopf detektiert. Der transmittierte Anteil der Welle geht hierbei verloren. Demgegenüber wird bei der Transmissionsmessung (Abbildung 3-21 b) dieser Anteil mittels eines zusätzlichen Wandlers (Empfänger) aufgenommen. Weiterführende Informationen zu den Verfahren finden sich in folgenden Quellen [Deutsch, 90].

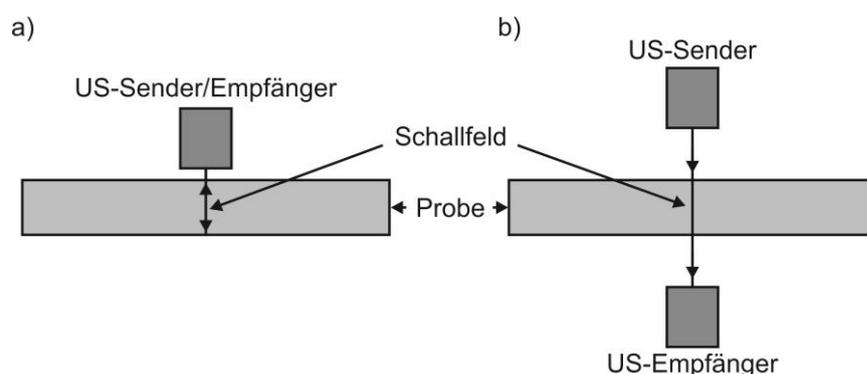


Abbildung 3-21. Schematischer Aufbau einer a) Impuls-Echo-Messung sowie b) Transmissionsmessung

Bewegt sich eine akustische Welle durch ein CFK-Laminat, so kommt es zu einer Schwächung der Ultraschallwelle aufgrund von Streuung an Faser-Matrix-Grenzflächen [Mouritz, 03]. Diesen Sachverhalt macht man sich unter anderem im späteren Kapitel 4.3 zu Nutze, um Schäden wie Meta-Delaminationen, interlaminare Risse und Delaminationen sichtbar zu machen.

### 3.3.2 Röntgencomputertomografie

Bei der Röntgencomputertomografie wird das Prüfobjekt mittels Röntgenstrahlung untersucht (prinzipieller Aufbau siehe Abbildung 3-22). Die Röntgenstrahlung dringt in die Probe ein, und ein Teil der Strahlung wird hierbei absorbiert. Auf der Rückseite wird der nicht absorbierte Strahlenanteil mittels eines Röntgendetektors detektiert. Der Anteil der absorbierten Energie hängt vom spezifischen Absorptionskoeffizient der unterschiedlichen Bestandteile des Prüflings ab. Der Unterschied zwischen dem Absorptionskoeffizient von Faser und Matrix ist sehr gering. Aus diesem Grund ist es kaum möglich, solche Strukturen in einem Computertomografiebild (CT-Bild) zu unterscheiden. Jedoch ist der Absorptionsunterschied zwischen einem Riss und der Faser-Matrix-Struktur groß genug, um diesen sichtbar zu machen. Gegenüber konventionellen Röntgenverfahren werden bei der Röntgencomputertomografie Absorptionsprofile der Probe aus vielen Richtungen erstellt. Später lässt sich am Computer eine Volumenstruktur rekonstruieren. Um den Kontrast zusätzlich zu vergrößern, besteht die Möglichkeit, die Proben vor der Messung in eine röntgenstrahlenundurchlässige Flüssigkeit zu tauchen. In den Arbeiten von F. Gao et al. [Gao, 99] wird für die Untersuchung von 2D-Geweben eine wässrige Zinkiodid-Methanollösung (Kontrastmittel) vorgeschlagen. Die Flüssigkeit kann in die oberflächennahen Risse eindringen und erlaubt einen besseren Kontrast [Mouritz, 03]. Die Röntgencomputertomografie erlaubt die Detektion von intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen, interlaminaren Rissen sowie große Faserrisse im inneren von CF-PPS Proben. Die CT-Aufnahmen mit einer maximalen Auflösungsgrenze der in dieser Arbeit verwendeten Anlage liegt bei ca.  $9\ \mu\text{m}$  für CF-PPS Proben einer Kantenlänge von ca. 1 cm. Die experimentellen Ergebnisse sind in Kapitel 4.3 und Kapitel 5.1 zu sehen.

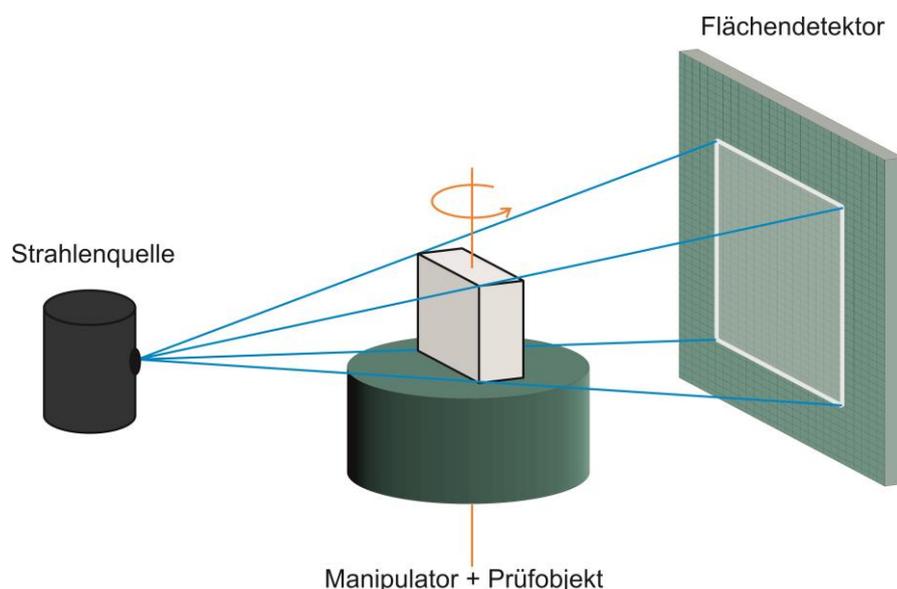


Abbildung 3-22. Schematischer Aufbau einer Röntgencomputertomografiemessung mit Strahlenquelle, drehendem Manipulator, Prüfobjekt sowie Flächendetektor

### 3.3.3 Resonanzspektroskopie

Die Resonanzspektroskopie macht sich die Eigenschaft zu Nutze, dass ein schwingungsentkoppelter Prüfling nach einer mechanischen Anregung in seinen Resonanzfrequenzen schwingt. Die Resonanzfrequenzen korrelieren hierbei direkt mit den mechanischen Eigenschaften, der Geometrie, der Dichte und den Randbedingungen eines Prüfbjektivs. Diesen physikalischen Sachverhalt verwendet man unter anderem bei der Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten. Bei bekannter Geometrie und Dichte des Werkstoffs lassen sich die mechanischen Kennwerte aus analytischen Formeln ableiten. In dem Prüfling vorhandene Fehler in Form von Einschlüssen, Rissen etc. reduzieren die Resonanzfrequenzen.

Die Norm DIN EN ISO 12680-1:2007 beschreibt den Aufbau der Resonanzspektroskopie bestehend aus einem Impulsgeber, einem Auflager für das Prüfobjekt sowie einem Signalaufnehmer. Zur Datenaufzeichnung und -weiterverarbeitung sind ein Signalverstärker und ein Computer nötig. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 3-23 zu sehen. Weiterführende Literatur finden sich in den Quellen [Scherer, 12; DGZfP, 03].

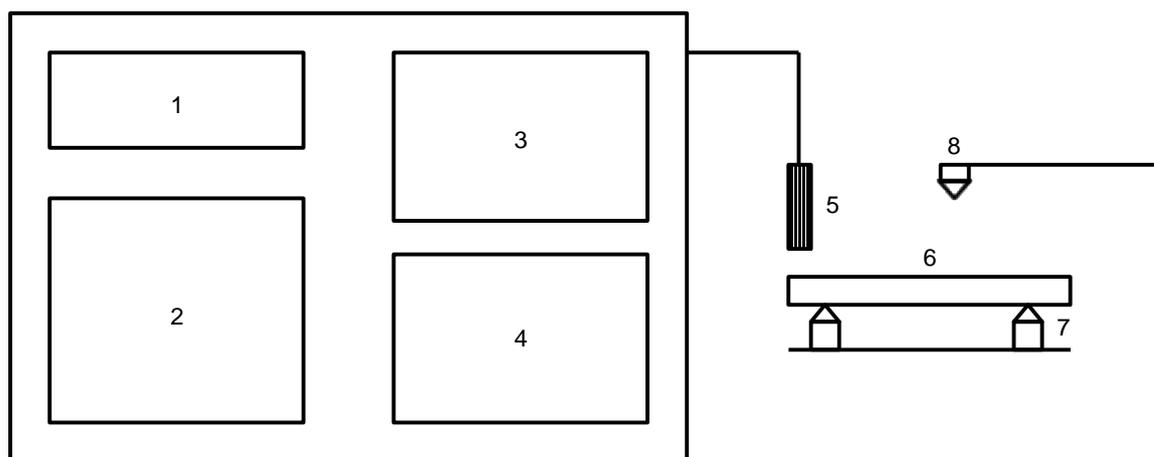


Abbildung 3-23. Allgemeiner schematischer Messaufbau der akustischen Resonanzanalyse: Die Probe (6) ist in zwei Punkten gelagert (Loslager) (7) und wird mit einem Impulsgeber (8) mechanisch, durch einen einzelnen Schlag angeregt. Die resultierende Schwingung wird vom Signalaufnehmer / Mikrofon (5) erfasst und nach anschließender Signalverstärkung (3) mit Hilfe eines Computers analysiert (4). Die gemessene Frequenz wird auf der Anzeige (1) dargestellt. Die Auswertung erfolgt mittels geeigneter Software (2), in Anlehnung an DIN EN ISO 12680-1:2007

Durch die Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren ist es möglich, Risse im Ausgangszustand sowie in verschiedenen Stadien der Ermüdung zu detektieren. Intralaminare Risse und Meta-Delaminationen, die vor allem im Frühstadium der Ermüdung auftreten, lassen sich global durch einen auftretenden Steifigkeitsabfall im CFK-Bauteil mit Hilfe der Resonanzspektroskopie feststellen. Zur lokalen Detektion und Charakterisierung der Ermüdungsschäden findet die Röntgencomputertomografie Verwendung. Später auftretende interlaminare

Risse, Delaminationen und Faserrisse lassen sich zusätzlich durch die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik auffinden.

### 3.4 Spektralanalyseverfahren zur Ermittlung von zeitlichen Änderungen in Ultraschallzeitsignalen

Die im vorherigen Abschnitt genannten zerstörungsfreien Prüfmethode können angewandt werden, wenn eine Entnahme der Probe aus der Beanspruchungseinheit erfolgt. Dies würde aber bedeuten, dass die Entstehungsphase von Ermüdungsschäden in der Probe während der Beanspruchung in der Ermüdungseinheit nicht nachvollzogen werden kann. Aus diesem Grund wird die hochfrequente zyklische Ultraschallbeanspruchung in der 3-Punkt Biegemaschine simultan zur Ultraschallprüfung genutzt. Die Oberflächenschwingung der CFK-Probe wird mittels Laservibrometer und die Schallabstrahlung mittels eines Mikrofons aufgenommen. Die hierbei ermittelten Zeitsignale werden mittels schneller Fourier-, Kurzzeit-Fourier- und Hilbert-Huang-Transformation ausgewertet. Die unterschiedlichen Spektralanalyseverfahren sollen dazu dienen, aufgrund des Ermüdungsprozesses veränderte Probeneigenschaften zu detektieren.

#### 3.4.1 Fourier-Transformation

Ein grundlegendes Verfahren zur Analyse von Zeitsignalen ist die Bestimmung des Frequenzinhalts. Die klassische Fourier-Transformation beschreibt den Frequenzinhalt eines stationären Zeitsignals  $x(t)$  anhand einer unendlichen Anzahl von Sinus- und Kosinus-Funktionen. Mathematisch lautet die Funktion wie folgt:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad 3-1$$

wobei  $t$  die Zeit [s] und  $\omega$  die Frequenz [1/s] ist.

Das Fourier-Spektrum beschreibt die Frequenzen, die sich in einem stationären Zeitsignal befinden. Handelt es sich jedoch um ein nicht-stationäres Signal, geht die Information bezüglich der zeitlichen Änderung der Frequenzen verloren. Um einen Zugang zu diesen Daten zu erhalten, findet die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) Verwendung. Das Konzept basiert auf einer Erweiterung der klassischen Fourier Transformation. Das nicht stationäre Zeitsignal wird in kleine feste Zeitfenster zerlegt (siehe Abbildung 3-24 a). In dem jeweiligen Zeitfenster wird die Fourier-Transformation angewendet, um den Frequenzinhalt zu bestimmen. Die Gesamtheit aller Spektren zeigt, wie sich das Spektrum in Abhängigkeit von der Zeit ändert (Abbildung 3-24 b).

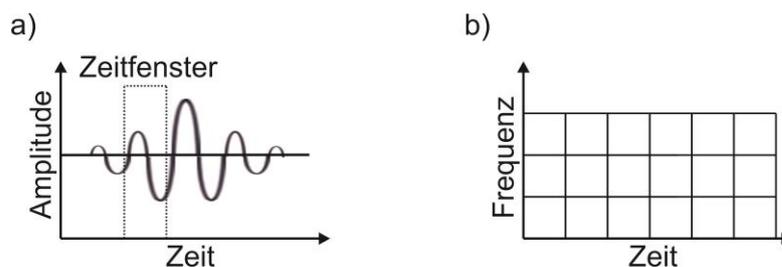


Abbildung 3-24. a) Prinzip der Zeitfensterzerlegung eines nicht stationären Zeitsignals und b) erhaltenem Kurzzeit-Fourier-Spektrum nach [Giurgiutiu, 08]

Um eine höhere Zeitauflösung zu erhalten, bietet es sich an, das Zeitfenster immer kleiner werden zu lassen. Jedoch ist dies nicht möglich, da kürzere Zeitsignale von Natur aus größere Frequenzbandbreiten besitzen. Dies lässt sich mittels des Unbestimmtheitsprinzips erklären. Dieses Prinzip sagt aus, dass das Produkt aus dem Zeitintervall und dem Frequenzintervall, bzw. Zeitauflösung  $\Delta t$  und Frequenzauflösung  $\Delta \omega$ , einen endlichen Wert besitzen muss.

$$\Delta \omega \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \quad 3-2$$

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein Anstieg in der Frequenzauflösung mit einem Abfall in der Zeitauflösung einhergeht und umgekehrt. Weitere Details dieser und weiterer Signal-auswertetechniken sind in dem Werk *“Signal Processing and Pattern Recognition for PWAS-based Structural Health Monitoring”* von V. Giurgiutiu zu finden [Giurgiutiu, 08].

### 3.4.2 Hilbert-Huang-Transformation (HHT)

Obwohl die Kurzzeit-Fourier-Transformation in der Lage ist, die zeitliche Änderung des Frequenzinhalts eines Zeitsignales aufzuzeigen, besitzt diese Technik den Nachteil des Unbestimmtheitsprinzips. Im Fall eines tieffrequenten Zeitsignals kurzer Dauer stößt diese Art von Auswertetechnik an ihre Grenzen, da das zu untersuchende Zeitfenster mindestens eine Schwingungsperiode enthalten muss. Aus diesem Grund wird eine weitere Technik verwendet, die sogenannte Hilbert-Huang-Transformation (HHT). Das Prinzip der HHT ist in Abbildung 3-25 in einem Flussdiagramm beschrieben. Gegenüber der Fourier-Transformation ist die HHT ein empirisches Verfahren. Grundlegender Teil ist hierbei die empirische Modenzerlegung (EMD) eines nichtstationären Zeitsignals  $x(t)$  in seine sogenannten intrinsischen Modenfunktionen  $c_i$  (IMF). Dies geschieht mit Hilfe der sogenannten empirischen Modenzerlegung EMD. Eine IMF repräsentiert einen speziellen von dem Zeitsignal  $x(t)$  abgeleiteten Oszillationsmode. Laut Definition ist eine IMF eine Funktion mit der gleichen Anzahl an Extrema und Nullstellen, bei der die Einhüllende symmetrisch zur Zeitachse ist. Mit der IMF wird eine Hilbert-transformationsfähige Funktion erzeugt. Für jede berechnete IMF wird

die Hilbert-Spektralanalyse ausgeführt, die ein zeitabhängiges analytisches Signal  $Z(t)$  mit Realteil  $X(t)$  und Imaginärteil  $Y(t)$  ergibt. Mittels dieser Funktion ist es möglich, die Momentanphase  $\theta(t)$ , Momentanfrequenz  $\omega(t)$  und Momentanamplitude  $a(t)$  zu berechnen. Werden diese Informationen zusammengefügt, ergibt sich ein Hilbertspektrum  $H_i(\omega, t)$  für die jeweilige  $i$ -te IMF. Dieser Vorgang wird  $i$ -mal wiederholt, bis sich die einzelnen Hilbertspektren  $H_i(\omega, t)$  zu einem kombinierten Hilbertspektrum  $\sum_i H_i(\omega, t)$  zusammenfassen lassen. Weitere Informationen bzgl. dieses Verfahrens finden sich unter anderem im Buch „Hilbert-Huang Transform and its Applications“ [Huang, 05].

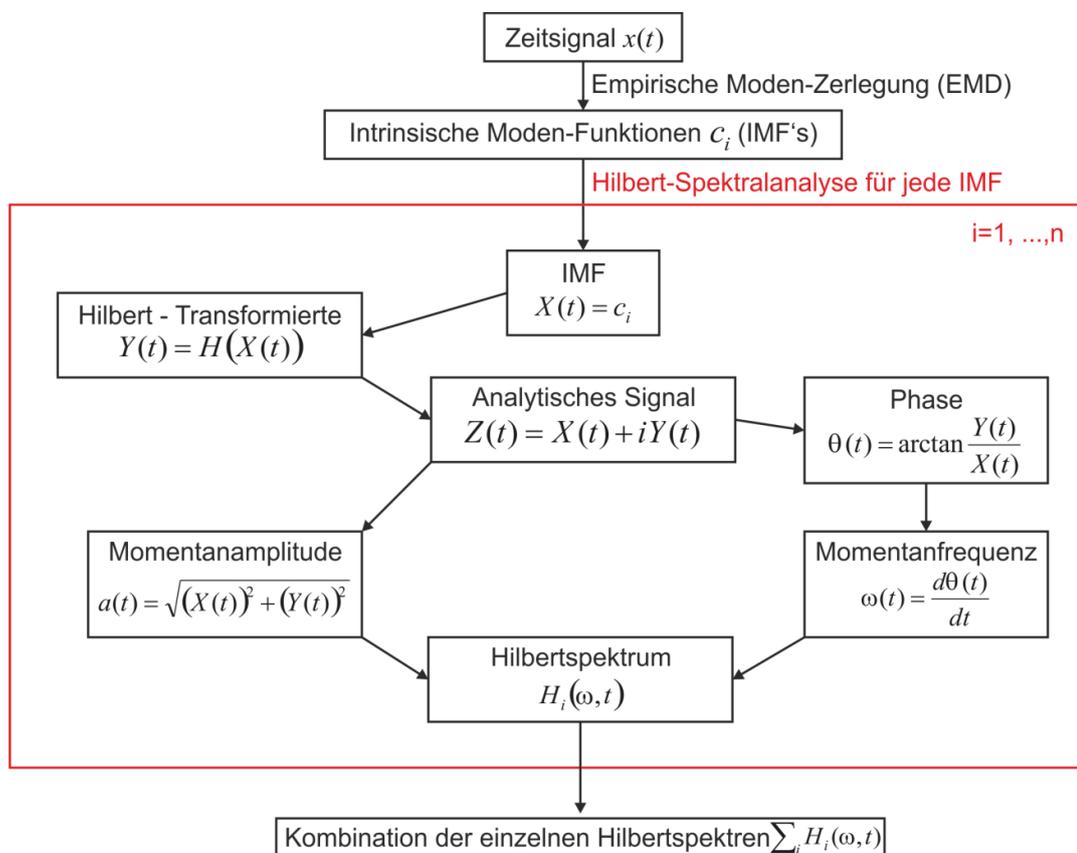


Abbildung 3-25. Flussdiagramm mit der Funktionsweise der Hilbert-Huang Transformation

Durch die Implementierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren mit entsprechenden Online-Signalauswerteroutinen in die Hochfrequenz-Ultraschallprüfanlage wird eine in-situ Beobachtung der Schadensentwicklung der CFK Proben ermöglicht. In verschiedenen Schadensstadien werden die Proben zusätzlich mit konventionellen zerstörungsfreien Prüfmethode überprüft und charakterisiert. Die hierbei erhaltenen Daten werden kombiniert und ausgewertet, um die Schadensmechanismen in hochfrequent beanspruchten CFK-Bauteilen festzustellen. Im folgenden Kapitel wird der experimentelle Aufbau für die Ermüdungsuntersuchungen genauer beschrieben.

## 4 Experimenteller Aufbau und Realisierung der Hochfrequenz-Ermüdungsuntersuchungen

Zur Untersuchung der Ermüdung von CFK-Materialien bei hohen Beanspruchungsfrequenzen ( $f \approx 20$  kHz) sowie bei hohen Lastwechselspielzahlen ( $N = 10^9$ ) in ökonomisch vertretbaren Zeiten wird eine neuartige 3-Punkt-Biegemaschine verwendet. Die hohe Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20,26$  kHz wird technisch mit Hilfe einer Ultraschall-Anregungsquelle realisiert. Als Untersuchungswerkstoff wurde ein 2D-Gewebe mit einer Köper (2/2)-Struktur und einer Polyphenylensulfid-Matrix verwendet. Vor dem Start der Ermüdungsuntersuchungen wurde das Probenmaterial hinsichtlich seiner dynamischen elastischen Eigenschaften charakterisiert. Die Geometrie der Probe wurde so ausgelegt, dass die Frequenz ihres ersten transversalen Biegemodes der Beanspruchungsfrequenz der Ermüdungseinheit entspricht. Dies ist notwendig, damit die Probe der Oszillation des Schwingersystems folgt. Der Auflagerabstand wurde so eingestellt, dass dieser dem Knotenabstand des Biegemodes entspricht, um ein Abheben der Probe zu verhindern.

Die hochfrequente zyklische Beanspruchung wird gleichzeitig als Ultraschallanregung zur zerstörungsfreien Online-Beobachtung der Materialermüdung genutzt. Die Oberflächenschwingung der Probe wird mit Hilfe eines Ein-Punkt-Laservibrometers ermittelt. Die Schallabstrahlung der Probe wird berührungslos mit Hilfe eines Mikrofons detektiert. Die gemessenen Zeitsignale werden mittels der schnellen-Fourier-, Kurzzeit-Fourier- und der Hilbert-Huang-Transformation untersucht. Hierdurch ist es möglich, den nichtlinearen Anteil und die zeitliche Änderung des Spektralinhalts eines Signals auf Schadensanzeichen in der Probe zu untersuchen. Im Ausgangszustand sowie während den Beanspruchungspausen werden die Proben zerstörungsfrei charakterisiert, um den Ablauf der Ermüdungsschäden in CFK-Bauteilen zu verstehen.

### 4.1 Die 3-Punkt-Biege-Ermüdungsanlage

Bei der 3-Punkt-Biege-Ermüdungsanlage (Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern) (Abbildung 4-1) handelt es sich um eine umgebaute Ultraschallschweißanlage des Herstellers Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG mit Sitz in Karlsbad. Die hohe Beanspruchungsamplitude wird mit Hilfe eines piezoelektrischen Konverters, eines Boosters und der Sonotrode (Beanspruchungseinheit) realisiert. Ein digitaler Ultraschallgenerator erzeugt eine hochfrequente elektrische Wechselspannung (20 kHz) mit einer Amplitude im kV-Bereich. Der Konverter kann hierdurch eine Amplitude von bis zu  $\pm 10$   $\mu\text{m}$  erzeugen. Der Booster sowie die Sonotrode verstärken diese Schwingungsamplitude rein mechanisch jeweils um den Faktor 2. Hierdurch wird eine theoretische Auslenkung von ca.  $\pm 40$   $\mu\text{m}$  reali-

siert. Der Booster und die Sonotrode bestehen aus einer ermüdungsfesten Titanlegierung, um ein Versagen der Komponenten während des Versuchs ausschließen zu können. Die Auflager bestehen aus gehärtetem rostfreiem Stahl. Der Radius der Sonotrode sowie der Auflager beträgt jeweils 5 mm. Der Auflagerabstand kann den zu untersuchenden Proben variabel angepasst werden. Die CFK-Probe wird durch eine statische Vorspannung beansprucht. Hierdurch wird ein ungewolltes Abheben der Sonotrode von der Probenoberfläche und eine unzulässige Temperaturerhöhung an der Probe verhindert. Am oberen Querhaupt sind das Ultraschallresonanzsystem, die Kühleinheit und die Auflagereinheit befestigt. Der Messtisch mit den Geräten für die zerstörungsfreien Messmethoden (Mikrofon, Laservibrometer und Infrarotkamera), der Datenerfassungs- und die Auswerteeinheit sind schwingungsentkoppelt am unteren Querhaupt montiert.

Für die Steuerung, Datenerfassung und -abspeicherung sowie zur instantanen Auswertung der Zeitsignale werden mehrere unterschiedliche Rechnersysteme verwendet. Zur Versuchssteuerung wird ein LabVIEW-Programm verwendet, das vom Lehrstuhl für Werkstoffkunde Kaiserslautern speziell für Ermüdungsversuche entwickelt wurde. Bei zwei von drei Rechnersystemen handelt es sich um Real-Time-Systeme, um Echtzeitsteuerung und instantane Auswertung zu gewährleisten. Zur Datenerfassung und -auswertung ist in einem Real-Time-System eine PCIe-Karte mit einer Vertikalauflösung von 14 bit und einer Abtastrate von 100 MS/s eingebaut. Zur Datenabspeicherung sowie als Benutzerschnittstelle wird ein Microsoft-Windows-Rechnersystem eingesetzt. In diesem auf Windows basierten Computer ist eine Datenerfassungskarte mit zwei Kanälen und einer Vertikalauflösung von 16 bit und einer Abtastrate von 500 kS/s eingebaut.

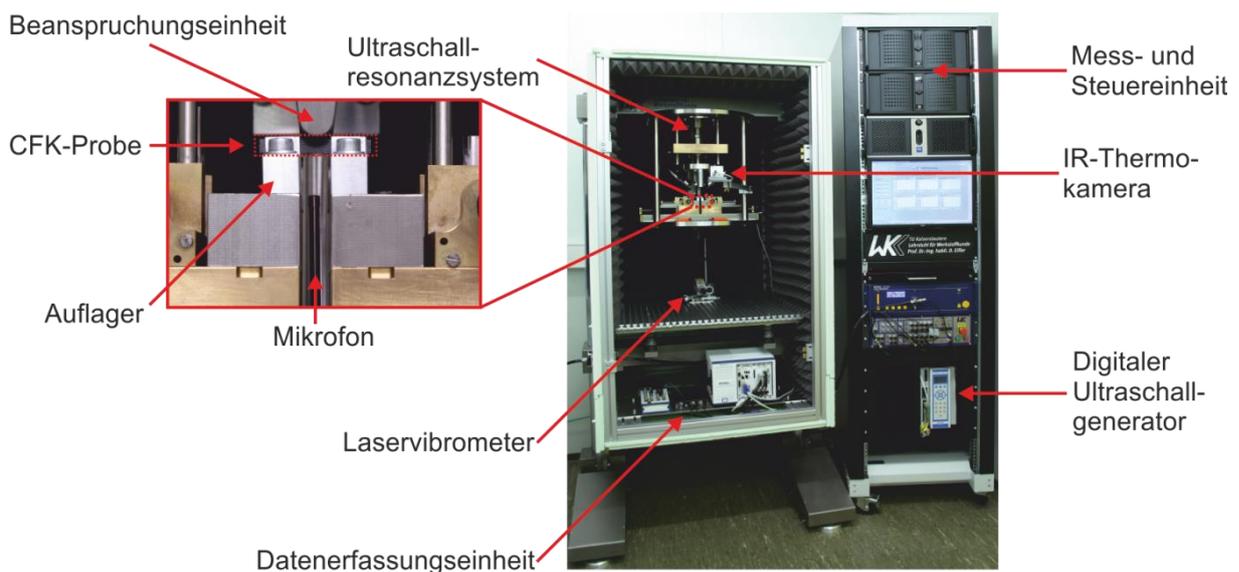


Abbildung 4-1. a) Neuentwickeltes Prüfsystem für Wechselbiegebeanspruchung in Kombination mit zerstörungsfreier Online-Überwachung zur Bewertung beginnender und fortschreitender Werkstoffermüdung; Standort: Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern; Bild aus [DFG, 13]

Der schematische Aufbau der 3-Punkt-Biegemaschine mit CFK-Probe und zerstörungsfreier Online-Überwachung ist in Abbildung 4-2 a zu sehen. Während jeder Ultraschallschwingung wird die Wegamplitude der CFK-Probe mittig an der Probenunterseite mit einem Laservibrometer CLV 2534 der Firma Polytec GmbH gemessen und überwacht. Die Abtastfrequenz liegt bei  $f = 3,2$  MHz. Der empfohlene Arbeitstemperaturbereich des Vibrometers liegt zwischen  $T = 5$  °C bis  $T = 40$  °C [Polytec, 10]. Die Schallabstrahlung der CFK-Probe wird durch ein breitbandiges Mikrofon ( $f = 10$  Hz bis 200 kHz) der Firma G.R.A.S. Sound & Vibration, Holte, Dänemark, detektiert. Das Mikrofon kann in einem Lautstärkebereich von 40 dB bis 174 dB bei einer Arbeitstemperatur von  $T = -40$  °C bis 150 °C arbeiten. Um den Anteil von Störgeräuschen (Probenkühlung, Raumgeräusche) möglichst gering zu halten, wird das Mikrofon direkt unterhalb der CFK-Probe angebracht. Die Probentemperatur wird an den Kontaktpunkten Probe / Auflager und Probe / Sonotrode während des Ermüdungsexperiments permanent durch ein IR-Thermografiesystem überwacht. An diesen Punkten ist aufgrund von Reibungskräften mit einem erhöhten Temperaturanstieg zu rechnen.

Um eine unzulässige Probenerwärmung ausschließen zu können, werden die VHCF-Experimente in einem Puls-Pause-Betrieb durchgeführt. Die Probentemperatur muss deutlich unterhalb der Glasübergangstemperatur ( $T_g$ ) liegen. In Abbildung 4-2 b sind Ultraschallpulse mit einer nominellen Pulsdauer von 100 ms, einem Puls-Pause-Verhältnis von 1:20 und dem typischen Anstieg der Probentemperatur schematisch zu sehen. Zur Minderung des Temperaturanstiegs während eines Ultraschallpulses werden die Proben mit gereinigter und getrockneter Druckluft gekühlt. Durch die Durchführung der Experimente im Puls-Pause-Betrieb und die Anwendung einer zusätzlichen Druckluftkühlung der Proben wird eine unzulässige Probenerwärmung verhindert.

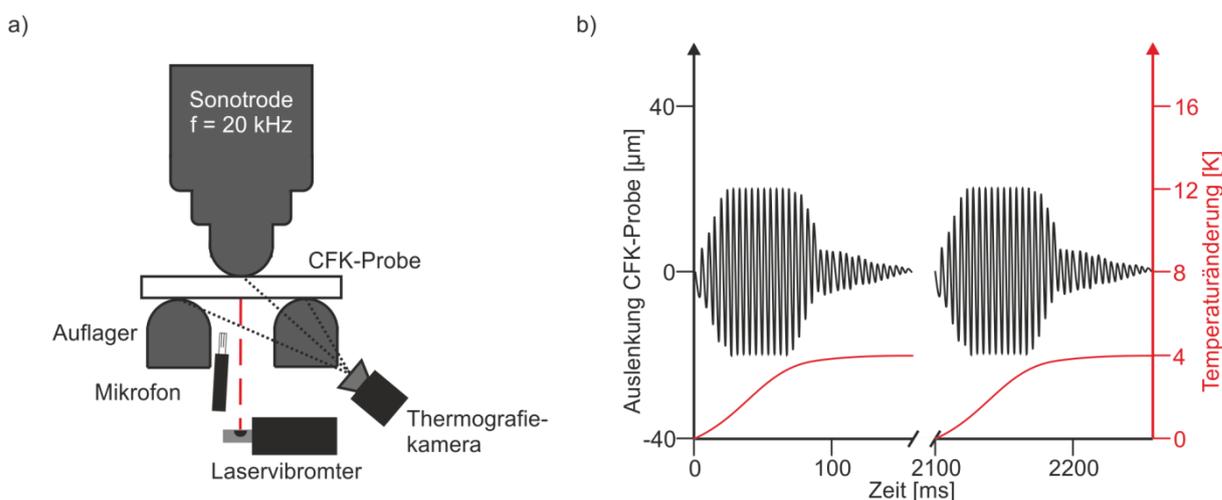


Abbildung 4-2. a) Schematischer Aufbau der 3-Punkt-Biegemaschine mit Thermografie-Kamera zur Temperaturüberwachung, Laservibrometer und Mikrofon zur Online-Überwachung der Oberflächenschwingung und Schallabstrahlung der Probe während eines Beanspruchungszyklus; b) schematisch gezeichnete Ultraschallpulse (schwarz) bei einer Pulsdauer von 100 ms und einem Puls-Pause-Verhältnis von 1:20, resultierende maximale Probenerwärmung während eines Ultraschallpulses (rot)

## 4.2 Werkstoff für die VHCF-Untersuchungen

Bei der Auswahl des Probenmaterials wurde Wert auf eine hohe und vor allem konstante Qualität des Organoblechs gelegt. Herstellungsfehler wie Einschlüsse, Faserverdrehungen, etc. würden sonst die Ermüdungsergebnisse unzulässig beeinflussen. Da Ermüdungsuntersuchungen über mehrere Jahre laufen, muss sichergestellt werden, dass Probenmaterial über einen langen Zeitraum nachbestellt werden kann. Der Aufbau eines Gewebes bestimmt nicht nur sein mechanisches Verhalten, sondern nimmt auch Einfluss auf die Schädigungsentwicklung während der Ermüdung (siehe Kapitel 3.2). Eine genauere Information über die anisotrope Struktur des CF-PPS Probenmaterials ist für eine erfolgreiche Probenauslegung in den VHCF-Untersuchungen notwendig. Um eine ausreichende Schwingamplitude der Probe zu erreichen, muss der erste transversale Biegemode unter einer 3-Punkt-Biegebeanspruchung bei der Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit liegen. Die elastischen Konstanten, die Probengeometrie und die Dichte bestimmen die Frequenz dieses Modes und damit die Durchführbarkeit der VHCF-Untersuchungen.

### 4.2.1 Probenmaterial und struktureller Aufbau

Bei dem ausgewählten Probenmaterial handelt es sich um ein kommerziell beziehbares Kohlenstofffaser-Polyphenylensulfid-Organoblech. Hersteller ist die Bond Laminates GmbH aus Deutschland. Der Werkstoff wird in vielen Ingenieur Anwendungen z. B. in der Luftfahrtindustrie oder im Freizeitbereich eingesetzt [Skrna-Jakl, 09]. Polyphenylensulfid (PPS) ist ein teilkristalliner Thermoplast mit einem Maximum der Glasübergangstemperatur von  $T_g = 90^\circ\text{C}$ . Seine Schmelztemperatur liegt bei  $T_m = 290^\circ\text{C}$ . Durch seine hervorragenden Eigenschaften wie zum Beispiel seine hohe Steifigkeit, chemische Beständigkeit, geringe Wasseraufnahme und Einsatztemperaturen von bis zu  $200^\circ\text{C}$ , gilt er als zugelassener Werkstoff in der Flugzeugindustrie. Die aus PAN hergestellten Kohlenstofffasern sind in einer Köper-(2/2)-Struktur miteinander verwoben (siehe Abbildung 4-3 a). Der Faservolumenanteil beträgt 54,8 %. Das hergestellte Laminat hat ein Oberflächengewicht von  $200\text{ g/cm}^3$ . Die Dicke des verwendeten Organoblechs beträgt  $d = 4\text{ mm}$ . Der Aufbau besteht aus 19 Lagen, wobei eine regellose Stapelanordnung mit und ohne Versatz (verschachtelt bzw. fluchtend) vorhanden ist. Die Dichte wird mit  $\rho = 1,54\text{ g/cm}^3$  angegeben und konnte experimentell bestätigt werden [Bond Laminates]. Die Ober- sowie Stirnfläche einer CF-PPS Probe ist in Abbildung 4-3 zu sehen.

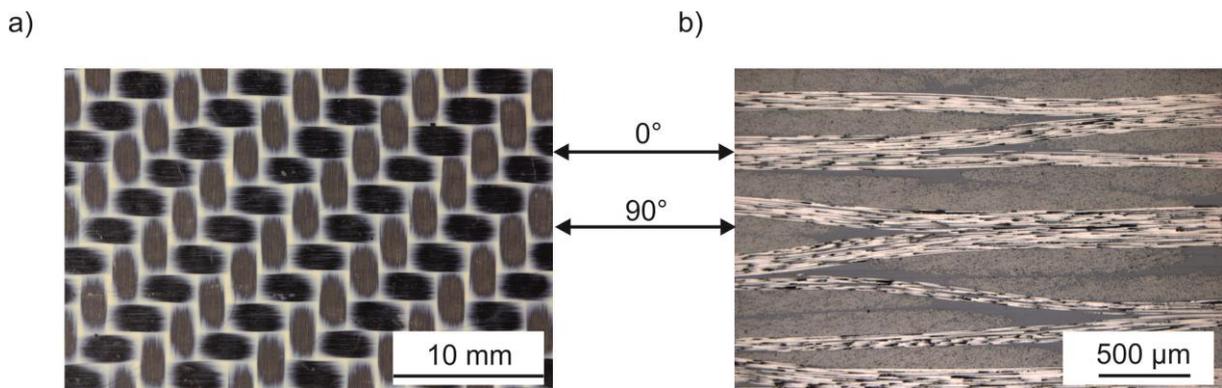


Abbildung 4-3. Optische Bilder einer CF-PPS Probe a) an der Oberfläche und b) an der Stirnfläche, Herstellerbezeichnung: Tepex® dynalite 207-C22/50% (Bond Laminates GmbH), Matrix: Polyphenylsulfid PPS (Thermoplast), orthotroper Lagenaufbau, 2D-Gewebe Körper-(2/2)-Struktur, Dichte  $\rho = 1,54 \text{ g/cm}^3$ , Dicke  $d = 4 \text{ mm}$ , Oberflächengewicht  $200 \text{ g/cm}^3$

Für die Fasern in  $0^\circ$ -sowie  $90^\circ$ -Richtung beträgt die Gewebeeinheitshöhe  $h$  im Durchschnitt  $210 \mu\text{m}$ . Das Roving besitzt in beiden Richtungen eine mittlere Höhe  $h_a$  von  $100 \mu\text{m}$  und eine durchschnittliche Breite  $a$  von  $1600 \mu\text{m}$ . Einen Unterschied der Welligkeit zwischen Kett- und Schussfäden konnte nicht festgestellt werden. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit von Fasern in  $0^\circ$  sowie  $90^\circ$  Richtung gesprochen, da keine Unterscheidung zwischen Kett- und Schussfäden möglich ist. Die Welligkeit der Fasern in  $0^\circ$ -sowie  $90^\circ$ -Richtung beträgt weniger als 1%. Der Ondulationsgrad  $\theta$  liegt zwischen  $4^\circ$  und  $7^\circ$ . Die Größe der Maschenöffnung  $M$  geht gegen null. Nichtsdestotrotz sind aufgrund der regellosen Stapelanordnung vereinzelte polymerreiche Zonen zu sehen. Die Fasern weisen eine leicht ovale Struktur auf. Die Feinheit der Fäden variiert hierdurch zwischen  $5 \mu\text{m}$  entlang der kürzesten und  $8 \mu\text{m}$  entlang der längsten Richtung. Die Fadenzahl beträgt ca.  $8 \text{ cm}^{-1}$ .

Der strukturelle Aufbau eines Gewebes bestimmt das mechanische Verhalten und nimmt Einfluss auf die Schädigungsentwicklung während der Ermüdung. Mehr noch, Abweichungen in den elastischen und inelastischen Eigenschaften sind aufgrund des Ermüdungsprozesses zu erwarten. Genauere Informationen über die anisotrope Struktur des zu untersuchenden Materials sind unabdingbar für eine erfolgreiche Probenauslegung in den VHCF-Untersuchungen. Aus diesem Grund wird das CF-PPS-Werkstoffverhalten bezüglich seiner dynamischen sowie akustischen Eigenschaften, die aus seiner mechanischen Anisotropie resultieren, charakterisiert.

#### 4.2.2 Charakterisierung des Probenmaterials

Allgemein weisen flache, gewebte CFK-Lamine mit unterschiedlich orientierten Schichten eine orthotrope Symmetrie mit neun unabhängigen elastischen Konstanten auf [Maier, 07]. Die gesuchten elastischen Konstanten des Elastizitätstensors in Matrixschreibweise sind in

Abbildung 4-4 a dargestellt. Ultraschalllaufzeitmessungen und akustische Resonanzspektroskopie wurden kombiniert, um die dynamischen elastischen Konstanten des Werkstoffs zu bestimmen. CF-PPS-Proben mit unterschiedlichen Ausrichtungen wurden angefertigt. Die makroskopische Schallgeschwindigkeit der Scher- und Longitudinalwelle wurde in 3-Richtung (Koordinatensystem siehe Abbildung 4-4 b) mit Hilfe der Impuls-Echo- und Impuls-Transmissions-Messung ermittelt. Kontaktprüfköpfe, die für die Impuls-Echo-Messung verwendet wurden (Panametrics V 103, Panametrics V 153, Olympus Waltham, MA, USA), arbeiteten mit einer Mittenfrequenz von  $f = 1$  MHz. Für die Transmissionsmessungen in 1- und 2-Richtung wurde ein Z5N20 sowie ein L5M (General Electrics, Lewiston, PA, USA) mit einer Mittenfrequenz von  $f = 5$  MHz verwendet.

a)

$$c_{ij} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{pmatrix}$$

b)

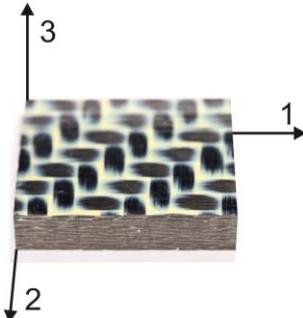


Abbildung 4-4. a) Elastizitätstensor in Matrixschreibweise für eine orthotrope Materialsymmetrie  
b) CF-PPS Probe mit Koordinatensystem

Durch Lösen der Christoffel-Gleichung können Beziehungen zwischen Schallgeschwindigkeiten und elastischen Konstanten hergeleitet werden, die es im Prinzip erlauben, alle neun dynamischen elastischen Konstanten zweiter Ordnung zu bestimmen, unter der Annahme, dass die Dichte des Materials bekannt ist, und eine ausreichende Durchschallung in den verschiedenen kristallographischen Richtungen gegeben ist [Auld, 90]. Für die CF-PPS-Platten mit einem  $0^\circ/90^\circ$ -Lagenaufbau konnte das Vorhandensein einer tetragonalen Symmetrie nachgewiesen werden, da die Scherwellengeschwindigkeit in 3-Richtung unabhängig von der Ausrichtung der CFK-Probe war. Die transversale Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Probenausrichtung in 3-Richtung ist in Abbildung 4-5 zu sehen. Die maximale Abweichung der Schallgeschwindigkeit lag in der Größenordnung des Messfehlers von  $\pm 0,01$  mm/ $\mu$ s.

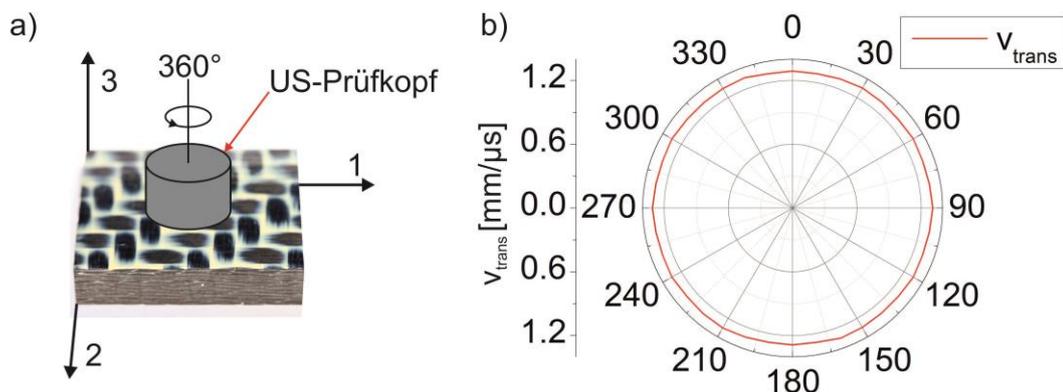


Abbildung 4-5. a) CF-PPS Probe mit Koordinatensystem und US-Prüfkopf b) Gemessene Transversale Laufzeitgeschwindigkeiten durch 360°-Drehung eines Prüfkopfs entlang der 3-Richtung

Aus dieser Messung ließ sich schlussfolgern, dass nur noch sechs unabhängige dynamische elastische Konstanten bestimmt werden müssen, bzw. dass das Material tetragonale Symmetrie aufweist, was gleichbedeutend ist mit  $c_{11} = c_{22}$ ,  $c_{13} = c_{23}$  und  $c_{44} = c_{55}$ . Nichtsdestotrotz erschweren die geringe Dicke der CFK-Platte und die Existenz von Quasi-Longitudinal- und Quasi-Scherwellen in Nichtsymmetrieachsenrichtungen die Messung von  $c_{12}$ ,  $c_{13}$  und  $c_{66}$ . Die Konstanten  $c_{11}$ ,  $c_{33}$ , und  $c_{44}$  konnten direkt aus den Laufzeitmessungen bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Komponenten der Steifigkeitsmatrix erhalten durch Ultraschalllaufzeitmessungen an einer CF-PPS Probe

Wellenmode	Ausbreitungsrichtungsrichtung	Ultraschallgeschwindigkeit [mm/μs]	Elastische Konstanten [GPa]
Longitudinal	Faserrichtung (1- oder 2- Richtung)	$6,94 \pm 0,22$	$c_{11} = 74,24 \pm 2,69$
Longitudinal	Dickenrichtung (3- Richtung)	$2,61 \pm 0,02$	$c_{33} = 10,50 \pm 0,04$
Transversal	Dickenrichtung (3- Richtung)	$1,33 \pm 0,01$	$c_{44} = 2,7 \pm 0,05$

Um die elastischen Konstanten zu bestimmen, die nicht über Ultraschall-Laufzeiten gemessen werden konnten, wurden zusätzlich die akustische Resonanzspektroskopie verwendet. Proben mit den Abmessungen  $180 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4,0 \text{ mm}$  (Länge  $\times$  Breite  $\times$  Dicke) wurden aus Platten in den Richtungen  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  sowie  $90^\circ$  bezogen auf die Längsrichtung der Kohlenstofffasern im Gewebe aus den Platten geschnitten. Die hierfür erzeugten Proben wurden an einem Bindfaden befestigt und durch einen kurzen Schlag mit einem Hammer in Vibration versetzt. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 4-6 a zu sehen.

Die Schallabstrahlung der Probe wird mittels eines breitbandigen Mikrofons mit einem Frequenzbereich von  $f = 10$  Hz bis  $f = 200$  kHz der Firma G.R.A.S. Sound & Vibration, Holte, Dänemark ermittelt. Das hierbei erhaltene Zeitsignal wird an einem Oszilloskop digitalisiert. In einem speziell für diesen Zweck entwickelten LabVIEW-Programm [Ollmann, 14] können mit Hilfe der schnellen Fourier-Transformation die Frequenzspektren ausgewertet werden [Scherer, 12]. Obwohl die innere Dämpfung von CFK-Werkstoffen deutlich größer ist als die von Metallen, konnten die Resonanzfrequenzen bestimmt werden. Die jeweiligen Resonanzfrequenzen konnten eindeutig den jeweiligen Biege- sowie Torsionsmoden eines Balkens zugewiesen werden. Die ersten fünf Maxima in Abbildung 4-6 entsprechen den ersten fünf transversalen Biegemoden.

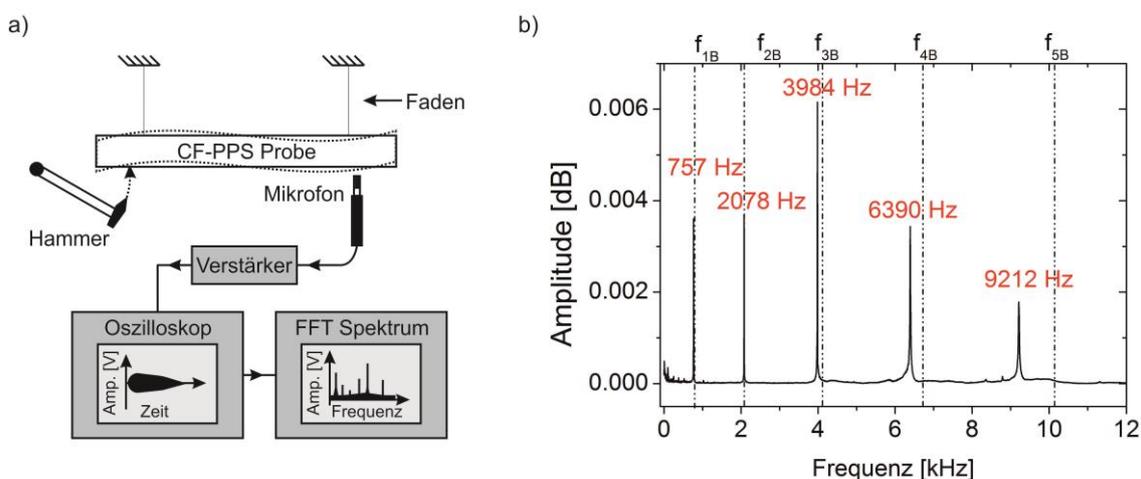


Abbildung 4-6. a) Schematischer Aufbau zur Bestimmung der dynamischen elastischen Konstanten mit Hilfe der Resonanzspektroskopie; b) Frequenzspektrum einer CF-PPS Probe mit den Maßen 180 mm x 10 mm x 4 mm, die Längsachse der Probe ist in Faserrichtung orientiert.

Der Ausdruck  $f_{nB}$  bezeichnet im Folgenden den n-ten ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ) Biegemode. Die Lösung der Euler-Bernoulli-Gleichung für einen freien Balken der Länge  $L$  [m], Breite  $B$  [m] und Dicke  $d$  [m] mit rechteckigem Querschnitt liefert den ersten transversalen Biegemode unter der Randbedingung  $L \gg B \gg d$  [Morse, 68]:

$$f_{1B} = \frac{(k_1 L)^2}{2\pi} \cdot \frac{d}{L^2} \sqrt{\frac{E_L}{12\rho}} \quad 4-1$$

wobei  $E_L$  [Pa] der E-Modul in Längsrichtung des Balkens,  $\rho$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] die Dichte und  $k_1 L = 4,37$  die normierte Wellenzahl des ersten transversalen Biegemodes bei freien Enden ist. Durch Umstellung von Gleichung 4-1 nach dem E-Modul  $E_L$  lässt sich dieser aus der Resonanzfrequenz, der Dichte sowie den geometrischen Größen berechnen. Daraus ergibt sich Gleichung 4-2.

$$E_L = \frac{48\pi^2 \rho \cdot f_{1B}^2 \cdot L^4}{(k_1 L)^4 \cdot d}. \quad 4-2$$

Die Resonanzfrequenzen der Proben, die in  $0^\circ$  sowie  $90^\circ$  zur Faserrichtung orientiert waren, waren im Rahmen der Messgenauigkeit identisch. Daraus ergibt sich,  $E_L(0^\circ) = E_L(90^\circ) = (53,54 \pm 1,32)$  GPa. Die Abweichungen liegen in der Größenordnung des Messfehlers. In einem kartesischen Koordinatensystem mit Achsen parallel zur Faserrichtung gilt:

$$\begin{aligned} E_L(0^\circ) &= E_{11} \\ E_L(90^\circ) &= E_{11} \end{aligned} \quad 4-3$$

Für die Messungen mit Proben, die in  $45^\circ$ -Richtung zur Faserorientierung geschnitten waren, ergab sich ein E-Modul von  $E_L(45^\circ) = (13,3 \pm 0,4)$  GPa. Die Beziehung zum E-Modul  $E_L(45^\circ)$  und  $E_L(0^\circ)$  wurde aus [Altenbach, 04] entnommen und lässt sich wie folgt berechnen:

$$\frac{1}{E_{11}(\varphi)} = \frac{1}{E_{11}} \cdot \cos^4(\varphi) + \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} \right) \cdot \sin^2(\varphi) \cdot \cos^2(\varphi) + \frac{1}{E_{22}} \cdot \sin^4(\varphi), \quad 4-4$$

wobei  $\varphi$  der Winkel relativ bezogen zur Faserrichtung,  $G_{12}$  der Schubmodul und  $\nu_{12}$  die Querkontraktionszahl ist. Durch Einsetzen von  $\varphi = 45^\circ$  erhalten wir die vereinfachte Formel:

$$\frac{1}{E_L(45^\circ)} = \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}}. \quad 4-5$$

Durch Zuhilfenahme der Ergebnisse der quasistatischen Zugversuche, durchgeführt am Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK) Kaiserslautern, darf davon ausgegangen werden, dass  $\nu_{12} = 0$  ist [DFG, 13]. Durch Einsetzen von  $E_L(45^\circ)$ ,  $E_L(0^\circ) = E_{11} = E_{22}$ , und  $\nu_{12}$  in Gleichung 4-5 und Auflösen nach der gesuchten Größe lässt sich ein Wert von  $G_{12} = (3,79 \pm 0,50)$  GPa ermitteln.

Die Verwendung der mathematischen Beziehung zwischen den Elementen der Steifigkeitsmatrix  $c_{ij}$  und den Elementen der Nachgiebigkeitsmatrix  $S_{ij}$  erlaubt eine gegenseitige Umrechnung aller sechs unabhängigen elastischen Konstanten. Diese lauten wie folgt in Notation des Nachgiebigkeitstensors in Matrixschreibweise [ $\text{GPa}^{-1}$ ]:

$$S_{ij} = \begin{pmatrix} \frac{1}{53,54} & 0 & \frac{-0,155}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{53,54} & \frac{-0,155}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-0,155}{5,9} & \frac{-0,155}{5,9} & \frac{1}{5,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2,7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2,7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{3,79} \end{pmatrix}, \quad 4-6$$

sowie in Notation des Elastizitätstensors in Matrixschreibweise [GPa]:

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} 74,24 & 20,70 & 14,71 & 0 & 0 & 0 \\ 20,70 & 74,24 & 14,71 & 0 & 0 & 0 \\ 14,71 & 14,71 & 10,46 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,70 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2,70 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,79 \end{pmatrix}. \quad 4-7$$

Die hier bestimmten dynamischen elastischen Konstanten werden im nächsten Schritt für die korrekte Probenauslegung verwendet. Die elastischen Konstanten, die Probengeometrie und die Dichte beeinflussen die Resonanzfrequenzen der CF-PPS-Probe (vgl. Formel 4-1). Jedoch sind diese Parameter mit Ausnahme der Länge und Breite feste Größen. Dies hat zur Folge, dass Länge und Breite der CF-PPS Proben so gewählt werden müssen, dass der erste transversale Biegemode unter der Randbedingung einer 3-Punkt-Biegebeanspruchung, bei der Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit liegt.

### 4.2.3 Probenauslegung

Die Ultraschallermüdungsmaschine zwingt die Probe, mit einer Frequenz von  $f_0 = 20,26$  kHz zu schwingen. Hierfür muss die Eigenresonanzfrequenz der Probe mit der Anregungsfrequenz der Maschine übereinstimmen. Dies bedeutet, dass die elastischen Eigenschaften der Proben und die Probengeometrie so aufeinander ausgelegt sind, dass der erste transversale Biegemode einer Balkenprobe angesprochen wird. Anderenfalls kann die Ermüdungsprobe nicht mit einer ausreichend hohen Amplitude schwingen. Die Auflager, auf denen die Probe während des Ermüdungsexperiments liegt, werden so positioniert, dass die Knotenlinien des Biegemodes sich treffen. Dies verhindert das Springen der Probe während der Messung. Unter Berücksichtigung der vorher genannten Kriterien sowie der bestimmten elastischen Konstanten und Dicke der Platten wurde am Lehrstuhl für Werkstoffkunde WKK, Kaiserslautern das Schwingungsverhalten der CF-PPS Probe in der 3-Punkt-Biegemaschine simuliert und die folgende Geometrie bestimmt (siehe Abbildung 4-7) [DFG, 13]. Die Dicke des Organoblechs blieb

unverändert bei  $d = 4$  mm. Die optimale Länge für die CF-PPS Proben wurde bei  $L = 33,5$  mm festgestellt. Der Abstand zwischen den Auflagern beträgt  $w = 18,72$  mm. Um Torsionsschwingungen bei einer Frequenz von  $f = 20,26$  kHz zu verhindern, wurde eine Probenbreite von  $b = 15$  mm gewählt.

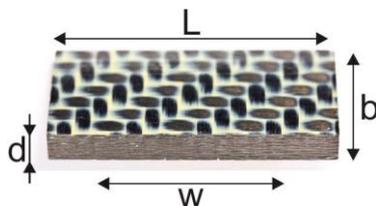


Abbildung 4-7. Optische Aufnahme einer CF-PPS-Probe für die Hochfrequenzermüdungsuntersuchung mit einer ausgelegten Geometrie von  $L = 33,5$  mm,  $b = 15$  mm,  $d = 4$  mm mit einer Resonanzfrequenz des 1. transversalen Biegemode bei  $f = 20,26$  kHz

Zur Überprüfung der analytischen Berechnungen und Simulation für die Probenauslegung wurde die Schwingungsform der CF-PPS-Probe in der 3-Punkt-Biegemaschine mittels eines 3D-Laservibrometers der Firma Polytec durch den Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK), TU Kaiserslautern überprüft. Die optischen Ergebnisse mit überzeichneter Auslenkung in y-Richtung sind in Abbildung 4-8 zu sehen. Die Messergebnisse zeigen klar, dass die Proben-schwingung der Auslenkung der Beanspruchungseinheit folgt. Keine weiteren Schwingungsmoden, die zu einer verfälschten Messung führen würden, werden angeregt.

Der scheinbare Abstand zwischen Beanspruchungseinheit und Probe ist ein Artefakt, der aufgrund der Positionierung des Laservibrometer-Systems oberhalb der Probe zurückzuführen ist. Durch diesen Effekt wird ein optischer Schatten erzeugt, der in Realität nicht vorhanden ist.

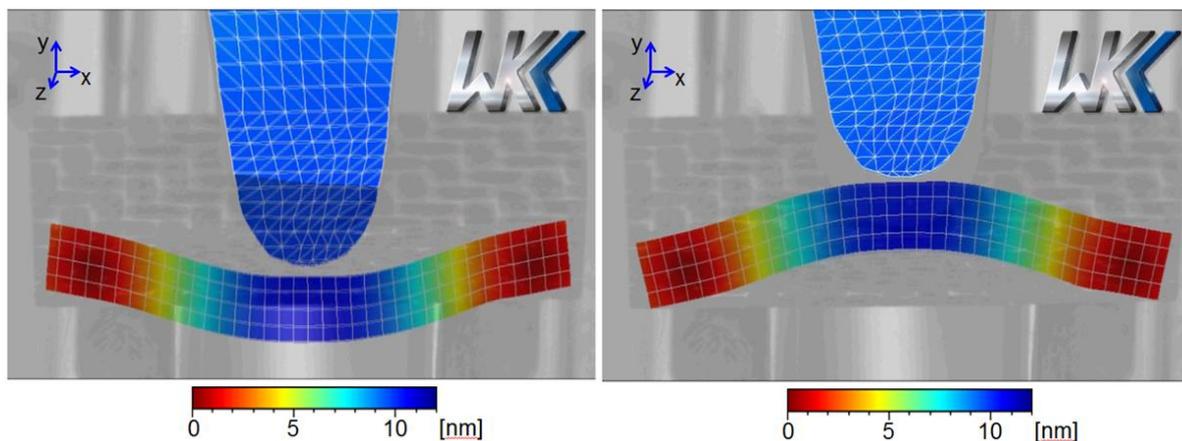


Abbildung 4-8. a) Validierung der Probenauslegung mittels 3D-Laservibrometrie. Überzeichnete Probenauslenkung in y-Richtung, Messung durch den Lehrstuhl für Werkstoffkunde, Technische Universität Kaiserslautern [DFG, 13].

Nach erfolgter Charakterisierung und Auslegung der Probengeometrie des CF-PPS für die Hochfrequenzermüdungsversuche, ist es möglich, mit den Untersuchungen zu beginnen.

### 4.3 Ablauf der Ermüdungsuntersuchungen

Unterschiedliche zerstörungsfreie Prüfverfahren werden vor und nach den Ermüdungsexperimenten angewendet, um die CF-PPS-Proben zu untersuchen (Offline-Charakterisierung). Optische Mikroskopie, Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik, Röntgencomputertomografie (CT) und Resonanzspektroskopie können Fehler und Änderungen in den Probeneigenschaften feststellen. Beispielhaft wird in diesem Kapitel der Ablauf einer Ermüdungsuntersuchung an einer CF-PPS-Probe (Probe 1) in der 3-Punkt-Biegeermüdungsanlage beschrieben. Die Ultraschallzeitsignale des Ermüdungsexperiments werden simultan als zerstörungsfreie Online-Überwachung aufgezeichnet. Die beanspruchte CF-PPS-Probe wurde mit  $N = 4 \times 10^8$  Zyklen beaufschlagt, bis der Versuch aufgrund einer schlechten Schwingung sowie einer Temperaturerhöhung an der Sonotrodenberührungstelle abgebrochen wurde. Unter einer schlechten Schwingung wird die Entstehung weiterer ungewollter Resonanzfrequenzen verstanden. Diese können aufgrund von Rissen, von Bewegungen der CF-PPS Probe auf den Auflagern entstehen oder dadurch, dass die Ermüdung der Probe zu einer zu großen Abweichung ihrer Resonanzfrequenz von der Beanspruchungsfrequenz der Sonotrode führt. Im weiteren Verlauf wird dies unter dem Begriff „schlechte Schwingung“ zusammengefasst.

#### 4.3.1 Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung im Ausgangszustand

Bevor die CF-PPS-Proben in die 3-Punkt-Biegemaschine zur Untersuchung des Ermüdungsverhaltens eingespannt werden, erfolgt eine zerstörungsfreie Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung. Jedes Verfahren erlaubt, unterschiedliche Arten von Fehlern zu detektieren. Durch die optische Mikroskopie lassen sich oberflächennahe Fehler auffinden. Jedoch erhalten wir keine Information über den inneren Zustand der Probe. Die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik erlaubt eine Lokalisierung von inneren Fehlern, Einschlüssen und Polymeragglomerationen im Millimeterbereich. Um eine größere Fehlerauflösung zu erreichen, bedient man sich in der Forschung der Röntgencomputertomografie. Diese Methode ist weit verbreitet, dient aber aufgrund der hohen Unterhaltungskosten als Referenztechnik. Fehler bis in den  $\mu\text{m}$ -Bereich lassen sich auffinden. Um eine globale Aussage des Materialzustands treffen zu können, bedient man sich der Resonanzspektroskopie. Mikrorisse, die selbst nicht mehr im Auflösungsbereich der Röntgencomputertomografie (ca.  $10 \mu\text{m}$ ) liegen, führen zu einer Verminderung der elastischen Eigenschaften des CFK-Verbundes. Die Frequenzen der jeweiligen Eigenmoden hängen neben der Geometrie auch von den elastischen Konstanten ab. Eine Schwächung materialspezifischer Eigenschaften führt zu einer Herabsetzung der Resonanzfrequenzen und erlaubt eine globale Abschätzung des Materialzustandes. Jedoch ist keine Lokalisierung der Fehler mit letztgenannter Technik möglich.

In Abbildung 4-9 a ist eine optische Aufnahme der zu untersuchenden CF-PPS-Probe mit der Seriennummer 1-1-1-32 zu sehen. Aufgrund von Fehlertoleranzen im Fertigungsprozess beträgt die Dicke dieser Probe  $d = 4,06$  mm und weicht nur sehr leicht von der Probenauslegung (siehe Kapitel 4.2.3) ab. Die Probe selbst wurde aus einer großen  $400 \times 400$  mm<sup>2</sup> und im Durchschnitt 4 mm dicken Platte gefertigt. Neben dem Trennprozess mittels Diamantsäge erfolgte als Nachbearbeitungsschritt ein Schleif- und Polierprozess, um eine geometrisch perfekte und rissfreie Stirnfläche zu gewährleisten.

In Abbildung 4-9 b ist eine schematische Skizze der Perspektive des Ultraschall B-Bilds (Abbildung 4-9 c) und des Ultraschall-C-Bilds (Abbildung 4-9 d) zu sehen. Die Probe wurde in ein mit Wasser gefülltes Becken eingetaucht und lateral mit einem breitbandigen 5 MHz-Ultraschallprüfkopf (H5M, GE) untersucht. Die laterale Schrittweite der Linearmotoren wurde auf 0,2 mm eingestellt. Die Wasservorlaufstrecke zwischen Schwinger- und Probenoberfläche beträgt 14 mm, um eine höchstmögliche Fokussierung des Schallfeldes in der Mitte der Probe zu gewährleisten. Hierdurch wurde eine höhere laterale Auflösung im Inneren der Probe ermöglicht. Im Ultraschall B-Bild (Abbildung 4-9 c) sind klar das Eintrittsecho sowie in ca. 5 mm Tiefe das Rückwandecho zu sehen. In ca. 2,5 mm bis 3,5 mm Tiefe sind linienartige Ultraschallreflektoren zu erkennen, die von polymerreichen Zonen stammen. Im Ultraschall C-Bild (Abbildung 4-9 d) sind lediglich kleine Ultraschallreflektoren zu erkennen, die auf unterschiedliche akustische Impedanzen der C-Faser und Polymermatrix zurückzuführen sind. Die gelben Bereiche deuten auf flächige polymerreiche Zonen hin, wie sie bei einer Gewebereinheitszelle (siehe Kapitel 3.1.3 Abbildung 3-3) zu erwarten sind.

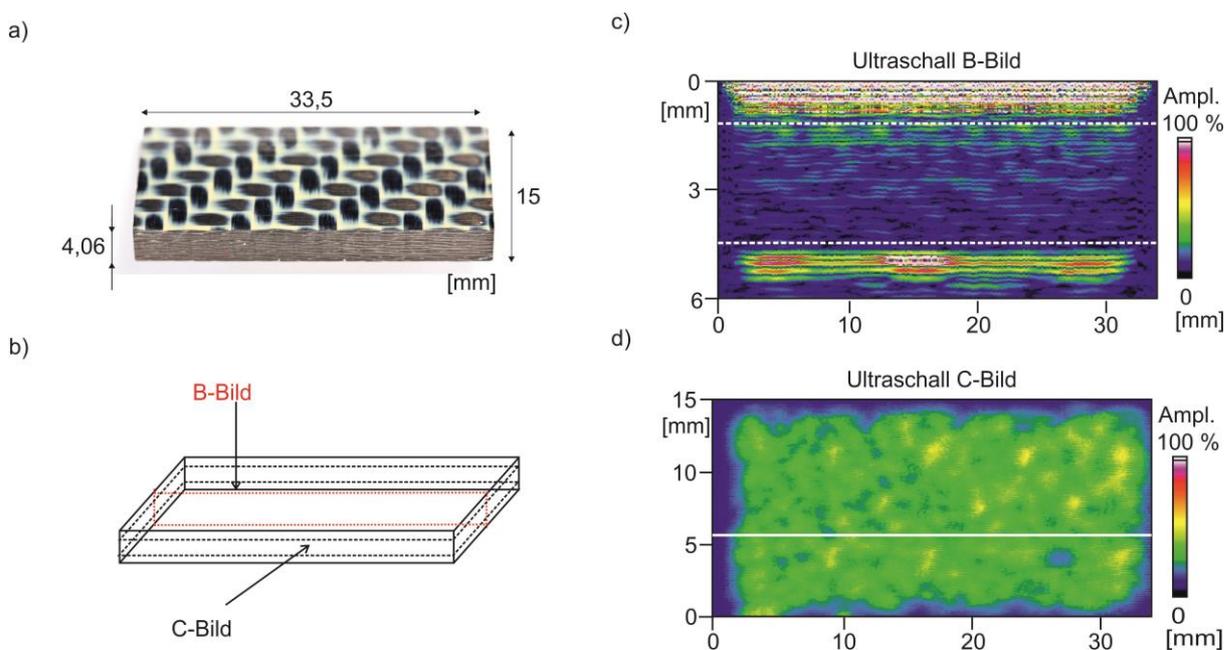


Abbildung 4-9. a) Optische Aufnahme einer CF-PPS-Probe im Ausgangszustand mit einer Länge  $L = 33,5$  mm, Breite  $b = 15$  mm und einer Dicke  $d = 4,06$  mm; b) Schematische Skizze der Perspektive des Ultraschall-B-Bilds und Ultraschall C-Bilds; c) Ultraschall B-Bild sowie d) Ultraschall C-Bild der CF-PPS-Probe mit der Seriennummer 1-1-1-32 im Ausgangszustand (Probe 1)

In Abbildung 4-10 a und b sind das CT-Bild der CF-PPS-Probe in der 1-3-Ebene (vgl. Abbildung 4-4) sowie in der 1-2-Ebene (vgl. Abbildung 4-4) ungefähr in der Probenmitte zu sehen. Aufgrund des geringen Unterschieds im spezifischen Absorptionskoeffizient zwischen den Kohlenstoffasern und der Polyphenylenmatrix ist der Kontrast zwischen Fasern und Matrix sehr gering. Die gewebte Struktur ist erkennbar. Jedoch ist es nicht möglich, eine Gewebeeinheitszelle im Inneren der Probe zu erkennen (Abbildung 4-10 a). Polymerreiche Zonen erscheinen hier weiß. Eine Unterscheidung zwischen einem Kett- oder einem Schussfaden ist nicht möglich. Risse konnten bei dieser Messung nicht festgestellt werden. Aufgrund der Probengröße und der begrenzten Pixelanzahl des Röntgenstrahlflächendetektors beträgt die Auflösung bei dieser Probe 22  $\mu\text{m}$ .

In Abbildung 4-10 c ist das Frequenzspektrum des 1. transversalen Biegemodes der Resonanzspektroskopiemessung zu sehen. Die direkte Korrelation zwischen der Resonanzfrequenz und den elastischen Eigenschaften soll dazu dienen Steifigkeitsabnahmen aufgrund der Materialermüdung festzustellen. Im Ausgangszustand konnte die Resonanzfrequenz des 1. transversalen Biegemodes bei  $f = 19,34 \text{ kHz}$  festgestellt werden. Der Vergleich zwischen dem Wert im Ausgangszustand und nach der Beanspruchung gibt Auskunft über die Stärke der Steifigkeitsabnahme aufgrund von Ermüdungsschäden.

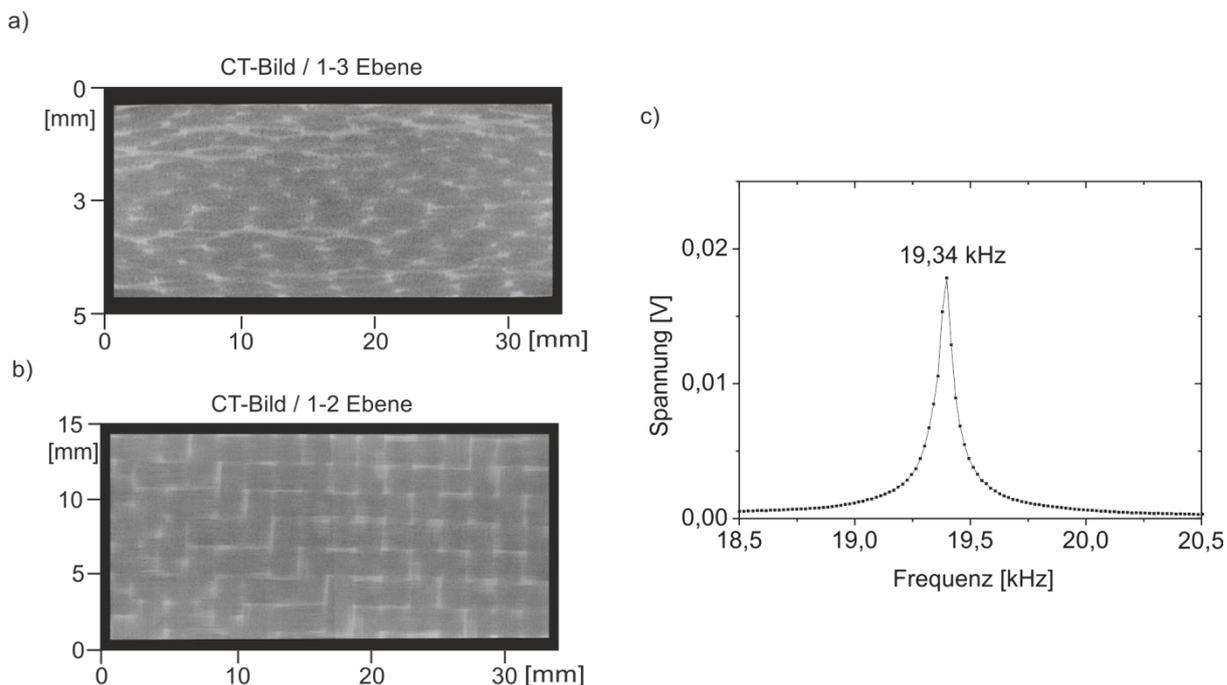


Abbildung 4-10. a) Computertomografie (CT) Bild in der 1-3 Ebene (vgl. Abbildung 4-4) und b) 1-2 Ebene (vgl. Abbildung 4-4) ungefähr in der Probenmitte; c) Frequenzspektrum des 1. transversalen Biegemodes der resonanzspektroskopischen Untersuchung der CF-PPS-Probe mit der Seriennummer: 1-1-1-32 im Ausgangszustand (Probe 1)

Nach erfolgter Charakterisierung und Überprüfung auf Fehlerfreiheit im Ausgangszustand wird die CF-PPS Probe in die 3-Punkt-Biegemaschine eingespannt. Hier wird die Probe mit einer hochfrequenten Ultraschallanregung bei einer Frequenz von  $f_0 = 20,26$  kHz beansprucht.

### 4.3.2 Erfassung und Auswertung von Ultraschallsignalen während eines Ermüdungsexperiments

Das Ermüdungsexperiment wird im Drei-Punkt-Biegeversuch bei einer statischen Verschiebung von  $100 \mu\text{m}$  an der Unterseite der Probe durchgeführt, was einer statischen Mittelspannung von  $115 \text{ MPa}$  entspricht. Die Amplitude der dynamischen Beanspruchung beträgt  $36,4 \mu\text{m}$ . Dies entspricht einer Spannungsamplitude von  $65 \text{ MPa}$ . Die lokale Oberflächenschwingung der Probe wird an ihrer Unterseite in der Mitte mit Hilfe eines Einpunkt-Laservibrometers aufgezeichnet. Des Weiteren wird ein breitbandiges Mikrofon zwischen den beiden Auflagern der Ermüdungsvorrichtung positioniert. Die Signale des Laservibrometers und des Mikrofons werden mit Hilfe einer Datenerfassungseinheit digitalisiert und abgespeichert. Zur Verhinderung einer unzulässigen Erhöhung der Proben temperatur wird die nominelle Pulszeit auf  $100 \text{ ms}$  und die Pulspause auf  $2000 \text{ ms}$  festgelegt. Bei der nominellen Pulszeit handelt es sich um die Zeit, während der der Generator das Signal erhält, einen Puls mit einer Frequenz von  $f = 20,26 \text{ kHz}$  zu erzeugen. In Abbildung 4-11 sind typische Zeitsignale einer CF-PPS-Probe während eines Beanspruchungszyklus zu sehen. Der hier aufgezeichnete Pulszyklus wurde nach  $N = 2,0 \times 10^7$  ( $=5 \% N_f$ , Bruchlastspielzahl) aufgezeichnet. Die Amplitude des Ultraschallpulses steigt beim Pulsstart für  $29 \text{ ms}$  an und wird für ca.  $90 \text{ ms}$  konstant gehalten (Bereich ① und ② in Abbildung 4-11). Wie in der Messung zu sehen wird nicht auf Anhieb die volle Pulsamplitude erreicht. Diese Pulsdauer fehlt um einen  $100 \text{ ms}$  konstanten Puls zu erhalten. Aufgrund der aktiven Dämpfung der Sonotrode nach den  $100 \text{ ms}$  werden diese fehlenden Pulse im Mittel ausgeglichen. In Abbildung 4-11 beträgt die Dauer der aktiven Dämpfung (Bereich ③)  $18 \text{ ms}$ . Im Anschluss schwingt die Sonotrode aus.

Das Laservibrometer-Zeitsignal (Abbildung 4-11 a) zeigt das gleiche allgemeine Verhalten wie das Mikrofon-Zeitsignal (Abbildung 4-11 b). Das Ultraschallsignal des Mikrofons enthält mehr Rauschen als das Laservibrometersignal, da neben der Schallabstrahlung der CF-PPS Probe zusätzlich die Geräusche der Luftdruckdüsen und der Beanspruchungseinheit erfasst werden.

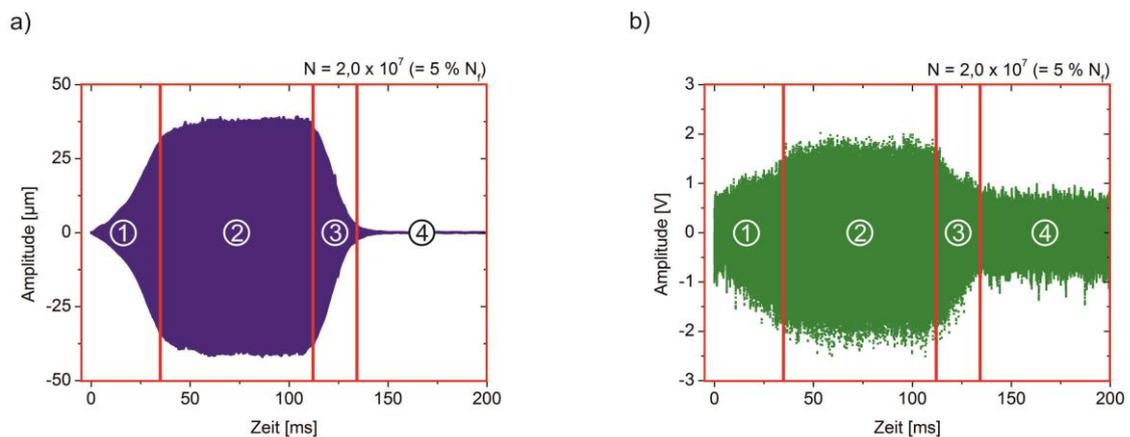


Abbildung 4-11. Ultraschall-Zeitsignal einer CF-PPS-Probe (Seriennummer: 1-1-1-32) während eines Beanspruchungszyklus nach  $N = 2 \times 10^7$  Zyklen gemessen mit einem a) Laservibrometer und b) Mikrofon; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = Freies Ausschwingen des Systems [>63 ms]

Bei einer geringen Verschiebung der Probe in den Auflagern während des Ermüdungsexperiments kann es in vereinzelten Fällen zu einer starken Schwächung des reflektierten Laserstrahls und damit zu einem verzerrten Ultraschallzeitsignal kommen (siehe Abbildung 4-12 a). Die Oberflächenreflektivität der CF-PPS-Probe variiert stark, abhängig davon, ob der Laserstrahl in Richtung der Faser oder der Matrix ausgerichtet ist. In Abbildung 4-12 b ist eine CF-PPS-Probenoberfläche mit einem schematisch eingezeichnetem Laserpunkt zu sehen. Der Laserpunkt befindet sich zwischen der Kohlenstofffaser und der Matrix an einer kritischen Stelle, die zur Schwächung des Laservibrometer-Zeitsignals führen kann. Das Mikrofon ist frei von solchen Effekten.

Durch geeignete Signalanalyseverfahren wie der schnellen Fourier-, Kurzzeit-Fourier- und Hilbert-Huang-Transformation werden die gemessenen Ultraschallzeitsignale ausgewertet um den Schädigungsfortschritt in der CF-PPS Probe während der Beanspruchung bestimmen zu können.

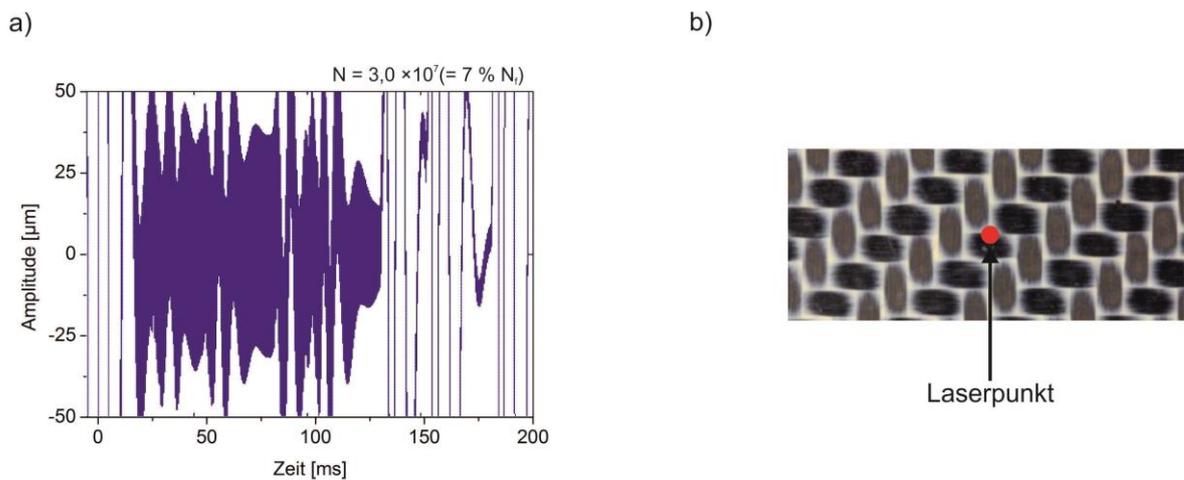


Abbildung 4-12. a) Verzerres Laservibrometer-Zeitsignal einer CF-PPS-Probe aufgrund kleinster Probenverschiebung in den Auflagern während eines Beanspruchungszyklus ( $N = 3 \times 10^7$  Zyklen); b) CF-PPS-Probenoberfläche mit schematisch eingezeichnetem Laserpunkt zur Visualisierung einer kritischen Laserposition, die zu einer möglichen Verzerrung des Laservibrometer-Zeitsignals führen kann.

Nach Abbruch des Ermüdungsexperiments wird die beanspruchte CF-PPS-Probe aus der 3-Punkt-Biegemaschine entnommen und zerstörungsfrei untersucht. Vorhandene Ermüdungsschäden werden erfasst und charakterisiert, um Änderungen in den Ultraschallzeitsignalen während des Ermüdungsexperiments mit zeitlich auftretenden Schädigungsmechanismen in der Probe korrelieren zu können.

#### 4.3.3 Fehlerprüfung und Materialcharakterisierung nach der Beanspruchung

Die aus der Ermüdungsmaschine entnommene CF-PPS Probe (Seriennummer 1-1-1-32) wird wie bereits im Ausgangszustand zerstörungsfrei untersucht. Durch die Vielzahl der angewandten Verfahren sollen unterschiedliche Arten von Fehlern detektiert werden. Bei der Entnahme der CF-PPS-Probe aus dem Versuchsaufbau sind an den Oberfläche der Proben Kerben sichtbar, die aufgrund von Reibkräften an den Auflagern und der Sonotrode während der Beanspruchung entstanden sind. Zur Bestimmung der Kerbtiefe wurde ein Rauheitsmessgerät Hommel-Tester T1000 wave mit Vorschubeinheit-Waveline-20 und Bezugsebenentaster TKL300L der Firma Jenoptik verwendet. Laut Kalibrierschein hat das Gerät eine Messunsicherheit von 3 %. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 4-13 zu sehen. In Abbildung 4-13 a und d ist die jeweilige Probenoberfläche mit Ober- und Unterseite mit schematisch gezeichneter Lage der Messlinie zu sehen. Das entsprechende Tiefenprofil der Sonotrode mit einer Kerbbreite von 1,28 mm und einer Kerbtiefe von 27 µm ist in Abbildung 4-13 b und einer unbeschädigten Oberfläche mit einer durchschnittlichen Kerbbreite von 0,8 mm und einer Oberflächenrauigkeit von 6 µm in Abbildung 4-13 c zu sehen. Auf der Probenunterseite befinden sich zwei Auflagereinkerbungen. Bei der linken Kerbe (Abbildung

4-13 e) wurde eine Kerbbreite von 2,92 mm und eine Kerbtiefe von 220  $\mu\text{m}$  gemessen. Für das rechte Auflager ergab sich eine Kerbbreite von 3,1 mm und eine Kerbtiefe von 228  $\mu\text{m}$  (Abbildung 4-13 f). Zusätzlich konnte eine Polymeranhäufung an der Oberfläche mit einer Höhe von 27  $\mu\text{m}$  und einer Breite von 0,38 mm festgestellt werden. In wie weit die Einkerbungen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten und die Schadensentwicklung nehmen, muss im Weiteren noch geklärt werden.

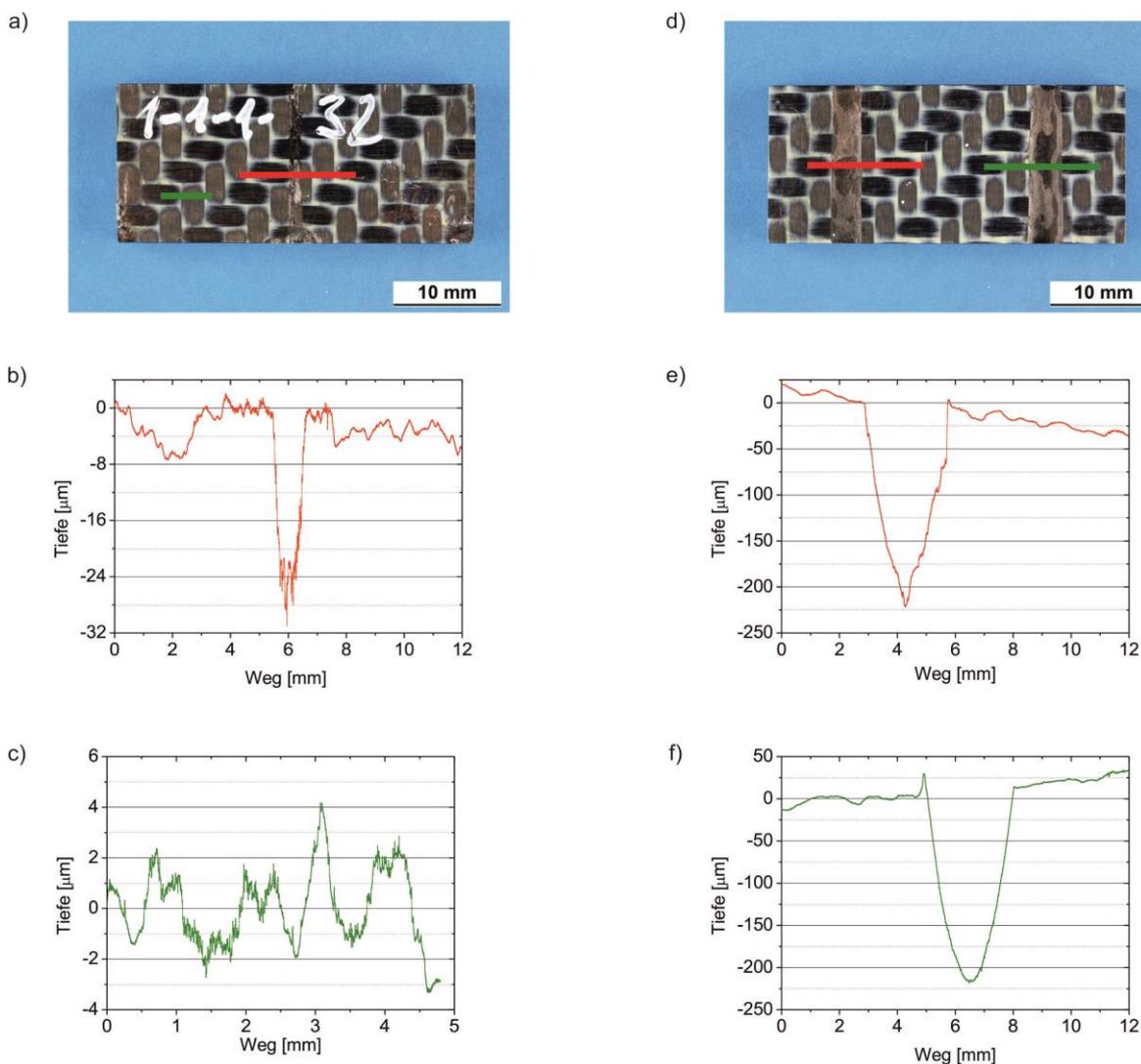


Abbildung 4-13. a) CF-PPS-Probe (Probe 1) nach der Beanspruchung mit Einkerbungen, rote Linie = Messweg zur Bestimmung der Sonotrodeneinkertiefe, grüne Linie = Messweg zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit; b) Tiefenprofil der Einkerbung durch die Sonotrode; c) Tiefenprofil einer unbeschädigten Oberfläche; d) CF-PPS-Probe nach der Beanspruchung mit Auflagereinkerbungen, rote Linie = Messweg zur Bestimmung der linken Auflagereinkertiefe, grüne Linie = Messweg zur Bestimmung der rechten Auflagereinkertiefe; e) Tiefenprofil der linken Auflager; f) Tiefenprofil der rechten Auflagereinkerbung

In Abbildung 4-14 a und b sind die Ergebnisse der Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik nach  $N = 4 \times 10^8$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen zu sehen. Gegenüber dem Messergebnis im

Ausgangszustand (Abbildung 4-9) sind nach Beendigung der Ermüdungsuntersuchungen starke Reflektoren im Inneren in der Nähe des linken Auflagerabdrucks zu erkennen. Die Ultraschallreflektoren sind im Bereich der maximalen Schubspannung entstanden. Viele kleine intralaminare Risse sind im Schnittbild der Röntgen-CT sichtbar (Abbildung 4-14 c). Zusätzlich sind größere schwarze Bereiche zu erkennen, die auf eine Meta-Delamination oder einen interlaminaren Riss hindeuten. Aufgrund des geringen Kontrastunterschieds zwischen Faser und Matrix ist eine genauere Unterscheidung nicht möglich. Stark ausgeprägte Delaminationen sind nicht zu erkennen. Die gemessene Resonanzfrequenz des transversalen Biegemodes liegt bei 18,963 kHz. Dies entspricht einer Reduzierung von 0,435 kHz bzw. 2,2 % bezogen auf einen Ausgangswert von 19,398 kHz. In wie weit die Einkerbung der Auflager und der Sonotrode Einfluss auf die Frequenzreduzierung genommen haben, muss in weiteren Arbeiten genauer untersucht werden.

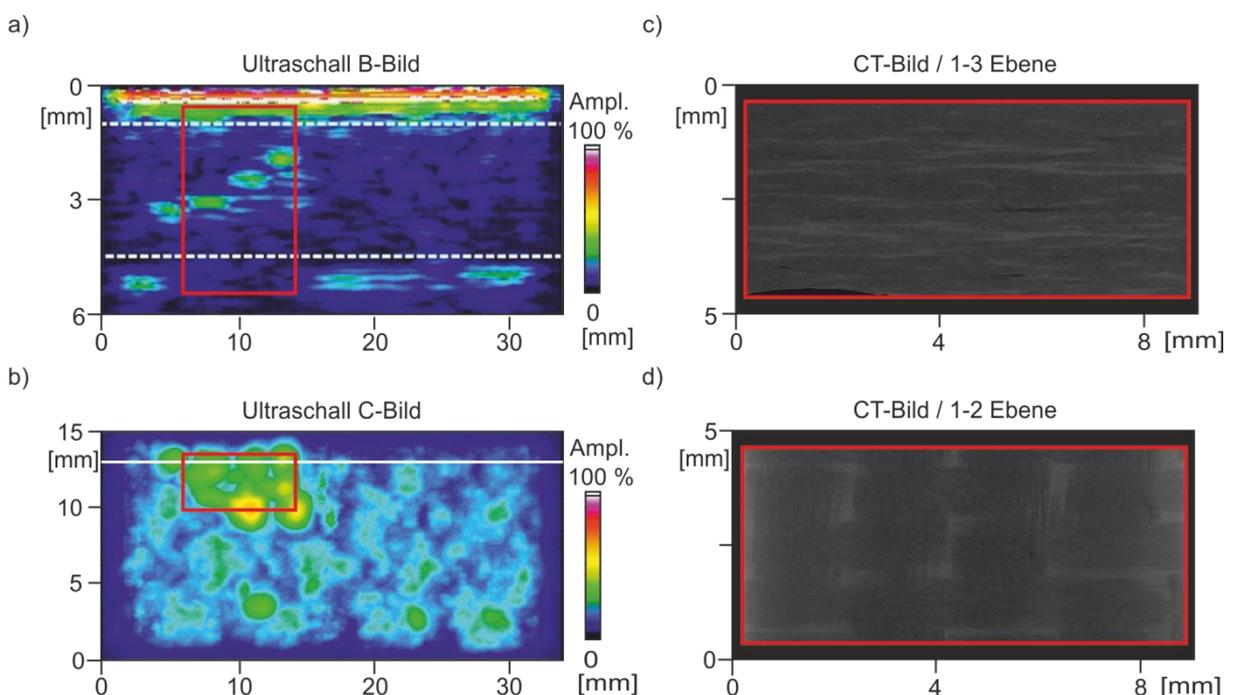


Abbildung 4-14. a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall-C-Bild, c) Computertomografiebild (Auflösungsgrenze 9  $\mu\text{m}$ ) in der 1-3-Ebene und d) 1-2-Ebene einer beanspruchten CF-PPS-Probe (Seriennummer: 1-1-1-32, Probe 1) nach  $N = 4 \times 10^8$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen

Durch die Ultraschallfehlerprüfung sind größere Ultraschallreflektoren an der Rückseite in der Nähe der linken Auflagereinkerbungen der CF-PPS-Probe zu erkennen. Zur besseren Analyse der Schadensentwicklung wurde an der gleichen Stelle die Stirnfläche lichtmikroskopisch genauer untersucht. In Abbildung 4-15 a ist eine lichtmikroskopische Aufnahme der Stirnflächenrückseite der CF-PPS Probe zu sehen. Zu beachten ist, dass sich die Auflagereinkerbungen oben und die Sonotrodeneinkerbung unten befinden. Verschiedene Arten von Fehlern sind bei einer Vergrößerung der Stirnfläche an der Oberfläche zu erkennen

(Abbildung 4-15 b). Neben intralaminaren Rissen die zu Anfang einsetzen, ist auch ein starker interlaminarer Riss (Vergrößerung Abbildung 4-15 d) zu sehen. Beispielhaft für eine Ausbreitung von intralaminaren Rissen ist Abbildung 4-15 e zu nennen. Des Weiteren ist eine Meta-Delamination mit senkrecht dazu laufendem intralaminarem Riss zu erkennen. Eine großflächige Delamination an der Oberfläche ist nicht vorhanden.

a)

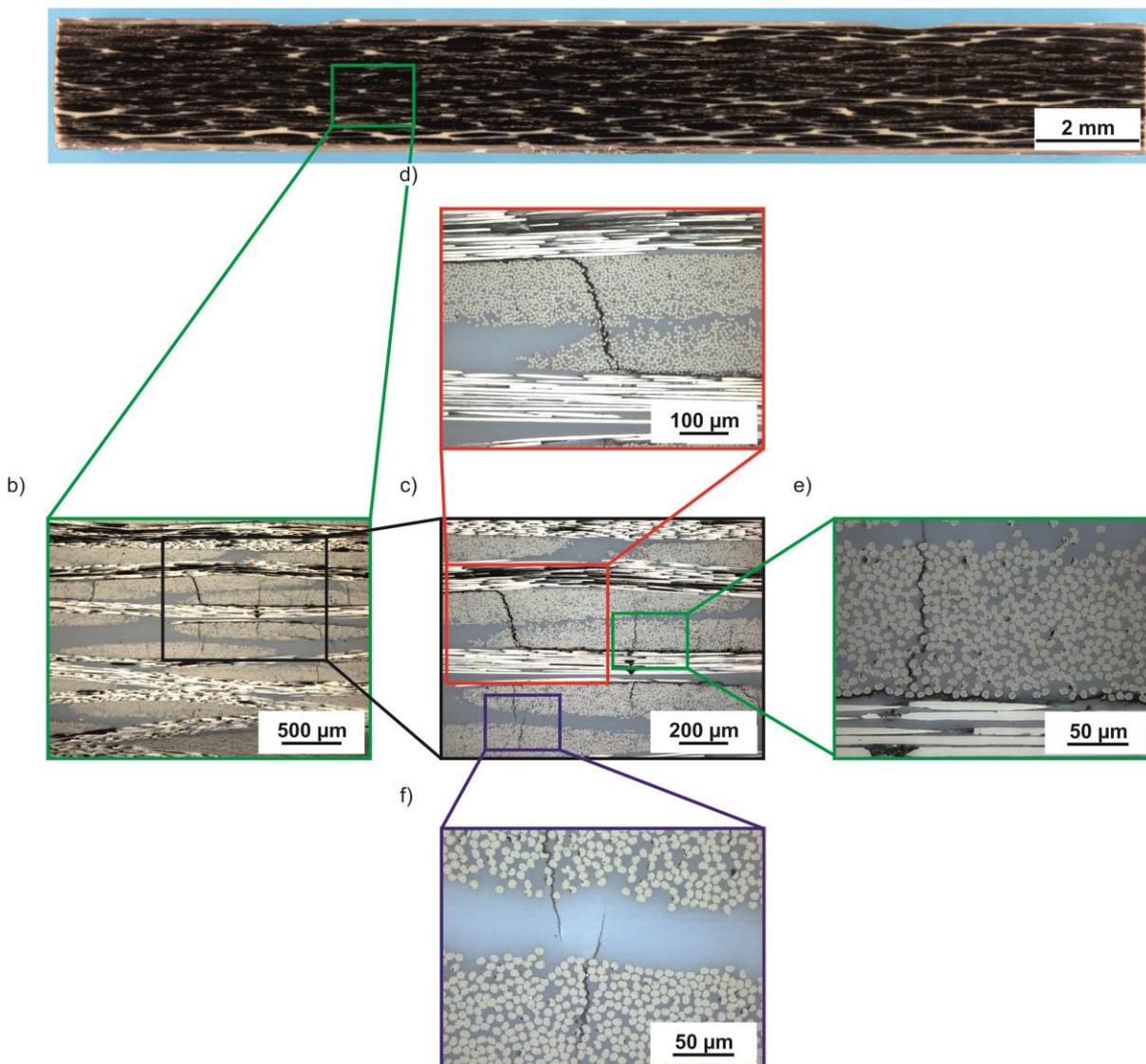


Abbildung 4-15. Lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante einer beanspruchten CF-PPS-Probe mit der Seriennummer 1-1-1-32 (Probe 1) nach  $N = 4 \times 10^8$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen a) Probenseitenkante (Rückseite, Auflagereinkerbungen oben, Sonotrodeneinkerbung unten) b) Vergrößerung des grünen Bereichs aus a) mit einer Vielzahl unterschiedlicher Ermüdungsfehler, c) Vergrößerung des schwarzen Bereichs aus b) mit intra-, interlaminaren Rissen und Meta-Delaminationen; d) Vergrößerung des roten Bereichs aus c) mit einem interlaminaren Riss; e) Vergrößerung des grünen Bereichs aus c) mit einem intralaminaren Riss (senkrechter Riss) und einer Meta-Delamination (waagerechter Riss); f) Vergrößerung des violetten Bereichs aus c) mit intralaminaren Rissen (Risswachstum in polymerreiche Gebiete)

Anhand des Schadensbildes (Abbildung 4-16) kann der Ablauf wie folgt rekonstruiert werden: Zuerst entstehen intralaminare Risse in den 90°-Fasern (blau gestrichelte Linien in Abbildung 4-16). Diese erzeugen Meta-Delaminationen (rot gestrichelte Linie in Abbildung 4-16), die entlang der Grenzfläche Faser-Matrix der 0°-Fasern verlaufen. Kommen sich zwei Meta-Delaminationen, zweier unterschiedlicher Gewebeeinheitszellen (1) und (2) zu nahe, entsteht eine Rissverbindung (grün gestrichelte Linie in Abbildung 4-16). Diese Verbindung zweier Meta-Delaminationen unterschiedlicher Gewebeeinheitszellen wird als interlaminarer Riss bezeichnet. Dieser Riss verringert die adhäsiven Verbindungskräfte zweier Gewebeeinheitszellen. Bei fortschreitender Beanspruchung würden großflächige Delaminationen von dieser Stelle aus entstehen, die schlussendlich zum Bruch von tragenden Fasern in 0°-Richtung und damit zum Versagen des Bauteils führen.

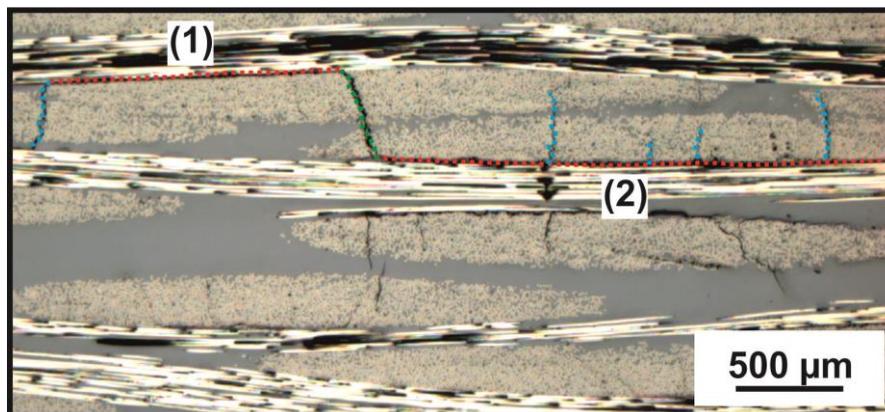


Abbildung 4-16. Lichtmikroskopische Aufnahme der Seitenkante einer beanspruchten CF-PPS-Probe (Seriennummer 1-1-1-32) nach  $N = 4 \times 10^8$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen; Vergrößerung aus Abbildung 4-15 b, blau gestrichelte Linien = intralaminare Risse, rot gestrichelte Linie = Meta-Delaminationen in Gewebeeinheitszelle (1) und (2), grün gestrichelte Linie Verbindungsrisse zwischen zwei Meta-Delaminationen

#### 4.3.4 Zusammenfassung und Fazit

Durch die Entwicklung eines Ultraschall-Hochfrequenzprüfstandes ( $f = 20,26$  kHz) in Kombination mit zerstörungsfreien Online-Prüfmethoden für Kohlenstofffaserkunststoffverbunde ist es möglich, ein Verständnis der Ermüdungsmechanismen von hochfrequenzbeanspruchten Kohlenstoffverbunden zu erlangen. Im Ausgangszustand und nach der Ermüdung werden die Proben mit ausgewählten zerstörungsfreien Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Fehlerfreiheit im Ausgangszustand sowie der Fehlerarten nach der Beanspruchung untersucht. Die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik lokalisiert Delaminationen und interlaminare Risse im Inneren der Probe im mm-Bereich. Eine größere Fehlerauflösung erlaubt die Röntgencomputertomografie. Risse und kleinere Einschlüsse im  $\mu\text{m}$ -Bereich werden bei dieser Technik aufgezeigt. Aufgrund des geringen Unterschieds im spezifischen Absorptionskoeffizienten der Röntgenstrahlung zwischen den Kohlenstofffasern und der Matrix ist keine Unterscheidung zwischen

den Fäden in 0°- und 90°-Richtung sowie der Matrix möglich. Intralaminare Risse in der Größenordnung von einigen 10 µm können aufgrund ihrer Ausrichtung im Verbund detektiert werden. Das Auffinden von interlaminaren Rissen oder Meta-Delaminationen ist möglich, jedoch ist eine direkte Unterscheidung aufgrund des geringen Kontrastunterschieds in der Gewebereinheitszelle unmöglich. Zur globalen, qualitativen Abschätzung des mechanischen Materialzustands findet die Resonanzspektroskopie Verwendung. Eine Herabsetzung der elastischen Eigenschaften aufgrund von Schädigungen im Verbund bewirkt eine Verringerung der Eigenresonanzfrequenzen. Eine Lokalisierung und Fehlerunterscheidung bei dieser Methode nicht möglich. Um einen Zugang zu den Ermüdungsmechanismen zu erhalten, sind lichtmikroskopische Aufnahmen am besten geeignet. Durch die Aufnahmen konnte eine klare Schadensabfolge festgestellt werden. Die Ergebnisse von Daggumati et al. [Daggumati, 13] bei niederfrequenter Beanspruchung stimmen mit denen der hochfrequenten Beanspruchung überein. Im ersten Schritt entstehen intralaminare Risse im Kettfadenbündel (90° Faser) gefolgt von Meta-Delaminationen, die sich durch Spannungskonzentrationen an den Risspitzen zu einem interlaminaren Riss miteinander verbinden. Hierdurch setzt eine mechanische Schwächung der jeweiligen Gewebereinheitszellen ein, die eine Entstehung von Delaminationen begünstigt. Longitudinale Faserablösungen, die unter quasi-statischer Zugbeanspruchung zu erwarten sind, treten nicht auf.

Die Messdaten der Offline-Charakterisierung geben keinen Hinweis zum Zeitpunkt der Rissentstehung. Aus diesem Grund werden die Ultraschallzeitsignaldaten der Online-Überwachung mit den Messdaten der Offline-Charakterisierung kombiniert. Die Korrelation soll weitere Informationen hinsichtlich der Art und dem Zeitpunkt der Entstehung von Ermüdungsschäden während der Beanspruchung liefern. Unterschiedliche Spektralanalyseverfahren sollen dazu dienen, Änderungen in den Probeneigenschaften, die zu einer Veränderung des Ultraschallzeitsignals führen, sichtbar zu machen.

## 5 Analyse der zeitlichen Schädigungsentwicklung in C-Faser-2D-Geweben im VHCF-Bereich

In dem folgenden Kapitel werden die Messdaten der Online-Überwachung mit den Daten der Offline-Charakterisierung kombiniert, um Aussagen über den Zeitpunkt der eintretenden Ermüdungsschäden treffen zu können. Für die Korrelation der Ergebnisse werden drei CF-PPS-Proben (Probe 1, Probe 2 und Probe 3) herangezogen, die unterschiedliche Ermüdungsstadien aufweisen. Eine Liste mit den weiteren untersuchten Proben befindet sich im Anhang Kapitel 7. Die drei im weiteren Verlauf der Arbeit diskutierten Proben haben die Seriennummern: 1-1-1-32, 1-1-1-37 und 1-1-1-4.

### 5.1 Ergebnisse der zerstörungsfreien Offline-Untersuchungen von drei beanspruchten CF-PPS-Proben

In Tabelle 2 sind die Messdaten und Versuchsparameter der drei ausgewählten CF-PPS-Proben aufgeführt. Alle drei Proben wurden mit einer anfänglichen statischen Mittellast von 115 MPa beansprucht. Im fortschreitenden Ermüdungsexperiment nimmt die Mittellast aufgrund der Einkerbung der Auflager und der Sonotrode ab. Die Beanspruchungsamplitude  $\sigma_a$  war bei Probe 1 (65 MPa) am größten, betrug 60 MPa bei Probe 2, und war bei Probe 3 mit 54 MPa am geringsten. Die Pulszeit betrug bei allen Proben 100 ms.

Probe 1 mit der Seriennummer 1-1-1-32 (Vergleich Kapitel 4.3) zeichnete sich neben interlamina ren Rissen vor allem durch viele kleine intralaminare Risse aus. Durch CT-Aufnahmen konnten vereinzelte kleine delaminierte Regionen in der Größenordnung von ein bis zwei Millimeter aufgezeigt werden. Größere schwere Schäden sind an der Oberfläche nicht zu sehen. Die relative Frequenzänderung des 1. transversalen Biegemodes vom Ausgangszustand bis zur Beanspruchungspause betrug lediglich 2,2 %. Das Ermüdungsexperiment wurde bei dieser Probe aufgrund eines schlechten Schwingverhaltens und einer Temperaturerhöhung an der Sonotrode sowie im linken Schubspannungsbereich nach  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen angehalten. Die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik konnte starke Ultraschallreflektoren in den Bereichen der Temperaturerhöhung messen (Abbildung 4-14).

Tabelle 2. Messdaten und Versuchsparameter zu drei ausgewählten CF-PPS-Proben

<b>Probe</b> (Seriennummer)	<b>1</b> (1-1-1-32)	<b>2</b> (1-1-1-37)	<b>3</b> (1-1-1-4)
<b>Geometrie</b> (Länge × Breite × Dicke)	33,5 × 15 × 4,06 mm <sup>3</sup>	33,4 × 15 × 4,06 mm <sup>3</sup>	33,65 × 15,8 × 4,02 mm <sup>3</sup>
<b>Beanspruchungszyklen</b>	4 × 10 <sup>8</sup>	1,4 × 10 <sup>7</sup>	3,3 × 10 <sup>8</sup>
<b>Anfängliche Mittellast</b>	100 µm / 115 MPa	100 µm / 115 MPa	100 µm / 115 MPa
<b>Beanspruchungsamplitude</b>	36,4 µm / 65 MPa	33,6 µm / 60 MPa	30,0 µm / 54 MPa
<b>Pulszeit</b>	100 ms	100 ms	100 ms
<b>Pulspause</b>	2000 ms	2000 ms	2500 ms
<b>Auflagermaterial</b>	Randgehärteter Stahl	Pulvermetallurgisch beschichteter Stahl	Rostfreier Stahl
<b>Einkerbungtiefe</b> (Sonotrode / Auflager links / rechts)	27 µm / 220 µm / 228 µm	25 µm / 76 µm / 144 µm	36 µm / 158 µm / 156 µm
<b>Frequenz des 1. transversalen Biegemode im Ausgangszu- stand</b>	19,398 kHz	19,245 kHz	19,283 kHz
<b>Frequenz des 1. transversalen Biegemode nach Beanspru- chung</b>	18,963 kHz	18,711 kHz	18,024 kHz
<b>Relative Frequenzänderung</b>	2,2 %	2,8 %	6,5 %
<b>Versuchsabbruchsursache</b>	schlechte Schwin- gung und Tempera- turerhöhung an der Sonotrode und Schubspannungsbe- reich links	Temperaturerhö- hung hinten rechts	Temperaturerhö- hung zwischen dem linken Aufla- ger und der Sono- trode

Bei Probe 2 mit der Seriennummer 1-1-1-37 sind im Gegensatz zu Probe 1 erste größere delaminierte Regionen an der Stirnfläche sichtbar (Abbildung 5-1 e). Die Beanspruchungspause erfolgte wegen einer Temperaturerhöhung in der Nähe des rechten Auflagers nach bereits  $N = 1,4 \times 10^7$  Beanspruchungszyklen. Bei der Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik wurden an dieser Position größere Ultraschallreflektoren festgestellt (Abbildung 5-1 a und b). Das CT-Bild in Abbildung 5-1 c zeigt einen Ausschnitt aus dem Ultraschall B-Bild (roter Kasten aus Abbildung 5-1 a). Hier sind neben intralaminaren auch interlaminare Risse oder Meta-Delaminationen sichtbar. Die Unterscheidung bzgl. der Fehlerart ist aufgrund des gerin-

gen Kontrasts zwischen Faser und Matrix für die beiden zuletzt genannten Fehler im Volumen nicht möglich (siehe Kapitel 3.3.2). Zusätzlich sind größere schwarze Flächen sichtbar (Abbildung 5-1 d). Bei diesen Flächen handelt es sich um Delaminationen. Die Anzahl dieser Fehler ist deutlich größer als bei Probe 1 (vgl. Abbildung 4-14 c und d). Dies wirkt sich auch auf die relative Frequenzänderung des 1. transversalen Biegemodes aus. Dieser hat bei Probe 1 einen Wert von 2,2 %, bei Probe 2 aber einen Wert von 2,8 %.

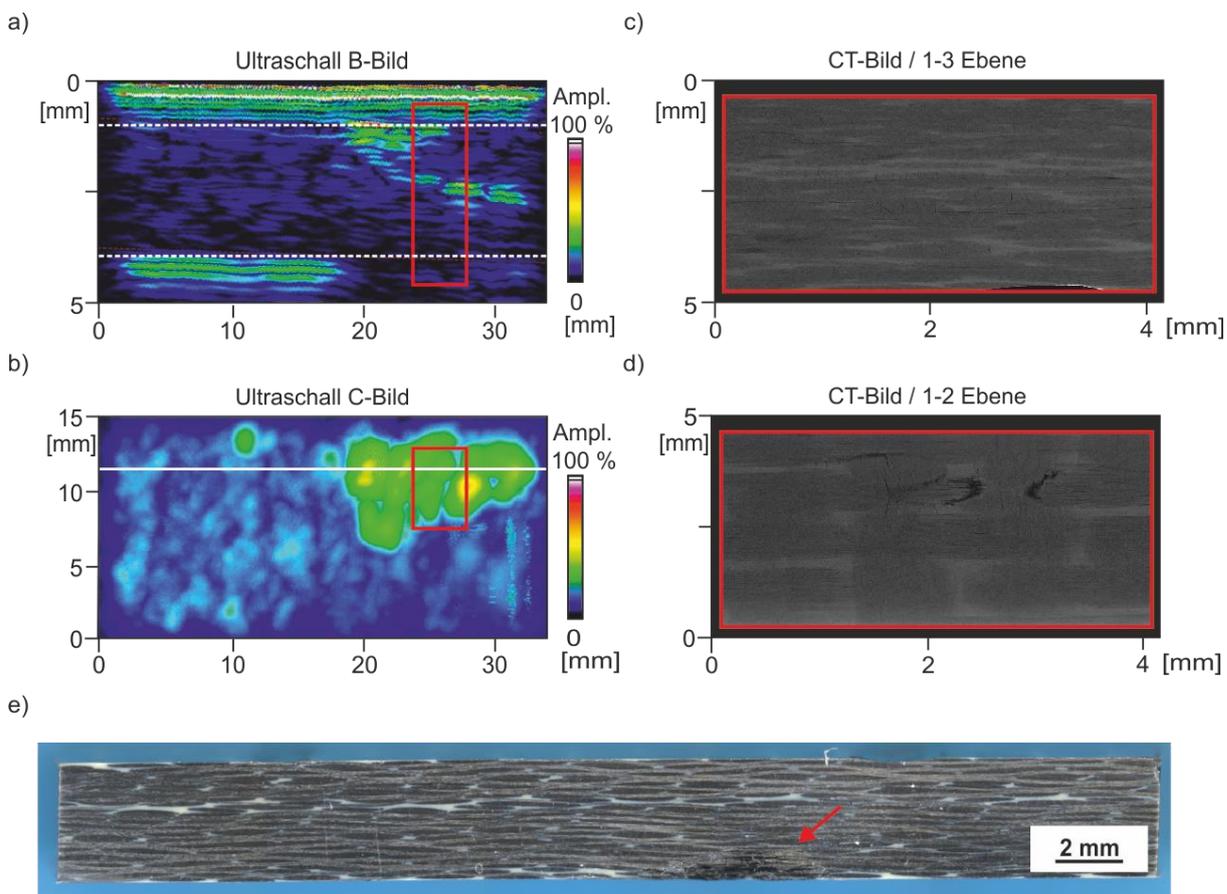


Abbildung 5-1. (Probe 2): a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall C-Bild, c) Computertomografiebild (ungefähr Probenmitte) in der 1-3 Ebene; d) 1-2 Ebene und e) lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante (Rückseite mit Auflagereinkerbungen oben) nach  $N = 1,4 \times 10^7$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen. Der rote Pfeil zeigt auf den Bereich mit Delaminationen.

Probe 3 mit der Seriennummer 1-1-1-4 wurde mit  $N = 3,3 \times 10^8$  Zyklen beansprucht. Die Pulspause wurde im Experiment von 2000 ms auf 2500 ms verlängert. Der Versuchsabbruch erfolgte aufgrund einer starken Temperaturerhöhung zwischen dem linken Auflager und der Sonotrode. Auf den ersten Blick ist an der rückseitigen Stirnfläche ein großer massiver Schaden zu sehen, der sich von links bis zur Mitte hin ausbreitet (Abbildung 5-2 e). Die Ultraschallfehlerprüfung kann mehrere starke Ultraschallreflektoren im Bereich des Maximums der Schubspannung während der Ermüdung feststellen (Abbildung 5-2 a). Die US-Reflektoren bedecken etwa 1/3 der Probenfläche (Abbildung 5-2 b). Bei einer genaueren Untersuchung

des Volumens der Probe konnten bei CT-Messungen großflächige Fehler sichtbar gemacht werden (Abbildung 5-2 c und d). Resonanzspektroskopische Untersuchungen ergaben eine relative Frequenzänderung von mehr als 6,5 %.

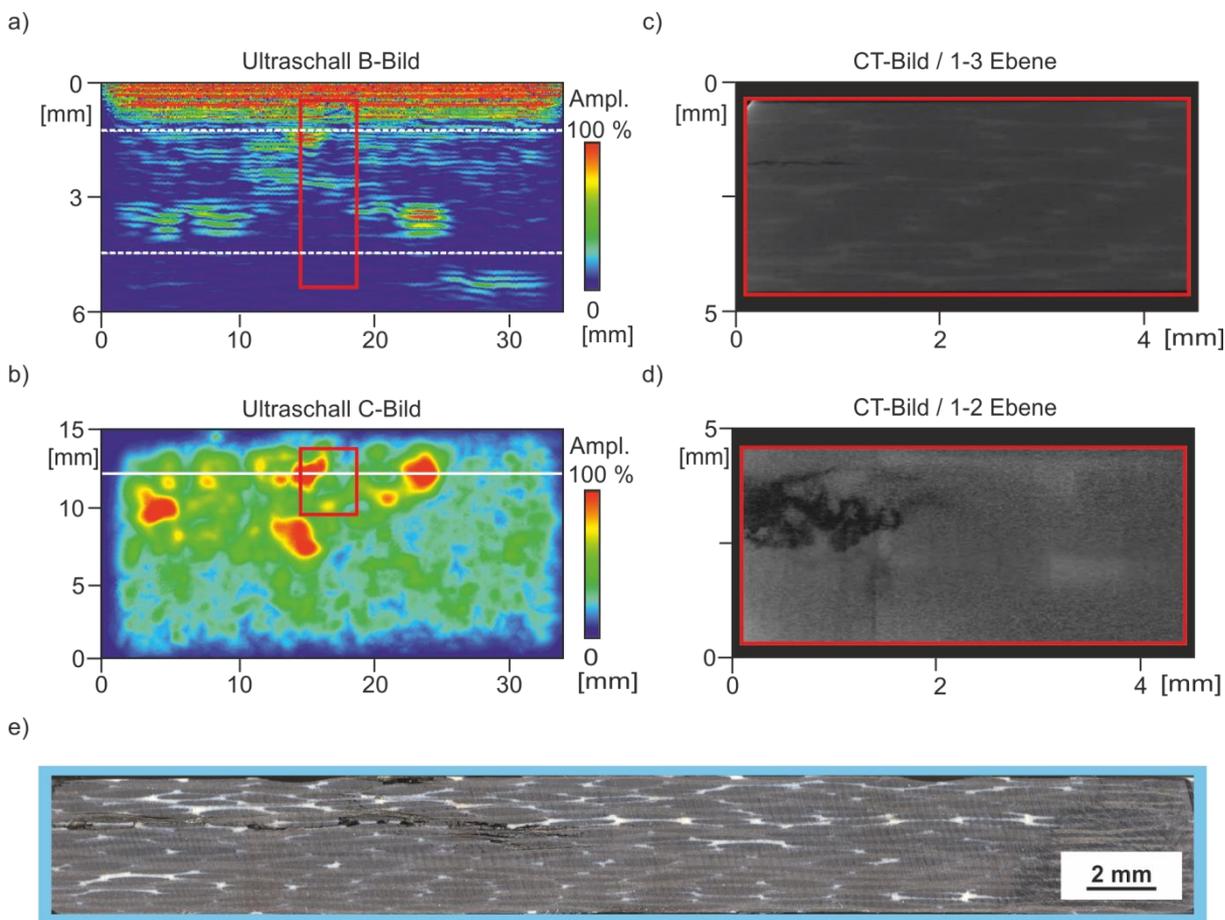


Abbildung 5-2. (Probe 3) a) Ultraschall B-Bild und b) Ultraschall C-Bild, c) Computertomografiebild (ungefähr Probenmitte) in der 1-3 Ebene; d) 1-2 Ebene und e) Lichtmikroskopische Aufnahmen der Seitenkante (Rückseite mit Auflagereinkerbungen oben) nach  $N = 3,3 \times 10^8$  ( $= N_f$ ) Beanspruchungszyklen

Probe 3 besitzt nach Probe 2 die mit Abstand größten Schäden. Kleinere Delaminationen konnten bei Probe 1 nur im Innern aufgrund von CT- und Ultraschall-Untersuchungen festgestellt werden. Lichtmikroskopische Aufnahmen an der Probenstirnfläche zeigten die unterschiedlichen Ermüdungsmechanismen in einem 2D-Gewebe (Abbildung 4-16). Intralaminare Risse in den  $90^\circ$ -Fasern erzeugen Meta-Delaminationen, die entlang der Grenzfläche Faser-Matrix ( $0^\circ$  Fasern) in einer Gewebeeinheitszelle verlaufen. Kommt es zu einer kritischen Annäherung von zwei Meta-Delaminationen zweier benachbarter Gewebeeinheitszellen, entwickelt sich eine Rissverbindung. Bei dieser Verbindung spricht man von einem interlaminaren Riss. Bei weiterer Beanspruchung nehmen die adhäsiven Kräfte der Matrix zwischen den Gewebeeinheitszellen aufgrund des interlaminaren Risses weiter ab, und die Wahrscheinlichkeit einer größeren delaminierten Region an dieser Stelle nimmt zu.

Die Verwendung unterschiedlicher Auflagerwerkstoffe führt zu veränderten Einkerbungstiefen der Sonotrode und der Auflager. Bei rostfreiem Stahl wurde eine durchschnittliche Einkerbung der Auflager von 157  $\mu\text{m}$  der Sonotrode von 36  $\mu\text{m}$  erhalten (Probe 3). Bei Probe 1, die in der gleichen Größenordnung beansprucht wurde, konnte eine durchschnittliche Auflager-einkerbung von 224  $\mu\text{m}$  gemessen werden. Diese Einkerbvertiefung führt zu einer deutlichen Verringerung der statischen Mittellast im fortschreitenden Ermüdungsexperiment. Die Ergebnisse der Offline-Charakterisierungen lassen aber keinen Zusammenhang zwischen den Auflagern und dem Ausgangspunkt von Ermüdungsschäden aufgrund von oberflächigen Einkerbungen erkennen.

Die unterschiedlichen Schadensstadien der hier ausgesuchten CF-PPS-Proben (Probe 1 bis 3) sollen dazu dienen, die gemessenen Änderungen im Ultraschallsignal während der Online-Überwachung mit aus der Offline-Charakterisierung nach der Beanspruchung festgestellten Fehlerarten (intralaminaren Rissen, Meta-Delaminationen, interlaminare Risse, große Delaminationen) zu korrelieren.

## 5.2 Ergebnisse der Online-Überwachung von drei ausgesuchten CF-PPS-Proben

Um eine Änderung der Probeneigenschaften während des Ermüdungsexperiments sichtbar zu machen, werden die gemessenen Ultraschallsignale mittels geeigneter Signalauswerteverfahren analysiert. In einem ersten Schritt werden die Frequenzspektren der Zeitsignale, die während eines Ermüdungsexperiments mittels Mikrofon sowie Laservibrometer aufgenommen wurden, durch die schnelle Fourier-Transformation (FFT) bestimmt. Die FFT-Spektren werden in dieser Arbeit in einem Energie-Frequenz-Diagramm dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Normierung nach der Schwingungsenergie der Grundfrequenz  $f_0$ . Die Berechnung der Energie aus der Amplitude des Laservibrometers [ $\mu\text{m}$ ] und des Mikrofons [V] wird im Anhang in Kapitel 7.4 genauer erläutert. Hierdurch können Veränderungen im Frequenzspektrum einfacher visualisiert werden, da der gesamte zur Verfügung stehende Bereich im Graph ausgenutzt werden kann.

Die Frequenzspektren zu unterschiedlichen Beanspruchungszyklen von Probe 1, berechnet aus dem Laservibrometer- (blau) sowie Mikrofon-Zeitsignal (grün), sind in Abbildung 5-3 zu sehen. Das Energiemaximum im Frequenzspektrum liegt bei allen Spektren bei  $f = 20,28$  kHz. Dies entspricht der Frequenz der Beanspruchungseinheit im Ermüdungsexperiment. Am Versuchsanfang sind neben der Grundfrequenz  $f_0$  (Beanspruchungsfrequenz, Anregungsfrequenz) bereits höhere harmonische Frequenzen  $f_n$  vorhanden. Höhere harmonische Frequenzen sind vielfache der Anregungsfrequenz ( $f_n = n \cdot f_0$ ), wobei  $n$  eine positive ganze Zahl zwischen 2 und unendlich sein kann. Höhere harmonische Frequenzen entstehen selbst bei fehlerfreien Werkstoffen aufgrund der sogenannten klassischen Nichtlinearität [Klepka, 13; Jhang, 09; Helfen, 12]. Zum anderen wird die Nichtlinearität, die aufgrund von Rissen erzeugt wird,

als nichtklassische Nichtlinearität bezeichnet. Befindet sich ein Riss in einem Bauteil im Frühstadium (Riss ist geschlossen), ist dieser im unbeanspruchten Zustand und unter Druckbeanspruchung geschlossen. Hierbei kann die Steifigkeit des Risses mit der Steifigkeit des ihm umgebenden Materials beschrieben werden. Unter Zugbeanspruchung öffnet sich der Riss und die Steifigkeit nimmt stark ab. Die Öffnung kann durch die Zugkomponente einer ausreichend großen Ultraschallwelle erfolgen, die in der Lage ist, die Rückstellkräfte eines Risses zu überwinden. Dieser erzeugte Knick bzw. asymmetrische Steifigkeitsverlauf, verursacht durch die Öffnung eines Mikrorisses, stellt eine Unstetigkeitsstelle im Steifigkeitsverlauf dar und sorgt für eine zusätzliche Quelle von Nichtlinearität [Klepka, 13; Jhang, 09; Helfen, 12]. Des Weiteren liefern Kontaktkräfte einen weiteren Beitrag zur Nichtlinearität. Bei  $N = 2,0 \times 10^7$  Beanspruchungszyklen ist eine subharmonische Frequenz mit einer Frequenz von  $f_{S1} = 6,75$  kHz sichtbar. Subharmonische Frequenzen sind Bruchteile der Anregungsfrequenz mit  $f_{Sn} = f_0/n$ , wobei  $n$  eine positive ganze Zahl zwischen 2 und unendlich sein kann. Sie entstehen durch einen zeitretardierten Öffnungs- und Schließprozess eines Risses aufgrund einer Ultraschallwelle. Die Rückstellkraft des Risses wird durch die Zugkomponente einer Ultraschallwelle überwunden. Nimmt diese Zugkraft ab, möchte sich der Riss schließen. Ist die Zeit, die der Riss benötigt um sich zu schließen, länger als die Dauer des Zyklus der Ultraschallwelle, kann die Welle den Riss nicht überwinden. Als Ergebnis erhält man z.B. eine Doppelung der Periode und eine Halbierung der Frequenz auf  $f_0/2$  [Ohara, 06; Yamana-ka, 07; Yamana-ka, 04]. Zusätzlich ist bei  $f_{M1} = 27,03$  kHz eine Mischfrequenz der subharmonischen Frequenz  $f_{S1} = 6,75$  kHz zu erkennen. Mischfrequenzen sind eine Amplitudenmodulation eines hochfrequenten Ultraschallsignals aufgrund einer niederfrequenten Vibration, in diesem Fall mit der subharmonischen Frequenz  $f_{S1}$ , mit ausreichend hoher Amplitude zum Öffnen und Schließen eines Mikrorisses. Im Druckbereich der niederfrequenten Vibration eines Zyklus bleibt der Mikroriss verschlossen. Die Amplitude des hochfrequenten Ultraschallsignals kann sich ungehindert ausbreiten. Unter Zugbeanspruchung ist das hochfrequente Signal aufgrund des geöffneten Risses partiell entkoppelt. Dies führt zu einer Reduzierung der Ultraschallamplitude im Zugbereich. Als Ergebnis ergibt sich eine Amplitudenmodulation des eingeschallten höherfrequenten Ultraschallsignals. Im Fourier-Spektrum werden diese Amplitudenmodulationen durch Seitenbänder um die Grundfrequenz und die höheren harmonischen Frequenzen sichtbar.

Mit fortschreitender Ermüdung nehmen die subharmonischen Frequenzen ab, und es entstehen bei  $N = 2,0 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen neue Frequenzen ( $f = 3,7$  kHz und  $f = 6,34$  kHz), die sich wiederum mit der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen mischen. Die Entstehung dieser Frequenzen ist unklar.

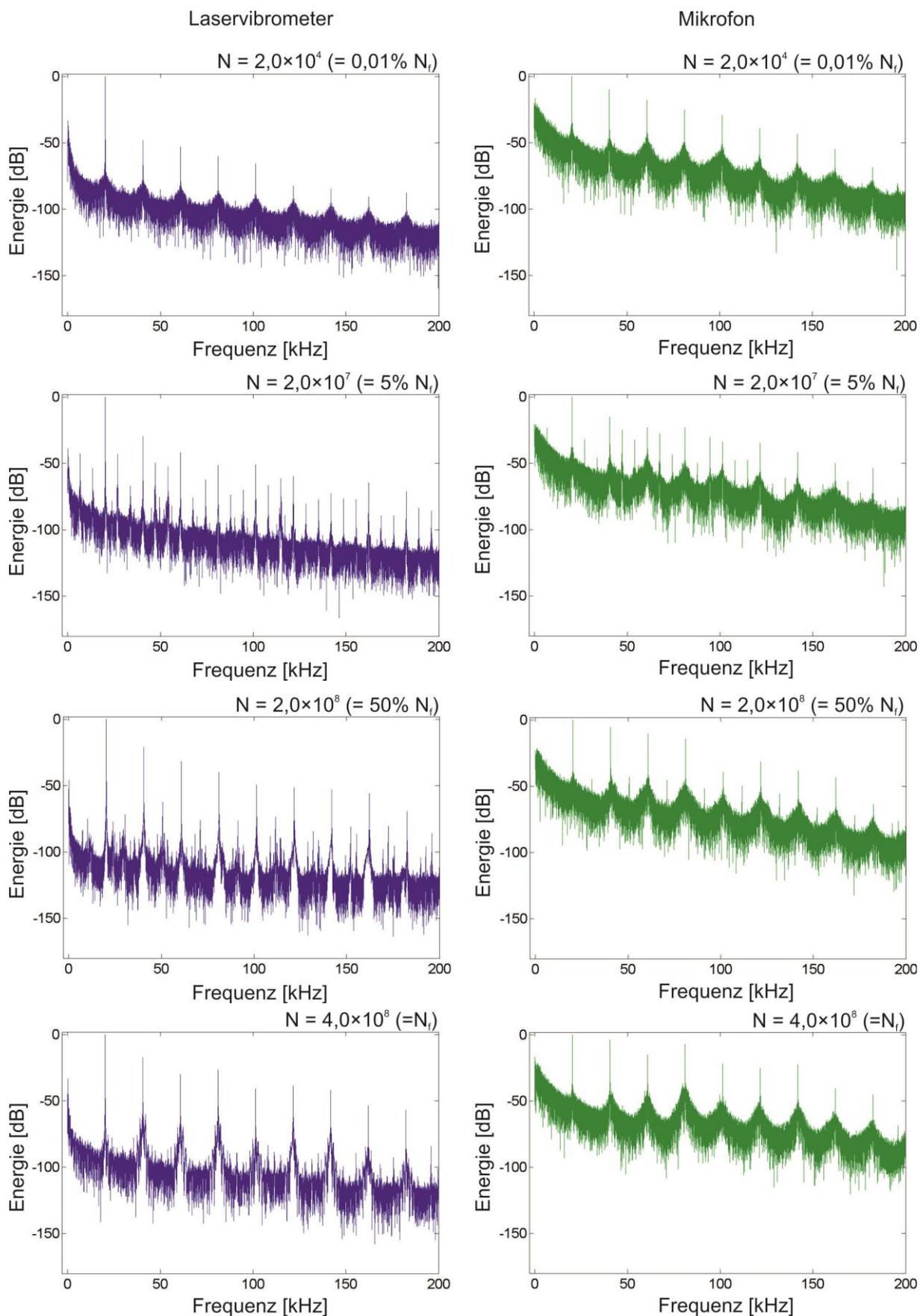


Abbildung 5-3. (Probe 1) Fourier-Spektrum berechnet aus den Zeitsignalen des Laservibrometers (blau) und des Mikrofons (grün) nach  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^7$ ,  $N = 2 \times 10^8$  und  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen

Subharmonische Frequenzen entstehen bei der Anwesenheit von Defekten an Grenzflächen (z. B. Mikrorisse, Delaminationen). Demgegenüber können sich höhere harmonische Frequenzen zusätzlich aufgrund eines nichtlinearen Materialverhaltens und bei der Schalleinkopplung (Kontaktproblem) bilden [Jhang, 09]. Dies erschwert zusätzlich die Auswertung der höheren harmonischen Frequenzen hinsichtlich der Existenz von Mikrorissen. Die weiteren Frequenzen können vielfältige Quellen besitzen. Sie können einerseits durch Mikrorisse entstehen. Andererseits können Störgeräusche (Luftkühlung, externe Geräte), Reibungskräfte der Auflager und der Sonotrode mit den harmonischen Frequenzen mischen und zu einer Bildung von Mischfrequenzen führen. Kurz vor Ende des Experiments ( $N = 4,0 \times 10^8$ ) verschwinden die subharmonischen Frequenzen mit ihren Mischfrequenzen und die Grundfrequenz mit den höheren harmonischen Frequenzen ist zu sehen. Die Mikrofonenspektren bestätigen den Trend der Laservibrometerspektren. Eine Literaturübersicht über nichtlineare Ultraschalltechniken zur zerstörungsfreien Detektion von Mikrorissen in Werkstoffen finden sich unter anderem in den Werken von K.Y. Jhang, I. Solodov et al. und D. Broda et al. [Jhang, 09; Solodov, 10; Broda, 14].

Der spektrale Inhalt der Probenschwingung ändert sich im Verlauf des Ermüdungsexperiments. In den jeweiligen Spektren sind die höheren harmonischen Frequenzen sowie die Grund- bzw. Beanspruchungsfrequenz und zusätzliche dazwischen liegende Resonanz/Mischfrequenzen zu sehen. Die Amplitude der Grundfrequenz während eines Pulses bleibt aufgrund der Regelung der Ermüdungsvorrichtung konstant. Kommt es aufgrund einer Schädigung in der Probe zu einer Abnahme der Generatoramplitude, regelt der Generator nach, indem er die Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit um einige Hz nach unten korrigiert. Aus diesem Grund lässt sich die Zunahme der Nichtlinearität des Schwingungssignals nicht nur durch die Änderung der Probe, sondern zusätzlich durch die Änderung des gesamten Systems aus Auflager, Beanspruchungseinheit, statischer Mittellast sowie CF-PPS-Probe erklären. Im Verlauf der Beanspruchung nimmt die statische Mittellast aufgrund der Einkerbung der Auflager und der Sonotrode ab. Dies bedeutet, dass es mindestens zwei Prozesse gibt, die gleichzeitig ablaufen. Die Abnahme der statischen Mittellast führt zu einer Verringerung der klassischen Nichtlinearität. Des Weiteren werden geöffnete Risse aufgrund von statischen Zugkräften wieder verschlossen.

Um die Änderung der Nichtlinearität der Probenschwingung in der Ermüdungsvorrichtung abschätzen zu können, wird ein spezieller Klirrfaktor  $K[\%]$  berechnet, der die harmonischen Frequenzen  $A_i$  berücksichtigt. Dieser setzt sich aus den 12 harmonischen Frequenzen im Frequenzintervall von  $f = 20$  kHz bis  $f = 250$  kHz zusammen.  $K$  wird definiert als:

$$K[\%] := 100 \cdot \sqrt{\frac{A_2^2 + A_3^2 + \dots}{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + \dots}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^n A_i^2}{\sum_{i=1}^n A_i^2}} \quad 5-1$$

In Abbildung 5-4 ist der Klirrfaktorverlauf zu sehen, der aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen in Abhängigkeit von der Anzahl der Beanspruchungszyklen aus den Fourier-Frequenzspektren des Laservibrometer-Zeitsignals (blau) und des Mikrofon-Zeitsignals (grün) berechnet wurde. Die Punkte (1) bis (4) in Abbildung 5-4 kennzeichnen die Klirrfaktoren der in Abbildung 5-3 gezeigten Fourier-Spektren. Die dazwischenliegenden Resonanz/Mischfrequenzen werden bei dieser Auswertung jedoch nicht berücksichtigt. Der absolute Wert des Klirrfaktors, der aus dem ausgewerteten Zeitsignal des Mikrofons berechnet wurde, ist größer als der des Laservibrometers. Nichtsdestotrotz weisen beide Kurven nahezu das gleiche Verhalten in Abhängigkeit von der Beanspruchungszyklenanzahl auf. Beide Kurven weisen einen starken stufenweisen Anstieg sowie Abfall nach  $N = 7,0 \times 10^7$  ( $= 17,5 \% N_f$ ), und  $N = 2,1 \times 10^8$  ( $= 52 \% N_f$ ) auf. Zu einem kritischen Anstieg und Abfall des Klirrfaktors kommt es kurz vor dem Versagen der CF-PPS Probe bei  $N = 4,0 \times 10^8$  ( $= 99,99 \% N_f$ ).

Wie bereits beschrieben, verhalten sich Kohlenstofffaserkunststoffverbunde mechanisch nichtlinear, selbst wenn kein Schaden vorhanden ist. Zu sehen ist dies auch an den bereits stark vertretenen höheren harmonischen Frequenzen in Abbildung 5-3 relativ am Anfang des Experiments bei  $N = 2,0 \times 10^4$  ( $= 0,01 \% N_f$ ). Der allgemeine Anstieg des Klirrfaktors während des Ermüdungsexperiments lässt sich vermutlich durch eine Zunahme von Fehlern, wie zum Beispiel durch intralaminare Risse, Meta-Delaminationen und interlaminare Risse erklären. Mit fortschreitendem Ermüdungsgrad nimmt die Anzahl dieser Risse zu.

Der Klirrfaktoranstieg nach  $N = 4,0 \times 10^8$  ( $= 99,99 \% N_f$ ) Beanspruchungszyklen kann auf die Entstehung vieler Mikrorisse hindeuten. Der plötzliche Abfall könnte auf größere Risse oder offene Delaminationen hinweisen. Komplett geöffnete Delaminationen dienen als Ultraschallreflektoren und sind nur an der Rändern Quellen der Nichtlinearität.

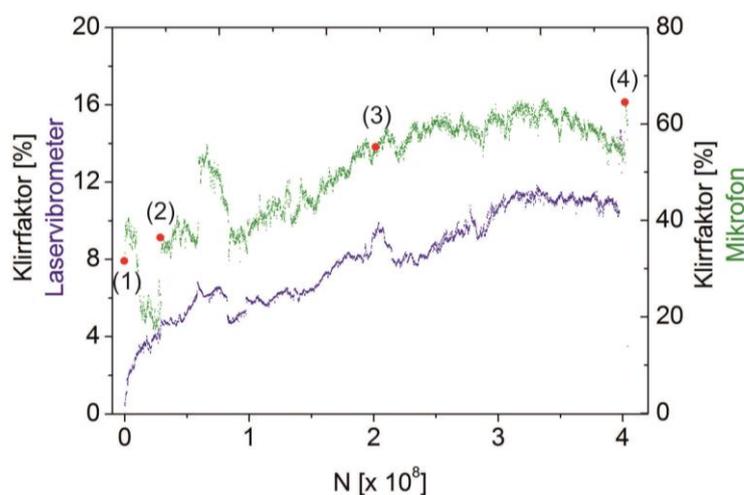


Abbildung 5-4. (Probe 1) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen der Fourier-Spektren des Laservibrometer- (blau) und des Mikrofon-Zeitsignals (grün). Die Punkte (1) – (4) in der Abbildung beziehen sich auf die in Abbildung 5-3 gezeigten Spektren.

Um als zusätzliche Information die zeitliche Veränderung des Frequenzspektrums während eines Ultraschallimpulses ermitteln zu können, wird als weiteres Spektralanalyseverfahren die Kurzzeit-Fourier-Transformation (STFT) verwendet. Bei dieser Form der Auswertung wird ein Zeitfenster mit fest definierter Länge (hier 2,162 ms entspricht 12 Schwingungsperioden) durch ein Zeitsignal geschoben. Im jeweiligen Zeitfenster wird mit der schnellen Fourier-Transformation ein Spektrum berechnet. Als Ergebnis erhält man ein Zeit-Frequenz-Amplituden-Schaubild (vgl. Kapitel 3.4.1). In Abbildung 5-5 sind die Kurzzeit-Fourier-Transformationsspektren, die aus dem Laservibrometer-Zeitsignal (linke Spalte) und Mikrofon-Zeitsignal (rechte Spalte) berechnet wurden, mit den entsprechenden Amplituden-Zeitsignalen nach  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^7$ ,  $N = 2 \times 10^8$  und  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen zu sehen. Wie bereits in Abbildung 5-3 zu sehen, befindet sich das Amplitudenmaximum bei der Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit von  $f_0 = 20,26$  kHz. Auch höhere harmonische Frequenzen der Grundfrequenz werden sichtbar. Wie bereits beim Klirrfaktorverlauf (Abbildung 5-4) sind die absoluten Werte der Amplitudenmaxima beim Mikrofon größer als beim Laservibrometer. Des Weiteren weisen die STFT-Spektren des Mikrofons ein kleineres Signal-Rauschverhältnis auf. Dies liegt an der zusätzlichen ungewollten Aufnahme von Störgeräuschen der Luftkühlung und der Beanspruchungseinheit. Nach den ersten Ultraschallpulsen ist auch hier eine subharmonische Frequenz bei  $f_R = 6,75$  kHz sichtbar, die sich mit den harmonischen Frequenzen mischen. Die subharmonischen Frequenzen treten erst während der konstanten Puls-Amplitude (vgl. Abbildung 4-11, Bereich ②) auf. Währenddessen ist der Bereich des Pulsstarts, der aktiven Pulsdämpfung und das freie Ausschwingen des Systems frei von solchen Frequenzen (vgl. Abbildung 4-11, Bereiche ①, ③ und ④). Nach ca. 50% der Bruchlastspielzahl nimmt die Energie der subharmonischen Frequenzen ab. Während des Pulsstarts und bei der aktiven Dämpfung bilden sich Mischfrequenzen, die im Bereich der konstanten Pulsamplitude nicht vorhanden sind. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Mischfrequenzen nicht aufgrund von Mikrorissen in der Probe entstanden sind. Eine mögliche Erklärung könnte die Reibung der Auflager auf der Probe sein. Die Amplitudenenergie der höheren harmonischen Frequenzen nimmt während des Ermüdungsexperiments zu. Die Auswirkungen der Auflager- und Sonotrodeneinkerbungen scheinen bei dieser Probe sehr gering zu sein.

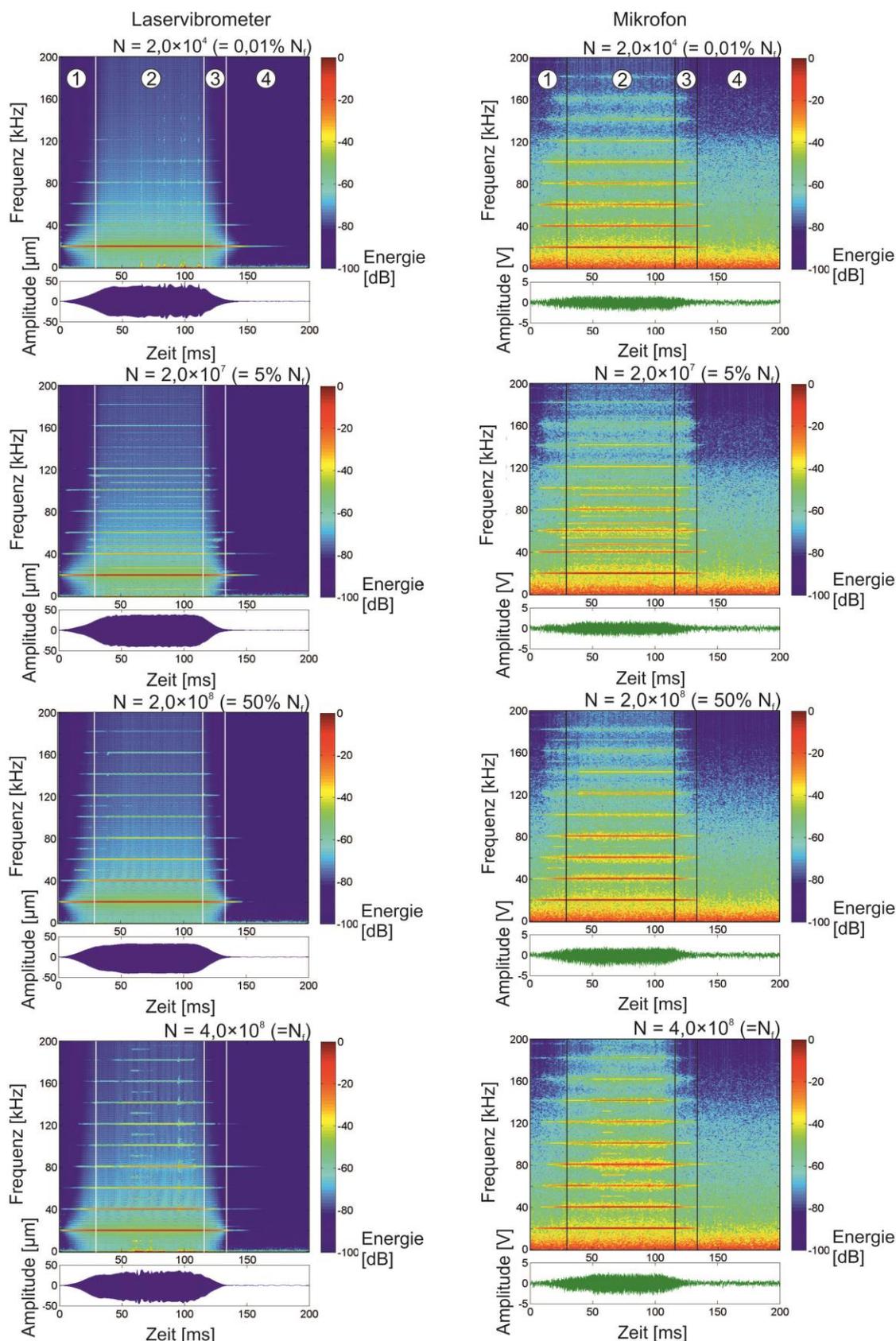


Abbildung 5-5. (Probe 1) Kurzzeit-Fourier-Transformationspektren von Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^7$ ,  $N = 2 \times 10^8$  und  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen mit entsprechenden gemessenen Amplituden-Zeit-Signalen; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$  ms]

Mit der STFT ist es möglich, den Verlauf des Klirrfaktors berechnet aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit zu bestimmen. In Abbildung 5-6 ist der spezielle Klirrfaktorverlauf während eines Beanspruchungszyklus zu sehen. Generell ist ein Anstieg des Klirrfaktors im Bereich ② der konstanten Puls-Amplitude mit zunehmenden Beanspruchungszyklen für das Laservibrometer sowie für das Mikrofon zu sehen. Der absolute Wert des Klirrfaktors, berechnet aus den Mikrofon-Zeitsignalen, ist auch hier größer als der Wert aus den Signalen des Laservibrometers. Zu Beginn des Ermüdungsexperiments ist der Verlauf bei konstanter Puls-Amplitude etwa konstant. Mit zunehmenden Beanspruchungszyklen steigt dieser und es kommt am Ende zu zusätzlichen starken Anstiegen im Verlauf (oranger Pfeil in Abbildung 5-6). Der stetige Anstieg in diesem Bereich ist mit der Zunahme der höheren harmonischen Frequenzen und einer zusätzlichen Abnahme von Subharmonischen- und Mischfrequenzen zu erklären. Der starke Anstieg (oranger Pfeil) könnte aufgrund von lokalen Erwärmungen der Rissflanken entstehen. Diese würden zu einer globalen Erwärmung der Polymermatrix und zu einer Erniedrigung der Steifigkeit des Verbundes führen. Dieser Prozess würde wiederum einen Beitrag zur klassischen Nichtlinearität im System liefern.

Im Bereich ① des Pulsstarts ist bei den berechneten Klirrfaktorverläufen des Laservibrometers sowie des Mikrofons ein Peak (roter Pfeil Abbildung 5-6) zu erkennen. Mit zunehmenden Beanspruchungszyklen erscheint dieser zu früheren Zeiten. Am Anfang des Ermüdungsexperiments liegt das Maximum bei  $t_{0,001\%N_f} = 10$  ms und nimmt auf  $t_{N_f} = 3,85$  ms ab. Dies spricht für ein besseres Einschwingverhalten der CF-PPS-Probe im Ermüdungsexperiment. Das absolute Maximum (7 %) des Peaks liegt bei ungefähr  $N = 2,0 \times 10^7$  Beanspruchungszyklen und erreicht sein Minimum von 2 % bei  $N = 4,0 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen (Laservibrometer). Eine solche Veränderung liegt auch in den Verläufen des Mikrofons vor. Jedoch beträgt der Wert des absoluten Maximums 68 % und nimmt zum Ende des Experiments auf 28 % ab. Sobald es zum Abschalten der aktiven Dämpfung kommt, nimmt der Klirrfaktor massiv zu. Aufgrund des schlechten Signal-Rauschverhältnisses wird der Bereich ④ nicht in der Auswertung in Betracht gezogen.

Als weiteres Analyseverfahren zur Bestimmung der zeitlichen Änderung des Frequenzinhalts, insbesondere für nichtstationäre Zeitsignale, wird die Hilbert-Huang-Transformation (HHT) verwendet. Diese Art der Auswertemethode unterliegt nicht dem Unbestimmtheitsprinzip und erlaubt gleichzeitig eine höhere Zeit- und Frequenzauflösung (vgl. Kapitel 3.4.2).

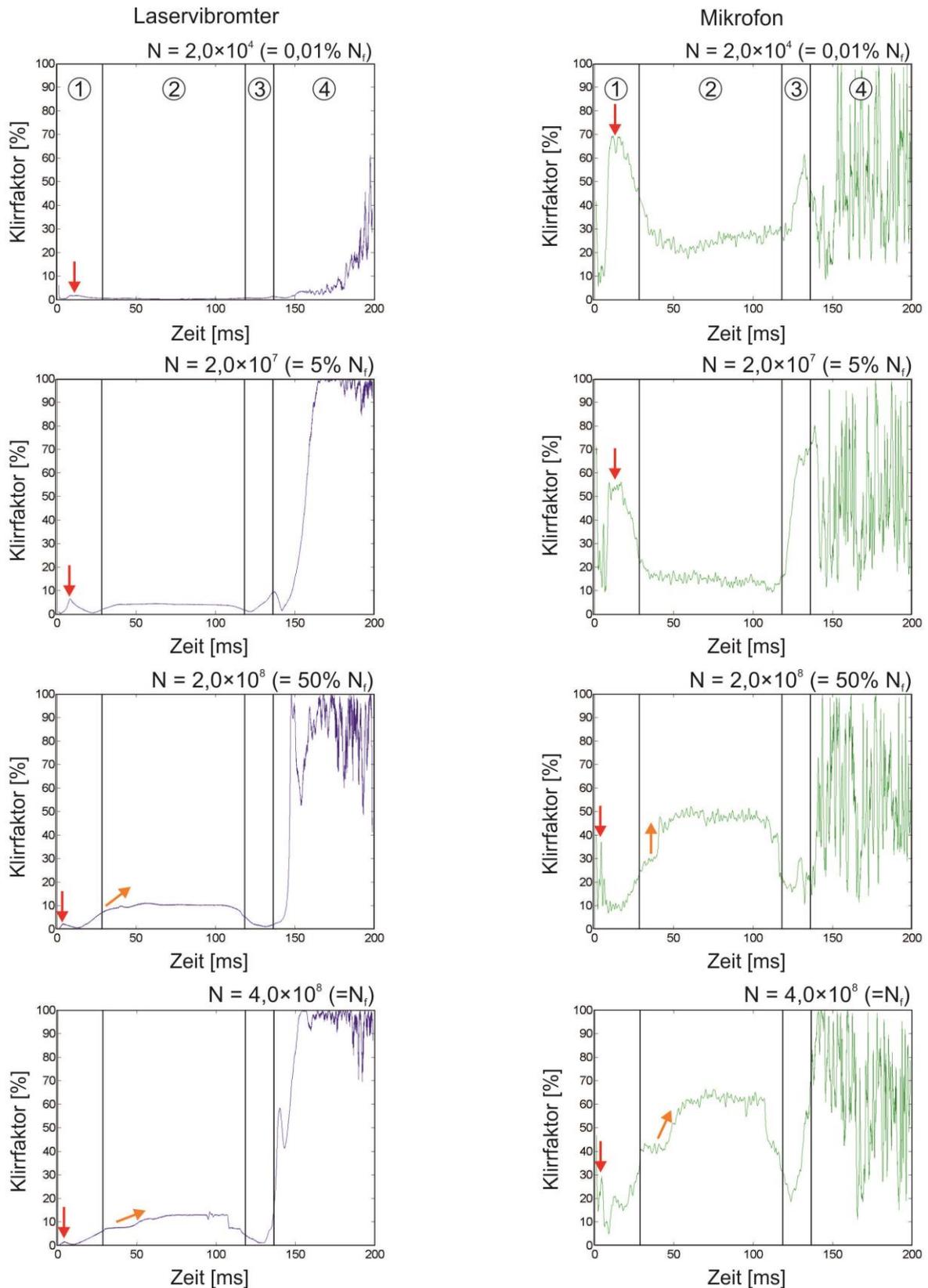


Abbildung 5-6. (Probe 1) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen als Funktion eines Beanspruchungszyklus berechnet aus den Short-Time-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-5; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>63 ms]

In Abbildung 5-7 sind die kombinierten Hilbert-Huang-Spektren aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^7$ ,  $N = 2 \times 10^8$  und  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen zu sehen. Das Amplitudenmaximum liegt wie bei der STFT bei der Anregungsfrequenz der Beanspruchungseinheit ( $f = 20,26$  kHz). Des Weiteren bildet sich bei  $f = 6,75$  kHz eine weitere Frequenz. Kleinere nichtlineare Anteile zeigen sich durch Oszillationen der Momentanfrequenz um die Anregungsfrequenz. Dies wird sichtbar bei der Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20,26$  kHz sowie bei der Frequenz von  $f = 6,75$  kHz. Diese Oszillationen werden mit zunehmender Nichtlinearität größer, bis sich weitere intrinsische Modenfunktionen für die Beanspruchungsfrequenz bei  $f = 40,52$  kHz und für die Frequenz von  $f = 6,75$  kHz bei  $f = 13,5$  kHz ausbilden. Gleichzeitig geht die Modulation um die Anregungsfrequenz der dominierenden Modenfunktion zurück. Aufgrund der großen Nichtlinearität des Mikrofonzeitsignals bereits am Start des Ermüdungsexperiments und des zusätzlichen schlechteren Signal-Rauschverhältnisses sind die kombinierten Hilbert-Spektren für dieses Messverfahren nur sehr schwer auswertbar. Die Anregungsfrequenz bei  $f = 20,26$  kHz wird durch eine Verringerung der Modulation und eine Ausbildung einer weiteren intrinsischen Modenfunktion bei  $f = 40,52$  kHz erst sichtbar. Frequenzen bei  $f = 6,75$  kHz sowie  $f = 13,5$  kHz gehen durch das schlechte Signal-Rausch-Verhältnis unter.

Probe 2 zeichnet sich durch einen anfänglich fast konstanten Klirrfaktorverlauf aus (Abbildung 5-8). Bei  $N = 1,28 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen kommt es zu einem starken Anstieg und Abfall der Kurve. Dieses Verhalten ergibt sich sowohl aus den ermittelten Laservibrometer- als auch den Mikrofondaten. Ab  $N = 4 \times 10^7$  Zyklen nimmt der Klirrfaktor der Mikrofonzeitsignale bis zum starken Anstieg des Klirrfaktors ab. Der Verlauf berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen folgt aber nicht diesem Trend.

Die Frequenzspektren zu drei im Klirrfaktorverlauf markierten Zyklen sind in Abbildung 5-8 bei  $N = 5,7 \times 10^6$ ,  $N = 5,1 \times 10^7$  und  $N = 1,3 \times 10^8$  zu sehen. Bereits am Anfang haben sich neben der Grundfrequenz  $f_0 = 20,27$  kHz auch höhere harmonische Frequenzen gebildet. Gegenüber Probe 1 sind zusätzlich Frequenzen ( $f = 9,0$  kHz und  $f = 11,3$  kHz) bei  $N = 5,7 \times 10^6$  Zyklen zu erkennen. Hierbei handelt es sich nicht um subharmonische Frequenzen. Eine Deutung hinsichtlich der Ursache der Entstehung haben wir zur Zeit nicht. Bei  $N = 5,1 \times 10^7$  Zyklen sind diese Frequenzen weiterhin vorhanden. Des Weiteren hat die Amplitude der höheren harmonischen Frequenzen leicht zugenommen. Kurz vor Versuchsabbruch sind neben der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen auch subharmonische Frequenzen vorhanden, die sich wiederum mit den harmonischen Frequenzen mischen. Die ersten subharmonischen Frequenzen sind bei  $f_{S1} = 6,5$  kHz sichtbar. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Offline-Charakterisierung würde den Rückschluss erlauben, dass subharmonische Frequenzen ein Indiz für Meta-Delaminationen oder interlaminare Risse sein könnten, da keine weiteren Schäden nach Versuchsabbruch festgestellt werden konnten.

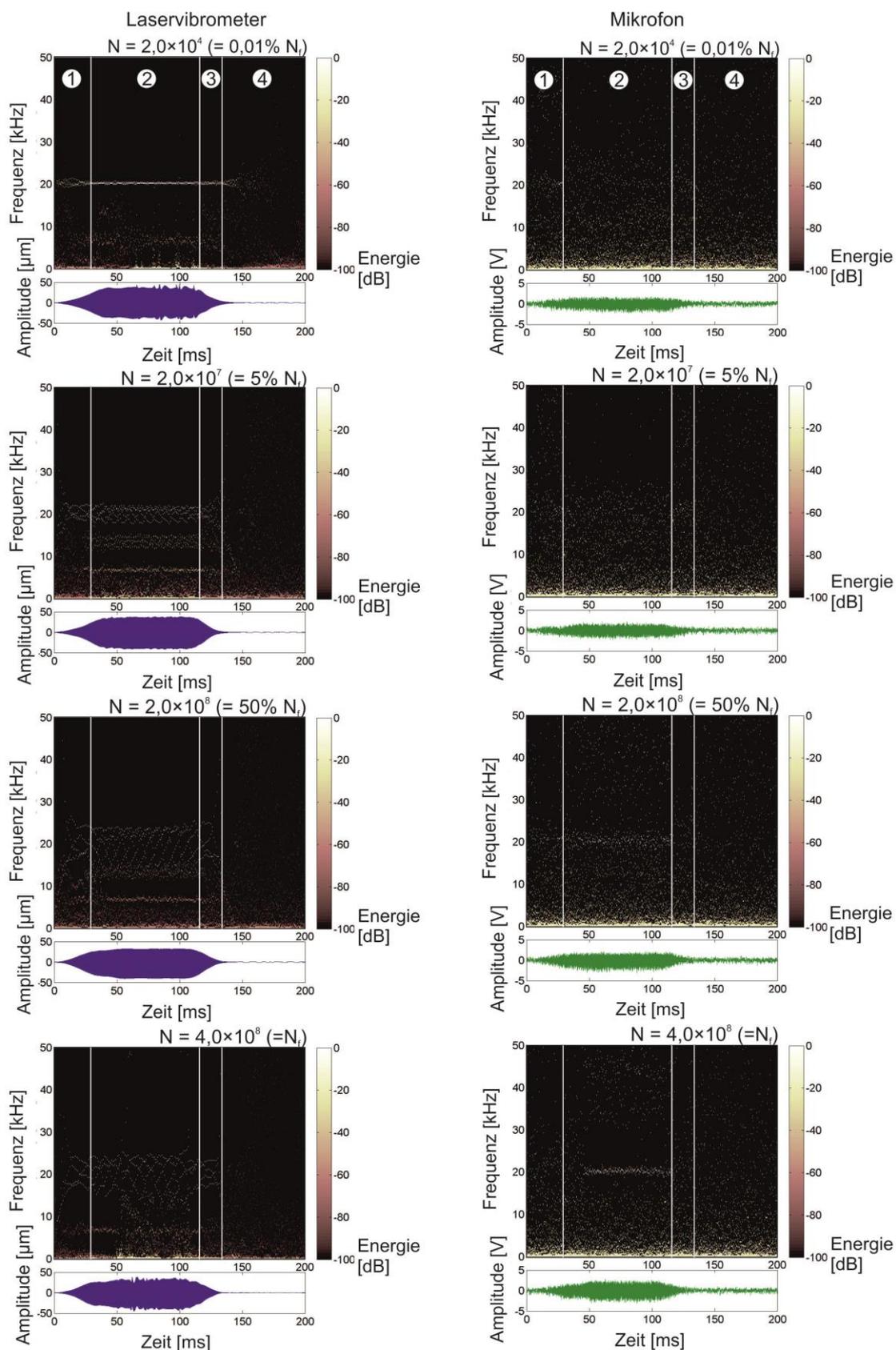


Abbildung 5-7. (Probe 1) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und den Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 2 \times 10^4$ ,  $N = 2 \times 10^7$ ,  $N = 2 \times 10^8$  und  $N = 4 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$  ms]

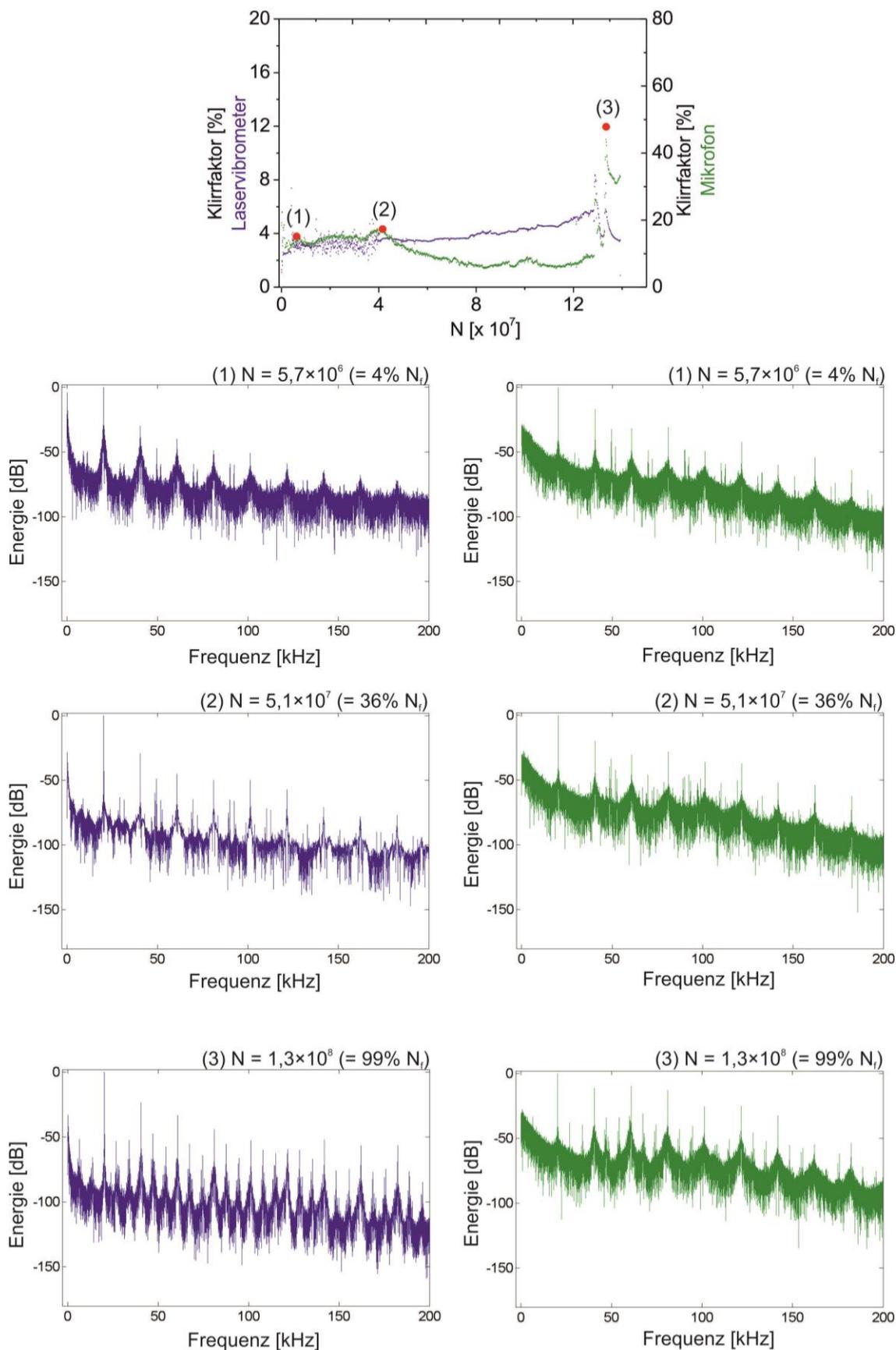
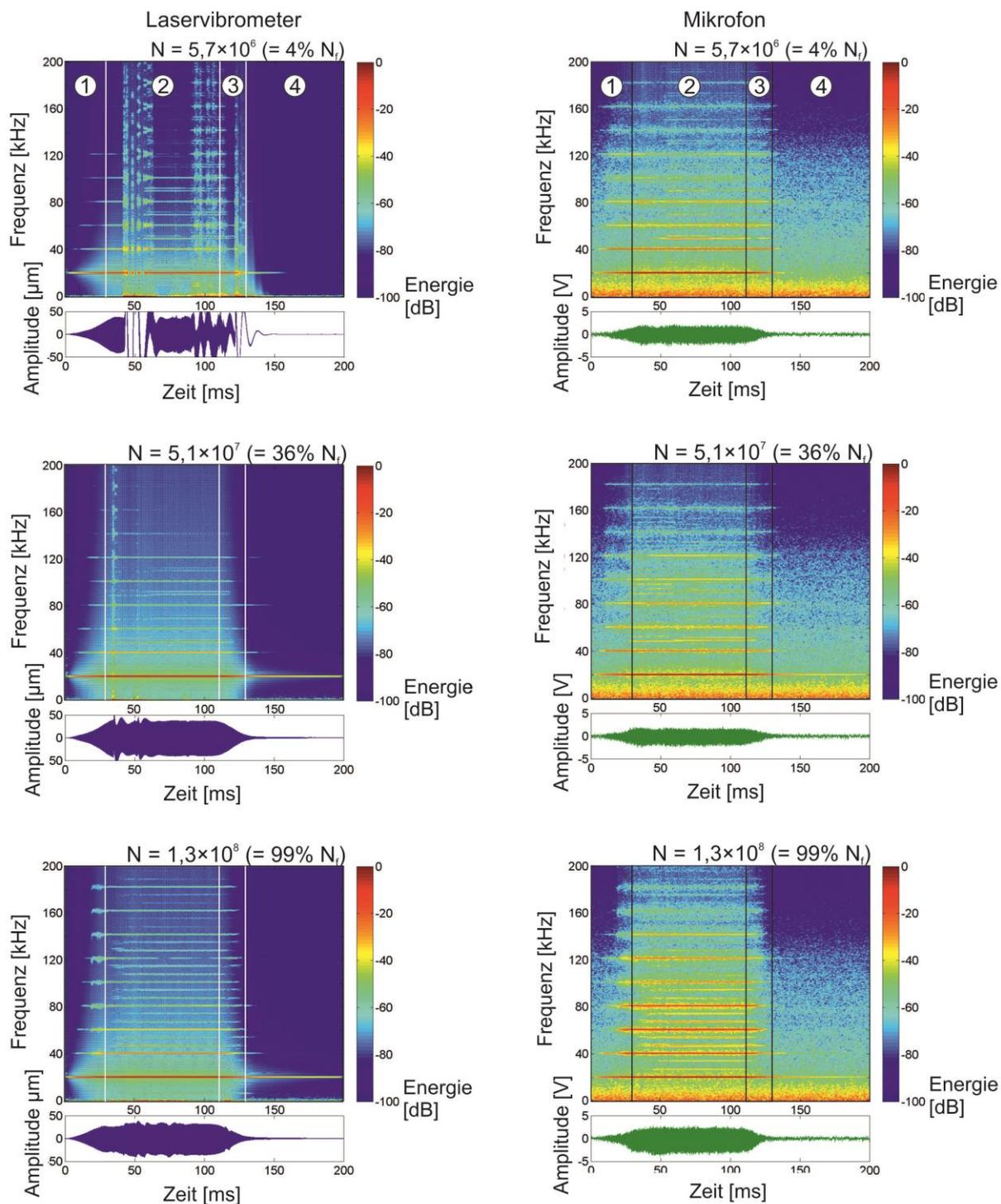


Abbildung 5-8. (Probe 2) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus den harmonischen Frequenzen (siehe Formel 5-1) der Fourier-Spektren des Laservibrometers- (blau) und Mikrofon-Zeitsignals (grün) mit drei ausgewählten Frequenzspektren (1), (2) und (3).

In Abbildung 5-9 sind die Kurzzeit-Fourier-Spektren von Probe 2 bei  $N = 5,7 \times 10^6$ ,  $N = 5,1 \times 10^7$  und  $N = 1,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen zu sehen. Das Amplitudenmaximum befindet sich bei der Anregungsfrequenz ( $f_0 = 20,27$  kHz). Des Weiteren sind höhere harmonische Frequenzen zu sehen. Bei  $N = 5,7 \times 10^6$  Beanspruchungszyklen verliert das Laservibrometer im Bereich ② sein Signal. Es ist davon auszugehen, dass es aufgrund einer geringen Verschiebung der Probe in den Auflagern zu einem Verlust des reflektierten Laserstrahls kommt. In dem Mikrofonpektrum und dem Laservibrometer sind wie bei den FFT-Spektren zusätzlich Frequenzen (z.B.  $f = 9,0$  kHz und  $f = 11,3$  kHz) zu erkennen. Diese entstehen im Bereich ② der konstanten Pulsamplitude. Nach  $N = 5,1 \times 10^7$  Beanspruchungszyklen ist keine große Veränderung zu sehen. Trotz fortschreitender Ermüdung kommt es zu keiner signifikanten Änderung im Frequenzspektrum. Dies würde die Schlussfolgerung erlauben, dass die gemessenen Frequenzen bei  $f = 9,0$  kHz und  $f = 11,3$  kHz nicht aufgrund von Rissen im Material erzeugt werden, da eine Steigerung der Amplitude sonst zu erwarten wäre. Kurz vor Versuchsabbruch ( $N = 1,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen) sind subharmonische Frequenzen im Bereich der konstanten Pulsamplitude zu erkennen. Im Bereich des Pulsstarts und der aktiven Dämpfung sind diese Frequenzen nicht vorhanden.

Der Klirrfaktorverlauf der Mikrofondaten (siehe Abbildung 5-10) zeigt wie bereits bei Probe 1 auch bei Probe 2 ein Maximum (roter Pfeil) im Bereich des Pulsstarts. Im Klirrfaktorverlauf des Laservibrometersignals ist dieses Maximum aufgrund des geringen Klirrfaktorwerts nicht zu erkennen. Mit zunehmender Zahl der Beanspruchungszyklen nimmt die Höhe des Klirrfaktormaximums ab. Des Weiteren erscheint das Maximum früher. Mit zunehmenden Beanspruchungszyklen steigt der Wert des Klirrfaktors für das Laservibrometer- und das Mikrofonsignals im Bereich der konstanten Pulsamplitude. Gegenüber Probe 1 ist jedoch kein stufenweiser Anstieg zu erkennen. Vielmehr entsteht die Tendenz, dass mit zunehmender Dauer eines Beanspruchungszyklus die Nichtlinearität – berechnet aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen – abnimmt. Begründet werden könnte dies durch die Zunahme an subharmonischen Frequenzen (siehe Abbildung 5-9), da diese Frequenzen in der Berechnung des Klirrfaktorverlaufs keine Berücksichtigung finden.



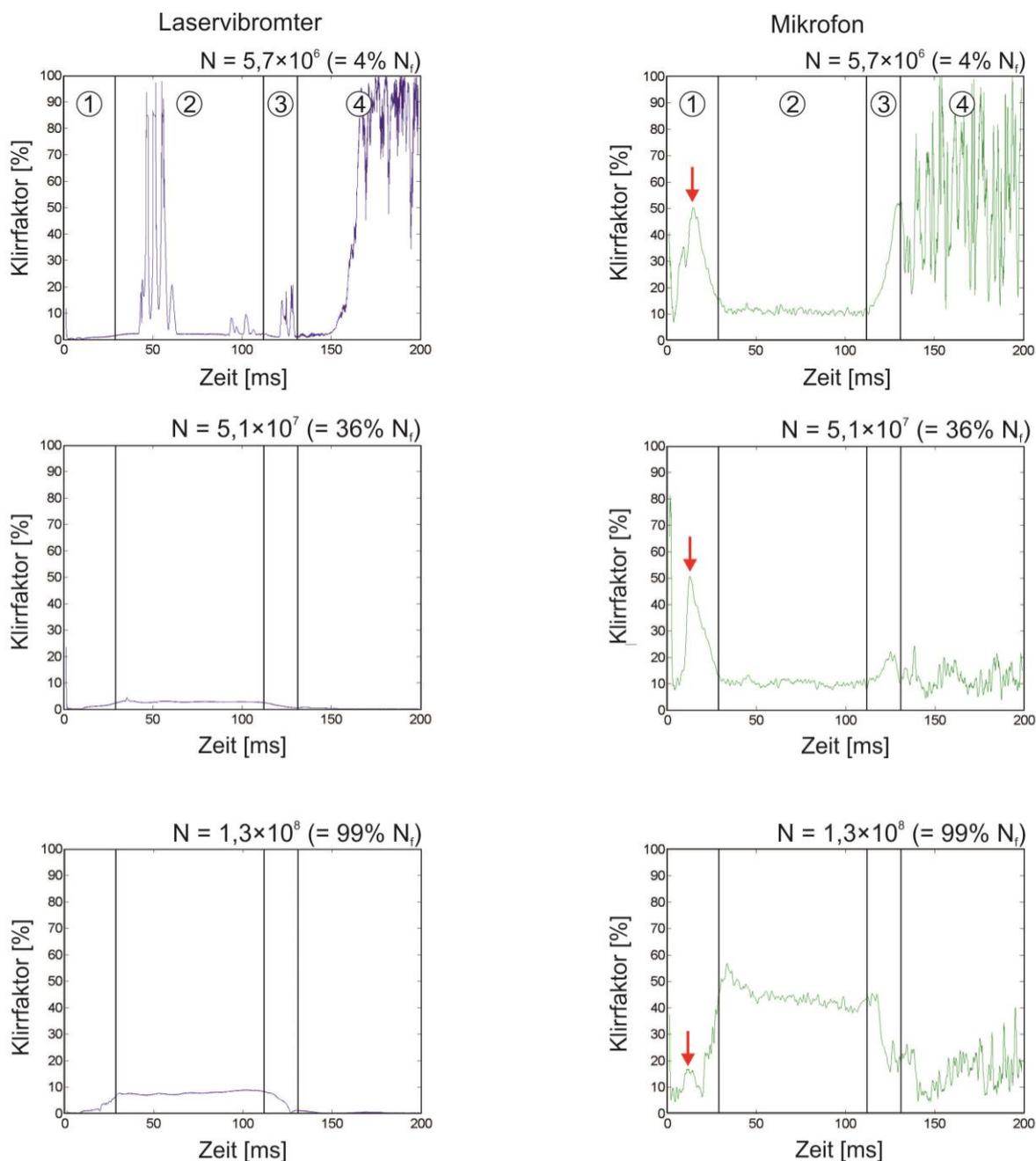


Abbildung 5-10. (Probe 2) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit berechnet aus den Kurzzeit-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-9; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [83 ms], ③ = aktive Dämpfung [19 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>69 ms]

Die kombinierten Hilbert-Huang-Spektren nach  $N = 5,7 \times 10^6$ ,  $N = 5,1 \times 10^7$  und  $N = 1,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen von Probe 2 sind in Abbildung 5-11 zu sehen. Wie bei den vorher angewandten Signalanalyseverfahren ist die Anregungsfrequenz von  $f_0 = 20,27$  kHz bei allen HHT-Spektren zu erkennen. Kleine nichtlineare Anteile äußern sich durch eine Oszillation der Momentanfrequenz um die Anregungsfrequenz. Der Verlust des Laservibrometersignals bei  $N = 5,7 \times 10^6$  äußert sich hier in einer willkürlichen Schwankung um die Anregungsfrequenz. Größere Veränderung des nichtlinearen Anteils bei  $N = 5,1 \times 10^7$

Zyklen gegenüber  $N = 5,7 \times 10^6$  sind nicht zu erkennen. Kurz vor Versuchsabbruch ( $N = 1,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen) sind die bereits in der FFT und STFT festgestellten subharmonische Frequenz bei  $f_s = 6,5$  kHz sichtbar. Die aus den Mikrofondaten berechneten Hilbert-Huang Spektren sind aufgrund des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses nur im geringen Maße hilfreich für die Auswertung der Ultraschallzeitsignale.

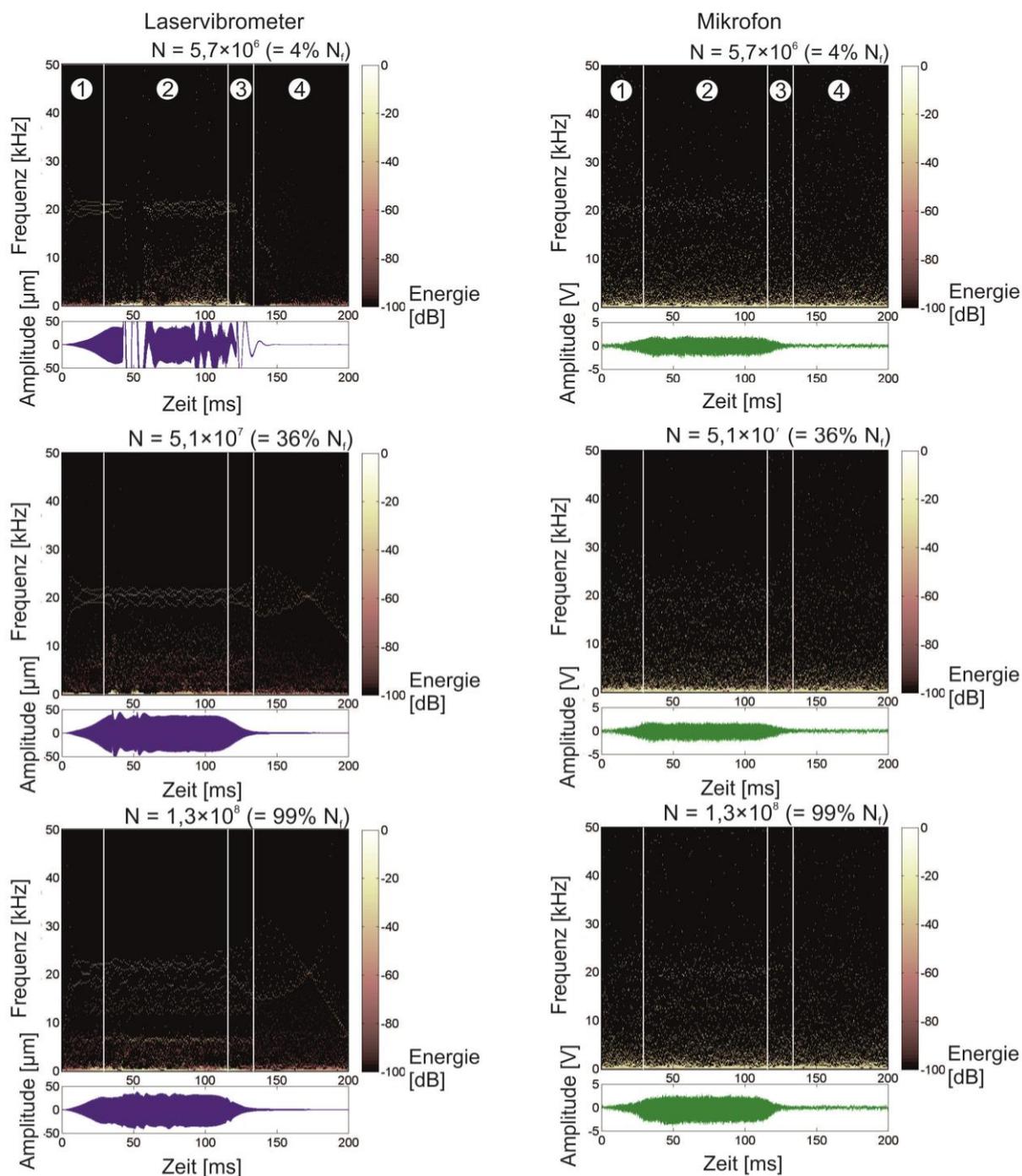


Abbildung 5-11. (Probe 2) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und den Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 5,7 \times 10^6$ ,  $N = 5,1 \times 10^7$  und  $N = 1,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [29 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [90 ms], ③ = aktive Dämpfung [18 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>63$  ms]

Der Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen von Probe 3 mit drei ausgewählten Frequenzspektren des Laservibrometer- und des Mikrofonsignals bei  $N = 8,3 \times 10^5$ ,  $N = 1,6 \times 10^8$  und  $N = 2,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen ist in Abbildung 5-12 gezeigt. Beide Kurvenverläufe der Klirrfaktoren zeigen generell einen Anstieg der Nichtlinearität mit zunehmender Anzahl der Beanspruchungszyklen. Zwei Maxima mit einem starken Anstieg und Abfall sind danach zu sehen. Die zweimalige starke Zunahme des Klirrfaktors ist wahrscheinlich auf die Initiierung von Mikrorissen (intralaminare Risse, Meta-Delaminationen, interlaminare Risse) bei fortschreitender Ermüdung zurückzuführen. Bei der spektralen Auswertung der Ultraschallzeitsignale mit Hilfe der FFT sind neben der Anregungsfrequenz ( $f_0 = 20,26$  kHz) auch bei Probe 3 höhere harmonische Frequenzen bereits am Anfang ( $N = 8,3 \times 10^5$ ) der Ermüdungsuntersuchungen festzustellen. Mit zunehmenden Beanspruchungszyklen nimmt die Intensität der höheren harmonischen Frequenzen zu, und es bilden sich zusätzliche Frequenzen um die harmonischen Frequenzen. Beispielhaft sind hierfür die Spektren bei  $N = 1,6 \times 10^8$  und  $N = 2,33 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen. Die Ursache für die Entstehung zusätzlicher Frequenzen um die harmonischen Frequenzen ist wie bereits bei den vorher untersuchten Proben (Probe 1 und 2) nicht verstanden. Des Weiteren haben sich bei Probe 3 im gesamten Ermüdungsexperiment keine subharmonischen Frequenzen gebildet. Diese waren bei den beiden vorher untersuchten Proben als mögliche Indikatoren für Meta-Delaminationen oder interlaminare Risse identifiziert worden. Eine mögliche Erklärung für die beiden Ausschläge im Klirrfaktorverlauf wäre die Entstehung größerer Delaminationen. Teilweise geöffnete Risse sind zunächst eine starke nichtlineare Quelle (nichtklassische Nichtlinearität). Kommt es zur einer vollständigen Öffnung während der fortschreitenden Beanspruchung, werden diese Risse zu starken linearen Ultraschall-Reflektoren und liefern somit kaum einen Beitrag zur nichtlinearen elastischen Werkstoffantwort. Aus diesem Grund könnte es zu einem schlagartigen Abfall im Klirrfaktorverlauf kommen.

Die zeitliche Veränderung der Frequenzspektren in Probe 3 bei  $N = 8,3 \times 10^5$ ,  $N = 1,6 \times 10^8$  und  $N = 2,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen ermittelt durch die Kurzzeit-Fourier-Transformation ist in Abbildung 5-13 dargestellt. Wie bereits in den Frequenzspektren in Abbildung 5-12 gezeigt, befindet sich das Amplitudenmaximum bei der Anregungsfrequenz von  $f_0 = 20,26$  kHz. Höhere harmonische Frequenzen der Grundfrequenz werden im Bereich ② der konstanten Puls-Amplitude sichtbar. Mit fortschreitender Beanspruchung steigt die Amplitude der höheren harmonischen Frequenzen. Des Weiteren bilden sich bei der konstanten Puls-Amplitude zusätzliche Frequenzen um die harmonischen Frequenzen.

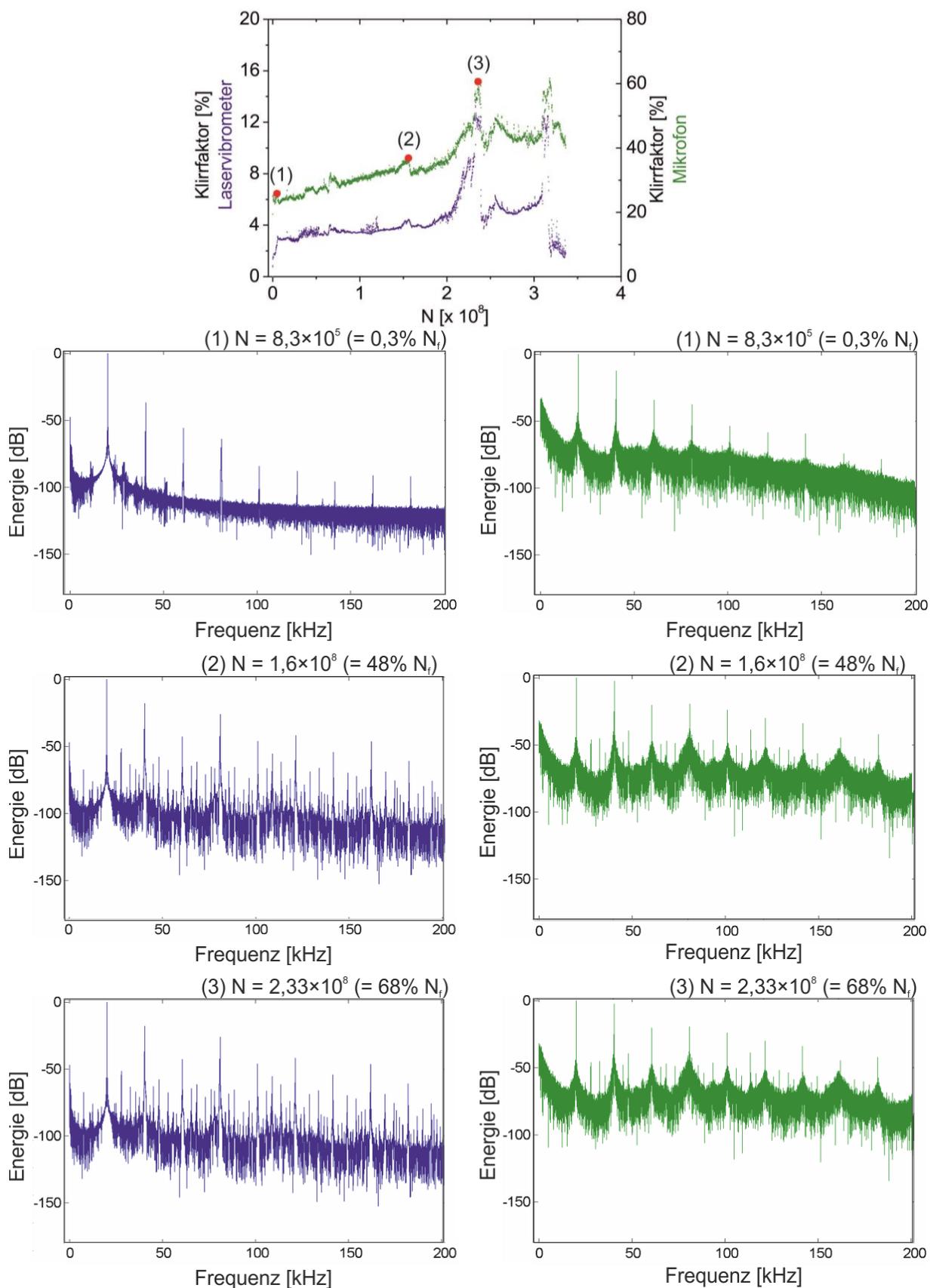


Abbildung 5-12. (Probe 3) Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen berechnet aus den harmonischen Frequenzen der Fourier-Spektren des Laservibrometer- (blau) und Mikrofon-Zeitsignals (grün) mit drei ausgewählten Frequenzspektren (1), (2) und (3).

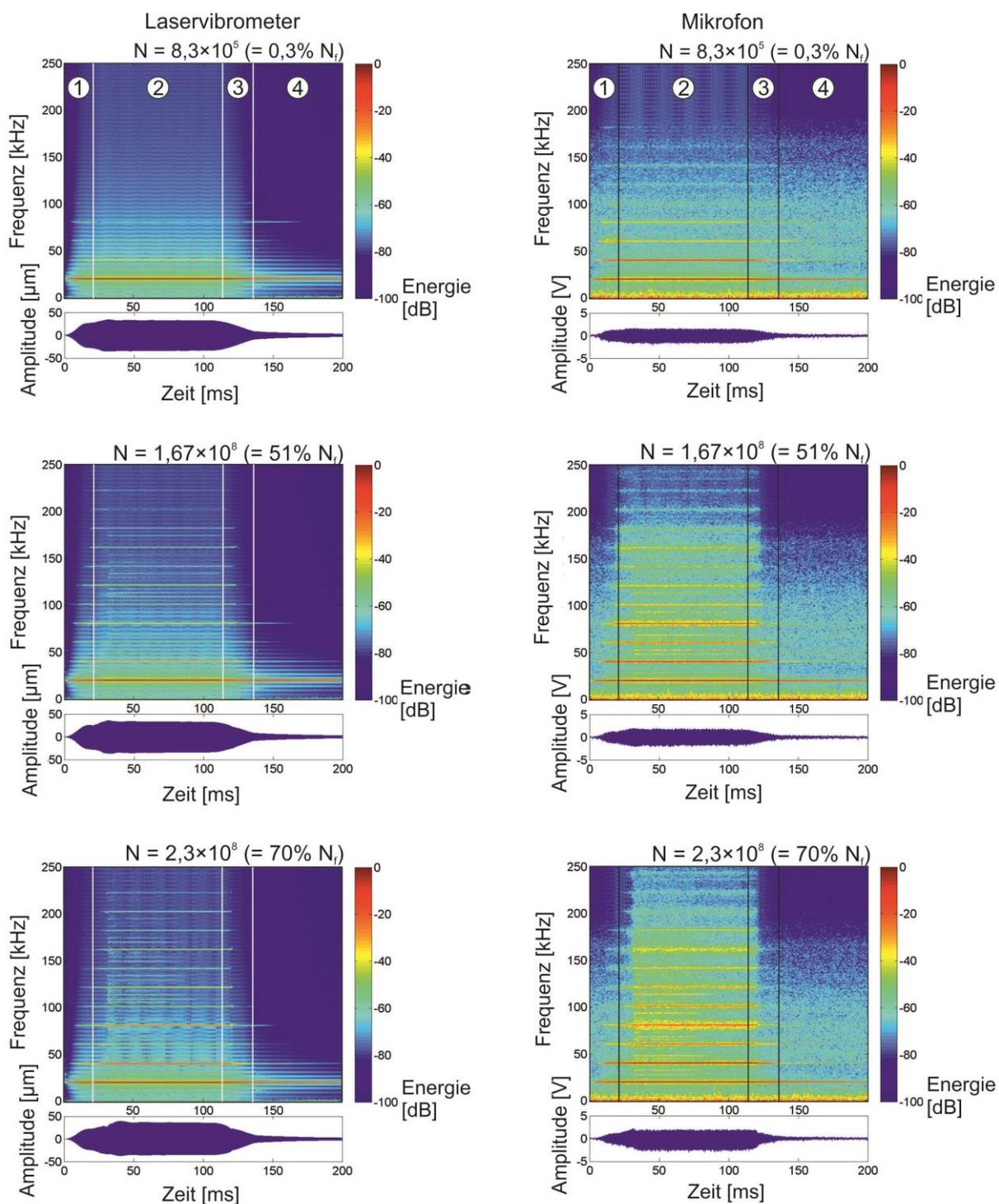


Abbildung 5-13. (Probe 3) Kurzzeit-Fourier-Transformationsspektren (Probe 2) von Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 8,3 \times 10^5$ ,  $N = 1,67 \times 10^8$  und  $N = 2,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen mit entsprechenden gemessenen Amplituden-Zeit-Signalen; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [>64 ms]

Der Verlauf des Klirrfaktors eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit für die in Abbildung 5-13 berechneten STFT-Spektren ist in Abbildung 5-14 zu sehen. Das Klirrfak-

tormaximum im Bereich des Pulsstarts ist bei Probe 3 nicht vorhanden. Dies kann aufgrund der Edelstahl-Auflager verursacht worden sein. Die Dauer des Einschwingvorgangs erfolgt schneller als bei Probe 1 und Probe 2 und beträgt lediglich 21 ms. Im Bereich der konstanten Puls-amplitude sehen wir mit fortschreitenden Beanspruchungszyklen einen Anstieg im Klirrfaktor. Der direkte Vergleich des Klirrfaktors berechnet aus den Mikrofondaten zeigt zu Anfang ( $N = 8,3 \times 10^5$ ) einen Wert von ca. 17 % und steigt bis auf ca. 65 % ( $N = 2,3 \times 10^8$ ). Wie bereits bei Probe 1 kommt es zusätzlich zu einem sprunghaften Anstieg und Abfall (orangene Pfeile in Abbildung 5-14). Auch hier kann als mögliche Erklärung der Anstieg des Klirrfaktors aufgrund von lokalen Erwärmungen der Rissflanken in Betracht gezogen werden, die zu einer globalen Erwärmung der Polymermatrix und zu einer Erniedrigung der Steifigkeit im Verbund führen. Dies führt wiederum zu einer Erhöhung der klassischen Nichtlinearität im gesamten System.

In den kombinierten Hilbert-Huang-Spektren von Probe 3 (Abbildung 5-15) sind – wie bereits bei den vorherigen Proben – die Anregungsfrequenz bei  $f_0 = 20.26$  kHz zu erkennen. Kleinere nichtlineare Anteile führen zu einer Oszillation der Momentanfrequenz um die Anregungsfrequenz. Zusätzlich bilden sich bei  $f = 6,5$  kHz und  $f = 13,0$  kHz Frequenzen aus. Die Herkunft kann zurzeit nicht erklärt werden. Im fortschreitenden Ermüdungsverlauf nimmt die Oszillation der Momentanfrequenz um die Anregungsfrequenz aufgrund steigender Nichtlinearität zu, bis sich schließlich weitere intrinsische Modenfunktionen um höhere Harmonische der Anregung bilden. Gleichzeitig reduziert sich die Modulation um die Anregungsfrequenz der dominierenden intrinsischen Modenfunktion. Wie bereits bei Probe 1 und Probe 2 ist die Auswertung aus den Ultraschallmikrofondaten der berechneten HHT-Spektren, sehr schwierig. Das schlechte Signal-Rauschverhältnis verhindert eine genauere Auswertung. Zusätzlich führt der größere nichtlineare Anteil zu einer größeren Oszillation der Momentanfrequenz um die Anregungsfrequenz. Diese Oszillationen führen in den Spektren zu einer Überlagerung der Frequenzen verschiedener IMFs.

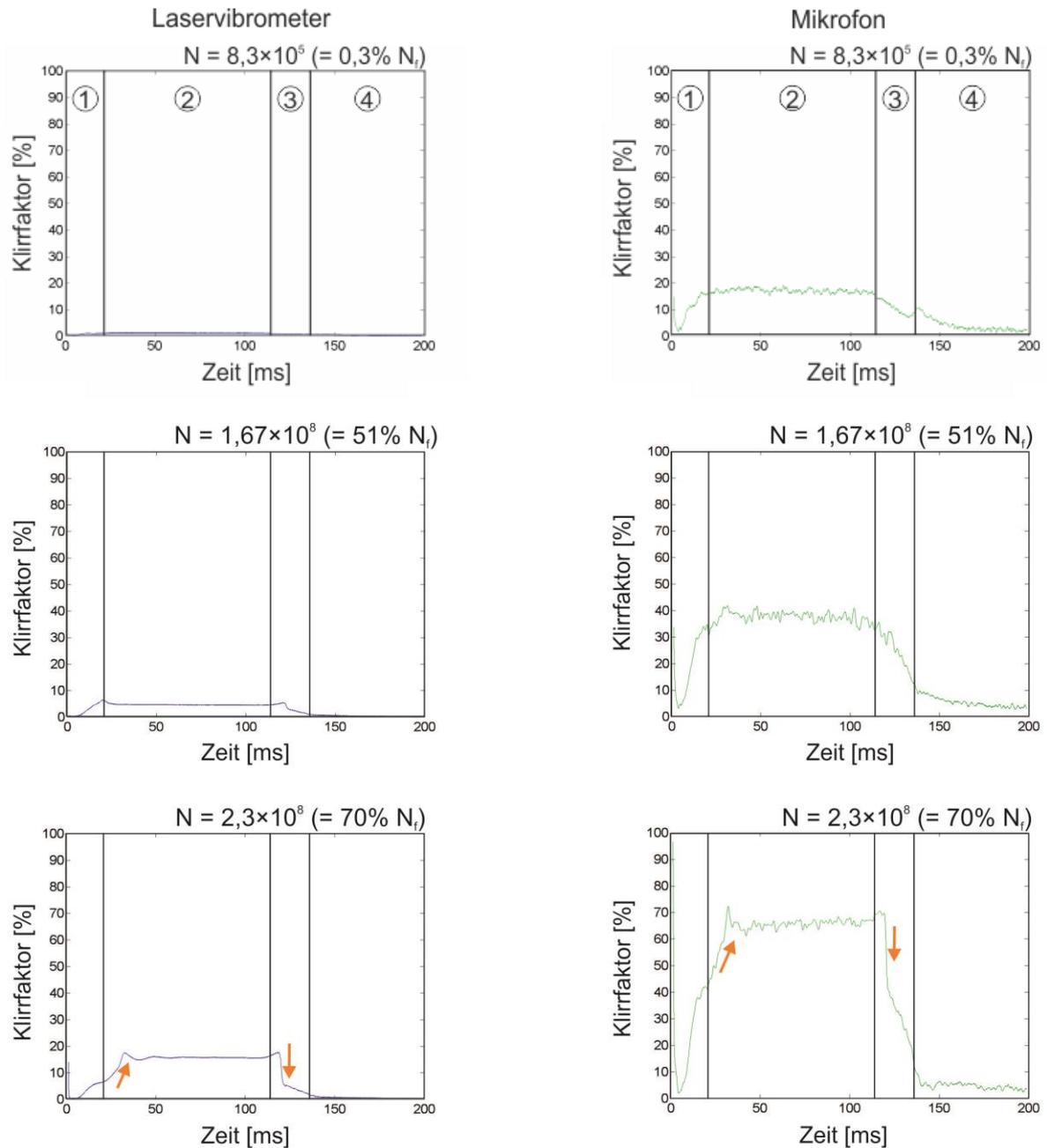


Abbildung 5-14. (Probe 3) Klirrfaktorverlauf der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit berechnet aus den Kurzzeit-Fourier-Transformations-Spektren aus Abbildung 5-13; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>64$  ms]

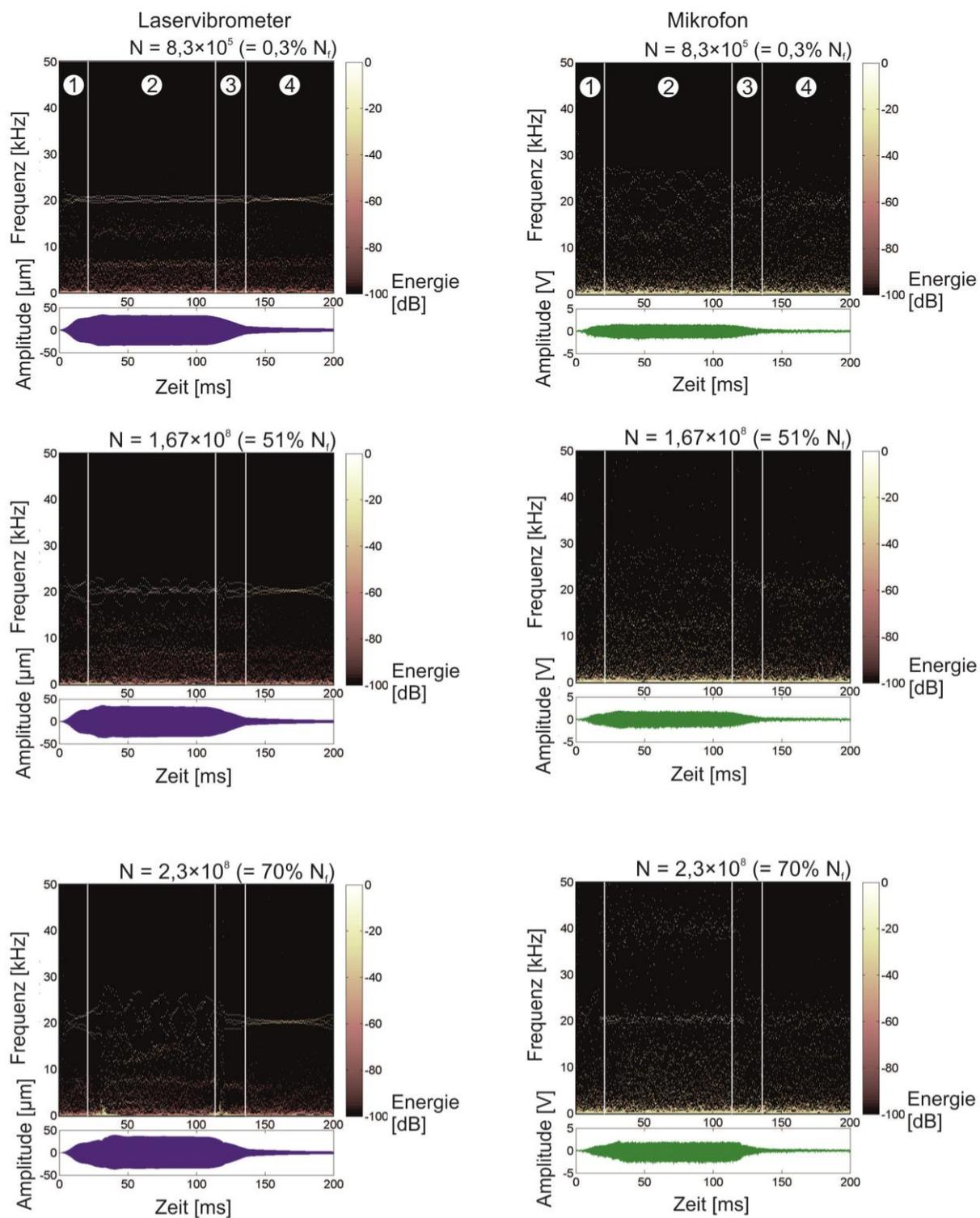


Abbildung 5-15. (Probe 3) Kombinierte Hilbert-Huang-Spektren berechnet aus den Laservibrometerzeitsignalen (linke Spalte) und Mikrofonzeitsignalen (rechte Spalte) nach  $N = 8,3 \times 10^5$ ,  $N = 1,67 \times 10^8$  und  $N = 2,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen, Amplituden-Zeit-Signale Laservibrometer = blau, Mikrofon = grün; ① = Pulsstart [21 ms], ② = konstante Puls-Amplitude [93 ms], ③ = aktive Dämpfung [22 ms] und ④ = freies Ausschwingen des Systems [ $>64$  ms]

### 5.3 Zusammenfassung zur Analyse der Ultraschallzeitsignale

Die schnelle Fourier- (FFT), Kurzzeit-Fourier- (STFT) und Hilbert-Huang-Transformation (HHT) liefern sich gegenseitig bestätigende Informationen. Die Unterschiede liegen in der unterschiedlichen Sensitivitäten. Die FFT ist vor allem für stationäre Zeitsignale mit relativen hohen nichtlinearen Anteilen geeignet. Für die Analyse von nichtstationären Zeitsignalen finden die STFT und die HHT Verwendung. Die HHT ist in der Lage, selbst kleine nichtlineare Anteile sichtbar zu machen. Sie stößt jedoch an ihre Grenzen, wenn ein schlechtes Signalrauschverhältnis und ein sehr großer nichtlinearer Anteil im Ultraschallzeitsignal vorliegen.

Mit Hilfe des Klirrfaktors – berechnet aus der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen jeweils für einen Beanspruchungszyklus – wurde in einem ersten Schritt ein möglicher Schadensparameter identifiziert. Mit diesem Klirrfaktor ist es möglich, Veränderungen im nichtlinearen Anteil des Ultraschallzeitsignals zu quantifizieren. Probe 3 zeigte im Klirrfaktorverlauf zwei starke Anstiege bei  $N = 2,3 \times 10^8$  und  $N = 3,1 \times 10^5$  Beanspruchungszyklen, die für eine mögliche Entstehung von geschlossenen Mikrorissen (Meta-Delaminationen, interlaminare Risse) stehen könnten. Das Öffnen des Mikrorisses und die Entstehung von Delaminationen im fortschreitenden Ermüdungsexperiment könnten als mögliche Erklärung für die Abnahme der Nichtlinearität im System dienen. Durch die Öffnung der Risse werden diese zu starken linearen Ultraschall-Reflektoren, die bei der Offline-Charakterisierung durch die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik sichtbar werden.

In Probe 1 und Probe 2 wurden neben der Grundfrequenz und ihren höheren harmonischen Frequenzen zusätzliche subharmonische Frequenzen identifiziert. Diese Frequenzen entstehen laut Literatur [Jhang, 09] aufgrund von geschlossenen oder halbgeöffneten Mikrorissen. Durch die Korrelation der Ergebnisse von Probe 2 aus der Offline-Charakterisierung und den Beobachtungen der Online-Überwachung könnte es möglich sein, die Entstehung von subharmonischen Frequenzen dem Entstehen von Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen zuzuordnen.

Jedoch konnten für Probe 3 weder subharmonische Frequenzen in den FFT- noch in den STFT- Spektren gefunden werden. Wesentliche Unterschiede zwischen Probe 1 und 2 gegenüber Probe 3 liegen in der geringeren Beanspruchungsamplitude bei Probe 3 sowie den veränderten Auflagern. Durch die Verwendung gehärteter Auflager für Probe 1 und Probe 2 wird die benötigte Dauer des Pulsstarts erhöht. Die Berechnung des Klirrfaktorverlaufs als Funktion eines Beanspruchungszyklus zeigte die Ausbildung eines Klirrfaktormaximums im Bereich des Pulsstarts. Die Höhe dieses Maximum nimmt im fortschreitenden Ermüdungsexperiment ab. Es könnte sein, dass aufgrund der Reibungskräfte das Klirrfaktormaximum erzeugt wird, da Reibkräfte einen Beitrag zur Nichtlinearität liefern. In der Literatur wird hier bei der Ultraschalleinkopplung von einem Kontaktproblem gesprochen [Jhang, 09]. Durch die fortschreitende Einkerbung der Auflager in die CF-PPS-Probe kommt es zu einem schnelleren Einschwingvorgang von Proben 1 und 2. Dies führt zu einem schnelleren Erreichen der kon-

stanten Pulsamplitude. Probe 3 mit den weicheren Auflagern erreicht die konstante Pulsamplitude bereits nach 21 ms. Bei Probe 1 und Probe 2 mit den gehärteten Auflagern erhöht sich die Zeit des Einschwingvorgangs um 8 ms auf 29 ms. Des Weiteren führen gehärtete Auflager zu einer tieferen Einkerbung bei ungefähr gleicher Anzahl von Beanspruchungszyklen. Probe 1 wies bei  $N = 4,0 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen eine durchschnittliche Einkerbtiefe der Auflager von  $224 \mu\text{m}$  auf. Demgegenüber liegt bei Probe 3 mit weicheren Auflagern ( $N = 3,3 \times 10^8$  Beanspruchungszyklen) eine Einkerbung von durchschnittlich  $157 \mu\text{m}$  vor. Gleichzeitig führt die Einkerbung zu einer Abnahme der statischen Mittelspannung im 3-Punkt-Biegeversuch. Der nichtlineare Anteil im gemessenen Ultraschallzeitsignal kann sich aufgrund der Änderung der statischen Mittellast selbst bei konstanter dynamischer Beanspruchungsamplitude ändern. Für Probe 1 (Abbildung 5-6) und Probe 2 (Abbildung 5-14) konnte im Bereich der konstanten Pulsamplitude ein stufenweiser Anstieg und Abfall im Klirrfaktorverlauf als Funktion eines Beanspruchungszyklus festgestellt werden. Als mögliche Erklärung kann der Anstieg des Klirrfaktors aufgrund der lokalen Reibung von Rissflanken und der damit einhergehenden globalen Erwärmung der Polymermatrix dienen. Diese Erwärmung führt zu einer zeitlichen Herabsetzung der Steifigkeit im Verbund. Dies führt wiederum zu einer Erhöhung des Beitrags der klassischen Nichtlinearität im System. Neben den harmonischen Frequenzen haben sich bei allen drei Proben weitere Frequenzen um die harmonischen Frequenzen gebildet. Die Herkunft und der Entstehungsgrund sind noch offen. Mit Hilfe der STFT-Spektren wurde aber sichtbar, dass ein großer Anteil dieser Frequenzen im Bereich des Pulsstarts und im Bereich der aktiven Dämpfung entsteht. Dies erlaubt die Schlussfolgerung, dass solche Frequenzen nicht aufgrund von Materialveränderungen in der Probe hervorgerufen werden. Wahrscheinlich sind es Effekte, die aufgrund der Veränderung des gesamten Systems aus Auflager und Beanspruchungseinheit entstehen. Aus diesem Grund muss die Veränderung der Nichtlinearität des Ultraschallzeitsignals nicht nur durch die Änderung der physikalischen Eigenschaften der CF-PPS-Probe, sondern zusätzlich durch die Veränderung des gesamten Systems aus Auflager, Beanspruchungseinheit und statischer Mittellast betrachtet werden.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Konventionelle Ermüdungsvorrichtungen in der Literatur [Couillard, 97; Weber, 01; Hosoi, 11] untersuchen das Ermüdungsverhalten von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden mit einer Beanspruchungsfrequenz von ca.  $f = 5 - 100$  Hz. Dies bedeutet, dass zum Erreichen der geforderten  $10^9$  Lastzyklen für eine Probe bis zu 6 Jahre vergehen. Aus diesem Grund liegt ein unzureichender Wissensstand des hochfrequenten Ermüdungsverhaltens von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden vor. Zur Untersuchung dieses Verhaltens bei Lastwechselspielzahlen bis  $N = 10^9$  Zyklen wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde der Technischen Universität Kaiserslautern ein hochfrequenter 3-Punkt-Biegeversuch mit kombinierten zerstörungsfreien Online-Prüfverfahren entwickelt. Die Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20,26$  kHz wird technisch mit Hilfe einer resonanzschwingenden Ultraschall-Anregungsquelle realisiert. Die Beanspruchung erfolgt in einem Puls-Pause-Zyklus von 1:20, um eine unzulässige Probenerwärmung zu verhindern ( $T \ll T_g$ ). Die Temperaturentwicklung wird mit Hilfe einer Infrarotkamera überwacht. Als Untersuchungswerkstoff wird ein 2D-Gewebe mit einer Körper(2/2)-Struktur und einer Polyphenylensulfidmatrix verwendet.

Die Herstellung von CFK-Platten ist ein komplexer Prozess, der für Fehler in Form von Einschlüssen, Dekohäsionen und Ondulationen anfällig ist. Aus diesem Grund wurde ein kommerziell beziehbares Material ausgewählt, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Der Lagenaufbau, die Anordnung der Kohlenstofffaser in der Polymermatrix, die Beanspruchungsfrequenz, die Mittelspannung, die Amplitude, die Beanspruchungsrichtung bestimmen die mechanischen Eigenschaften und die Art und den Ablauf der Ermüdungsschäden des gesamten Verbundes. Bei niederfrequenter Zugschwellbeanspruchung erfolgt die Rissinitiierung in unidirektionalen Gelegen in der Matrix durch transversale Risse (primärer Schadensmechanismus), die quer zur Hauptspannungsrichtung entlang der C-Fasern verlaufen. Demgegenüber entstehen in 2D-Geweben die ersten (intralaminaren) Risse in den Kettfäden aufgrund eines Grenzschichtbruchs zwischen Faser und Matrix. Dies bedeutet wiederum, dass eine verbesserte Adhäsionskraft zwischen der Faser/Matrix-Grenzfläche zu einem größeren Widerstand in 2D-Geweben gegenüber Ermüdungsschäden und der Entstehung weiterer Schadensmechanismen wie Meta-Delaminationen, interlaminaren Rissen und Delaminationen führt.

Zur Überprüfung und Charakterisierung der Proben auf Fehlerfreiheit werden die CF-PPS-Proben im Ausgangszustand und nach der Beanspruchung mittels der Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik, der Resonanzspektroskopie und der Röntgencomputertomografie untersucht (Offline-Charakterisierung). Durch die Kombination verschiedener zFP-Verfahren ist es prinzipiell möglich, Risse in verschiedenen Stadien ihrer Entstehung zu detektieren. Intralaminare Risse und Meta-Delaminationen, die vor allem im Frühstadium der Ermüdung auftre-

ten, lassen sich qualitativ durch einen auftretenden Steifigkeitsabfall in der Probe mit Hilfe der Resonanzspektroskopie feststellen. Zur lokalen Detektion von intralaminaren Rissen und Meta-Delaminationen mit einer Größe ab ca. 10  $\mu\text{m}$  wird die Röntgencomputertomografie verwendet. Interlaminare Risse und große Delaminationen in der Größenordnung von einigen Millimetern, die im fortschreitenden Ermüdungsprozess entstehen, lassen sich durch die Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik bestimmen. Zusätzlich werden die Stirnflächen der beanspruchten CF-PPS-Proben mittels lichtmikroskopischen Aufnahmen überprüft.

Die Kombination der Ergebnisse der Offline-Charakterisierung erlaubt die Entwicklung eines ersten Modells der Schadensentwicklung in hochfrequent beanspruchten 2D-Geweben. Der Vergleich mit Ergebnissen aus den Arbeiten von Daggumati et al. [Daggumati, 13] für niederfrequent beanspruchte 2D-Gewebe mit Atlasbindung legt hochfrequent beanspruchte Strukturen den gleichen Ablauf nahe. Erste Fehler, sogenannte intralaminare Risse, entstehen im Kettfadenbündel, gefolgt von Meta-Delaminationen. Kommen sich zwei Meta-Delaminationen zweier benachbarter Gewebereinheitszellen zu nahe, entsteht eine Rissverbindung. Dieser neu entstandene Riss wird als interlaminarer Riss bezeichnet, da dieser sich zwischen zwei benachbarten Lagen ausbreitet. Bei diesem Prozess setzt eine mechanische Schwächung der jeweiligen Gewebereinheitszellen ein, die eine Entstehung von großflächigen Delaminationen begünstigt.

Zur Bestimmung des Zeitpunkts der Rissentstehung reichen die Messdaten der Offline-Charakterisierung nicht aus. Aus diesem Grund werden die Ultraschallzeitsignale der Online-Charakterisierung mit den Daten der Offline-Charakterisierung korreliert. Die Kombination der Daten soll weitere Informationen hinsichtlich der Art und dem Zeitpunkt der Entstehung von Ermüdungsschäden während der Beanspruchung liefern.

Zur in-situ Überwachung der Schädigungsentwicklung während der Ermüdung werden in der Literatur verschiedenste oberflächen- und volumensensitive Überwachungstechniken verwendet. Mit Hilfe von mikroskopischen Lichtbildkameras wird die Entstehung von Rissen an der Stirnfläche der Proben betrachtet. Hierbei ist es lediglich möglich, die Veränderungen in einem kleinen Bildausschnitt an der Oberfläche zu betrachten, nicht aber die Informationen aus dem Inneren der Probe zu erhalten. Aus diesem Grund verwenden viele Forschungsgruppen die sogenannte akustische Emission. Bei dieser Technik wird die Anzahl an Vorübergehend erzeugten elastischen Wellen aufgrund von Ermüdungsschäden gezählt. Durch Auftragen der Anzahl der gemessenen Ereignisse als Funktion der Beanspruchungszyklen ist es indirekt möglich, verschiedene Schadensstadien zu erahnen. Die Anwendung der akustischen Emissionstechnik mit fest an der Probe montierten Sensoren ist im Ultraschall 3-Punkt Biegeversuch nicht möglich.

Die hochfrequente Beanspruchungsfrequenz von  $f = 20 \text{ kHz}$  wird in diesem Experiment simultan als globale zerstörungsfreie Überwachung der fortschreitenden Ermüdung der CFK-Probe verwendet. Die Oberflächenvibration und die Schallabstrahlung der Probe werden mit

Hilfe eines Laservibrometers und eines breitbandigen Mikrofons aufgenommen. Die gemessenen Ultraschallzeitsignale werden mittels schneller Fourier-, Kurzzeit-Fourier- und Hilbert-Huang-Transformation analysiert. Prinzipiell liefern alle drei Analyseverfahren sich gegenseitig bestätigende Informationen, jedoch haben die Verfahren unterschiedliche Sensitivitäten. Die schnelle Fourier-Transformation eignet sich für stationäre Zeitsignale. Zur Bestimmung der zeitlichen Frequenzänderung eines Signals werden die Kurzzeit-Fourier- und die Hilbert-Huang-Transformation verwendet.

Zur Bestimmung eines ersten schadenssensitiven Parameters wurde ein Klirrfaktor der Grundfrequenz und ihrer höheren harmonischen Frequenzen jeweils für einen Beanspruchungszyklus berechnet. Mit Hilfe des Klirrfaktors sollen Veränderungen im nichtlinearen Anteil des Ultraschallzeitsignals quantifiziert werden, da diese Änderungen in Zusammenhang mit der Entstehung von Schäden in der Probe stehen könnten. Bereits beim Start der Ermüdungsuntersuchungen sind in den Spektren neben der Grundfrequenz höhere harmonische Frequenzen vorhanden. Diese entstehen unter anderem aufgrund des nichtlinearen elastischen Materialverhaltens von Kohlenstofffaserkunststoffverbunden und der dadurch erzeugten Verzerrung einer eingeschallten monochromatischen Ultraschallwelle. In der Literatur wird neben der klassischen Nichtlinearität auch von der sogenannten nichtklassischen Nichtlinearität gesprochen. Diese liefert einen zusätzlichen Beitrag zur Nichtlinearität. Hierbei können neben der Grundfrequenz und der höheren harmonischen Frequenzen auch zusätzliche subharmonische sowie Resonanz/Mischfrequenzen sich ausbilden. Diese können aufgrund von Mikrorissen im Material, durch Reibungen (Kontaktproblem) und Störgeräusche entstehen. Diese Ausgangssituation erschwert zusätzlich die Auswertung des nichtlinearen Anteils der Ultraschallzeitsignale.

Im Klirrfaktorverlauf als Funktion der Beanspruchungszyklen von Probe 3 konnten ein starker Anstieg und Abfall des Klirrfaktors detektiert werden, die für eine mögliche Entstehung von geschlossenen Mikrorissen stehen könnten. In Probe 1 und Probe 2 konnten keine starken Ausschläge im Klirrfaktorverlauf festgestellt werden. Jedoch konnten in den Spektren dieser beiden Proben neben der Grundfrequenz und den höheren harmonischen Frequenzen subharmonische- und Misch-Frequenzen identifiziert werden. Die Kurzzeit-Fourier-Transformation zeigte, dass diese subharmonischen Frequenzen vorzugsweise im Bereich der konstanten Pulsamplitude entstanden. Laut Literatur sind subharmonische Frequenzen Indikatoren von Mikrorissen. Die Korrelation der Ergebnisse von Probe 2 aus der Offline-Charakterisierung und die Beobachtungen der Online-Überwachung könnten darauf hindeuten, dass die Entstehung von subharmonischen Frequenzen sich der Entstehung von Meta-Delaminationen und/oder interlaminaren Rissen zuordnen lässt. Zur weiteren Analyse der Zeitsignale wurde mit Hilfe der Kurzzeit-Fourier-Transformation der Klirrfaktorverlauf eines Beanspruchungszyklus als Funktion der Zeit berechnet. Dieser zeigte die Entstehung eines Klirrfaktormaximums im Bereich des Pulsstarts. Im fortschreitenden Ermüdungsexperiment nimmt dieses Maximum aufgrund der Einkerbung der Auflager in die CF-PPS-Probe ab. Gleichzeitig führt

die Einkerbung zu einer Abnahme der statischen Mittelspannung im 3-Punkt-Biegeversuch, und der nichtlineare Anteil im gemessenen Ultraschallsignal reduziert sich. Neben den harmonischen Frequenzen haben sich bei allen untersuchten Proben weitere Frequenzen um die harmonischen Frequenzen gebildet. Der Entstehungsgrund und die Herkunft sind zurzeit noch offen. Die STFT-Spektren zeigten, dass ein großer Anteil dieser Frequenzen im Bereich des Pulsstarts und der aktiven Dämpfung der Amplitude entstehen. Als Schlussfolgerung ist davon auszugehen, dass diese Frequenzen nicht aufgrund von Veränderungen im Materialverhalten hervorgerufen werden. Wahrscheinlich entstehen diese durch Veränderungen des gesamten Systems aus Auflager, Beanspruchungseinheit und statischer Mittellast.

Zum besseren Verständnis der Ermüdungsvorgänge in 2D-Geweben müsste eine größere Anzahl an CF-PPS-Proben im Ausgangszustand, nach der Beanspruchung und zusätzlich zu definierten Beanspruchungszyklen während der Belastungspausen mittels der bewährten zFP-Verfahren untersucht werden. Dies sollte eine genauere Korrelation der Ergebnisse der Online-Überwachung mit den Ergebnissen der Offline-Charakterisierung ermöglichen, um den Ablauf der verschiedenen Schadensmechanismen besser zu verstehen. Generell zeigte sich, dass die Nichtlinearität der Ultraschallsignale bei der Ermüdungsfrequenz im fortschreitenden Ermüdungsexperiment stark änderte (siehe auch Klirrfaktorverläufe im Anhang 7.6). Bei der Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik ( $f = 5$  MHz) zeigen sich nicht bei allen Proben Ultraschallreflektoren (siehe Ultraschallbilder Anhang 7.5). Der vorhandene Messaufbau der Ultraschallfehlerprüfung könnte so erweitert werden, dass die Proben während der Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik statisch beansprucht werden könnten. Durch den Vergleich von Ultraschall-B- und C-Bildern mit und ohne statische Durchbiegung könnten Schädigungen wie Mikrorisse, die ohne mechanische Beanspruchung geschlossen wären, im Ausgangszustand und während definierter Beanspruchungspausen detektiert werden. Zusätzlich könnten die CF-PPS-Proben mittels eines Kontrastmittels (Zinkiodid-Methanolösung) vorbehandelt werden, um oberflächennahe Fehler deutlicher in der Röntgencomputertomografie sichtbar zu machen.

Bei den quasistatischen Zugversuchen konnte in der Literatur ein Einfluss der Geometrie auf die Art der Schadensentwicklung festgestellt werden. In dieser Arbeit konnte der Einfluss der Geometrie auf die Ermüdungsmechanismen nicht untersucht werden. Der Spannungszustand der sich aufgrund des 3-Punkt Biegeversuchs ergibt unterscheidet sich gegenüber konventionellen Zugschwellversuchen. Zusätzlich stellt sich die Frage, in wie weit die hochfrequente Beanspruchung Einfluss auf die Faser/Matrix-Grenzschicht und damit auf das Ermüdungsverhalten hat. Es ist davon auszugehen, dass eine hochfrequente Beanspruchung zu einer Versteifung der Matrix und zu höheren Reibkräften an der Grenzschicht führt. Diese Arbeit konnte keine Unterschiede in den Schäden durch niederfrequente und durch hochfrequente Beanspruchung feststellen.

Das Abbruchkriterium des Ermüdungsexperiments beruht zurzeit auf subjektive Entscheidungsfindung des Benutzers. Hierfür sollen in Zukunft mit Hilfe der Berücksichtigung der Onli-

ne-Überwachung verschiedene Schadensparameter identifiziert werden, die zu unterschiedlichen Schadensstadien den Versuch anhalten, um die CF-PPS-Proben mit Hilfe der Offline-Charakterisierung genauestens zu untersuchen. Die in-situ Berechnung eines Schadensparameters, der den Anteil der subharmonischen Frequenzen berücksichtigt, könnte zum Beispiel als Indikator für die Entstehung von Meta-Delaminationen und interlaminaren Rissen dienen. Zusätzlich könnte ein lichtmikroskopisches System oberflächennahe Fehler quantifizieren, um eine Risskonzentrationsdichtebestimmung durchführen. Die zusätzliche Anschaffung eines hochauflösten Thermografie-Systems als zusätzliche Online-Überwachung könnte dazu dienen Delaminationen im Anfang der Entstehung, sichtbar zu machen, bevor sie als sogenannte „Hotspots“ in einfachen Infrarotkamarasystemen detektierbar sind. Des Weiteren ist der Einfluss der Einkerbung der Auflager in die CF-PPS Probe mit einhergehender Abnahme der statischen Mittellast unklar. Durch diesen Effekt kommt es zu einer Verringerung der mechanischen Beanspruchung im fortlaufenden Ermüdungsexperiment.

---

## Literaturverzeichnis

- [Altenbach, 04]: H. Altenbach, J. Altenbach, W. Kissing, *Mechanics of composite structural elements*, Springer, Berlin, 2004
- [Auld, 90] B.A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Krieger Publishing Company, Malabar, 1990.
- [Backe, 12]: D. Backe, F. Balle, T.B. Helfen, U. Rabe, S. Hirsekorn, C. Sklarczyk, D. Eifler, C. Boller, *Ultrasonic Fatigue Testing System Combined with Online Nondestructive Testing for Carbon Fiber Reinforced Composites*, TMS 2012, Orlando, FL, USA, March 11-15, 2012, Supplemental Proceedings: Volume 2: Materials Properties, Characterization, and Modeling TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2012, 855-863
- [Beehag, 95]: L. Ye, A. Beehag, *Mesostructural Aspects of Interlaminar Fracture in Thermoplastic Composites: Is Crystallinity a Key?*, Composites Science and Technology, **53**, 2, 1995, 167–173
- [Bergmann, 08]: W. Bergmann, *Werkstofftechnik: Polymerwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag, München, 2008, Seite 320ff
- [Böer, 13]: P. Böer, L. Holliday, T.H.-K. Kang, *Independent environmental effects on durability of fiber-reinforced polymer wraps in civil applications: A review*, Construction and Building Materials, **48**, 2013, 360 – 370
- [Bond Laminates]: Preliminary Material Data Sheet, Tepex® dynalite 207-C200(x)/50%, Bond Laminates GmbH, Germany
- [Boudot, 12]: F. Boudot, *Auswertung von Signalanalyseparametern bei der Hochfrequenzermüdung von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen (CFK) im Hinblick auf Schädigungsmechanismen*, Bachelorarbeit, Universität des Saarlandes, 2012
- [Broda, 14]: D. Broda, W.J. Staszewski, A. Martowicz, T. Uhl, V.V. Silberschmidt, *Modelling of nonlinear crack-wave interactions for damage detection based on ultrasound – A review*, Journal of Sound and Vibration **333**, 4, 2014, 1097-1118
- [Bureau, 02]: M. N. Bureau, F. Perrin, J. Denault, J.I. Dickson, *Interlaminar fatigue crack propagation in continuous glass fiber/polypropylene composites*, International Journal of Fatigue, **24**, 2-4, 2002, 99-102

- [Chung, 94]: D.D.L. Chung, *Carbon Fiber Composites, Processing of Carbon Fibers*, Butterworth-Heinemann, Boston, London, Oxford, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington, 1994
- [Couillard, 01]: R. Couillard, P. Schwartz, *Bending fatigue of carbon-fiber-reinforced epoxy composite strands*, *Composites Science and Technology*, **57**, 2, 1997, 229-235
- [Curtis, 87]: P. T. Curtis, B.B. Moore, *A comparison of the fatigue performance of woven and non-woven CFRP laminates in reversed axial loading*, *International Journal of Fatigue*, **9**, 2, 1987, 67-78
- [Daggumati, 13]: S. Daggumati, I. De Baere, W. Van Paepegem, J. Degrieck, J. Xu, S.V. Lomov, I. Verpoest, *Fatigue and post-fatigue stress-strain analysis of a 5-harness satin weave carbon fibre reinforced composite*, *Composites Science and Technology*, **74**, 2013, 20-27
- [Deng, 99]: S. Deng, L. Ye, *Influence of fiber-matrix adhesion on mechanical properties of graphite/epoxy composites: I. Tensile, flexure, and fatigue properties*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **18**, 11, 1999
- [Deutsch, 90]: V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, *Ultraschallprüfung: Grundlagen und industrielle Anwendung*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997 und J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials*, 4th Fully Revised Edition, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, 1990
- [DFG, 13]: DFG Forschungsantrag im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes 1466: „Life $\infty$ - Unendliche Lebensdauer für zyklisch beanspruchte Hochleistungswerkstoffe“ Teilprojekt 1: Hochfrequenzermüdung von C-Faser-Kunststoffverbunden mittels eines neu entwickelten Ultraschallprüfsystems in Kombination mit zerstörungsfreien Online Prüfmethoden, Lehrstuhl für Werkstoffkunde, TU Kaiserslautern, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung (LZPQ), Universität des Saarlandes, 2013
- [DGZfP, 03]: *Akustische Resonanzverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung*, Unterausschuss Akustische Resonanzverfahren im DGZfP Fachausschuss für Ultraschallprüfung, Richtlinie US6, 2009 und I. Hertlin, *Akustische Resonanzanalyse*, Band 5, Castell-Verlag, Wuppertal 2003
- [Drzal, 93]: L.T. Drzal, M. Madhukar, *Fibre-matrix adhesion and its relationship to composite mechanical properties*, *Journal of Materials Science*, **28**, Issue 3, 1993

- [Ehrenstein, 06]: G. W. Ehrenstein, *Faserverbund – Kunststoffe: Werkstoffe – Verarbeitung - Eigenschaften*, Carl Hanser Verlag München Wien, 2006, S. 228f
- [Elias, 96]: H. G. Elias, *Polymere. Von Monomeren und Makromolekülen zu Werkstoffen*, Hüthig & Wepf Verlag, Zug, Heidelberg, Oxford CT/USA, 1996
- [Galiotis, 03]: C. Galiotis, C. Koimtzoglou, *The effect of the interface on the fatigue performance of fibre composites*, B. Harris, *Fatigue in Composites*, Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003, 147-172
- [Gao, 99]: F. Gao, L. Boniface, S.L. Ogin, P.A. Smith, R.P. Greaves, *Damage accumulation in woven-fabric CFRP laminates under tensile loading: Part 1. Observations of damage accumulation*, *Composites Science and Technology*, **59**, 1, 1999, 123-136
- [Gao, 98]: Y.C. Gao, L.M. Zhou, *Numerical analysis of interface fatigue of fiber reinforced composites*, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **30**, 3, 1998, 235-241
- [Gamstedt, 99]: E.K. Gamstedt, B.A. Sjögren, *Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies*, *Composites Science and Technology*, **59**, 2, 1999, 167-178
- [Giurgiutiu, 08]: V. Giurgiutiu, *Signal Processing and Pattern Recognition for PWAS-based Structural Health Monitoring*, V. Giurgiutiu, *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors*, Elsevier, Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo, 2008
- [Gyekenyesi, 98]: A. L. Gyekenyesi, *Isothermal Fatigue, Damage Accumulation, and Life Prediction of a Woven PMC*, NASA/CR-19998-206593, 1998
- [Harris, 03a]: B. Harris, *A historical review of the fatigue behaviour of fibre reinforced plastics*, B. Harris, *Fatigue in Composites*, Science and Technology of the Fatigue Response of Fibre Reinforced Plastics, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003, 3-35
- [Harris, 03b]: B. Harris, *Fatigue in Composites*, Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003
- [Helfen, 12]: T.B. Helfen, R. Sridaran Venkat, U. Rabe, S. Hirsekorn, C. Boller, *Characterisation of CFRP through enhanced ultrasonic testing methods*, *Applied Composite Materials*, **19**, 6, 2012, 913-919

- [Hoffelner, 80]: W. Hoffelner, Fatigue crack growth at 20 kHz – a new technique, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, **13**, 1980, 617-619
- [Hosoi, 11]: A. Hosoi, K. Takamura, N. Sato, H. Kawada, *Quantitative evaluation of fatigue damage growth in CFRP laminates that changes due to applied stress level*, *International Journal of Fatigue*, **33**, 6, 2011, 781-787
- [Huang, 05]: N. E. Huang, S. S. P. Shen, *Hilbert Huang Transform and Its Applications*, *Interdisciplinary Mathematical Sciences*, Vol.5, World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2005
- [Jhang, 09]: K.-Y. Jhang, Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non-destructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, **10**, 1, 2009, 123-135
- [Karger Kocsis, 04]: J.Karger Kocsis, *Werkstoffe*, M. Neitzel, *Handbuch Verbundwerkstoffe*, Hanser, München, 2004
- [Klepka, 13]: A. Klepka, L. Pieczonka, W.J. Staszewski, F. Aymerich, Impact damage detection in laminated composites by non-linear vibro-acoustic wave modulations, *Composites Part B: Engineering*, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.003>
- [Kobayashi, 03]: S. Kobayashi, K. Terada, N. Takeda, *Evaluation of long-term durability in high temperature resistant CFRP laminates under thermal fatigue loading*, *Composites Part B*, **34**, 8, 2003, 753-759
- [Kumar, 10]: A. Kumar, C.J. Torbet, T.M. Pollock, J.W. Jones, *In situ characterization of fatigue damage evolution in a cast Al alloy via nonlinear ultrasonic measurements*, *Acta Materialia*, **58**, 6, 2010, 2143-2154
- [Liao, 99]: K. Liao, C. R. Schultheisz, D. L. Hunston, *Long-term environmental fatigue of pultruded glass-fiber-reinforced composites under flexural loading*, *International Journal of Fatigue*, **21**, 5, 1999, 485-495
- [Maier, 07]: M. Maier, *Berechnung und Konstruktion von Verbundwerkstoffen*, WS 2007/08, Institut für Verbundwerkstoffe, Technische Universität Kaiserslautern, 2007
- [Matthews, 99]: F.L. Matthews, R. D. Rawlings, *Composite materials: Engineering and science*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1999
- [Morse, 68]: P. M. Morse, K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968

- [Mouritz, 03]: A. P. Mouritz, *Non-destructive evaluation of damage accumulation*, B. Harris, *Fatigue in Composites, Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003, 242-266
- [Naik, 03]: N.K. Naik, *Woven-fibre thermoset composites*, B. Harris, *Fatigue in Composites, Science and technology of the fatigue response of fibre reinforced plastics*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003, 296-313
- [Nayfeh, 99]: A. H. Nayfeh, W. G. Abdelrahman, *Dynamic stress transfer in fibrous composites with damage*, *Composites Part B: Engineering*, **30**, 3, 1999, 233 -243
- [Neitzel, 04]: M. Neitzel, P. Mitschang, *Handbuch Verbundwerkstoffe*, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2004
- [Ohara, 06]: Y. Ohara, T. Mihara, K. Yamanaka, Effect of adhesion force between crack planes on subharmonic and DC responses in nonlinear ultrasound, *Ultrasonics*, **44**, 2, 2006, 194-199
- [Ollmann, 14]: H. Ollmann, *Erstellung eines Programms zur Ermittlung der dynamischen elastischen Konstanten von Carbonfaser verstärkten Kunststoffproben mittels Resonanzspektroskopie*, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung, Universität des Saarlandes, 2014
- [Pandita, 01]: S.D. Pandita. G. Huysmans, M. Wevers, I. Verpoest, *Tensile fatigue behaviour of glass plain-weave fabric composites in on- and off- axis directions*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **32**, 10, 2001, 1533-1539
- [Pandita, 04]: S. Pandita, I. Verpoest, *Tension-tension fatigue behaviour of knitted fabric composites*, *Composite Structures*, **64**, 2, 2004, 199-209
- [Polytec, 10]: Data Sheet, CLV-2534 Compact Laser Vibrometer, Polytec GmbH
- [Rabe, 12]: U. Rabe, T.B. Helfen, M. Weikert, S. Hirsekorn, H.-G. Herrmann, C. Boller, D. Backe, F. Balle, D. Eifler, *Nonlinear Ultrasonic Testing of Carbon Fibre Reinforced Plastics in the Very High Cycle Fatigue Regime*, XVII International Conference on Nonlinear Elasticity in Materials (ICNEM), Cefalù, Sicily, Italy, July 1-7, 2012, Acoustical Society of America, Proceedings of Meetings on Acoustics (POMA), **16**, 2012

- 
- [Reifsnider, 90]: K.L. Reifsnider, *Fatigue of Composite Materials*, Elsevier Science Publishers B.V., 1990, *Chapter 2: Damage and Damage Mechanics*, 11-78
- [Reß, 12]: W. Reß, G. Khatibi, B. Weiss, V. Gröger, *An ultrafast mechanical test system for bending fatigue studies of multilayered electronic components*, 4th ESTC 2012, Amsterdam, 2012
- [Scherer, 12]: A.S. Scherer, *Bestimmung elastischer Konstanten von Kohlenstofffaser-Kompositen mit akustischer Resonanzanalyse*, Bachelorarbeit, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätssicherung, Universität des Saarlandes, 2012
- [Schlimbach, 04]: J. Schlimbach, M. Neitzel, *Technisch-wirtschaftliche Entwicklung*, M. Neitzel, Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser, München, 2004, 3-24
- [Schürmann, 07]: H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, S.60f, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007
- [Skrna-Jakl, 09]: I. Skrna-Jakl, *Polymermatrix-Verbundwerkstoffe*, H.P. Degischer, S. Lüftl, Leichtbau, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2009, 105-137
- [Solodov, 10]: I. Solodov, N. Krohn, G. Busse, *Nonlinear ultrasonic ndt for early defect recognition and imaging*, Proceedings: ECNDT, 2010
- [Song, 97]: D.-Y. Song, N. Otani, *Fatigue life prediction of cross-ply composite laminates*, *Materials Science and Engineering: A*, **238**, 2, 1997, 329 – 335
- [Soutis, 00]: C. Soutis, *Analytic and numerical modelling, Fracture und fracture mechanics*, F.L. Matthews, G.A.O. Davies, D. Hitchings, C. Soutis, *Finite element modelling of composite materials and structures*, Woodhead Publishing Limited, Oxford, Cambridge, New Delhi, 2000, 123-210
- [Stelzer, 12]: S. Stelzer, G. Pinter, M. Wolfahrt, A.J. Brunner, J. Noisternig, *Cyclic Interlaminar Crack Growth in Unidirectional and Braided Composites*, *Fatigue Behaviour of Fiber Reinforced Polymers: Experiments and Simulations*, Weixing, 2012
- [Weber, 01]: I. Weber, P. Schwartz, *Monitoring bending fatigue in carbon-fibre/epoxy composite strands: a comparison between mechanical and resistance techniques*, *Composites Science and Technology*, **61**, 6, 2001, 849-853

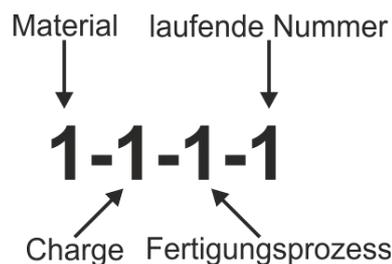
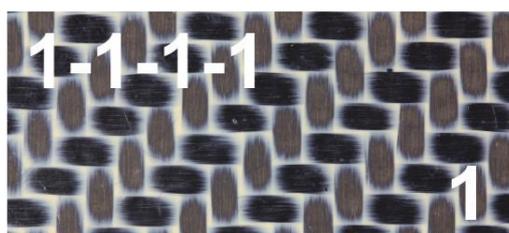
- [Xue, 07]: H. Xue, H. Tao, F. Montembault, Q. Wang, C. Bathias, *Development of a three-point bending fatigue testing methodology at 20 kHz frequency*, International Journal of Fatigue, **29**, 9-11, 2007, 2085-2093
- [Yamanaka, 04]: K. Yamanaka, T. Mihara, T. Tsuji, Evaluation of closed cracks by analysis of subharmonic ultrasound with closure stress, Proceedings: WCNDT, 2004
- [Yamanaka, 07]: K. Yamanaka, Y. Ohara, S. Yamamoto, T. Mihara, Ultrasonic evaluation of closed cracks using subharmonic/superharmonic phased array and a laser interferometer, IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, Octubre, 2007
- [Ye, 95]: L. Ye, A. Beehag, K. Friedrich, *Mesostructural Aspects of Interlaminar Fracture in Thermoplastic Composites: Is Crystallinity a Key*, Composites Science and Technology, **53**, 167 – 173, 1995
- [Zhang, 12]: J. Zhang, Y. Fu, L. Zhao, X. Liang, H. Huang, B. Fei, *Fatigue Behaviour of Woven Composite  $\pi$  Joints*, Fatigue Behaviour of Fiber Reinforced Polymers, 2012

## 7 Anhang

Im Anhang befinden sich die Erläuterungen zur Probenomenklatur, zur Berechnung der Zyklenzahl und der Amplitudenenergie. Des Weiteren wurden die wichtigsten Probandaten und Messergebnisse der resonanzspektroskopischen Untersuchungen in tabellarischer Form zusammengestellt. Zusätzlich sind die gesamten gemessenen Ultraschall B- und C-Bilder und berechneten Klirrfaktorverläufe aufgeführt.

### 7.1 Nomenklatur der Proben

Die Seriennummer der zu untersuchenden CF-PPS Proben wird links oben sowie die laufende Probennummer rechts unten mit weißer Farbe angebracht. Die erste Zahl steht für das Material, die zweite Nummer für die Produktionscharge. Die dritte Stelle gibt Auskunft über den verwendeten Schneidprozess. Bei der letzten Nummer handelt es sich um eine fortlaufende Zahlenfolge die unabhängig vom Material, der Charge, und dem Fertigungsprozess für jede einzelne Probe vergeben wird.



### 7.2 Zusammenstellung der Probandaten

Bei allen untersuchten CF-PPS-Proben wurde eine statische Mittelspannung von 115 MPa und eine nominelle Pulszeit von 100 ms gewählt. Als Ausnahme ist Probe 1-1-1-3 mit einer Pulszeit von 150 ms zu nennen. Die Proben mit der Seriennummer 1-1-1-1; 1-1-1-2 sowie 1-1-1-14 bis 1-1-1-20 und 1-1-1-23 wurden für Testmessungen verwendet. Ab der Probe mit der Seriennummer 1-1-1-21 wurde als Auflagermaterial anstelle von rostfreiem Stahl, ein randgehärteter Stahl verwendet. Zur zusätzlichen Verringerung des Auflagerabriebs wurde ab Probe 1-1-1-36 der randgehärtete Auflagerstahl durch einen pulvermetallurgisch beschichteten Stahl abgelöst. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Parameter und Ergebnisse der untersuchten Proben zusammengefasst.

Probe (Serien- nummer)	Geometrie (Länge × Breite × Dicke)	Beanspru- chungs- zyklen	Beanspru- chungs- amplitude [MPa]	Frequenz des 1. transversalen Biegemode		
				Ausgangs- zustand [kHz]	Beansprucht [kHz]	Relative Frequenzän- derung [%]
1-1-1-3	33,4 × 15,3 × 3,97 mm <sup>3</sup>	4,0 × 10 <sup>8</sup>	30	19,442	19,283	2,72
1-1-1-4	33,65 × 15,8 × 4,02 mm <sup>3</sup>	3,40 × 10 <sup>8</sup>	25	19,283	19,088	6,52
1-1-1-5	33,6 × 15,4 × 3,97 mm <sup>3</sup>	4,27 × 10 <sup>8</sup>	25	19,167	18,911	1,49
1-1-1-6	33,5 × 15,4 × 4,00 mm <sup>3</sup>	5,59 × 10 <sup>8</sup>	54	19,258	18,024	4,46
1-1-1-7	33,4 × 15,6 × 3,96 mm <sup>3</sup>	4,10 × 10 <sup>7</sup>	59	19,303	18,880	0,95
1-1-1-8	33,6 × 15,5 × 4,02 mm <sup>3</sup>	2,80 × 10 <sup>7</sup>	54	19,251	18,400	1,30
1-1-1-9	33,45 × 15,5 × 3,99 mm <sup>3</sup>	8,13 × 10 <sup>7</sup>	42	19,346	19,120	0,75
1-1-1-10	33,45 × 16 × 4,01 mm <sup>3</sup>	6,70 × 10 <sup>7</sup>	42	19,466	19,000	0,96
1-1-1-11	33,5 × 14,9 × 4,04 mm <sup>3</sup>	3,11 × 10 <sup>7</sup>	35	19,065	19,200	2,02
1-1-1-12	33,45 × 15,0 × 4,04 mm <sup>3</sup>	2,74 × 10 <sup>8</sup>	54	19,341	19,280	2,38
1-1-1-13	33,5 × 15,0 × 4,07 mm <sup>3</sup>	9,50 × 10 <sup>8</sup>	54	19,080	18,680	4,93
1-1-1-21	33,5 × 15,0 × 4,02 mm <sup>3</sup>	1,64 × 10 <sup>8</sup>	54	19,120	18,921	1,04
1-1-1-22	33,5 × 15,0 × 4,12 mm <sup>3</sup>	2,92 × 10 <sup>8</sup>	45	19,080	18,892	0,98
1-1-1-24	33,5 × 15,05 × 4,09 mm <sup>3</sup>	2,00 × 10 <sup>7</sup>	60	19,120	19,069	0,27
1-1-1-25	33,45 × 15,0 × 4,11 mm <sup>3</sup>	3,28 × 10 <sup>8</sup>	50	19,280	19,280	0,00
1-1-1-26	33,55 × 15,0 × 4,07 mm <sup>3</sup>	6,30 × 10 <sup>7</sup>	50	19,280	19,121	0,82

1-1-1-27	$33,45 \times 14,9 \times 4,06 \text{ mm}^3$	$5,85 \times 10^8$	50	19,280	19,2261	0,28
1-1-1-28	$33,5 \times 15,0 \times 4,04 \text{ mm}^3$	$5,80 \times 10^5$	75	12,025	19,0735	0,90
1-1-1-29	$33,6 \times 14,9 \times 4,08 \text{ mm}^3$	$7,23 \times 10^8$	45	19,245	19,121	0,64
1-1-1-30	$33,45 \times 15,0 \times 4,03 \text{ mm}^3$	$5,78 \times 10^8$	50	19,187	19,054	0,69
1-1-1-31	$33,5 \times 15,0 \times 4,03 \text{ mm}^3$	$6,53 \times 10^8$	50	19,207	19,0163	0,99
1-1-1-32	$33,5 \times 15,0 \times 4,06 \text{ mm}^3$	$4 \times 10^8$	65	19,398	18,963	2,20
1-1-1-33	$33,5 \times 14,9 \times 4,07 \text{ mm}^3$	$7,59 \times 10^8$	65	19,207	19,0735	0,70
1-1-1-34	$33,35 \times 15,0 \times 4,09 \text{ mm}^3$	$1,20 \times 10^8$	60	19,360	19,207	0,79
1-1-1-35	$33,45 \times 15,0 \times 4,03 \text{ mm}^3$	$2,84 \times 10^7$	70	19,112	18,902	1,10
1-1-1-36	$33,5 \times 14,9 \times 4,03 \text{ mm}^3$	$1,00 \times 10^9$	47	-	18,978	-
1-1-1-37	$33,4 \times 15,0 \times 4,06 \text{ mm}^3$	$1,4 \times 10^7$	60	19,245	18,711	2,80
1-1-1-38	$33,5 \times 15,0 \times 4,04 \text{ mm}^3$	$6,57 \times 10^8$	60	19,074	18,902	2,77
1-1-1-39	$33,45 \times 15,0 \times 4,04 \text{ mm}^3$	$4,10 \times 10^8$	65	19,179	18,997	0,90
1-1-1-40	$33,4 \times 15,0 \times 4,05 \text{ mm}^3$	$1,00 \times 10^9$	50	19,345	19,188	0,95

### 7.3 Berechnung der Zyklenzahl

Die Zyklenzahl lässt sich als Produkt der nominellen Pulsdauer  $t_p$ , der Beanspruchungsfrequenz  $f_0$ , und der Impulsnummer  $N_0$  berechnen. Die Impulsnummer beschreibt die Anzahl der durchgeführten Puls-Pause-Durchläufe.

$$N = t_p \cdot f_0 \cdot N_0 \quad 7-1$$

Es erfolgt keine Berücksichtigung des Pulsstarts und der aktiven Dämpfung der Sonotrode.

### 7.4 Berechnung der Amplitudenenergie

Um Änderungen der Nichtlinearität in den Frequenzspektren besser sichtbar zu machen, erfolgt in dieser Arbeit die Auftragung der Frequenzspektren in Abhängigkeit von der normierten Energie. Als Normierungsgröße wird die Energie der Grundfrequenz genommen. Wenn  $A$  die gemessene Amplitude in [ $\mu\text{m}$ ] für das Laservibrometer bzw. in [V] für das Mikrofon und des Weiteren  $A^*$  das Amplitudenmaximum in [ $\mu\text{m}$ ] bzw. in [V] ist, so kann mittels  $A/A^*$  die normierte Amplitude angegeben werden. Verwendet man das logarithmische Verhältnis folgt:

$$10 \cdot \lg\left(\frac{A}{A^*}\right) \text{dB}, \text{ wobei } \lg(x) = \log_{10}(x). \quad 7-2$$

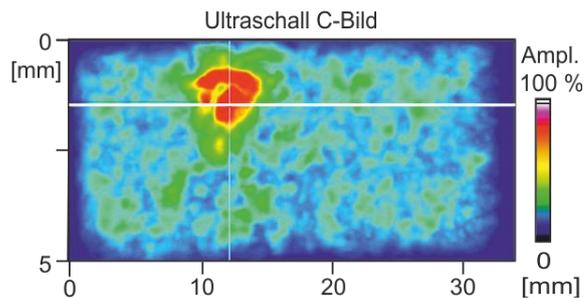
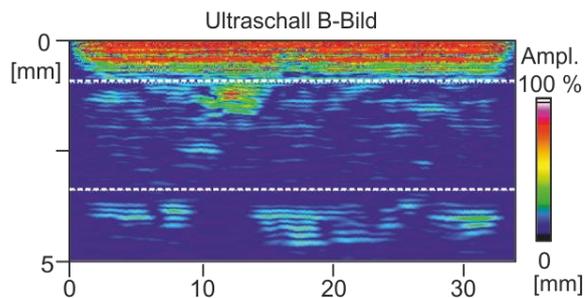
Durch die Verwendung der Proportionalität der Gesamtenergie zum Amplitudenquadrat ergibt sich für die Energie:

$$10 \cdot \lg\left(\frac{A}{A^*}\right)^2 \text{dB} = 20 \cdot \lg\left(\frac{A}{A^*}\right) \text{dB}. \quad 7-3$$

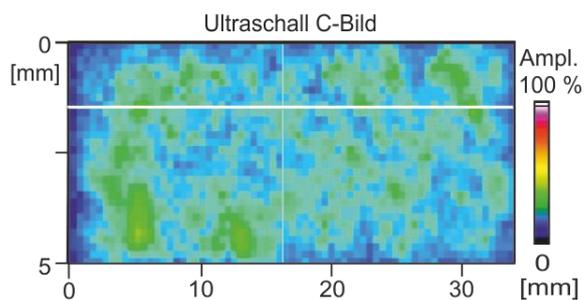
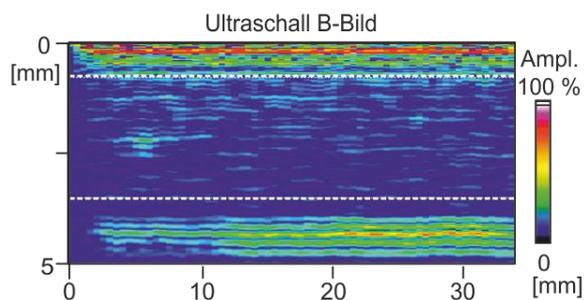
### 7.5 Offline Charakterisierung - Ultraschallfehlerprüfung in Tauchtechnik

Im Folgenden werden die Ultraschall B- und C-Bilder der untersuchten CF-PPS Proben im Ausgangszustand und nach der Beanspruchung gezeigt. Wie bereits in Kapitel 7.2 beschrieben handelte es sich bei den Proben mit der Seriennummer 1-1-1-1; 1-1-1-2 sowie 1-1-1-14 bis 1-1-1-20 und 1-1-1-23 um Testproben. Für diese Proben liegen keine Ultraschall B- und C-Bilder vor. Zusätzlich wurden bei den Proben 1-1-1-3, 1-1-1-5 bis 1-1-1-8, 1-1-1-13, 1-1-1-21 bis 1-1-1-27 und 1-1-1-36 keine Untersuchungen im Ausgangszustand durchgeführt, da die Ultraschallversuchsanlage zu dieser Zeit nicht zur Verfügung stand. Um den Messzeitplan am Lehrstuhl für Werkstoffkunde in Kaiserslautern nicht zu gefährden, wurde aus diesem Grund auf eine Untersuchung im Ausgangszustand verzichtet.

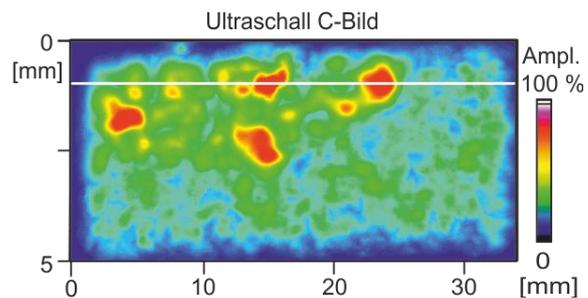
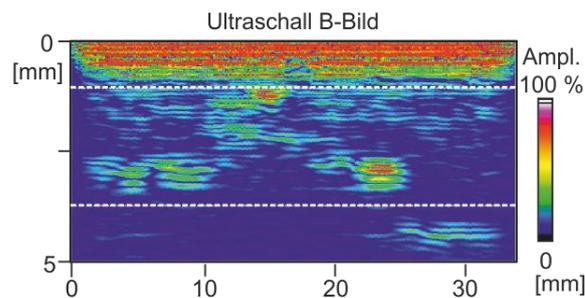
Probe: 1-1-1-3 ( $N = 4,57 \times 10^8 = N_i$ )



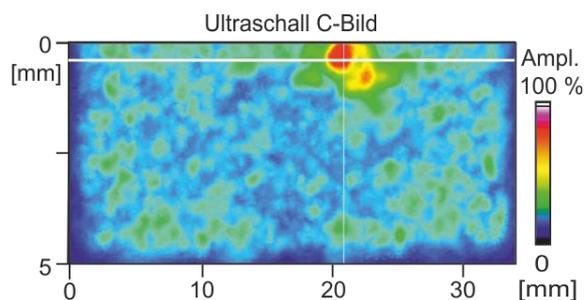
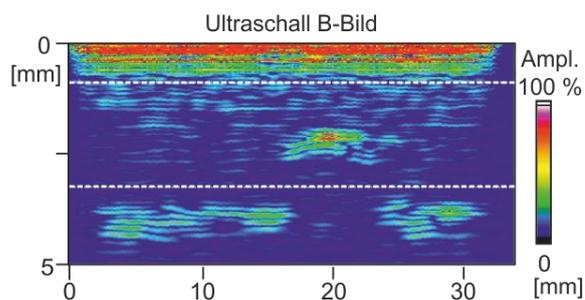
Probe: 1-1-1-4 (Ausgangszustand)



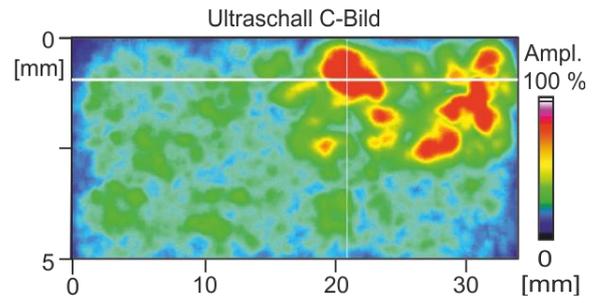
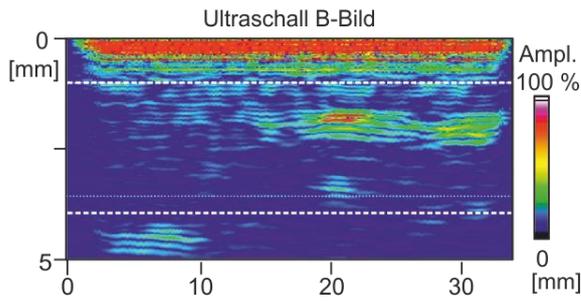
Probe: 1-1-1-4 ( $N = 3,4 \times 10^8 = N_i$ )



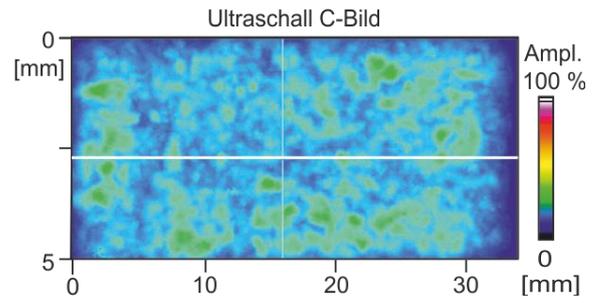
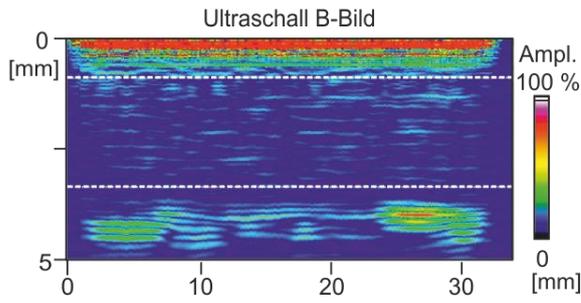
Probe: 1-1-1-5 ( $N = 4,27 \times 10^8 = N_i$ )



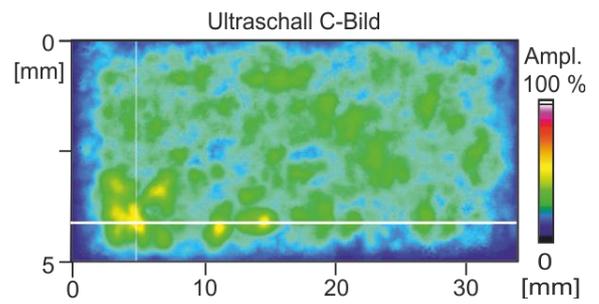
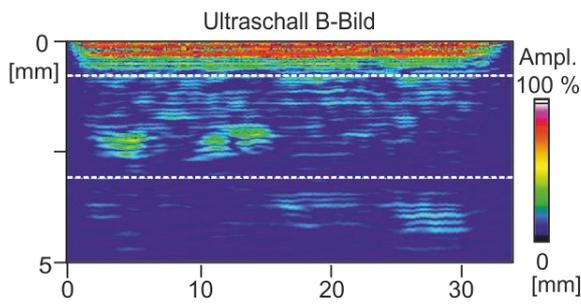
Probe: 1-1-1-6 ( $N = 5,59 \times 10^8 = N_i$ )



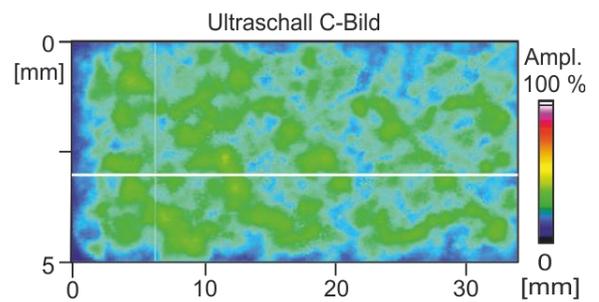
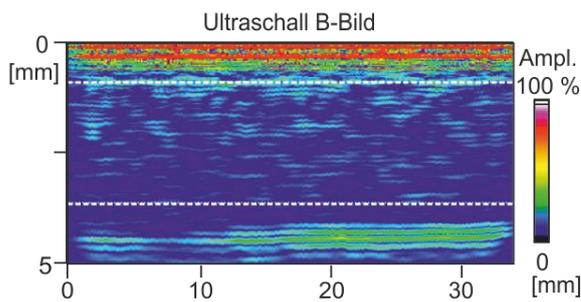
Probe: 1-1-1-7 ( $N = 4,1 \times 10^7 = N_i$ )



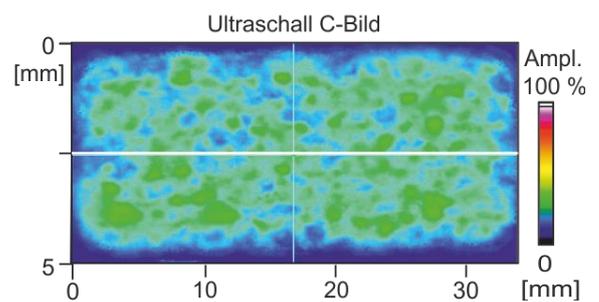
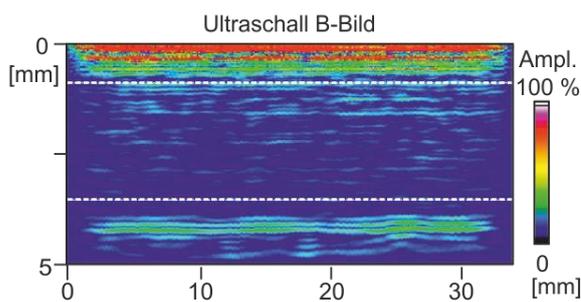
Probe: 1-1-1-8 ( $N = 2,8 \times 10^7 = N_i$ )



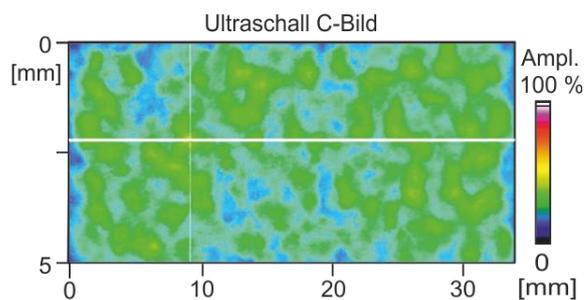
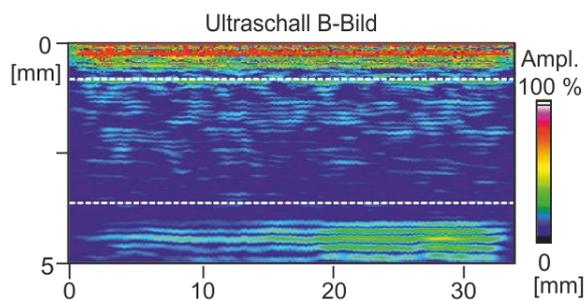
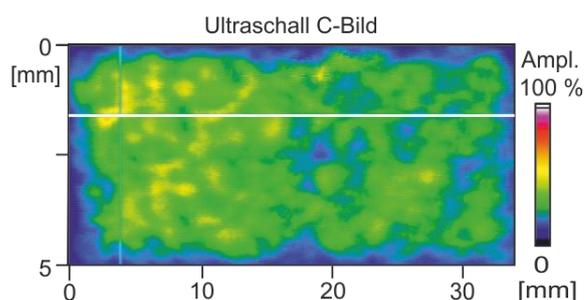
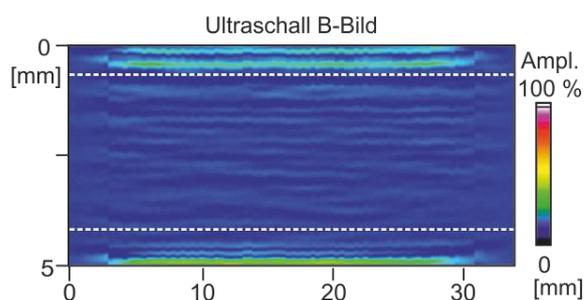
Probe: 1-1-1-9 (Ausgangszustand)



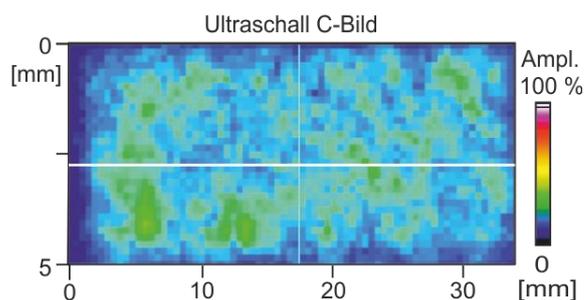
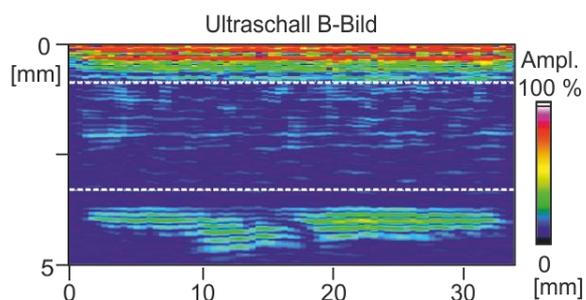
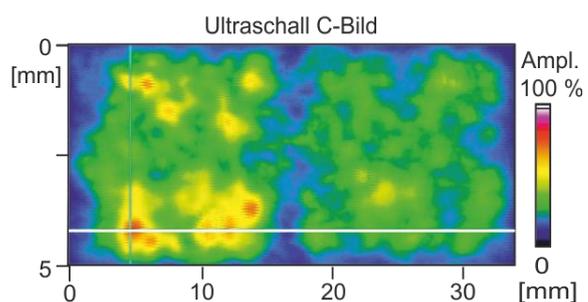
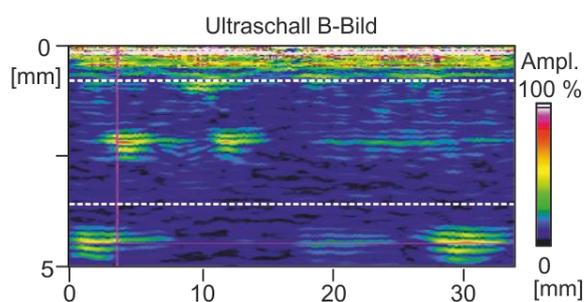
Probe: 1-1-1-9 ( $N = 8,13 \times 10^7 = N_i$ )



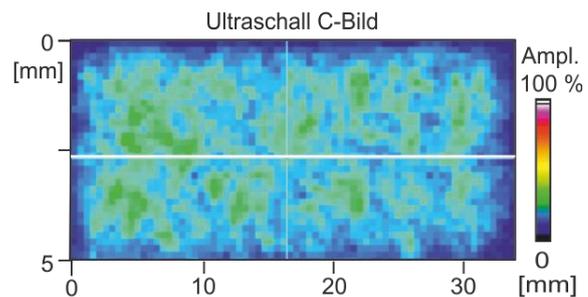
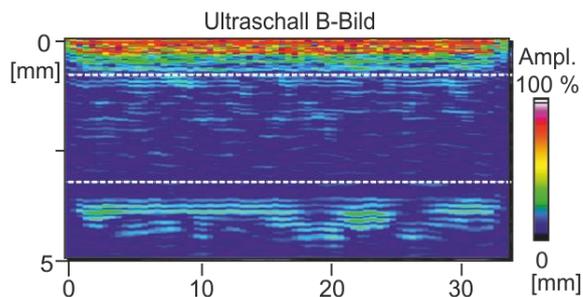
Probe: 1-1-1-10 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-10 ( $N = 6,7 \times 10^7 = N_i$ )

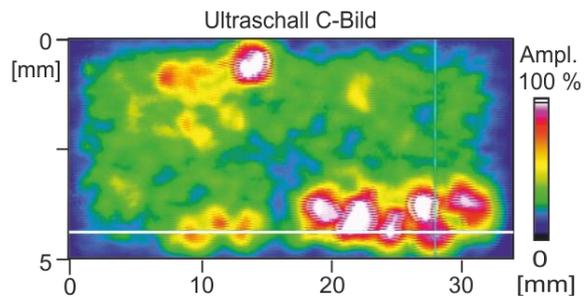
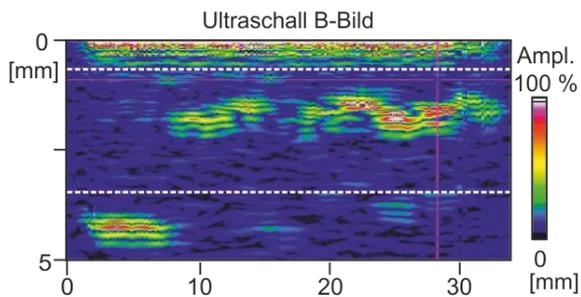
Probe: 1-1-1-11 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-11 ( $N = 3,11 \times 10^7 = N_i$ )

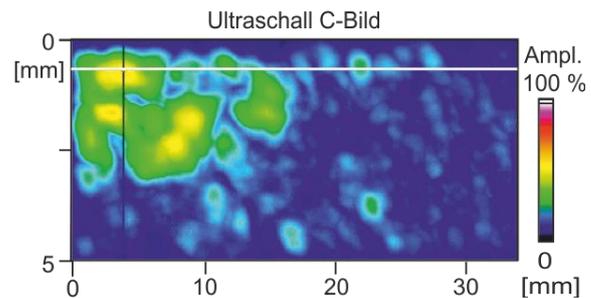
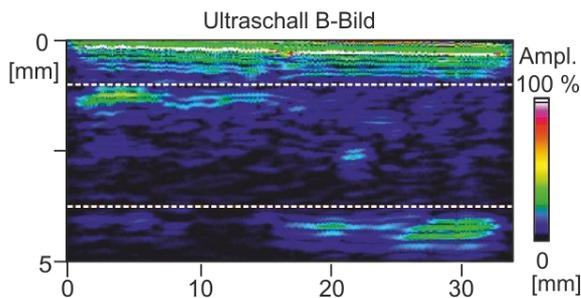
Probe: 1-1-1-12 (Ausgangszustand)



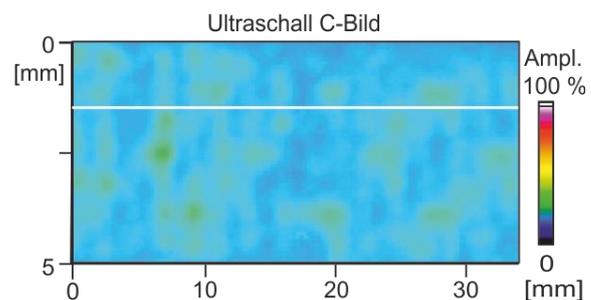
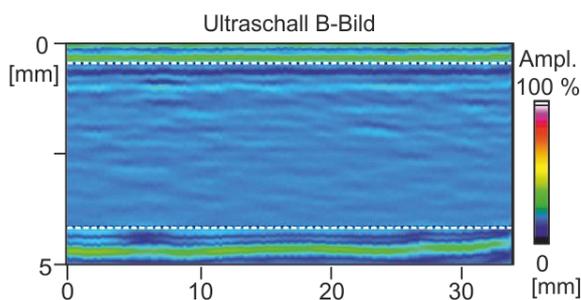
Probe: 1-1-1-12 ( $N = 2,74 \times 10^7 = N_i$ )



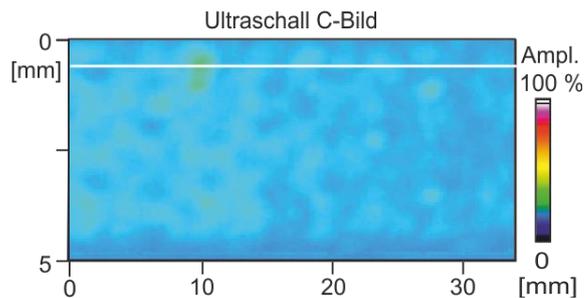
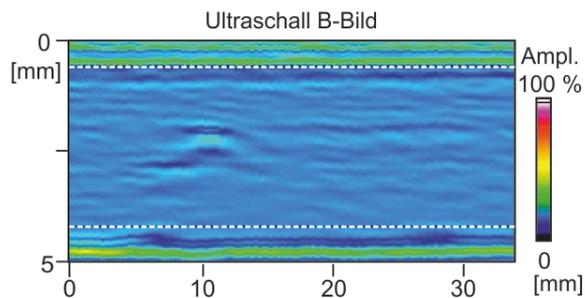
Probe: 1-1-1-13 ( $N = 9,5 \times 10^8 = N_i$ )



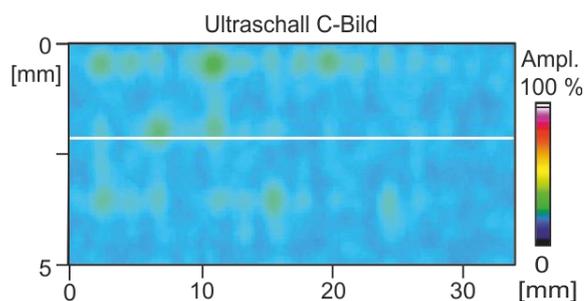
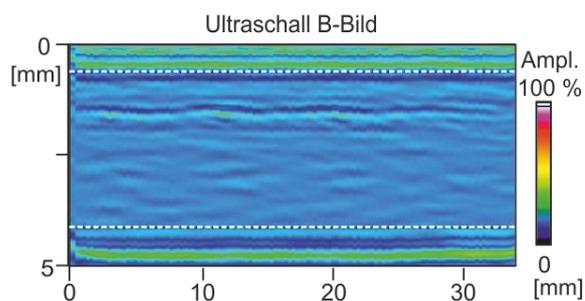
Probe: 1-1-1-21 ( $N = 1,64 \times 10^9 = N_i$ )



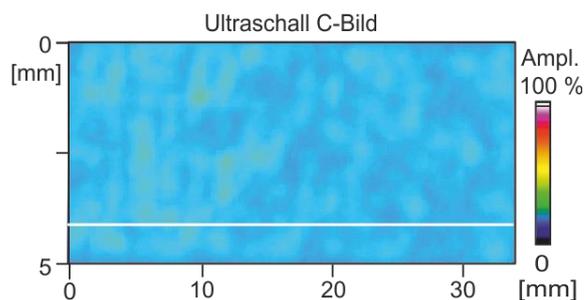
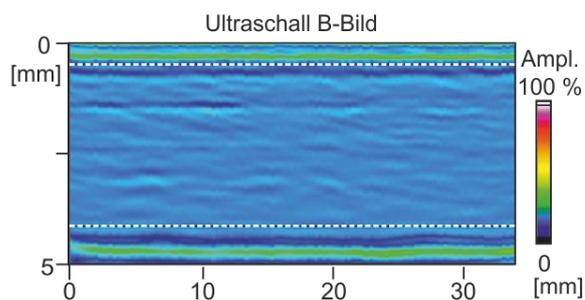
Probe: 1-1-1-22 ( $N = 2,92 \times 10^9 = N_i$ )



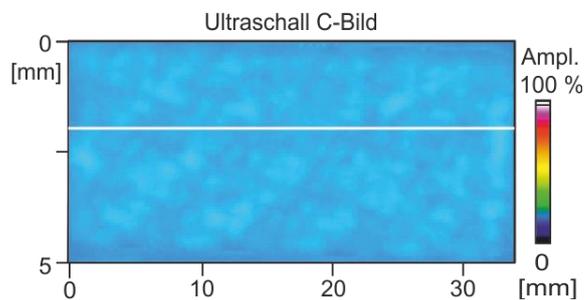
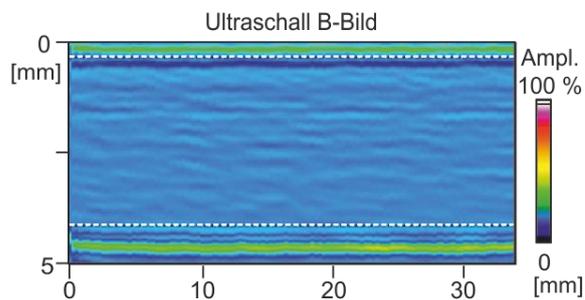
Probe: 1-1-1-24 ( $N = 2,0 \times 10^7 = N_i$ )



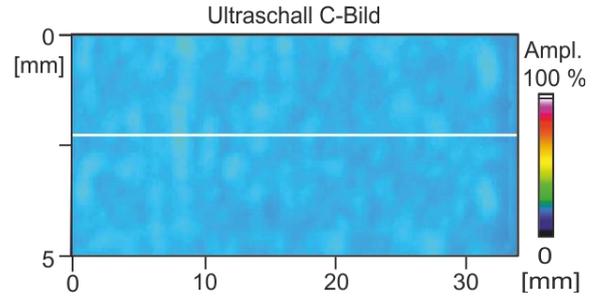
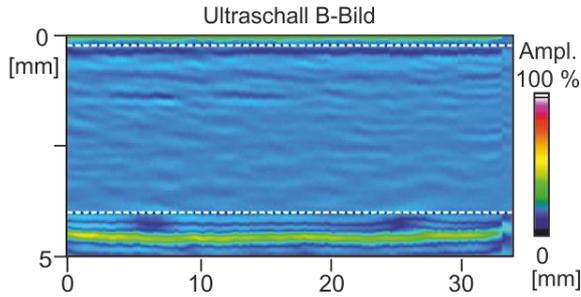
Probe: 1-1-1-25 ( $N = 3,28 \times 10^9 = N_i$ )



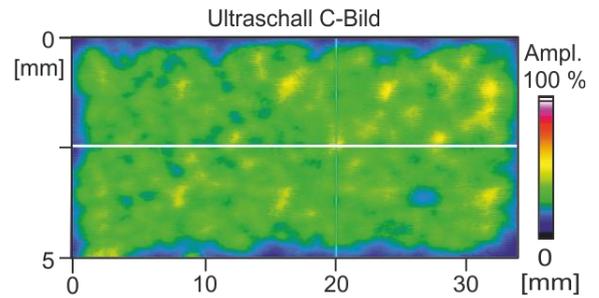
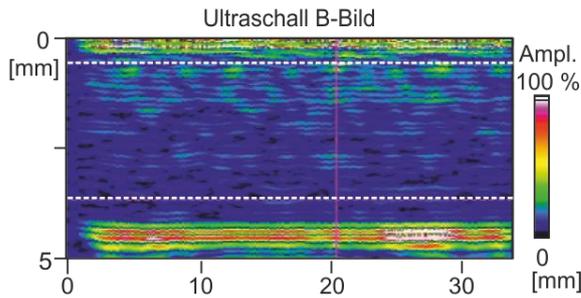
Probe: 1-1-1-26 ( $N = 6,3 \times 10^7 = N_i$ )



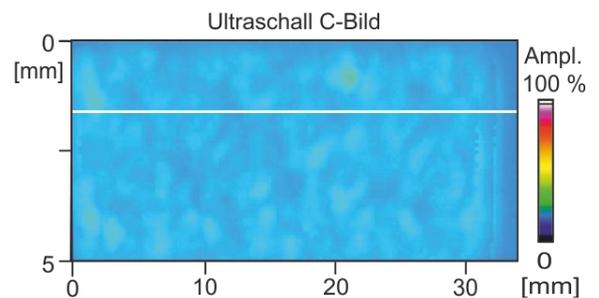
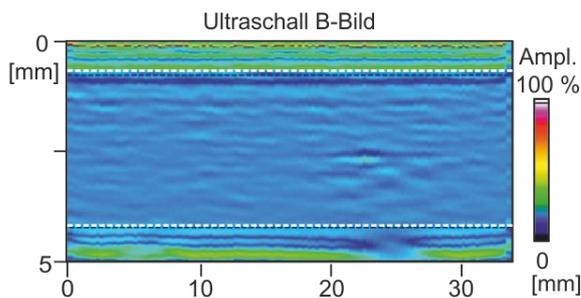
Probe: 1-1-1-27 ( $N = 5,85 \times 10^9 = N_i$ )



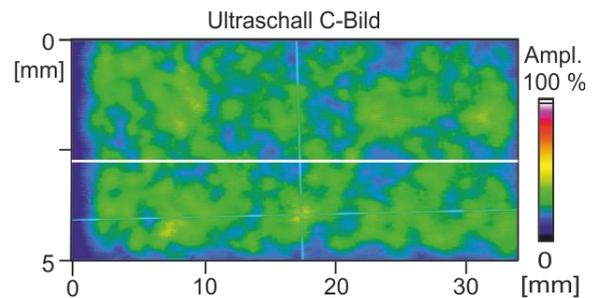
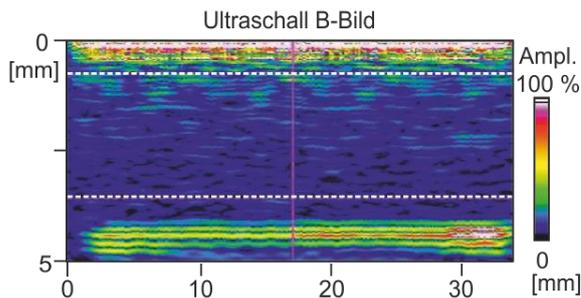
Probe: 1-1-1-28 (Ausgangszustand)



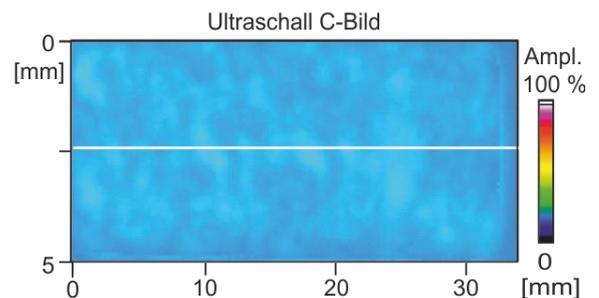
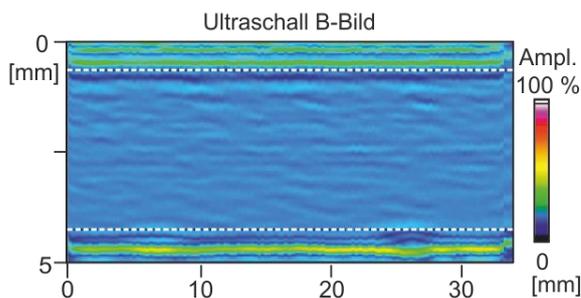
Probe: 1-1-1-28 ( $N = 5,8 \times 10^9 = N_i$ )



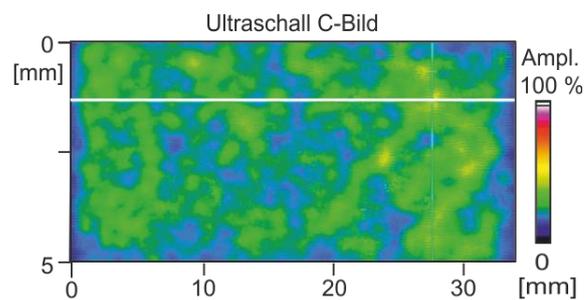
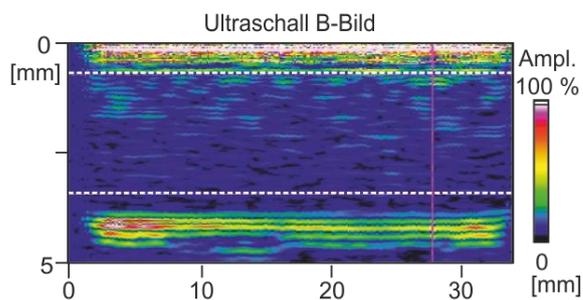
Probe: 1-1-1-29 (Ausgangszustand)



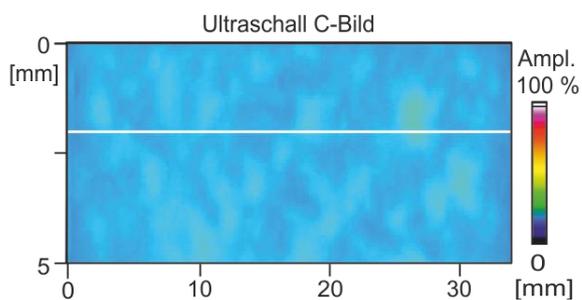
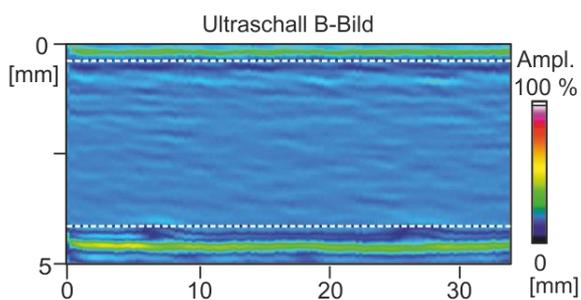
Probe: 1-1-1-29 ( $N = 7,23 \times 10^9 = N_i$ )



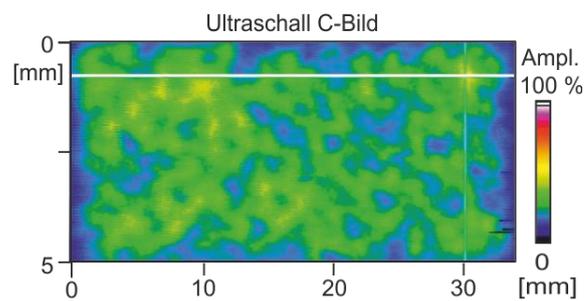
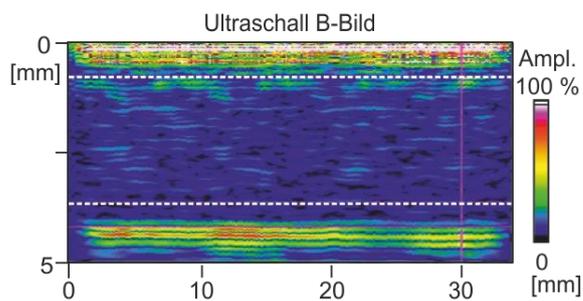
Probe: 1-1-1-30 (Ausgangszustand)



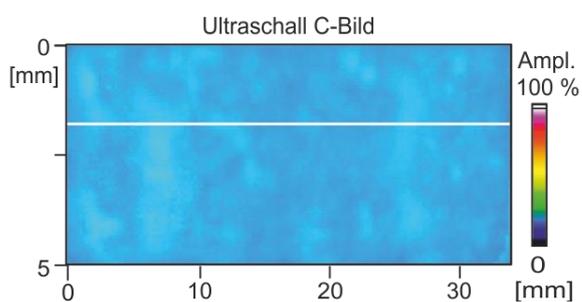
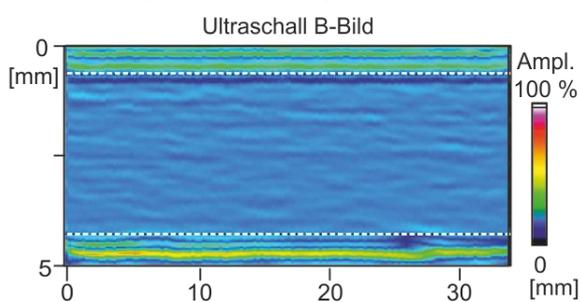
Probe: 1-1-1-30 ( $N = 5,78 \times 10^9 = N_i$ )



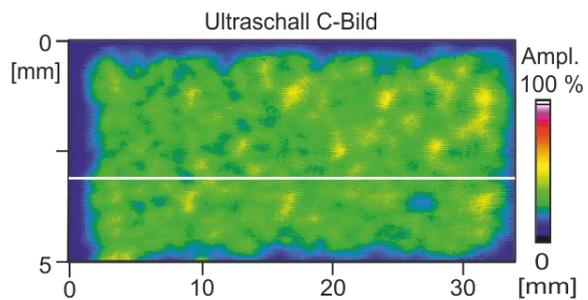
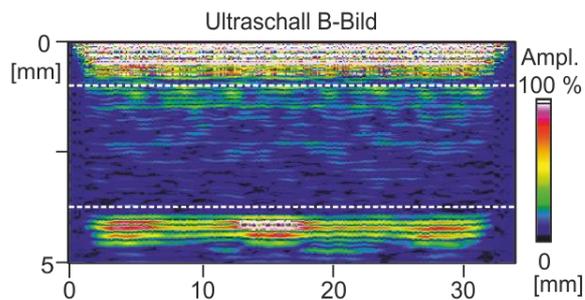
Probe: 1-1-1-31 (Ausgangszustand)



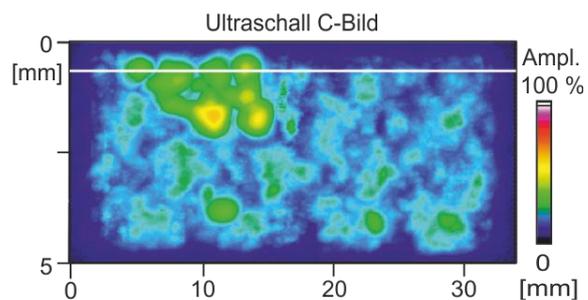
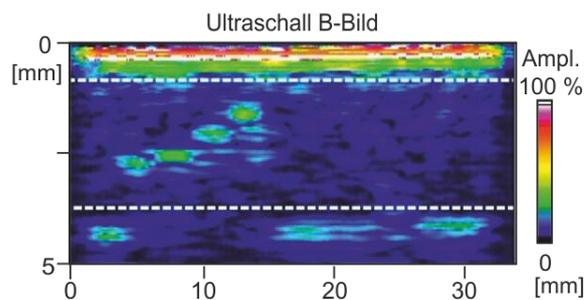
Probe: 1-1-1-31 ( $N = 6,53 \times 10^9 = N_i$ )



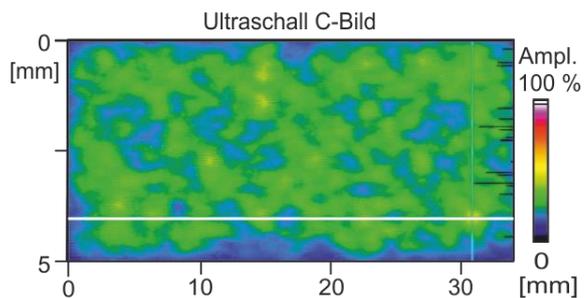
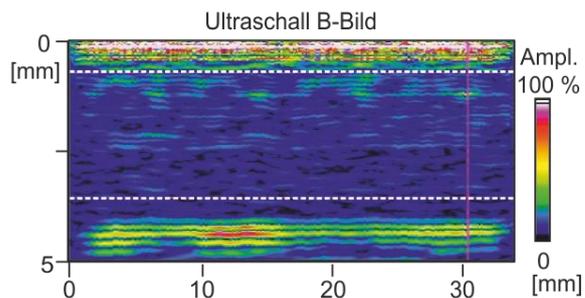
Probe: 1-1-1-32 (Ausgangszustand)



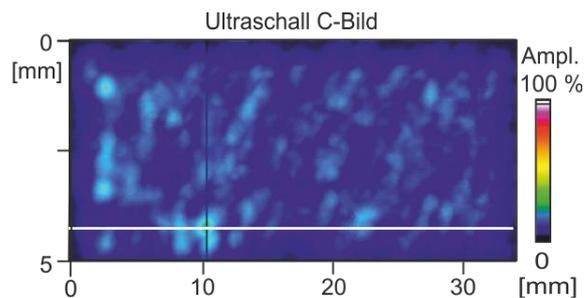
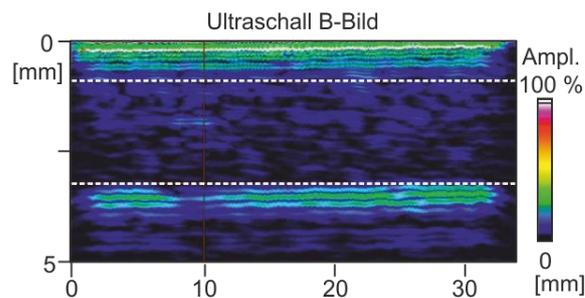
Probe: 1-1-1-32 ( $N = 4,0 \times 10^8 = N_i$ )



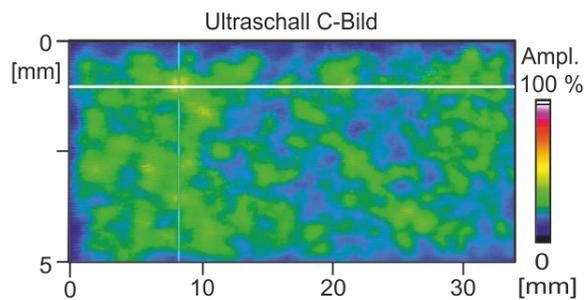
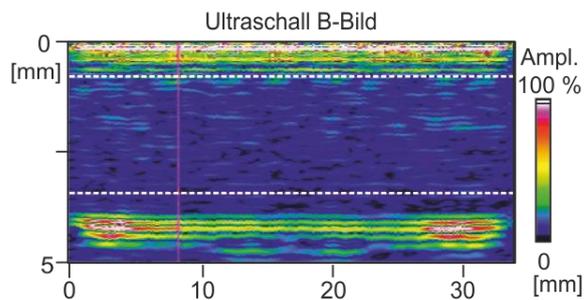
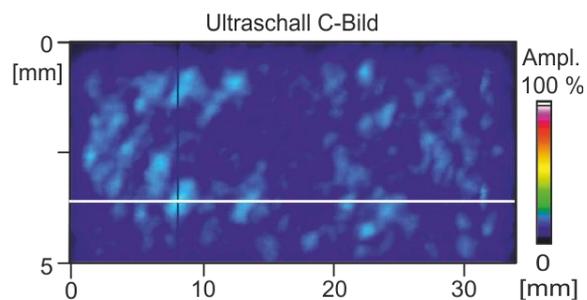
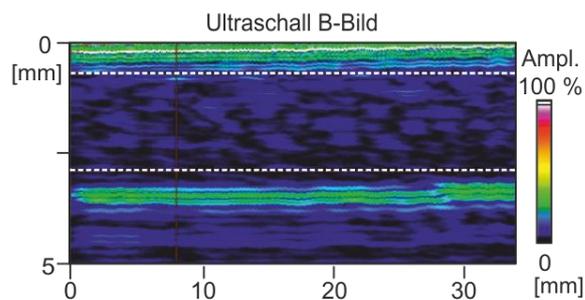
Probe: 1-1-1-33 (Ausgangszustand)



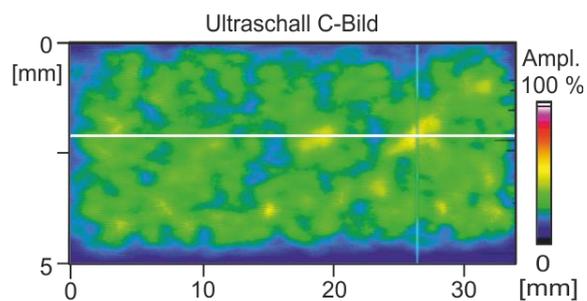
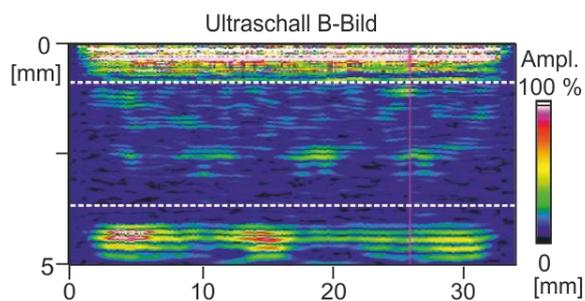
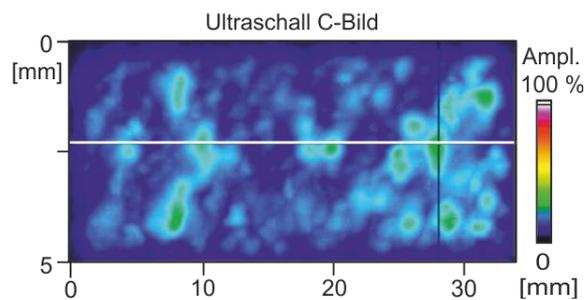
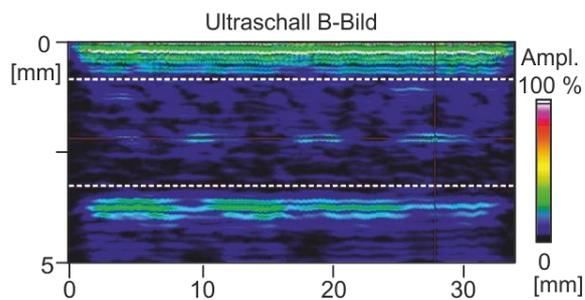
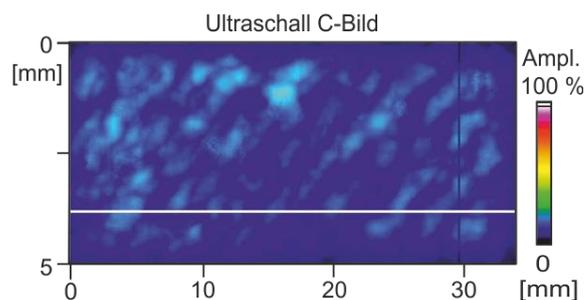
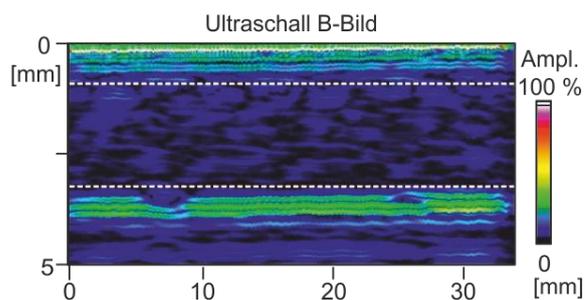
Probe: 1-1-1-33 ( $N = 7,59 \times 10^8 = N_i$ )



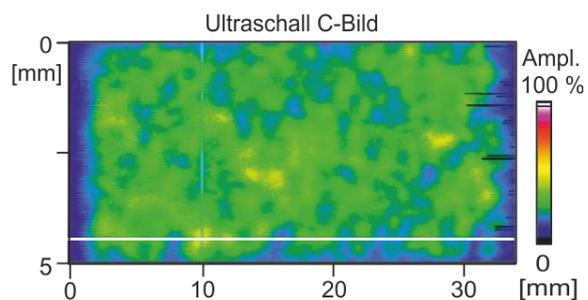
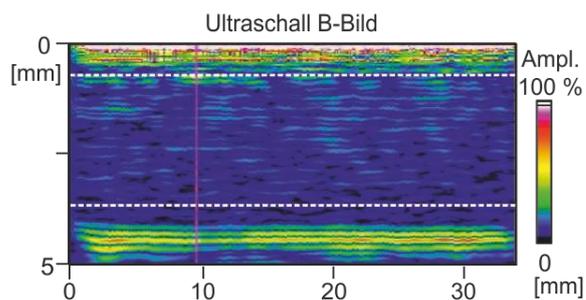
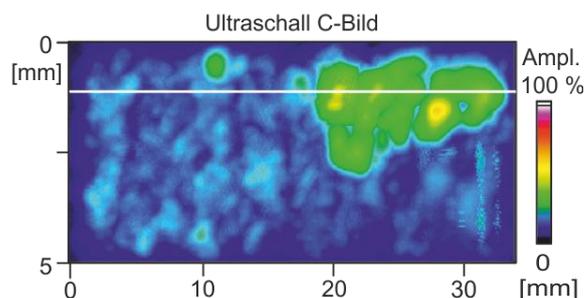
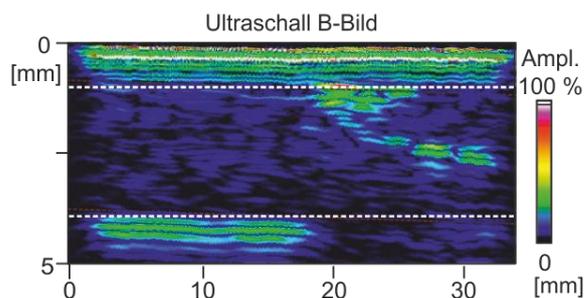
Probe: 1-1-1-34 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-34 ( $N = 1,2 \times 10^8 = N_i$ )

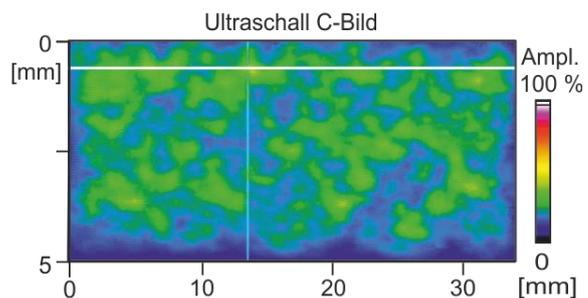
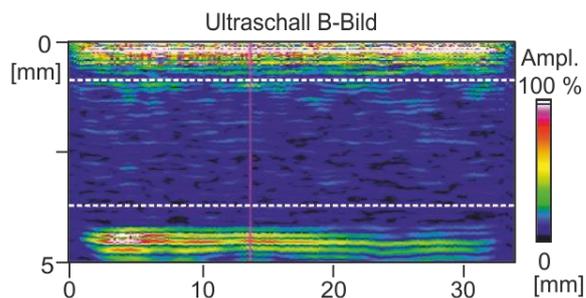
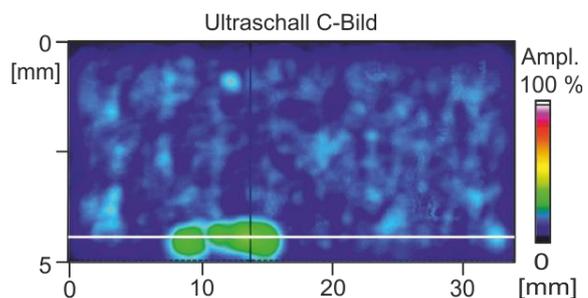
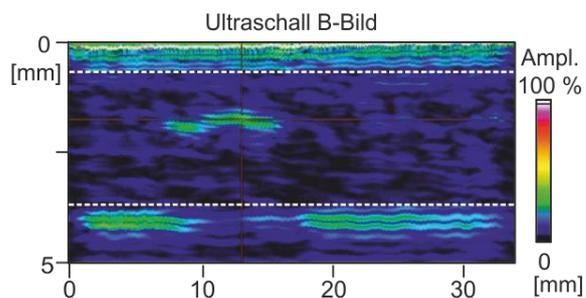
Probe: 1-1-1-35 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-35 ( $N = 2,84 \times 10^7 = N_i$ )Probe: 1-1-1-36 ( $N = 1 \times 10^9 = N_i$ )

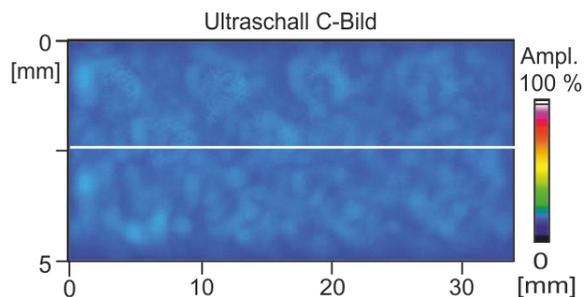
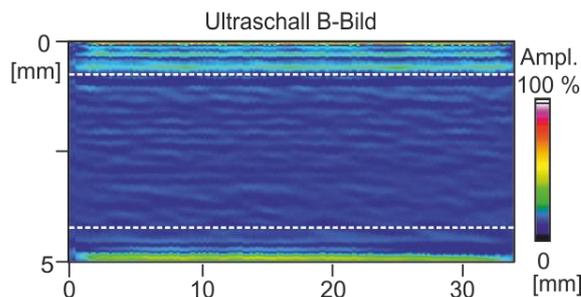
Probe: 1-1-1-37 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-37 ( $N = 1,4 \times 10^7 = N_i$ )

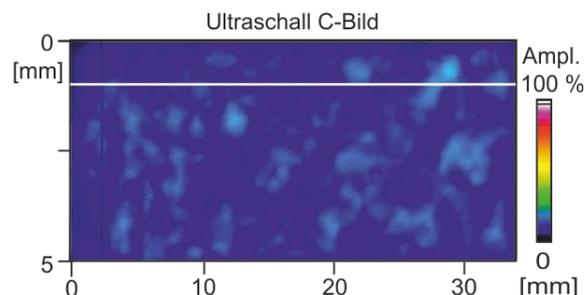
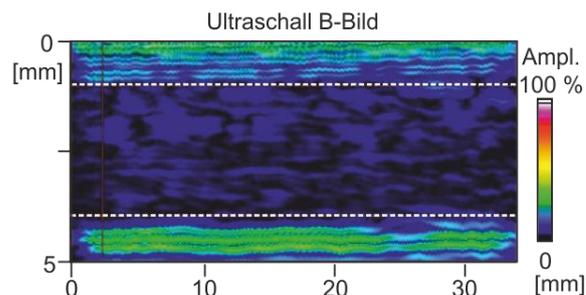
Probe: 1-1-1-38 (Ausgangszustand)

Probe: 1-1-1-38 ( $N = 6,57 \times 10^8 = N_i$ )

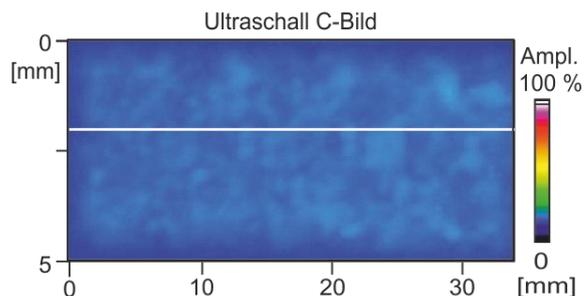
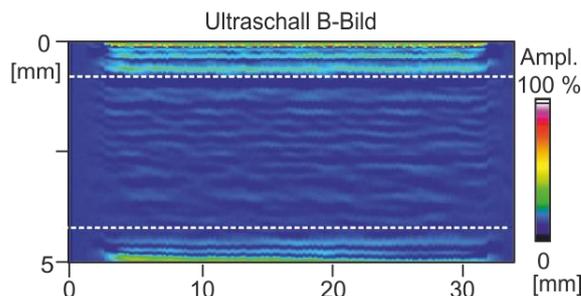
Probe: 1-1-1-39 (Ausgangszustand)



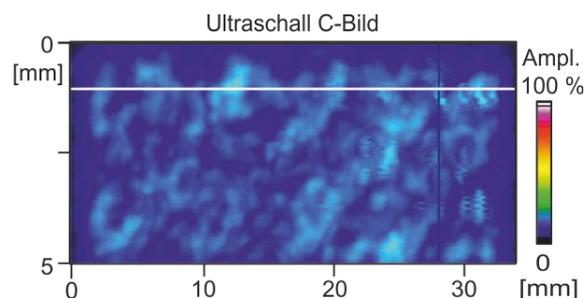
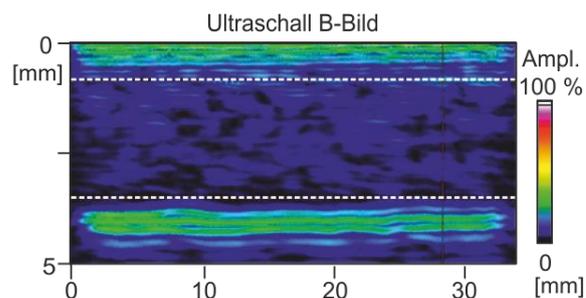
Probe: 1-1-1-39 ( $N = 4,10 \times 10^8 = N_1$ )



Probe: 1-1-1-40 (Ausgangszustand)



Probe: 1-1-1-40 ( $N = 1,0 \times 10^9 = N_1$ )



## 7.6 Klirrfaktorverläufe als Funktion der Beanspruchungszyklen

Die Klirrfaktorverläufe aller gemessenen CF-PPS Proben, mit Ausnahme der Testproben sind im Folgenden aufgeführt. Die Seriennummer befindet sich links oben in dem jeweiligen Graphen. Der Klirrfaktorverlauf in blau wurde berechnet aus den Ultraschallzeitsignalen des Laservibrometers und in grün aus den Ultraschallzeitsignalen des Mikrofons. Die Berechnung der Klirrfaktorverläufe erfolgte mit Hilfe von Formel 5-1.

