

Zuordnung von Schallemissionsparametern zu spezifischen Schadensarten in CFK- Werkstoffen

Ulrich HOLDER¹, Christoph SCHREIBER¹, Eberhard SCHULZE², Lars SCHUBERT²

¹Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach, Germany

²Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden, Germany

Kontakt E-Mail: ulrich.holder@porsche.de

Kurzfassung. Die hohen Anforderungen an die Emissionsminimierung und die damit steigenden Anforderungen an Leichtbauwerkstoffe führen zu einem erhöhten Einsatz von CFK-Bauteilen in der Automobilindustrie. Der Einsatz von CFK-Werkstoffen beschränkt sich nicht länger auf den Motorsport. Sicherheitsrelevante CFK-Bauteile werden derzeit bereits in Serienfahrzeugen verbaut. Um den sicheren Betrieb der Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen gewährleisten zu können, muss das Schädigungsverhalten dieser Werkstoffe verstanden werden. Dies betrifft auch Schäden welche beispielsweise durch Alterungseffekte oder Misuse hervorgerufen werden. In diesem Fall ist eine zuverlässige Identifizierung von verschiedenen Schadensmechanismen notwendig, wie z.B. Faserbrüchen, Delaminationen, Faserauszügen und Rissbildungen in der Matrix.

Ein Ansatz zur zerstörungsfreien Ermittlung der verschiedenen Schadensmechanismen ist die Verwendung der Schallemissionsprüfung (AET). Dieses spezielle Verfahren hat den Vorteil, dass es auch in situ während Standardprüfungen auf Coupon- oder Bauteilebene angewendet werden kann. Die Schallemissionsprüfung kann sowohl eine Lokalisierung von Schädigungen als auch die Erfassung der räumlichen und zeitlichen Schadenentwicklung liefern. Sie erlaubt darüber hinaus je nach Art des Belastungseintrages die Detektion materialspezifischer Versagensmechanismen.

Das Verfahren basiert darauf, dass an der Oberfläche von belasteten Bauteilen, mit Hilfe von hoch sensiblen piezoelektrischen Sensoren, dynamische Verschiebungen im Nanometerbereich nachgewiesen werden können. Diese Sensoren arbeiten in einem Frequenzbereich von etwa 50 kHz bis 1000 kHz. Ein Vorteil bei der Untersuchung von Faserverbundwerkstoffen ist, dass Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen erzeugen. Zum anderen sind unterschiedliche Schadensmechanismen durch spezifische Burstparameter der Emissionssignale nachweisbar. Ein Faserbruch emittiert beispielsweise Signale mit anderen Kennwerten als ein Riss in der Matrix. Diese Parametrisierungsmöglichkeit verschiedener akustischer Emissionen macht die Schallemissionsmessmethode zu einem qualifizierten, zerstörungsfreien Prüfverfahren für CFK-Werkstoffe. Der eingereichte Beitrag beschreibt systematische Untersuchungen auf Couponebene an CFK-Werkstoffen und stellt charakteristische Schallemissionsparameter den unterschiedlichen Schädigungsmechanismen gegenüber.

Grundlagen

Schallemissionsmesstechnik

Durch das Freisetzen von elastischer Energie in einem Festkörper, beispielsweise in Form einer elastischen Welle, wird Schallemission (AE) initiiert. Die Schallemissionsprüfung ist eine passive Prüfmethode und somit wird die Schallwelle, im Gegensatz zu einer gezielt eingebrachten Welle bei der Ultraschallprüfung, vom Defekt im Werkstoff selbst ausgelöst. Temporäre, sehr kleine Materialverschiebungen, die z.B. durch die Rückfederung des Materials bei schnell ablaufenden Belastungsregimen auftreten können, führen je nach Lasteintrag zu einer Mikrorissbildung oder interlaminaren Schäden in FVK, die eine elastische, akustische Welle (elastische Spannungswelle) an der Oberfläche auslösen. Als Schallemissionsquelle wird der ortbare, physikalische Ausgangspunkt der elastischen Welle bezeichnet. Elastische und plastische Verformungen (z.B. Versetzungsbewegungen), Rissbildung und Risswachstum, Phasenumwandlungen und Korrosionsvorgänge sind potentielle Schallemissionsquellen in unterschiedlichen Werkstoffen [1,2]. Die akustische Welle ist ein transientes Signal, welches durch einen definierten und erkennbaren Beginn, und durch ein ebenso erkennbares Ende charakterisiert ist. Dabei verursacht diese Welle ein elektrisches Signal im AE-Aufnehmer und wird als Schallemissionsereignis beschrieben.

Die als AE-Ereignisse bezeichneten Signale werden weiter entweder in Hits oder Events unterteilt. Einem Hit kann kein werkstoff- bzw. bauteilschädigendes Schadensereignis zugeordnet werden, wohingegen ein Event eine solche Aussage treffen kann. Um als Hit erkannt zu werden, muss ein Schallemissionssignal an mindestens einem Sensor einen definierten Schwellwert überschreiten. Potentielle Störgeräusche werden durch zusätzliches Filtern und dem Abgleichen mit unterschiedlichen Schallemissionsmerkmalen eliminiert. Zu diesen Merkmalen gehören unter anderem die Ankunftszeit (Zeit der ersten Überschwingung), die Anzahl der Überschwingungen, Anstiegszeit und Signaldauer, die Maximalamplitude, die freiwerdende Energie und der RMS-Wert (Root Mean Square). Der RMS-Wert wird ebenfalls zur Bestimmung des kontinuierlichen Hintergrundrauschens vor dem jeweiligen Hit verwendet [2]. Die eigentliche Unterscheidung in Hits und Events geschieht in der nachgeschalteten Datenauswertung und Analyse. Zur Einordnung und Interpretation der Events werden die bereits erwähnten Schallemissionsmerkmale herangezogen. Des Weiteren werden zusätzlich die Betriebsdaten (z.B. Kraft-Weg Diagramm) der Belastungsintervalle und die Geometrie des Prüflings (Probe oder Bauteil), sowie die Schallgeschwindigkeiten und die akustische Dämpfung einbezogen.

Zur Detektion der Schallemissionen werden hauptsächlich piezoelektrische Sensoren verwendet, die an einen Vorverstärker angeschlossen sind. Der Vorverstärker muss einen hohen Dynamikumfang ohne Übersteuern verarbeiten können. Vor der Digitalisierung der Schallemissionssignale durch den A/D-Wandler werden durch geeignete Frequenzfilter etwaige Störsignale aussortiert. Die Software, welche zur weiteren Datenverarbeitung eingesetzt wird kann je nach verwendetem Messsystem variieren. Für die in dieser Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse, wurde sowohl für die Datenerfassung, als auch für die Auswertung eine vom Fraunhofer IKTS entwickelte Software eingesetzt.

Die Schallemissionsereignisse sind lokalisierbar (die Genauigkeit hängt dabei wesentlich von der Sensoranzahl ab). Die Ortungsergebnisse können auf unterschiedliche Weise grafisch abgebildet werden (z.B. summiert und einzeln dargestellt). Die Grundlage der Lokalisierung eines Schallemissionssignals ist die Bestimmung des Quellorts jedes einzelnen Schallereignisses durch die Analyse der Laufzeitunterschiede der Signale zwischen den Sensoren. Schallwellen breiten sich in isotropen Medien mit konzentrischen Kreisen aus und werden dadurch von unterschiedlichen Sensoren zeitverzögert detektiert. Auf dieser Grundlage erfolgt zusätzlich die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit des Werkstoffs, welche für die Ortung und damit die Zuordnung der Ereignisse als Events

vorauszusetzen ist. Die Schallgeschwindigkeit eines Werkstoffes wird durch den Bleistiftminenbruch, der als reproduzierbare Ersatz-Schallquelle genutzt wird, ermittelt. Diese nach ihren Erfindern Hsu und Nielsen bezeichnete Hsu-Nielsen-Quelle ist ein Druckbleistift mit einem Führungsring, der den Minenbruch unter einem konstant, definierten Winkel sicherstellt. Hierfür werden Bleistiftminen mit einem Härtegrad von 2H und einem Durchmesser von entweder 0,5mm oder 0,35mm verwendet. Bei der Durchführung des Hsu-Nielsen Test ist darauf zu achten, dass das durch den Minenbruch erzeugte Schallsignal gleichbleibend an definierten Stellen durchgeführt wird, um über die Laufzeitdifferenz zwischen mehreren Sensoren die Schallgeschwindigkeit berechnen zu können. Die Schallausbreitung hängt im Allgemeinen vom Werkstoff, der Bauteil oder Probengeometrie und vom Umgebungsmedium ab. Bei Faserverbunden wird die Schalllaufzeit zusätzlich noch vom Lagenaufbau und der Faserorientierung beeinflusst.

Die Schallemissionsmessung und -analyse ist für sämtliche Werkstoffe einsetzbar. Um eine Messung realisieren zu können, muss der zu prüfende Werkstoff (z.B. Probe oder Bauteil) mit ausreichend Sensoren versehen werden und anschließend ist eine passive oder aktive Messung ohne weitere Arbeitsschritte möglich. Somit ist beispielsweise eine Echtzeitüberwachung während eines Prüfstandlaufes von Bauteilen bei dynamischen Lasten möglich. Nachteilig bei der Schallemissionsanalyse ist die hohe Empfindlichkeit des Messsystems auf Störgrößen wie elektromagnetische Störungen oder Witterungsverhältnisse zu bewerten. Für eine zuverlässige Durchführung von Schallemissionsmessungen müssen diese Störgrößen weitestgehend vermieden werden. Als einen weiteren Nachteil kann das Fehlen einer Datenbank mit Bewertungskriterien und einheitlichen Schallemissionsparametern gesehen werden. Folglich beruht die Auswertung und vor allem Bewertung und Interpretation der Schallemissionsergebnisse zu großen Teilen auf den Erfahrungen des Prüfers oder Prüfinstituts [2].

Stand der Wissenschaft und Technik

Bereits in den 1950er Jahren forschte Joseph Kaiser auf dem Gebiet des akustischen Verhaltens von Metallen während unterschiedlicher Belastungszustände. Nach ihm wurde auch der Kaiser-Effekt benannt, der das „Ausbleiben von detektierbarer Schallemission bis die vorangegangene maximale Belastung überschritten ist“ beschreibt [2]. Danach entstanden zahllose weitere Arbeiten auf dem Gebiet der Schallemissionsanalyse. In dieser Veröffentlichung werden lediglich Ergebnisse von Untersuchungen an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) dargestellt und diskutiert.

Zusätzlich zum Kaiser-Effekt besitzt das Schallemissionsverhalten von Werkstoffen aus Faserverbunden durch den Felicity-Effekt eine zusätzliche spezifische Besonderheit. In der Literatur wird der Felicity-Effekt auch oft als Felicity-Ratio bezeichnet und es beschreibt, dass die Schwere eines vorherigen induzierten Schadens sich auf die Folgelast auswirkt. Folglich können Schallemissionen bei zum Beispiel zyklisch ansteigenden Belastungsregimen vor dem Erreichen der vorherigen Maximallast auftreten [4]. Potentiell bietet die Schallemissionsanalyse die Option, bei einer ausreichenden Kenntnis des Bauteils und dessen Schädigungsverhaltens (auch dem des Werkstoffes), Aussagen bezüglich des Vorschädigungsverhältnisses zu treffen und somit Rückschlüsse auf die Restlebensdauer ziehen zu können.

Um die unterschiedlichen Schädigungsmechanismen in FVK sicher identifizieren zu können, müssen zwingend verschiedene Schallemissionsparameter verglichen und bewertet werden. Für diese vergleichende Betrachtungsweise der Schallemissionsparameter werden die Signale z.B. der Wellenform- und Wellenmoden-Analyse unterzogen, die Frequenzanalyse durch die Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt, eine Mustererkennung und Clusterung durch z.B. neuronale Netzwerke angewandt und die Modellierung der AE-Quellen betrachtet.

J. Bohse [5, 9] forschte als einer der Ersten systematisch an der Detektion von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen mit der Schallemissionsanalyse. Dabei erzeugte er gezielt, bestimmte Bruchmoden in glasfaserverstärkten Kunststoffen. Er verwendete hierzu den Double-Cantilever-Beam-Test, der ein Delaminationsversagen provozierte, welches von den AE-Aufnehmern detektiert wurde. Es gelang ihm durch die Ortung der Schallquellen und der Frequenzanalyse einen Frequenzbereich der Schallemissionen bei Schädigung der Proben von 100 – 350 kHz dem Matrixversagen und einen Frequenzbereich von 350 – 700 kHz dem Faserversagen zuzuordnen. Eine etwas detailliertere Trennung der verschiedenen Schädigungsmechanismen beschrieb de Groot [6] anhand seiner Untersuchungen an kohlenstofffaserverstärkten Verbundwerkstoffen. Er definierte für den Matrixbruch einen Frequenzbereich von 90 – 150 kHz, für das Interfaceversagen wie beispielsweise Debonding und Faser pull-out einen Frequenzbereich von 180 – 310 kHz und für den Faserbruch einen Frequenzbereich >300 kHz. De Groot stieß bei seinen Untersuchungen auch auf Frequenzanteile die im Bereich von 540 kHz lagen. Diese wurden in seinen Ausführungen nicht weiter behandelt. Bei der Untersuchung der Auswirkung des Sensorabstandes zur Schallemissionsquelle stellte Ni [7] die Frequenzanalyse der Amplitudenanalyse gegenüber und es stellte sich heraus, dass die Frequenz der Schallemissionsquelle im Vergleich zur Amplitude vom Sensorabstand weitgehend unbeeinflusst ist. Folgende Frequenzbereiche konnte er den Schädigungsarten zuordnen. Matrixbruch <100 kHz, Debonding von 200 - 300 kHz und Faserbruch zwischen 400 und 450 kHz. Die Untersuchungen von Ni wurden allerdings an einzelnen eingebetteten Fasern und Fasersträngen durchgeführt, wodurch der Einfluss des Faserverbundes nicht mit einbezogen wurde. Eaton [8] teilte die Frequenzbereiche der Schädigungsklassen wiederum in lediglich in zwei Teile auf. So ergaben seine Untersuchungen für das Matrixversagen <150 kHz und für das Faserversagen >300 kHz.

2004 führte Rowland [4] eine Untersuchung hinsichtlich des Schädigungsverhaltens eines F1-Monocoques aus CFK auf Grundlage der Felicity Analyse durch. Er konzentrierte sich bei seiner Auswertung auf die Anzahl der Hits und deren Energiesummen. Dies lieferte jedoch nur eine Abschätzung der aufgetretenen Schädigungsmechanismen.

Sause [3, 10, 11] arbeitete im Rahmen seiner Dissertation an der Erkennung der Schädigungsmechanismen durch die Mustererkennung und wendete unterschiedliche Analyseverfahren an. Zunächst ermittelte er durch die Energie- und Amplitudenanalyse der Schallemissionssignale je nach Schädigungsart unterschiedliche Cluster. In weiterführenden Arbeiten legte er seinen Schwerpunkt auf die Simulation der Ausbreitung von akustischen Signalen der Schallemissionsquellen und entwickelte auf Basis der Erkenntnisse eine Clusteranalyse. Anschließend validierte er die Ergebnisse der simulierten Clusteranalyse mit experimentell ermittelten Ergebnissen von Zug- und Biegeversuchen. Zur Clusterung verwendete er eine Kombination aus Energieparameter, Signalanzahl, die FFT und die neu entwickelte Weighted Peak Frequency, die sich aus einer Parameterextraktion im Zeit- und Frequenzraum zusammensetzt und sich wie folgt berechnet:

$$f_{WPF} = \sqrt{f_{Peak} \cdot f_{centroid}} \text{ und } f_{centroid} = \frac{\int f \times \tilde{U}(f) df}{\int \tilde{U}(f) df} \text{ mit } \int_{f_1}^{f_2} \tilde{U}^2(f) df *$$

*Partial Power 1: $f_1=0$ kHz; $f_2=150$ kHz; Partial Power 2: $f_1=150$ kHz; $f_2=300$ kHz Partial Power 3: $f_1=300$ kHz; $f_2=450$ kHz (gemäß der charakteristischen Frequenzspektren)

Zum Schluss stellte er die Ergebnisse von Simulation, Clusterung und Experimenten den Ergebnissen der mikroskopischen Untersuchungen gegenüber. Dabei gelang es Sause die frequenzbasierten Matrix-, Interface- und Faserspektren noch genauer zu differenzieren. Die Überschneidungen der Matrix- und Interfacespektren konnte er allerdings nicht vollständig auflösen und wies deshalb im Ausblick auf eine Weiterentwicklung der verwendeten Algorithmen hin. Einen starken Einfluss auf die Überlappung haben jedoch auch die

Probengeometrie, der Abstand des Sensors zur AE-Quelle und der Materialaufbau der Proben.

Betrachtet man die Ergebnisse der Arbeiten auf diesem Gebiet, kann zusammengefasst werden, dass in den letzten Jahren große Fortschritte bei der Detektion und Zuordnung der Schädigungsmechanismen durch die Schallemissionsanalyse erzielt wurde. Eine eindeutige Zuordnung von Schallemissionsparametern zu Schädigungsmechanismen ist bis heute noch nicht möglich. Somit kann die für die Praxis relevante Übertragung auf ein Bauteil unter Betriebslast, erst dann erfolgen, wenn eine eindeutige Zuordnung von AE-Parametern zu den jeweiligen Schädigungsmechanismen möglich ist. Daher bezieht sich diese Arbeit hauptsächlich auf Couponproben mit geeigneter Sensoranordnung.

Bisherige Arbeiten [12] der Autoren an taillierten/nicht-taillierten Zugproben haben die Zuordenbarkeit der AE-Signale zu unterschiedlichen Schädigungsklustern anhand eines umfangreichen Probenumfangs gezeigt. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Taillierung den Ort der zu erwartenden Hauptschädigungszone gut einschränkt. Die hier verwendete, im Zentrum der Längsstreckung der Proben befindliche Taillierung, kann sich jedoch ungünstig auf die Lokalisierung der SE-Ereignisse auswirken, wenn die Schallemissionen von EMV-Störungen überlagert werden, die zeitgleich von allen Sensoren erfasst werden. Eine asymmetrisch taillierte Probe löst dieses Problem, da Schallemissionssignale aus dem taillierten Bereich jetzt zu unterschiedlichen Zeitpunkten von den Sensorpaaren erfasst werden. Ebenfalls wurde der Einfluss der Probenbreite auf die Schallemissionssignale betrachtet.

Experimentelle Arbeit

Es wurde der gleiche Versuchsaufbau verwendet, den die Autoren bereits in [12] vorgestellt haben. Bei der Ergebnisdarstellung in Abbildung 1 bis 3 wurden die Parameter der einzelnen Schallemissionsereignisse als rote Kreise dargestellt. Es ist durchgängig die partielle Leistung I (PP1 in %) über der gewichteten Vorzugsfrequenz (WPF in kHz) aufgetragen. In jeder Versuchsreihe wurden standardmäßig die Lagenaufbauten $0/90^\circ$, $\pm 45^\circ$ und quasiisotrop getestet. Geprüft wurde mit einem, an den Lagenaufbau angepassten, zyklischen Prüfregime, bei dem jedes Mal eine nach Erreichen der Lastrampe wieder auf eine definierte Vorkraft entlastet wurde. Es wurden je Einzelversuch fünf gültige Proben ausgewertet. Die Proben waren immer aus der-selben Materialkombination. Die Probengeometrien wurden wie folgt variiert und der Einfluss auf die AE-Cluster betrachtet:

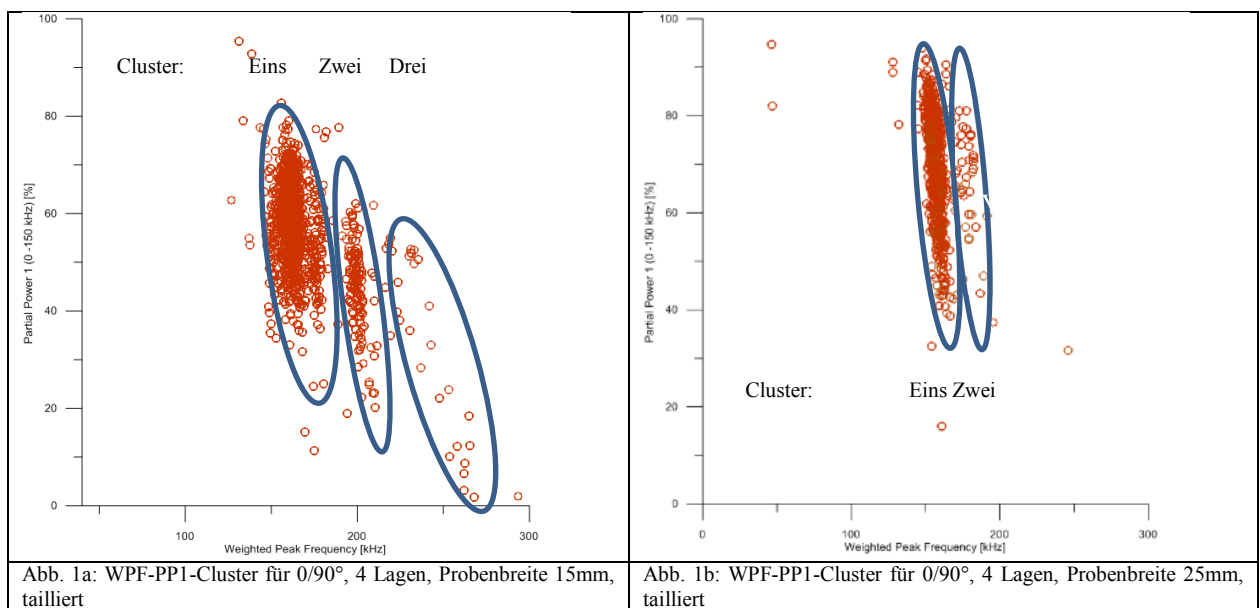
- Änderung der Probenbreite bei taillierten Proben
- Änderung der Lagenanzahl bei taillierten Proben
- Taillierte Proben gegenüber nicht taillierte Proben

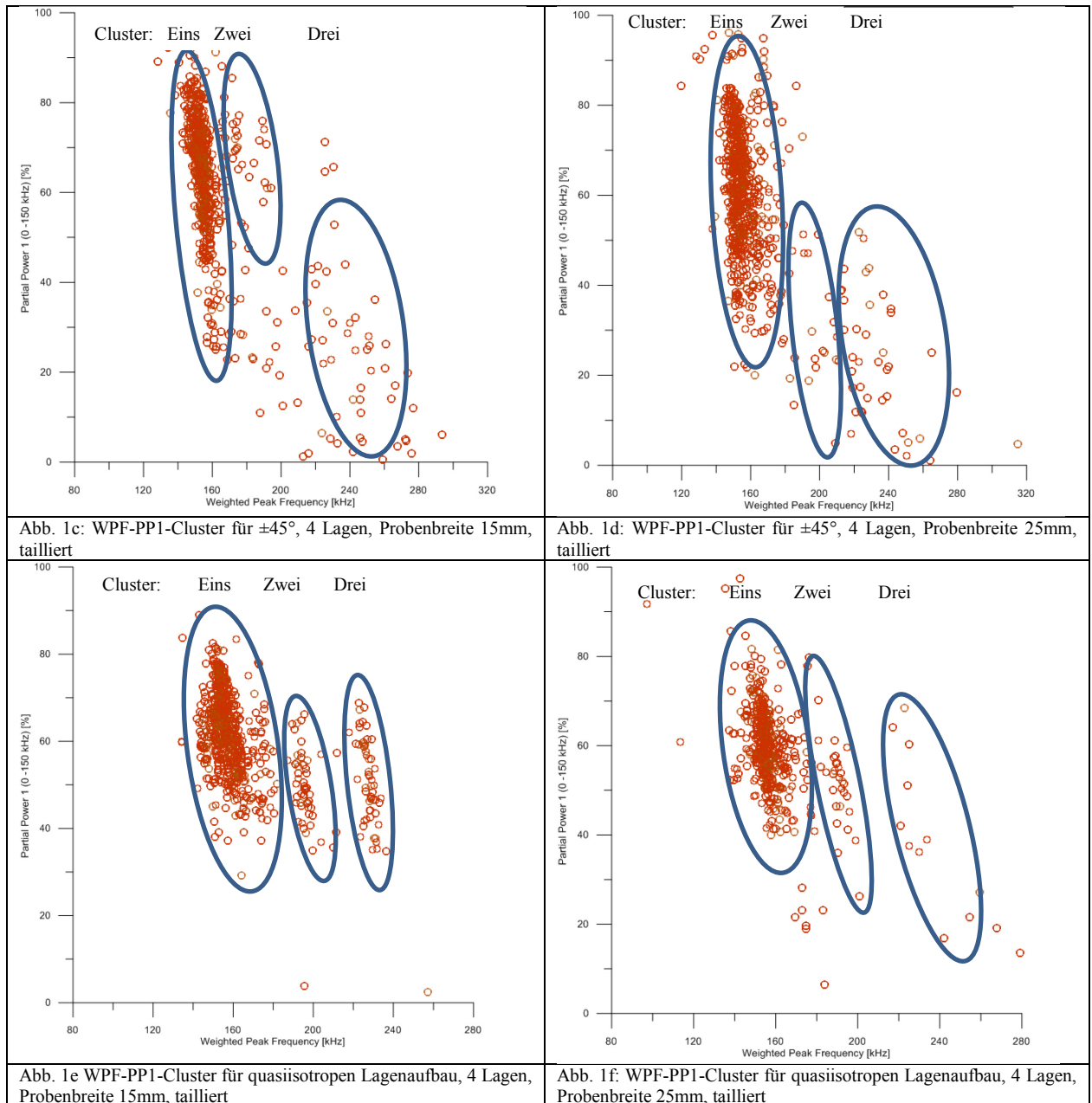
Einfluss der Probenbreite bei taillierten Proben

Bei den Versuchen an $0/90^\circ$ Proben ist zu erkennen, dass sich bei den schmalen taillierten Proben eine höhere Anzahl von Schallemissionssignalen detektieren lässt (Abbildung 1a). Es bilden sich drei Cluster aus, wobei das dritte Cluster bei den schmalen Proben nicht stark ausgeprägt ist. In Abbildung 1b hat sich kein drittes Cluster ausgebildet und somit fehlt in dieser Prüfkonfiguration das Cluster mit hoher gewichteter Vorzugsfrequenz, welches den faserdominierten Schadensmechanismen zugeordnet wird. Cluster Eins und Zwei sind hingegen gut voneinander getrennt erkennbar und in einem ähnlichen Bereich für die partielle Leistung I und der gewichteten Vorzugsfrequenz wie in Abbildung 1a. Eine mögliche Erklärung hierzu kann das bessere Verhältnis der Taillierung zur Gesamtbreite sein. Etwaige Dämpfungseffekte der Materialkombination könnten bei den schmalen Proben weniger zum

Tragen kommen. Bei einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau ist kaum ein Unterschied zu erkennen. So bilden sich in Abbildung 1c und Abbildung 1d das erste Cluster (matrixdominierte Schäden) im selben Bereich für die partielle Leistung₁ und der gewichteten Vorzugsfrequenz aus. Cluster Zwei, was für kombinierte Faser und Matrixschäden steht, ist hingegen schwach ausgeprägt und Cluster Drei zeigt bei beiden Varianten ab einer gewichteten Vorzugsfrequenz von ca. 220 kHz die faserdominierten Schädigungsmechanismen. Beim quasiisotropen Lagenaufbau, dargestellt in den Abbildungen 1e und 1f, werden die Cluster in allen Bereichen in der schmalen Probe deutlicher ausgebildet. Bei den breiten Proben überlappen Cluster Eins und Zwei und das dritte ist kaum zu erkennen. Das dritte Cluster bei den breiten Proben könnte tendenziell durch die Prüfung einer deutlich größeren Anzahl von Proben erzeugt werden. Das kaum vorhandene dritte Cluster in Abbildung 1f, könnte ähnlich wie in Abbildung 1b, mit dem schlechteren Verhältnis von Taillierung zu Gesamtbreite der Probe begründet sein. Die ersten zwei Cluster befinden sich jedoch bei den schmalen und breiten Proben in einem ähnlichen Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz und partiellen Leistung₁.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die schmalen Proben eine bessere Clusterauflösung liefern (besseres Verhältnis Taillierung zu Gesamtbreite der Probe). Die Proben mit einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau und die quasiisotropen Proben liegen im gleichen Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz- und partiellen Leistung₁. Die beste Clustertrennung war bei den schmalen, quasiisotropen Proben möglich. Die schmalen $0/90^\circ$ Proben zeigen bei gleicher gewichteter Vorzugsfrequenz niedrigere Werte der partiellen Leistung₁. Die Ursache ist noch nicht abschließend geklärt.





Einfluss der Probendicke durch Vergleich 4lagig – 6lagig

Ähnlich wie bei den Ergebnissen der Untersuchungsreihe mit unterschiedlichen Probenbreite werden für die $0/90^\circ$ Proben unterschiedlicher Dicke (Varianz der Lagenanzahl) die ersten zwei WPF-PP1-Cluster gut ausgebildet (Abbildung 2a und 2b). Die dickere Probe zeigt erwartungsgemäß mehr Schallemissionsaktivitäten. Bei beiden Varianten ist das dritte Cluster kaum ausgebildet. Dies ist speziell für die $0/90^\circ$ Proben noch nicht final geklärt. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich im zweiten Cluster für diesen Lagenaufbau bereits Faserbrüche manifestieren. Bei den $\pm 45^\circ$ Proben (dargestellt in Abbildung 2c und 2d), ist die Übereinstimmung der Schallemissionsergebnisse ebenso gegeben. Hier trat im Gegensatz zu den $0/90^\circ$ Proben mehr Schallemission bei den dünneren Proben auf. Dies führte zu einer deutlicheren Clusterausprägung. Der Grund für die erhöhte Schallemissionsaktivität bei dünneren Proben mit diesem Lagenaufbau ist noch nicht geklärt. Die Schallemissionsergebnisse der Messungen an quasiisotropen Proben in Abbildung 2e und Abbildung 2f zeigen bei der Varianz der Probendicke gleichermaßen eine gute Übereinstimmung der Schallemissionsergebnisse. Wie schon bei den $\pm 45^\circ$ Proben zeigen die dünneren Proben eine geringfügig bessere Ausprägung der WPF-PP1-Cluster, was mit einer

etwas höheren Anzahl der Schallemissionsereignisse je Cluster begründet werden kann. Was die partielle Leistung¹ angeht weisen die Schallemissionsergebnisse der quasiisotropen Proben die niedrigsten Werte auf. Trotz einer ähnlichen Bereichsausbildung der unterschiedlichen Cluster, sehen die grafisch dargestellten Schallemissionsergebnisse je nach Lagenaufbau sehr unterschiedlich aus. Hier lassen sich erstmals Schallemissionscharakteristika je nach Lagenaufbau erkennen.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Schallemissionsergebnisse bezüglich der Darstellung WPF-PP1-Darstellung unabhängig von der Anzahl der Lagen ist. Es bilden sich bei beiden Dickenvarianten je nach Lagenaufbau die-selben Cluster aus. Teilweise ist eine bessere Clusterausbildung bei den dünneren Proben zu erkennen, da sich die Schallemissionsereignisse bei einer höheren Lagenanzahl gegebenenfalls überlagern.

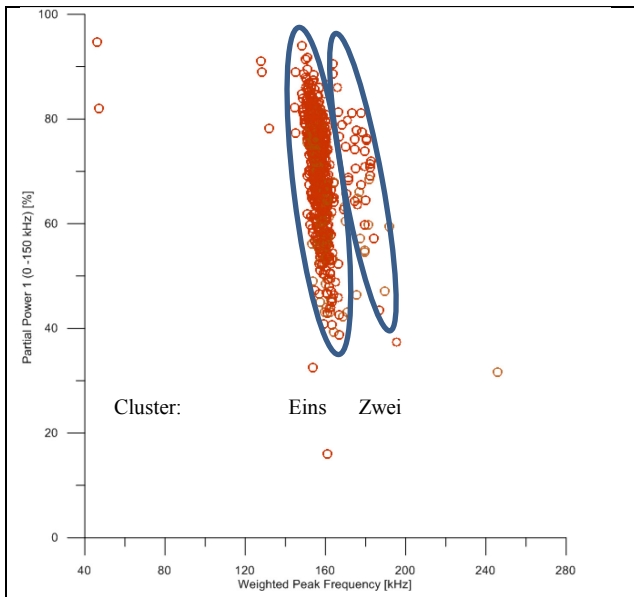


Abb. 2a: WPF-PP1-Cluster für 0/90°, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

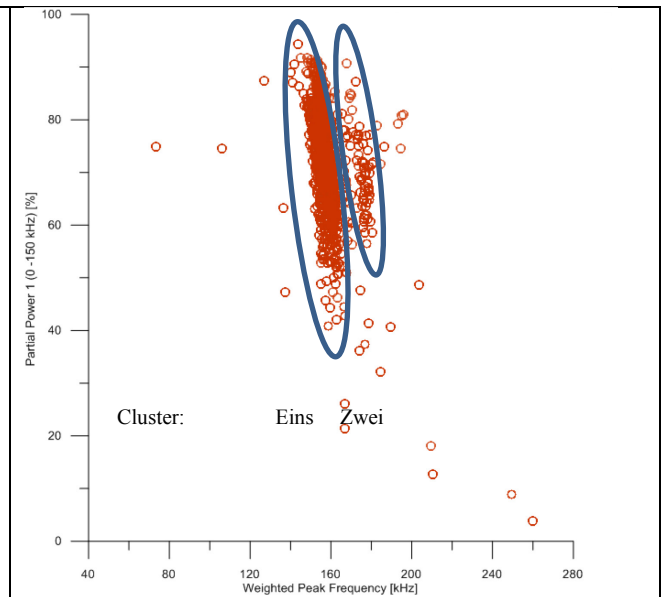


Abb. 2b: WPF-PP1-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

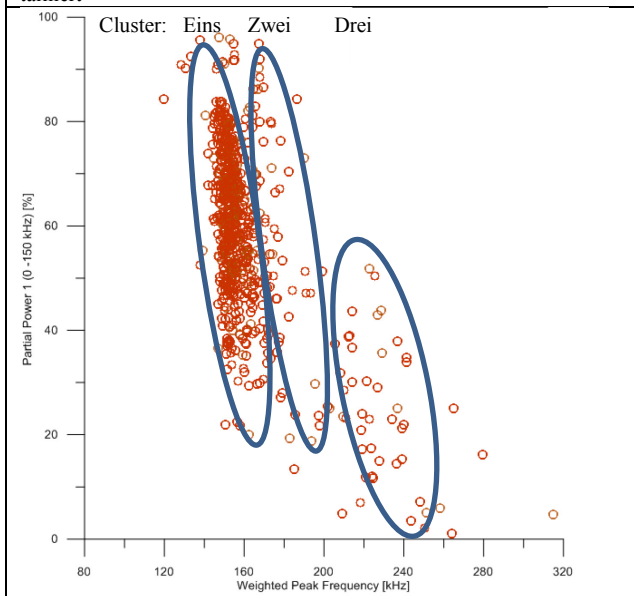


Abb. 2c: WPF-PP1-Cluster für ±45°, 4 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

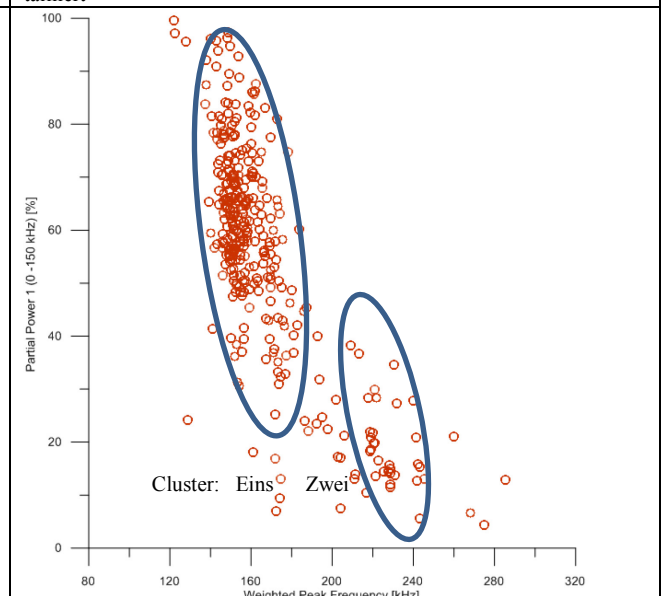
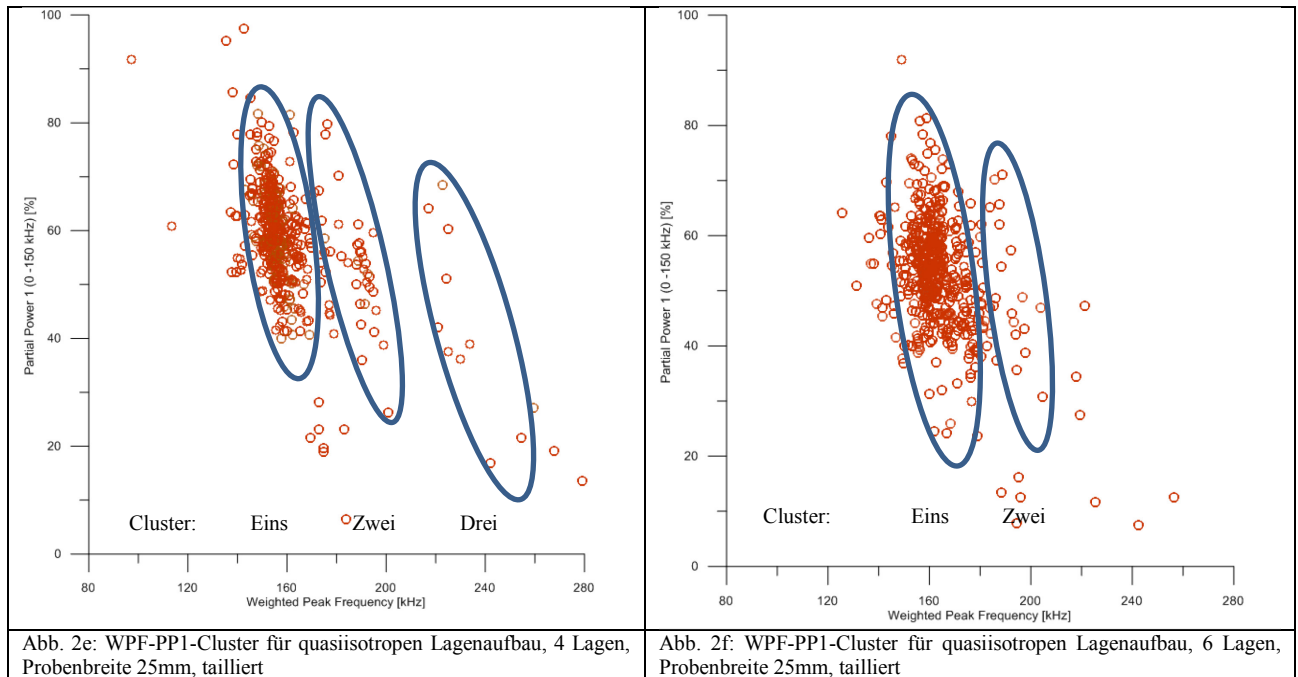


Abb. 2d: WPF-PP1-Cluster für ±45°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert



Einfluss der Taillierung auf Ergebnisse

In der für diese Ausarbeitung letzten Versuchsreihe werden die Schallemissionsergebnisse für 25 mm breite, 6-lagige Proben, eine Charge tailliert und eine Charge nicht tailliert denen an bereits diskutierten Lagenaufbauten gegenübergestellt. In Abbildung 3a und Abbildung 3b ist ein deutlicher Unterschied bei der Clusterausbreitung der 0/90° Proben zu erkennen. Wohingegen sich bei den taillierten Proben wieder nur zwei Cluster ausbilden (gleiche Probenspezifikation wie in Darstellung 2b -> gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachgewiesen), sieht man bei den nicht taillierten Proben gut getrennte drei Einzelcluster. Das Niveau der partiellen Leistung1 ist bei den nicht taillierten Proben niedriger als bei den taillierten, jedoch zeigt der hohe Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz bei den nicht taillierten Proben höhere Werte. Dies kann auf einen höheren Lasteintrag bei der Prüfung zurück-zu-führen sein. Hier wäre auch die durch die Geometrie (Taillierung) beeinflusste Dämpfung der Schallsignale im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abbildung 2b und Abbildung 3a weniger groß. Bei den ±45° Proben gibt es hinsichtlich der Clusterausbildung keine gravierenden Unterschiede. Wie in Abbildung 3c und Abbildung 3d zu erkennen ist, lässt sich jeweils das bei hohen Frequenzen ausgebildete Cluster Drei gut von den ersten beiden Clustern trennen. Die Unterscheidung des Clusters Eins bei niedrigeren WPF-Werten zu Cluster Zwei ist hingegen schwer möglich. Wie bereits bei den Ergebnissen der 0/90° Proben bekannt, emittieren die nicht taillierten Proben mehr Schallsignale und das dritte Cluster bildet sich deutlicher aus (Abbildung 3d). Auffällig ist ebenfalls die Häufung der Schallemissionen im oberen Bereich der partiellen Leistung 1. Dies könnte ein Indiz für Delaminationen speziell bei Proben mit einem ±45° Lagenaufbau sein. Darstellung 3e zeigt für einen quasiisotropen, taillierten Lagenaufbau keine deutliche Clusterausprägung, ähnlich zur Darstellung 2e, die Proben mit zwei Lagen weniger zuzuordnen ist. Bei den nicht taillierten Proben mit der-selben Spezifikation in Abbildung 2f hingegen sind alle drei Cluster gut ausgebildet. Ebenso wie bei den zuvor dargestellten Ergebnissen ist das Niveau der partiellen Leistung1 bei den quasiisotropen Lagenaufbauten auch bei der taillierten und nicht taillierten Variante niedriger als beim 0/90° und ±45° Lagenaufbau.

Beim Vergleich tailliert zu nicht tailliert zeigen diese Ergebnisse, dass die Versuchsergebnisse an nicht taillierten Proben die Cluster besser ausbilden. Dies liegt an der größeren Anzahl von Schallemissionsereignissen, wird aber mit einer flächigen Verteilung der Schallemissionsereignisse auf der gesamten Probenlänge erkauft. Die 0/90° Proben und

$\pm 45^\circ$ Proben zeigen für die taillierte und nicht taillierte Probenvariante ähnliche Ergebnisse. Zusätzlich zeigen die $\pm 45^\circ$ Proben eine Häufung im oberen Bereich der partiellen Leistung 1. Wie bereits erwähnt, kann dies ein Hinweis auf Delaminationen sein. Darüber hinaus zeigen $\pm 45^\circ$ Proben auch Schallemissionen im höheren Bereich der gewichteten Vorzugsfrequenz, die auf Faserrisse hindeuten. Da dies nicht direkt zu erwarten war, gilt es zu klären, ob hier die hochfrequenten Anteile auf ein Faser-Matrix-Mischversagen wie beispielsweise Faserauszug zurückzuführen ist.

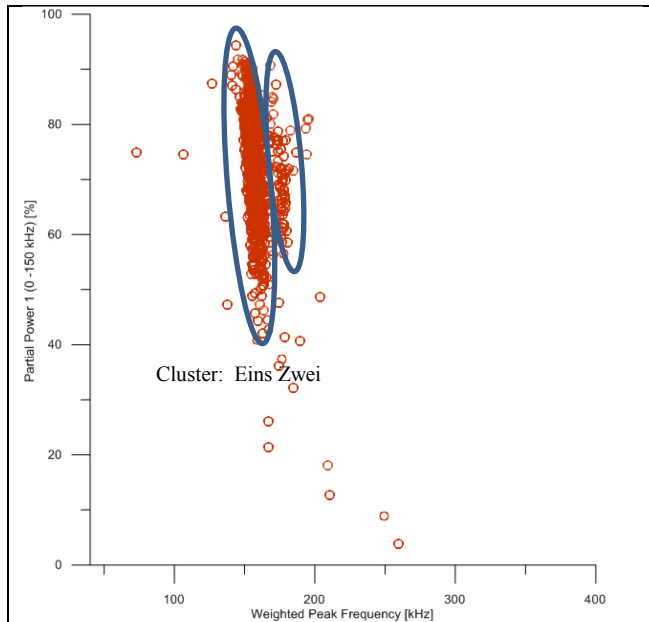


Abb. 3a: WPF-PP1-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

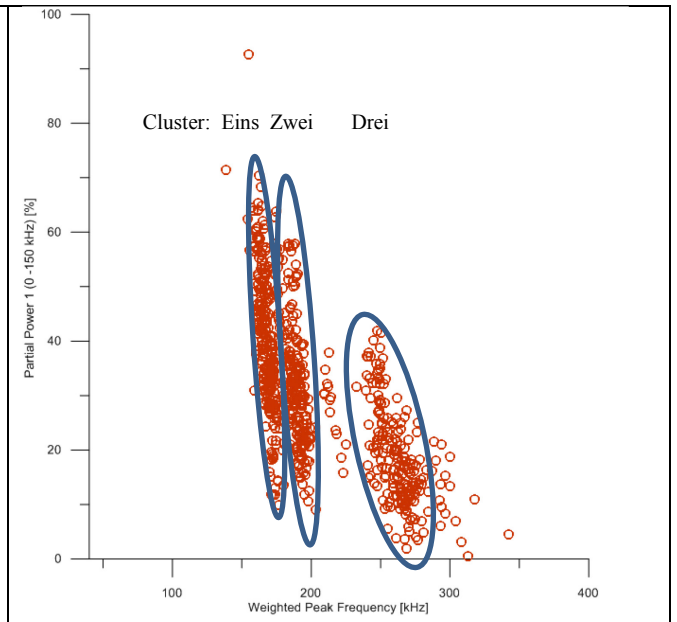


Abb. 3b: WPF-PP1-Cluster für 0/90°, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, nicht-tailliert

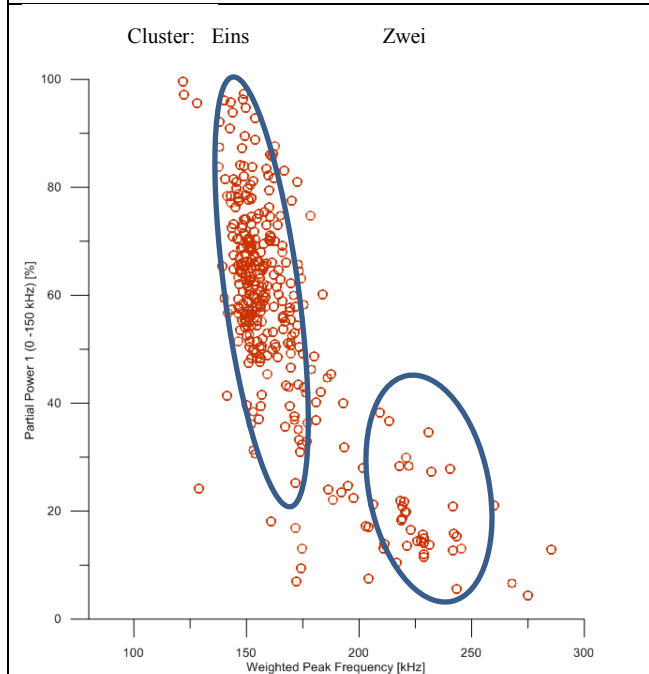


Abb. 3c: WPF-PP1-Cluster für $\pm 45^\circ$, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, tailliert

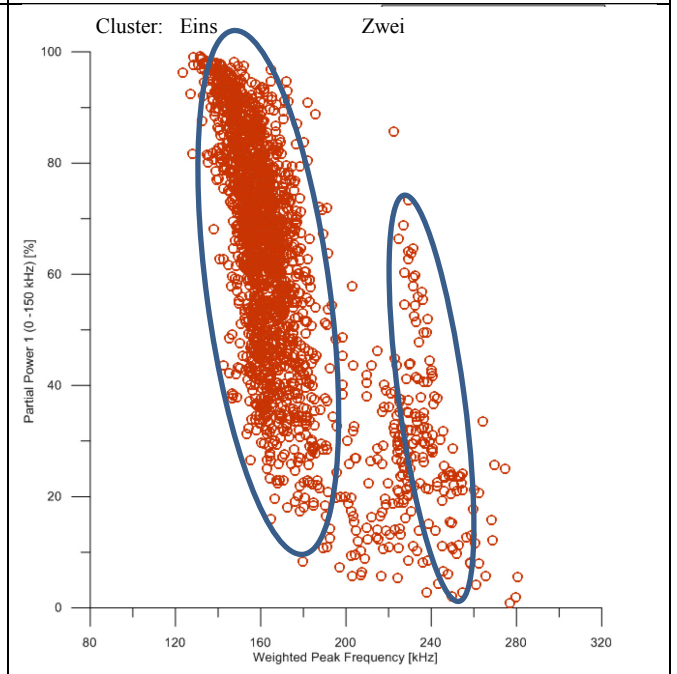
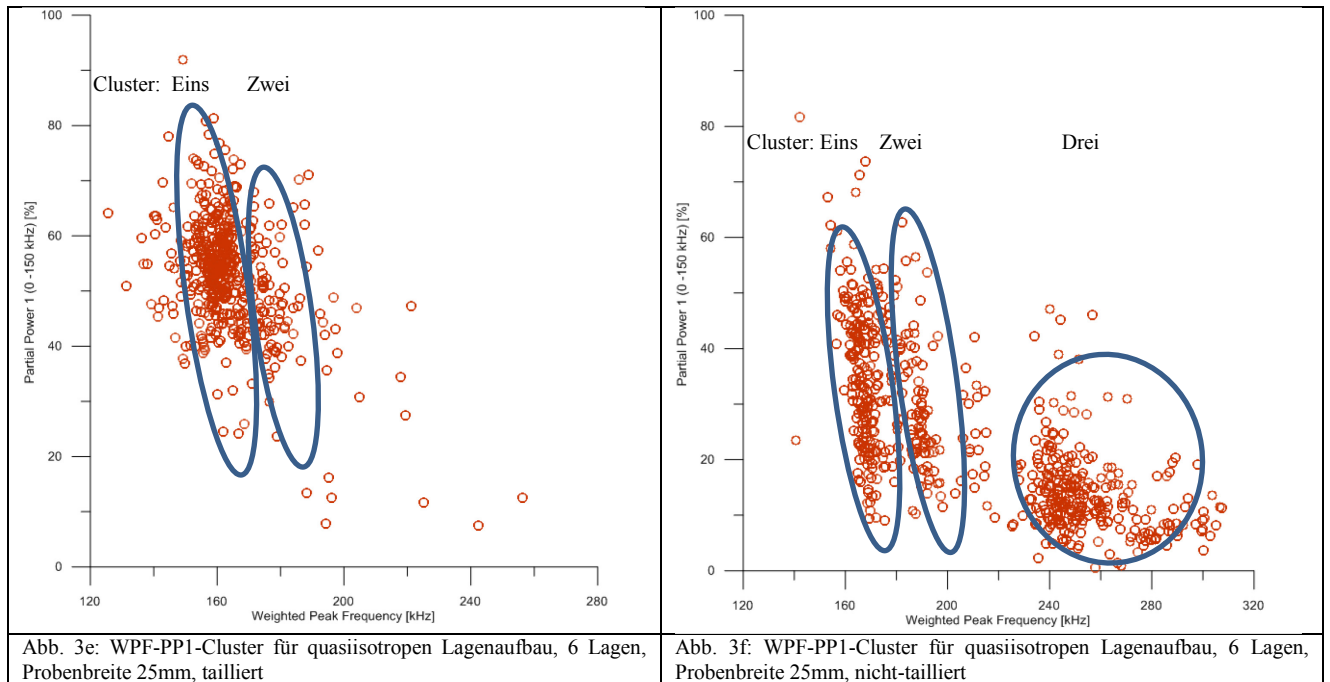


Abb. 3d: WPF-PP1-Cluster für $\pm 45^\circ$, 6 Lagen, Probenbreite 25mm, nicht-tailliert



Zusammenfassung und Ausblick

Sofern die Proben tailliert ausgeführt waren, zeigen die Ergebnisse der linearen Ortung eine starke Häufung in eben diesem Bereich. Dies ist für weiterführende, nicht zerstörende Tests, eine wichtige Voraussetzung, um durch zusätzliche, hochauflösende Untersuchungen bestimmte Vorschädigungsmechanismen zu identifizieren. Mit dem Ziel, geeignete Probengeometrien und Prüfscenarien zur Ermittlung der materialspezifischen Schallemissionen bei unterschiedlichen Schädigungsmechanismen in Faserverbundwerkstoffen zu definieren, bieten die diskutierten Ergebnisse folgende Erkenntnisse:

Bei der Anregung bestimmter Schädigungsmechanismen müssen der Lagenaufbau, die Probenbreite, und die Taillierung der Proben für Zugversuche in Betracht gezogen werden. So eignen sich beispielsweise asymmetrisch zu den Sensorpositionen taillierte, schmale Proben mit einem dünnen $0/90^\circ$ Lagenaufbau für die Detektion von matrixdominierten Versagensmechanismen. Speziell mit einem zyklischen Prüfregime lassen sich die Rissöffnung und das Risswachstum gut erfassen. Mehrlagige Lagenaufbauten mit einem $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau in einer nicht taillierten Ausführung rufen eher Delaminationen hervor. Darüberhinaus sind an Proben mit einem mehrlagigen, nicht taillierten quasiisotropen Lagenaufbau Faserrisse zu provozieren, die in der WPF-PP1-Darstellung als eigenes gut ausgebildetes Cluster mit höher gewichteten Vorzugsfrequenzen zu erkennen, sind. Die deutlichste Clustertrennung ergab sich in der diskutierten Versuchsreihe an 4-lagigen, dünnen, schmalen taillierten Proben. In diesem Fall wurden durch das gewählte Prüfregime alle Schädigungsmechanismen, denen spezifische Cluster im WPF-PP1-Raum zuzuordnen sind erfasst. Hervorzuheben ist an dieser Stelle, dass sich unabhängig von der gewählten Probenkonfiguration, die den spezifischen Schadensmechanismen zuordenbaren Cluster, immer in den selben Bereichen der WPF-PP1-Darstellung ausbilden. Dies ist als eine Qualifizierung der angewandten Messtechnik und Auswertelgorithmen für Prüfung von Proben aus Faserverbundwerkstoffen zu sehen. Für zukünftige Untersuchungen sind hochauflösende, zerstörungsfreie Prüfverfahren an vorgeschädigten Proben zu empfehlen. Die bildgebende Tomographie könnte weitere Erkenntnisse zum Schädigungsgrad und der Zuordnung der gewichteten Vorzugsfrequenz zu den Schädigungsarten geben.

Literatur

- [1] Hönig, U.: Diplomarbeit „Erstellung eines Anforderungsprofils an Referenzversuchen zur Ermittlung und Bewertung von unterschiedlichen Schadensmechanismen in Faserverbunden mittels Schallemissionsanalyse“, 03/2016
- [2] Vallen, H.: Schallemissionsprüfung, Castell-Verlag GmbH Wuppertal, 2005
- [3] Sause, M. G. R.: Identification of failure mechanisms in hybrid materials utilizing pattern recognition techniques applied to acoustic emission signals, Dissertation, 2010, Universität Augsburg
- [4] Rowland, C.: Acoustic emission technique to assist the formula one designer in structural design, European Working Group on Acoustic Emission (EWGAE), 2004
- [5] Bohse, J., Chen, J.: Acoustic emission examination of Mode I, Mode II and mixed mode I/II interlaminar fracture of unidirectional fiber reinforced polymers, Journal of Acoustic Emission Vol. 19, S.1-10, 2001
- [6] de Groot, P. J., Wijnen, P. A. M., Janssen, R. B. F.: Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites, Composites Science and Technology Vol. 55, 1995
- [7] Ni, Q.-Q., Iwamoto, M.: Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites, Engineering Fracture Mechanics Vol. 69, 2002
- [8] Eaton, M., Holford, K., Featherston, C., Pullin, R.: Damage in carbon fibre composites: The discrimination of acoustic signals using frequency, Journal of Acoustic Emission Vol. 25, S. 140-148, 2007
- [9] Bohse, J.: Schallemission von verstärkten Polymeren, 14. Kolloquium Schallemission, Berlin, Vortrag 7, 2003, DGZfP Berichtsband
- [10] Sause, M. G. R., Schultheiß, D., Horn, S.: Acoustic emission investigation of coating fracture and delamination in hybrid carbon fiber reinforced plastic structures, Journal of Acoustic Emission Vol. 26, S. 1-13, 2008
- [11] Sause, M. G. R., Horn, S.: Influence of Specimen Geometry on Acoustic Emission Signals in Fiber Reinforced Composites: FEM-Simulations and Experiments, European Working Group on Acoustic Emission, Wien, Vortrag 3, 2010
- [12] Hönig, U., Holder, U., Pietzsch, A., Schulze, E., Frankenstein, B., Schubert, L.: Definition of requirements for reference experiments to determine and evaluate various damage mechanisms in fibre composites by acoustic emission, 19th World Conference on Non Destructive Testing, München, Paper, 2016