



Vergleich von Messsystemen zur Schallemissionsprüfung von Faserverbundwerkstoffen

Markus SAUSE¹, Stefan SCHMITT¹, Horst TRATTNIG², Daniel ALTMANN²,
Alexander PIETZSCH³, Mareike STEPHAN³, Lars SCHUBERT³

¹ Universität Augsburg, 86135 Augsburg

² Vallen Systeme GmbH, 82057 Icking

³ Fraunhofer IKTS, 01109 Dresden

Kontakt E-Mail: markus.sause@mrm.uni-augsburg.de

Kurzfassung. Im Rahmen eines Ringversuches zur Schallemissionsanalyse bei faserverstärkten Kunststoffen wurden drei verschiedene Messketten miteinander verglichen. Zum Einsatz kamen ein Express-8 System mit 2/4/6 Vorverstärkern und WD Sensoren (alle Mistras Group), ein AMSY-6 mit AEP3N Vorverstärkern und VS150-M Sensoren (alle Vallen Systeme), sowie ein Mehrkanaliges Akustisches System (MAS2) mit PreAmp MCE 6.3 Vorverstärkern und Sensoren vom Typ KAR 601 S (alle Fraunhofer IKTS). In der ersten Messreihe wurden jeweils 10 identische Zugprüfkörper mit einem quasi-isotropen Lagenaufbau mit jeweils einer Messkette instrumentiert. In der zweiten Messreihe wurden gleichzeitig alle drei Messketten auf insgesamt drei skalierten Zugprüfkörpern instrumentiert. In allen Fällen wurden neben dem Spannungs-Dehnungsverlauf der Prüfkörper auch die gesamten Rohdaten (extrahierte Signalparameter und getriggerte Wellen) abgespeichert. Anschließend wurden die Daten der einzelnen Messketten jeweils mit ihrem zugehörigen Softwarepaket (AEwin, VisualAE, AETools) ausgewertet und unabhängig davon alle gemeinsam in der MATLAB basierten Software AEToolbox. Dieser Beitrag diskutiert die Auswirkungen der verschiedenen Instrumentierungsvarianten hinsichtlich der aufgezeichneten Signale (Bandbreiteneffekte, Empfindlichkeit, etc.) und vergleicht die erhaltenen Ergebnisse.

1. Einführung

Zur Untersuchung des Versagensverhaltens von faserverstärkten Kunststoffen wird die Schallemissionsprüfung bereits seit vielen Jahrzehnten verwendet [1], [2]. Im Rahmen der Arbeit internationaler Normungskomitees wurden bereits zahlreiche Standards als Handlungsanweisung für die Prüfung erarbeitet. Hierbei kommen vielfach Bewertungskriterien zum Einsatz, die auf Basis der aufgezeichneten Schallemissionssignale berechnet werden. Für eine zuverlässige Prüfung ist daher die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Messsysteme von entscheidender Bedeutung.

Hierfür muss insbesondere die Empfindlichkeit der verwendeten Sensorik, die Bandbereichslimitierung der Messkette und die teilweise unterschiedlichen Aufzeichnungs- und Triggerkonzepte berücksichtigt werden. Während beispielsweise in [2] der Einfluss der Sensorwahl bei gleichem Aufzeichnungskonzept (d.h. gleichem Transientenrekorder und Triggerkonzept) dargestellt ist, soll im Rahmen dieses Beitrags die Vergleichbarkeit von drei



verschiedenen Messketten inklusive ihrer Transientenrekorder und Aufzeichnungssoftware verglichen werden.

Zur Evaluierung der Effekte wurde eine Studie in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Teil wurden mit jeder Messkette je 10 Zugprüfkörper aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) begleitet. Dies soll insbesondere dem statistischen Vergleich der Signalerfassung der Messketten dienen. Im zweiten Teil der Studie wurden Proben aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) mit allen drei Messketten gleichzeitig instrumentiert. Dies erlaubt die direkte Vergleichbarkeit der aufgezeichneten Schallemissionssignale der Messketten zueinander.

2. Messtechnik und Versuchsaufbau

2.1 Studie 1 - unabhängige Instrumentierung

In diesem Teil der Studie wurden Messungen an CFK Proben gemäß DIN EN ISO 527-4 mit quasi-isotropen Lagenaufbau und den nominellen Abmessungen 250 mm × 15 mm × 2 mm (Länge × Breite × Dicke) durchgeführt. Die Sensoren jeder Messkette wurden gemäß der Darstellung in Abb. 1 an der Probe befestigt. Der nominelle Sensorabstand beträgt 100 mm. Zur Unterscheidung der Wellenmoden (symmetrisch, antisymmetrisch) wurde jeweils ein Sensorpaar auf gegenüberliegenden Seiten der Probe appliziert. Auf der rechten Seite in Abb. 1 ist das Bruchbild einer Beispielprobe inklusive der Instrumentierung gezeigt. Zum Einsatz kamen ein Express-8 System mit 2/4/6 Vorverstärkern und WD Sensoren (alle vom Hersteller Mistras Group), ein AMSY-6 mit AEP3N Vorverstärkern und VS150-M Sensoren (alle vom Hersteller Vallen Systeme), sowie ein Mehrkanaliges akustisches System (MAS2) mit PreAmp MCE 6.3 Vorverstärkern und Sensoren vom Typ KAR 601 S (alle vom Hersteller Fraunhofer IKTS). Für jede Messkette wurden insgesamt 10 Proben geprüft. Die Aufzeichnung erfolgte mit der Software AEwin™ (Mistras Group), VisualAE (Vallen Systeme) und AETools (Fraunhofer IKTS). Im Folgenden werden diese drei Messketten als „Mistras“, „Vallen“ und „IKTS“ bezeichnet. Die Aufzeichnungseinstellungen sind in Tab. 1 zusammengefasst.

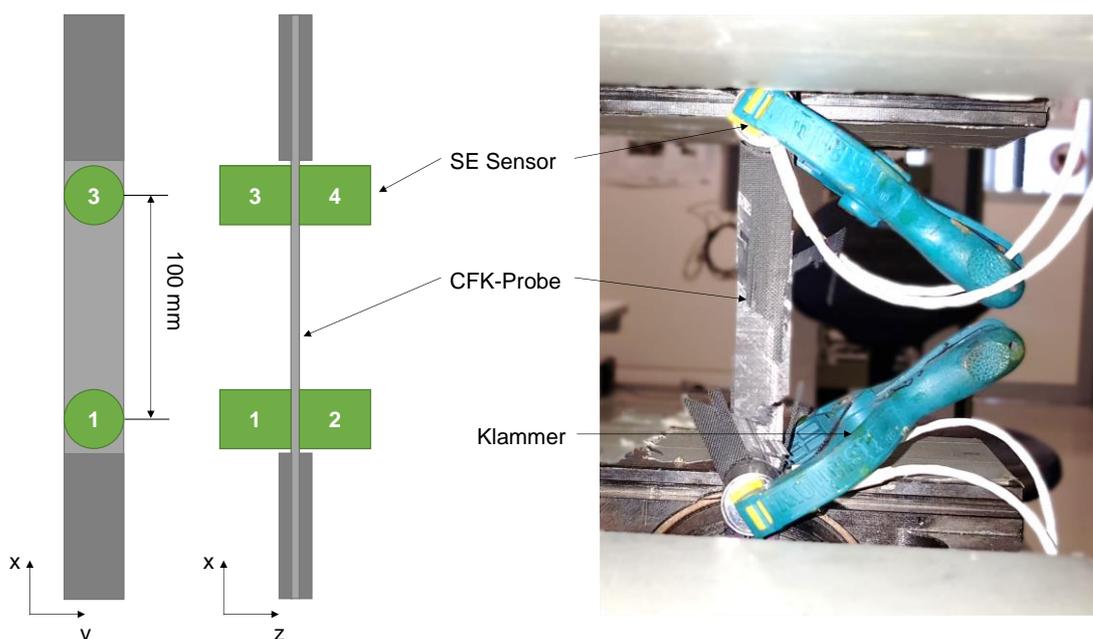


Abb. 1. Schema der Instrumentierung (links) und Beispielbild des Versuchsaufbaus (rechts).

2.2 Studie 2 - gemeinsame Instrumentierung

Im zweiten Teil der Studie wurden insgesamt drei GFK-Proben mit $\pm 45^\circ$ Lagenaufbau gemessen. Hierzu wurden breitere Proben verwendet als in der DIN-EN-ISO 527-4 vorgesehen, um die Sensoren aller drei Messketten gleichzeitig auf dem Prüfkörper zu applizieren. Die nominelle Abmessung der Prüfkörper beträgt daher $260 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 1,4 \text{ mm}$ (Länge \times Breite \times Dicke). Die Instrumentierung ist in Abb. 2 dargestellt und folgt der Vorgehensweise der Instrumentierung aus dem ersten Teil der Studie. Wie in der Fotografie in Abb. 2 dargestellt, wurden alle drei Messketten mit entsprechenden Klammersystemen befestigt, um eine gegenüberliegende Positionierung baugleicher Sensoren zu erlauben. Dem Farbcode in der Abbildung entsprechend wurden die drei Messketten von links nach rechts auf der Probe positioniert, um eine möglichst gleichwertige Positionierung zum Prüfbereich zu ermöglichen. Die Auswahl der Sensoren, Vorverstärker und Messsysteme entsprechen dem ersten Teil der Studie, die Aufzeichnungseinstellungen finden sich in Tab. 1. Die Belastung des Prüfkörpers erfolgt durch Laststeigerungsversuche mit vollständiger Entlastung.

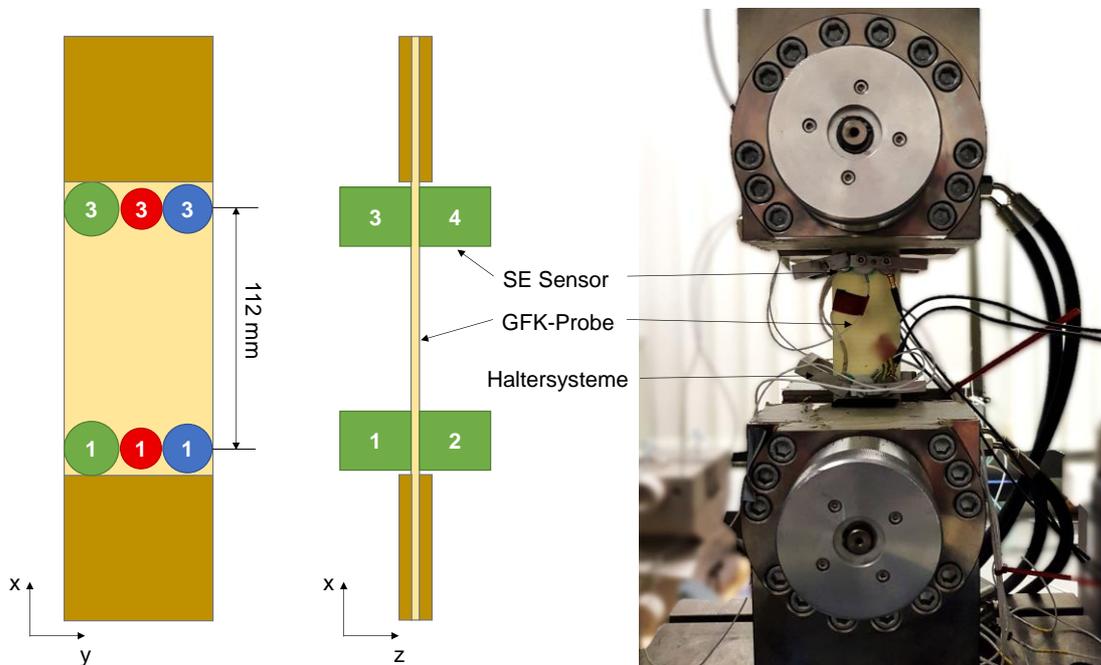


Abb. 2. Schema der Instrumentierung der VS150-M Sensoren (grün), KAR 601 S Sensoren (rot) und WD Sensoren (blau) und Beispielbild des Versuchsaufbaus (rechts).

3. Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei verschiedenen Messketten hinsichtlich verschiedener Faktoren diskutiert. Hierzu wird zunächst auf die Sensitivität eingegangen. Im Anschluss erfolgen eine Diskussion der Quellortung und der Frequenzcharakteristik der Signale.

3.1 Sensitivität der verschiedenen Messketten

Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden die Daten aller drei Messketten innerhalb der auf MATLAB basierten Software AEToolbox (Revision 2.11) ausgewertet. In Abb. 3-links ist der Vergleich der Rohdaten der drei Messketten aus Studie 1 dargestellt.

Hierzu wurden der Mittelwert und die Standardabweichung der detektierten Signale berechnet. Bereits hier wird deutlich, dass die drei Messketten eine deutlich andere Anzahl an Signalen detektieren. Während die Messketten „Mistras“ und „Vallen“ noch in ihrer Größenordnung übereinstimmen, zeichnet sich bei der Messkette „IKTS“ eine deutlich geringere Signalanzahl ab. Dies liegt zum Großteil an dem verwendeten Aufzeichnungskonzept der Messkette „IKTS“. Anders als bei den Messketten „Mistras“ und „Vallen“ wird ein abweichendes Triggerkonzept angewendet, welches auf der Berechnung eines Langzeit- und eines Kurzzeit-Effektivwertes (RMS) basiert. Entsprechend wird in der Messkette „IKTS“ nicht bei jedem Überschreiten eines voreingestellten Schwellwertes getriggert, sondern bei Erfüllung einer speziellen Triggerbedingung. Dieses Triggerkonzept zeichnet sich durch seine Langzeitstabilität aus und hat sich bei der Untersuchung von Großstrukturen z.B. im Rahmen von Ermüdungstests an Rotorblättern von Windkraftanlagen bewährt. Für die Beurteilung von beginnenden Schäden werden Änderungen der Statistik der Ereignisse und ihrer Parameter in Bezug zur Belastung herangezogen, sodass eine reduzierte Ereignisanzahl toleriert werden kann.

Tab. 1. Zusammenfassung der Aufzeichnungseinstellungen

	Messkette „Mistras“	Messkette „Vallen“	Messkette „IKTS“
Studie 1	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: AEwin Messsystem: Xpress-8 10 MSP/s Abtastrate 10/80/300 (PDT/HDT/HLT) 35dB_{AE} Schwellwert 40dB Vorverstärkung Bandpass 20 kHz – 1200 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: AESuite Messsystem: AMSY-6 10 MSP/s Abtastrate 300/300 (DDT/RAT) 34dB_{AE} Schwellwert 34dB Vorverstärkung Bandpass 20kHz-500 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: CANWARE Messsystem: MAS2 (interne Verstärkung 8 dB) 6.25 MSP/s Abtastrate 327/4915 (PreTrig/PostTrig) RMS Trigger 46dB_{AE} Vorverstärkung Bandpass 10 kHz – 500 kHz
Studie 2	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: AEwin Messsystem: Xpress-8 10 MSP/s Abtastrate 10/80/300 (PDT/HDT/HLT) 35dB_{AE} Schwellwert 40dB Vorverstärkung Bandpass 20 kHz – 1200 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: AESuite Messsystem: AMSY-6 10 MSP/s Abtastrate 300/300 (DDT/RAT) 34dB_{AE} Schwellwert 34dB Vorverstärkung Bandpass 20 kHz-1100 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Messsoftware: CANWARE Messsystem: MAS2 (interne Verstärkung 8 dB) 6.25 MSP/s Abtastrate 327/4915 (PreTrig/PostTrig) RMS Trigger 46dB_{AE} Vorverstärkung Bandpass 10 kHz – 500 kHz

Um die drei Messketten besser vergleichbar zu machen, wurden die Signale aller Messketten mit einem Δt -Filter reduziert. Hierzu wurde zunächst jeweils ein Signalpaar entlang der Längsachse der Prüfkörper (z.B. Kanal 1 und Kanal 3, s. Abb. 1) gewählt und alle Signale gelöscht, welche nicht innerhalb eines Zeitfensters von $\pm 20 \mu\text{s}$ einen Ersteinsatz an allen vier Kanälen aufweisen. Zusätzlich wurde eine Totzeit nach dem Event von $300 \mu\text{s}$ gewählt um eine doppelte Zählung von Echos zu vermeiden. Dies reduziert die Gesamtsignalanzahl erheblich, führt aber grundsätzlich zu einer besseren Vergleichbarkeit der aufgezeichneten Daten, da somit Schallemissionsquellen aus dem Einspannbereich ausgeschlossen werden. Hier zeigt sich insbesondere die Auswirkung der höheren Sensitivität des resonanten Sensor VS150-M innerhalb der Messkette „Vallen“. Im Vergleich dazu liegt die Anzahl der mit den beiden anderen Messketten mit ihren breitbandigeren Sensorsystemen aufgezeichneten Signale deutlich darunter.

In Abb. 3-rechts ist die Zunahme der Schallemissionssignale für eine Beispielprobe aus Studie 2 gezeigt. Auch hier bildet sich die unterschiedliche Sensitivität der drei Messketten ab. Das Auftreten der Schallemissionssignale geschieht zu vergleichbaren Zeitpunkten, allerdings mit unterschiedlicher Zuwachsrate.

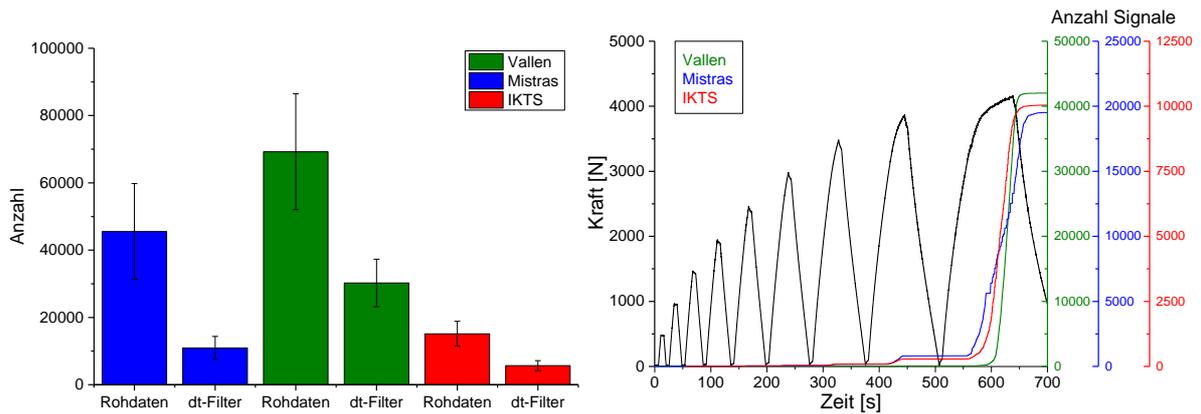


Abb. 3. Vergleich der Signalanzahl der Rohdaten (2 Kanäle) und nach einer Δt -Filterung mit $\pm 20 \mu\text{s}$ aus Studie 1 (links) und Kraft-Zeit-Verlauf mit kumulierter Signalanzahl für eine Probe aus Studie 2 (rechts).

In der Abb. 4 ist die Amplitudenverteilung der drei Messketten für dieselbe Beispielprobe aus der Studie 2 dargestellt. Trotz der gemeinsamen Instrumentierung auf einem Prüfkörper – und damit der exakt gleichen Schallemissionsquellen – unterscheiden sich die drei Histogramme deutlich. Analog der Studie 1 zeichnet sich ein deutlicher Unterschied in der Anzahl der Signale ab. Der beobachtete Trend entspricht dabei den Ergebnissen aus Studie 1. Weiterhin wurden die Rohdaten erneut mit einem Δt -Filter reduziert. In diesem Beispiel gleichen sich die Absolutwerte der beiden Messketten „Mistras“ und „Vallen“ deutlich an, es bleibt aber dennoch ein Faktor zwei bis drei Unterschied zu der Messkette „IKTS“. Die Verteilung der gemessenen Signalamplituden ist allerdings vor und nach dem Δt -Filter gut vergleichbar. Bedingt durch den Δt -Filter werden insbesondere Signale mit geringer Amplitude gefiltert, da bei diesen die Bestimmung der Erstankunftszeit im Mittel deutlich ungenauer ist als bei Signalen mit höheren Amplituden. Entsprechend kommt es zu einer Verschiebung des Schwerpunkts der Verteilung weg vom Schwellwertbereich ($\sim 35 \text{ dB}_{\text{AE}}$) hin zu höheren Amplituden ($42 \text{ dB}_{\text{AE}} - 46 \text{ dB}_{\text{AE}}$).

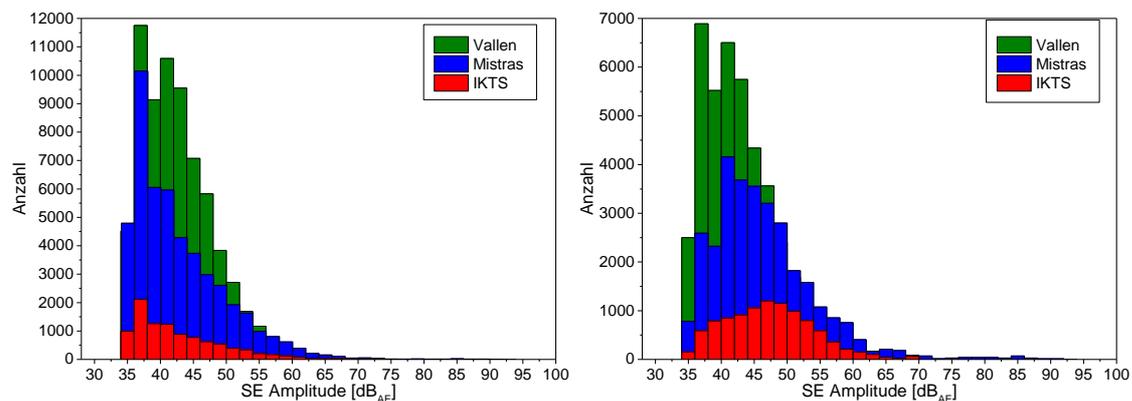


Abb. 4. Vergleich der gemessenen Amplitudenverteilung der Rohdaten (links) und nach einer Δt -Filterung mit $\pm 20 \mu\text{s}$ (rechts).

3.2 Signalortung

Neben der Aufzeichnung der Signale spielt die Ortung von Signalquellen bei der Bewertung von Faserverbundstrukturen eine wichtige Rolle. Auch wenn die Schallgeschwindigkeit für Faserverbundwerkstoffe im Allgemeinen anisotrop und modenspezifisch ist, kann für die hier vorliegenden Prüfkörper aufgrund des quasi-isotropen Lageraufbaus und der ausgeprägten Längsachse ein 1D-Ortungsansatz mit einer Schallgeschwindigkeit von

3500 m/s im Falle der GFK-Proben genutzt werden. Für die Berechnung der Ortungsergebnisse wurde für alle Softwareprogramme eine Gruppierung zu Ereignissen auf Basis eines Δt -Bereiches von $\pm 20 \mu\text{s}$ und $300 \mu\text{s}$ Totzeit genutzt. Für den ersten Teil der Untersuchung wurde mittels der Software AEToolbox, Rev. 2.11 eine lineare Ortung auf Basis der Laufzeitdifferenz bestimmt durch das Akaike-Information-Criterion berechnet [3]. In Abb. 5 ist das Ergebnis der Ortung als Projektion auf den Prüfkörper dargestellt. Der Prüfbereich wurde entlang der Längsachse in 400 Zonen eingeteilt und die Anzahldichte der Ortungsereignisse farbcodiert dargestellt. Eine rote Färbung entspricht dabei einer hohen Anzahl an georteten Schallemissionsquellen, eine blaue Färbung einer niedrigen Anzahl. Bereiche ohne Ortungsergebnis sind in grau dargestellt. Ein Vergleich der Ortungsergebnisse der drei Messketten zeigt grundsätzlich eine Häufung der Lage der Signalquellen im Prüfbereich der Probe. Die Lage der Positionen mit höchster Signalanzahl ist jedoch für jede der drei Messketten individuell. Dies liegt sicher teilweise an der unterschiedlichen Anzahl von aufgezeichneten Signalen, welche eine ungleichwertige Anzahl von gruppierten Ereignissen zur Folge hat.

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden die Rohdaten von den jeweils gerätespezifischen Softwarepaketen erneut gruppiert und die Signalquellen mit den jeweiligen Algorithmen geortet. Für die Messkette „Vallen“ ist dies die Software VisualAE, für die Messkette „Mistras“ die Software Noesis und für die Messkette „IKTS“ die Software AETools. In allen Fällen werden die Signalquellen ebenfalls im Prüfbereich geortet. Die Lage der Positionen mit höchster Signalanzahl ist allerdings wiederum spezifisch für jede Messkette. Bedingt durch die unterschiedliche Anzahl an gruppierten Ereignissen und den verschiedenen verwendeten Algorithmen ist dies allerdings ebenfalls zu erwarten.

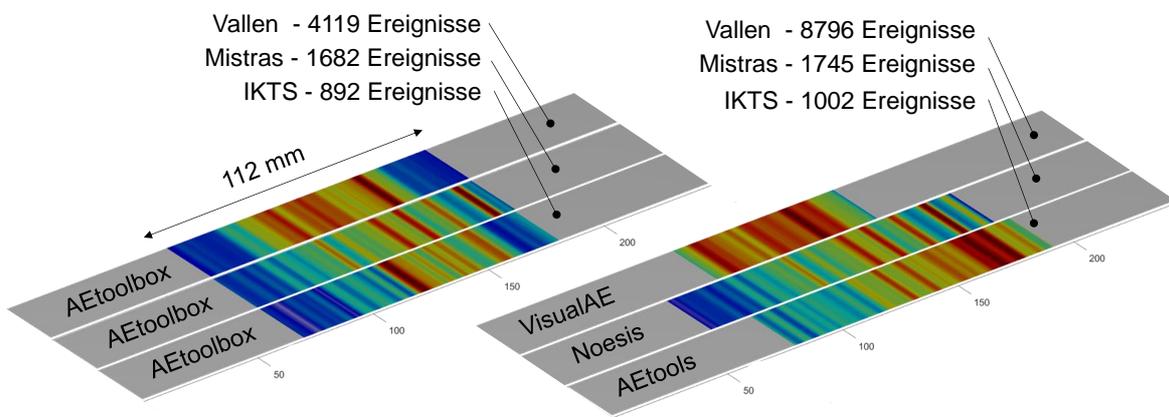


Abb. 5. Vergleich der Quellortungsergebnisse für eine Beispielprobe aus Studie 2.

3.3 Bandbreite und Frequenzcharakteristik

Für die Bewertung des Ursprungs von Signalquellen und der Signalklassifizierung kommen in Faserverbundwerkstoffen vermehrt frequenzbasierte Parameter zum Einsatz. Zum Vergleich der drei Messketten wurden auf Basis der Signalamplitude und des Zeitpunktes des Auftretens Signale gleichen Ursprungs gruppiert. In Abb. 6 ist eine Gegenüberstellung für zwei Beispiele dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Signalamplituden aufgrund der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Messketten deutlich zueinander abweichen, aber die Wellenzüge im Beispiel von Abb. 6-a gut vergleichbar sind. Dennoch ist im hochfrequenten Anfangsbereich ein Unterschied der beiden Signale der Messkette „Mistras“ und „Vallen“ ersichtlich. Dieser wird umso deutlicher, wenn ein Beispielsignal herangezogen wird, dessen Quelle eine höhere Bandbreite besitzt, d.h. deutlich hochfrequenter ist.

Am Beispiel in Abb. 6-b zeigt sich der deutlichere Unterschied der gemessenen Signalamplituden bei der Aufzeichnung eines Wellenzuges mit höherfrequenten Anteilen. Diese unterschiedlichen Frequenzlagen entsprechen den propagierenden Wellenmoden der symmetrischen Mode (S_0) und der antisymmetrischen Mode (A_0). Da der WD-Sensor in der Messkette „Mistras“ eine höhere Bandbreite als der VS150-M Sensor der Messkette „Vallen“ aufweist, werden diese hochfrequenten Signale mit höherer Empfindlichkeit detektiert. Der Sensor KAR 601 S liegt in seiner Bandbreite zwischen den beiden anderen Sensorsystemen und detektiert daher beide Wellenmoden mit vergleichbarer Sensitivität.

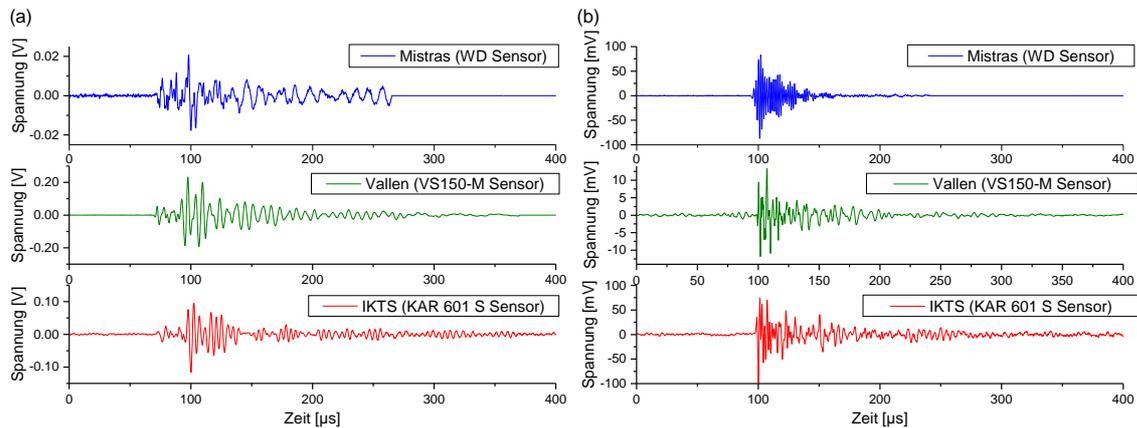


Abb. 6. Vergleich ausgewählter Signale mit gemeinsamem Ursprung und geringer Bandbreite (a), sowie hoher Bandbreite (b).

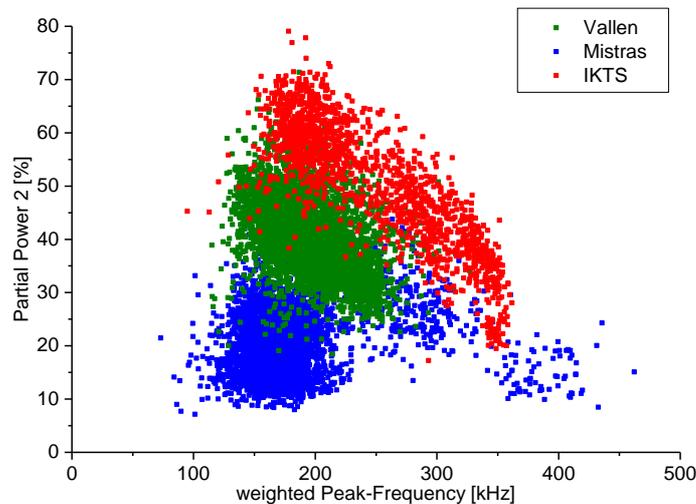


Abb. 7. Frequenzlage der georteten Signale aller drei Messketten für eine Beispielprobe aus Studie 2.

Dieser Unterschied in der spektralen Empfindlichkeit der drei Messketten überträgt sich in die berechneten Signalparameter. Hierzu wurden verschiedene frequenzbasierte Parameter berechnet (Definition s. [2]) und miteinander verglichen. Zur Unterscheidung von verschiedenen Schädigungsarten in Faserverbundwerkstoffen lässt sich die Auftragung von „Partial Power“ über der gewichteten Spitzenfrequenz „weighted Peak-Frequency“ heranziehen. In Abb. 7 ist der Vergleich der Signale aller drei Messketten für eine Beispielprobe aus Studie 2 dargestellt. Insbesondere beim resonanten Sensor VS150-M wird deutlich, dass alle Signale in einem engen Bereich entlang beider Achsen (um die Resonanzfrequenz) gehäuft sind. Diese Messkette eignet sich daher nur sehr eingeschränkt für die Unterscheidung verschiedener Signalklassen im Frequenzraum. Die Messkette „IKTS“ weist eine höhere Bandbreite auf, was sich in der größeren Abdeckung entlang der

beiden Achsen äußert. Eine Trennung in mehrere Häufungspunkte von Signalen im Frequenzraum ist erkennbar, was die Basis für eine Unterscheidung von Signalquellen bilden kann. Dies trifft in gesteigertem Maße auf die Messkette „Mistras“ zu. Mit dem hier verwendeten WD-Sensor kann eine hohe Bandbreite abgedeckt werden und damit auch eine bessere Messung der spektralen Eigenschaften der Signalquelle vorgenommen werden. Dies bildet sich auch in einer deutlicheren Trennung der Häufungspunkte im Frequenzraum ab.

4. Zusammenfassung

Der Vergleich der verschiedenen Messketten hat gezeigt, dass trotz erheblicher Bemühungen um die Standardisierung der Gerätetechnik ohne weiteres keine direkte Vergleichbarkeit der erhaltenen Ergebnisse möglich ist, dass aber trotz der Unterschiede der Messketten die Registrierung des Beginns der Schädigung bezogen auf den Kraftverlauf bei den 3 Messketten vergleichbar stattfindet. In Tab. 2 sind die wesentlichen Unterschiede und Messkonzepte der drei Messketten nochmals miteinander verglichen.

Bereits durch die Wahl des Sensors findet ggf. eine Reduktion der Bandbreite statt, welche die Art der aufgezeichneten Information beeinflusst. Diese kann durch das angeschlossene Messsystem nicht mehr kompensiert werden. Abhängig vom Gerätetyp haben aber auch die Aufzeichnungseinstellungen erheblichen Einfluss auf die Anzahl der Signale, die zur Analyse verwendet werden können. Für Analysen jenseits der Bestimmung von Signalintensität und Anzahl zeigt sich ebenfalls, dass die verwendeten Algorithmen (z.B. zur Ortung) deutlichen Einfluss auf das Gesamtergebnis haben. Allerdings führen Fehler bei der Bestimmung der Ersteinsatzzeit aufgrund der kurzen Signallaufwege ohnehin schnell zu einem hohen Fehler, so dass eine genaue Ortung für diese Art vom Proben normalerweise nur bedingt aussagekräftig ist.

Tab. 2. Überblick zum Unterschied der drei Messketten.

	Messkette „Mistras“	Messkette „Vallen“	Messkette „IKTS“
Signalaufzeichnung	<ul style="list-style-type: none"> • Messsoftware: AEWin • schwellwertbasierte Triggerung • Signalaufzeichnung basiert auf drei Zeitkonstanten (PDT/HDT/HLT) 	<ul style="list-style-type: none"> • Messsoftware: AESuite • Schwellwertbasierte Triggerung • Signalaufzeichnung basiert auf zwei Zeitkonstanten DDT/RAT 	<ul style="list-style-type: none"> • Messsoftware: CANWARE • RMS Triggerung • Signalaufzeichnung basiert auf zwei Zeitkonstanten (Pre- und Posttrigger)
Ortung	<ul style="list-style-type: none"> • Analysesoftware: Noesis • Iterativer Algorithmus (100 Iterationen) • Event-Terminierung „Echo“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Analysesoftware: VisualAE • Iterativer Algorithmus (200 Iterationen) mit mehreren Startpunkten (10) 	<ul style="list-style-type: none"> • Analysesoftware: AETools • Bewertung von 8 Zeitdifferenzen (4 Sensoren, 2 Ersteinsatzverfahren AIC, COR) • Verwendung der Sensor-Verfahrenskombination mit höchster kumulativer Event-Anzahl und höchster kumulativer Energie

Referenzen

- [1] C. U. Grosse and M. Ohtsu, *Acoustic Emission Testing*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] M. G. R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, vol. 242. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [3] H. Akaike, “Markovian representation of stochastic process and its application to the analysis of autoregressive moving average processes,” *Ann. Inst. Stat. Math.*, vol. 26, pp. 363–387, 1974.