

Schallemissionsprüfung im Rahmen der Biegeumlaufprüfung von Fahrzeugrädern

Alexander PIETZSCH¹, Mareike STEPHAN¹, Eberhard SCHULZE¹, Ulrich HOLDER²,
Jörg IHNE³, Henning BLUMENTHAL³, Sven BOSE³, Lars SCHUBERT¹

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden

² Porsche Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, Weissach

³ OTTO FUCHS KG, Meinerzhagen

Kontakt-E-Mail: alexander.pietzsch@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Bei der Entwicklung von Fahrzeugrädern bildet die Biegeumlaufprüfung (BUP) auf einfache Weise die Belastung auf das Rad durch Kurvenfahrten über die gesamte Fahrzeuglebensdauer ab. Sie ist somit eine wichtige Prüfmethode zur Verifizierung einer betriebssicheren Bauteilauslegung.

Bei BUP-Prüfständen wird ein umlaufendes Biegemoment, das der Belastung bei Kurvenfahrt entspricht, über einen rotierenden Stab in den Nabenbereich des Rades eingeleitet. Das heute gängige Versagens- & Prüfstandabschalt-Kriterium ist dabei eine definierte Schwingwegerhöhung dieses rotierenden Stabes, die durch Strukturschäden im Rad und damit über eine globale Steifigkeitsänderung des am Innenhorn fest eingespannten Rades hervorgerufen wird.

Ziel der vorgestellten Arbeiten war es, die Schallemissionsprüfung (AT) als prüfstandbegleitendes In-Situ-Bewertungsverfahren zur zeitgenauen Identifizierung der Entstehung von Strukturschäden während der BUP zu validieren. Das Verfahren wurde sowohl an Rädern aus Verbundwerkstoffen als auch an Aluminium-Schmiederädern angewendet. Die Schallemissionsprüfung kann sowohl eine Lokalisierung von Schädigungen als auch die frühzeitige Erfassung der räumlichen Schadensentwicklung während des dynamischen Belastungsversuches liefern.

Bei Aluminium-Schmiederädern konnte durch die Nutzung der AT der Zeitpunkt der für die Bauteilauslegung relevanten Initial-Rissbildung, die aber durch teilweise signifikant unterschiedliche Risswachstumsgeschwindigkeiten deutlich vor einem Anstieg der Schwingwegerhöhung auftreten kann, im Rad identifiziert werden und ein entsprechendes Abschalt-Signal für den Prüfstand erzeugt werden.

Bislang war die Ermittlung der Initialriss-Lastwechselzahl nur durch zeitaufwändige visuelle Zwischenkontrollen möglich. Die prüfungsbegleitende AT bietet den entscheidenden Vorteil der frühzeitigen Detektion von Strukturschäden. Es erfolgten Untersuchungen zur Mindestanzahl von Schallemissionssensoren, die pro Rad instrumentiert werden müssen, um Initialrisse sicher zu erfassen.

Vorteil bei der Anwendung der AT im Rahmen von Fatigue-Tests an Faserverbundwerkstoffen ist es, dass Faserbrüche und Delaminationsprozesse sehr starke Schallemissionen erzeugen. Um den Schädigungsverlauf von Komposit-Rädern zu erfassen, wurden quasi-statische Belastungstests mit Last-Steigerung und –Abfall innerhalb unterschiedlicher Lastrampen durchgeführt. Dabei wurde die Schallemissionsprüfung sowohl während zerstörender Lasten als auch während nicht-zerstörender Lasten (so genannten Proof-Loads) angewendet. Es wurde untersucht, inwiefern eine im niedrigen Lastbereich „angeschwungene“ BUP und Aufnahme der AE-Parameter geeignet ist, den Schädigungsverlauf zu erfassen.

Einführung

Die Technik der Schallemissionsprüfung oder Acoustic emission testing (AET oder AT) basiert darauf, dass dynamische Verschiebungen im Nanometer-Bereich an der Oberfläche von belasteten Prüfobjekten mittels hochempfindlicher piezoelektrischer Sensoren im Frequenzbereich von ca. 50 kHz bis 1 MHz detektiert und in elektrische Signale umgewandelt werden. Diese Oberflächenverschiebungen werden durch akustische Wellen (elastische Spannungswellen) verursacht, welche durch kurzzeitige, sehr kleine Materialverschiebungen, zum Beispiel infolge Rückfederung des Materials bei schnell ablaufenden Prozessen, wie Mikrorissbildung, Rissfortschritt, Rissuferreibung etc. entstehen. Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen schallemittierenden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu einer Vielzahl von Sensoren (mindestens drei bei ebener Ortung), kann die Position der aktiven Schädigung berechnet werden. Die wesentliche Herausforderung bei der Anwendung der Schallemissionsanalyse bei dynamischer Strukturbelastung ist das starke Umgebungsrauschen. Dieser Anforderung begegnet das akustische Messsystem durch Speicherung und Bewertung der vollständigen Wellenformen mittels spezieller Filteralgorithmen [4].

Die Biegeumlaufprüfung (BUP) wird als Betriebsfestigkeitsversuch bei der Entwicklung von Fahrzeugrädern eingesetzt. Sie bildet auf einfache Weise die Belastung durch Kurvenfahrten über die gesamte Fahrzeuglebensdauer auf das Rad unter Berücksichtigung entsprechender Sicherheitsfaktoren ab (Abbildung 1). Bei BUP-Prüfständen wird ein umlaufendes Biegemoment, das der Belastung bei Kurvenfahrt entspricht, über einen rotierenden Stab in die Radnabe des Rades eingeleitet. Beim Eintrag zerstörender Lasten ist das Versagens- & Prüfstandabschalt-Kriterium aktuell eine definierte Schwingweghöhung dieses Stabes, die durch Strukturschäden im Rad und damit einer globale Steifigkeitsänderung des am Innenhorn fest eingespannten Rades hervorgerufen wird. Alternativ bzw. attributiv wird auch eine Veränderung der Drehzahl des Biegestabes genutzt, um ein Abschaltsignal für die BUP zu erzeugen. Ursächlich für diese Drehzahländerung ist ebenfalls eine Steifigkeitsänderung im Prüfobjekt durch Rissbildungen.

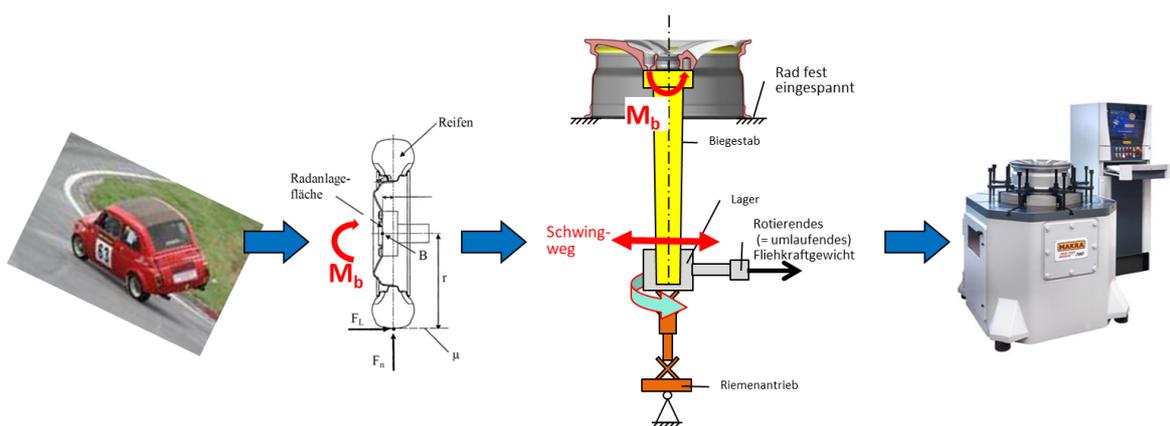


Abb. 1. Prinzip der Biegeumlaufprüfung (BUP) für Räder

Da die Risswachstumsgeschwindigkeit und damit auch der Zeitpunkt vom Auftreten der ersten Initialrisse bis zum Eintreten einer messbaren globalen Steifigkeitsänderung durch Bauteilschäden über die Messung einer Schwingwegänderung je nach Risslage im Rad stark variieren kann, war die Ermittlung der für eine präzise FEM-Verifizierung für zukünftige Bauteilauslegung entscheidenden Initialriss-Lastwechselzahl aber bislang nur durch

zeitaufwändige visuelle Zwischenkontrollen in festgelegten Intervallen und somit auch nur mit einer gewissen Unschärfe möglich. Durch die Nutzung der AT soll der Zeitpunkt der Initial-Rissbildung im Rad genauer identifiziert werden und ein entsprechendes Abschaltsignal für den Prüfstand erzeugt werden.

Somit lässt sich die Aufgabenstellung für Aluminium-Schmiederäder, wie in Abbildung 2 dargestellt, zusammenfassen.

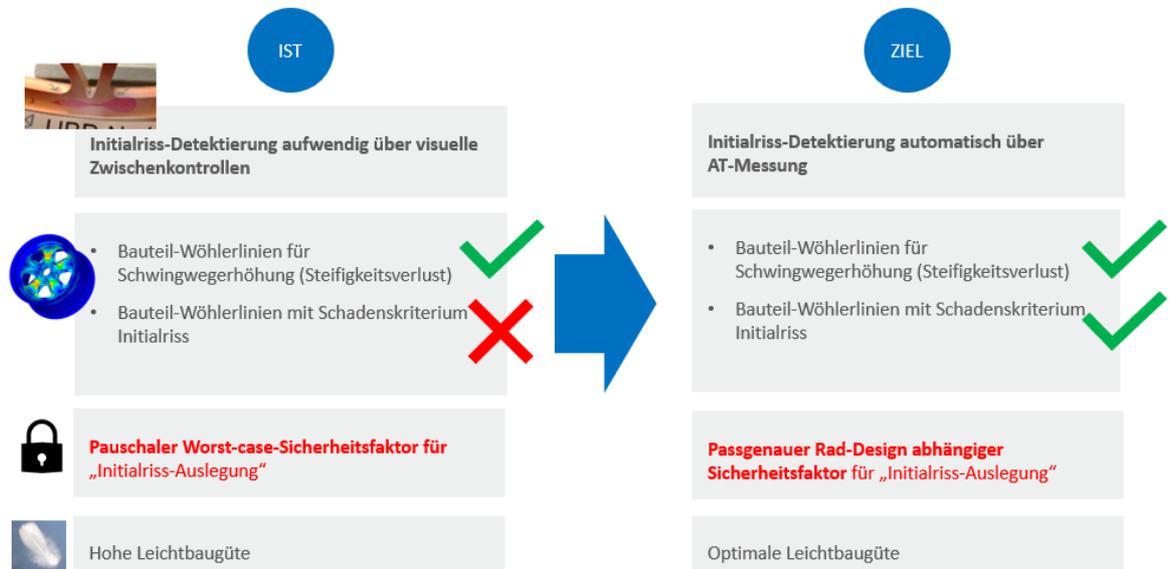


Abb. 2. Zielsetzung des Einsatzes der AT bei der Biegeumlaufprüfung von Aluminium-Schmiederädern

Schallemissionsanalyse im Rahmen der Biegeumlaufprüfung von Aluminium-Schmiederädern

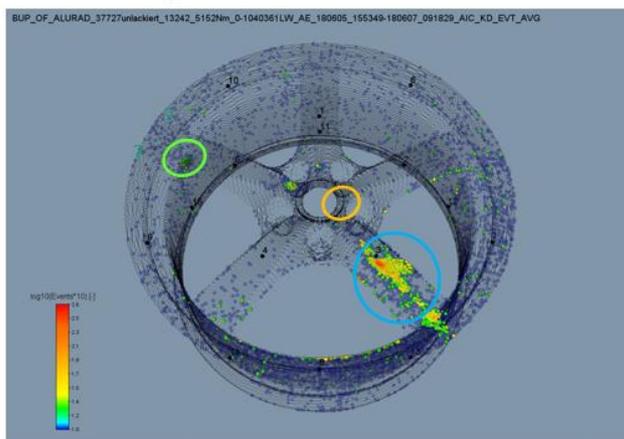
Bei der Instrumentierung eines Rades mit einer Vielzahl von Sensoren kann die Schallemissionsprüfung sowohl eine Lokalisierung von Schädigungen als auch die frühzeitige Erfassung der räumlichen Schadensentwicklung während des dynamischen Belastungsversuches liefern. Um den Prüfaufwand in der späteren Anwendung zu minimieren, erfolgten an Aluminium-Schmiederädern Untersuchungen zur Mindestanzahl von Schallemissionssensoren, die pro Rad instrumentiert werden müssen, um erste sichtbare Strukturschäden in Form von Oberflächen-Initialrissen zu erfassen und ein frühzeitiges Abschalten der Prüfmaschine zu realisieren.

Typischerweise treten Risse bei Aluminium-Schmiederädern bei der BUP im Bereich der Radschüssel und im Übergangsbereich der Radschüssel in den Felgenring auf, weshalb diese Bereiche bei der Schadensdetektion über AT auch im Fokus stehen. Die in der BUP erreichten Mindest-Lastwechselzahlen der Aluminium-Schmiederäder entsprechen dabei einem Vielfachen der Lastwechselzahlen, die über die Fahrzeuglebensdauer im realen Fahrbetrieb im Extremfall auftreten können.



Abb. 3. Messaufbau für die AT-Sensorik während der BUP von Aluminium-Schmiederädern mit breiten Speichen

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Anwendbarkeit der AT auf Aluminium-Schmiederäder anhand zwei typischer Fünf-Speichen-Designs untersucht. Die Speichen bei diesen Rädern waren relativ breit, somit war genügend Platz für die Applikation der AT-Sensoren mittels Jochs auf der Sichtseite der Speichen, siehe Abbildung 3. Für einen optimalen Halt der Sensoren unter der teils sehr hohen dynamischen Belastung durch Umlauf-Biegemomente von bis zu 10.000 Nm bei Drehzahlen von ca. 1.500-1.800 U/min wurden die Joche der Speichengeometrie angepasst. Zusätzlich wurden zwei Sensorgürtel mit jeweils fünf AT-Sensoren im Felgenbett in Innen- und Außenhornnähe fixiert. Während der AT-Messung wurden mehrere Zwischenstopps eingelegt, um eine genaue visuelle Inspektion auf mögliche Initialrisse durchzuführen. Die Anstiege in der Eventanzahl und der Energiekurve über die Lastwechselanzahl korrelierten hier sehr gut mit dem zeitlichen Verlauf der visuell festgestellten Schadensereignisse. In Abbildung 4 ist die logarithmierte Anzahl der lokalisierten Schallemissionen (Events) bis zu ca. 1 Mio. Lastwechseln als Ortungsplot dargestellt. Auf der rechten Bildseite ist das Protokoll der visuellen Inspektionsergebnisse abgebildet. Auch die per Ortungsmodell ausgegebenen Risslagen korrelierten sehr gut mit den visuell detektierten Risslagen.



- 10.000 LW
 - Radschrauben nachgezogen
- ca. 200.000 LW
 - schwarze Punkte auf Speichen aufgrund gebeizter Oberfläche (8S DF), keine Risse
- ca. 380.000 LW
 - Rissmarkierungen bzw. schwarze Punkte an Kanten Speiche 2 und 5, sicht- und bremsenseitig (8S/B K)
 - Riss in Nabe (< 3mm)
- ca. 600.000 LW
 - Riss in Nabe >= 3mm
 - Rissmarkierungen an Übergang Speiche 2 und 5 in Außenhorn, sicht- und bremsenseitig (7B DF, 7S K)
- ca. 750.000 LW
 - Riss ca. 3mm an Übergang Speiche 5 in Außenhorn, sichtseitig (7S K)
- ca. 850.000 LW
 - Riss ca. 5 – 8 mm an Übergang Speiche 5 in Außenhorn, sichtseitig (7S K)
 - Riss ca. 8 mm Übergang Hinterschnitt in Ventilschräge Speiche 5
- ca. 1.030.000 LW
 - Riss Speiche 3, Speichenmitte (8S DF)
 - ca. bis zur halben Speichendicke und fast gesamte Speichenbreite
 - Riss geht „durch“ Sensor 3
 - Riss sehr schnell gewachsen
- 1.040.381 LW
 - Abschaltung aufgrund 10%-Schwingwegerhöhung
 - Speiche 3 nicht vollständig durchtrennt / gebrochen

Abb. 4. Ortungsplot eines Aluminium-Schmiederades aus der 1. Messreihe mit begleitender AT und Protokoll der visuellen Inspektion.

Die Schadensortung konnte mit steigender Sensoranzahl präziser durchgeführt werden. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Messungen mit unterschiedlichen Sensoranordnungen

im Parameterbereich zwischen 0 und 1 Mio. Lastwechsel abgebildet. Farblich dargestellt sind die Anzahl der Events über dem Winkel des Quellorts in Polar-Koordinaten in Grad. An den Speichen zeichnete sich die Lokalisation der Schadensereignisse gut erkennbar ab, weiterhin waren auch Lastumlagerungen im Prüfungsverlauf erkennbar. Bei der Variante mit 3 AT-Gürtel-Sensoren konnten trotz einfachem Ortungsmodell Schadensereignisse lokalisiert werden, allerdings mit der Positions-Unschärfe von bis zu einer Speiche. Die Messung mit 20 Sensoren auf 2 Sensorgürteln beinhaltete eine 6-mal höhere Eventdichte gegenüber der 3-Sensor-Variante auf einem Gürtel, wodurch auch eine präzisere Lokalisierung der Initialrissbildung möglich war. Die Bewertung der Messergebnisse ergab ferner, dass selbst bei einer alleinigen Analyse der Signale des Sensorgürtels mit 3-AT-Sensoren eine frühzeitige Initialriss-Detektion gegeben war.

Eine genaue Schadensortung steht für die industrielle Anwendung der AT-Messung bei metallischen Rädern während der BUP aber nicht primär im Fokus, da Bauteilschäden immer in Form von Oberflächenrissen auftreten und diese im Rahmen einer visuellen Rissprüfung nach Versuchsende z.B. über Farbeindringverfahren standardmäßig ermittelt werden müssen.

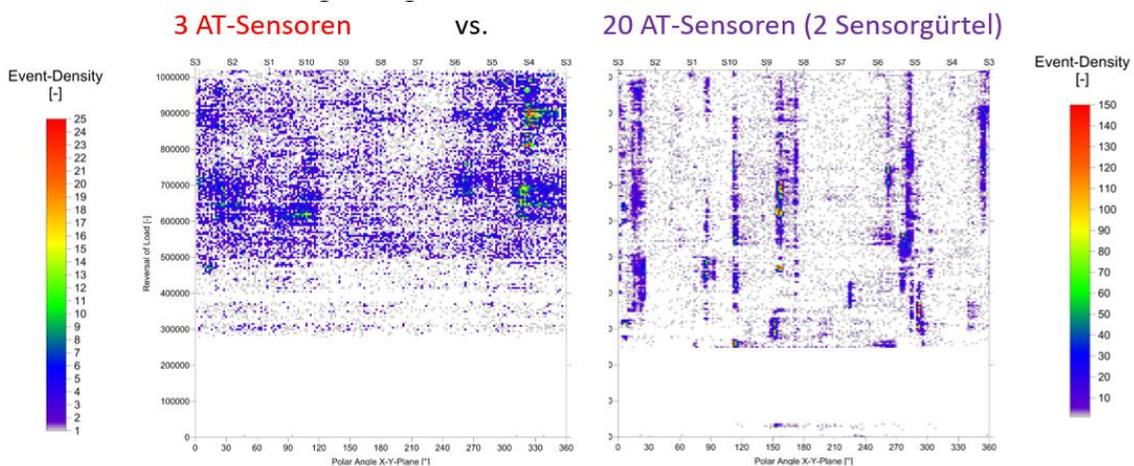
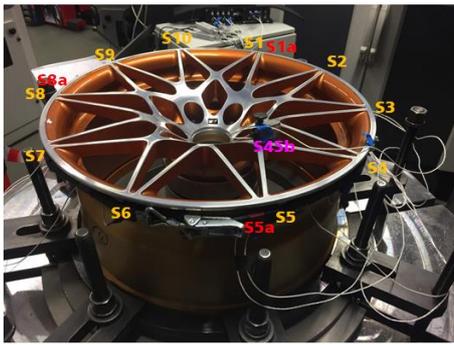


Abb. 5. AT-Daten im Parameterbereich zwischen 0 und 1.020.006 Lastwechseln über dem Winkel des Quellorts der Events in Polar-Koordinaten in Grad, farbkodiert: Anzahl der Events.

Zur Verifizierung der positiven Ergebnisse für den ersten beispielhaften Radtyp mit breiten steifen Speichen, aber auch zur genaueren Ermittlung der mindestens erforderlichen Anzahl an Sensoren und deren ideale Positionierung am Rad, wurde eine zweite Versuchsreihe mit einem weiteren Radtyp durchgeführt. Neben der Ermittlung der optimalen Sensoranzahl (1-, 3- oder 10-AT-Sensoren) stand auch die Anwendbarkeit der AT-Messung auf filigranere Raddesigns mit schmalen Speichen im Fokus. Die Applikation, bei der die AT-Sensoren mittels eines spannbaren Sensorgürtels (3- und 10-AT-Sensoren) um den Felgenring und mittels Joch auf der Speiche fixiert (1-AT-Sensor) wurden, war ähnlich robust wie bei der ersten Versuchsreihe mit breiten Speichen. Der Sensorgürtel mit 3- und 10-AT-Sensoren war dabei radschüsselnah zum Außenhorn fixiert, siehe Abbildung 6. Diese drei unterschiedlichen Sensorkonzepte waren an jeweils drei unabhängig voneinander arbeitenden AT-Prüfsystemen angeschlossen. Insgesamt wurden jeweils zwei AT-Messungen auf zwei unterschiedlichen Lastniveaus (3760 und 4512 Nm Biegemoment) durchgeführt. Die Drehzahl der BUP-Prüfmaschinen lag im Bereich von zirka 1500 U/min. Bei der 10 AT-Sensor-Variante ergab sich erwartungsgemäß ein signifikant deutlich höherer Instrumentierungsaufwand und ein sehr hohes Datenaufkommen im Vergleich zur 1- und 3-AT-Sensor-Variante.



- 1 Sensorgürtel im Felgenbett 25mm Abstand zum Außenhorn mit
- 10 AT-Sensoren (S1-S10) sowie
 - 3 AT-Sensoren (S1a, S5a, S8a)
 - 1 AT-Einzelsensor (S45b) mittels Joch auf Speiche fixiert

Abb. 6. Rechts: Sensorkonzepte für AT an Aluminium-Schmiederädern
links: Aluminium-Schmiederad mit schmalen Speichen auf BUP-Prüfstand

In Abbildung 7 sind die beiden Methoden der Prüfstandabschaltung mittels Schwingwegerhöhung und mittels AT-Sensorik gegenübergestellt. Die konventionelle Technologie der Prüfstandabschaltung über eine 10%-ige Schwingwegerhöhung führt zu einer ermittelten Ausfall-Lastwechsel-Zahl von ca. 675.000 Lastwechseln. Gegenüber der 1-AT-Sensor-Variante, bei der bei ca. 525.000 Lastwechseln ein deutlicher Signalanstieg eintritt, zeigten die Versuchsergebnisse mit 3 und 10 AT-Sensoren eine zeitlich deutlich frühere Detektion von Schallemissionssignalen (Hits) bei bereits ca. 125.000 – 150.000 Lastwechseln, die durch allererste Initialrisse, sogenannte Pittings, erzeugt werden, welche noch deutlich vor Erreichen einer Risslänge im Bereich von technischen Anrissen auftreten. Lastumlagerungen im Rad waren mit 10 AT-Sensoren, aber auch bereits mit nur 3 AT-Sensoren erkennbar.

Detektierung Rissbildung über AT- Hits und Schwingwegänderung

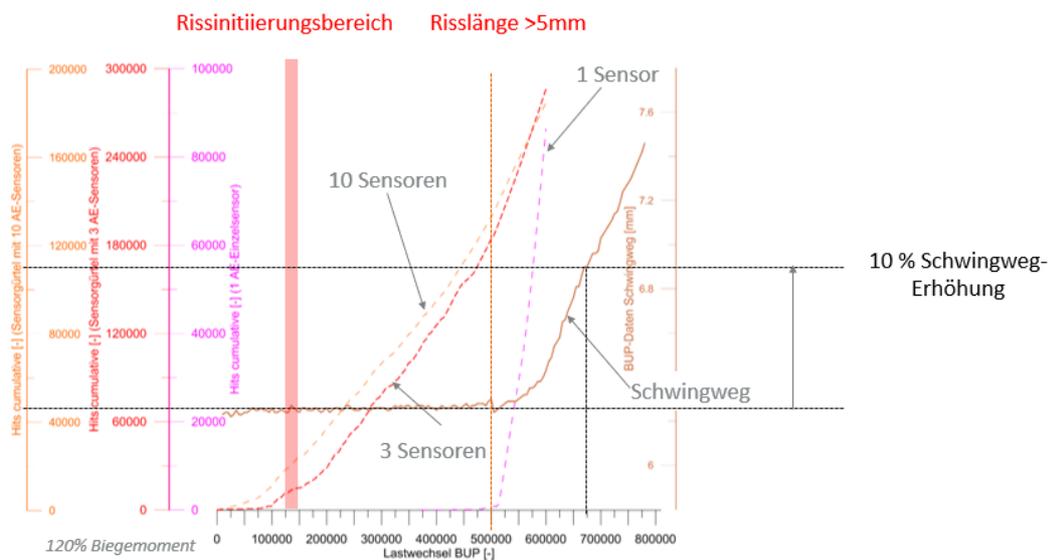


Abb. 7. Exemplarischer Vergleich AT-Hits für verschiedene Sensoranzahl-Konzepte über Lastwechselzahlen bei der BUP (120% Lastniveau) eines Aluminium-Schmiederades und Schwingweg des BUP-Stabes.

Für eine hinreichend genaue Generierung eines Abschaltsignals über Schallemissionsmessung für die BUP von Aluminium-Schmiederädern stellt somit eine Anzahl von 3 AE-Sensoren den bestmöglichen Kompromiss hinsichtlich einer handhabungsfreundlichen, wirtschaftlichen und präzisen Signalerzeugung dar (siehe Abbildung 8).

Vor- und Nachteile der angewendeten Sensorkonzepte

Kriterien	1-AE-Sensor	3-AE-Sensoren	20/10-AE-Sensoren
zuverlässige „frühzeitige Schadensindikation“	👎	👍	👍👍
Handling/Praktikabilität (Instrumentierung)	👍👍	👍	👎👎
Datenaufkommen (Menge, Speicher)	👍	👍	👎👎
Positionsabhängigkeit auf der Radgeometrie	👎👎	👍	👍👍
Lastumlagerungen im Rad abbildbar/erkennbar	👎👎	👍	👍👍
Σ	👎👎	👍👍👍👍	👍👍

Abb. 8. Zusammenfassende Bewertung der verschiedenen Sensorkonzepte hinsichtlich Handhabungsfreundlichkeit, Datenaufkommen, Positionsabhängigkeit und Wirksamkeit in Aluminium-Schmiederädern

Die Versuchsergebnisse belegen damit anschaulich, dass durch Einsatz der Schallemissionsprüfung mit mindestens 3-AT-Sensoren deutlich früher Riss-Indikatoren generiert und zu einer Prüfstandsabschaltung genutzt werden können als dies durch die heute gängige, aber aufwändige visuelle Inspektion hinsichtlich Rissbildung mit Zwischenhalten in festen Intervallen oder durch die Messung der Veränderung des Schwingweges möglich ist.

Schallemissionsprüfung als prüfstandsbegleitendes Bewertungsverfahren für die Integrität und den Zustand von CFK-Rädern

Die Ableitung von restlebensdauerbezogenen AE-Größen ist nur am spezifischen Gesamtbauteil (Rad) möglich, da das Lastszenario die Schadensentwicklung bestimmt. In komplexen Bauteilen treten bei der Schadensentwicklung Lastumlagerungen auf, die wiederum zu Beanspruchungen in anderen Strukturbereichen führen, d.h. Ort und Zeit der Schadensentwicklung ist essenziell. Um den Schädigungsverlauf von CFK-Rädern zu erfassen, wurden quasi-statische Belastungstests mit Schallemissionsmessungen (AT) begleitet. Es erfolgten zyklische Versuche mit Laststeigerung und –abfall, wobei die Maximalkraft der Lastrampen stufenweise bis zum Bauteilversagen gesteigert wurde. Zwischen die Rampen mit zerstörenden Lasten waren Proof-Loads (1 kN bis 5 kN Rampen) zwischengeschaltet, um zu klären, ob sich die Änderungen in den Schallemissionsparametern nach zerstörenden Lasten auch bei Proof-Load-Belastung abzeichnen.

Im Unterschied zu metallischen Werkstoffen, bei deren Belastung Schallemissionen bis zum Überschreiten der vorangegangenen maximalen Belastung ausbleiben (Kaiser-Effekt) treten bei Verbundwerkstoffen signifikante Schallemissionsereignisse bereits bei einer Belastung unter der vorangegangenen Maximallast auf. Dieser als Felicity-Effekt

eingeführte Wirkmechanismus ist in der Hauptsache auf Reibungsvorgänge im vorgeschädigten Kompositmaterial zurückzuführen.

Der Hauptteil der bei Belastungstests beobachteten Burst-Ereignisse tritt erwartungsgemäß in den Phasen der Lastspitzen auf. Aus der bei den quasistatischen Tests pro Laststufe umgesetzten kumulativen Energie und dem Zeitpunkt der vor der vorherigen Maximallast einsetzenden Schallemissionen kann der Grad der Materialschädigung im jeweiligen Belastungszyklus abgeschätzt werden. Das Felicity-Verhältnis berechnet sich bei größer werdenden Lastrampen als Quotient von der Kraft, ab der beim Lastanstieg nennenswerte Schallemission auftrat, und der Maximallast des vorangegangenen Belastungszyklus. Im Ergebnis der quasistatischen Belastungstests zeigte sich, dass neben dem Felicity-Verhältnis die kumulierte Anzahl der georteten Schallereignisse bzw. die an den Quellort rückgerechneten Werte der kumulierten Burstenergie zur Erfassung des Schädigungsgrades der Struktur herangezogen werden können. Proof-Loads emittieren vergleichbare Schallemissionen in den geschädigten Zonen, wie während der schädigenden Lasten auftreten.

Während der schädigenden BUP können Ergebnisse der Schallemissionsanalyse den Ort und Art/Grad der Schadensentwicklung aufzeigen. Abbildung 9 zeigt den Messaufbau einer AT-Instrumentierung an einem Kompositrad.



Abb. 9. Messaufbau AT während der BUP eines Komposit-Rads mit optimierten Winkel-Kopfstücken der Sensoren auf den Speichen und zwei Sensorgürteln im Felgenbett [5]

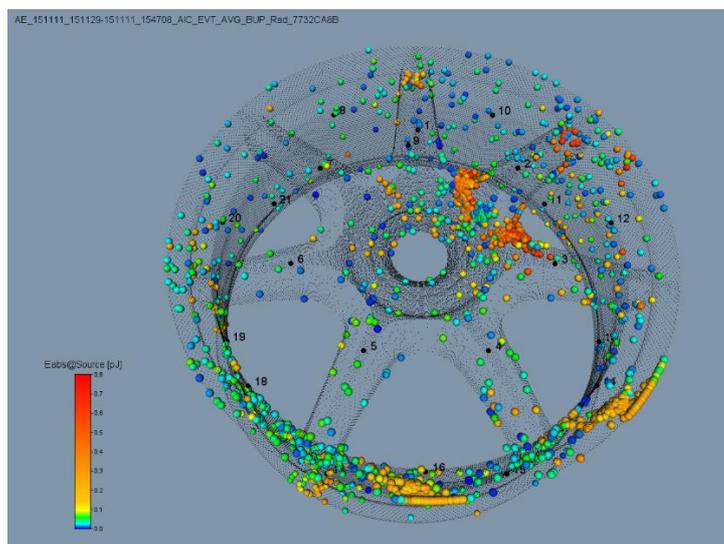


Abb. 10. AT während BUP mit zerstörenden Lasten am vorgeschädigten Kompositrad, Ortungsplot, farbcodiert: Burstenergie am Quellort [5]

Der Ortungsplot in Abbildung 10 zeigt, dass eine Schallemissionsmessung während der BUP mit zerstörenden Lasten am vorgeschädigten Kompositrad erfolgreich durchgeführt werden kann. Wichtig sind angepasste Filter- und Sortieralgorithmen. Die Verteilung der Burstenergie am Quellort weist auf die Bildung neuer Schäden an Stellen hin, die vorher gering geschädigt waren (Nabenanbindung Speiche 2).

Unterschiede zwischen vorgeschädigten und neuen Bauteilen sind vor allem in der Frequenzverteilung sichtbar. Die Gewichtete Vorzugsfrequenz der akustischen Burstsignale gibt auch bei Bauteiluntersuchungen Hinweise auf die Art der Schäden, Reibgeräusche und Delaminationen zeichnen sich durch niederfrequente Burstsignale < 100 kHz ab, Faserrisse oder Faser-Matrix-Debonding durch hochfrequente Signale mit Frequenzen > 160 kHz. Im Unterschied zu den Coupon-Belastungsversuchen zeichnet nur ein Cluster im Frequenzbereich > 160 kHz ab, der Indikationen auf Faserauszugs- bzw. Faserversagen gibt. Schallwellenanteile mit hohen Frequenzen werden an den Inhomogenitäten im Komposit stark gestreut. Aufgrund der deutlich längeren Laufwege im Bauteil, in Verhältnis zur Couponprobe, sind deshalb am Bauteil kaum faserrisstypische Frequenzen > 220 kHz beobachtbar. In der im rechten Teil von Abbildung 11 dargestellten Verteilung der gewichteten Peak-Frequenz, in der die WPF der Burstsignale entsprechend der genannten Clustergrenze farbcodiert ist, zeichnet sich ein zunehmender Schädigungseintrag im Bereich niedriger WPF-Werte ab, initialisiert durch mehr Reibungsvorgänge. Der Verlauf des Felicity Ratio untermauert die Aussagen, ähnlich wie die Steifigkeit, ist jedoch nicht im Proof-Load Bereich anwendbar.

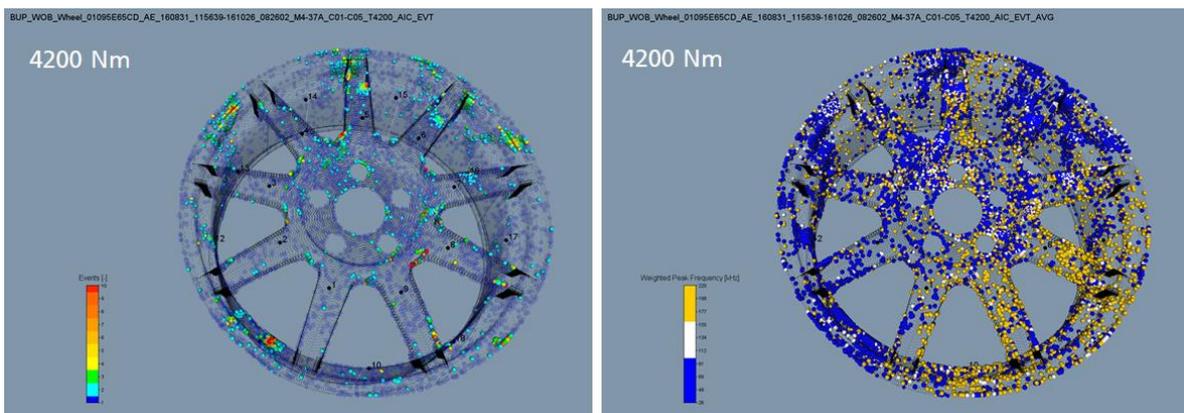


Abb. 11. Ortungsplots im Ergebnis der Schallemissionsprüfung am Kompositrad im Volllastbereich bis zum Versagen, Lasteintrag BUP 4200 Nm, mehrfach 80.000 LW; farbcodiert links: Anzahl georteter Ereignisse in den ca. 1 mm^3 großen Voxeln, farbcodiert rechts: gewichtete Peak-Frequenz [5]

Bei nicht-zerstörender Belastung können die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse im Rahmen von Steifigkeitstests den Ort und Art/Grad der Vorschädigung abbilden. Abbildung 12 erlaubt einen Vergleich zwischen den bei axialen und radialen 3 kN Belastungen des Rades (Ort der Lasteinleitung am jeweiligen Label) ermittelten Steifigkeiten und den bei diesen Belastungen auftretenden Schallemissionen. Teilweise sind sehr geringe Steifigkeitsänderungen im 0,4% Bereich zu beobachten, aber auch bis zu 10% zwischen geschädigten und ungeschädigten Speichen. Die Steifigkeitswerte korrelieren gut mit AT Parametern. Die Schallemissionsanalyse visualisiert bereits Schäden in Speiche 7, obwohl der dort ermittelte Steifigkeitswert relativ hoch ist, ein Mehrwert im Ergebnis der AT!

Fazit

Die Anwendung der Schallemissionsprüfung während der BUP kann sowohl für die Steuerung des Ermüdungsversuches als auch zur Strukturintegrität wichtige Zusatzinformationen liefern:

Unabhängig vom konkreten Sensorkonzept liefert die Schallemissionsprüfung (AT) zeitlich weit vor der schwingwegerhöhungs- bzw. drehzahländerungsbasierten Abschaltung der Biege-Umlauf-Prüfmaschine Burstsignale, die auf sich entwickelnde Strukturfehler im Rad zurückzuführen sind.

Die Ergebnisse der BUP begleitenden Versuche belegen zudem, dass mittels der Schallemissionsprüfung mit mindestens 3-AT-Sensoren - im Rahmen der Versuche im Felgenbett über einen Sensorgürtel angekoppelt - auch deutlich früher Schallemissions-signale detektiert wurden, bevor Risse durch eine visuelle Inspektion in den festgelegten BUP-Zwischenhalten nachweisbar waren. Somit bietet die Anwendung der AT im Auslegungsprozess neue und verbesserte Möglichkeiten für eine weiter verfeinerte Bauteilauslegung über eine optimierte Korrelation zwischen BUP-Prüfergebnissen und der Lebensdauervorhersage der Räder mittels FEM-Berechnung.

Zudem besteht die Möglichkeit mit AT lastinduzierte Lastumlagerungen im Rad während der BUP zu erkennen, wenn mindestens 3 AT-Sensoren während der Prüfung zum Einsatz kommen und eine Ortung der Signale erfolgt.

Referenzen

[1] Schulze, E.: Schallemissionsanalyse im Rahmen dynamischer Ermüdungstests von Faserverbundbauteilen, DGZfP, 19. Kolloquium Schallemission, Statusberichte zur Entwicklung und Anwendung der Schallemissionsanalyse, 12. – 13. September 2013, Augsburg

[2] 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

[3] K. Tschöke, T. Gaul, F. von Dungern und L. Schubert, „Integrierte Strukturüberwachung sicherheitsrelevanter Fahrzeugkomponenten aus kohlefaserverstärkten Kunststoffverbundwerkstoffen,“ in Smarte Strukturen und Systeme, M. Wiedemann und T. Melz, Hrsg., Shaker Verlag, 2017, pp. 63-72.

[4] E. Schulze, A. Pietzsch, L. Schubert, A. Ulbricht, Schallemissionsprüfung an einem neuartigen Leichtbau-Drehgestellrahmen aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff während statischer und dynamischer Ermüdungstests, DGZfP, 22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen, 27. – 28. März 2019, Karlsruhe

[5] Holder, U.: Zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels Schallemissionsanalyse, Dissertation TU-Dresden, 2018