

Schallemissionsmessung bis zum Versagen von Kohlefaserlamellen an einem Stahlbetonträger

Rosemarie HELMERICH, Jürgen BOHSE, Ute EFFNER, Mathias RÖLLIG, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Manuel LÖHR, Physical Acoustics BV- Deutschland, Hamburg

Andreas SCHULTZ, Johannes VIELHABER, Peter POPP, Fachhochschule Potsdam, Baulabor für konstruktiven Ingenieurbau

1.0 Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Qualitätssicherung von Brückenverstärkungen mit Hilfe moderner Materialien wie kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) hinsichtlich ihrer Ausführung und Dauerhaftigkeit ist seit über 10 Jahren in der Entwicklung, aber noch immer nicht so weiterentwickelt, dass sie in Inspektions- und Zustandsbewertungsstrategien integriert werden konnte. Im Rahmen des EU-Projektes „Sustainable Bridges“ wurde die aktive Infrarotthermografie systematisch für die Qualitätssicherung des Verbundes zwischen Betonoberflächen und CFK weiterentwickelt, das Verfahren optimiert und automatisiert. Mit Hilfe eines optimierten thermografischen Verfahrens wurde die Detektierung von Ablösungen $> 1 \text{ cm}^2$ erfolgreich nachgewiesen und validiert. Für eine nachfolgende Machbarkeitsstudie wurden erste Vorüberlegungen zu einer Verfahrenskombination von aktiver Infrarotthermografie und Schallemission durchgeführt und versuchstechnisch umgesetzt. Die globale Ortung mittels Schallemission und die lokale Verifizierung von aktiven Schäden in den vorab global ermittelten Bereichen verspricht eine deutliche Verbesserung der Schadensfrüherkennung und der Detektierbarkeit von Schädigungen während der Nutzdauer. Wiederholte Messungen anlässlich von Inspektionen oder Monitoring akustischer Ereignisse sollen die Qualitätssicherung des Verbundzustandes verbessern und beschleunigen.

2.0 Einführung und Motivation

Vor dem Hintergrund der leeren Kassen der öffentlichen Auftraggeber gewinnt die Verstärkung von Brückenbauten der Verkehrsinfrastruktur zunehmend an Bedeutung. Die Belastungssteigerung des öffentlichen Straßennetzes durch den zunehmenden Güterverkehr betrug in Deutschland allein in den letzten 10 Jahren 69%. Ähnlich verhält es sich mit dem schienengebundenen Verkehr. Die Einrichtung der gerade erst beschlossenen Europäischen Bahnkorridore wird die Verstärkung zahlreicher Bahnbrücken erfordern. Das EU-Projekt Sustainable Bridges (SB 2003-2007) beschäftigt sich mit der Möglichkeit, die vorhandene Brückeninfrastruktur für Achslasten bis 33 t im Güterverkehr und schnellere Züge im Personenverkehr, sowie eine höhere Zugfrequenz zuzulassen. Da es keine europaweit gültigen Bewertungsstrategien und Normen für die Zustandsermittlung und Berechnung von bestehenden Brückenbauwerken gibt, werden neben der Weiterentwicklung vorhandener Berechnungsmethoden auch neue zerstörungsfreie Untersuchungsstrategien in den Bewertungsprozess integriert. Die Idee für die im folgenden vorgestellte Machbarkeitsstudie ist

eine konzeptionelle Fortführung der Erarbeitung eines Qualitätssicherungskonzeptes für Brückenverstärkungen mit Hilfe von kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) im EU-Projekt „Sustainable Bridges“. Eine frühzeitige Detektion und Ortung von Verbundversagen zwischen Lamelle und Stahlbetonträger soll durch den Einsatz der Schallemissionsanalyse angezeigt und lokalisiert werden¹. Die Bewertung und Vermessung des Verbundversagens erfolgt mit einem anderen ZfP-Verfahren. Als erfolgreich haben sich Messungen mittels Thermografie zur Charakterisierung der delaminierten Fläche gezeigt (entwickelt an der BAM, Berlin). Im Sinne einer kostengünstigen und effektiven Inspektion und Qualitätskontrolle ist es zielführend, Übersichtsprüfungen durchzuführen („globale Inspektion durch Schallemission“), um gezielt weitere ZfP-Verfahren einzusetzen („lokale Inspektion durch Thermographie“).

2.1 Aktive Impulsthermografie

Grundsätzlich kann man dieses Verfahren erfolgreich für die Detektierung von Ablösungen $> 1 \text{ cm}^2$ verwenden; das ist etwa 30% der minimalen geforderten Detektierbarkeit von Ablösungen in den USA. Eine größere Genauigkeit dürfte auch in Europa nicht erforderlich sein, auch wenn es bislang keine systematische Untersuchung dazu gibt. Einen Standard für minimal zu detektierende und maximal zulässige Ablösungen der CFK-Verstärkung vom Betonuntergrund gibt es in Europa nicht. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass auch noch so kleine Ablösungen unter ungünstigen Beanspruchungsverhältnissen zum Ausgangspunkt von aktiven Schäden während der Nutzung werden. Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Erwärmungseinheit mit Infrarotkamera. Die CFK-verstärkte Betonoberfläche wird zunächst durch eine externe Wärmequelle aktiv erwärmt. Eine Untersuchung zum optimierten Einsatz von Wärmequellen führte zur Anwendung von Blitzlichterwärmung. Mit diesem Erwärmungsprinzip wurde der verstärkten Oberfläche genau so viel Wärme zugeführt, dass eine zuverlässige Detektierung der gesuchten Schäden $> 1 \text{ cm}^2$ gerade noch möglich war^{2,3}. Dabei war zu beachten, dass laut Zulassung von Verstärkungen mit Kohlefaserverstärkungen durch das Deutsche Institut für Bautechnik eine länger andauernde Erwärmung über 40 °C und eine kurzfristige Erwärmung von 42 °C nicht überschritten werden darf; also auch nicht bei der Qualitätskontrolle. Um den personellen Aufwand einerseits zu reduzieren und andererseits eine gute geometrische Zuordnung und damit eine gute Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, wurde der Vorgang der Messung mit aktiver Infrarotthermografie automatisiert. Der automatisierte Messprozess wurde von einem PC gesteuert. Die Software und Hardware für den Linearantrieb, Blitzinitiierung und den Schrittmotor wurden in der BAM entwickelt, ebenso wie die Datenerfassung und Datenvorverarbeitung für die Infrarotkamera. Abbildung 2 zeigt links das Wärmeflussbild eines Schadens, der im Rahmen der Verfahrensvalidierung für die Untersuchung des CFK-Betonverbundes an einem eigens zu diesem Zweck projektierten Probekörper aufgenommen wurde. Die Abbildung 2 rechts zeigt die Auswertungsstrategie für jedes einzelne Pixel einer Infrarotkamera während des unterschiedlichen Abkühlverhaltens eines Schadens im Vergleich zu einem definitiv ungestörten Bereich der dokumentierten Fläche im Zeitbereich.



Abbildung 1: Ansicht der Thermografieeinheit zur Beobachtung des Verbundverhaltens im Vierpunkt-Biegeversuch.

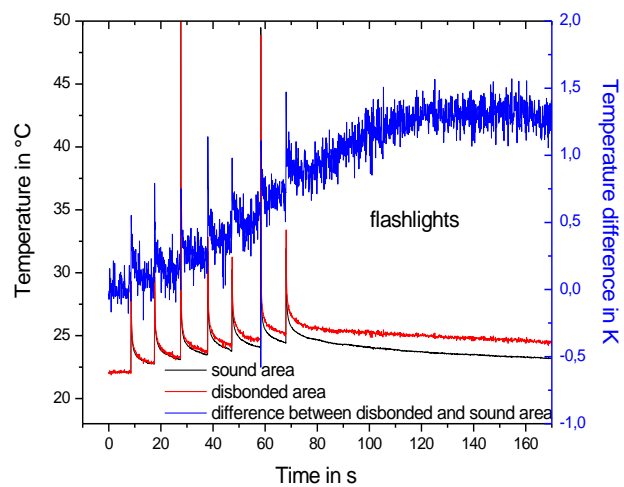
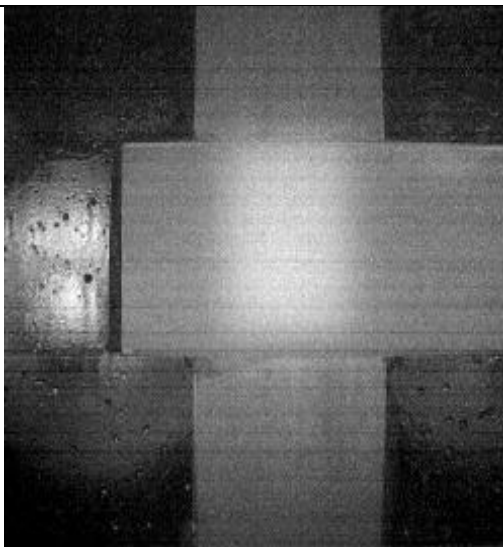


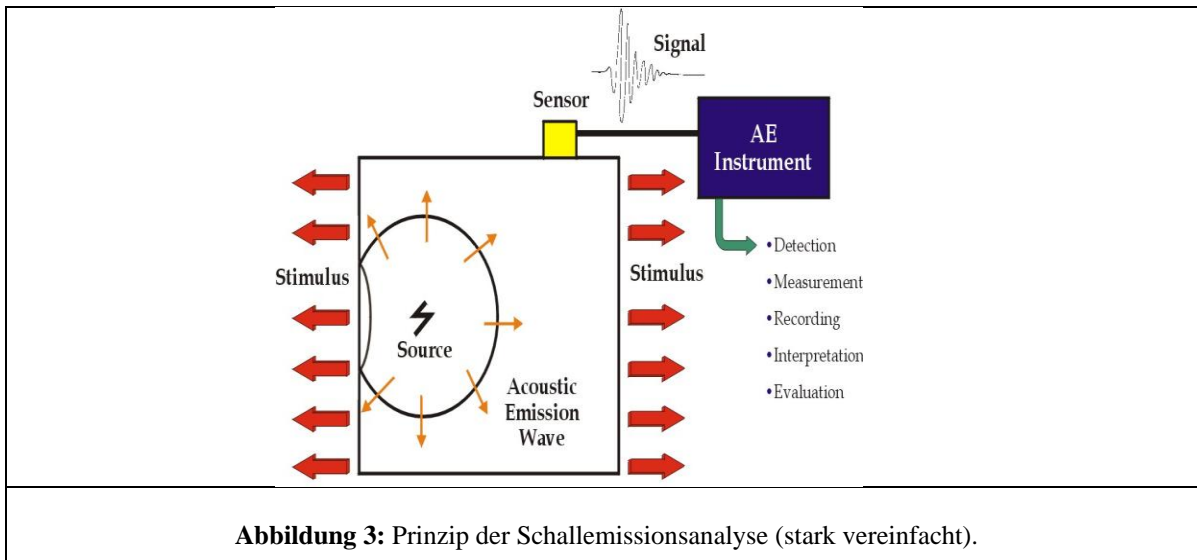
Abbildung 2: Optimierte Erwärmung mittels Blitzlicht in der Verbundfläche zwischen CFK und Betonoberfläche an einer eingebauten Fehlstelle von etwa 50 cm² Grösse (Gesamtausschnitt etwa 625 cm²). Verwendet werden zwei Blitzlichter (jeweils 1500 Watt) mit sieben Blitzern in 60 Sekunden bei einer Auswertungszeit von 2 Minuten. Links: Wärmeflussbild, Rechts: transiente Kurven für die Fehlstelle T_F (rot) und einen Referenzpunkt T_R (schwarz) und die entsprechende Temperaturdifferenzkurve ΔT (blau) der transienten Temperaturkurven.

2.2 Verfahrenskombination mit der Schallemissionsanalyse

Bei der Behälterprüfung wird die Schallemissionsanalyse seit Jahren erfolgreich eingesetzt, um schnell und sicher Bereiche zu orten, die infolge einer Druckbelastung des Behälters Schallemission emittieren, z. B. durch Risswachstum. Die detektierte Schallemission wird bewertet und gibt Empfehlung für weitere, nachfolgende ZfP-Verfahren (falls ökonomisch), die

dann zielgerichtet eingesetzt werden. Als passives Verfahren genügen der Schallemissionsanalyse relativ wenige Sensoren, um ein großes Bauteilvolumen integral zu erfassen. Ein Prinzipschema einer Schallemissionsmessung findet sich in Abbildung 3. Wesentlich ist das Vorhandensein einer äußeren Belastung, damit Schadensbereiche Schallemission emittieren. Durch Überschreiten von lokalen Festigkeitseigenschaften kommt es z.B. bei Rissbildung oder –wachstum zur Freisetzung von elastisch, gespeicherter Energie (auch bei Reibung und Strukturveränderung), die u.a. in Wärme und Schall gewandelt wird. Jedes Material leitet diese Wellen mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit weiter. Die Dämpfung dieser akustischen Wellen ist ebenfalls materialspezifisch und zudem beeinflusst von Umweltfaktoren wie Feuchtigkeit oder, bei heterogenen Materialien wie CFK-verstärktem Stahlbeton auch von den einzelnen Komponenten wie Gesteinskörnungen, Zementmatrix, Bewehrung, Epoxidharz und Kohlefaserlamelle. Der sich ausbreitende Schall kann von akustischen Sensoren aufgezeichnet werden. Aus der Laufzeit der Signale von den einzelnen Schall aussendenden Quellen (aktive Risse, Verbundstörungen, Reibung) zu einer Vielzahl von Sensoren (mindestens zwei bei linearer Ortung), kann auf die Position der aktiven Schädigung zurückgerechnet werden. Die Anordnung, der für die Ortung der Schallquelle verwendeten Sensoren, bezeichnet man als Array. Man verwendet Schallemissionssensoren, die Schallemissionen im für das Material spezifischen Bereich aufzeichnen. Strukturveränderungen im Beton können z.B. mit Sensorfrequenzen zwischen 40 und 100 kHz empfangen werden. Ablösungen der CFK-Lamellen könnten bei höheren Frequenzen (~150 kHz) noch detektierbar sein. Systematische Untersuchungen fehlen hier derzeit noch. Häufig handelt es sich jedoch um kombinierte Schäden, also um Ablösungen in der Grenzschicht zwischen Betonoberfläche und Rissentwicklung im Beton, die sekundär zur Schädigung in Form von Verbundverlust führen. Für das Detektieren derartiger Phänomene können auch Breitbandsensoren verwendet werden. Störende Effekte im niedrigen und für die Schadensentwicklung untypischen Bereich können herausgefiltert werden. Die Schallemissionsanalyse wird bereits mit Erfolg an Brückenbauwerken eingesetzt⁴, um insbesondere Risswachstum zu detektieren und zu lokalisieren. In der Regel erfolgt der Messaufbau und die Messung ohne Einschränkung des Straßenverkehrs. Der Straßenverkehr auf der Brücke wird genutzt, um die notwendige, äußere Belastung zu erzeugen, unter denen Schadensbereiche Schallemission erzeugen.

Wie im vorangegangenen Kapitel näher beschrieben wurde, bietet die Thermografie die Möglichkeit präziser Untersuchung von vorhandenen Schäden und deren Abmessungen im oberflächennahen Bereich. Durch die Kombination mit dem zerstörungsfreien Prüfverfahren Schallemissionsanalyse soll die Detektionsgeschwindigkeit von Schäden, insbesondere Delamination, sowie die Detektierbarkeit auch von kleinen Schäden deutlich gesteigert werden. Insbesondere Schäden, die während der Nutzung des Bauwerks auftreten und sich verändern (wachsen) sind interessant.

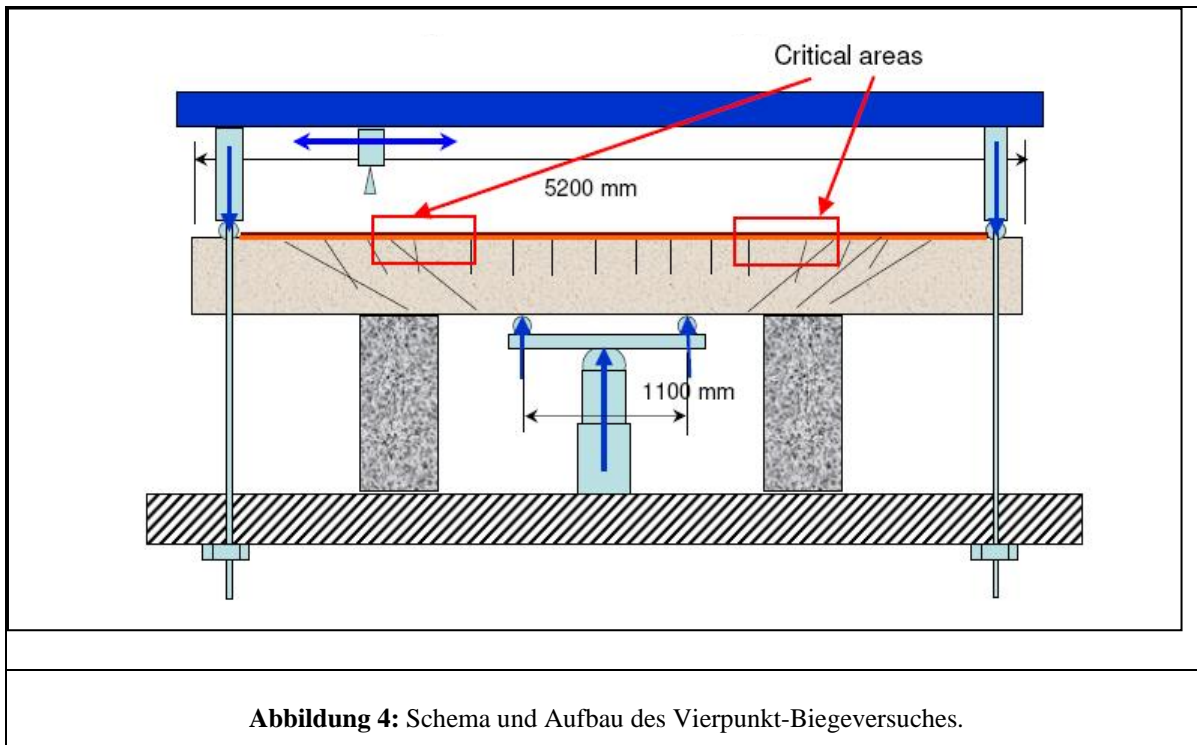


3.0 Versuch

Ein Stahlbetonträger, der mit zwei CFK-Lamellen verstärkt ist, wird durch Vierpunkt-Belastung bis zum Versagen beansprucht. Der Versuch wird durch eine Schallemissionsmessung, visuelle Inspektion und Thermographiemessungen begleitet⁵.

3.1 Belastung und Versagensprognose des kohlefaserverstärkten Betonbalkens

Die Belastung erfolgt durch Vierpunkt-Biegung mit einem Stempel, der den Balken durch eine Kraft F mittig von unten belastet (siehe Abb. 4), wobei ein konstantes maximales Biegemoment im Mittenbereich über eine Länge von 1100 mm eingeleitet wird. Der Stahlbetonbalken hat eine Länge von 5200 mm, eine Breite von 500 mm und eine Höhe von 300 mm. Der verwendete Beton entspricht der Klasse C50/60. Durch die Wahl der Bewehrungslage(n) ergeben sich in den Drittelpunkten des Balkens kritische Bereiche. Hier überlagern sich die Biege- und Schubspannungen. Der Balken wird im Randbereich des Balkens durch Widerlager gehalten. Die aufgeklebten zwei CFK-Lamellen (orange, siehe auch Abb. 5) liegen im Randfaserbereich der Zugzone des Balkens und enden vor den Widerlagern. Es liegen bereits Erfahrungen an zwei CFK-verstärkten Stahlbetonträger gleicher Bauart vor, die unter quasi-identischen Bedingungen belastet worden sind: das Versagen der CFK-Lamellen tritt zuerst an einem der beiden Drittelpunkte auf. Diese Bereiche sind für die Schallemissionsmessung von großem Interesse. Desweiteren tritt bis zu einer Belastung von etwa 100 kN eine Vielzahl von Biegerissen auf. Diese sind zumeist unkritisch bei einer Rissöffnungsbreite bis etwa 2 mm. Die weitere Belastung führt mit steigender Belastung zu einem zunehmenden Ablösen des Betons von der Bewehrung. Die gesamte Zugbelastung wird mehr und mehr nur noch von den CFK-Lamellen getragen. Parallel dazu nehmen Schubrisse in Ihrer Anzahl und in ihrer Größe zu. Das Versagen tritt ein, wenn Risse im Beton über die gesamte Balkenbreite zusammenwachsen. Es bilden sich Keile, die aus dem Betonverbund direkt unterhalb der Lamelle herausbrechen und so zu einer deutlichen Schwächung des Verbundes CFK-Lamelle/ Beton führen. Die Folge ist ein schlagartiges Versagen der beiden CFK-Lamellen über den Grossteil ihrer Länge.



3.2 Einsatz der Schallemissionsanalyse

Es wird mit zwei 8-Kanal Schallemissionssystemen A und B von Physical Acoustics gearbeitet. In Abbildung 5 links ist eine Draufsicht auf dem Betonbalken mit samt der applizierten Sensoren zu sehen. Die Schallemission wird von zwei unterschiedlichen Sensortypen erfasst. Die Schallemission von sieben 150 kHz-Sensoren (PAC R15I), die mittig auf einer CFK-Lamelle angeordnet sind, wird vom Schallemissionssystem A erfasst. Das Schallemissionssystem B verwendet vier 150 kHz-Resonanzsensoren (PAC R15), die auf der zweiten CFK-Lamelle entlang der Mittellinie appliziert sind. Zusätzlich werden noch zwei Breitbandsensoren 100 kHz – 1000 kHz (PAC WD) auf der zweiten Lamelle, sowie zwei weitere Breitbandsensoren auf dem Betonbalken neben der CFK-Lamelle angekoppelt. In Abbildung 5 rechts sind die genauen Sensorpositionen angegeben.

Die Einstellungen der Hardware beider Schallemissionssysteme sind in der Tabelle 1 zusammengefasst. Zur Registrierung kommen nur Signale („Hits“), die einen maximalen Spannungsausschlag (Amplitude) von mindestens 34 dB_{AE} bei einer Vorverstärkung von 40 dB_{AE} besitzen. Zur Analyse werden nur Schallemissionsereignisse verwendet, die aus der linearen Ortung („Events“) stammen. Auf diese Weise wird auch die Datenmenge reduziert und gefiltert. Ein linear lokalisiertes Schallemissionsereignis („Event“) setzt sich aus zwei zeitnahen Hits zusammen, die an unterschiedlichen Sensoren registriert werden. Das Schallemissionssystem A verwendet sieben R15I-Sensoren (S1-S7, siehe Abb. 5) in gleichen Abständen von 0,5 m für die lineare Lokalisation. Das Schallemissionssystem B verwendet ebenfalls eine gemeinsame lineare Ortungsgruppe aus allen, einschließlich den auf dem Betonbalken applizierten Sensoren. Diese Vorgehensweise ist berechtigt, da – anhand von Vorversuchen nachgewiesen – kaum Unterschiede in der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit nachweisbar sind, und die mittels Bleistiftminenbrüchen kontrollierte Ortungsgenauigkeit dies bestätigt. Beide Schallemissionssysteme verwenden quasi-identische Softwareeinstellungen für die lineare Lokalisierung, wobei als Schallgeschwindigkeit 2500 m/s verwendet wird.



Abbildung 5: Positionen von Sensoren der Schallemissionssysteme A und B auf dem mit CFK-Lamellen verstärkten Stahlbetonträger 5200 mm x 500 mm x 300 mm.

Schallemissionssystem	A	B
Meßsystem	PAC μ DISP-4 8 Messkanäle	PAC MISTRAS 2001 8 Messkanäle
Sensortyp	7x PAC R15I	4x PAC R15 4x PAC WD
Sensorenposition (siehe Abb. 5)	CFK-Lamelle rechts	4x PAC R15 und 2x PAC WD auf CFK-Lamelle links 2x PAC WD auf Betonbalken
Ankopplungsmedium	Wälzlagerfett	Prestik [®] - Elastomer
Vorverstärkung	40 dB _{AE} integriert im Sensorgehäuse 20 Hi: 20 – 1200 kHz	40 dB _{AE} Vorverstärker PAC 1220A mit Hardware-Steckfilter: BP 100 - 400 kHz (PAC R15) 20 Hi = 20 -1200 kHz (PAC WD)
Software-Filter	20 – 400 kHz	20 - 400 kHz (PAC R15) 20 - 1200 kHz (PAC WD)
Auswertungsschwelle	34 dB _{AE}	
Schallemissionsparameter	Events aus linearer Ortung (Schallgeschwindigkeit: 2500 m/s)	
Externer Parameter	Kraft in kN	

Tabelle 1: Einstellungen der Schallemissionsanalyse.

3.3 Versuchsdurchführung

In der Abbildung 6 ist der zeitliche Verlauf der Belastung gezeigt, als Kraft in kN über der Zeit in sec (rote Linie). Die Belastung des Stahlbetonbalkens mit der Kraft F erfolgt in Stufen, wobei in jeder Stufe eine Mindesthaltezeit von 180 s eingehalten wird. Während der Haltephasen werden viermal Thermographieaufnahmen gemacht (siehe schwarze Linien in Abb. 6). Die Schallemissionsmessung wird dabei nicht unterbrochen, da es kaum zu „Störgeräuschen“ durch die Thermographiemessung kommt. Die Belastung des Betonbalkens erfolgt bis zum Versagen der CFK-Lamellen. Zum Schutz der Sensoren werden alle Sensoren des Systems B nach der Belastung bei etwa 275 kN demontiert (siehe schwarze Linie in Abb. 6). Vom System A verbleiben lediglich zwei Sensorpaare (Sensor S3, S4 und S6, S7) auf der anderen CFK-Lamelle, die sich jeweils um den 1/3 und 2/3 Punkt befinden. Zu Beginn der letzten Belastungsstufe werden auch diese Sensoren entfernt (siehe schwarze Linie in Abb. 6). In diesem Belastungsintervall versagen beide CFK-Lamellen bereits bei einer Last von 260 kN. Der Stahlbetonbalken wird insgesamt zweimal völlig entlastet. Die erste Vollentlastung findet nach der ersten Belastung um 80 kN statt. Diese Entlastung ist notwendig, um den Balken auszurichten. Die zweite Entlastung findet am Ende des ersten Messtages statt. Die grünen Balken in Abb. 6 zeigen die Zeitpunkte, an denen das Schallemissionssystem auf Pause geschaltet wird, um z.B. visuelle Prüfungen am CFK verstärkten Stahlbetonbalken vorzunehmen. Die Breite der grünen Balken entsprechen der zeitlichen Länge dieser Pausen.

3.4 Ergebnisse und Diskussion

Zur Analyse der Schallemission wird die Aktivität von linear lokalisierten Ereignissen verwendet. Eine erste Analyse der Messdaten von Merkmalen einzelner Schallemissionssignale (Amplituden- und Frequenzanalyse, Korrelation von Signalmerkmalen etc.) geben keinen unmittelbaren Hinweis auf die Möglichkeit, zwischen Rissbildung im Stahlbetonträger und (adhäsiver bzw. kohäsiver) Ablösung in der CFK/Stahlbeton-Grenzfläche zu unterscheiden. Ein möglicher Grund ist, dass es bei diesem Versuch kaum zur Delamination im Vorfeld des schlagartigen Versagens der CFK-Lamellen kommt.

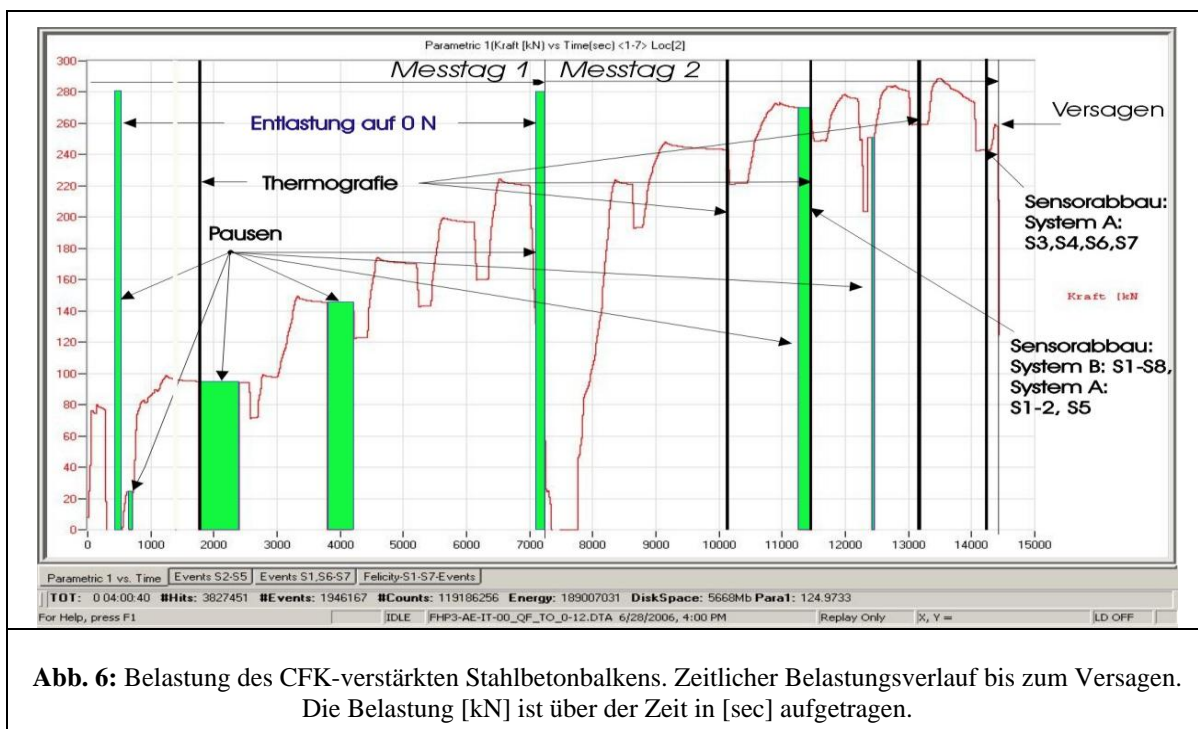


Abb. 6: Belastung des CFK-verstärkten Stahlbetonbalkens. Zeitlicher Belastungsverlauf bis zum Versagen. Die Belastung [kN] ist über der Zeit in [sec] aufgetragen.

In der Abb. 7 unten findet sich die ortsabhängige, zeitliche Entwicklung der linearen Ortungsereignisse („Events“) vom ersten Messtag mit dem Messsystem A. Das Ergebnis der linearen Ortung durch das System B deckt sich im wesentlichen mit den Ortungsergebnissen des Systems A. Die Summe von registrierten Ortungsergebnissen an der jeweiligen zeitlichen und örtlichen Position ist in der Abb. 7 farblich codiert. Es wird erwartungsgemäss starke Schallemission in der Balkenmitte bis zu einem Belastungsniveau von etwa 100 kN detektiert. Neben der erstmaligen Belastung, die erfahrungsgemäss immer mit starker Schallemission verbunden ist, treten hier vermehrt Biegerisse auf, die vornehmlich in der Balkenmitte auftreten. In der Abbildung 7 oben ist ein typisches Rissbild (rot angezeichnet) eines identischen CFK verstärkten Stahlbetonbalkens im Vierpunktbiegeversuch nach den ersten Belastungsstufen zu sehen. Interessanterweise wird hier auch am 2/3 Punkt starke Schallemission lokalisiert. Die weitere Belastung am ersten Messtag (siehe Abb. 7 unten) zeigt immer weniger aktive Schallemission, insbesondere aus der Balkenmitte. Zum Ende des ersten Versuchstages wird wieder verstärkt Schallemission am 2/3 Punkt detektiert, aber auch am 1/3 Punkt wird die Schallemission wieder aktiver. Nach vollständiger Entlastung wird der Versuch am zweiten Tag fortgesetzt⁵. Insbesondere von Interesse ist das Verhalten der Sensoren, die unmittelbar in der Nähe des 1/3 und 2/3 Punktes liegen, um eine Aussage über die Schädigung des Verbundes CFK-Lamelle/ Stahlbeton zu bekommen. So kommt es hier ab etwa 250 kN zu einer exponentiellen Zunahme der Schallemissionsaktivität, auch in den Haltephasen, und eine abwechselnde hohe Schallemissionsaktivität zwischen dem 1/3 und 2/3 Punkt⁵.

Beide Schallemissionsmesssysteme liefern vergleichbare Ergebnisse, obwohl die Sensortypen und deren Positionen zwischen den beiden Schallemissionssystemen nicht identisch sind. Desweiteren ist festzuhalten, dass die entstehende Schallemission an einer CFK-Lamelle auch vom anderen System registriert werden kann. In der Abb. 8 oben ist die Summe aller lokalisierten Ereignisse („Events“) über der zeitlichen Belastung (als Kraft in kN) gezeigt. Der verwendete Graph dient bei der Druckbelastung von Faserverbundwerkstoffen und an Betonstrukturen zur Errechnung des Felicity-Verhältnisses. Die obere Grafik zeigt den Verlauf vom Messsystem A; hierbei sind sieben 150 kHz-Sensoren auf einer CFK-Lamelle angebracht. Die mittlere Grafik zeigt den Verlauf vom Messsystem B, wobei insgesamt acht Sensoren (4x breitbandig, 4x 150 kHz) auf der anderen CFK-Lamelle appliziert sind. Die untere Grafik in Abbildung 8 zeigt die Summe von Rissen über der Belastung in kN, die visuell an der Betonoberfläche gefunden werden. Es ist zu erkennen, dass die visuell gefundenen Risse auf der Fenster- und Raumseite sich annähernd gleich verhalten und nahezu identische Werte aufweisen. Dies ist auch ein Grund für die gute Übereinstimmung der Schallemissionsmessergebnisse zwischen dem System A (Raumseite) und B (Fensterseite).

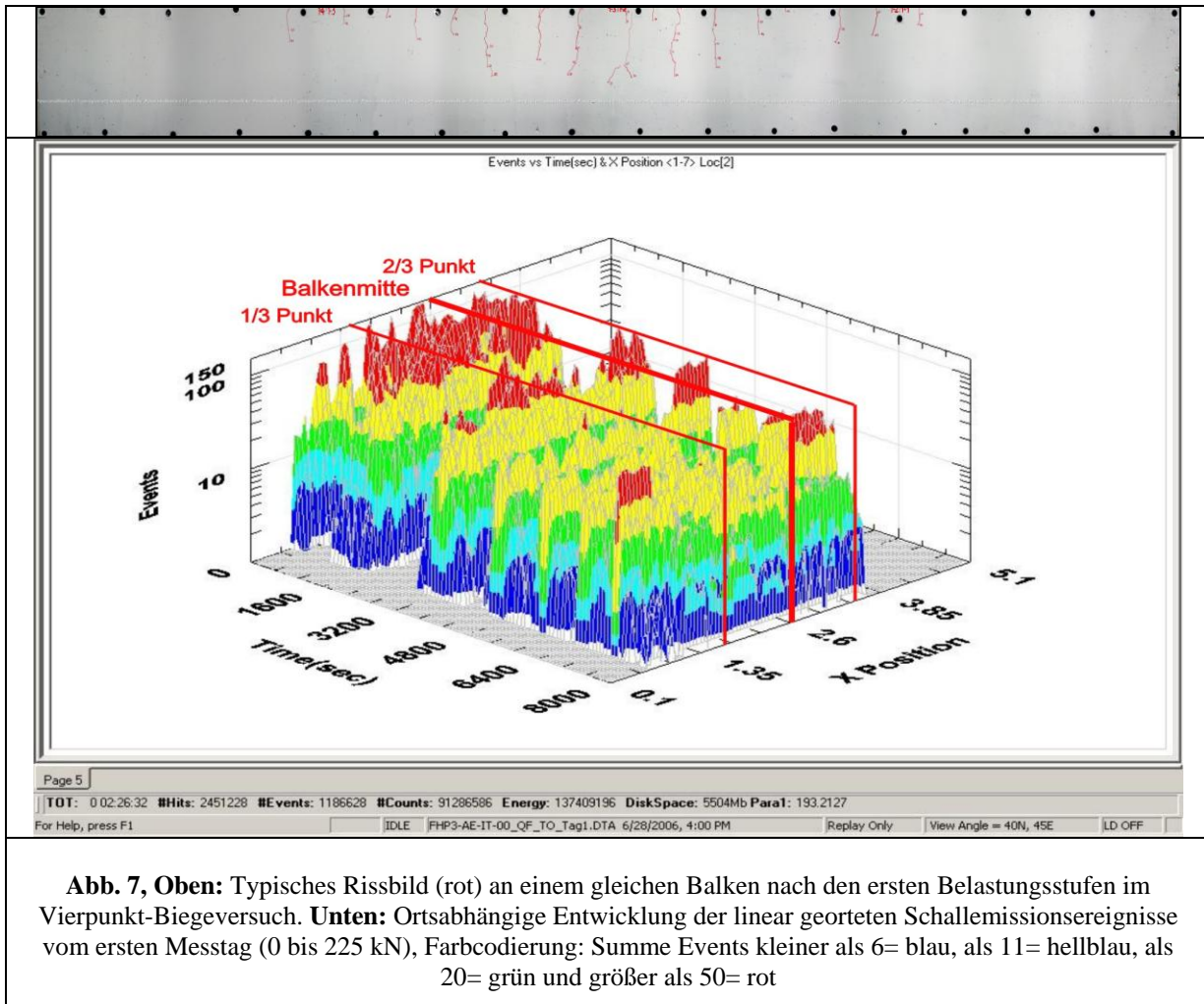


Abb. 7, Oben: Typisches Rissbild (rot) an einem gleichen Balken nach den ersten Belastungsstufen im Vierpunkt-Biegeversuch. **Unten:** Ortsabhängige Entwicklung der linear georteten Schallemissionsereignisse vom ersten Messtag (0 bis 225 kN), Farbcodierung: Summe Events kleiner als 6= blau, als 11= hellblau, als 20= grün und größer als 50= rot

In allen drei Grafiken der Abbildung 8 lassen sich drei Bereiche unterscheiden:

Im ersten Bereich bis zu einer Belastung von etwa 100 kN (bis zum ersten schwarzen senkrechten Strich) erfolgt ein starker Anstieg der Eventsumme mit zunehmender Belastung. Die Anzahl der Risse zeigen ebenfalls eine lineare Zunahme. Die Bildung von Biegerissen erfolgt vornehmlich in der Balkenmitte. In Abb. 7 unten ist zu erkennen, dass starke Schallemission nicht nur in der Mitte, sondern über den gesamten Balken geortet wird.

Der zweite Bereich bis zu einer Belastung von etwa 250 kN (bis zum zweiten schwarzen senkrechten Strich) erfolgt die Zunahme der Eventsumme und die Anzahl der Risse quasi-linear mit der steigenden Belastung. Die Zunahme der Risse ist in diesem Bereich grösser bzw. die Zunahme der Eventsumme kleiner als im ersten Bereich bis etwa 100 kN. In diesem Bereich scheinen nun vermehrt auch Schubrisse aufzutreten, die gross in Ihrer Anzahl, aber gering im Risswachstum sind. Desweiteren finden nun auch vermehrt Ablösungen der Bewehrungslagen von der Betonmatrix statt. Der gestrichelte schwarze Strich in Abbildung 8 markiert die Belastung von 225 kN. Dies ist das maximale Belastungsniveau des ersten Messtages. Der Balken wird total entlastet und am nächsten Tag wieder voll belastet. Es kommt dadurch zu einem Sprung in den einzelnen Graphiken, da durch diese totale Be- und Entlastung zusätzliche Risse bzw. Risswachstum aufgetreten sind.

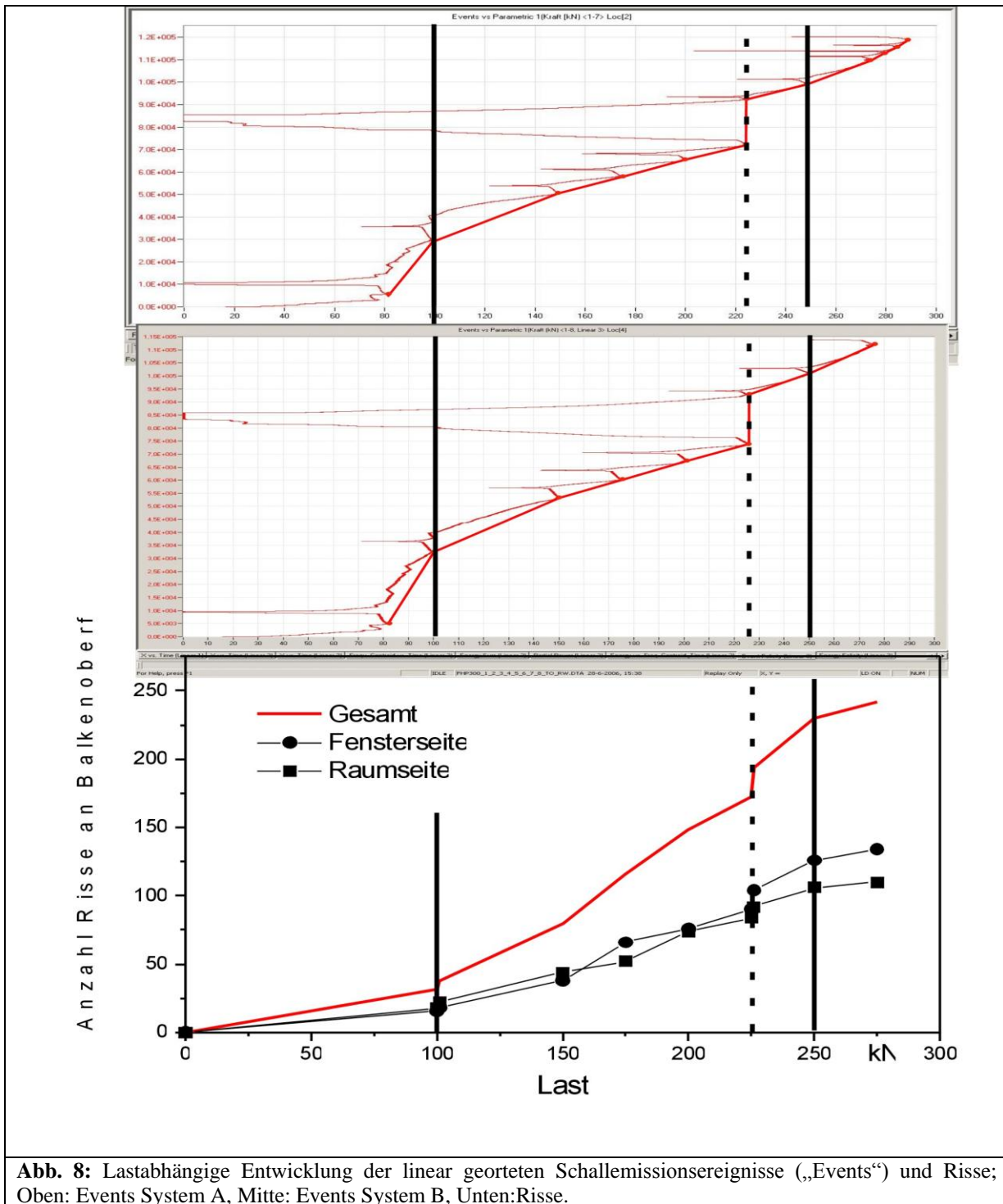


Abb. 8: Lastabhängige Entwicklung der linear georteten Schallemissionsereignisse („Events“) und Risse; Oben: Events System A, Mitte: Events System B, Unten: Risse.

Die weitere Steigerung der Belastung oberhalb von 250 kN (3. Bereich) führt zu einem zunehmend progressiven Anstieg der Eventsumme als Funktion der Kraft während der Belastungsphasen. Nach Erreichen der Belastungsstufe von 275 kN werden 3 Sensoren vom System A und alle Sensoren von System B entfernt. Die letzten drei Belastungsstufen werden nur vom System A begleitet. Die letzte mit Schallemission begleitete höchste Belastungsstufe zeigt erwartungsgemäß die stärkste Zunahme der Eventsumme pro Belastungserhöhung. In Abb. 6 zeigt sich in diesem Belastungsintervall die stärkste Abnahme in der Kraft-Zeit-Kurve während der Haltephase. Das Verbundsystem CFK-Lamelle/ Stahlbeton geht in ein kritisches Belastungsstadium (verstärkte Schädigung durch Rissbildung und Risswachstum) über. Dies

wird untermauert durch die starke Schallemission, die während der Haltephase auftritt⁵. Die Zunahme an Rissen ist im letzten Bereich nur bis zu einer Belastung von 275 kN dokumentiert. Tendenziell scheint die Zunahme an Rissen gegenüber dem zweiten Bereich (100 – 250 kN) abzunehmen (siehe Abb. 8 unten). Die Risse scheinen in dieser kritischen Belastungsphase eher schnell zu wachsen bzw. zusammen zu wachsen, als dass neue Risse entstehen. Folge ist, das Zusammenwachsen von Keilen, die herausbrechen und zum Versagen der CFK-Lamellen in den nachfolgenden Belastungen führen. Die zusätzliche Korrelation mit dem Risswachstum (Bruchfläche) wäre notwendig und zielführender. Sie konnte leider in diesem Rahmen nicht durchgeführt werden. Mit dem Einsatz der Schallemissionsanalyse konnte die Schädigung des Verbundes früher erkannt werden (im Vergleich zu den bisherigen Versuchen) und mit Thermographieaufnahmen dokumentiert werden.

4.0 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kombination von linearer globaler Ortung mittels Schallemission mit der lokalen Verifizierung der Schadensgröße durch die aktive Infrarotthermografie verbessert und beschleunigt den Nachweis von Schäden, die während der Nutzung der Infrastruktur auftreten. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Schallemissionsmessung zur Anzeige und Ortung von kritischen Zuständen an kohlefaserverstärkten Stahlbetonbalken geeignet ist. Weitere Versuche sind notwendig, insbesondere um die Praxistauglichkeit der Schallemissionsanalyse im Sinne einer Übersichtprüfung an realen Bauwerken zu untersuchen. Die Schallemissionsmessung zeigt ab einer Belastung von 250 kN einen zunehmenden progressiven Anstieg in der Anzahl der lokalisierten Ereignisse („Events“) als Funktion der Belastung. Desweiteren kommt es ab Belastungen oberhalb von 250 kN während der Haltephasen zur Schallemissionsaktivität und es treten bei der weiteren Belastungszunahme immer stärker werdende Schallemission im Bereich des 1/3 und 2/3 Punktes auf. So kommt es während der Belastungszunahme erst an einem Drittpunkt zu einer höheren Eventrate, um unter gleichzeitigem Anstieg der Eventrate am anderen Drittpunkt wieder zu sinken. Dieses gesamte Verhalten könnte auf ein bevorstehendes instabiles Bruchversagen (komplette Delamination der CFK-Lamelle) hinweisen. Bei der Prüfung und Bewertung eines realen Bauwerks mit Hilfe der Schallemission wären dies deutliche Anzeichen für einen kritischen Schädigungszustand mit der Konsequenz, die Belastung zu stoppen bzw. das Bauwerk zu entlasten und für weitere Untersuchungen außer Betrieb zu nehmen. Parallel ablaufende Entwicklungen zu kabellosen Kommunikation zwischen Sensor und Datenerfassungs-/ Datenverarbeitungseinheiten sowie Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) führen zu realistischen Dauerüberwachungssystemen für bedeutende zyklisch beanspruchte Konstruktionen, z.B. Brücken.

Referenzen

¹ Johnson, D.E., Shen, W.H., Finlayson, R.D.: Acoustic emission evaluation of reinforced concrete beam with graphite composite laminate, Physical Acoustics Corporation, Princeton, NJ USA, 2000.

² Helmerich, R., Maierhofer, C., Röllig, M., Arndt, R., Vielhaber, J.: Bond quality survey of loaded RC-beams with CFRP-plate repair using impulse-thermography, Proceedings of the International Conference IABMAS 2006, Porto, pp. 331.

³ Arndt, R., Helmerich, R., Maierhofer, C., Röllig, M.: Quantitative Pulse-Phase-Thermography for composites and concrete structures, Structural faults and repair, 2006, Edinburgh.

⁴ BA 86/06 – Advise Notes on Non-Destructive Testing of Highway Structures, Highway Agency, United Kingdom, August 2006

⁵ Helmerich, R., Löhr, M., Bohse, J., Effner, U.; Röllig, M., Vielhaber, J., Popp, P., Schultz, A., Machbarkeitsstudie zur Kombination von aktiver Infrarotthermografie mit Schallemission, BAM- interner Bericht, Berlin 2007