

Analyse der Schadensmechanismen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mittels zerstörungsfreier Prüftechniken

Stephan PIRSKAWETZ¹, Götz HÜSKEN¹, Klaus-Peter GRÜNDER¹, Daniel KADOKE¹
¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: stephan.pirskawetz@bam.de

Kurzfassung. Der durch Kräfte senkrecht zur Stabachse belastete Balken ist eines der Haupttragerelemente des Stahlbetonbaus. Biegebalken finden unter anderem Anwendung in Form von Brückenträgern oder Unterzügen. Die bei maximaler Beanspruchung auftretenden Versagensformen unterteilen sich dabei in Biege- und Querkraftversagen (Schubversagen). Ein Versagen des Balkens kann je nach Versagensmechanismus mit oder ohne Vorankündigung erfolgen. Gebräuchliche Bemessungskonzepte der Baupraxis zur Dimensionierung entsprechender Tragelemente zielen auf ein Versagen mit ausreichender Vorankündigung (große Verformungen oder breite Risse) ab, wie es z.B. beim sekundären Biegedruckversagen entsteht.

Für die Zustandsüberwachung von Bauwerken (z.B. Brücken) mittels zerstörungsfreier Prüftechniken sind fundierte Kenntnisse zu den bei Biegebeanspruchung auftretenden Schadensmechanismen erforderlich. Im Rahmen eines BAM-internen Projektes sollen durch praxisnahe Untersuchungen an einer brückenähnlichen Referenzstruktur unterschiedliche auf das Tragwerk einwirkende thermische und mechanische Belastungen untersucht werden und in die Entwicklung eines Monitoringsystems einfließen.

Anhand der aus Biegeversuchen vorliegenden Ergebnisse wird der Einsatz unterschiedlicher Methoden der zerstörungsfreien Materialprüfung gezeigt und deren Anwendbarkeit für die Analyse des Verformungsverhaltens von Stahlbetonbalken diskutiert. Hierzu wurde das Verformungsverhalten eines Stahlbetonbalkens ($L = 2,75$ m) in einem Vierpunkt-Biegeversuch im Labormaßstab untersucht. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Charakterisierung der ausschlaggebenden Versagensmodi durch die einzelnen zerstörungsfreien Prüfverfahren und der Vergleich zu klassischen Messmethoden (z.B. Verformungsmessung mittels induktiver Wegaufnahme (IWA)). Die Biegeversuche wurden dazu durch Schallemissionsanalyse (SEA) und optische Verformungsanalyse mittels Stereo-Fotogrammetrie (SF) und Bildkorrelationsverfahren (BKV) begleitet.

1. Einführung

Laut Berichten des BMVI [1], [2] hat sich im Jahr 2010 die Beförderungsleistung im Güterverkehr auf der Straße gegenüber dem Bezugsjahr 1980 mehr als verfünffacht. Prognosen gehen von einer Verachtfachung bis 2025 aus. Insbesondere die Brücken werden durch die steigenden Belastungen in Mitleidenschaft gezogen. Der Zustand von etwas mehr als 50 % der insgesamt ca. 39.500 Brücken im Bundesfernstraßennetz wurde 2015 als „sehr gut“ bis



„befriedigend“ eingestuft. Allerdings erhielten auch mehr als 12 % die Note „nicht ausreichend“ oder „ungenügend“. 87 % der Brücken wurden aus Spann- bzw. Stahlbeton errichtet. Grundlage für die Planung der Sanierung bzw. die Entscheidung für einen Neubau ist die Kenntnis des Tragverhaltens der Brücken. Mit einer Zustandsüberwachung kann der sichere Betrieb bis zur Sanierung gewährleistet und der Erfolg der Maßnahmen kontrolliert werden.

Im derzeit laufenden Themenfeldprojekt „BLEIB - Bewertung, Lebensdauerprognose und Instandsetzung von Brückenbauwerken“ werden durch die BAM Methoden und Techniken zur Zustandsanalyse und -überwachung von Betonbrücken entwickelt und an einer Referenzstruktur getestet. Diese Modellbrücke mit einer Spannweite von 2 x 12 m wurde im Dezember 2016 auf dem Testgelände Technische Sicherheit (TTS) der BAM errichtet. Im Vorfeld wurden Versuche an 3 m langen, bewehrten Betonbalken zur Applikation und Synchronisation der Messsysteme durchgeführt. Des Weiteren wurde die Reaktion der verschiedenen Messsysteme auf die während eines Vierpunkt-Biegeversuchs auftretenden Stadien der Rissbildung und -ausbreitung untersucht. Die Ergebnisse der Schallemissionsmessungen sowie der optischen Messverfahren werden nachfolgend diskutiert.

2. Experimentelle Arbeiten

2.1 Probedesign und -herstellung

Mit der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine können Vierpunkt-Biegeversuche mit einem maximalen Auflagerabstand von 300 cm und einem Lastrollenabstand von maximal 100 cm bis zu einer Höchstlast von 100 kN durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen und der in Tabelle 1 aufgeführten Materialkennwerte der verwendeten Betonmischung wurden die Balken nach EC 2 [3] ohne Teilsicherheitsbeiwert bemessen. Somit ergeben sich bei einem Stahlquerschnitt von $A_s = 4,02 \text{ cm}^2$ (BSt500S) die in Abb. 1 dargestellten Querschnittsabmessungen. Hierbei ist ein Fließen der Bewehrung bei einer Belastung von ca. 60 kN zu erwarten.

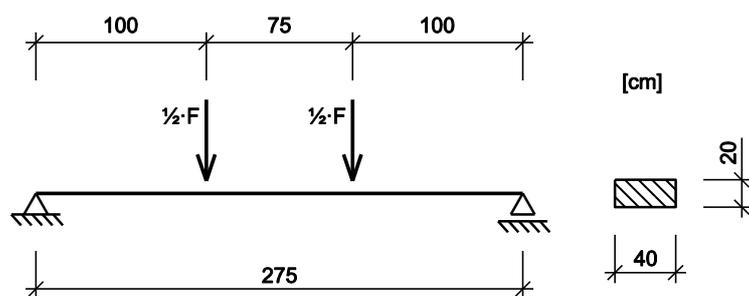


Abb. 1. Statisches System und Querschnittsabmessungen der Biegebalken.

Im Rahmen der Studie sollte auch der Einfluss unterschiedlicher Bewehrungsdurchmesser auf die Rissbildung und -ausbreitung untersucht werden. Daher wurden für die Realisierung des Stahlquerschnittes von $A_s = 4,02 \text{ cm}^2$ zwei Bewehrungsstäbe $\text{Ø} 16 \text{ mm}$ bzw. acht Stäbe $\text{Ø} 8 \text{ mm}$ verwendet. Abb. 2 zeigt die Lage der Bewehrung beider Varianten im Querschnitt und die zugehörigen Balken während der Betonage. Die Balken wurden ohne Querkraftbewehrung (Bügel) hergestellt, um eine im Bereich der Bügel aufgrund der Querschnittsschwächung zu erwartende Erstrissbildung auszuschließen. Im rechnerischen Nachweis ist die einwirkende Querkraft bei maximaler Biegebelastung kleiner als die durch den Balken ohne Querkraftbewehrung aufnehmbare Querkraft ($V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$).

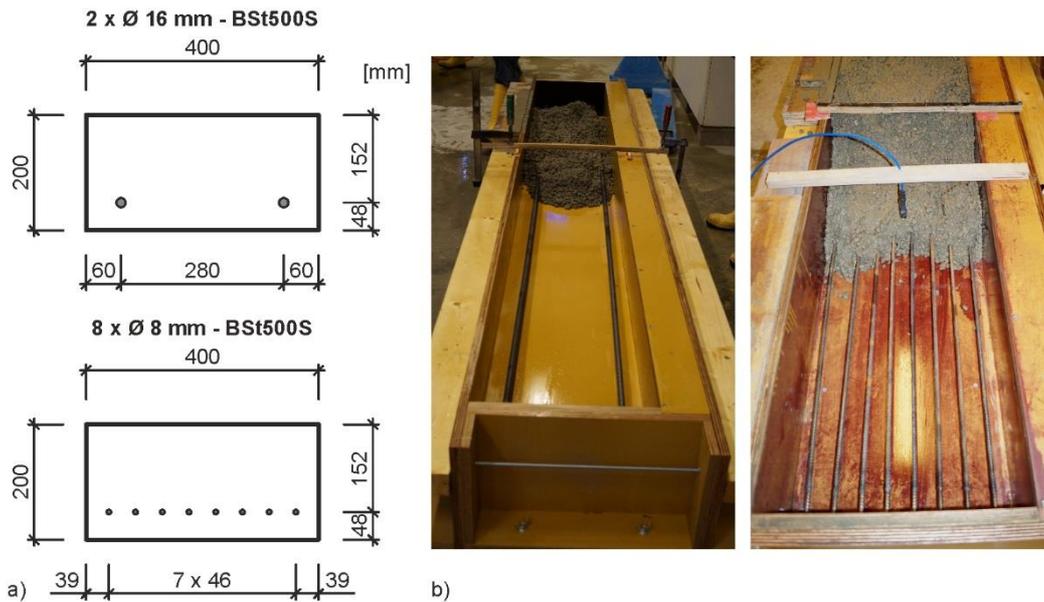


Abb. 2. Varianten der Stahlbewehrung der Biegebalken: a) Lage der Bewehrungsstäbe im Querschnitt; b) Balken während der Betonage.

Die Zusammensetzung der Mischung mit einem Größtkorn von 16 mm sowie die Frisch- und Festbetonkennwerte können Tabelle 1 entnommen werden. Die Zusammensetzung der Betonmischung entspricht dem Typ C (0,45) nach DIN EN 1766. Nach 28 Tagen erreichte die Betonmischung Druckfestigkeiten von ca. 66 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von ca. 4,1 N/mm².

Tabelle 1. Mischungszusammensetzung sowie Frisch- und Festbetoneigenschaften der verwendeten Betonmischung.

Ausgangsstoffe	Menge [kg/m ³]	Parameter	Wert
CEM I 42,5 R	375,0	Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5) [mm]	565
Quarzsand 0-0,5	236,0	Frischbetonrohddichte (DIN EN 12350-6) [kg/m ³]	2390
Quarzsand 0,5-1,0	145,0	Luftgehalt (DIN EN 12350-7) [%]	0,9
Quarzsand 1,0-2,0	163,0	Festbetondichte (DIN EN 12390-7) [kg/m ³]	2380
Quarzsand 2,0-4,0	254,0	Druckfestigkeit (DIN EN 12390-3) [N/mm ²]	66,1±0,9
Kies 4-8	327,0	Biegezugfestigkeit (DIN EN 12390-5) [N/mm ²]	4,1±0,3
Kies 8-16	690,0	E-Modul (DIN EN 12390-13) [N/mm ²]	33333±577
Fließmittel	5,63		
Wasser	169,0		

2.2 Versuchsprogramm

Nach dem Aufbringen einer geringen Vorlast von 250 N erfolgte die Belastung der Balken in einem weggeregelten Vierpunkt-Biegeversuch mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten. Um detaillierte Messungen während der Erstrissbildungsphase zu ermöglichen, wurde zu Versuchsbeginn eine sehr geringe Belastungsgeschwindigkeit von 0,2 mm/min gewählt. Nach dem Übergang vom ungerissenen in den gerissenen Zustand wurde die Belastungsgeschwindigkeit auf 0,5 mm/min erhöht. Zwischen beiden Lastrampen lag eine vierminütige Pause, die zur Umstellung der Messtechnik sowie für Ultraschallmessungen genutzt wurde. Die Entlastung des Balkens erfolgte mit 6 mm/min. Abb. 3 zeigt das Belastungsregime und die daraus resultierenden Kräfte.

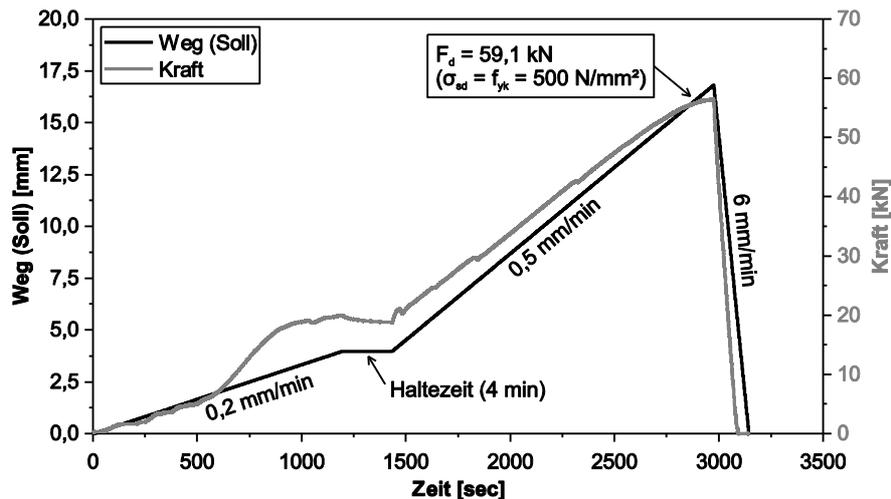


Abb. 3. Belastungsregime und resultierende Kraft des Balkens B2 - 2 Ø 16 mm.

Zur Synchronisation und Steuerung der Messsysteme wurden vom Regler der Prüfmaschine alle 4 s (entspricht 0,013 mm bzw. 0,033 mm gefahrenem Weg) Spannungspulse an die angeschlossenen Geräte gesendet. Zusätzlich wurden weitere Daten wie Kraft und Maschinenweg als elektrische Spannungssignale an die externen Messgeräte übertragen.

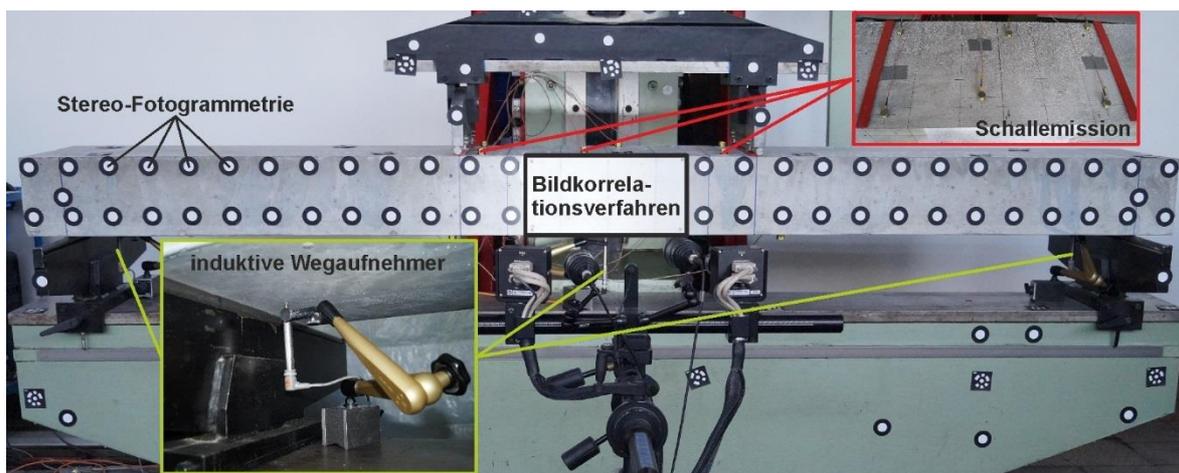


Abb. 4. Balken in der Prüfmaschine mit eingesetzter Messtechnik.

2.3 Schallemission

Zur Aufzeichnung der Schallemissionssignale wurde eine zwölfkanaliges Schallemissionssystem AMSY 6 verwendet. Die zwölf Sensoren vom Typ VS150MS wurden mit Bostik Prestik®, knetbaren Klebepads, an den Balken angekoppelt. Zuvor wurden die entsprechenden Stellen zur Entfernung oberflächlichen Zementleims angeschliffen und gereinigt. Die Positionen der Sensoren sind in Abb. 7 dargestellt. Abb. 7 enthält ebenfalls ausgewählte Positionen der Bleistiftminenbrüche (Hsu-Nielsen-Source, Ø 0,5 mm, 2H) zur Verifizierung der Sensorankopplung mit den zugehörigen Ortungsergebnissen. Der Ortungsfehler ist an allen Positionen kleiner als 2 cm. Dass künstliche Ereignisse an den vier Positionen rechts unten fehlen, ist der Unaufmerksamkeit des Prüfers zuzuschreiben. Die der Ortung zugrunde gelegte Schallgeschwindigkeit des ungerissenen Betons von 4000 m/s wurde anhand der Bleistiftminnebrüche sowie automatischer Sensortests abgeschätzt. Aufgrund des geringen Geräuschpegels der hydraulischen Prüfmaschine konnte die Erfassungsschwelle mit 35 dB auf einen für Versuche an Beton vergleichsweise niedrigen Wert eingestellt werden. Auch der

Bereich des Bandpassfilters konnte mit 25-850 kHz großzügig gewählt werden. Um die Datenmenge zu begrenzen wurde die Aufzeichnung der Wellenformen während der zweiten Belastungsphase mit 0,5 mm/min auf Signale mit Amplituden größer als 45 dB eingeschränkt. Im Folgenden werden nur geortete Schallereignisse diskutiert. Zusätzlich wurden mit den parametrischen Eingängen des Systems die von der Prüfmaschine gemessene Kraft, der Maschinenweg (Regelgröße während des Versuchs) und die Durchbiegung des Balkens (siehe Abschnitt 2.5) aufgezeichnet.

2.4 Verfahren zur Verformungsanalyse

Die beiden eingesetzten kameragestützten Messverfahren zur 3D-Koordinatenbestimmung von Oberflächenmerkmalen des zu untersuchenden Prüfobjektes beruhen auf dem Prinzip der fotogrammetrischen Triangulation. Aus den gemessenen 3D-Koordinaten lassen sich zeit- oder lastabhängig Parameter der Oberflächengestalt, von Bewegungen in sechs Freiheitsgraden, Verschiebungen oder Verzerrungen berechnen. Die kommerziellen Messsysteme der Stereo-Fotogrammetrie (SF) und des Bildkorrelationsverfahrens (BKV) [4] bestehen jeweils aus zwei fotogrammetrisch zueinander kalibrierten Kameras, die auf den zu beobachtenden Oberflächenbereich des Balkens ausgerichtet sind.

Als Oberflächenmerkmale dienen bei der SF aufgeklebte kontrastreiche Kreispunkte. In Abb. 4 sind markierte Biegelinien zu erkennen, die sich über die gesamte Länge des Balkens erstrecken. Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich insbesondere auf die aus der unteren Biegelinie abgeleiteten maximalen Durchbiegungen. Das BKV stützt sich auf die Identifizierung und Verfolgung kleiner Bildbereiche (sogenannter Facetten) im gesamten Messfeld, die durch Besprühen der Oberfläche mit einem kontrastreichen stochastischen Sprenkelmuster aus Graphit erzeugt wurden und im Fokus des verwendeten Korrelationsalgorithmus stehen. Die laterale Messfeldgröße (siehe hellen mittigen Bereich in Abb. 4) wurde hier zu ca. 200 mm mal 350 mm gewählt. Im Abschnitt 3 sind die mit den beiden Messverfahren gewonnenen Ergebnisse dargestellt und im Zusammenhang diskutiert.

2.5 Weitere Messtechnik

Neben den beschriebenen Messverfahren wurden weitere klassische Verfahren zur Messung der Belastung und der Reaktion des Balkens auf diese eingesetzt. Regelgröße während des Versuchs war der Maschinenweg, d.h. die Verschiebung des Kolbens der Prüfmaschine, gemessen mit einem fest installierten induktiven Wegaufnehmer. Die daraus resultierende Kraft wurde über der Traverse zur Aufnahme der Belastungsrollen gemessen. Induktive Wegaufnehmer wurden zur Messung der vertikalen Verschiebungen in der Mitte unter dem Balken und an den Auflagern platziert, aus denen die Durchbiegung des Balkens berechnet wurde.

3. Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die am Balken B2 - 2 Ø 16 mm gewonnen Ergebnisse diskutiert. Der Vergleich der Ergebnisse der drei Verformungsmessungen in Abb. 5a zeigt eine gute Übereinstimmung. Die dreidimensionale Analyse der Daten der optischen Messsysteme offenbart allerdings ein leichtes Verdrehen des Balkens während des Versuchs. Dadurch entstehen an der Vorderseite des Balkens, an der die beiden optischen Systeme messen, etwas größere vertikale Verschiebungen als an der Längsachse der Unterseite. Darauf ist die leichte Diskrepanz zwischen den optischen (SF, BKV) und klassischen Messungen (IWA) zurückzuführen.

In der Kraft-Durchbiegung-Kurve in Abb. 5b sind drei Phasen erkennbar. In Phase 1 zu Beginn der Belastung steigt die Kraft bis 14,5 kN steil und nahezu linear zur Durchbiegung an. Entsprechend der Theorie zum Trag- und Verformungsverhalten befindet sich der

Stahlbetonbalken im ungerissenen Zustand I, in dem die Zugspannungen am unteren Rand die Betonzugfestigkeit nicht übersteigen. Im ungerissenen Zustand werden die Zugspannungen im Wesentlichen vom Beton aufgenommen und der Stahlbetonbalken kann als ein homogenes Bauteil betrachtet werden [5], Trotzdem können in dieser Phase bereits Schallereignisse geortet werden. Insbesondere zum Ende der ersten Phase ist eine Konzentration der Ereignisse in den Bereichen der später makroskopisch sichtbaren Risse erkennbar. Sie liegen im Wesentlichen unterhalb der Bewehrung (siehe Abb. 8a). Gleichermaßen sind im Bereich der späteren Risse bereits erhöhte Dehnungen erkennbar (siehe Abb. 9a)

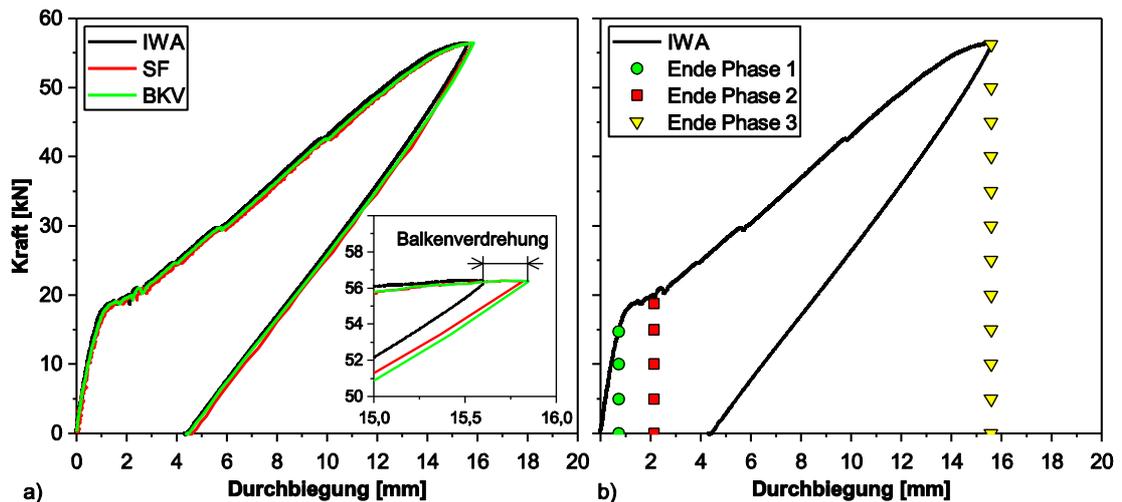


Abb. 5. Kraft-Durchbiegungs-Diagramm: a) Vergleich der verschiedenen Messsysteme der Verformungsmessung; b) Bereiche zur Darstellung der Ergebnisse der Schallemissionsanalyse und der Fotogrammetrie.

Aus der aufgebracht Last von 14,5 kN und unter Berücksichtigung des Eigengewichts von 1,77 kN/m ergibt sich eine Zugspannung von 3,4 N/mm² in der unteren Randfaser des Balkens, welche die in Tabelle 1 gegebene mittlere Biegezugfestigkeit des verwendeten Betons noch nicht übersteigt. Erste Anzeichen für Rissbildungsprozesse (Schallereignisse und Dehnungen in Phase 1) sind jedoch aufgrund geometrischer Imperfektion erkennbar und der Balken geht vom ungerissenen in den gerissenen Zustand 2 über. Dementsprechend ist der zweite Abschnitt der Kurve durch einen Rückgang des Kraftanstieges gekennzeichnet. Es bilden sich makroskopisch sichtbare Risse im Bereich zwischen den Lasteinleitungsrollen aus. Diese Risse verlaufen von der Unterseite des Balkens ausgehend bis über die Ebene der Bewehrung hinaus, welche nun die Zugspannungen aufnimmt. Die Rissbildung mit Rissweiten von bis 0,150 mm ist deutlich in der mit der Fotogrammetrie ermittelten Dehnungsverteilung erkennbar (siehe Abb. 9b). In dieser Phase werden die meisten Schallereignisse geortet. Sie folgen, wie auf der Ansicht des Balkens von unten zu sehen, dem Verlauf der makroskopisch sichtbaren Risse (siehe Abb. 8b). Die Ansicht von vorn zeigt, dass es eine Konzentration der georteten Ereignisse in Höhe der Bewehrungslage gibt. Allerdings wandern die georteten Ereignisse auch mit den Risspitzen nach oben bis ca. $\frac{3}{4}$ der Balkenhöhe. Die Ortungsergebnisse scheinen in dieser Ansicht nicht gut mit den sichtbaren Rissverläufen zu korrelieren. Dies liegt daran, dass die Risse über die verhältnismäßig große Tiefe des Balkens nicht senkrecht zur Vorderseite verlaufen.

Im anschließenden dritten Abschnitt steigt die Kraft wieder nahezu linear an und die Zugspannungen werden vollständig von der Bewehrung aufgenommen. Die Risse wachsen weiter in Richtung der Druckzone. Weitere Risse bilden sich in den Zonen zwischen den Auflagern und den Lasteinleitungsrollen – im Kraft-Durchbiegungs-Diagramm erkennbar an den drei kurzen Pausen im Kraftanstieg. Die Schallemissionsaktivität ist in dieser Phase in

der gleichen Größenordnung wie in Phase 2, wobei die mittlere Amplitude der Hits sogar etwas höher ist. Trotzdem können nur noch wenige Schallereignisse geortet werden und die Ortungen korrelieren nicht mehr mit den sichtbaren Rissen. Ursache sind die ausgeprägten Gefügestörungen. Die dem Ortungsalgorithmus zugrundeliegende Annahme einer homogenen Schallgeschwindigkeit ist durch die Rissbildung nicht mehr erfüllt. Das zeigt sich beim Vergleich der Ortungsergebnisse für die Bleistiftminenbrüche vor und nach dem Versuch. Während die künstlichen Quellen auf der Oberseite des Balkens noch mit einem vor dem Versuch vergleichbaren Fehler geortet werden konnten, ist die Ortung auf der Unterseite nach dem Versuch auf den mittleren Bereich beschränkt. Zudem sind die Ortungsergebnisse ca. 5 cm nach oben verschoben. In Abb. 6 sind die von den Sensoren 2 (Oberseite) und 8 (Unterseite) detektierten Signale dargestellt, deren Ursprung ein Bleistiftminenbruch an der in Abb. 7 mit einem Kreuz markierten Position ist. Die durch die Gefügedegradation verursachte Dämpfung ist parallel zur Hauptzugspannungsrichtung bedeutend größer als senkrecht dazu.

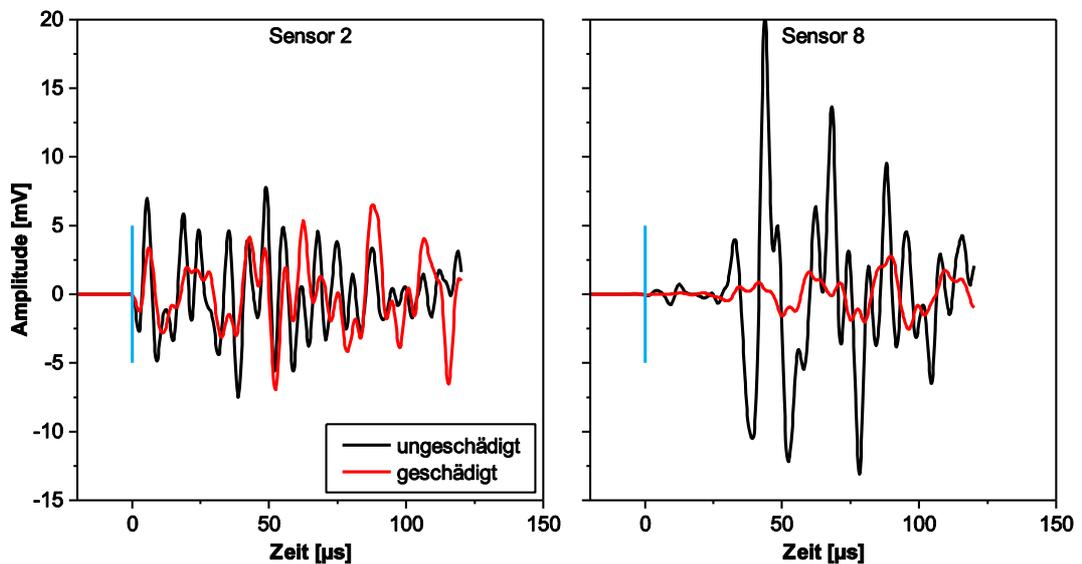


Abb. 6. Einfluss der Schädigung auf die Signalamplitude.

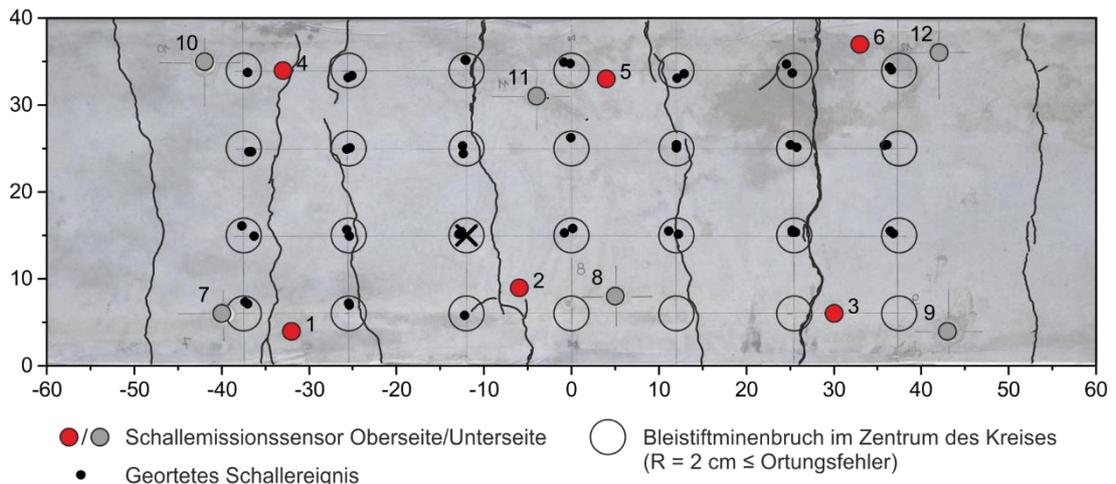


Abb. 7. Positionen der Schallemissionssensoren und der Bleistiftminenbrüche.

Zum Ende der dritten Phase beginnt die Bewehrung zu fließen. Trotz steigender Durchbiegung wird der Kraftanstieg immer kleiner und geht schließlich gegen Null. Um ein vollständiges Versagen des Balkens zu vermeiden wurde der Versuch hier beendet. Nach der Entlastung des Balkens ist eine erhebliche bleibende Verformung erkennbar.

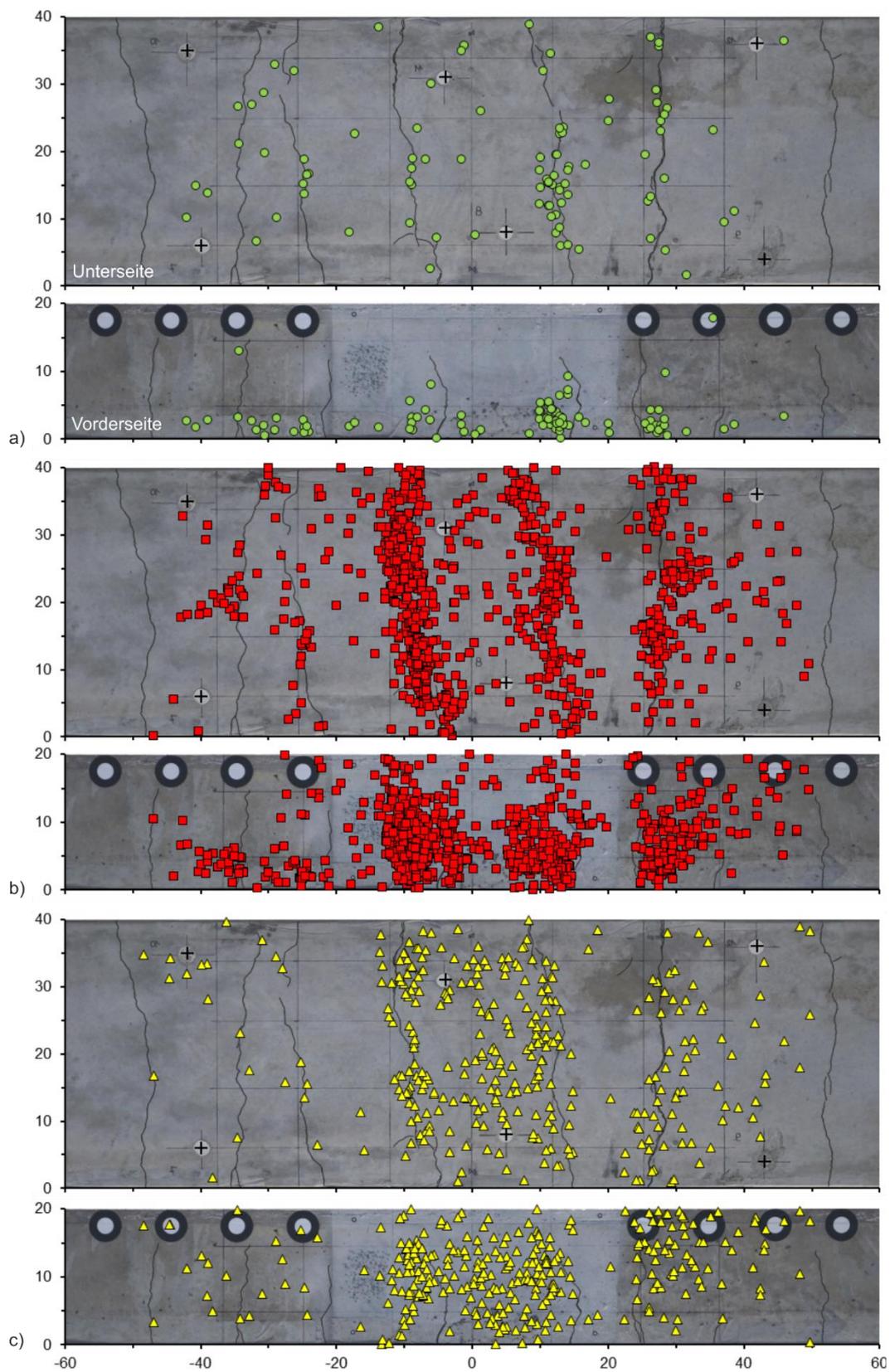


Abb. 8. Ortungsergebnisse der Schallemissionsanalyse. Die farblichen Markierungen entsprechen den in Abb. 5b gekennzeichneten Bereichen: a) geotete Schallereignisse bis zum Ende der Phase 1; b) geotete Schallereignisse bis zum Ende der Phase 2; c) geotete Schallereignisse bis zum Ende der Phase 3.

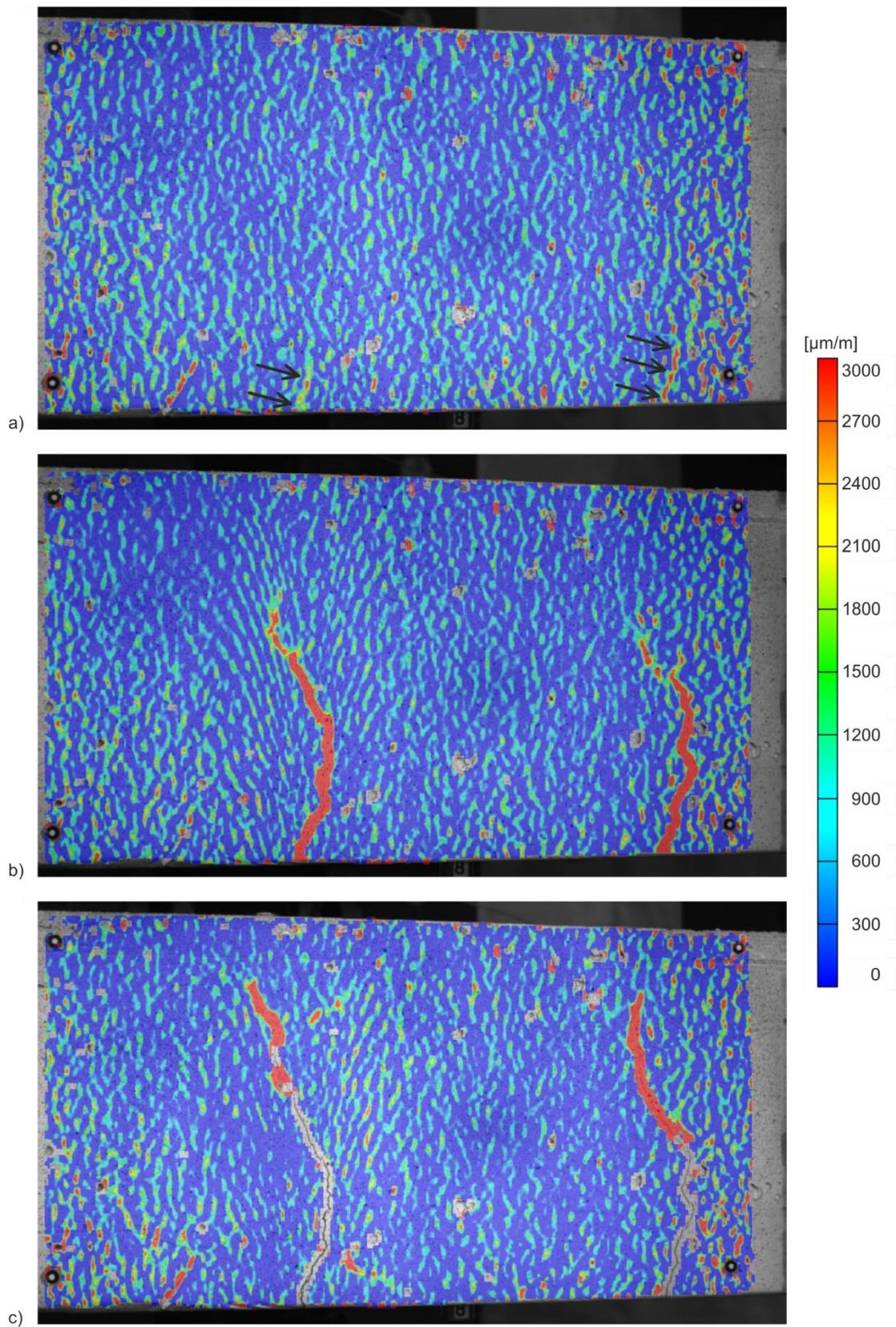


Abb. 9. Ergebnisse der fotogrammetrischen Verformungsmessung zum Ende der in Abb. 5b gekennzeichneten Bereiche: a) Dehnungsverteilung zum Ende der Phase 1; b) Dehnungsverteilung zum Ende der Phase 2; c) Dehnungsverteilung zum Ende der Phase 3.

4. Zusammenfassung

Im Vorfeld zu Versuchen an einem großmaßstäblichen Modell einer Betonbrücke wurden die Applikation von Sensoren und die Synchronisation der Messsysteme an Betonbalken im Labormaßstab getestet. Dabei zeigen die Ergebnisse der optischen Verformungsmessungen sehr gute Übereinstimmungen mit denen klassischer Messtechniken. Die damit mögliche dreidimensionale Erfassung der Verschiebungen erweist sich als großer Vorteil, der mit konventionellen Methoden nur mit erheblichem Mehraufwand erreichbar ist. Allerdings sind die optischen Systeme derzeit noch nicht für eine Dauerüberwachung von Bauwerken geeignet. Diese Aufgabe könnte mit der Schallemissionsanalyse realisiert werden. Die Versuche haben gezeigt, dass der Übergang vom ungerissenen Zustand 1 in den gerissenen Zustand 2, verbunden mit einer Ortung des Risswachstums, zuverlässig detektiert werden kann. Mit Rücksicht auf die Ortungsprobleme in bereits geschädigten Betonstrukturen muss die Anordnung der Sensoren bei der Überwachung von Bauwerken mit Rissen individuell optimiert werden. Der Einfluss von Störgeräuschen war noch nicht Bestandteil der diskutierten Versuche, wird aber beim Monitoring von Brücken eine große Rolle spielen.

Mit den Vorversuchen konnten wertvolle Erfahrungen gesammelt werden. Es ist zu erwarten, dass diese Erfahrungen auf das großmaßstäbliche Modell und schließlich auch auf reale Bauwerke übertragen werden können.

Referenzen

- [1] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen, Bericht zur Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages, Berlin, 22. Mai 2013
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Stand der Ertüchtigung von Straßenbrücken der Bundesfernstraßen, Bericht zur Vorlage an den Ausschuss für Verkehr und digitale Infrastruktur des Deutschen Bundestages, Berlin, 26. Oktober 2015
- [3] Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für Deutschland. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012, ISBN: 978-3-410-20088-8
- [4] www.gom.com
- [5] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Springer, 2010, ISBN: 978-3-540-70638-0