

Bildsequenzanalyse zur Rissdetektion bei Belastungsversuchen an Stahl- und Spannbetonbauteilen

Robert KOSCHITZKI

Zusammenfassung

Probelastungen können zum experimentellen Nachweis der Tragfähigkeit von Massivbaukonstruktionen eingesetzt werden, wenn dies auf rechnerischem Weg nicht möglich oder zu aufwändig ist. Die Zielstellung des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung und Erprobung von speziellen Indikatoren, welche für die sichere Beurteilung von Massivbaukonstruktionen mit geringem Ankündigungsverhalten geeignet sind. Der Begriff „Ankündigung“ bezieht sich dabei auf die beim Belastungsversuch wichtige Bestimmung der Versuchsgrenzlast, deren Überschreiten zu inakzeptablen Schädigungen führt und daher mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden muss. Durch den Einsatz und vor allem die Kombination moderner Messverfahren (Photogrammetrie und Schallemission) sollen bereits kleinste Strukturveränderungen im Tragwerk während des Belastungsversuches erfasst und beurteilt werden, so dass eine nicht tolerable Schädigung oder gar ein Versagen des Tragwerkes mit hinreichender Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

Der Beitrag gibt einen Einblick in die Thematik zur Bestimmung von Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen mit geringem Ankündigungsverhalten. Er befasst sich mit der frühzeitigen Detektion von Schubrisen auf Basis der Bildsequenzauswertung und Schallemissionsanalyse.

1 Einleitung

Die Aufgabe des Bauingenieurs besteht in der Gewährleistung der Sicherheit von baulichen Anlagen und Konstruktionen während der geplanten Nutzungszeit. Das Bauwerk muss demnach den mechanischen Einwirkungen mit ausreichender Zuverlässigkeit widerstehen und während der Nutzungszeit in einem gebrauchsfähigen Zustand bleiben. Diese Anforderungen beinhalten sowohl eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit als auch die Gewährleistung der Tragsicherheit einer Konstruktion. Die Bestimmung und Bewertung dieser Tragsicherheit erfolgt in der Regel auf rechnerischem Wege. Auch bei vorhandenen Gebäuden (z. B. im Fall der Umnutzung) ist der Nachweis einer ausreichenden Tragsicherheit für die neu geplante Beanspruchung zu führen und es tritt nicht selten der Fall auf, dass Informationen zur rechnerischen Tragsicherheitsbewertung nicht mehr verfügbar sind. In derartigen Fällen stellt die experimentelle Tragsicherheitsbewertung (auch Belastungsversuch oder Probelastung) alternativ ein Verfahren zur sicheren und gleichzeitig wirtschaftlichen Beurteilung der Tragfähigkeit dar. In vielen Fällen können damit die Trageigenschaften wirklichkeitsnah eingeschätzt und Tragreserven erschlossen werden, so dass eine aufwändige Verstärkung oder gar ein Ersatzneubau nicht erforderlich sind. Grundlage für die Planung, Durchführung und Bewertung der experimentellen Untersuchung ist die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Belastungsversuche an Betonbauwerken“ (DAFSTB 2000). Im Versuch wird die Belastung nach einer festgelegten

Be- und Entlastungsfolge stufenweise bis zur Versuchsziellast gesteigert, darf dabei jedoch die Versuchsgrenzlasterlast nicht überschreiten. Die Versuchsziellasterlast ergibt sich aus der nachzuweisenden Beanspruchbarkeit der Konstruktion zuzüglich aller Sicherheitsbeiwerte. Als Versuchsgrenzlasterlast gilt die Belastung, bei der gerade noch keine Schädigung auftritt, welche die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit im künftigen Nutzungszeitraum beeinträchtigt. Die DAfStb-Richtlinie gibt definierte Kriterien an, die das Erreichen der Versuchsgrenzlasterlast anzeigen. Dies sind vor allem Verformungskriterien wie Beton- und Stahldehnungen oder Rissbreiten und Durchbiegungen, die zum vorzeitigen Versuchsabbruch führen. Diese Kriterien sind während des Versuches permanent zu überwachen und zu bewerten. Für die zeitnahe Detektion einer sich ankündigenden Schädigung und die Bewertung des Tragzustandes ist eine onlinefähige Mess- und Auswertetechnik unablässig. Um sicherzustellen, dass die Versuchsgrenzlasterlast nicht überschritten wird, muss das untersuchte Bauteil ein ausreichendes Ankündigungsverhalten aufweisen, wobei sich der Begriff „Ankündigung“ auf die Versuchsgrenzlasterlast bezieht (BOLLE 1999). Bei Tragwerken (z. B. Stahlbetonkonstruktionen ohne Querkraftbewehrung oder Tragwerke aus Spannbeton) mit geringem Ankündigungsverhalten sind die genannten Kriterien nicht oder nur bedingt anwendbar, so dass solche Konstruktionen oft vom experimentellen Tragsicherheitsnachweis auszuschließen sind. Hier können schon geringe Strukturveränderungen eine intolerable Schädigung, einen unzulässigen Verlust an Vorspannkraft oder gar eine Reduzierung der Tragfähigkeit zur Folge haben. Für die Messung von sehr geringen Strukturveränderungen sind die heute bei Probelastungen üblichen Messverfahren nur bedingt geeignet, da im Falle der Globalverformungen (z. B. Durchbiegungen) Nichtlinearitäten erst sehr spät erkannt werden können, wogegen bei punktuellen Dehnungsmessungen der Ort des Auftretens von Nichtlinearitäten vorher genau bekannt sein muss.

Im hier beschriebenen Forschungsprojekt wird daran gearbeitet, durch die photogrammetrische Überwachung Dehnungs- und Rissbildungsprozesse in relevanten Tragwerksbereichen frühzeitig zu erkennen und hieraus Indikatoren abzuleiten, die eine Bestimmung der Versuchsgrenzlasterlast ermöglichen. Forschungsschwerpunkt stellt dabei das Schub- bzw. Querkraftversagen dar.

2 Schubversagen und mögliche Indikatoren

Das Schubtragverhalten von Stahlbeton ist bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen und ist bis heute noch nicht abschließend geklärt. Gerade für Stahlbetonbauteile ohne Querkraftbewehrung existieren teils sehr unterschiedliche Modelle zur Beschreibung des Tragverhaltens. Einen großen Einfluss auf die Art des Versagens haben vor allem geometrische Parameter, wie die Bauteilhöhe und der Abstand zwischen der Lasteinleitung und dem Auflager. Die Gefahr eines Schubversagens ist nur dann vorhanden, wenn bestimmte geometrische Verhältnisse vorliegen und nicht zuvor ein Biegeversagen eintritt. Für eine detaillierte Beschreibung des Schubversagens sei auf KANI (1966) und LEONHARDT & WALTHER (1962) verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich, dass der Tragzustand bei Schubbeanspruchung lokal stark von der sich einstellenden Rissbildung abhängig ist. Die Rissentwicklung ist damit ein wichtiges Bewertungskriterium, um eine unnötige Schädigung des Bauteils zu verhindern. Ent-

scheidend für die Beurteilung des Tragzustandes ist die Beobachtung der Rissbildung und -entwicklung. Die Versagensursache ist immer ein sogenannter kritischer Schubriss. Mögliche Indikatoren für eine Beurteilung des Tragzustandes sind in Abbildung 1 dargestellt. Die folgenden Messgrößen wurden als mögliche Indikatoren identifiziert:

- kritische Schubrissbreite (w_{krit})
- kritische Neigung des Schubrisses
- Risswachstumsrate (stabiles - instabiles Risswachstum)
- Betonstauchung in der Nähe der Lasteinleitung

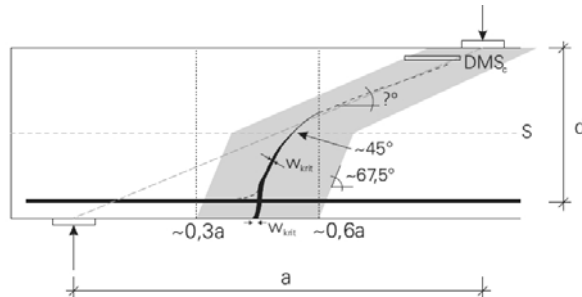


Abb. 1: Mögliche Indikatoren für Schubversagen

3 Rissdetektion

3.1 Messtechnische Umsetzung

Infolge der Komplexität des Schubverhaltens wurde zur ganzheitlichen Erfassung des Versagens auf verschiedene Messverfahren zurückgegriffen, welche für die bereichsweise Überwachung von Bauteilabschnitten geeignet sind. Konkret wurden folgende Technologien bzw. Verfahren ausgewählt:

- Photogrammetrie
- Schallemissionsmessung
- Klassische Verformungsmessung

Für die oberflächige Untersuchung des Probekörpers wird ein photogrammetrisches Verfahren auf Basis der Bildsequenzanalyse eingesetzt. Die parameterbasierte Schallemissionsanalyse dient der Detektion kleinster Strukturveränderungen im Inneren des Bauteils. Zur Validierung der Messergebnisse werden zusätzlich klassische Messgeräte zur Verformungsmessung (Dehnmessstreifen, Wegaufnehmer) eingesetzt. Die Applikation der Messtechnik in den kritischen Bereichen des Probekörpers ist in Abbildung 2 dargestellt.

Vor allem durch die Kombination der genannten Verfahren soll eine wesentliche Verbesserung der Informationsqualität während des Belastungsversuches erreicht werden, um objektive Kriterien für die Bestimmung der Versuchsgrenzlast zu definieren. Dadurch soll gewährleistet werden, dass beginnendes nichtlineares Strukturverhalten unmittelbar während

des Versuches festgestellt und die Versuchsgrenzlast damit schädigungsfrei ermittelt werden kann.

Der in Abbildung 2 dargestellte Balken wurde so dimensioniert, dass ein Biegeversagen ausgeschlossen werden kann. Dazu wurde eine kräftige Biegebewehrung angeordnet und eine Schubslankheit des Balkens gewählt, für die sich nach KANI (1966) die größte Gefährdung eines Schubbruches ergibt. Damit das Schubversagen auch in dem erwarteten Feld eintritt, wurden die Endbereiche des Balkens stark verbügelt, um so ein Verankerungsversagen auszuschließen. Der Probekörper wurde während des Versuches mit einem ansteigenden Belastungsregime weggesteuert be- und entlastet. Nach dem Erreichen der Versuchsziellast wurde die Belastung bis zum Versagen gesteigert.

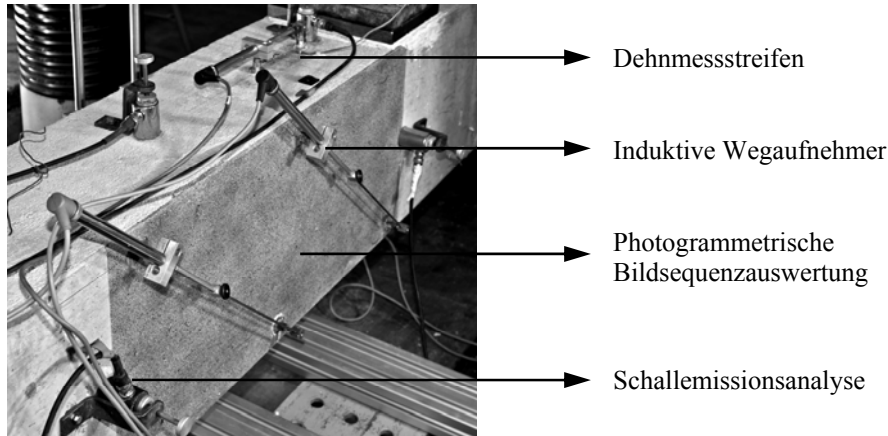


Abb. 2: Applikation der Messtechnik

3.2 Photogrammetrische Deformationsmessung

Die photogrammetrische Deformationsmessung basiert auf der Bildsequenzanalyse einer oder mehrerer Kameras. Die Verfolgung und der Vergleich homologer Punkte in Bildern aufeinander folgender Epochen ermöglicht die Detektion und Vermessung von Materialverformungen. Mit Hilfe der Auswertung von Bildsequenzen sollen die Ausbildung und der Verlauf der Risse an der Bauteiloberfläche beobachtet werden. Beton besitzt eine sehr strukturarme Oberfläche und erfordert daher eine künstliche Texturierung. Um eine spätere Praxistauglichkeit zu gewährleisten, wird diese mittels eines zufälligen Sprühmusters umgesetzt. Dazu wird Graphitstaub verwendet, der auf die gekalkte Betonoberfläche aufgesprüht wird. Einen Ansatz zur Rissdetektion und -messung basierend auf einer künstlichen Oberflächenstrukturierung stellen HAMPEL & MAAS (2009) vor. Im Gegensatz zu ihrem stereometrischen Ansatz wird bei den durchgeführten Schubversuchen eine zweidimensionale Auswertung genutzt, da Bewegungen in Tiefenrichtung vernachlässigt werden können. Wird beim Ein-Kamera-Aufbau die Kamera orthogonal und bewegungsinvariant zum Objekt ausgerichtet, ist die Verformungsmessung in Abhängigkeit vom Maßstab direkt aus der Koordinatenänderung im Bild zu bestimmen. Die relative Verformungsanalyse zur Ausgangslage hat den Vorteil, dass sich systematische Fehler der äußeren und inneren Orientie-

rung bei der Differenzbildung minimieren. In Bezug auf die Bildgröße bleiben kleine Verformungen daher unbeeinflusst von Objektivverzeichnungen. Der Aufbau ermöglicht dadurch eine Reduzierung der Rechenzeit und ein hohes Genauigkeitspotenzial und stellt damit die Voraussetzung für eine spätere Echtzeitumsetzung dar.

Die zugrunde liegende Idee der Rissdetektion in den Bilddaten basiert auf der Verformungsanalyse kleinster Flächenelemente. Mittels der Delaunay-Triangulation werden durch den Harris-Interest-Operator ausgewählte Feature-Punkte zu einem Dreiecksnetz verbunden. Die zugehörigen homologen Eckpunkte des Dreiecksnetzes werden in den Folgebildern mittels Least-Squares-Matching detektiert. Jedes einzelne Dreieckselement besitzt zu Beginn des Versuches eine spezifische Ausgangsfläche. Durch den Vergleich der identischen Dreiecke in einer Bildserie kann die inkrementelle bzw. absolute Flächenänderung im Verhältnis zum Ausgangszustand bestimmt werden. Dadurch wird die Lokalisierung von Dehnungsmaxima auf der Bauteiloberfläche ermöglicht. Ein Kamerabild mit überlagertem Dreiecksnetz und dessen Vergrößerung im Bereich des zu erwartenden kritischen Schubrisses ist in Abbildung 3 dargestellt. Durch die grauwertcodierte Darstellung der Flächenänderung des Dreiecksnetzes werden zonale Dehnungsmaxima respektive Rissverläufe visualisiert. Eine absolute Rissvermessung ist mit diesem Verfahren noch nicht möglich. Methoden zur Vermessung werden unter anderem von LANGE (2009) beschrieben.

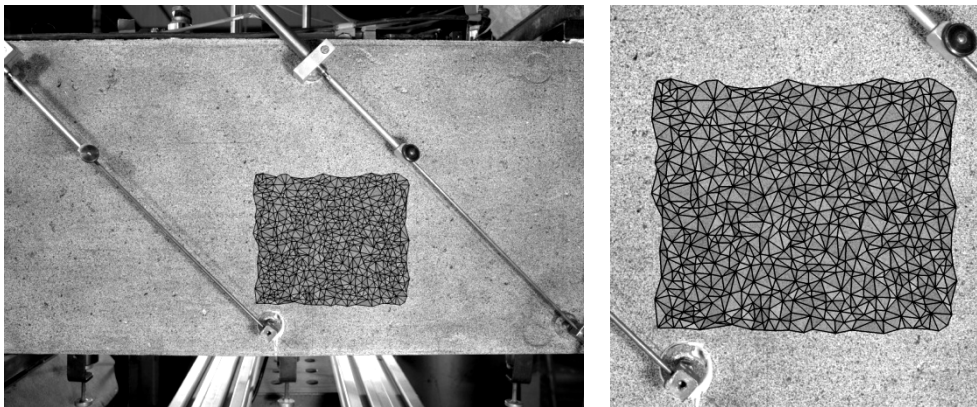


Abb. 3: Kamerabild mit ROI (Region of Interest) und überlagertem Dreiecksnetz

3.3 Schallemissionsanalyse

In Stahlbetonbauteilen bilden sich schon bei relativ geringer Beanspruchung zahlreiche Mikrorisse, die bei steigender Last zu Makrorissen wachsen und dann auch an der Oberfläche sichtbar werden. Aus Verträglichkeitsbedingungen muss sich das Bauteil bei Belastung verformen. Diese Verformung ist verbunden mit einem fortschreitenden Risswachstum und erfolgt an der Rissspitze durch plastische Verformungen in einer bestimmten Zone (Rissprozesszone). Ein Teil der freigesetzten Energie geht bei der Bildung neuer Oberflächen verloren und der restliche Teil breitet sich als Schallemission in Form von elastischen Wellen, ausgehend vom Ort der Schädigung im gesamten Körper aus. Mit Hilfe von piezoelektrischen Sensoren werden diese elastischen Wellen an der Oberfläche des Körpers aufge-

nommen, in Spannungssignale gewandelt und über einen Vorverstärker gelangen diese Informationen zum Aufzeichnungsgerät. Die aufgezeichneten Daten können auf zwei verschiedenen Wegen analysiert werden. Es wird die parameterbasierte (qualitative) und die signalbasierte (quantitative) SEA unterschieden. Erfolgt die Auswertung parameterbasiert werden statt des Gesamtsignals nur einzelne charakteristische Parameter identifiziert und gespeichert. Für die Rissdetektion im Stahlbeton haben sich Parameter wie die Signalenergie, -dauer, -amplitude und Energierate sowie die Anzahl der eingehenden Signale (Hitrate) als wichtig erwiesen (KAPPAHN & FIEDLER 2007). Charakteristisch für Stahlbeton ist eine ausgeprägte Rissbildung, die mit hohen Schallemissionsaktivitäten verbunden ist. Besonders interessant ist die Phase, in der aus einer Vielzahl von Mikrorissen ein sichtbarer Makroriss entsteht. Schallemissionstechnisch bedeutet das den Übergang von einzelnen Ereignissen zur quasi kontinuierlichen Schallemission. Eine Konzentration von Mikrorissen führt zu einem Anstieg der Signale mit der Folge, dass die Signalanfänge und -enden ineinander übergehen. Die Anzahl der Signale nimmt wieder ab, obwohl die Schallemissionsaktivität steigt, es entstehen Signale mit langer Dauer und hoher Energie.

Für den hier vorgestellten Schubversuch wird auf die parameterbasierte Schallemissionsanalyse zurückgegriffen, da nur sie den Einsatz in Echtzeit ermöglicht. Die acht verwendeten Schallemissionssensoren werden um das Schubfeld herum angeordnet. Die Unterteilung in zwei Gruppen gewährleistet eine bessere Differenzierung der Signale, hervorgerufen durch Biege- und Schubrisse. Bei der eingesetzten zonalen Ortung wird jedes Signal nur von dem Sensor registriert und bewertet, der sich am dichtesten an der Quelle befindet (first hit sensor). Das Ergebnis eines Schubversuches ist in Abbildung 4 für die Belastung des Probekörpers von 100-160 KN dargestellt. Ab 100 KN nimmt die Hitrate (Chan3) kontinuierlich zu (siehe Abbildung 4: Hits vs Time). Es treten Signale mit hoher Energie und großer Dauer deutlich gehäuft auf (siehe Abbildung 4: Energy vs Duration). Auch die lokalisierten Ereignisse verschieben sich zum Auflager hin (Chan5). Die Schubrissausbildung kann damit eindeutig nachgewiesen werden.

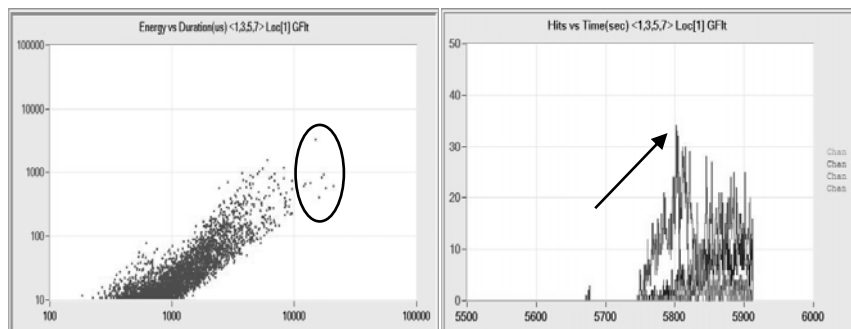


Abb. 4: Schallemissionsanalyse für die Belastung von 100-160 KN

3.4 Kombination der Messverfahren

Im Anschluss an die Auswertung der Bildsequenzen und der Schallemission wurden diese mit den Daten der Dehnmessstreifen und Wegaufnehmer synchronisiert. Die Gegenüberstellung für zwei Belastungszeitpunkte $T_1 = 5625$ s und $T_2 = 5633$ s ist in Abbildung 5 dar-

gestellt. Das Weg-Zeit-Diagramm zeigt die Messdaten eines auflagernahen Wegaufnehmers auf der Balkenoberseite, gestrichelt gekennzeichnet ist der Zeitpunkt T_1 . Deutlich sind der letzte Belastungszyklus und die anschließende kontinuierliche Belastung zu erkennen. Trotz stetiger Belastung des Probekörpers erfährt der Wegaufnehmer ab $T_3=5647$ s eine Entlastung bzw. Zugbeanspruchung. Dies deutet auf eine Veränderung des Tragverhaltens hin. Zum Zeitpunkt T_1 ist die Makrorissbildung nicht zu erkennen. Im gleichen Diagramm ist die Anzahl der Schallemissionssignale im Zeitintervall aufgetragen. Die erhöhte Signalanzahl in T_1 kündigt den Schubriss an. Dem gegenüber steht die Auswertung der photogrammetrischen Bildsequenzanalyse. Ein geringer lokaler Dehnungsanstieg im Zentrum des Dreiecksnetzes ist zu erahnen.

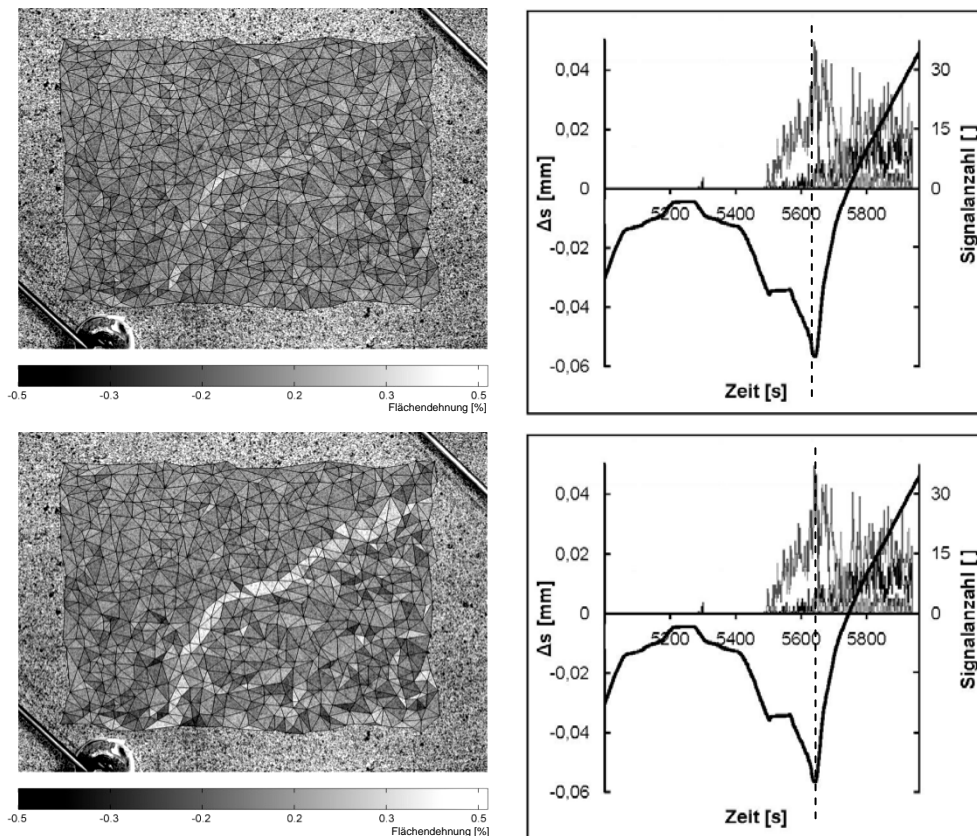


Abb. 5: Gegenüberstellung der photogrammetrisch bestimmten Flächendehnung in den Kamerabildern mit den synchronisierten Daten der Wegaufnehmer und der SE-Sensoren (v. l. n. r.) zum Zeitpunkt $T_1 = 5625$ s und $T_2 = 5633$ s (v. o. n. u.)

Zum Zeitpunkt T_2 ist eine erhöhte Flächendehnung in der photogrammetrischen Auswertung eindeutig zu erkennen. Auch die Schallemissionssensoren verzeichnen fast die höchste Signalanzahl am kritischen Sensor und einen Übergang der Signale zum Auflager. Der Riss kann somit mit beiden Messmethoden detektiert werden. Einzig der Wegaufnehmer kündigt

den Riss noch nicht an. Eine mögliche Begründung ist die Reibung an den Ufern des sehr schmalen Schubrisses. Ein hoher Traganteil kann darüber aufgenommen werden und erst bei weiterer Aufweitung des Risses geht der Balken in einen anderen Tragzustand über. Die visuelle Detektion des Risses in den Bilddaten ist erst zum Zeitpunkt $T_4 \approx 5700$ s möglich, mehr als 30 s nach der ersten photogrammetrischen Erkennung.

4 Ausblick

Zu den vorgestellten Überlegungen werden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens vor allem Arbeiten zur Auswertung der photogrammetrischen Messdaten hinsichtlich der Risserkennung und -vermessung, sowie zur Bewertung des Übergangs von stabilem zu instabilem Risswachstum und damit der Entwicklung eines Versuchsgrenzlastindikators erfolgen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der direkten Verknüpfung der Messverfahren und im Echtzeiteinsatz.

5 Danksagung

Diese Ausarbeitung entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Entwicklung und Erprobung von Versuchsgrenzlastindikatoren bei der experimentellen Tragfähigkeitsanalyse bestehender Hochbaukonstruktionen mit geringem Ankündigungsverhalten.“ Das Projekt wird durch die Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesministeriums für Bau- und Raumordnung gefördert. Weiterer Dank gilt dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden.

6 Literatur

- Bolle, G. (1999): *Zur Bewertung des Belastungsgrades biegebeanspruchter Stahlbetonkonstruktionen anhand von Last-Verformungs-Informationen*, Bauhaus Universität Weimar
- DAfStb (2000): *Belastungsversuche an Betonbauwerken*, Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln
- Hampel, U.; Maas, H.-G. (2009): *Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Nr. 64, S. 345–350
- Kani G. (1966): *Basic facts concerning shear failure*, ACI Journal, S. 675-692
- Kapphahn G.; Fiedler, L.-D. (2007): *Schallemissionsprüfung bei der experimentellen Tragfähigkeitsbewertung von historischen Deckenkonstruktionen am Beispiel des Wiederaufbaus des Museums Berlin*, 16. Symposium Schallemission, Puchberg (Österreich)
- Lange, J. (2009): *Mess- und Auswertungstechnik zur Riss- und Faserdetektion bei Betonbauteilen*, Technischen Hochschule Aachen
- Leonhardt, F. & Walther, R. (1962): *Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung*, DAfStb Heft 151, Ernst & Sohn, Berlin