Vergleich photogrammetrischer und akustischer Messverfahren zur Rissdetektion bei Belastungsversuchen im Stahlbetonbau

Comparison of Photogrammetric and Acoustic Techniques for Crack Detection during Load Tests in Reinforced Concrete Structures

Robert Koschitzki, Hans-Gerd Maas

Der Beitrag befasst sich mit der räumlich und zeitlich aufgelösten Rissdetektion und -analyse an Betonstrukturen mit geringem Ankündigungsverhalten. 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 sollen kleinste Strukturveränderungen im Tragwerk bereits während des Belastungsversuches erfasst und beurteilt werden. Ziel ist die frühzeitige Detektion des Schubversagens auf Basis der photogrammetrischen Bildsequenzauswertung und der Schallemissionsanalyse zur anschließenden Entwicklung von Versuchsgrenzlastindikatoren.

Schlüsselbegriffe: Rissdetektion, Bildsequenzanalyse, Schallemissionsanalyse, Schubversagen

This paper focuses on space- and time-resolved crack detection in concrete structures with low advance notice of failure. In this context the term "advance notice" refers to the determination of the ultimate test load, the exceeding of which would cause irreversible damages of the tested structure. The idea of instrumental load test monitoring by modern measurement methods is the real-time detection and assessment of smallest structural changes in the tested structure during the load test. The goal is the early detection of shear failures based on the combination of photogrammetric image sequence analysis and acoustic emission analysis to allow the definition of objective criteria for detecting the ultimate test load.

Keywords: Crack detection, image sequence analysis, acoustic emission analysis, shear failure

1 EINLEITUNG

Probebelastungen können zum experimentellen Nachweis der Tragfähigkeit von Massivbaukonstruktionen eingesetzt werden, wenn dies auf rechnerischem Weg nicht möglich oder zu aufwändig ist. 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 /*DAFSTB 2000*/. Im Versuch wird die Belastung nach einer festgelegten Be- und Entlastungsfolge stufenweise bis zur Versuchsziellast gesteigert. Die Versuchsziellast wird als die maximale Last definiert, welche für die zukünftige Nutzung der Konstruktion nachzuweisen ist. Die DAfStb-Richtlinie gibt definierte Kriterien an, die das Erreichen der Versuchsgrenzlast anzeigen. Diese sind vor allem Verformungskriterien wie Beton- und Stahldehnungen oder Rissbreiten und Durchbiegungen, die zum vorzeitigen Versuchsabbruch führen. Speziell das Verhalten von Konstruktionen mit geringer Duktilität ist aufgrund ihres geringen Ankündigungsverhaltens schwierig zu bewerten, so dass diese Tragwerke noch heute vom experimentellen Tragsicherheitsnachweis auszuschließen sind. Dies betrifft beispielsweise Stahlbetonbauteile ohne Querkraftbewehrung oder Tragwerke aus Spannbeton. Der Begriff "Ankündigungsverhalten" bezieht sich in dem Zusammenhang auf die Bestimmung der Versuchsgrenzlast, deren Überschreitung zu inakzeptablen Schädigungen führt und daher mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden muss /Bolle 1999/. 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.

2 SCHUBVERSAGEN

Das Schubtragverhalten von Stahlbeton ist bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen. Bis heute gibt es kein mechanisches Modell, welches das Schubverhalten ohne Bügelbewehrung präzise in seiner Gänze beschreibt. Speziell 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/, /LEONHARDT, WALTHER 1962/ und /RAMIREZ U. A. 1998/verwiesen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, 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. Entscheidend für die Beurteilung des Tragzustandes ist die Beobachtung der Rissbildung und -entwicklung. Die Versagensursache ist immer ein sogenannter kritischer Schubriss. Die folgenden Messgrößen wurden als mögliche Indikatoren identifiziert (siehe *Abb. 1*):

- Kritische Schubrissöffnung (w_{krit}/ (Ausfall der Rissverzahnung)
- Verlauf des Schubrisses (kritische Neigung des Schubrisses)
- Risswachstumsrate
- (stabiles instabiles Risswachstum)
- Druckzonenstauchung
- Abschluss der Biegerissbildung

Für die ausführliche Beschreibung des Schubversagens auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene und die Herleitung der möglichen Indikatoren sei auf */MARX U. A. 2011/* verwiesen.



Abb. 1 | Mögliche Indikatoren für das Schubversagen

3 RISSDETEKTION

3.1 Bildsequenzauswertung

Photogrammetrische Anwendungen zur Verformungs- und Deformationsmessung im bautechnischen Mess- und Versuchswesen basieren auf der photogrammetrischen Bildsequenzanalyse. Die Anwendung von zwei oder mehr Kameras erlaubt die dreidimensionale Auswertung der beobachteten Szene und wird in /Lange 2009/, /Maas, Hampel 2006/, Benning u. a. 2004/ und /Whiteman, Litchi, Chan-DER 2002/beschrieben. Der Informationsgewinn bei der Verwendung einer zweiten oder dritten Kamera steht den höheren Anschaffungskosten der zusätzlichen Ausrüstung und dem zeitlichen Mehraufwand beim Versuchsaufbau und bei der Auswertung gegenüber. Für den Fall ausschließlich zweidimensionaler Verformungen an ebenen Objekten bietet ein Ein-Kamera-Aufbau großes Potenzial zur Rissdetektion. Eine orthogonale und bewegungsinvariante Ausrichtung der Kamera zur Oberfläche vorausgesetzt, gestattet die direkte Bestimmung der Verformungen aus der Änderung der Bildkoordinaten einer Bildserie. Zusätzlich werden systematische Fehler (soweit sie nicht ohnehin durch die Kamerakalibrierung eliminiert werden) wie die Bildverzeichnung bei der Differenzbildung zur Deformationsbestimmung für den Fall kleiner Verschiebungen größtenteils kompensiert. Eine Übersicht über zweidimensionale Verschiebungs- und Dehnungsmesstechniken stellt /Pan u. a. 2009/ zusammen. Grundsätzlich können auch zentralperspektive Schrägaufnahmen mittels einer projektiven Entzerrung in orthogonale Darstellungen transformiert werden. Dadurch ist die maßstäbliche Messung in den entzerrten Bilddaten möglich. Dies setzt die Bestimmung von mindestens vier Passpunkten voraus. Im Gegensatz dazu bieten telezentrische Objektive den Vorteil einer Abbildung ohne perspektive Verzerrung. Weiterhin wirken sich axiale Objektbewegungen nicht auf den Abbildungsmaßstab aus. Die Kompensation von Objektbewegungen in Tiefenrichtung unter Verwendung objektseitiger Telezentrie wird in /Sutton u. A. 2008/ diskutiert. Durch den speziellen Strahlengang der Objektive können jedoch nur Objekte kleiner gleich dem Durchmesser der Objektivaustrittsöffnung abgebildet werden. Diese Bauform bedingt daher neben hohen Anschaffungskosten einen sehr eingeschränkten Anwendungsbereich.

Unabhängig von der Anzahl der verwendeten Kameras bildet die Verfolgung homologer Punkte innerhalb einer Bildsequenz die Grundlage der Verformungsdetektion und -messung. Die dafür zum Einsatz kommenden Matching-Verfahren erfordern entweder eine vorhandene natürliche Oberflächenstruktur oder eine künstliche Texturierung des Untersuchungsobjektes. Verfahren der Texturierung durch die optische Projektion eines Musters bieten sich an, wenn Tiefendeformationen zu bestimmen sind, scheiden jedoch weitgehend aus, wenn (planare) Risse detektiert werden sollen. Grundsätzlich können hier somit zwei Formen der Oberflächenstrukturierung diskutiert werden. Eine Variante besteht in der Verwendung diskret verteilter Messmarken. Der Einsatz von kodierten oder unkodierten Messmarken erlaubt eine sehr genaue Bildmessung, wobei die Auflösung bei der Detektion von Deformationen vom Abstand der Marken im Raster abhängt. Dies führt speziell bei der Rissanalyse zu einer starken Generalisierung der Rissposition, indem trotz hochgenauer Vermessung der Rissbreite die Position eines Risses nur ungenau bestimmt werden kann. Ein weiterer Nachteil des diskreten Punktmusters ist der Aufwand der Anbringung, der quadratisch mit der Auflösung ansteigt. Das Auftreten mehrerer Risse zwischen zwei benachbarten Marken führt zudem zur Akkumulation der Rissbreite. Untersuchungen zur Detektion und Vermessung von Rissen bei Belastungsversuchen an Stahlbetontragwerken unter Verwendung diskreter Punktmuster werden in /Hegger, Schwermann 2002/ und /BERNSTONE, HEYDEN 2009/ detailliert vorgestellt. Basierend auf der Farbauswertung unterschiedlich kolorierter Messmarken beschreiben /BARAZZETTI, SCAIONI 2009/ ein Verfahren zur Deformationsanalyse. Alternativ zur diskreten Signalisierung durch Zielmarken kann eine flächig aufgebrachte Textur genutzt werden. Die Verwendung markerloser Methoden verringert i. d. R. den Zeitaufwand zur Vorbereitung der Objektoberfläche und erhöht damit die Praxistauglichkeit.

Einen Ansatz zur Rissdetektion und -messung basierend auf einer künstlichen Oberflächenstrukturierung stellen /Hampel, Maas 2009/vor. Im Gegensatz dazu verzichten /BARAZZETTI, SCAIONI 2010/ gänzlich auf eine nachträgliche Texturierung der Oberfläche. Mit Hilfe des Wallis-Filters nimmt Barazzetti eine lokale Kontrastanpassung in den Bilddaten vor, um natürliche Strukturen hervorzuheben. Unabhängig von der Art der Oberflächenstrukturierung erfolgt die Generierung eines dichten Verschiebungsvektorfeldes oder Dehnfeldes auf Grundlage der Ergebnisse der eingesetzten Matching-Methoden. Zum Einsatz kommen beispielsweise die Kreuzkorrelation oder das Least-Squares-Matching. Eine Verbesserung der Ergebnisse kann durch den Einsatz von Interest-Operatoren erreicht werden. Diese extrahieren Bildpunkte oder -regionen mit einem hohen Grad an Einzigartigkeit in einer begrenzten Nachbarschaft. Einen Vergleich dreier Interest-Operatoren und ihre Abhängigkeit von einer Kontrastanhebung wird in /JAZAYERI, FRASER 2008/diskutiert. Weitere Operatoren werden in /GIL U. A. 2009/ bewertet, wobei der Harris-Detektor sehr gute Ergebnisse auch bei Änderung des Bildmaßstabes und des Blickwinkels liefert.

3.2 Analyse in Dreiecksmaschen

Bei den hier vorgestellten Arbeiten steht die Untersuchung des Schubverhaltens von Stahlbetonbauteilen mit geringem Ankündigungsverhalten im Vordergrund. Bedingt durch die Dimensionierung



Abb. 2 | Kamerabild mit überlagertem Dreiecksnetz

der Versuchskörper und die stabile Versuchsanordnung können die auftretenden Deformationen bis zum Zeitpunkt der einsetzenden Rissbildung als zweidimensional angenommen werden. Damit lässt sich die Verwendung eines Ein-Kamera-Systems begründen.

Das zu Grunde liegende Konzept der Rissdetektion basiert auf der Deformationsmessung kleiner Dreiecksflächenelemente. Mittels der Delaunay-Triangulation werden durch den Harris Interest-Operator ausgewählte Merkmalspunkte im Bild zu einem Dreiecksnetz vermascht (siehe Abb. 2). Homologe Eckpunkte der Dreiecke werden in einer Serie aufeinander folgender Bilder unter Verwendung des Least-Squares-Matchings mit Subpixelgenauigkeit verfolgt. Zu Beginn eines Versuches besitzt jedes Dreieckselement einen spezifischen Flächeninhalt. Durch den Vergleich homologer Dreiecke in einer Bildserie kann die inkrementelle bzw. absolute Flächenänderung im Verhältnis zur Ausgangsfläche bestimmt werden. Zudem können riss- oder deformationsbedingte Veränderungen in den Seitenverhältnissen der Dreiecke analysiert werden. Eine Farbkodierung der einzelnen Dreieckselemente, abhängig von ihrem Dehnungszustand, ermöglicht die Visualisierung zonaler Deformationen auf der Bauteiloberfläche. Dabei verhalten sich Flächendehnung und Seitenverhältnisse bei rotatorischen oder translatorischen Bewegungen des Versuchskörpers parallel zum Kamerasensor invariant, da die ins Bild projizierten Dreiecke keiner Maßstabsänderung unterliegen. Dies ist insbesondere im Hinblick auf kleine Kamerabewegungen, welche im realen Experiment nicht auszuschließen sind, wichtig. Sowohl eine Veränderung des Kameraabstandes zur untersuchten Oberfläche ($\Delta z \neq$ konst.) als auch eine Kippung der Kamera oder des Versuchskörpers würden zu einer veränderten Dreiecksfläche führen und damit zu einer scheinbaren Dehnungsänderung. Eine Detektion dieser Effekte ist jedoch durch den Vergleich der Seitenverhältnisse der einzelnen Dreiecke innerhalb einer Bildsequenz möglich.

3.3 Schallemissionsanalyse

Im Inneren von 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. 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 aufgenommen. Die aufgezeichneten Daten können entweder parameterbasiert (qualitativ) oder signalbasiert (quantitativ) analysiert werden. 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 (hit-rate) als wichtig erwiesen /KAPPHAHN, FIEDLER 2007/. Charakteristisch für Stahlbeton ist eine ausgeprägte Rissbildung, die mit hohen Schallemissionsaktivitäten verbunden ist. Bezogen auf den Prozess der Rissbildung ist die Entwicklung einer Vielzahl kleinerer Mikrorisse zu einem sichtbaren Makroriss besonders interessant und signalisiert 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 (vgl. Abb. 3).



Abb. 3 I Darstellung einer SEA mit Biege- und Schubrissbildung (Bild nach Kapphahn)

Für weitere Informationen über die Schallemissionsanlyse (SEA) an Betonstrukturen im Allgemeinen sei auf */Köppel 2000/* und hinsichtlich eines Schubversagens auf */Kapphahn, Fiedler 2001/* verwiesen.

4 DATENAKQUISITION

Zur Untersuchung des schlagartigen Schubversagens von Stahlbetonstrukturen bedingt durch eine geringe Querkraftbewehrung wurde eine Serie an Belastungsversuchen durchgeführt, bei denen neben dem Einsatz konventioneller Messtechnik (Dehnmesstreifen und Wegaufnehmer) auch optische und akustische Sensoren verwendet wurden. Folgende Ziele wurden dabei verfolgt:

- Herbeiführung eines Schubversagens
- Vergleich verschiedener Messverfahren (SEA, Photogrammetrie und herkömmliche Weg- und Dehnmesstechnik) und Verknüpfung der Informationen





Abb. 5 | Belastungsregime



Abb. 6 | Verwendung unterschiedlicher Messtechniken



Abb. 7 | Applikation der Messtechnik

Abb. 4 | Bewehrungsführung und Versuchsaufbau

- Überwachung der Schädigungs- und Versagensprozesse hinsichtlich einer eventuellen Vorankündigung
- Detektion der Schubrissbildung

Dazu wurden Versuchsbalken verwendet, die so geplant wurden, dass jeder Balken für genau zwei Versuche genutzt werden konnte. *Abb. 4* zeigt die schematische Darstellung der Bewehrung der Balken und die Belastungsanordnung für beide Versuchsseiten. Jeder Balken wurde so dimensioniert, dass zum einen das Risiko eines Biegeversagens ausgeschlossen werden konnte und dass zum anderen die Wahrscheinlichkeit eines Schubversagens maximal war. Dazu wurde der Balken mit einer kräftigen Biegezugbewehrung versehen und das Auftreten des Schubversagens durch eine entsprechende Schubschlankheit (a/d = 2,5) forciert (vgl. */Kawl 1966/j*. Damit der Schubbruch in dem gewünschten Feld auftritt und ein Verankerungsversagen ausgeschlossen werden kann, wurden der mittlere Balkenteil und die Endbereiche hinter den Auflagern stark verbügelt.

Die Belastung wurde, wie es in der Richtlinie für die Durchführung von Belastungsversuchen vorgeschrieben ist, in mehreren Laststufen aufgebracht. Nach jeder Laststufe erfolgte eine Entlastung bis auf eine definierte Grundlast. Das Belastungsregime für den ersten Versuch ist in *Abb. 5* dargestellt.

In *Abb. 6* sind die für die Untersuchungen eingesetzten Messtechniken dargestellt. Für die photogrammetrischen Aufnahmen wurden die Versuchsfelder mit einer Oberflächentextur bestehend aus einer Kalkgrundierung und einem aufgesprühten Zufallsmuster aus Graphitstaub vorbereitet. Der hohe Kontrast der Strukturierung verbessert die Matching-Ergebnisse ohne die Rissentwicklung zu beeinflussen. Die Bildaufnahme erfolgte durch den Einsatz zweier Nikon Kameras (D700) mit lichtstarken Nikkor Objektiven auf der Vorderund Rückseite des Untersuchungsobjektes. Der Deformationsprozess wurde mit einer Aufnahmefrequenz von 0.5 Hz verfolgt. Die Bilder decken im Objektraum etwa einen Bereich von 45 x 70 cm ab und lösen den Balken mit etwa 0,16 mm pro Pixel auf. Der Bildmaßstab beträgt etwa 1:20.

Die Schallemissionssensoren wurden um das Schubfeld herum angeordnet (drei Sensoren auf der Balkenunterseite, zwei an der Oberseite und zwei weitere in Balkenmitte). Eine bessere Unterscheidung zwischen Biege- und Schubrissen konnte durch die Teilung der Schallsensoren in zwei Gruppen (Auflager und Krafteinleitung) erreicht werden. Außerdem wurde das Konzept "first hit sensor" genutzt, bei dem jedes akustische Signal nur von dem Sensor aufgenommen und ausgewertet wird, welcher sich in nächster Nähe zur Signalquelle befindet. Jedes Schubfeld wurde auf der einen Seite mit diagonal und auf der anderen mit vertikal verlaufenden IWA (Induktiver Wegaufnehmer) versehen. Zusätzlich war ein IWA in der Druckzone in der Nähe der Lasteinleitung angebracht. Dieser wurde durch einen DMS (Dehnmessstreifen) an gleicher Position ergänzt (vgl. *Abb. 7*).

5 AUSWERTUNG

Alle untersuchten Balken versagten planmäßig unter Bildung eines schrägen Hauptrisses zwischen Lasteinleitung und Auflager auf Biegeschub. Wie die nachfolgende Zusammenstellung zeigt, gab es einen deutlichen Unterschied zwischen den Versuchsergebnissen für die zuerst geprüfte und anschließend geprüfte Balkenseite. Die erste Balkenseite trug wesentliche höhere Beanspruchungen auch nach der Schrägrissbildung, was durch eine Schädigung des zweiten Balkenbereiches während des ersten Versuches erklärt werden kann. Der aus den Wegaufnehmern abgelesene Zeitpunkt der Rissbildung, bzw. die zugehörige Rissbildungslast zeigten eine nicht ganz so starke Streuung wie die Bruchlasten. Im Folgenden wird exemplarisch auf die Ergebnisse der Schallemission und der Bildsequenzauswertung des ersten Versuches näher eingegangen.

5.1 Schallemission

Die Schallemissionssensoren wurden, wie in *Abb. 7* gezeigt, um das Schubfeld herum angeordnet. Zu Beginn des Versuches waren nur Signale geringer Intensität und Dauer wahrnehmbar. Im Bereich unter der Last wurden bei Kräften bis zu 100 kN primär Signale einer Biegerissbildung aufgezeichnet. Ab 100 kN war im Versuch eine stetige Steigerung der Signale an Sensor 3 zu verzeichnen, was auf eine beginnende Schubrissentstehung hindeutet. Die starke Zunahme der Signale mit hohen Energieraten und langer Dauer vor allem an den Sensoren 1 und 3 (siehe *Abb. 8*), und damit die Verschiebung der Bereiche verstärkter SE-Aktivitäten in Richtung des Auflagers können als deutliches Anzeichen für eine einsetzende Schrägrissbildung betrachtet werden. Die weitere Entwicklung des Schubrisses und die langsame Rissöffnung führen zu weiter hohen SE Signalen, die erst langsam abnehmen. Nachdem sich der Riss geöffnet hat, nehmen die SE-Aktivitäten in diesem Bereich wieder ab, da der Riss die Aus-



Abb. 8 | SEA-Ergebnis für Sensor 1 und 3

breitung der SE-Wellen dämpft. Es kann für die SEA kein spezifischer Grenzwert für die Energie oder Dauer von kritischen Signalen angegeben werden, aber die räumliche Verschiebung der SE-Aktivität kombiniert mit erhöhten Energie- und Dauerwerten, erlauben eine bessere Interpretation des jeweiligen Tragwerkszustandes.

5.2 Photogrammetrie

Bei der Bildsequenzakquisition wurde auf einen stabilen Versuchsaufbau geachtet. Die zu verfolgenden Oberflächenpunkte wurden durch den Harris Interest-Operator ausgewählt. Alternativ zur Detektion der Merkmalspunkte mittels Interest-Operator wäre aufgrund der hohen Qualität der Oberflächenstrukturierung auch ein regelmä-Big angeordnetes Punktraster denkbar. Eine Ausschnittsvergrößerung der texturierten Betonoberfläche zeigt Abb. 9. Die Verfolgung der Bildpunkte innerhalb der Bildsequenz wurde über das Least-Squares-Matching (LSM) realisiert. Durch die Verwendung eines Interest-Operators zur Merkmalspunkt-Generierung konnte im Gegensatz zu dem Punktraster eine Verbesserung der Standardabweichung der LSM-Parameter im Mittel um etwa 5 % erreicht werden. Die nachstehende Abbildung zeigt einen vergrößerten Kameraausschnitt mit überlagerter Rissdetektion zum Zeitpunkt der Rissbildung. Die Flächenänderung der einzelnen Dreiecke ist farbkodiert dargestellt, wobei rote Bereiche einer Dehnung und blaue einer Stauchung unterliegen. Die gemittelte Standardabweichung der Bildpunktzuordnung bezogen auf den Entlastungszustand beträgt zu Beginn des Belastungsversuches für die Parameter der Translation 1/100 Pixel. Mit einsetzender Rissbildung erhöht sich diese aufgrund der erschwerten Bildpunktzuordnung hervorgerufen durch die Gefügeänderung im Bereich der Rissufer.



Abb. 9 | Kamerabild mit überlagerter Rissdetektion und Texturvergrößerung der Betonoberfläche



Abb. 10 | Vergleich der Messergebnisse aus SEA, Photogrammetrie und Dehnungsmessungen

5.3 Vergleich der Messverfahren

Nach der Auswertung der Bilddaten und der akustischen Signale wurden die Ergebnisse mit den Daten der Dehnmessstreifen und Wegaufnehmer synchronisiert. Abb. 10 zeigt den direkten zeitlichen Vergleich aller drei Messverfahren. Dargestellt sind acht Zeitpunkte mit den zugehörigen Bildern der Sequenzanalyse der Balkenvorder- und -rückseite. In der Bildmitte sind links die detektierten SE-Aktivitäten an den im Bereich des Schubrisses angeordneten Sensoren dargestellt und rechts der zeitliche Verlauf der Dehnungsmessung in der Druckzone (auf der Balkenoberseite). Die Zuordnung der Bilder erfolgt zeitlich mit Hilfe der orange dargestellten Linien, die den jeweiligen Bildzeitpunkt abbilden. Zwischen den Aufnahmen liegen in der Regel 10 Sekunden. Ab Zeitpunkt 3 ist in den photogrammetrischen Aufnahmen erkennbar, dass sich neben dem vorhandenen Biegeriss ein zweiter geneigter Riss entwickelt. Zu diesem Zeitpunkt steigen auch die SE-Aktivitäten an, obwohl hier noch nicht eindeutig zu erkennen ist, dass sich ein Schubriss bildet. Im Dehnungs-Zeit-Diagramm ist noch keine Veränderung des Tragwerkszustandes zu erkennen. Der Balken ist hier also noch vollkommen intakt, da über den noch nicht ausgebildeten Makroriss Zugspannungen übertragbar sind. Dieser Balkentragzustand kann bis zum Zeitpunkt 8 aufrechterhalten werden. Erst hier beginnt sich das Tragverhalten zu ändern, da die Druckzone des Balkens nun plötzlich Zugspannungen ausgesetzt ist. Das bedeutet, dass zu genau diesem Zeitpunkt die Rissöffnung einsetzt und der Riss vollständig ausgebildet ist.

Abschließend ist festzustellen, dass sowohl die Photogrammetrie als auch die SEA geeignet sind, die Schubrissbildung zu einem Zeitpunkt zu detektieren, zu dem noch keine qualitative Änderung des Tragverhaltens eingetreten ist. Damit sind beide Verfahren für die Entwicklung entsprechender Versuchsgrenzlastindikatoren sehr gut geeignet.

6 ZUSAMMENFASSUNG

In allen Versuchen ist es gelungen, durch die verwendeten Messverfahren zum einen den Zeitpunkt der Rissbildung eindeutig zu bestimmen und auch die der Rissöffnung vorausgehende Mikrorissbildung zu erkennen. Durch die Kombination der Messergebnisse der optischen und akustischen Verfahren ist der Tragwerkszustand bis zum Bruch vollständig beschreibbar und sind auch die unterschiedlichen Versagensformen erklärbar.

Die gewählten Messverfahren wurden vor allem in Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit für die Bewertung von Belastungsversuchen beschrieben. Für die photogrammetrische Auswertung der im Versuch zu messenden Mikrorissbildung wurde ein geeigneter und robuster Algorithmus entwickelt und praktisch umgesetzt, so dass eine lokale Dehnungserhöhung eindeutig identifiziert werden kann. Wichtig ist dabei die erzielbare Invarianz gegenüber eventuellen Kamerabewegungen, welche unter realen Versuchsbedingungen nicht ausschließbar sind. Auch die Interpretation der Schallemissionssignale ermöglicht eine eindeutige Bewertung. Insbesondere die kombinierte Beurteilung der Messergebnisse beider Verfahren führt zu einer signifikant erhöhten Sicherheit bei der Durchführung von Belastungsversuchen.

Zukünftige Aufgaben bestehen in der Weiterentwicklung der photogrammetrischen Analyse bezogen auf einen Einsatz unter realen Bedingungen außerhalb des Labors. Dies umfasst zum Einen die mögliche Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Aufnahmesituationen und zum anderen eine Echtzeit-Fähigkeit. Die gefundenen Kriterien zur Beurteilung des Tragwerkszustandes während des Versuches sollen in weiteren Bauteiluntersuchungen zu allgemeingültigen und praxisgerecht anwendbaren Indikatoren weiterentwickelt werden. Auch soll durch gezielte Versuche an typischen Bauteilen des Hochbaus eine genauere Beschreibung der Schubbruchgefährdung erfolgen. Ziel dabei ist, die herausgearbeiteten Einflussfaktoren so miteinander zu kombinieren, dass klare Abgrenzungen der sich einstellenden Versagensform angegeben werden können. Abschlie-Bend soll die Praxistauglichkeit der entwickelten Indikatoren in einem umfassenden in-situ Versuch nachgewiesen werden.

7 DANKSAGUNG

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Forschungsprojektes "Entwicklung und Erprobung von Versuchsgrenzlastindikatoren bei der experimentellen Tragfähigkeitsanalyse bestehender Hochbaukonstruktionen mit geringem Ankündigungsverhalten" durchgeführt. Das Projekt wird durch die Forschungsinitiative "Zukunft Bau" des Bundesministeriums für Bau- und Raumordnung gefördert. Die praktischen Untersuchungen wurden in Kooperation mit dem Institut für Massivbau der Technischen Universität Dresden realisiert.

LITERATUR

- Barazzetti, L.; Scaioni, M. (2009): Crack measurement: Development, testing and applications of an automatic image-based algorithm. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 285-296.
- [2] Barazzetti, L.; Scaioni, M. (2010): Development and Implementation of Image-based Algorithms for Measurement of Deformations in Material Testing. Sensors 10, 7469-7495.
- [3] Benning, W. u.a. (2004): Monitoring crack origin and evolution at concrete elements using photogrammetry. ISPRS Congress Istanbul, Commission V.
- [4] Bernstone, C.; Heyden, A. (2009): Image analysis for monitoring of crack growth in hydropower concrete structures. Measurement 42, 879-893.
- [5] Bolle, G. (1999): Zur Bewertung des Belastungsgrades biegebeanspruchter Stahlbetonkonstruktionen anhand von Last-Verformungs-Informationen. Bauhaus Universität Weimar, Dissertation.
- [6] DAfStb (2000): Belastungsversuche an Betonbauwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin und Köln.
- [7] Gil, A. u.a. (2009): A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. Machine Vision and Applications.
- [8] Haddadi, H.; Belhabib, S. (2008): Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. Optics and Lasers in Engineering 46, 185-196.
- [9] Hampel, U.; Maas, H.-G. (2009): Cascaded image analysis for dynamic crack detection in material testing. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64, 345-350.
- [10] Hegger, J., Görtz, S.; Schwermann, R. (2002): Analyse des Schubrissverhaltens unter Einsatz der Photogrammetrie. Bautechnik 79, 135-143.

- [11] Jazayeri, I.; Fraser, C.S. (2008): Interest operators in close-range object reconstruction. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 47 (B5), 69-74.
- [12] Kani, G. (1966): Basic facts concerning shear failure. ACI Journal, 675-692.
- [13] Kapphahn, G.; Fiedler, L.-D. (2001): Schallemissionsuntersuchungen zum Tragverhalten schlanker Stahlbetonbalken, Fachtagung Bauwerksdiagnose, Leipzig.
- [14] Kapphahn, G.; Fiedler, L.-D. (2007): Schallemissionsprüfung bei der experimentellen Tragsicherheitsbewertung von historischen Deckenkonstruktionen am Beispiel des Wiederaufbaus des Museums Berlin. 16. Symposium Schallemission, Puchberg.
- [15] Köppel, S. (2000): Schallemissionsanalyse zur Untersuchung von Stahlbetontragwerken, Dissertation. ETH Zürich.
- [16] Lange, J. (2009): Mess- und Auswertungstechnik zur Riss- und Faserdetektion bei Betonbauteilen. Dissertation, RWTH Aachen.
- [17] Leonhardt, F.; Walther, R. (1962): Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung. DAfStb Heft 151, Ernst & Sohn, Berlin.
- [18] Maas, H.-G.; Hampel, U. (2006): Photogrammetric Techniques in Civil Engineering Material Testing and Structure Monitoring. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72 (1), 39-45.
- [19] Marx, S. u.a. (2011): Versuchsgrenzlastindikatoren bei Belastungsversuchen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Zukunft Bau", SF-10.08.18.7-09.7/II3 – F20-09-072, 189 S.
- [20] Pan, B. u.a. (2009): Two-dimensional digital image correlation for inplane displacement and strain measurement: a review. Measurement Science and Technology 20, 1-14.
- [21] Ramirez, J.A. u.a. (1998): Recent approaches to shear design of structural concrete. Journal of Structural Engineering, 1374-1417.
- [22] Sutton, M.A. u.a. (2008): The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. Optics and Lasers in Engineering 46, 746–757.
- [23] Whiteman, T.; Litchi, D.; Chander, I. (2002): Measurement of deflections in concrete beams by close range photogrammetry. ISPRS Commission IV Symposium: Geospatial Theory, Processing and Applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 34.

Dipl.-Wirt.-Ing. Robert Koschitzki

INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden E-Mail: robert.koschitzki@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Gerd Maas

INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND FERNERKUNDUNG TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Helmholtzstraße 10 | 01069 Dresden E-Mail: hans-gerd.maas@tu-dresden.de

Manuskript eingereicht: 16.07.2011 | Im Peer-Review-Verfahren begutachtet

