

Monitoring von Hallentragwerken – Entwicklung eines Verfahrens zur kontinuierlichen Verformungsüberwachung auf Basis digitaler Bildverarbeitung

This report introduces a new system of measuring deformation in wide span roof constructions based on the principals of digital image processing. In the course of the research project the method was developed right from the first idea through multiple steps of preliminary tests, to a prototypical system ready for everyday use. Finally, it was tested and refined in a pilot project.

Ziel der Forschungsaufgabe

Die zahlreichen Halleneinstürze der vergangenen Winter in Deutschland und dem benachbarten Ausland führten unter anderem zum Wunsch nach besseren Möglichkeiten für die Überwachung von Hallentragwerken als vorbeugende Maßnahme. Die hier vorgestellte Forschungsarbeit wird gefördert von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, dem Landratsamt Garmisch-Partenkirchen, der Impuls GmbH, Gilching, und der Sommer Messtechnik, Koblach/Österreich. Zielsetzung war, ein einfaches, robustes und kostengünstiges Verfahren zur kontinuierlichen Verformungsüberwachung von Hallentragwerken zu entwickeln. Dies sollte erreicht werden, indem ausgewählte Punkte des Tragwerks mit elektronischen Kameras periodisch erfasst und ihre Abbildungen im digitalen Bild vermessen werden. Die Praxistauglichkeit des Verfahrens sollte abschließend im Rahmen eines Pilotprojektes erprobt werden.

Prinzipieller Lösungsweg und Vorversuche

Eine Industriekamera (K) ist auf einen Messpunkt (M) gerichtet. Die Kamera ist mit einem Computer mit einer speziellen Bildauswertungssoftware verbunden. Der Messpunkt bildet sich auf dem Sensor der Kamera ab; Verschiebungen des Messpunktes parallel zur Bildebene der Kamera erscheinen als Verschiebungen des Punktbildes. Unter Ausnutzung der Gesetzmäßigkeiten der Perspektive können aus den Verschiebungen des Punktbildes die Verschiebungen des Punktes selbst berechnet werden. Um Fehlmessungen aus unbeabsichtigten Bewegungen der Kamera zu vermeiden, wird zusätzlich ein unbeweglicher, montierter Referenzpunkt (R) mit aufgenommen und im Bild die Lage des Messpunktes relativ zur Lage des Referenzpunktes gemessen. Um störende Einflüsse aus dem Umgebungslicht auszublenden, dienen als Mess- und Referenzpunkte Leuchtdioden (LEDs), deren Strahlung im Infrarotbereich liegt. Entsprechend wurde bei der Kamera der standardmäßig eingebaute Infrarotsperrfilter entfernt und ein spezieller Tageslichtsperrfilter eingebaut. Um

das vorgeschlagene Verfahren zu testen, wurden zunächst im Labor und später in der für das Pilotprojekt vorgesehenen Halle Vorversuche durchgeführt. In diesen konnte nachgewiesen werden, dass mit dem vorgeschlagenen Verfahren Änderungen in der Lage des Messpunktes mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich ermittelt werden können.

Pilotprojekt

Die Umsetzbarkeit des Verfahrens in die Praxis wurde im Rahmen eines Pilotprojektes erprobt. Als Objekt wurde die ca. 30 Jahre alte Dreifachturnhalle des Staffelseegymnasiums in Murnau im Landkreis Garmisch-Partenkirchen mit einem weit gespannten Dachtragwerk aus Holz ausgewählt (s. Abb. 1). Die für das Dachtragwerk maßgebende Schneelast ist seit 1.1.2007 von $s_0 = 1,50 \text{ kN/m}^2$ (DIN 1055-5:1975-06) auf $s_k = 3,78 \text{ kN/m}^2$ (DIN 1055-5:2005-07) erhöht worden. Da der Biegespannungsnachweis am Hauptträger für die neue Schneelast mit einem Ausnutzungsgrad von $\eta = 1,09 > 1,00$ nicht erbracht werden kann, ist die Tragsicherheit des Dachtragwerks der Turnhalle nicht ausreichend.



Abb. 1: Turnhalle in Murnau, Landkreis Garmisch-Partenkirchen

Um dennoch einen sicheren Betrieb der Halle gewährleisten zu können, ohne aufwendige Verstärkungsmaßnahmen am Tragwerk vornehmen zu müssen, wurde

ein Monitoringsystem dauerhaft in der Halle installiert. Sein Hauptbestandteil ist eine Verformungsmesseinrichtung, bestehend aus einer Kamera (K), drei Messpunkten (M1-M3) und einem Referenzpunkt (R) für jeweils jeden der vier Hauptträger (s. Abb. 2).

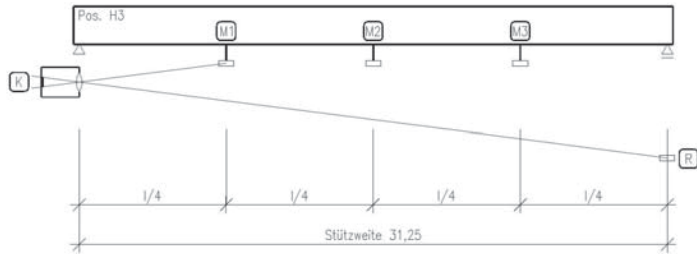


Abb. 2: Turnhalle in Murnau, Verformungsmesseinrichtung: Anordnung von Kamera (K), Messpunkten (M1-M3) und Referenzpunkt (R)

Bei den eingesetzten Kameras handelt es sich um sog. „intelligente“ Kameras (d. h. mit integriertem Prozessor) vom Typ Matrix Vision mvBlueCOUGAR-P mit einem 1/2-Zoll-CMOS-Sensor, einer geometrischen Auflösung von 1280 x 1024 Pixeln und einer Bildfrequenz von bis zu 30 Bildern pro Sekunde. Sie sind mit Objektiven der Brennweite 100 mm ausgestattet. Bei den Kameras wurde – wie schon bei den Vorversuchen – der Infrarotsperrfilter entfernt und ein spezieller Tageslichtsperrfilter eingebaut, sodass sie nur im nahen Infrarotspektrum empfindlich sind. Die zu erfassenden Tragwerkspunkte und der Referenzpunkt wurden mit LEDs mit einem Durchmesser von 5 mm bestückt. Alle LEDs sind für eine Wellenlänge von 850 nm im nahen Infrarot spezifiziert. Mit einem zusätzlich fest eingebauten Lasermessgerät können Kontrollmessungen durchgeführt werden. Außerdem wurde – um die Korrelation zwischen Klimagrößen

und Verformungen beobachten zu können – auf dem Dach der Halle eine Wetterstation mit Schneekissen (S) und Sensoren für Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit installiert. Eine Übersicht über die Lage der Komponenten gibt Abbildung 3.

Alle Daten und Prozesse sind auf einem zentralen Messcomputer mit Fernzugriff über das Internet zusammengefasst. Mit einer speziell dafür entwickelten Software werden die Daten ausgewertet und grafisch dargestellt. Das Messprogramm steuert die Kameras, nimmt die Messungen vor und protokolliert die Messergebnisse auf SQL-Basis in einer Datenbank. Außerdem werden Meldungen, Messwerte und Bilder angezeigt (s. Abb. 4). Die Anzeige der Messwerte erfolgt sowohl in Pixeln (d. h. die rohen Messwerte ohne Umformung) als auch in mm-Auslenkung, bezogen auf eine einmal festgelegte Null-Position. Die Frequenz der Aufnahmen wird in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Größe der Durchbiegung gesteuert.

In Versuchen mit einer künstlichen Last (s. Abb. 5) wurde die tatsächliche Biegesteifigkeit der Hauptträger ermittelt.

Der Vergleich der gemessenen (Kamera, Bodenlaser) und statisch berechneten Werte (Statik) für Vertikalverschiebungen in der Mitte des Hauptträgers ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut. Die tatsächliche Biegesteifigkeit des Hauptträgers übersteigt die in der statischen Berechnung eingesetzten Normwerte. Aus den Ergebnissen der Verformungsmessungen resultiert ein E-Modul von $E = 1.400 \text{ kN/cm}^2 = 14.000 \text{ N/mm}^2$.

Auf dieser Grundlage wurden Verformungsgrenzen festgelegt, bei deren Erreichen Kontrollhandlungen vorgenommen oder Alarm ausgelöst werden soll. Für die Alarmierung wird die technische und organisatorische Infrastruktur der vorhandenen Brandmeldeanlage mit genutzt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Im vorliegenden Bericht wird ein neues Verfahren zur Erfassung von Verformungen an weit gespannten Hallen-tragwerken vorgestellt. Es beruht auf den Methoden der digitalen Bildverarbeitung. Das Verfahren wurde im Rahmen der Forschungsarbeit von der ersten Idee über mehrere Stufen von Vorversuchen bis hin zu einem alltags-tauglichen Prototypen entwickelt. Abschließend wurde es in einem Pilotprojekt getestet und weiter verfeinert.

Es konnte gezeigt werden, dass die digitale Bildverarbeitung hervorragend dafür geeignet ist, Verformungen an Gebäuden kontinuierlich zu messen. Die Ge-

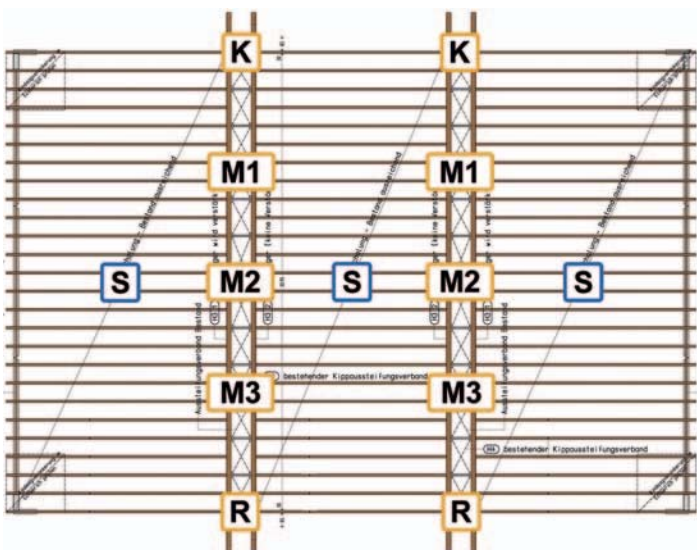


Abb. 3: Turnhalle in Murnau, Monitoringsystem, Lage der Systemkomponenten

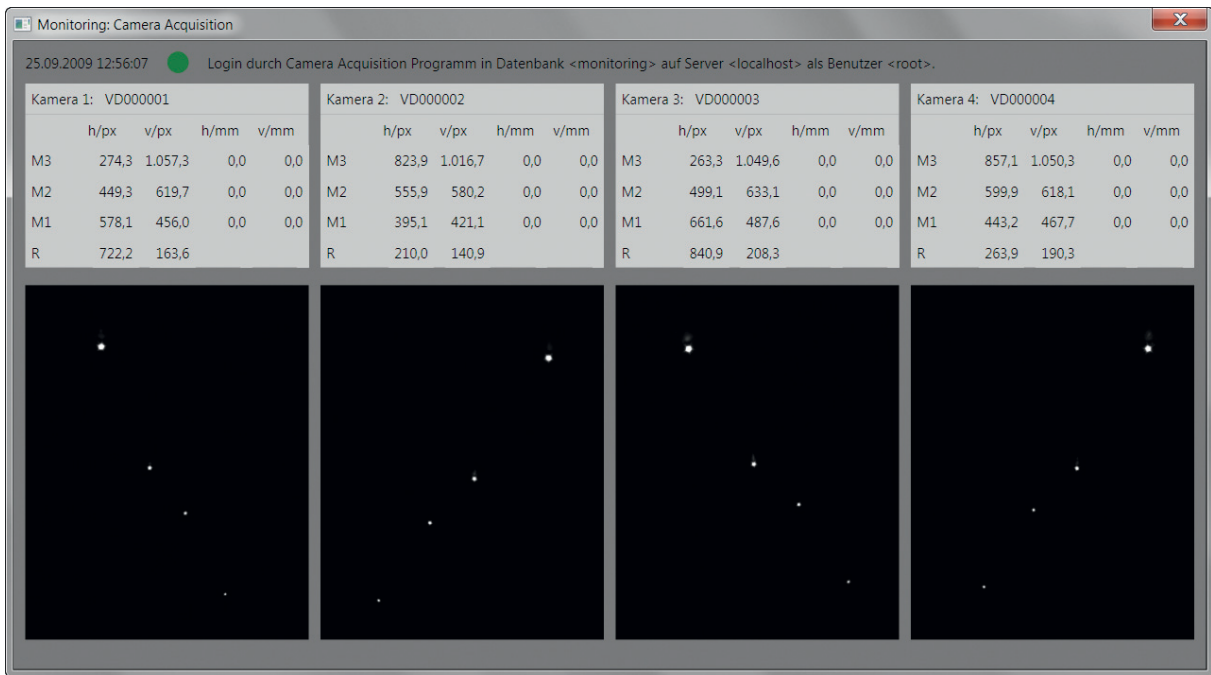


Abb. 4: Benutzeroberfläche des Messprogramms „Camera Acquisition“ mit den Bildern der Leuchtdioden an den vier Hauptträgern (unten), den gemessenen Verformungswerten (darüber) und dem Feld für Fehlermeldungen (oben)



Abb. 5: Künstliche Last auf dem Dach der Turnhalle, bestehend aus 154 mit Wasser gefüllten 90-l-Mörtelkästen, unmittelbar nach Abschluss des Befüllvorgangs

naigkeiten, die man damit erzielen kann, übertreffen die Erfordernisse bei der Überwachung auch von weit gespannten Tragwerken. Gleichzeitig sind die Systeme einfach, robust und kostengünstig. Redundanz und damit zusätzliche Sicherheit kann durch die Kombination mit anderen Messsystemen wie Schneelastsensoren oder Laser-Distanz-Messgeräten erreicht werden.

Das Monitoringsystem kann und soll kein Ersatz für die Beurteilung der komplexen Zusammenhänge bezüglich Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit durch einen geschulten und erfahrenen Fachmann sein. Vielmehr steht damit ein zusätzliches und verlässliches Ingenieurwerkzeug zur Verfügung, mit dessen Hilfe der sichere Betrieb von Gebäuden – auch bei sich ändernden Bedingungen, z. B. bei Schneelasten – dauerhaft gewährleistet werden kann.

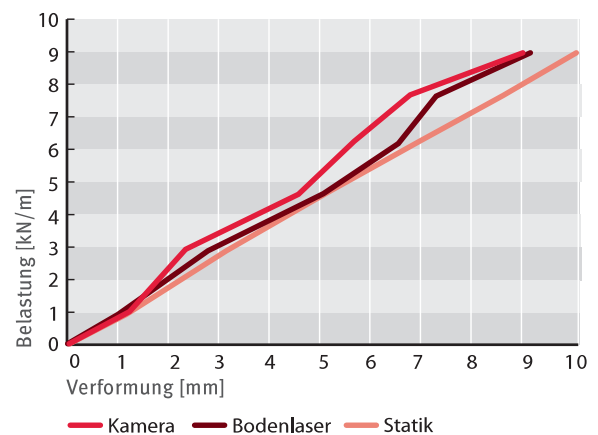


Abb. 6: Künstliche Last auf dem Dach der Turnhalle; Vergleich der gemessenen (Kamera, Bodenlaser) und statisch berechneten Werte (Statik) für Vertikalverschiebungen in der Mitte des Hauptträgers; Horizontalachse = Verformung [mm], Vertikalachse = Belastung [kN/m]

Literaturverzeichnis

- [1] K. Henke, R. Pawlowski, S. Winter, *Kontinuierliche Verformungsüberwachung weitgespannter Hallentragwerke auf der Basis digitaler Bildverarbeitung*, Schlussbericht für das aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung geförderten Forschungsvorhaben (Aktenzeichen: Z6-10.08.18.7-08.18/II2-F20-08-20), München/Karlsruhe, 2011.
- [2] R. Pawlowski, K. Henke, et al., *Digital image processing in the monitoring of wide-span timber roof structures*, COST E55 – Modelling of the Performance of Timber Structures, 3rd Workshop, Helsinki, Finland, März 2008.
- [3] R. Pawlowski, K. Henke, et al., *Monitoring of wide-span timber roof structures – development of a monitoring system*, CD-ROM, WCTE 2008 – 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 2008.
- [4] W. Riedner, *Sicherheit und Überwachung von weitgespannten Hallensystemen*, in: Bautechnik, 1/2007, S. 78–80.
- [5] S. Winter, *Der Einsturz der Sporthalle in Bad Reichenhall und was man daraus lernen muss*, in: *Zuschnitt*, Vol. 25, März 1994, S. 17.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski

Professor an der Fakultät für Architektur und Bauwesen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Klaudius Henke

Technische Universität München
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Dipl.-Ing. Peter Schregle

Impuls computergestützte Bildanalyse GmbH
Buchloe

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Architektur und Bauwesen
E-Mail: robert.pawlowski@hs-karlsruhe.de