



**Kurzbericht für das Forschungsvorhaben:**

## **Kontinuierliche Verformungsüberwachung weitgespannter Hallentragwerke auf der Basis digitaler Bildverarbeitung**

### **Forschungsstellen:**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter  
Arcisstraße 21  
80333 München

Hochschule Karlsruhe  
Technik und Wirtschaft  
Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe

### **Projektleitung:**

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Klaudius Henke  
Prof. Dr.-Ing. Robert Pawlowski

### **unterstützt durch:**

Impuls Bildanalyse GmbH  
Bahnhofstraße 40  
86807 Buchloe

Landratsamt Garmisch-Partenkirchen  
Olympiastraße 10  
82467 Garmisch-Partenkirchen

Sommer GmbH & Co. KG  
Straßenhäuser 27  
6842 Koblach, Österreich

### **gefördert von:**

Forschungsinitiative Zukunft Bau  
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Deichmanns Aue 31-37  
53179 Bonn

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.  
(Aktenzeichen: Z6-10.08.18.7-08.18/II2-F20-08-20)  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München / Karlsruhe, 30. September 2011

## 1 Ziel der Forschungsaufgabe

Die zahlreichen Halleneinstürze der vergangenen Winter in Deutschland und dem benachbarten Ausland führten unter anderem zu dem Wunsch nach besseren Möglichkeiten für die Überwachung von Hallentragwerken als vorbeugende Maßnahme.

Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war es, 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.

## 2 Durchführung der Forschungsaufgabe

### 2.1 Prinzipieller Lösungsansatz 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 unbeweglich montierter Referenzpunkt (R) mit aufgenommen und im Bild die Lage des Messpunktes relativ zur Lage des Referenzpunktes gemessen. Um störende Einflüsse aus 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.

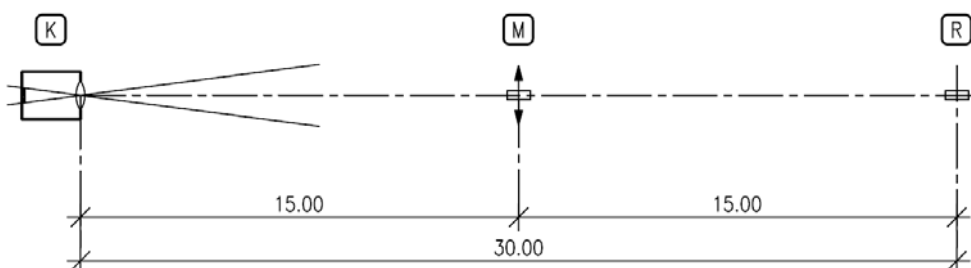


Abbildung 1: Vorversuche: Anordnung der Systemkomponenten

Um das vorgeschlagene Verfahren zu testen, wurden zunächst im Labor und später in der für das Pilotprojekt vorgesehenen, weiter unten beschriebenen Halle Vorversuche durchgeführt. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 1 dargestellt, die einzelnen Komponenten in Abbildung 2. Bei den Vorversuchen wurde der Messpunkt in Millimeterschritten vertikal bewegt und nach jedem

Schritt ein Bild aufgenommen. Abbildung 3 zeigt vier verschiedene Messbilder. Die Beschriftung unten links in jedem Bild gibt den jeweils eingestellten Millimeterschritt an, die orangen Linien stellen Messungen im Bild dar.



Abbildung 2: Vorversuche: Kamera (links), verschiebbliche Mess-LED (Mitte) und Referenz-LED (rechts)

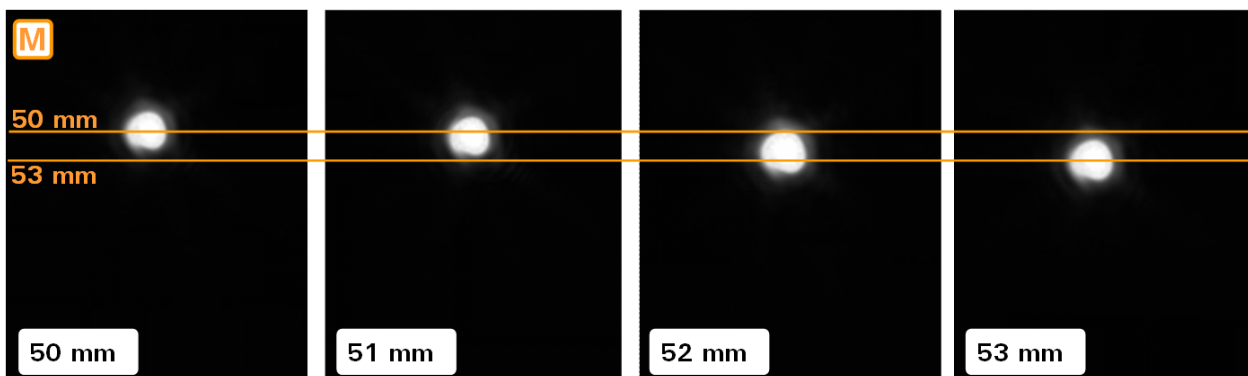


Abbildung 3: Vorversuche: vier Messbilder bei unterschiedlicher Lage der Mess-LED

Mit den Vorversuchen konnte nachgewiesen werden, dass mit dem vorgeschlagenen Verfahren Änderungen in der Lage des Messpunktes mit einer Genauigkeit im Millimeterbereich ermittelt werden können.

## 2.2 Pilotprojekt

Die Umsetzbarkeit des Verfahrens in die Praxis wurde im Rahmen eines Pilotprojektes erprobt. Als Objekt wurde die Dreifachturnhalle des Staffelseegymnasiums in Murnau im Landkreis Garmisch-Partenkirchen mit einem weit gespannten Dachtragwerk aus Holz ausgewählt (Abbildung 4).

Die für das Dachtragwerk maßgebende Schneelast ist seit dem 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.



Abbildung 4: 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 (Abbildung 5).

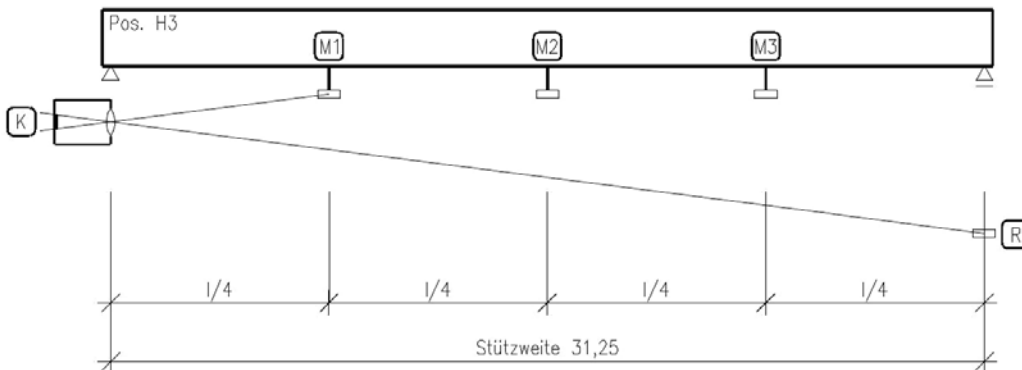


Abbildung 5: Turnhalle in Murnau, Verformungsmesseinrichtung: Anordnung von Kamera (K), Messpunkten (M1-M3) und Referenzpunkt (R)

Mit einem zusätzlich fest eingebauten Laser-Messgerät 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 6.

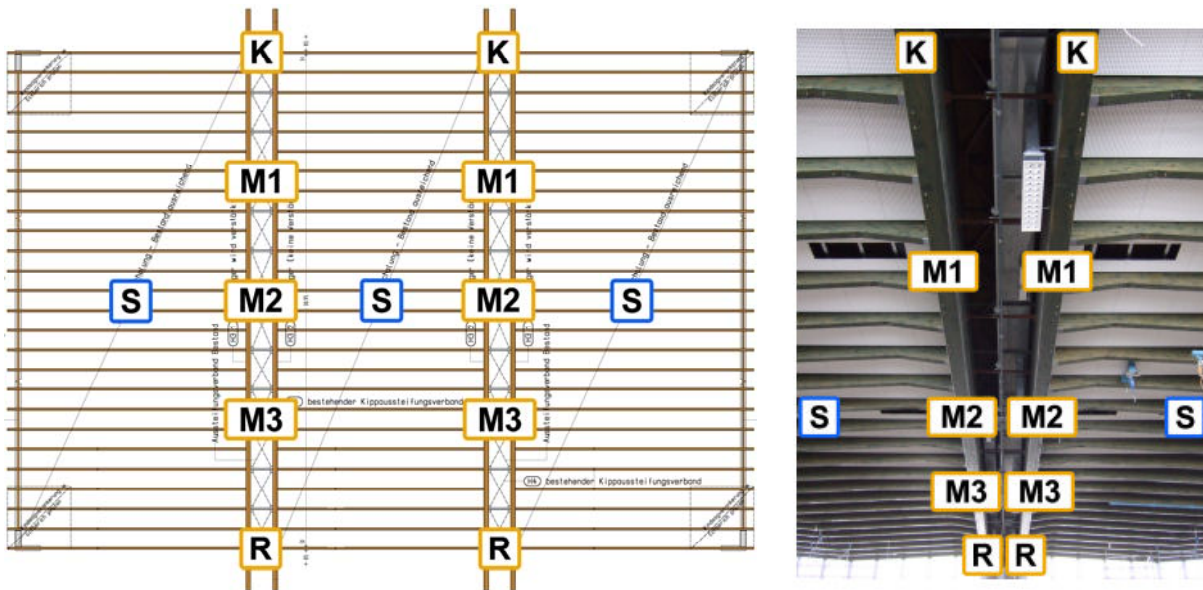


Abbildung 6: Turnhalle in Murnau, Monitoringsystem: Schematische Darstellung der Lage von Schneekissen (S) und Verformungsmesseinrichtungen bestehend aus Kameraeinheiten (K), Messpunkten (M1-M3) sowie Referenzpunkten (R)

Bei den eingesetzten Kameras handelt es sich um sog. „intelligente“ Kameras (d.h. mit integriertem Prozessor) vom Typ Matrix Vision mvBlueCOUGAR-P mit einem  $\frac{1}{2}$ “ CMOS-Sensor mit 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 Infrarot-Spektrum 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.



Abbildung 7: Kameras unterhalb der Auflager der Hauptträger, während (links) und nach Abschluss der Montagearbeiten (rechts)

Die Kameras wurden auf der Südseite der Halle unmittelbar unterhalb der Auflager der Hauptträger hinter einer vorhandenen Holzverschalung ballwurfsicher montiert (Abbildung 7). Die Leuchtdioden der Messpunkte sind durch Halterungen aus massivem Stahl geschützt, welche an den Unterseiten der Träger angeschraubt sind (Abbildung 8). Die Leuchtdioden der Referenzpunkte wurden gegenüber der Kameras auf der Nordseite der Halle ebenfalls unterhalb der Auflager der Hauptträger hinter der Holzverschalung montiert.



Abbildung 8: LED eines Messpunktes während der Montage mit Halterung aus Stahl

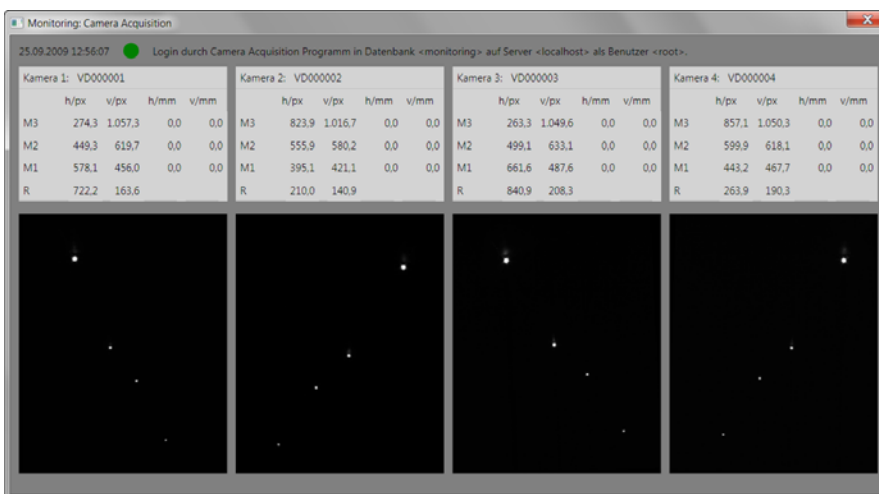


Abbildung 9: Benutzeroberfläche des Messprogramms Camera Acquisition mit den Bildern der Leuchtdioden an den vier Hauptträgern (unten), den gemessenen Verformungswerten (darüber) und dem Feld für Fehlermeldungen (oben)

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 graphisch dargestellt. Mit diesem Messprogramm werden die Kameras gesteuert sowie die Messungen vorgenommen und in einer Datenbank auf SQL Basis protokolliert. Außerdem werden Meldungen, Messwerte und Bilder angezeigt (Abbildung 9). 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 (Abbildung 10) wurde die tatsächliche Biegesteifigkeit der Hauptträger ermittelt. 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.



*Abbildung 10: Künstliche Last auf dem Dach der Turnhalle, bestehend aus 154 wassergefüllten 90l-Mörtelkästen, unmittelbar nach Abschluss des Befüllvorgangs*

### **3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

In vorliegendem Bericht wird ein neues Verfahren zur Erfassung von Verformungen an weit gespannten Hallentragwerken 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 alltagstauglichen Prototyp 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 damit erzielbaren Genauigkeiten 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 etwa mit 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 den geschulten und erfahrenen Fachmann sein. Vielmehr steht damit ein zusätzliches, verlässliches Ingenieurwerkzeug zur Verfügung, mit dessen Hilfe der sichere Betrieb von Gebäuden - auch bei sich ändernden Bedingungen z.B. bei den Schneelasten - dauerhaft gewährleistet werden kann.