

# Schadenserkennung durch reflektorlose Deformationsmessungen

Erwin Penka, Konrad Zilch, Markus Hennecke,  
Thomas Wunderlich, Thomas Schäfer, Karl Foppe

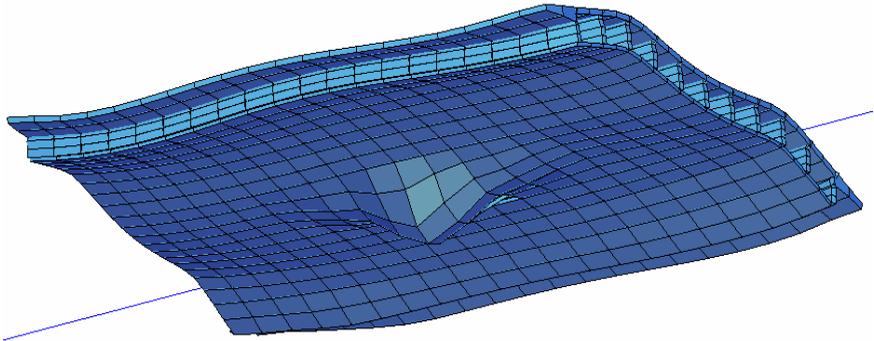
**Die Beurteilung bestehender Brücken hinsichtlich der weiteren Nutzung gewinnt aufgrund des alternden Brückenbestands immer mehr an Bedeutung. Der Istzustand oder eine Bauwerksschädigung lassen sich meist jedoch nicht mit Standardmethoden bestimmen. Für die nachfolgend beschriebene Schädigungsart, die bei der Spannbetonbrücke „Hochbrücke Freimann“ aufgetreten ist, hat sich aufgrund von FE Analysen der Schädigung gezeigt, dass hierfür eine reflektorlose Deformationsmessung, gekoppelt mit numerischen Modellen, eine wirtschaftliche Möglichkeit der Schadenserkennung darstellt.**

## Schadensbeschreibung

Die Hochbrücke Freimann besitzt als Querschnitt einen vielzelligen Hohlkasten, bei dem zuerst die untere Platte hergestellt wurde und in einem zweiten Schritt die Stege zusammen mit der Fahrbahnplatte anbetoniert wurden. Während der Nutzung konnte in weiten Bereichen chloridhaltiges Wasser in diese Betonierfugen eindringen, wodurch dort die Bewehrung teilweise stark korrodiert ist. An einer Stelle des Bauwerks hat dies zum Versagen der Schubbügel und zum Ablösen der unteren Platte vom Steg geführt. Durch die rechtzeitige Erkennung des Schadens bei regelmäßigen visuellen Kontrollen der Hohlkästen konnte eine Sanierung des geschädigten Bereichs durchgeführt werden. Aufgrund des Bauwerkszustands könnte dieses Schadensbild jedoch auch in anderen Bereichen auftreten.

## Rechnerische Simulation der Schädigung

Die rechnerische Simulation der Schädigung an einem Falterwerkssystem hat gezeigt, dass bei einer rechtzeitigen Erkennung des Schadens die Tragfähigkeit aufgrund von Umlagerungsmöglichkeiten noch nicht beeinträchtigt ist und der Schaden ohne Verkehrseinschränkungen behoben werden kann. Außerdem wurde bei der Simulation erkannt, dass bei einer Schadensausbildung mit einer ausreichenden Tragfähigkeit nur Rissbreiten in der Betonierfuge vorhanden sind, die kleiner 1 mm sind. Jedoch führt der Steifigkeitsverlust des Steges durch das Ablösen der Platte zu zusätzlichen Verformungen an der Plattenunterseite. In der Berechnung treten in der Mitte der Ausbeulung Verformungsdifferenzen von 1,3 bis 8 mm auf, wobei größere Werte bei einer Schädigung in Feldmitte als beim Schadensbild im Stützenbereich vorhanden sind. Die nachfolgende Abbildung zeigt überhöht die rechnerisch ermittelten Verformungen bei einem Ausfall der Schubdügel an zwei Innenstegen über eine Länge von ca. 10 m.



**Abb. 1.** Simulation des Schadens: Verformtes System mit Schaden

## Reflektorlose Deformationsmessung

Aufgrund der Schadensausbildung wurde zusammen mit dem Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München (Lehrstuhlinhaber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Th. Wunderlich) ein Messverfahren gesucht, mit dem die vertikalen Verformungen der Plattenunterseite mit einer Standardabweichung  $< 2$  mm bestimmt werden können.

Nach umfangreichen Voruntersuchungen im Labor und an der Brücke hat sich gezeigt, dass mittels spezieller Mess- und Auswertestrategien auf der Basis der reflektorlosen Distanzmessung die Erfüllung der Genauigkeitsanforderungen möglich ist – insbesondere unter Berücksichtigung der Entwicklung eines sehr wirtschaftlichen Verfahrens. Abbildung 2 zeigt für diese Art der Distanzmessung das Messprinzip. Ausgehend von festen Standpunkten werden in jeder Epoche zuvor festgelegte, nicht signalisierte Punkte (Raster ca.  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , insgesamt ca. 2800 Messpunkte) mit einem Servo-Tachymeter vollautomatisch angezielt und dreidimensional erfasst. Durch diesen „Scanvorgang“ entsteht ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), aus dem sich die Durchbiegung über geometrische Beziehungen ermitteln lässt. Aufgrund des schleifenden Schnitts sinkt mit kleiner werdendem Schnittwinkel zwischen Zielstrahl und Betonoberfläche die Genauigkeit der Messung. Aus diesem Grund wurden die Tachymeterstandpunkte so angeordnet, dass in den stütznahen Bereichen, in denen eine höhere Genauigkeit zur Erkennung der Schädigung notwendig ist, ein großer Schnittwinkel zwischen Messstrahl und Objekt Oberfläche vorhanden ist.

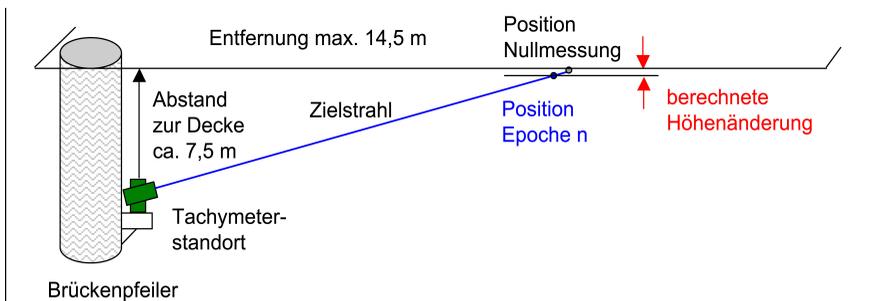
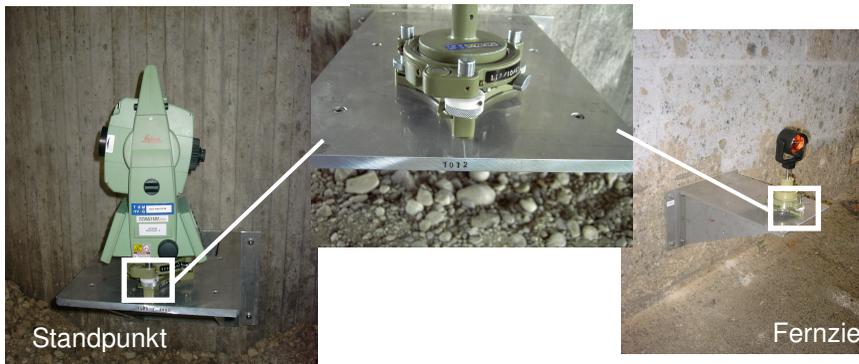


Abb. 2. Messprinzip

Zur Vermeidung aufwendiger Gründungsmaßnahmen für die Messstandorte wurden diese mit speziellen Konsolen direkt an den Pfeilern angebracht. Die Gefahr von Vandalismus konnte durch abnehmbare Konsolen, die in Abbildung 3 dargestellt sind, verringert werden. Diese Stützstellen des geodätischen Überwachungsnetzes dienen dabei sowohl als Messstandpunkt als auch als Fernziel zur Bestimmung der Orientierung des Tachymeters.



**Abb. 3.** Konsolen als Standpunkt und Fernziel

Aus der Gerätespezifikation, den durchgeführten Voruntersuchungen und der räumlichen Netzausgleichung ergeben sich für das Verfahren folgende Genauigkeitserwartungen:

- Standardabweichung der Netzpunkte in Lage und Höhe  $< 1$  mm (Absolutwert)
- Standardabweichung aus der Aufstellung, Zentrierung und der Orientierung  $< 1$  mm (Absolutwert)
- Standardabweichung der reflektorlosen Distanzmessung  $< 2$  mm für minimalen Schnittwinkel (25 gon) zwischen Zielstrahl und Betonoberfläche (Wiederholgenauigkeit; Relativwert)
- Standardabweichung  $< 1$  mm bei einem Schnittwinkel  $> 35$  gon zwischen Zielstrahl und Betonoberfläche (Wiederholgenauigkeit; Relativwert). Dieser Wert kann jedoch aufgrund der Spezifikation des Messgerätes nicht gewährleistet werden, konnte aber in vorhergehenden Projekten erfahrungsgemäß erreicht werden.
- Wiederholungsmessungen zur Abschätzung der Verkehrseinflüsse haben gezeigt, dass die aufgeführten Genauigkeiten auch unter laufendem Verkehr erzielt werden können.

Für die Erkennung der beulenartigen Verformungen des Schädigungsbildes sind für benachbarte Rasterpunkte nur die relativen Durchbiegungsveränderungen zwischen den einzelnen Messepochen notwendig. Deshalb ist für die Messung in den Feldbereichen die Standardabweichung  $< 2$  mm für einen Schnittwinkel von 25 gon entscheidend. In den Stützbereichen ist mit den verwendeten Messstandpunkten und der oben aufgeführten Einschränkung in großen Bereichen eine Standardabweichung von 1 mm erreichbar, da dort ein Schnittwinkel  $> 35^\circ$ gon gewährleistet ist.

Zusätzlich zur Messung der Rasterpunkte werden 72 Prismen an der Plattenunterseite angebracht. Diese werden zur Messung der Längs- und Querverformungen verwendet und dienen als zusätzliche Stützstellen für die Durchbiegungsmessung, sowie als Passpunkte zwischen den einzelnen Brückenfeldern.

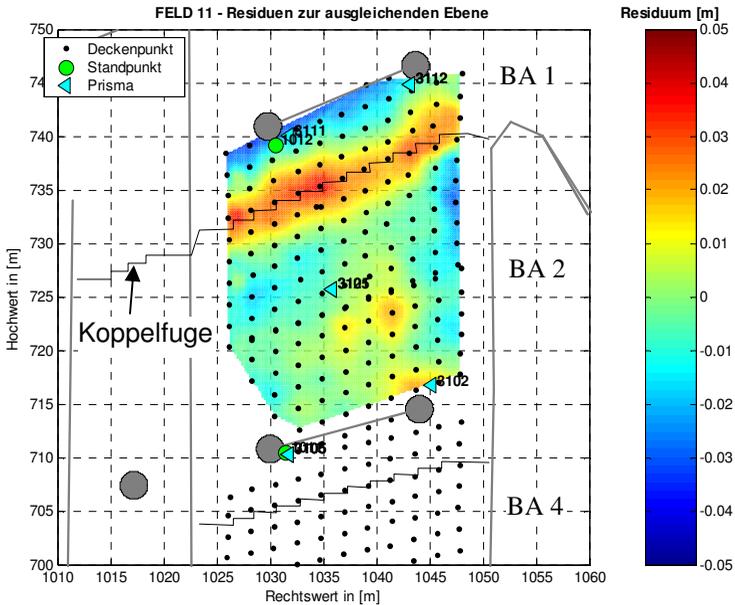
Zur Erhöhung der inneren Messgenauigkeit und zum Aufdecken grober Messfehler wird der Messvorgang in jeder Messepoche durch drei voneinander unabhängige Durchläufe zu je fünf Einzelbeobachtungen wiederholt. Somit erhält man pro Epoche für jeden Messpunkt insgesamt 15 Einzelwerte.

## Ergebnisse der Nullmessung

Nachfolgend sind einzelne Ergebnisse der Nullmessung, die im Oktober 2004 durchgeführt wurde, dargestellt. Diese Messung dient als Ausgangsbasis für die Schadenserkennung. Aufgrund des vorhandenen Verformungsbildes der Plattenunterseite, das sich aus den Bauzuständen und der vorhandenen Belastung des Systems ergeben hat, kann die beschriebene Schädigung mit einer Messung allein nicht bestimmt werden. Erst durch den Vergleich der Durchbiegungen der Rasterpunkte und der Prismen mit vorherigen Messepochen lässt sich eine Schädigung durch Veränderungen des Gesamtbildes der Durchbiegungen feststellen.

Die Ergebnisse der Nullmessung werden außerdem zur Überprüfung der numerischen Modelle verwendet werden, indem bestimmte Verformungseffekte, die bei der Messung zu erkennen sind, simuliert und berechnet werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt für das Feld 11 der Brücke das aktuelle Verformungsbild. Man kann erkennen, dass sich aufgrund des abschnittswisen Bauens an der Koppelfuge zwischen dem ersten und zweiten Bauabschnitt (BA) eine deutliche Hebung der Plattenunterseite um ca. 2 cm einstellt. Des Weiteren sieht man einen etwas größeren Durchhang des rechten Randträgers. Sonst sind nur sehr geringe und lokal begrenzte Abweichungen von der ausgleichenden Ebene vorhanden.



**Abb. 4.** Abstände zu einer ausgleichenden Ebene

In Abbildung 5 sind die Standardabweichungen der Höhenkomponente der gesamten Nullmessung dargestellt. In weiten Bereichen wurde eine Standardabweichung der 15 Messergebnisse der Rasterpunkte kleiner 0,2 mm erzielt. In diesem Bild kann man aber auch erkennen, dass die Standardabweichung bei dieser Messung nicht nur die Genauigkeit des Verfahrens angibt. Die erhöhte Standardabweichung im linken Koppelfugenbereich deutet z. B. darauf hin, dass die links verlaufende Abfahrtsrampe, die monolithisch mit dem Haupttragwerk verbunden ist, zusammen mit einer Querschnittsschwächung an der Koppelfuge, dort zu einem erhöhten Verkehrseinfluss führt. Dies bietet eine zusätzliche Möglichkeit der Schadenserkennung.

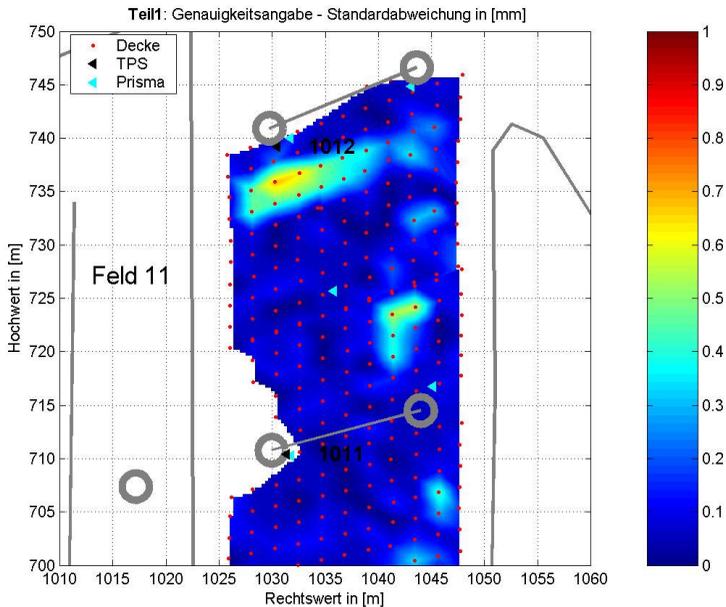
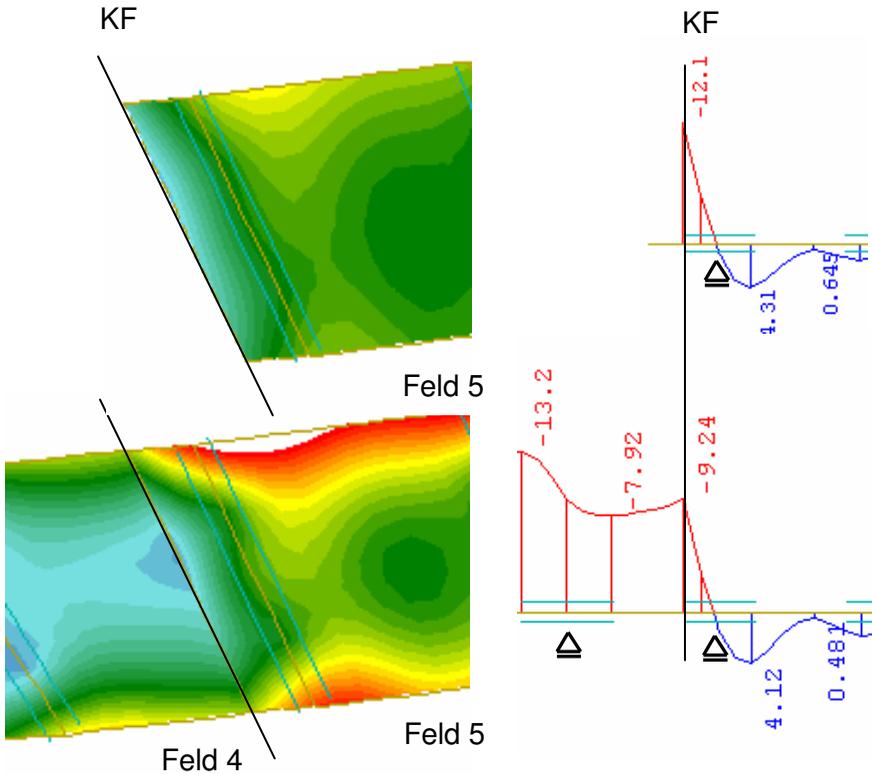


Abb. 5. Güte der gesamten Nullmessung (Standardabweichung aus 15 Einzelmessungen)

## Kopplung der Messergebnisse mit numerischen Modellen

Zur Überprüfung der verwendeten numerischen Modelle, die später eine Beurteilung der Durchbiegungsveränderungen hinsichtlich des vorhandenen Bauwerkszustands ermöglichen sollen, wird der gemessene Einfluss des abschnittswise Bauens an der Koppelfuge im Feld 4 an einem Plattensystem modelliert. Die sich in der rechnerischen Simulation ergebenden Verformungen sind in Abbildung 6 einmal flächig und als Schnitt in der Querschnittsmittte dargestellt.



**Abb. 6.** Rechnerische Simulation der gemessenen Koppelfugeneffekte

Bei der Nullmessung ist an dieser Koppelfuge eine maximale Abweichung von der Ausgleichsebene von ca. 15 mm vorhanden. Der gemessene Effekt kann somit mit den vorhandenen Modellen sehr gut wiedergegeben werden. Jedoch können mit dem Plattenmodell lokale Schädigungen, wie das Ablösen der Bodenplatte, nicht abgebildet werden. Deshalb wurde das Grundsystem so aufgebaut, dass einzelne Felder des Gesamtsystems durch ein Falzwerk ersetzt werden können (siehe auch Abbildung 1). Dies ermöglicht eine einfache Anpassung des Modells, um später die aus der Messung gewonnenen Erkenntnisse rechnerisch schnell nachvollziehen und das Tragverhalten des Bauwerks beurteilen zu können.

---

## Fazit

Bei rechtzeitiger Erkennung des Ablösens der Bodenplatte stellt dieses Schadensbild bei der Hochbrücke Freimann kein Tragfähigkeitsproblem dar und kann ohne Verkehrseinschränkungen saniert werden. Die Modellierung des Schadensablaufs mit einem Faltwerksystem brachte zusätzlich die Erkenntnis, dass das Ablösen nicht nur durch den Riss zwischen Bodenplatte und Steg zu erkennen ist, sondern dass sich aufgrund des Steifigkeitsverlustes des Steges eine Beule an der Plattenunterseite ausbildet, die als zusätzliches Merkmal zu Schadenserkennung verwendet werden kann. Das dafür entwickelte reflektorlose Messkonzept bietet die Möglichkeit, die Vertikalverformungen nahezu der gesamten Brückenunterseite in einem Raster von ca. 2 m x 2 m mit einer Standardabweichung  $< 2$  mm wirtschaftlich zu bestimmen. Durch die Beobachtung der zusätzlich vorhandenen Prismen können die Längs- und Querverformungen berücksichtigt werden. Die Interpretation der gewonnenen Messergebnisse erfolgt anschließend durch die Kopplung mit numerischen Modellen, wodurch Rückschlüsse auf das Tragverhalten ermöglicht werden und auch andere Bauwerksveränderungen erkannt werden können.