

Autarkes Brückenfernüberwachungssystem für dynamische Messungen an der Steinbachtalbrücke, Deutschland

Autor 1: Spuler, T.

Adresse 1: Geschäftsführer, mageba sa, Solistrasse 68, 8180 Bülach, Schweiz

Autor 2: Moor, G.

Adresse 2: Stellvertretender Geschäftsführer, mageba sa, Solistrasse 68, 8180 Bülach, Schweiz

Autor 3: Siegwart, M.

Adresse 3: Projektleiter/Produktmanager, mageba sa, Solistrasse 68, 8180 Bülach, Schweiz

Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurde es für Eigentümer von Brückenbauwerken auf Grund des zunehmenden Alters der Bauwerke, sowie der geänderten Sicherheitsbestimmungen/Normen, notwendig aber auch gleichzeitig schwieriger die Sicherheit und Tragfähigkeit dieser Bauwerke zu beurteilen. Zudem wurden einige dieser Bauwerke auf Setzungsgrund oder Rutschhängen gebaut oder sind ansonsten harschen Umweltbedingungen ausgesetzt. Diese Faktoren können zum Teil Katastrophen wie z.B. den Einsturz der Reichsbrücke Wien (1976) verursachen, und es empfiehlt sich daher, dass Bauwerke kontinuierlich überwacht werden. So ist es möglich Aufschlüsse über das Bewegungsverhalten, Auflagerkräfte, Schwingungen oder andere Faktoren zu erhalten, welche auf einen kritischen Bauwerkszustand hindeuten könnten. Mit der traditionellen Brückeninspektion, die alle 2 bis 6 Jahre stattfindet, kann man diese Art von Daten entweder gar nicht erfassen oder nicht im notwendigen Beobachtungsintervall. Deshalb hat sich ein Markt für ein Produkt gebildet, mit dem man Bauwerke kontinuierlich und auch zu vernünftigen Kosten überwachen kann. mageba hat diese Marktlücke erkannt und ein kostengünstiges, standardisiertes und solarbetriebenes Fernüberwachungssystem entwickelt, welches die an der Brücke gemessenen Daten per Mobilfunk (GSM/GPRS-Netz) übermittelt. Das Überwachungssystem ist unabhängig von Strom- und Telekommunikationsleitungen und kann deshalb auch in abgelegenen Gegenden installiert werden. Die gemessenen Daten werden automatisch zu mageba übermittelt, analysiert und auf einem gesicherten Internetportal dem Benutzer graphisch zur Verfügung gestellt. Von diesem Portal aus können die Daten zudem noch herunter geladen und weiter analysiert werden. Sobald ein kritischer Schwellenwert gemessen wird, wird eine Alarmnachricht entweder per SMS direkt von der Brücke oder per Email über das Internet abgeschickt und geeignete Massnahmen können eingeleitet werden. In diesem Artikel wird ein solches System an Hand der Steinbachtalbrücke in Deutschland vorgestellt. Die kritischen Parameter, die an diesem Bauwerk überwacht werden sind die Bewegung, der Temperaturverlauf, sowie die Dehnung an verschiedenen Stellen am Bauwerk. Zusätzlich ist eine Kamera zur Beweissicherung des überfahrenden Verkehrs installiert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mageba ein Fernüberwachungssystem entwickelt hat, mit dem man Brückenbauwerke kontinuierlich überwachen, beurteilen und frühzeitig geeignete Massnahmen, wie Inspektionen oder sogar Schliessungen, ergreifen kann.

Stichwörter: Brückenfernüberwachung, optische Sensoren, Verkehrsmanagement, dynamische Ereignisse, Dehnungsmessung, Temperatur, Belastung, Bewegung, Schwingung, Sicherheit

DIE STEINBACHTAL BRÜCKE AUF DER SÜDHARZAUTOBAHN, DEUTSCHLAND

Bauwerksbeschreibung

Die Steinbachtalbrücke liegt in Thüringen und führt die Südharsautobahn A38 von Göttingen nach Halle. Die Autobahn A38 befindet sich noch im Bau und die Erdmassentransporte, die zum Streckenbau benötigt werden, führen über diese Brücke. Aus diesem Grund wurde die Steinbachtalbrücke als vorgezogene Baumassnahme im Jahre 2000 ausgeführt. Die Brücke überspannt in einem einteiligen Überbauquerschnitt den Steinbach, die Landesstrasse L 2020 zwischen den beiden Ortschaften Bodenrode und Steinbach und landwirtschaftliche Wege. Die Länge der Brücke beträgt 372m, die Stützweiten der insgesamt fünf Pfeiler liegen zwischen 54m und 78m, die maximale Bauwerkshöhe liegt bei 35m. Die schlanke Verbund-Konstruktion bringt es mit sich, dass das Bauwerk empfindlich auf Schwerlastverkehr, insbesondere auf die überschweren Erdtransporte während des Baubetriebes, reagiert. Des Weiteren wird im Jahre 2005 eine bauliche Instandsetzung der Brücke ausgeführt, welche die Belastungen durch das Eigengewicht der Brücke für einen kurzen Zeitraum reduzieren wird. Die Brücke ist in Fig. 1 dargestellt.



Fig. 1. Die Steinbachtalbrücke auf der Südharsautobahn (A38) bei Bodenrode, Thüringen, Deutschland.

Gründe und Ziele der Installation des Systems Robo@Control

Um den Einfluss des Baustellenverkehrs und der Veränderungen im Lastbild aus den baulichen Massnahmen an der Brücke zu überwachen, hat man sich bei der Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH (DEGES) dazu entschlossen das Fernüberwachungssystem Robo@Control der Firma mageba zu installieren. Das System misst 4 verschiedene Kenngrößen am Bauwerk mit jeweils verschiedenen Messprinzipien. Die folgenden Messungen werden durchgeführt:

- Temperatur mittels faseroptischen und konventionellen Sensoren
- Bewegung mittels magnetostritiver Messtechnik
- Dehnung mit faseroptischen und konventionellen Sensoren sowie
- Schwingung mittels faseroptischen Sensoren.

Die Anordnung der Sensoren ist in Fig. 2 auf der nächsten Seite gezeigt. Die Ziele, welche man mit der Installation des Fernüberwachungssystems verfolgt, sind wie folgt:

- Schwerlastverkehr über das Schwingungsverhalten der Brücke zu ermitteln und zu kategorisieren,
- die durch die geänderte Eigenlast während der Sanierungsmassnahmen ab September 2005 auftretenden Belastungen im Bauwerk zu ermitteln,
- Aufschluss über die durch die Temperatur tatsächlich verursachten Bewegungen der Brücke zu erhalten und mit theoretis ermittelten Werten zu vergleichen.

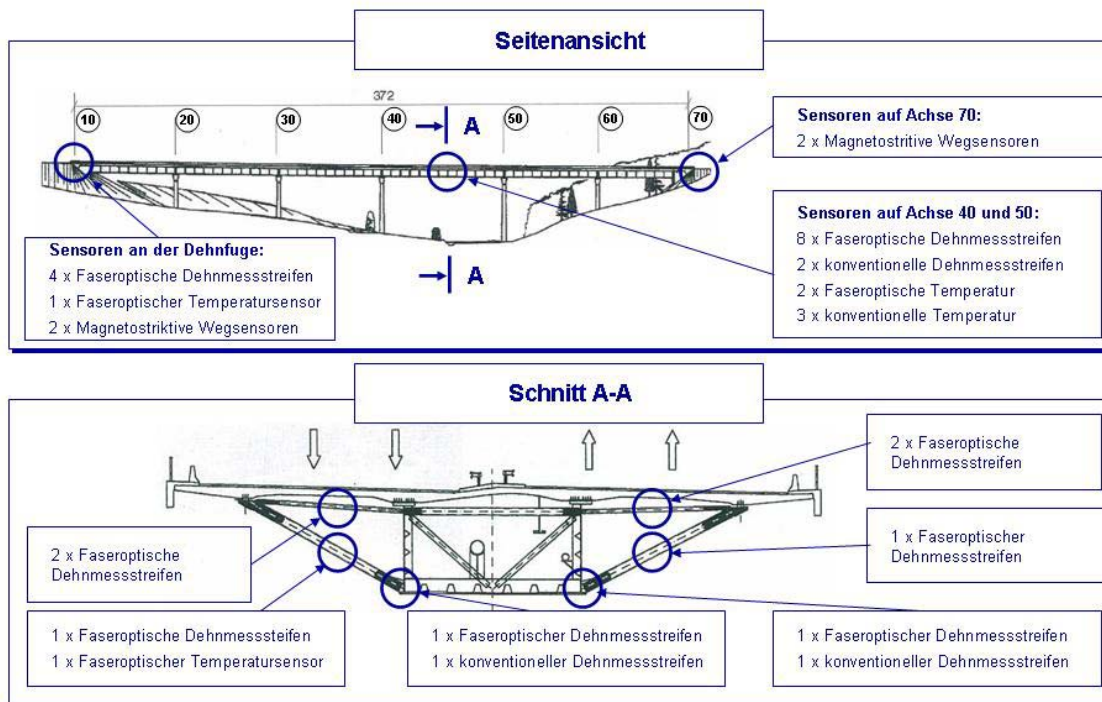


Fig. 2. Sensoranordnung im Brückenquerschnitt auf Achse 40-50 der Steinbachtalbrücke.

Messprinzipien von Robo®Control

Die Temperatur wird in und am Bauwerk mittels konventionellen und faseroptischen Temperatursensoren gemessen, parallel hierzu werden die aus Temperaturschwankungen resultierenden Bauwerksbewegungen im westlichen und östlichen Brückenwiderlager jeweils bei den Brückenlagern gemessen. Das hierzu verwendete Messprinzip besteht aus magnetostruktiven Wegsensoren. Des Weiteren wird in Feldmitte zwischen Achse 40 und 50 (Feld in Brückenmitte) die Dehnung des Stahlhohlkastens auf Grund der Belastungen aus Verkehr und der Baumassnahme mittels faseroptischen und konventionellen Dehnmessstreifen festgehalten. Mit den gewonnenen Daten kann man Rückschlüsse auf die durch die aus Eigenlasten tatsächlich bewirkten Belastungen im Bauwerk ziehen, und mit den theoretisch ermittelten Werten vergleichen.

Die Messungen ermöglichen zudem Rückschlüsse auf die tatsächlich vorgefundenen Bewegungen der Brücke und den Spannungen in kritischen Bauteilen wie dem Stahlhohlkasten zu treffen. Zusätzlich zu den oben angeführten Sensoren wurden zwischen Achse 40 und 50 jeweils 4 faseroptische Dehnmessstreifen zur Aufnahme von Schwingungen installiert. An verschiedenen Stellen werden die auftretenden Spannungen mit einer Abtastrate von 100Hz gemessen. Auf diese Weise kann man den Baustellenverkehr (Last und Geschwindigkeit) sowie das resultierende Bauwerksverhalten messen und auch langfristig die Reaktionen des Bauwerkes auf die einwirkenden Lasten überprüfen.

Durchgeführte Kalibrierungen


Um das durch den Schwerverkehr ausgelöste Bauteilverhalten zu ermitteln und um eine Kategorisierung des Verkehrs zu ermöglichen, wurde am 16. September 2005 ein Belastungsversuch mit 3 verschiedenen schweren LKWs (20, 40 und 50t) unter unterschiedlichen Geschwindigkeiten (5, 30, 60 km/h und maximale Geschwindigkeit) durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten wurden von mageba in Hinsicht auf die Kategorisierung der Ereignisse bezüglich Geschwindigkeit und Gewicht (= Überfahrten von LKW schwerer als 20t) ausgewertet.

Zusätzlich durchgeführte Beweissicherung mittels Kamera

Es wurde ausserdem am Bauwerk noch eine Kamera installiert, um kritische Ereignisse, hervorgerufen durch, zum Beispiel das Überschreiten von Grenzlaster und Geschwindigkeiten, photographisch zu dokumentieren. Eine solche photographische Dokumentation, aufgenommen auf der Brücke und übermittelt per GPRS Modem, ist im Bild 3. Die am Bauwerk gewonnenen Daten werden mittels GPRS-Modem kabellos an einen Internetserver übertragen und aufbereitet. Im Internetserver wird ausserdem geprüft, ob gewisse Ereignisse (Alarmwerte z.B. erhöhte Last und/oder Schwingungen) eingetreten sind, bei denen der Kunde informiert werden soll (per SMS und Email). Dies kann die Überschreitung einer kritischen Dehnung, Bewegung oder auch Temperatur sein.



Fig. 3. Bilder zur Beweissicherung auf Grund der dynamischen Erkennung von LKW an der Fugenkonstruktion (Website)

 <p>Switzerland www.mageba.ch</p>	<p>RoboControl Referenzprojekt: Steinbachtalbrücke (Deutschland)</p>	<p>Issued: WU Checked: IM Approved: GM</p>	<p>Revision: 00 Date: 13/02/2006 Page: 5/9</p>
---	---	--	--

Detailbeschreibung der Systems

Ein lang eingeführtes und bewährtes Qualitätssicherungssystem gewährleistet, dass alle Komponenten des Fernüberwachungssystems eine lange Lebensdauer haben [1]. Das Fernüberwachungssystem Robo®Control ist kostengünstig und in der Basisversion können Brücken schon für circa 30'000€ mit einem System ausgerüstet werden [2]. Eine Komplettüberwachung mit Schwingungsmessung und Alarmierung und sehr vielen Sensoren kann jedoch 100'000€ und mehr kosten.

Systembeschreibung der standard Robo®Control Box vom Typ I

Am Bauwerk ist eine Robo®Control Boxen vom Typ I (RC – Box Typ I) im Widerlager auf der Achse 10 installiert. Mittels dieser Box werden Daten bezüglich Bauwerkstemperatur (3x) und Bewegung (4x) gesammelt und im 15 Minutenintervall gespeichert. Die Übermittlung findet per SMS statt. Es wird permanent geprüft, ob die Sensoren noch intakt sind (nur Temperatur) und ggf. ein Alarm übermittelt. Eine besondere Vorauswertung findet nicht statt.

Für jeden Tag werden 4 x pro Tag die ermittelten Messwerte übertragen. Alarmwerte, sowie Kurzzeitmessungen, d.h. Messungen im Sekundentakt, müssen jeweils mindestens einen Tag vor der Messung angefordert werden, da diese um Mitternacht übertragen werden. Die Anzahl SMS ist abhängig von der Anzahl der angeschlossenen Sensoren und von der zu übermittelnden Datenmenge. Langfristig veränderliche Daten wie Bewegung und Temperatur werden von der RCI Box im 15-Minutenintervall automatisch gemessen, gespeichert und übertragen. Sie können via Webapplikation angesehen und bei Bedarf als MS-Excel kompatible CSV Datei herunter geladen werden.

Systembeschreibung der erweiterten Robo®Control Box vom Typ II

Im Widerlager auf Achse 10 befindet sich ausserdem die Robo®Control Box vom Typ II (RC II Box siehe Fig. 4) zur Dehnmessung und für dynamische Messung. Im Normalfall werden die Daten dort durch Mittelwertbildung, sowie der Feststellung von Minima und Maximalwerten, von 6000 Werten pro Minute auf 3 Werte pro Minute reduziert. Alle anderen Messdaten werden nicht gespeichert und gehen somit verloren. Sollten gewisse Sonderfälle auftreten, d.h. Überschreitung eines Schwellenwertes der Dehnung, werden die dynamischen Ereignisse für eine bestimmte Dauer gespeichert und per GPRS-Modem an einen Internetserver übermittelt.

Die dynamischen Daten werden in der RC II Box vorausgewertet und zwischengespeichert. Zudem werden die Messdaten der faseroptischen Sensoren, die als Wellenlänge des Lichtes übermittelt werden, vor Ort kalibriert und in temperaturkompensierte Dehnung, bzw. in Temperatur umgerechnet. Wenn der Zwischenspeicher eine kritische Schwelle erreicht hat (75% des Speichers ist voll), werden die Daten übermittelt (sowohl die reduzierten Ganglinien der Dehnungen, als auch die dynamischen Pakete bestehend aus jeweils 6'000 Werten pro Minute pro Sensor).

Dies kann mehrmals täglich geschehen. Ein Anruf an die RC II Box, sowie von der RC II Box kann beliebig erfolgen. Neben dem Einstellen von Kalibrierungswerten, bietet die Box auch die Möglichkeit eines Firmware Updates, um so bei nachträglich notwendigen Anpassungen die Möglichkeit zu haben dies bequem vom Büro aus zu erledigen.



Fig. 4. Die Messdateneinheit, die so genannte Robo®Control Box vom Typ I (klein, silberfarben) für konventionelle Messungen und vom Typ II mit integriertem Laserinterrogator (gross, weiss).

Systembeschreibung – Software

Kritisch für die übersichtliche Darstellung der Messergebnisse ist ein gut durchdachtes und auf das Messproblem abgestimmte Software Konzept. Es war wichtig, dass die Daten, welche miteinander verknüpft sind, z.B. Temperatur und Bewegung oder Dehnung und LKW-Überfahrten, jeweils zusammen dargestellt werden können. Dies wurde mittels einer gut strukturierten Datenbank erreicht (siehe Fig. 5)

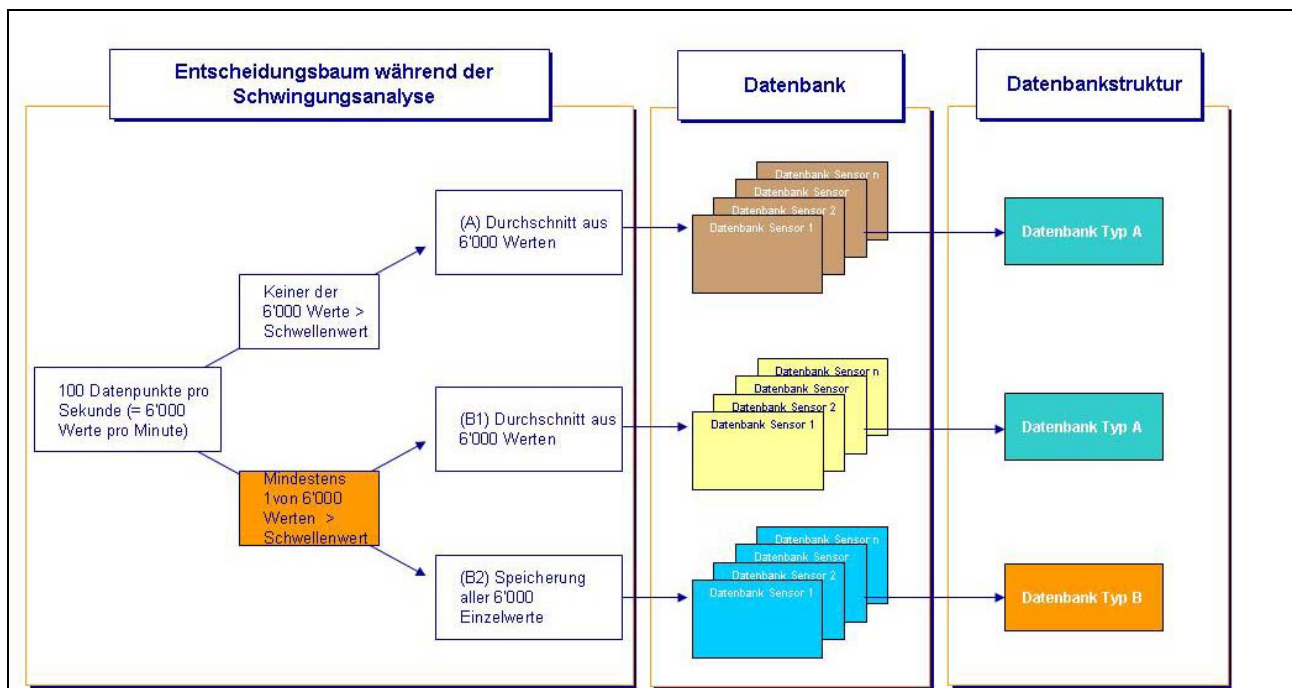


Fig. 5. Konfiguration und Einteilung der Datenbank erlaubt eine übersichtliche Darstellung der Daten

▪ Baustellenkalibrierung

Die Kategorisierung der Lastkraftwagenüberfahrten erfolgt anhand zweier Faktoren. Für das Gewicht der Lastkraftwagen ist die maximal erreichte Dehnung in $\mu\text{m}/\text{m}$ gegenüber dem Grundwert der Dehnung des betreffenden Sensors massgebend. Der Grundwert wird immer als Durchschnitt aller Messdaten eines Sensors während einer Minute neu berechnet.

Für die Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist die Zeitspanne von dem Zeitpunkt relevant, an dem die kritische Dehnung zum ersten Mal erreicht wird, bis zu dem Zeitpunkt an dem der Grundwert sich wieder einstellt. Jedes Bauteil liefert typische Werte, die kategorisiert werden müssen. Es ist sinnvoll hierzu die Bauteile in gleiche Gruppen einzuteilen, die unter Belastung ähnlich reagieren. Dies ist zum Beispiel möglich bei symmetrischen Bauteilen.

Analyse und Auswertung der Daten

Auf Grund dieser Einteilung erhält man 4 verschiedene Sensorkategorien an der Steinbachtalbrücke. Da im Augenblick nur die Brückennordseite befahrbar ist, konnte auch nur für die Nordseite eine Kalibrierung durchgeführt werden. Während des Belastungsversuchs reagierten die Sensoren auf der Nordseite am stärksten auf Belastung, während manche Überfahrten von den Sensoren auf der Südseite kaum erfasst wurden.

Automatisierte Erkennung und Differenzierung der dynamischen Ereignisse

Da der Verkehr aus 2, 4 oder 5-achsigen Fahrzeugen bestehen kann und am empfindlichen Bauteil, der Fuge, diese einzeln aufgelöst werden (im Gegensatz zur Brücke), müssen diese herausgefiltert und richtig erkannt werden, um noch eine Kategorisierung nach Geschwindigkeit zu ermöglichen.

Dies geschieht wie folgt:

- Der Mindestabstand zwischen den Fahrzeugen beträgt immer 20m (Annahme)
- In diesem Fall fahren die Fahrzeuge nicht schneller als 50 km/h (Annahme)
- Die Mindestanzahl der Messpunkte zwischen einem Ereignis beträgt daher mindestens 144 Messpunkte (1.44 Sekunden).
- Der maximale Abstand zwischen den Achsen beträgt 5m, bei langsamer Fahrt (5km/h) ergeben sich somit 362 Messpunkte, bei schneller Fahrt (>60km/h) ergeben sich weniger als 30 Messpunkte.
- Die Übermittlung wird abgebrochen, wenn 4 Tiefpunkte bzw. 4 Spitzen gemessen wurden und innerhalb des zweifachen Abstandes, der zwischen der 3. und 4. Achse liegt, - gemessen nach der 4. Achse – sowie immer noch keine 5. Achse (= fünfter Tief- bzw. Hochpunkt) gemessen wird. Dies ist nochmals in Bild 6 graphisch dargestellt.
- Des Weiteren wird die Ereignisfeststellung gestoppt, wenn die Anzahl der Spitzen bzw. Tiefpunkte = 5 ist. Wenn 5 Spitzen, bzw. Tiefpunkte gezählt werden, handelt es sich um ein 5-achsiges Fahrzeug.
- Wenn es sich um 4 Spitzen bzw. Tiefpunkte handelt, ist die Lastverteilung von Spitze 1 zu Spitze 2 bzw. von Spitze 3 zu Spitze 4 zu überprüfen. Ist diese jeweils 40% (+/-5%) zu 60% (diese Bedingung muss für alle 2 Fahrzeuge gleichzeitig erfüllt sein), handelt es sich um zwei 2-achsige Fahrzeuge.
- Sollten innerhalb des betrachteten Zeitraumes nur 3 Spitzen bzw. Tiefpunkte gemessen werden, so ist dieses Ereignis wie ein 4-achsiges Fahrzeug zu behandeln. Das bedeutet es ist die Belastung für die 1. bis 3. Achse für die Kategorisierung anzusetzen. Dies kann unter Umständen geschehen, wenn eine LKW-Achse „hochgefahren“ ist und nicht mit dem Untergrund in Berührung kommt.
- Die Achsen werden durch das Programm nicht noch einmal separat kategorisiert.

Das Resultat dieser Einteilung und Filterung ist in Fig. 6 graphisch zusammengefasst.

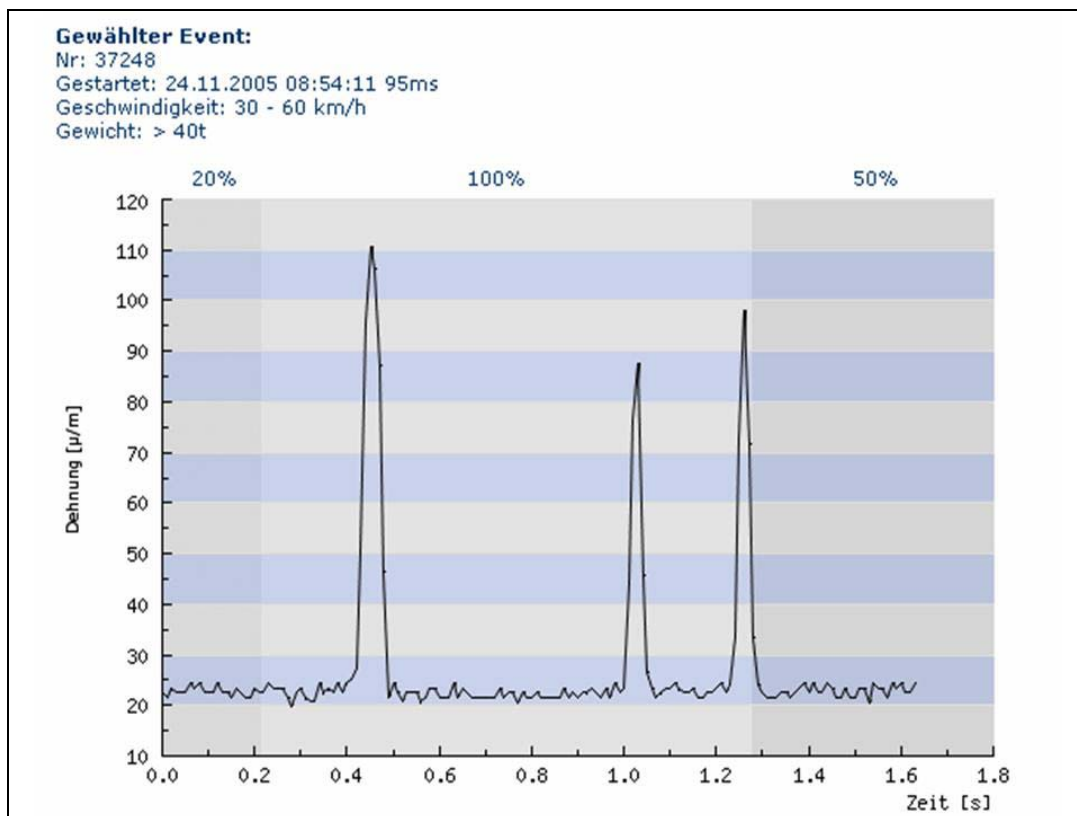
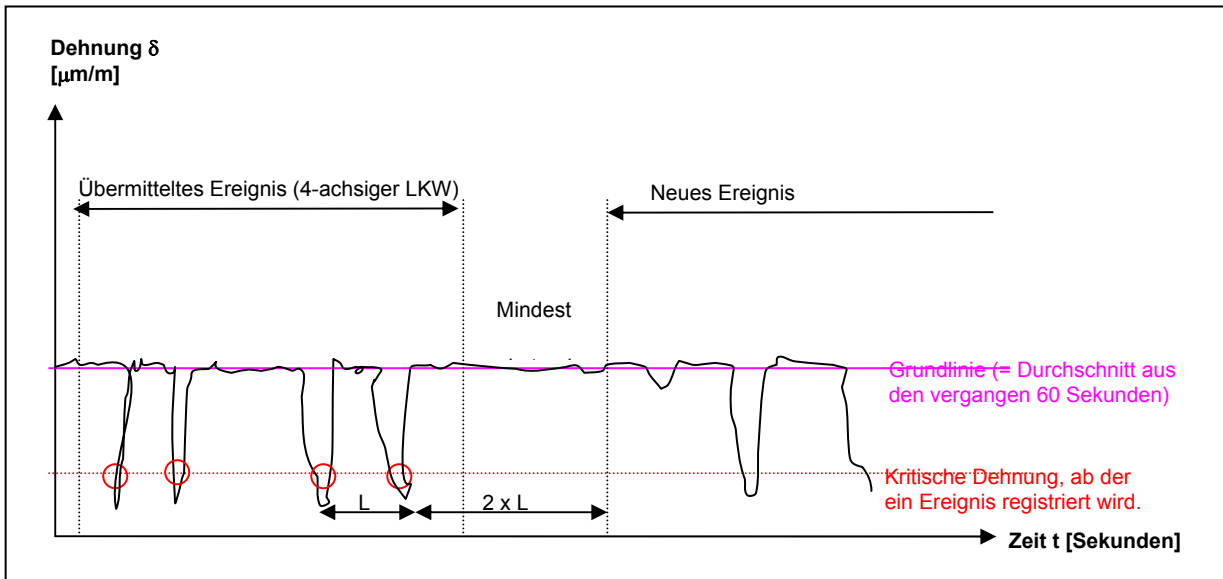



Fig. 7. Dynamische Erkennung von LKW an der Fugenkonstruktion (tatsächlich erkanntes Ereignis – Website Darstellung)

In Fig. 7 werden die auf der Baustelle ermittelten Ergebnisse der Dehnungsmessung in der Fuge als auch der damit verbundenen LKW-Überfahrten angezeigt. Mit Robo®Control lässt sich somit über das Bauwerksverhalten eine gleichzeitige Beweissicherungsmaßnahme (Bilder, siehe auch Fig. 3) verknüpfen.

 <p>Switzerland www.mageba.ch</p>	<p>RoboControl Referenzprojekt: Steinbachtalbrücke (Deutschland)</p>	<p>Issued: WU Checked: IM Approved: GM</p>	<p>Revision: 00 Date: 13/02/2006 Page: 9/9</p>
---	---	--	--

Schlussfolgerung

In den letzten Jahren ist zunehmend ein Markt für kostengünstige Fernüberwachungssysteme entstanden, mit denen das Bauwerksverhalten auch von kleineren Brücken zuverlässig überwacht werden kann. Das von mageba entwickelte System Robo®Control vom Typ I (RC I Box) erfüllt diesen Anspruch. Es ist geeignet Auf-lagerdrücke, Brückenbewegung und Temperatur, Schwingungen sowie andere Parameter zu erfassen und auf einen zentralen Datenserver zu übertragen und vorauszuwerten.

Auf diese Art ist es dem Ingenieur bequem und jederzeit möglich von jedem beliebigen Ort ein Bild über das Verhalten des Bauwerkes zu gewinnen und gegebenenfalls weitere Massnahmen einzuleiten. Für besonders kritische Parameter können zudem noch Alarmwerte gesetzt werden bei deren über- bzw. Unterschreitung die Verantwortlichen direkt informiert werden. Dadurch ist sichergestellt, dass die Bauwerkssicherheit jederzeit gewährleistet ist.

Neben den klassischen oben angeführten Bauwerksparametern, können am System Robo®Control vom Typ II (RC II Box) weitere Erfassungsgeräte an das System angeschlossen werden und Ereignisse aufnehmen, die nicht unmittelbar mit dem Bauwerksverhalten zu tun haben. So kann zum Beispiel eine Kamera zur Beweissicherung der Ereignisse auf einem Bauwerk benutzt werden, wenn gewisse Trigger-Werte wie Dehnung oder Schwingung überschritten werden.

mageba bietet somit die Möglichkeit zum einen preiswertes Brückenmonitoring mit dem Typ I und zum anderen High-End Bauwerksüberwachung mit Schwingungsanalyse und Beweissicherung durch das System vom Typ II zu betreiben und somit Aufschlüsse über das Tragwerksverhalten, die Bauwerkssicherheit oder andere relevante Parameter zu erhalten.

Referenzen

[1] Spuler T., "New EC-Quality Assurance Standards applied at bearings for the Great Belt Bridge", 3rd World Congress on Joints&Bearings, Toronto, 1991.

[2] Spuler T., Moor G., Siegwart M., "Affordable remote monitoring system for bridge structures", International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, Copenhagen, 2006.