



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

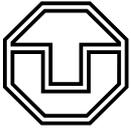
**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 43



Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

---

Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE  
UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 43

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine  
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller  
Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastra

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68

Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer  
Korrekturen: Angela Heller  
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan  
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf [www.qucosa.de](http://www.qucosa.de).

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz  
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

## Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i> .....	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i> .....	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzki, Franziska Pannasch</i> .....	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreusch, Florian Bavendiek</i> .....	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i> .....	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i> .....	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Kruedener, Pascale Dominik</i> .....	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i> .....	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i> .....	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i> .....	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i> .....	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i> .....	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i> .....	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i> .....	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i> .....	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i> .....	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i> .....	207
Übersicht KID-Hefte .....	215

## Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken

Max Käding<sup>1</sup>, Marc Wenner<sup>1</sup>, Steffen Marx<sup>2</sup>

**Zusammenfassung.** Die Bauwerksüberwachung begleitend zu einem Bauprozess zur Absicherung kritischer Zustände ist ein Zweck des Monitorings. Dabei spielen nicht nur die Bauprozesse bei der Errichtung bzw. bei Sanierung/Um-  
bau am bestehenden Bauwerk selbst eine Rolle, sondern auch Bautätigkeiten im Umfeld des Bauwerks. Anhand von zwei Beispielen sollen die Möglichkeiten und Grenzen des Monitorings im Zusammenhang mit der baubegleitenden Überwachung veranschaulicht werden. Das erste Beispiel (Allerbrücke) behandelt die Bestandssicherung und das zweite Beispiel die Überwachung beim Neubau (Aurachtalbrücke).

**Summary: Monitoring of the condition of bridges during the building phase.**  
*A purpose of monitoring is the supervision of a construction during a construction process in order to secure critical states. Beside the processes involved in the erection or refurbishment/reconstruction of a construction itself, also the building activities in the surroundings of the site can be of importance. Using two examples, the possibilities and limitations of the monitoring in connection with the accompanying supervision of a construction are illustrated. The first example (Aller bridge) treats about securing an existing structure and the second example about the monitoring at a new building (Aurachtal bridge).*

### 1 Die baubegleitende Zustandsüberwachung als ein Zweck des Monitorings

Unter Monitoring wird im Bauwesen eine systematische und kontinuierliche Überwachung von Bauwerksreaktionen und/oder der einwirkenden Größen mittels eines automatisierten Messsystems über einen gewissen Zeitraum verstanden [1]. Im Zusammenhang mit dem Brückenbau können verschiedene Anlässe und Zwecke des Monitorings definiert werden. Diese wurden ausführlich in [1] dargestellt und erläutert. Die baubegleitende Zustandsüberwachung ist ein spezifischer Zweck des Monitorings.

Die Überwachung von Bauprozessen stellt sowohl hinsichtlich der Gewährleistung der Qualität bei der Erbringung von Bauleistungen als auch hinsichtlich der Absicherung kritischer Bauzustände eine wichtige Aufgabe dar. Klassischerweise erfolgt die Überwachung durch einfache Sichtprüfungen oder durch etablierte Methoden aus der Geodäsie. Bei komplexeren Bauvorhaben kommen bei Bedarf die Methoden des Monitorings mit den entsprechenden technologischen Möglichkeiten zur Anwendung. Je nach Baumaßnahme können die Ziele für eine messtechnische baubegleitende Überwachung sehr unterschiedlich sein. Im Folgenden wurde eine Kategorisierung vorgenommen (siehe auch Bild 1).

---

1 Dipl.-Ing., Marx Krontal GmbH Beratende Ingenieure, Hannover

2 Univ.-Prof. Dr.-Ing., Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover

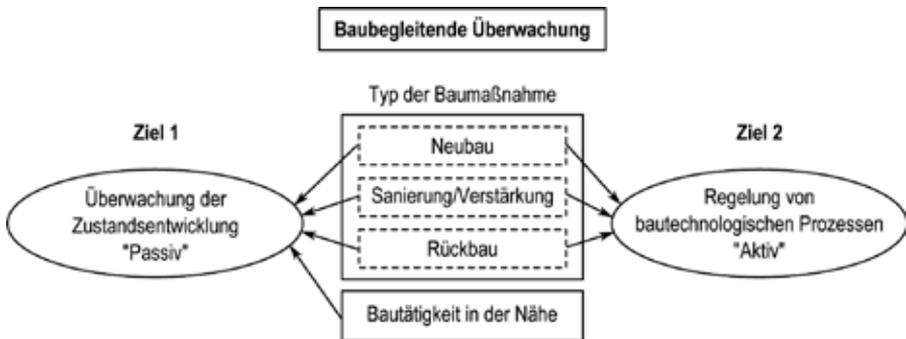


Bild 1: Ziele einer baubegleitenden Überwachung

Grafik: Marc Wenner

### 1.1. Ziel 1: Überwachung der Zustandsentwicklung (passive Überwachung)

Durch die sich ständig ändernden räumlichen und zeitlichen Zustände zählt die Bauphase hinsichtlich der Einsturzgefahr zu der risikvollsten Zeit im Leben einer Brücke. Dieses Risiko betrifft sowohl die Bauprozesse bei der Errichtung bzw. Sanierung/Umbau am bestehenden Bauwerk selbst, als auch Bautätigkeiten im Umfeld des Bauwerks, beispielsweise bei unterirdischen Arbeiten oder Abrissarbeiten in der Nähe des Bauwerks.

Gerade bei komplexen Tragwerken, Bautechnologien oder Randbedingungen kann es erforderlich werden, die übliche visuelle bzw. geodätische Überwachung des Baus durch ein spezifisches Monitoring zur Überwachung der Zustandsentwicklung des Bauwerks oder der Baubehelfe zu ergänzen. Diese Überwachung ist im Gegensatz zur „aktiven“ Überwachung im Sinne des Ziels 2 als eine „passive“ Überwachung zur Bewertung des Zustands von Bauteilen oder eines ganzen Bauwerks zu verstehen. Durch eine Überwachung kritischer Einwirkungen (z. B. Baugrundsetzungen, Temperatur) oder kritischer Bauwerksreaktionen (z. B. hoch ausgelastete Querschnitte in der Statik, Kräfte in temporären Ankern) können auffällige Zustandsentwicklungen erkannt werden und somit die Unversehrtheit des betrachteten Bauwerks durch eine frühe Detektion und Reaktion abgesichert werden. Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Planung der Maßnahme, die Festlegung von Grenzwerten und eine eindeutige und konkrete Definition der Schnittstellen und Verantwortlichkeiten in der Informationskette sowie der anschließenden Maßnahmen. Die Aufbereitung der Messdaten und der Grenzwertvergleich erfolgen unmittelbar nach der Erfassung und müssen auch bei der Verarbeitung großer Datenmengen in kurzer zeitlicher Folge gewährleistet sein. Ein Beispiel wird im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt (siehe Beispiel 1). Es sei angemerkt, dass diese passive Überwachung auch zur Dokumentation/Beweissicherung der in der Bauphase auftretenden Einwirkungen (z. B. im Sinne der DIN 4150-3 [2]) eingesetzt werden kann.

### 1.2 Ziel 2: Regelung von bautechnologischen Prozessen (aktive Überwachung)

Bei einer Baumaßnahme (Neubau, Sanierung, Verstärkung oder Rückbau) kann es durch die gewählte Bautechnologie oder durch die eingesetzten Komponenten erforderlich werden,

den Prozess durch eine messtechnische Begleitung zu regeln. Die erfassten Werte werden direkt vom Bedienungspersonal als Regelungsgröße eingesetzt. Dies wird hier als „aktive“ Überwachung definiert. Typische Beispiele sind:

- ❑ Einstellung der Vorspannkraft von Spanngliedern oder Ankern (direkte Messung der Kraft),
- ❑ Verschub oder Taktschiebeverfahren (synchrone Messung des Wegs an den verschiedenen Gleitstellen),
- ❑ Anheben/Absenken von Überbauten (Messung der Pressenkraft),
- ❑ Temperaturüberwachung (Schweißen von Bauteilen oder Schienen, Überbautemperatur bei der Betonage integraler Brücken).

Die Zielwerte für diese Regelungsgrößen werden durch den Planer gemacht und müssen auf der Baustelle erreicht werden. Je nach Aufgabe werden diese Messungen entweder direkt von der Baufirma oder von Spezialdienstleistern für Bauwerksmessungen durchgeführt. Die Messdaten müssen in situ in einer praxistauglichen Darstellung zur Verfügung gestellt werden und können somit für die Überprüfung der Vorgaben herangezogen werden.

Je nach Komplexität erfolgt die Regelung in Kombination mit der „passiven“ Überwachung zur Verfolgung der Zustandsentwicklung von weiteren Tragwerksreaktionen. Diese Messergebnisse werden dann nicht als Regelungsgröße eingesetzt, bei unplanmäßigem Verhalten kann aber der Prozess unterbrochen werden. Ein Beispiel wird im Rahmen dieses Beitrags vorgestellt (siehe Beispiel 2).

### 1.3 Grenzen der baubegleitenden Überwachung

Die begleitenden Messungen ermöglichen eine deutliche Anhebung des Sicherheitsniveaus beim Bau einer Brücke, das Restrisiko kann jedoch nicht eliminiert werden. Beim Einsatz von Messungen im Rahmen einer baubegleitenden Überwachung (insbesondere im Sinne des Ziels 1) müssen folgende Grenzen des Monitorings bekannt sein:

- ❑ Die Messgrößen, die Messstellen und deren Umfang werden im Rahmen einer Planung auf Basis von rechnerischen Annahmen (Baugrundverhalten, Materialverhalten, statisches System) und von Prognosen festgelegt. Ob kritische Zustandsänderungen zuverlässig erkannt werden können, hängt demnach maßgeblich von der Fachkunde der Beteiligten in dem individuellen Fall ab.
- ❑ Kritische Zustände oder Versagen müssen mit ausreichender Vorankündigung sowohl betrags- als auch zeitmäßig detektierbar sein, um eine ausreichende Reaktionszeit zur Umsetzung von Folgehandlungen zu ermöglichen.
- ❑ Bei Messungen mit automatischer Meldung von Grenzwertüberschreitungen müssen sowohl das technische System (Sensoren, Messanlage, Alarmierungssystem) als auch die menschliche Handlungskette eine sehr hohe Verfügbarkeit aufweisen und redundant ausgebildet werden.

## 2 Beispiele

Im Folgenden werden zwei Beispiele vorgestellt, die jeweils eine der beschriebenen Zielstellungen behandeln und die Erfahrungen der Autoren bei der praktischen Umsetzung im Brückenbau darstellen.

### 2.1 Beispiel 1: Monitoring an der Allerbrücke im Zuge des parallelen Ersatzneubaus

Die Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden überführt die Strecke von Wunstorf nach Bremerhafen. Das ehemalige Bauwerk bestand vor der Baumaßnahme aus einer Vorlandbrücke als massiver Mauerwerksbogen und einer als Stahlkonstruktion ausgebildeten Strombrücke (siehe Bild 2) [1].



Bild 2: Ehemalige Allerbrücke vor dem Ersatzneubau Foto: Gustav Richard

Die 1847 errichteten Pfeiler und Widerlager und 1860 hergestellten Gewölbe aus Ziegelmauerwerk wiesen vorrangig alterungsbedingte und durch Feuchtigkeit hervorgerufene Schäden auf. Nach unterschiedlichen Untersuchungen und Ertüchtigungsmaßnahmen wurde der Ersatzneubau des Bauwerks beschlossen. Die Trasse wurde dafür um ca. 13,8 m parallel zur bestehenden Gleislage verschoben und der Neubau unmittelbar neben der bestehenden und unter Betrieb befindlichen Brücke ausgeführt (siehe Bild 3).



Bild 3: Allerbrücke nach Fertigstellung des Ersatzneubaus in paralleler Lage Foto: Erich Schwinge

Die erforderlichen Tiefgründungsarbeiten und Rammarbeiten im Zuge der Baugruubenherstellung für den Neubau mussten angrenzend an die bestehende Konstruktion durchgeführt werden. Wegen des in Summe schlechten Zustands des Bestandsbauwerkes und der Unsicherheit hinsichtlich der genauen Lage von dessen Gründung war mit einer Degradation des Zustands des Tragwerkes und mit Aus-

wirkungen auf die Gesamtstandsicherheit zu rechnen. Zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebes während der Bauzeit waren besondere Maßnahmen erforderlich. Als mögliche Ursachen für eine Zustandsdegradation und für die Beeinträchtigung der Standsicherheit wurden das Auftreten größerer Setzungen und die Einleitung von Erschütterungen in das Tragwerk identifiziert. Das Erreichen eines kritischen Zustands würde sich durch das Auftreten von Setzungen und durch die Neubildung oder Öffnung bestehender Rissen äußern. Durch diese Erscheinungen war ein ausreichendes Vorankündigungsverhalten gegeben. Es wurde entschieden, ein Monitoring im Sinne einer baubegleitenden Überwachung durchzuführen.

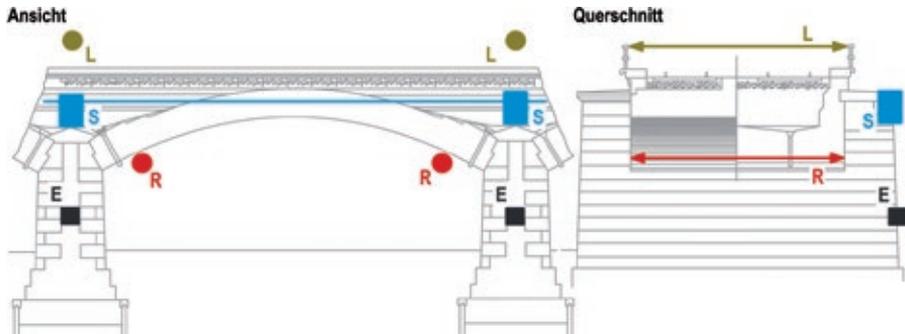


Bild 4: Prinzipdarstellung der Maßnahmen

Grafik: Marc Wenner

Das erarbeitete Monitoringkonzept sah sowohl eine regelmäßige und gesamthafte Überprüfung des baulichen Zustands als auch eine kontinuierliche Überwachung der besonders gefährdeten Bereiche mittels eines elektronischen Messsystems vor. Dafür wurden folgende Maßnahmen vorgesehen (siehe auch Bild 4):

- ❑ Erschütterungsmessungen (**E**) mittels triaxialer Schwinggeschwindigkeitssensoren während des Einbringens von Verbauten zur Meldung unzulässiger Erschütterungen (temporär),
- ❑ Setzungsmessungen (**S**) an den durch Gründungsarbeiten beeinflussten Pfeilern des Bauwerks mittels Schlauchwaagen zur Detektion von Setzungsunterschieden, siehe auch Bild 5,
- ❑ Überwachung der gefährdeten Bogenbereiche mittels Laserdistanzsensoren (**R**) zur Detektion neuer Risse oder von Rissöffnungen,
- ❑ Überwachung der Relativverschiebungen zwischen den Stirnwänden (**L**), um kritische Verformungszustände zu erkennen.

Es handelt sich bei diesem Monitoringprojekt um ein Mess- mit Alarmierungssystem, bei dem bei Grenzwertverletzungen automatische Nachrichten per SMS bzw. E-Mail gemäß ei-

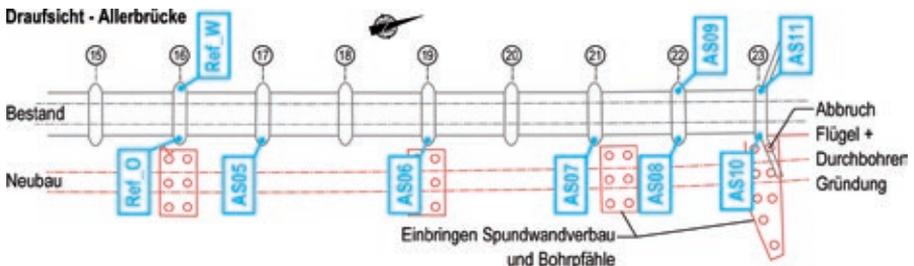


Bild 5: Messlayout Allerbrücke im Bereich des Widerlagers Nord beispielhaft für die Maßnahme S

Grafik: Marc Wenner

ner im Vorfeld definierten Meldekette versendet werden. Es wurde ein dreistufiges Konzept mit Informationswerten, Warnwerten und Alarmwerten gewählt. Da zusätzlich zu den zu erwartenden Auswirkungen aus der Baumaßnahme die Sensoren auch das Regelverformungsverhalten des Bauwerks erfassen (vorwiegend aus Temperatureinflüssen), wurde zur Festlegung der Grenzwerte ein Probetrieb der Messanlage von einem Monat gewählt. In diesem Messzeitraum können auch Fehler der Messanlage detektiert und beseitigt werden. Je länger dieser Probetrieb gewählt wird, desto weniger Fehlermeldungen treten in der ersten Zeit der relevanten Messungen auf. Grundsätzlich wird ein Zeitraum von mindestens 3 Monaten für den Probetrieb empfohlen.

Die Informationsstrategie ist bei solchen Vorhaben ein wichtiger Schlüssel für den Erfolg des Monitorings. Neben der Nachricht, dass ein Grenzwert überschritten wurde, muss auch die Möglichkeit eingeräumt werden, den Verlauf des Messsignals – auch im Vergleich zu den anderen Sensoren – zu konsultieren. Durch das Einstellen einer Webplattform konnten die Beteiligten die Verformungs-Zeitverläufe überprüfen und den Trend über den letzten Tag, über die letzte Woche sowie über den letzten Monat feststellen. Auch dadurch konnten Fehlalarme (z. B. durch das Verdecken des Laserstrahls oder durch Flüssigkeitsverlust in der Schlauchwaage) erkannt werden.

Am Beispiel der gemessenen Setzungen soll der Mehrwert des Monitorings in diesem Fall gezeigt werden. Eine kritische Bauphase waren die Arbeiten im Bereich des bestehenden Widerlagers. Für den Neubau des Widerlagers mussten die Schrägflügel getrennt und die Gründung durchbohrt werden. Die Verläufe der Setzungen bei den Schlauchwaagenmesspunkten AS05 bis AS11 (vgl. Bild 5) sind in Bild 6 dargestellt. Durch die Abbrucharbeiten und durch die Herstellung der Tiefgründung des neuen Widerlagers traten Setzungen von bis zu 10 mm auf der Ostseite des Widerlagers auf. Durch die automatische Information wurde die

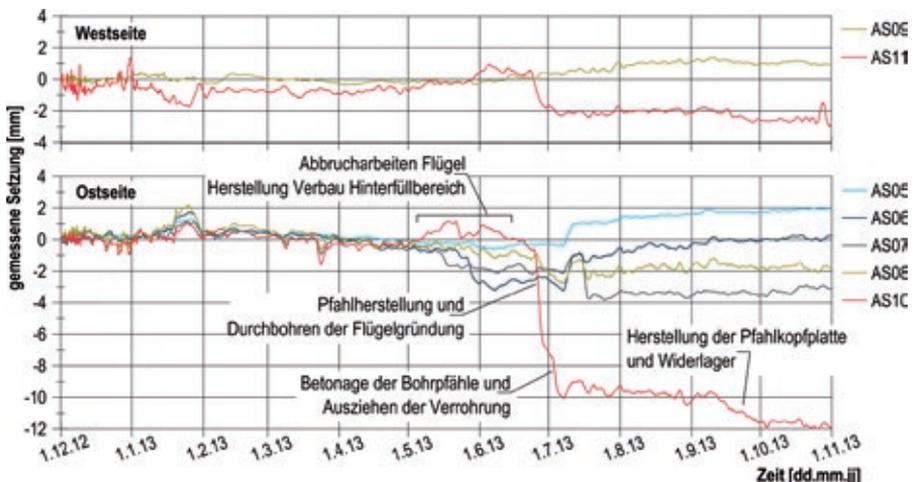


Bild 6: Ergebnisse der Setzungsmessungen im Bereich des Widerlagers Nord und Zuordnung der Ereignisse  
Grafik: Marc Wenner

Bauüberwachung über das Einsetzen der Setzungen benachrichtigt. Durch die visuellen Überprüfungen vor Ort und die Verfolgung des Trends auf der Webplattform konnte jederzeit eingeschätzt werden, ob es sich um ein erwartetes Verhalten oder um einen kritischen Zustand handelt. Nach der Feststellung der Konsolidierung des Zustands wurden die Grenzwerte neu angepasst, um die Alarmkette neu zu konfigurieren und neu einsetzende Verformungen automatisch zu erkennen.

Das durchgeführte baubegleitende Monitoring beim Neubau der Allerbrücke war für die Beurteilung der Zustandsentwicklung des bestehenden Bauwerks bei den verschiedenen Phasen von großer Bedeutung. Durch die automatische Benachrichtigung im Falle von Grenzwertüberschreitungen konnte eine präzise und zielführende Beurteilung des Zustands durch die Bauüberwachung erfolgen. Das Monitoring ist aber als zusätzliches Werkzeug in der Überwachung zu verstehen, da selbst ein sehr umfangreiches Monitoring nur die Punkte überwacht, die zuvor als Gefahrenpunkte erkannt wurden. Das Monitoring ist in diesem Falle eine wertvolle Ergänzung zur visuellen Begutachtung.

Wichtig bei der Konzeptionierung des Monitorings ist, dass die möglichen kritischen Zustände und deren Vorankündigung im Vorfeld erkannt werden und dass die Messinstrumente so verteilt werden, dass die Vorankündigungserscheinungen erfasst werden können. Weiterhin ist der Definition der Grenzwerte und der Informationskette bei Grenzwertüberschreitungen große Aufmerksamkeit im Zuge der Planung zu schenken.

Zusätzliche Informationen können den Quellen [1] und [3]–[5] entnommen werden.

## 2.2. Beispiel 2: Absicherung kritischer Bauzustände bei der Errichtung der semi-integralen Aurachtalbrücke

Die Aurachtalbrücke überführt die Hauptstrecke Nordbayerns von Nürnberg nach Würzburg zwischen den Bahnhöfen Hagenbüchach und Emskirchen über das Tal der Mittleren Aurach. Bereits in 1865 wurde das erste Bauwerk für den eingleisigen Verkehr in Betrieb genommen und trotz der widrigen Untergrundverhältnisse als ein 3-feldriges Viadukt mit Pauliträgern als Überbaukonstruktion hergestellt (s. Bild 7) [6]. Die Bahnlinie wurde von vornherein für den zweigleisigen Ausbau konzipiert und bis Ende 1892 um drei weitere Fischbauchträger erweitert. Nach etwa 70 Jahren Betriebszeit wurden die alten Träger durch die bis vor kurzem noch unter Betrieb stehende Vollwandträgerkonstruktion ersetzt (siehe Bild 8).

Aufgrund der schwierigen Baugrundverhältnisse mussten die alten Dämme immer

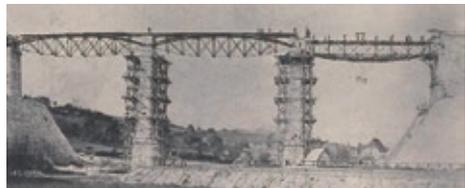


Bild 7: Bauwerk von 1865 mit Fischbauchträgern (Pauliträgern) im Bauzustand Foto: [6]



Bild 8: Bauwerk von 1936 mit Vollwandträgern unter Betrieb Foto: [6]



Bild 9: Neubau im Bauzustand mit alter Brücke von 1936 im Hintergrund Foto: Max Käding

wieder aufwändig saniert werden. Um eine dauerhafte Linienverbesserung zu erzielen, wurde aufgrund der hohen Bedeutung der Verbindung im Streckennetz der DB ein Neubau geplant. Der Entwurf für das neue Bauwerk entstand im Zuge eines europaweiten Planungswettbewerbes. Der Vorschlag einer semi-integralen Spannbetonkonstruktion mit einer Gesamtlänge von 530 m überzeugte durch eine architektonisch und technisch-konstruktiv hochwertige Umsetzung. Der Überbau wurde als ein über 11 Felder durchlaufender Spannbetonplattenbalken geplant, der mit allen Pfeilern sowie mit dem Widerlager in Achse 10 (Widerlager Fürth) monolithisch verbunden ist (siehe Bild 9 und Bild 10). Nur in Achse 120 wurde eine Bewegungsfuge zwischen dem Überbau und dem Widerlager angeordnet.

Durch die monolithische Verbindung zwischen Überbau und Unterbauten erzeugen die Längsverformungen des Überbaus aus Temperaturänderungen, Kriechen und Schwinden große

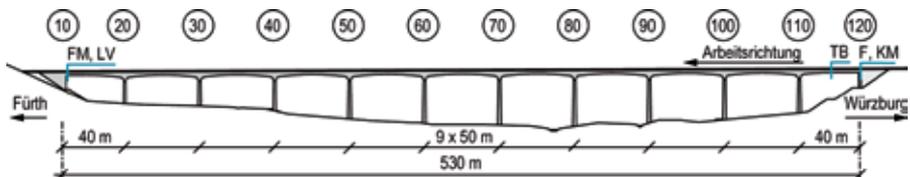


Bild 10: Ansicht des Neubaus und Anordnung der Messstellen (Auszug für diesen Beitrag) Grafik: Max Käding

Zwangsschnittgrößen in den Pfeilern, die mit zunehmendem Abstand vom Ruhepunkt des Tragwerkes in Achse 10 größer werden. Diese Effekte werden umso kritischer, je geringer die Pfeilerhöhen durch das steigende Geländeprofil in Richtung Achse 120 ausfallen. Um die Zwangskräfte auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren, wurde für die Bauausführung ein Vorgehen gewählt, welches bereits in ähnlicher Weise bei der Errichtung der Scherkondetalbrücke erfolgreich eingesetzt wurde [7], [8].

Die Herstellung des Überbaus der Au-rachtalbrücke erfolgte von einem in Achse 120 temporär eingerichteten Festpunkt in Richtung des Widerlagers in Achse 10 (siehe Bild 10). Durch die Anordnung von zusätzlichen temporären Spanngliedern zwischen dem Endquerträger des Überbaus und einem Verankerungsbalken hinter der Kammerdecke des Widerlagers wurde die bauzeitliche Längsfesthaltung sichergestellt (siehe Bild 11). Der Verankerungsbalken wurde mit Pressen gegen die Kammerdecke abgestützt, so dass in verschiedenen Bauzuständen durch Anfahren oder Ablassen der Pressen eine horizontale Ausrichtung des Tragwerkes ermöglicht wurde. Das endgültige Tragsystem wurde erst mit dem Lückenschluss zwischen Achse 10 und gleichzeitigem Festpunktwechsel hergestellt.

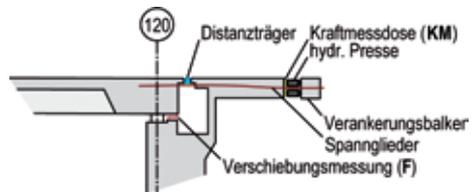


Bild 11: Temporäre Längsfesthaltung und Anordnung der Messstellen in Achse 120

Grafik: Max Käding

Da die Vielzahl der Einflussparameter aus dem Materialverhalten, den Baugrundverhältnissen bzw. den Einwirkungen äußerst komplex ist und deren Auswirkungen trotz sorgfältiger Planung nicht vollständig prognostiziert werden können, wurde durch das Eisenbahnbundesamt eine Überwachung der tatsächlichen auftretenden Verformungen und ein Vergleich mit den berechneten Werten gefordert. Diese Forderung bezieht sich sowohl auf den Zeitraum der Errichtung des Bauwerkes als auch auf die ersten Betriebsjahre. Das erarbeitete Monitoringkonzept beinhaltet daher sowohl baubegleitende Maßnahmen als auch ein umfangreiches Dauermonitoring. Aus dem beschriebenen Bauablauf ergaben sich im Wesentlichen zwei kritische Bauzustände, die eine begleitende messtechnische Überwachung erforderlich machten: a) die Herstellung und Einrichtung des temporären Festpunktes und b) der Festpunktwechsel.

Bei der Herstellung des temporären Festpunktes wurde das erste Überbaufeld um ein definiertes Maß an die Kammerdecke des Widerlagers herangezogen, um eine planmäßige Vorverformung des am Überbau bereits angeschlossenen Pfeilers in Achse 110 einzustellen und so den Verkürzungen aus Kriechen und Schwinden im Endzustand entgegenzuwirken. Zur Überwachung dieses Vorganges wurden eine Verformungsmessung (**F**) mit einem potentiometrischen Weggeber in der Bauwerksfuge zur Erfassung der Längsverschiebungen und eine Kraftmessung (**KM**) zwischen dem Verankerungsbalken und der Kammerdecke zur Überwachung der eingeleiteten Zugkräfte geplant (siehe Bilder 10 und 11).

In den Vorgaben der statischen Berechnungen wurde eine Vorverformung von 75 mm vorgesehen. In Bild 12 ist zu erkennen, dass dieser Verformungswert in mehreren Schritten eingestellt wurde (Rückziehen im Zeitraum September/Okttober 2015). Durch eine Kraft von

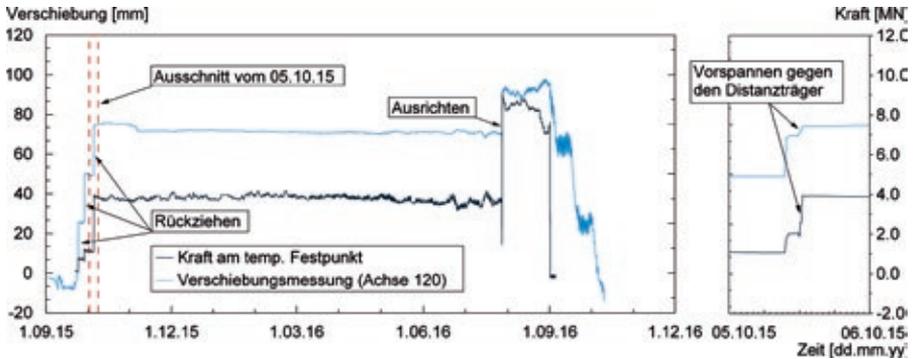


Bild 12: Darstellung der Verschiebungs- und Kraftmessung in Achse 120 über die gesamte Bauzeit  
 Grafik: Max Käding

2 MN konnte eine Verschiebung von etwa 70 mm erreicht werden (siehe Auszug rechts in Bild 12). Im Anschluss wurde der Überbau gegen den Distanzträger zwischen Endquerträger und Kammerdecke vorgespannt und eine zusätzliche Verformung von 5 mm realisiert, so dass der geplante Weg von 75 mm erreicht wurde. Die Unverschieblichkeit des Bauwerks ist durch den vorgespannten Zustand während der gesamten Bauzeit gewährleistet.

Vor dem Festpunktwechsel wurde Ende Juli 2016 das nahezu vollständig errichtete Tragwerk durch ein erneutes Anfahren der Pressen ausgerichtet, um dem Kriechen und Schwinden aller weiteren Pfeiler entgegenzuwirken. Die erforderliche Verschiebung wurde in Abhängigkeit der Bauwerkstemperatur vorgegeben, welche in einem entsprechenden Messquerschnitt (TB) durch im Beton eingelassene Temperatursensoren erfasst wurde (siehe Bild 10). Auch in diesem Fall konnte durch die Kraft- und Verschiebungsmessung der vorgegebene Wert nachgewiesen werden. Nach den Bewehrungsarbeiten erfolgte Ende August 2016 die Betonage des letzten Überbauabschnittes (zwischen den Achsen 10 und 20) und der Festpunktwechsel. Bei diesem Bauzustand bestand die Gefahr, dass in dem noch jungen Beton unplanmäßige Zwangsbelastungen infolge der Verschiebungen des freien Überbauendes (Achse 20) durch Tempera-

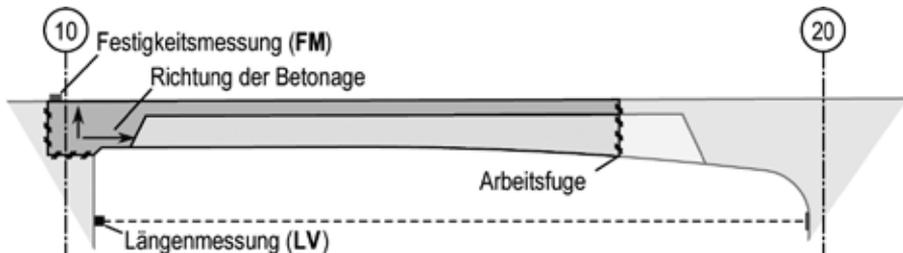


Bild 13: Darstellung des letzten Bauabschnittes und Anordnung der Messstellen in Achse 10  
 Grafik: Max Käding

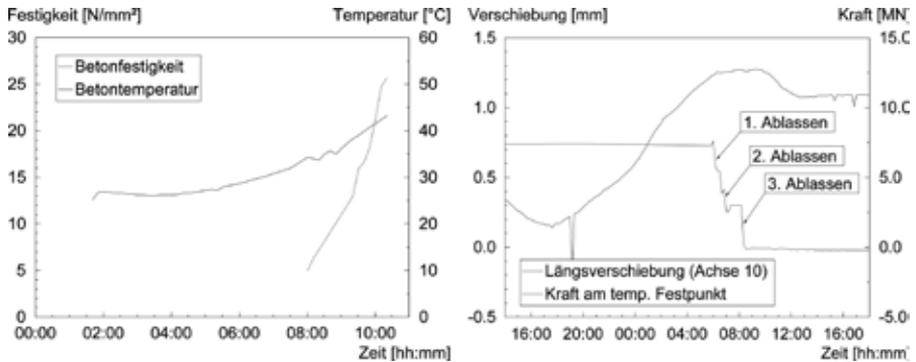


Bild 14: Betonfestigkeit und -temperatur des Frischbetons (links); Längsverschiebung zwischen Achse 10 und Achse 20 sowie Kraftmessung am temporären Festpunkt (rechts) Grafik: Max Käding

turschwankungen des fast 500 m langen Überbaus auftreten. Darüber hinaus war für die Umlagerung des statischen Systems eine ausreichende Festigkeit des Frischbetons erforderlich. Der Fokus dieser Messungen lag daher auf der Überwachung der Entwicklung der Frischbetonfestigkeit (**FM**) und der Längsverschiebung zwischen Widerlager und Überbauende (**LV**) (siehe Bilder 10 und 13). Die Frischbetonfestigkeit wird auf Grundlage einer Ultraschalllaufzeitmessung und eines rezepturabhängigen Werkstoffmodells ermittelt. Die Tauchsonde wurde auf der frisch abgezogenen Betonoberfläche appliziert und bis zum Ablassen betrieben.

Durch eine frühzeitige Installation der Längenmessung (**LV**) konnten zum Zeitpunkt der Betonage die zu erwartenden Längsverschiebungen infolge der tageszeitlichen Temperaturänderungen des Überbaus zuverlässig prognostiziert werden. Entgegen den Erwartungen in der Planungsphase wurden wegen der geringen Temperaturvariationen des Betons kleine Verformungen gemessen. Die aufgetretenen Verformungen konnten daher in zwei Ablassstufen problemlos kompensiert werden (siehe Bild 14). In einer dritten Stufe wurden die Spannkabel am temporären Festpunkt nach Erreichen der vorgegebenen Betonfestigkeit vollständig gelöst und der Festpunktwechsel vollzogen.

Das Beispiel der Aurachtalbrücke zeigt, dass mit der messtechnischen Begleitung kritischer Bauabläufe dem bauausführenden Unternehmen, dem Bauherrn bzw. dem Ausführungsplaner ein hilfreiches Werkzeug zur Verfügung steht. Die erfassten Messdaten konnten problemlos in situ am Messrechner dargestellt und unmittelbar für die Überprüfung der Annahmen bzw. der Angaben aus den Arbeitsanweisungen herangezogen werden. Insbesondere für die Herstellung komplexer Tragwerke können auf diese Weise die gewünschten Parameter gezielt eingestellt und überwacht werden.

## Literatur

- [1] Marx, S.; Hahn, O.; Wenner, M.: Monitoring an Brücken, Möglichkeiten und Grenzen. In: Ingenieurakademie West e.V. (Hrsg.): Tagungsband zum Seminar Brückenbau im Fokus, 25.11.2016, Essen: Ingenieurakademie West e.V., 2016, S. 29–51.
- [2] DIN 4150-3:2015-10: Erschütterungen im Bauwesen – Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen.
- [3] Marx, S.; Krontal, L.; Tamms, K.: Monitoring von Brückentragwerken als Werkzeug der Bauüberwachung. Bautechnik 92 (2015) 2, S. 123–133 | – DOI: 10.1002/bate.201500002.
- [4] Schacht, G.; Schwinge, E.; Krontal, L.; Hahn, O.; Marx, S.: Die Eisenbahnbrücke über die Aller bei Verden (1843–2016). In: Jäger, W. (Hrsg.): Mauerwerkskalender 2018 (in Vorbereitung).
- [5] Schacht, G.; Piehler, J.; Müller, J. Z. A.; Marx, S.: Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke. Bautechnik 94 (2017) 2, S. 125–130 – DOI: 10.1002/bate.201600084.
- [6] Wendler, H.: Die letzte Lücke – die Emskirchener Brücke, 125 Jahre Eisenbahnlinie Nürnberg–Würzburg. Emskirchen, 1990.
- [7] Marx, S.; Wenner, M.: Structural Health Monitoring (SHM) an der Scherkondetalbrücke: eine semi-integrale Eisenbahn-Betonbrücke. Beton- und Stahlbetonbau Spezial 110 (2015) – Supplement: Erhaltung und Instandsetzung von Betonbauwerken – Beispiele aus Europa und der Welt, S. 2–8 – DOI: 10.1002/best.201500501.
- [8] Marx, S.; Krontal, L.; Wenner, M. (2014): Semiintegrale Brücken. In: Mehlhorn, G.; Curbach, M. (Hrsg.): Handbuch Brücken, Kap. 6.2.2, 3. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.