
Anhang zu:

Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

von

Ursula Freundt

Ralf Vogt

Sebastian Böning

Dirk Michael

Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt, Weimar

Carsten Könke

Heiko Beinersdorf

Materialforschungs- und Prüfanstalt

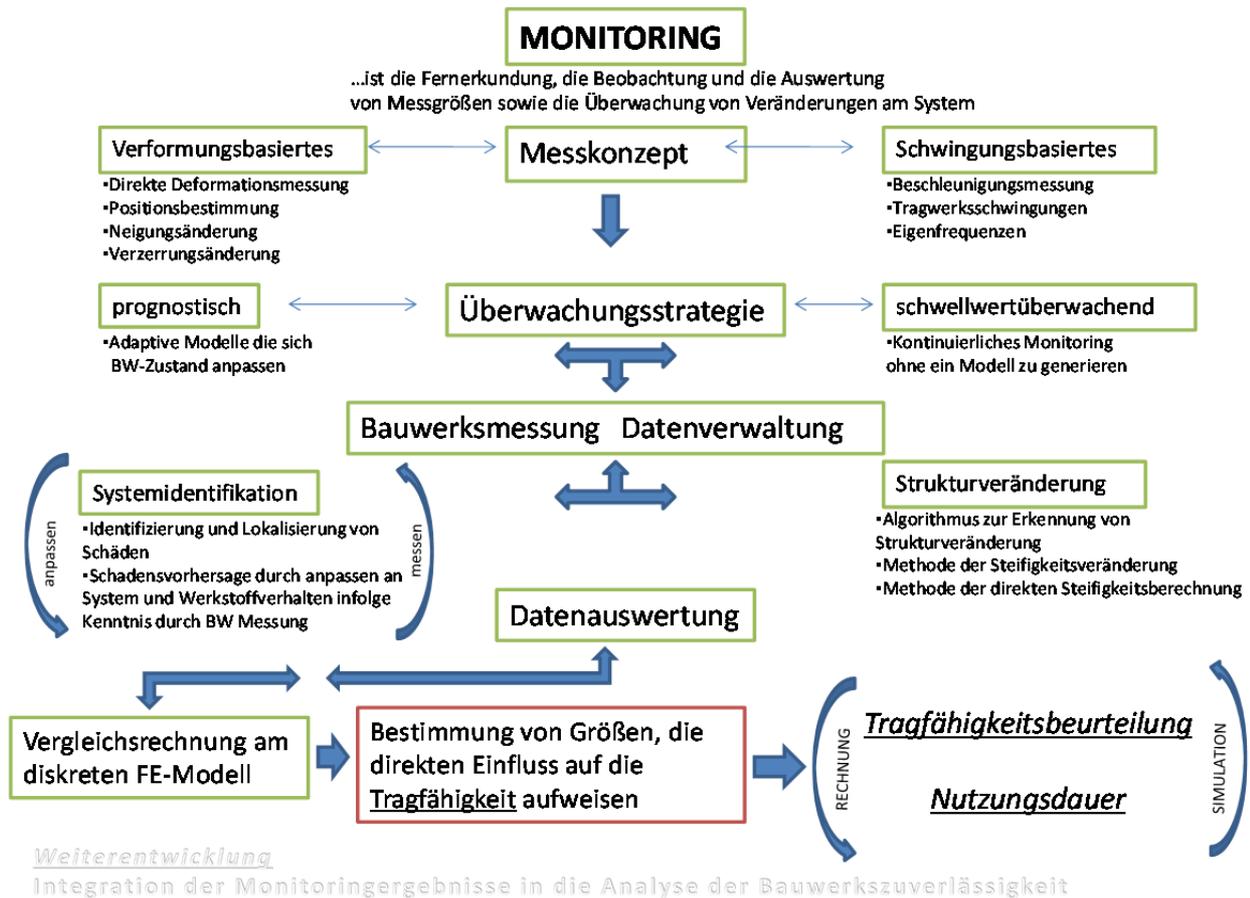
Bauhaus-Universität Weimar

**Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen
Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 106**

A Analyse Schadenskatalog Hauptbauteil Überbau aus Stahlbeton und Spannbeton

Nr	Bauwerksart, Hauptbauteil / Konstruktionsteil / Bauteilergänzung oder Hauptbaustoff / Schäden	Messverfahren /Messprinzip	Bemerkung	Eignung für Monitoring	
ÜBERBAU					
1	Stahlbeton/Spannbeton - Überbau durchgebogen	Durchbiegungsmessung von einem / mehreren Festpunkten aus	z.B. geodätisch	ja	Schwellwertüberwachung
		Dehnungsmessung	z.B. DMS, faseroptischer Dehnungssensor	ja	
		Neigungsmessung	z.B. Neigungssensor	ja	
2	Stahlbeton/Spannbeton - großflächige Durchfeuchtungen/Ausblühungen/Aussinterung	Messung der Feuchteverteilung	z.B. Multiring-Elektrode	ja	Messung ab Neubau /Frequenz einmal im Monat
3	Stahlbeton - Abplatzungen mit freiliegender Tragbewehrung mit korrodierter Bewehrung (Querschnittsminderung bis teilweiser Ausfall der Tragbewehrung)	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	z.B. Korrosionssensor	ja	Messung ab Neubau /Frequenz einmal im Jahr
4	Stahlbeton/Spannbeton - Betondeckung der Tragbewehrung > 15 mm - 30 mm, schlechte Betonqualität	Messung der magnetischen Induktion	z.B. Bewehrungsprüfgerät	nein	Abnahmeprüfung
5	Stahlbeton/Spannbeton - Karbonatisierungsfront reicht an Tragbewehrung heran	Indikatorverfahren	Phenolphthalein	nein	
6	Stahlbeton/Spannbeton - Chloridfront (>0,4 M%-Z bei Stahlbeton, bzw >0,2 M%-Z bei Spannbeton) reicht an Tragbewehrung heran	Messung der elektrischen Leitfähigkeit	z.B. Chloridsensoren	ja	Messung ab Neubau /Frequenz einmal im Jahr
7	Stahlbeton/Spannbeton - sich unter Verkehrslast bewegende Risse >0,4 mm	Messung der Rissöffnung	z.B. induct. Wegaufnehmer	ja	Schwellwertüberwachung
8	Abdichtung, durchdrückendes Wasser großflächig	Messung der Feuchteverteilung	z.B. Multiring-Elektrode	ja	Messung ab Neubau /Frequenz einmal im Monat

B Prinzipieller Ablauf bei Monitoringsystemen



C Ein Kennwertbezogenes Monitoring-System für Brücken – Grundlagen und praktische Empfehlungen

(Original – Auszug aus der Diplomarbeit von Udo Büchner, Bauhaus-Universität Weimar)

Ein kennwertbezogenes Monitoring-System für Brücken

Grundlagen und praktische Empfehlungen

Diplomarbeit

Bauhaus-Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Verkehrsbau

vorgelegt von: Udo Büchner

Seminargruppe: B/00/C

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. U. Freundt

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Dirk Michael

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen	4
1 Einleitung	5
2 Analyse durchgeführter in situ Untersuchungen	6
2.1 Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des fließenden Verkehrs und Temperatureinwirkungen	7
2.1.1 Ermittlung des Schwerverkehrs mit Hilfe des Schwingverhaltens der Brücke	7
2.1.2 Frühzeitiges Feststellen von Spannkraftverlusten.....	12
2.1.3 Überwachung der Spannungen in der Bewehrung.....	17
2.1.4 Ermittlung von Fahrzeugen durch Auswertung von Einflusslinien.....	20
2.1.5 Ermüdungssicherheit von Koppelfugenquerschnitten	26
2.1.6 Prüfen von Konstruktionslösungen	31
2.2 Untersuchungen an Lagerungspunkten.....	36
2.2.1 Messung der Lagerreaktionen während einer Fahrzeugüberfahrt.....	36
2.2.2 Langzeitmessungen von Lagerbewegungen	40
2.3 Untersuchungen hinsichtlich des temperaturbedingten und zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Beton	43
2.3.1 Verifizierung von Konstruktionslösungen für Hochleistungsbetone.....	43
2.4 Zusammenfassung.....	49
3 Beispieldefinition zur Entwicklung eines Monitoringkonzeptes	51
3.1 Tragwerksbeispiel	51
3.2 Untersuchungsziel.....	53
3.3 Grundlagen der Ermüdung.....	53
3.4 Analyse von Einflussparametern	58
3.4.1 Maßgebende Einwirkungen	58
3.4.2 Ermüdungsrelevanter Tragwerksbereich.....	62

4 Messkonzept	64
4.1 Voruntersuchungen	64
4.2 Messgröße und Messfrequenz.....	65
4.2.1 Erfassung der Einflüsse des fließenden Verkehrs	65
4.2.2 Erfassung des Einflusses der Temperatureinwirkung	66
4.3 Technische Ausrüstung und Messposition.....	67
4.3.1 Grundlegendes.....	67
4.3.2 Dehnungsmessung.....	68
4.3.3 Temperaturmessung	68
4.3.4 Darstellung der Messposition.....	69
4.3.5 Abschätzung der Kosten der technischen Ausrüstung	70
4.4 Prinzipielle Messergebnisse	72
4.5 Kalibrierung	73
5 Auswertung der Messdaten.....	78
5.1 Steuerung der Datenerfassung	78
5.2 Datenvorauswertung	80
5.3 Dateninterpretation.....	84
5.3.1 Untersuchung des Funktionsverlaufes einer simulierten Überfahrt.....	85
5.3.2 Berechnungsmodell zur Ermittlung von Achslasten.....	91
5.4 Bewertung der Messdaten.....	96
5.5 Folgerungen für das Tragwerk.....	98
6 Zusammenfassung.....	100
Literaturverzeichnis	103
Abbildungsverzeichnis.....	105
Tabellenverzeichnis	106
Erklärung	108

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Symbole

E	[N/mm ²]	E-Modul
I	[m ⁴]	Flächenträgheitsmoment
Hz	[1/s]	Hertz (Frequenz)
L	[m]	freie Länge
L _i	[m]	Feldlänge
T _N	[K]	konstanter Temperaturanteil
T _M	[K]	vertikale Temperaturdifferenz
ε	[-]	Dehnung
φ	[-]	Verdrehung

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
BAB	Bundesautobahn
DMS	Dehnungsmessstreifen
Kap.	Kapitel
LKW	Lastkraftwagen
PKW	Personenkraftwagen
VMA	Vielstellenmessanlage

1 Einleitung

Ein leistungsfähiges Infrastrukturnetz ist stark mit der Sicherheit der darin befindlichen Brückenbauwerke verknüpft. Besonders vor dem Hintergrund immer älter werdender Bauwerke, ist die Aufrechterhaltung der Zuverlässigkeit (Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit) und der Verkehrssicherheit über die Nutzungsdauer von hohem Interesse. Allgemein wird dies maßgeblich von äußeren Faktoren wie beispielsweise Verkehr und Klima beeinflusst. Zusätzlich variieren die örtlichen Gegebenheiten sowie die Art der Konstruktion bei jeder Brücke.

Sichere Aussagen über den Zustand des Bauwerks sind von enormer Wichtigkeit. Hierfür werden gegenwärtig regelmäßige Bauwerkskontrollen durchgeführt. Diese stellen eine Momentaufnahme dar und unterliegen subjektiven Einschätzungen des Prüfindenieurs. Um objektive Aussagen über Zustand und Veränderung eines Bauwerks zu treffen, sind Messungen notwendig. Infolgedessen hat das Brückenmonitoring an theoretischem und praktischem Stellenwert gewonnen. In jüngerer Vergangenheit wurden bereits verschiedene Monitoringkonzepte entwickelt und an diversen Brückenbauwerken angewandt.

Ziel der Arbeit ist es, diese Konzepte eingehend zu analysieren, die daraus gewonnenen Erkenntnisse zu bündeln und damit die Grundlage für ein aufgabenbezogenes Monitoringkonzept zu schaffen. Dabei werden prinzipiell die Einwirkungen aus Temperatur und Verkehr berücksichtigt und ausschließlich auf balkenartige Tragsysteme eingegangen.

2 Analyse durchgeführter in situ Untersuchungen

Im Folgenden werden verschiedene Monitoringkonzepte vorgestellt, die sich innerhalb ihrer Zielsetzungen mit Einwirkungen aus fließendem Verkehr und/oder Temperatur beschäftigen. Grundlegendes Interesse gilt dabei den Möglichkeiten der Erfassung von systembezogenen Kennwerten und den daraus ableitbaren problembezogenen Aussagen. Zusätzlich werden Konzepte beschrieben, deren Aufgabenbereich anderen Problemstellungen gewidmet ist, die aber Lösungen für bestimmte Teilprobleme auf dem Gebiet der messtechnischen Datenerfassung bieten.

Resultierend aus verschiedenen Problemstellungen werden unterschiedliche Herangehensweisen beschrieben. Es wird das betreffende Tragwerk und die dabei verfolgten Ziele vorgestellt. Weiterhin wird auf die zur Durchführung notwendigen Kenngrößen und auf die daraus abgeleitete messtechnische Umsetzung eingegangen. Sofern hierzu Angaben vorhanden sind, werden die zur Dateninterpretation gewählten Auswertungsansätze und Messergebnisse der Datenauswertung und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse beschrieben. Abschließend werden die Messkonzepte hinsichtlich ihrer prinzipiellen Eignung bzw. der Eignung für entsprechende Teilprobleme durch den Verfasser bewertet.

2.1 Untersuchungen bezüglich der Auswirkungen des fließenden Verkehrs und Temperatureinwirkungen

2.1.1 Ermittlung des Schwerverkehrs mit Hilfe des Schwingverhaltens der Brücke

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [1] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Steinbachtalbrücke ist eine über sechs Felder durchlaufende, einteilige Stahlverbundkonstruktion mit Spannweiten zwischen 48 m und 78 m. Sie wurde als vorgezogene Maßnahme im Zuge des Baus der Südharzautobahn BAB 38 errichtet, um die für den Streckenbau benötigten Erdmassentransporte über das Tal zu führen. Nach 5-jähriger Nutzung wurde das Bauwerk instand gesetzt. Diese Baumaßnahme führte zu einer kurzzeitigen Reduzierung des Eigengewichtes.

Zur Beobachtung der Auswirkungen der mitunter überschweren Erdmassentransporte und der Lastbildveränderungen durch die Instandsetzungsmaßnahmen, wurde das Bauwerk mit einem kommerziell erhältlichen Fernüberwachungssystem ausgerüstet.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Mit der messtechnischen Überwachung waren drei Aufgaben verbunden. Mit Hilfe der Messung des Schwingverhaltens der Brücke sollte der Schwerlastverkehr nicht nur ermittelt, sondern auch kategorisiert werden. Weiterhin galt es, das durch die Instandsetzungsmaßnahme veränderte Lastbild aus Eigengewicht zu bestimmen. Schließlich sollten Informationen über die temperaturbedingten Bewegungen des Überbaus gesammelt und mit theoretischen Werten verglichen werden.

Mit dieser Zielsetzung wurden in Feldmitte des mittleren und zugleich längsten Brückenfeldes einerseits die Dehnungen an mehreren Stellen des Querschnitts und andererseits die Temperaturen im und am Bauwerk gemessen. Ebenfalls in Feldmitte sowie am Widerlager der Achse 10 wurden Sensoren, die eine Messfrequenz von 100 Hz ermöglichten, zur dynamischen Dehnungsmessung angebracht. Um die Bewegungen des Überbaus hinsichtlich der Temperaturschwankungen aufzunehmen, wurden die Lagerverschiebungen an beiden Widerlagern messtechnisch erfasst. Die genaue Anordnung der Sensoren kann Abb. 1 entnommen werden.

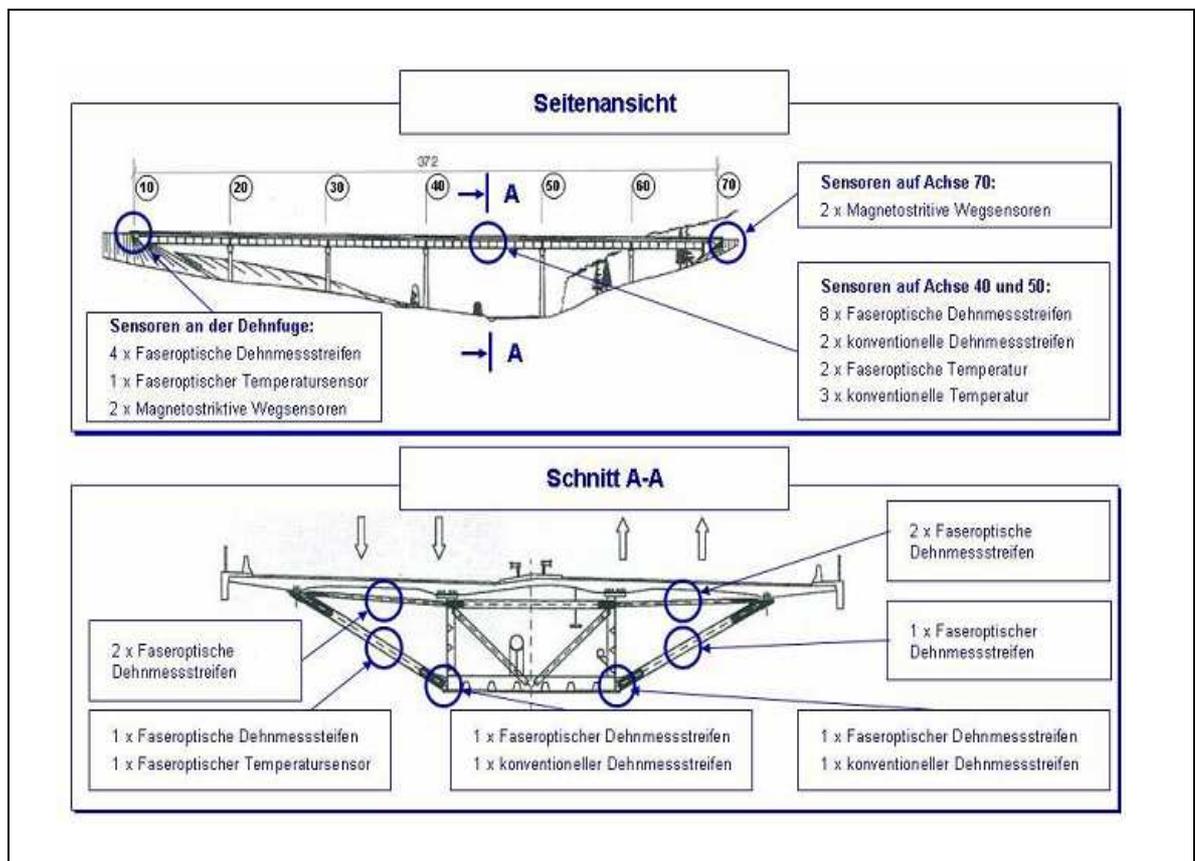


Abb. 1: Anordnung der Messinstrumentation der Steinbachtalbrücke [1]

Auswertungsansätze

Zur Messung der Temperatur und der Überbaubewegungen wurden 15-minütig Messdaten gespeichert. Bei der dynamischen Dehnungsmessung (100 Hz) wurde die aus 6000 Messwerten pro Minute bestehende Datenmenge durch Ermittlung des Mittelwertes und der Extremwerte auf 3 Werte pro Minute reduziert.

Das System ermöglichte zudem, vorab Grenzwerte für bestimmte Messgrößen (z.B. Dehnungen oder Schwingungen) zu definieren, bei deren Überschreiten ein Alarm ausgelöst werden konnte. Für diesen Grenzfall wurden die dynamischen Größen für das entsprechende Zeitfenster im Gesamten gespeichert. Zur fotografischen Dokumentation kritischer Ereignisse wurde eine Kamera auf der Brücke angebracht.

Zur Kalibrierung der Messeinrichtung und zur Bestimmung des Bauwerksverhaltens unter Schwerlastverkehr, wurde ein Belastungsversuch mit drei verschiedenen schweren LKW (20 t, 40 t, 50 t) bei jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten (5, 30, 60 km/h und maximale Geschwindigkeit) durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt war lediglich der nördliche Teil des Bauwerks befahrbar, so dass auch nur die dort befindlichen Sensoren kalibriert wurden.

In der Fuge der Widerlagerachse 10 erfolgte die Kategorisierung des Schwerverkehrs. Hierfür waren das Gewicht des Fahrzeugs und dessen Geschwindigkeit von Bedeutung. Der Unterschied zwischen dem maximalen und dem grundsätzlichen Dehnwert des entsprechenden Sensors war maßgebend für die Bestimmung des Fahrzeuggewichts. Der Grundwert wiederum bestimmte sich aus dem Durchschnitt aller Messwerte eines einzelnen Sensors während einer Minute. Die Fahrzeuggeschwindigkeit definierte sich über die Zeitspanne vom ersten Erreichen der maximalen Dehnung bis zum Zeitpunkt, an dem der Grundwert wieder erreicht wurde.

Für eine genaue Fahrzeugeinteilung wurden vorab einige Annahmen getroffen, damit der aus 2-, 4- oder 5-achsigen Fahrzeugen bestehende Verkehr richtig zugeordnet werden konnte. Dies beinhaltete unter anderem Abschätzungen der Fahrzeugabstände bei bestimmten Geschwindigkeiten, aber auch der Achsverteilung und der Verteilung der Achslasten der einzelnen Fahrzeuge. Auf dieser Grundlage wurde in dem Messsystem ein Algorithmus zur Datenauswertung programmiert. Eine separate Kategorisierung der Achsen wurde nicht vorgenommen. Eine prinzipielle Ereignisfeststellung ist in Abb. 2 dargestellt.

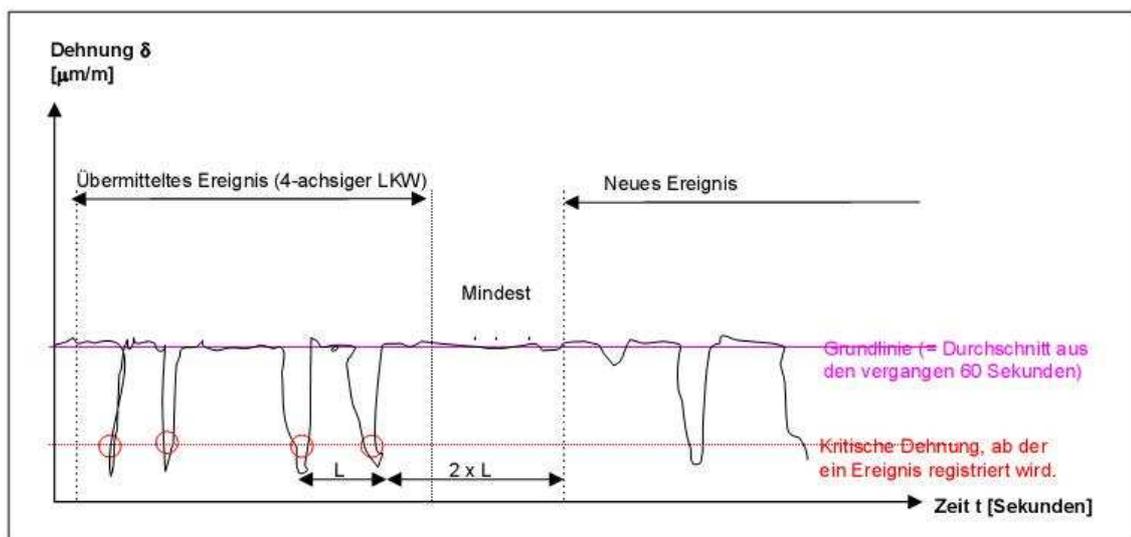


Abb. 2: Ereignisfeststellung in der Fuge bei Geschwindigkeitskategorisierung [1]

Bewertung des Messsystems

Das Messsystem kann die gestellten Aufgaben nur bedingt erfüllen. Der gewählte Messquerschnitt erlaubt, in Abhängigkeit der vorhandenen Einwirkung, die Erfassung von maximalen Beanspruchungen entsprechend der statischen Eigenschaften des Tragsystems. Die Sensoren innerhalb des Messquerschnittes wurden an ausgewählten, kritischen Bereichen platziert. Durch die hohe Frequenz der dynamischen Messung werden die aus Verkehr resultierenden kurzzeitigen Dehnungsänderungen sehr genau erfasst. Dementsprechend gut wird das Dehnungsschwingverhalten des Tragwerks abgebildet. Unklar jedoch ist, warum die Dehnungen sowohl statisch als auch dynamisch erfasst wurden, da beide Messwerte aus der gleichen Messposition ermittelt wurden.

Die Angaben bezüglich der Verteilung der Temperatursensoren sind nicht ausreichend, so dass eine Bewertung diesbezüglich möglich ist. Es ist fraglich, ob das Temperaturfeld eines Stahltroges mit 5 Messpunkten ausreichend erfasst wird. Das hier gewählte Zeitintervall der Messwerterfassung eignet sich gut zur Abbildung des prinzipiellen Temperaturganges.

Ausgehend von einem Bauwerksfestpunkt zwischen den Achsen 30 und 50, ermöglicht die Messung der Lagerverschiebungen an den Widerlagern Aussagen über die maximalen Lagerbewegungen. Unter der Annahme einer über die gesamte Überbaulänge konstanten Bauwerkstemperatur können so allgemeine Zusammenhänge zwischen Temperaturänderungen und Bauwerksverschiebungen getroffen werden. Jedoch sind auch hier keine genauen Angaben über die Vorgehensweise der Verschiebungsmessungen vorhanden.

Das Messsystem zur Kategorisierung des Verkehrs lässt einige Fragen offen. In der Fuge wurden kurzzeitigen Dehnungsänderungen ermittelt. Allerdings gab es keine Angaben, die ein bestimmtes Bauteil oder eine genaue Position beschreiben. Deshalb sind Aussagen bezüglich der Qualität der Ergebnisse nur schwer möglich. Abbildung 2 zeigt in der Fuge gemessene Dehnungswerte jeder einzelnen Achse eines Fahrzeugs. Einerseits wird nicht geklärt, wie die hier ermittelte Anzahl und Verteilung der Fahrzeugachsen den Messwerten des Messquerschnitts zugeordnet werden konnten. Andererseits ist nicht nachvollziehbar, wie aus den ermittelten Messwerten die entsprechenden Fahrzeuggewichte bestimmt wurden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass mehrere

Fahrzeuge gleichzeitig das Bauwerk befahren. Hierbei beeinflussen sich die jeweiligen Auswirkungen gegenseitig. So ist fraglich, wie das Messsystem beispielsweise im Falle von Verkehr aus beiden Richtungen oder mehrerer Fahrzeuge in Kolonne diese differenziert und bewertet.

In der Messdatenauswertung wurde die Datenmenge durch Bildung von Extrem- und Mittelwerten in Zeiträumen mit geringer oder keiner Belastung reduziert. Durch eine grenzwertgesteuerte Messwerterfassung konnten Ereignisse mit vorab definierten Auswirkungen genau festgehalten werden. Die damit erreichte Steuerung der Messdatenerfassung beschreibt eine wirtschaftlich sinnvolle Möglichkeit, die Datenmenge entsprechend zu reduzieren und die notwendige Speicherkapazität zu optimieren.

2.1.2 Frühzeitiges Feststellen von Spannkraftverlusten

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [2] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Rampe „Breslauer Straße“ ist ein über 6 Felder laufender Zubringer zur Köhlbrandbrücke. Dabei überspannt der aus Spannbeton hergestellte Hohlkasten Entfernungen zwischen 31 m und 49 m. Auf dem Überbau führen zwei gegenläufige Fahrspuren und einseitig ein breiter, kombinierter Fuß- und Radweg, zu einer aus Verkehr resultierenden asymmetrischen Belastung des Bauwerksquerschnittes.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Im Endfeld der Rampe wurden während einer Hauptprüfung gravierende Mängel festgestellt. Diese setzten sich aus Hohlstellen, mangelhaft verpressten Spanngliedern und dem korrosionsbedingten Versagen einiger Litzen dieser Spannglieder zusammen. Da es sich um das am tiefsten liegende handelt, ist dieses Feld bereits bei geringen und dementsprechend häufigen Sturmfluten dem Hochwasser ausgesetzt. Des Weiteren muss im Hafenverkehr mit „gelegentlichem“ Überschreiten von zulässigen Achs- und Gesamtlasten gerechnet werden. Auf Grund dieser besonderen Umstände wurden Abschnitte der Brücke mit einem kommerziell erhältlichen Überwachungssystem ausgerüstet.

Mit der eingesetzten Messanlage wurden vier Aufgaben verknüpft. Es sollten Veränderungen in der Bauwerksstruktur im Bereich der sanierten Felder und Spannkraftverluste im Bereich der Messstellen festgestellt werden. Weiterhin sollte der Schwerverkehr gezählt und klassiert und Beanspruchungen durch unzulässigen Schwerverkehr bewertet werden.

Im Bereich der größten Feldmomente der ersten beiden Felder wurden die Dehnungen jeweils an vier verschiedenen Stellen integral über eine Länge von vier Metern im Bereich der Stege gemessen. Zudem wurden mit Hilfe von acht Temperatursensoren die Bauwerks- und Umgebungstemperatur ermittelt. Um das als Sonderfall definierte Fluten des Holkastens erfassen zu können, wurde ein zusätzlicher Schwimmschalter installiert. Die prinzipielle Verteilung der Dehnungssensoren ist in Abb. 3 dargestellt.

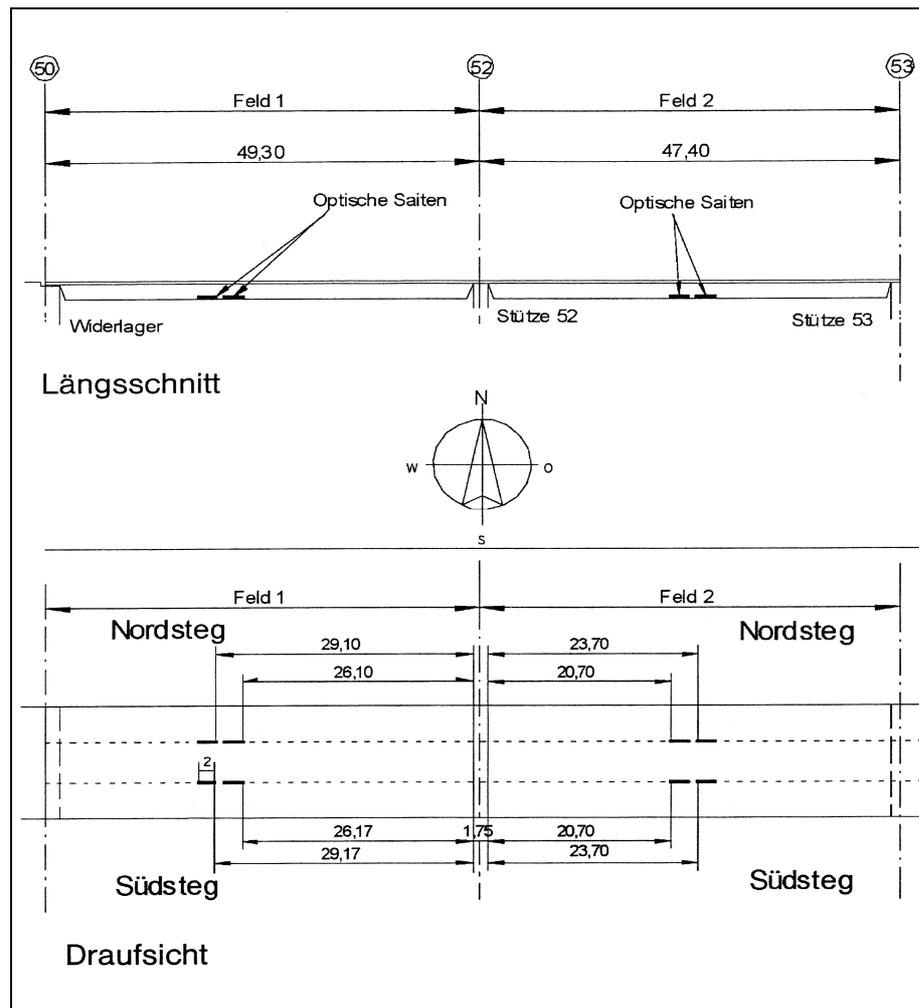


Abb. 3: Sensoranordnung in den ersten beiden Feldern [2]

Ergebnisse und Auswertungsansätze

Zur Kalibrierung des Messsystems wurde ein Belastungsversuch mit drei verschiedenen schweren Belastungsfahrzeugen (19,9 t, 40,4 t und 40,9 t) durchgeführt. Es wurden sowohl statische als auch dynamische Ereignisse simuliert. Zwischen den unterschiedlichen Fahrzeuggewichten und dem Verformungsverhalten zeigte sich ein proportionales Verhalten. Die Klassifizierung des Schwerverkehrs basierte auf dem Grundsatz der Reproduzierbarkeit von Verformungen. Des Weiteren konnte dem Querschnitt bei unsymmetrischen Laststellungen eine gute Querlastverteilung nachgewiesen werden. Die im Belastungsversuch erzeugten dynamischen Beanspruchungen waren bis zu 20 %

größer als die statischen. Der Konstruktion konnte anhand der Versuche elastisches Materialverhalten nachgewiesen werden.

Die Ergebnisse eines 4-monatigen Beobachtungszeitraumes ergaben, dass mehr als 1600 Fahrzeuge mit einem Gewicht von über 60 t das Tragwerk in dieser Zeit überquerten. Somit bestätigte sich die Vermutung, dass das Bauwerk weitaus höheren Belastungen ausgesetzt ist, als angenommen.

Um Änderungen des statischen Bauwerksverhaltens zu beurteilen, wurden die dynamischen Messwerte in geeigneten Intervallen gemittelt. Im Zusammenhang mit der Temperaturmessung zeigte sich, dass die täglichen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen die größten Bauwerksverformungen verursachten. Zwischen einzelnen Messpunkten stellten sich teilweise deutliche Unterschiede ein, die auf Differenzen durch oberflächennahe Temperaturmessung (Verschattungseffekte) zurückgeführt wurden.

Mit den bis zu diesem Zeitpunkt gesammelten Erkenntnissen durch das Monitoring, konnte das Bauwerk weiterhin uneingeschränkt genutzt werden. Die Messdaten erlaubten keine Schlussfolgerungen, die auf eine Tragwerksschädigung oder einen Spannkraftverlust hindeuteten.

Bewertung des Messsystems

Das hier vorgestellte Überwachungssystem erfüllt die gestellten Aufgaben nur bedingt. Eine integrale Dehnungsmessung an der Betonoberfläche eignet sich zum Feststellen von strukturellen Veränderungen innerhalb des Messbereiches. Die Messwerte entsprechen einem über die Messlänge gemittelten Wert. Auftretende Störungen des Betongefüges, beispielsweise durch Risse hervorgerufen, zeigen Sprünge in den Messkurven und können so sehr gut erkannt werden. Allerdings ist es fraglich ob auf diese Art unmittelbar auf Veränderungen der Spannkraft geschlossen werden kann. Spannkraftverluste bedeuten nicht zwangsläufig den Verlust von kompletten Spanngliedern. Vielmehr beginnt dieser Prozess durch den teilweisen Ausfall von Litzen oder Drähten eines Spanngliedes. Dabei kommt es anfangs zu einer Umlagerung von Schnittgrößen auf die umliegende Bewehrung, wodurch der Verlust kompensiert wird. Es ist fraglich, wie sich

hierbei Auswirkungen auf die Gesamtstruktur einstellen und ob diese aus Spannkraftverlusten resultierend identifiziert werden können. Um den Zustand der Spannbewehrung innerhalb des Messbereiches zu kontrollieren, müsste das Dehnungsverhalten der Spannglieder direkt überwacht werden.

Hinsichtlich der Temperaturmessung wurden keine Aussagen über Verteilung der Messpunkte im und/oder am Bauwerk getroffen. Dementsprechend sind Aussagen über die Qualität der Messergebnisse nur schwer möglich. Jedoch zeigten sich während der Auswertung dieser Messdaten Differenzen, die sich aus lokalen Verschattungseffekten ergaben. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Temperatursensoren an entsprechend aussagekräftigen Bereichen positioniert wurden.

Durch den Belastungsversuch wurde das Tragverhalten des Bauwerks analysiert und die Messtechnik entsprechend kalibriert. Die Zuordnung der Fahrzeuge erfolgt nach deren Gesamtgewicht. Allerdings wird nicht erwähnt, nach welchem Prinzip die Ermittlung des Fahrzeuggewichtes durchgeführt wird. Es wurde mit drei verschiedenen schweren Fahrzeugen ein proportionales Verhalten zwischen Verformung und Fahrzeuggewicht festgestellt. In wie weit hierbei eine unterschiedliche Achsverteilung und unterschiedliche Verteilungen der Achslasten berücksichtigt wurde, ist ebenso unklar. Bei mehreren, zeitgleich das Bauwerk befahrenden Fahrzeugen, zeigt sich der Vorteil von zwei Messquerschnitten. So kann mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit die Fahrtrichtung des Fahrzeugs und somit die belastete Fahrspur identifiziert werden. Offen bleibt wiederum die Frage, wie das Messsystem aus den sich hierbei überlagernden Einflüssen das entsprechende Gesamtgewicht der einzelnen Fahrzeuge ermittelt.

2.1.3 Überwachung der Spannungen in der Bewehrung

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [3] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Reussbrücke bei Wassen (Schweiz) besteht aus zwei Einzelbauwerken, die im Grundriss einer gekrümmten Trassierung folgen. Daraus ergeben sich unterschiedliche Bauwerkslängen von 192 m in Richtung Gotthard und 232 m in Richtung Luzern bei Spannweiten zwischen 32 m und 64 m. Der Überbau besteht aus vorgespannten Hohlkästen und ist schwimmend gelagert. Nach umfassenden Instandsetzungsmaßnahmen wurde ein Brückenträger mit einem Überwachungssystem ausgestattet.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Mit Hilfe des Monitorings sollten Rückschlüsse auf Spannungen in der Bewehrung gezogen werden, um somit Tragwerksschäden frühzeitig zu erkennen. Des Weiteren sollten Zusammenhänge zwischen Temperatur und Bauwerksveränderungen aufgezeigt werden. Zusätzlich erhoffte man sich daraus Erkenntnisse zu gewinnen, die bei der Bemessung von Fahrbahnübergängen genutzt werden können. Außerdem sollte der über die Brücke fahrende Schwerverkehr kategorisiert und gezählt werden.

Auf dieser Grundlage wurden in Feldmitte des mittleren und zugleich größten Feldes die Betondehnungen am unteren Querschnittsrand mit Hilfe von vier optischen Sensoren integral gemessen. Im südlichen Widerlagerbereich wurden zum einen die Längenänderung der Fugenöffnung unter dem Fahrbahnübergang und zum anderen die Einsenkung der Lager durch darüber fahrende Fahrzeuge gemessen. An beiden Messquerschnitten zeichneten Sensoren den Verlauf der Temperatur auf. Die Anordnung der Messtechnik kann nachstehend Abb. 4 entnommen werden.

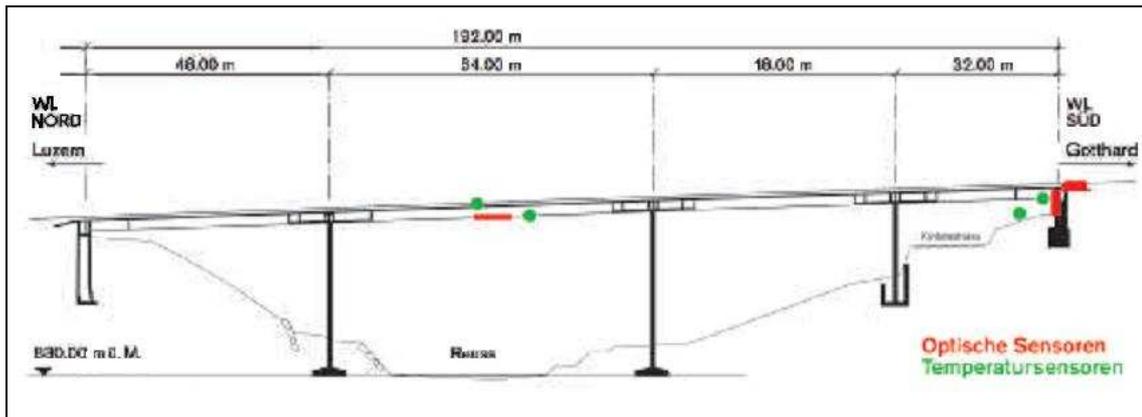


Abb. 4: prinzipielle Anordnung der Sensoren im und am Bauwerk [3]

Auswertungsansätze

Durch Probelastungen wurde herausgefunden, dass die Lagereinsenkung in einem proportionalen Verhältnis zur Achslast steht. So zeigte sich bei der Kalibrierung der Messinstrumentation, dass eine Lagereinsenkung von $1 \mu\text{m}$ circa 1 t Gewicht entspricht. Dies sollte die Gewichtsbestimmung eines überfahrenden Fahrzeugs mit einer Genauigkeit von 1 t ermöglichen. Da der messtechnisch ausgerüstete Überbau nur für eine Fahrtrichtung freigegeben war, erreichten die Fahrzeuge den Messquerschnitt unmittelbar vor dem Verlassen der Brücke. In den Messergebnissen zeigten sich deutlich die einzelnen Achsen der Fahrzeuge.

Hinsichtlich der Auswertung der Temperatur- und Verschiebungskenngrößen werden keine Angaben gemacht.

Bewertung des Messsystems

Auch dieses Messsystem kann die ihm gestellten Anforderungen nur bedingt erfüllen. Die Dehnungen werden wie schon unter Kap. 1.1.2 vorgestellt auf integraler Basis an der Betonoberfläche ermittelt. Dies entspricht einem über die Messlänge gemittelten Wert, der es ermöglicht, Störungen des Betongefüges zu erkennen. Allerdings sind die hier ermittelten Messwerte nicht repräsentativ, um auf Spannungen in der Bewehrung bzw. des Spannstahls zu schließen. Mit Hilfe der gemessenen Dehnungswerte der Betonoberfläche sind einzig Abschätzungen hinsichtlich der Spannungsänderungen der Bewehrung auf Grund von veränderlichen Einwirkungen, wie Verkehr und Temperatur, möglich. Um genaue Angaben über das Belastungsverhalten der Bewehrung zu machen, sollten die Dehnungen direkt am Schalfstahl bzw. den Spanngliedern erfasst werden.

Die angegebenen Messungen zur Beschreibung des temperaturbedingten Verhaltens des Überbaus sind ausreichend. In Kombination mit den erfassten Längenänderungen der Fugenöffnung können somit Aussagen über das prinzipielle Ausdehnungsverhalten des Überbaus getroffen werden.

Die elastischen Verformungseigenschaften der Lagerung sind zur Kategorisierung des Schwerverkehrs nur bedingt geeignet. Es ist prinzipiell möglich, Achsen für einzelne, die Brücke befahrende Fahrzeuge zu identifizieren. Jedoch ist es nicht möglich aus diesen Messwerten auf das entsprechende Gesamtgewicht des Fahrzeugs zu schließen. Aus den Erläuterungen geht nicht hervor, in wie weit der Einfluss von unterschiedlichen Achsgeometrien und Achslastverteilungen und dementsprechend unterschiedlichen Belastungszuständen berücksichtigt wird. Des Weiteren ist es fraglich, wie Achsen mit geringem Gewicht oder auch Achsgruppen identifiziert werden. Unter fließendem Verkehr ergeben sich weitere Probleme. Wenn mehrere Fahrzeuge beispielsweise in Kolonne oder auch nebeneinander das Bauwerk befahren, überlagern sich deren Einflüsse. Wie in dieser Situation eine Differenzierung und Identifizierung erfolgt, ist ebenfalls unklar. Ebenso wird nicht geklärt, in wie fern dynamische Einflüsse die Messergebnisse beeinträchtigen. Auch eine Erläuterung, wie die am Widerlager ermittelten Fahrzeuggewichte den in Brückenmitte ermittelten Messwerten zugeordnet wurden fehlt.

2.1.4 Ermittlung von Fahrzeugen durch Auswertung von Einflusslinien

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [4] aufgeführten Quelle entnommen.

An einer ca. 30 Jahre alten Spannbetonbrücke wurden für einen Zeitraum von über 12 Monaten Messungen des Tragverhaltens unter Verkehrsbeanspruchung durchgeführt. Es handelt sich hierbei um eine Hohlkastenkonstruktion mit zwei separaten Überbauten, die jeweils zwei Fahrspuren führen.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Anhand der Messdaten sollten Erkenntnisse über die Belastung durch den fließenden Verkehr gewonnen werden. Besonderes Interesse galt hierbei den Fahrzeugen und den damit verbundenen Eigenschaften, wie Gesamtgewicht, Achslasten, Geschwindigkeit usw. Hierfür wurde zur Messdatenauswertung eine auf evolutionären Algorithmen basierende Methode entwickelt und angewandt.

Auf Grund der Verkehrsbelastung wurden die Änderungen der Dehnungen sowie die Beton- und Lufttemperatur an verschiedenen Stellen eines Querschnitts gemessen. In Abb. 5 sind der Ort der Messung im Brückenlängsschnitt sowie die Belastungsfunktion eines 5-achsigen Fahrzeugs mit einem Gesamtgewicht von 40 t zu sehen.

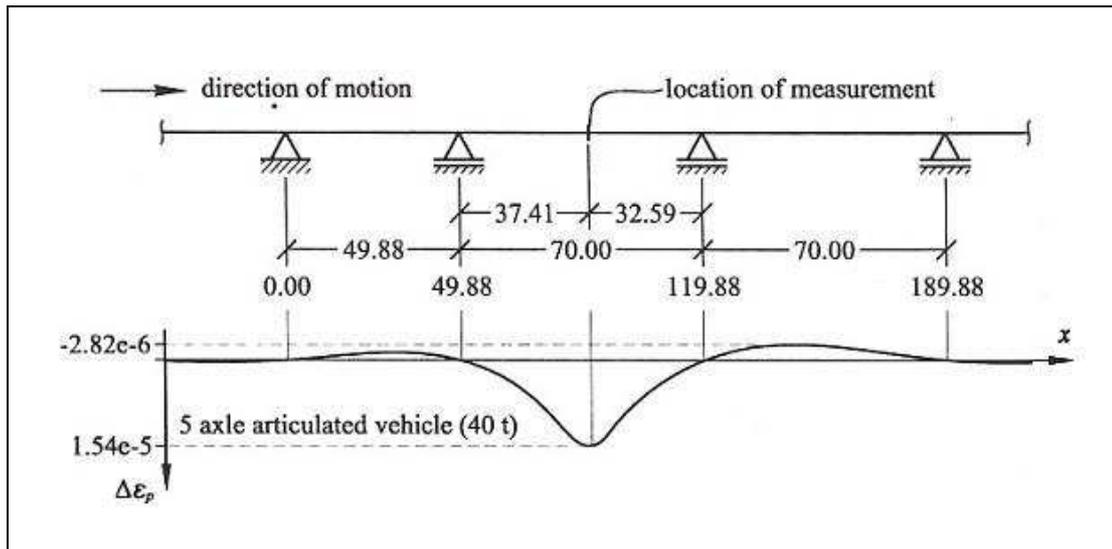


Abb. 5: Messposition und Einflusslinie eines Fahrzeugs [4]

Auswertungsansätze

Der Prozess der Datenanalyse bestand aus drei aufeinander folgenden Schritten. Als erstes wurden die Daten vorausgewertet. Dies umfasste vor allem die Bereinigung von Störungen bzw. Verzerrungen sowie von dynamischen Einflüssen. Weiterhin wurde der Einfluss der Temperatur aus den Messdaten herausgefiltert. Der zweite Schritt beschrieb die Datenauswertung. Der letzte Schritt beinhaltete die Verarbeitung des gewonnenen Wissens für weiterführende Studien hinsichtlich eventueller Veränderungen von Verkehrslasten und Verkehrszusammensetzungen.

In diesem Beitrag wird der Prozess der Datenauswertung näher erläutert. Er basierte auf der Auswertung von Einflusslinien. Befanden sich mehrere Fahrzeuge auf der Brücke, so überlagerten sich diese. Dementsprechend enthielten die Messdaten einzelne Fahrzeuge oder Kombinationen verschiedener Fahrzeuge. Eine Auswertung nach analytischen Methoden ist dabei nicht mehr ausreichend. Abb. 6 zeigt beispielhaft, wie sich die Einflusslinie von zwei in kurzem Abstand aufeinander folgender Fahrzeuge zusammensetzte.

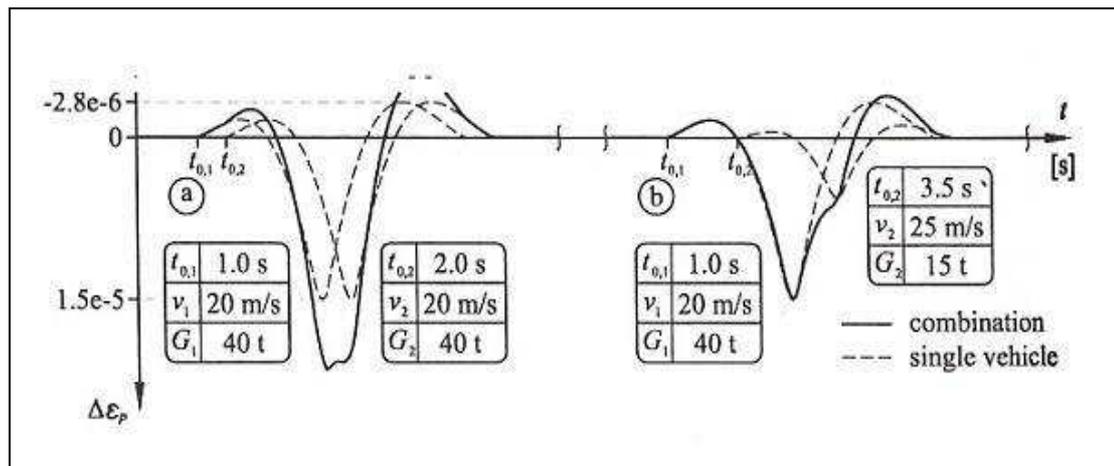


Abb. 6: Überlagerung von Einflusslinien [4]

Das Erscheinungsbild einzelner Fahrzeuge setzte sich aus dem Gesamtgewicht, der Geschwindigkeit, der Art des Fahrzeugs und dem Grad der grundlegenden Beanspruchung zusammen. Während das Gesamtgewicht durch die Dehnungsänderungen und die Geschwindigkeit anhand der Dauer des Ereignisses definiert wurden, legten die Achskonstellation, der Achsabstand sowie die Verteilung der Achslasten den Verlauf der Belastungsfunktion fest. Mit dem Grad der Grundlegenden Beanspruchung wurde das physikalisch nichtlineare Verhalten des Querschnitts, verursacht durch kontinuierliche und temperaturbedingte Einwirkungen, abgedeckt. Auch die Höhe einer eventuell vorhandenen Vorspannung galt es zu berücksichtigen.

Die Analyse der Messdaten erfolgte mit Hilfe einer auf evolutionären Algorithmen basierender Methode. Zunächst wurden Zeitintervalle der Länge \bar{t} über kleine Zeitschritte der Länge $\Delta t \ll \bar{t}$ gebildet (Abb. 7). Intervalle ohne Verkehrsbelastung wurden vorab herausgefiltert. Die zu untersuchende Verkehrssituation stellte eine Ereignisgruppe dar, die aus Kombinationen einzelner Fahrzeuge bestand. Die Ereignisgruppen setzten sich aus Einzelereignissen zusammen, die wiederum reale Fahrzeuge beschrieben (Abb. 8). Einzelereignisse definierten sich durch den Zeitpunkt des Auftretens t_0 , die Geschwindigkeit v , das Gesamtgewicht des Fahrzeugs G und dem Fahrzeugtyp S .

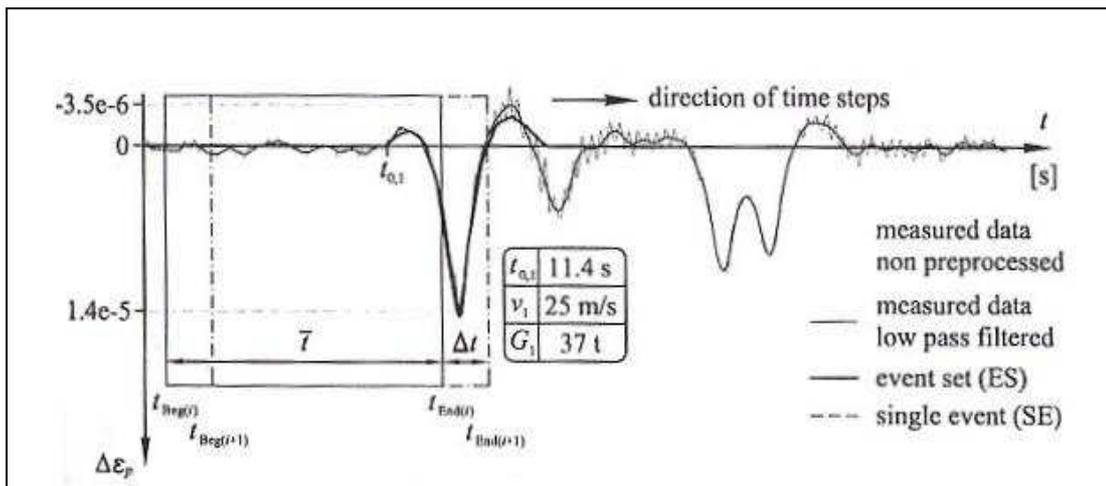


Abb. 7: Zeitintervalle und Zeitschritte [4]

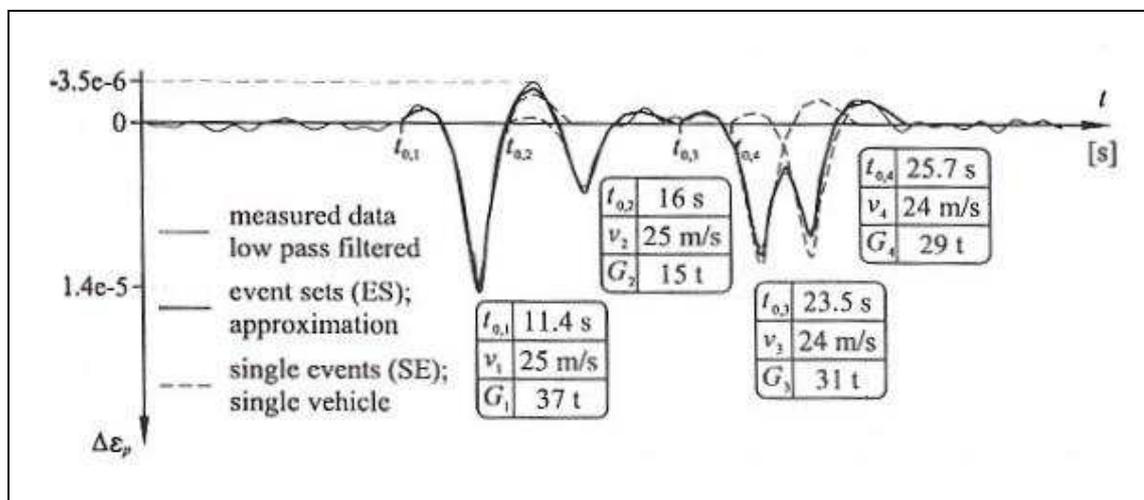


Abb. 8: Ereignisgruppe mit entsprechenden Einzelereignissen [4]

Ereignisgruppen, die aus einem oder mehreren Einzelereignissen bestehen konnten, wurden genutzt, um die Messdaten während des Optimierungsprozesses zu approximieren. Als ein wichtiger Bestandteil der Optimierung wurden Ereignisgruppen mit ihren entsprechenden Einzelereignissen aus vorhergehenden Zeitintervallen für die Bereitstellung des aktuellen Bestandes übernommen. Die zu untersuchenden Zeitintervalle überlagerten sich immer, da die Abstände der Zeitschritte wesentlich kleiner waren. Dementsprechend änderten sich die Randbedingungen nur leicht, so dass bereits gewonnenes Wissen aus dem vorhergehenden Zeitschritt in den Nächsten überführt und die Optimierung damit verbessert wurde. Auf diese Weise erhöhte sich die Genauigkeit der Annäherung. In Abbildung 9 ist eine schematische Darstellung des entwickelten Algorithmus zu sehen.

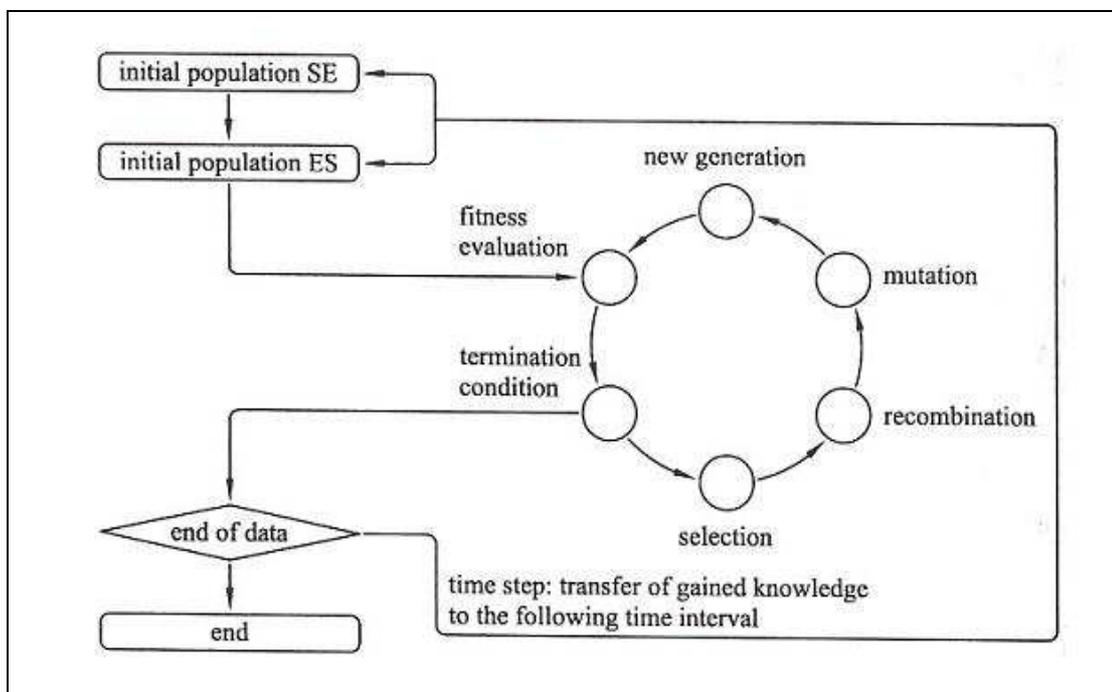


Abb. 9: schematische Darstellung der Verfahrensweise [4]

Bei der Bereitstellung der Daten wurden die Einzelereignisse und die daraus resultierenden Ereignisgruppen durch jeweils vier unterschiedliche Varianten charakterisiert. Anschließend wurden die in einer Ereignisgruppe enthaltenen Einzelereignisse neu kombiniert oder durch Mutation (verändern der entsprechenden Elemente t_0 , v , G , S) verändert.

Mit dem hier vorgestellten Algorithmus konnten Gesamtgewichte und Geschwindigkeiten von Fahrzeugen durch Messen der Dehnungsänderungen ermittelt werden. Bei einem Versuch mit einem Fahrzeug, dessen Gewicht und Geometrie bekannt war, ergab sich ein minimaler Fehler von -5,7 % und ein maximaler Fehler von +3,9 %. Die durchschnittliche Standardabweichung des Gesamtgewichtes betrug 1,2 t. Als Weiterentwicklung des Systems wurde versucht, Achspositionen durch Verschiebungsmessungen an der oberen Platte des Hohlkastens zu bestimmen. Diese Vorgehensweise zeigte sich viel versprechend bei der Analyse von „verschmierten“ Messwerten bezüglich der Lokalisierung von leichten Achsen und Achsgruppen.

Bewertung des Messsystems

Hier wurde eine Methode vorgestellt, die sich mit der Auswertung von Messdaten auseinandersetzt. Auf die Erfassung der Messgrößen sowohl für die Dehnungen als auch für die Temperaturen wird nicht eingegangen. Somit können Aussagen über die Art und Qualität der erfassten Messdaten nur schwer getroffen werden. Da die Temperaturen ermittelt wurden, ist es möglich, den daraus resultierenden Dehnungsanteil zu eliminieren. Wie in Abb. 5 dargestellt, wurden die Dehnungen in einem einzigen Messquerschnitt an mehreren Stellen ermittelt. In der Auswertung wurden jeweils die Dehnungsverläufe des Biegezugbereiches dargestellt. Aus den Erläuterungen geht nicht hervor, wie für einzelne Fahrzeugüberfahrten anhand der ermittelten Messdaten auf die Geschwindigkeit, den Fahrzeugtyp mit der entsprechenden Achsverteilung und das resultierende Gesamtgewicht geschlossen wurde. Es wird einzig erwähnt, dass für einzelne Fahrzeuge die Bestimmung der entsprechenden Größen analytisch auf der Auswertung von Einflusslinien basiert. Dieser grundlegende Schritt der Datenauswertung wurde für die hier vorgestellte Untersuchungsmethode hinsichtlich der sich überlagernden Ein-

flüsse bei mehreren Fahrzeugen auf dem Bauwerk vorausgesetzt. So wurde hier weiterführend ein Algorithmus vorgestellt, mit dem sich diese überlagernden Einflüsse verschiedener Fahrzeuge aus den Messwerten separieren und die dazugehörigen Eigenschaften einzelner Fahrzeuge ableiten lassen.

2.1.5 Ermüdungssicherheit von Koppelfugenquerschnitten

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [5] aufgeführten Quelle entnommen.

Es wurde ein Messsystem entwickelt, das die Beurteilung der Ermüdungssicherheit von Koppelfugenquerschnitten an bestehenden Bauwerken ermöglicht. Dieses fand bei zwei bestehenden Spannbetonbrücken Anwendung und soll im Folgenden am Beispiel einer dieser Brücken vorgestellt werden.

Die betreffende Brücke wurde Mitte der siebziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts gebaut. Es handelt sich hierbei um einen zweistegigen, höhenbetonten Plattenbalken mit einer konstanten Bauhöhe von 2,95 m. Das Bauwerk überspannt bei einer Gesamtlänge von 270,60 m vier Felder mit Einzelstützweiten von jeweils 67,65 m. Bedingt durch die abschnittsweise Herstellung sind drei Koppelfugen, in denen die Spannglieder zu 100 % gekoppelt wurden, vorhanden. Die Brücke überführt eine Straße mit einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung. Innerhalb der Koppelfugenquerschnitte wurden Risse von 0,1 mm Breite und einer Höhe von ca. 40 cm an beiden Balken entdeckt.

Ziel der Messung und Messsystem

Bei der Bemessung von Tragwerken in der damaligen Zeit wurden Temperaturbeanspruchungen nicht berücksichtigt. Daraus ergibt sich, dass Bereiche mit vergleichsweise niedriger ständiger Beanspruchung nach heutigen Maßstäben unterdimensioniert sind. Besonders die Arbeitsfugen bei abschnittsweise hergestellten Brücken weisen durch das Anbetonieren eine geringere Zugfestigkeit auf, was zu Rissen führen kann. Gleichzeitig wurden in diesen Bereichen die Spannglieder gekoppelt. Bedingt durch das nicht-lineare Spannungs-Momenten-Verhalten führt der Übergang in den gerissenen Zustand II zu höheren Spannungsschwingbreiten in der Bewehrung bei gleicher Belastung. Dementsprechend steigt die Ermüdungsempfindlichkeit in diesen Bereichen, was bis zum Versagen der Querschnitte führen kann. Daraus leitete sich die Maßgabe ab, ältere Brücken hinsichtlich des Ermüdungsrisikos zu beurteilen.

Das Messsystem sollte das Tragverhalten unter realen Bedingungen bestimmen, ohne die vorhandene Spannungsverteilung des Querschnitts zu verändern. So wurden die Rissbewegungen an beiden Plattenbalken mit Dehnmessstreifen an der Betonoberfläche gemessen. Des Weiteren erfasste man die Betonranddehnungen in einer Entfernung von 1 bis 3 m vom Riss. So sollte der Unterschied zu den angrenzenden, ungerissenen Bereichen ermittelt werden. Um den Einfluss der Temperaturbeanspruchung zu bestimmen, wurden Temperatursensoren über den gesamten Querschnitt verteilt. Da die größten Temperaturschwankungen in den Sommermonaten zwischen Mai und August auftreten, wurden die dreimonatigen Untersuchungen in diesem Zeitraum durchgeführt.

Die Verteilung der Dehnungs- und Temperatursensoren kann den Abb. 10 und 11 entnommen werden.

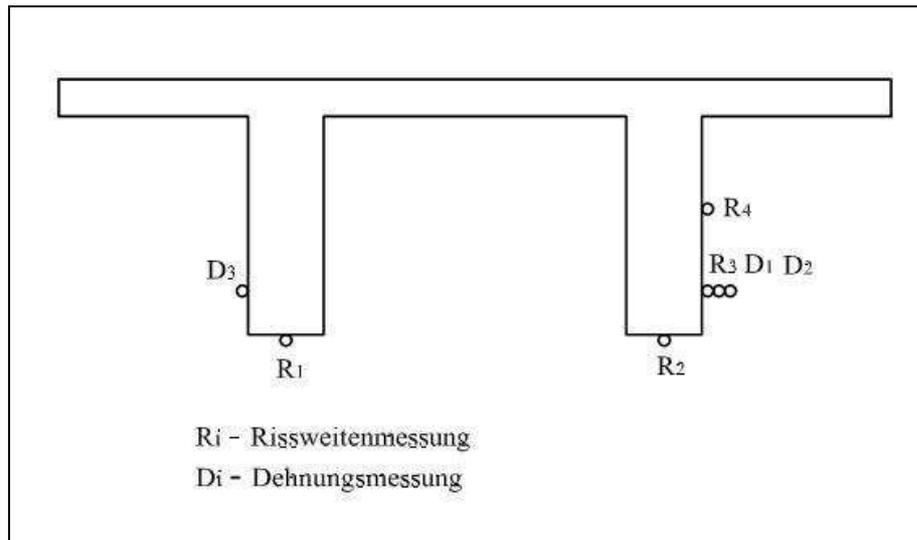


Abb. 10: Verteilung der Dehnungsmesser am vereinfachten Querschnitt

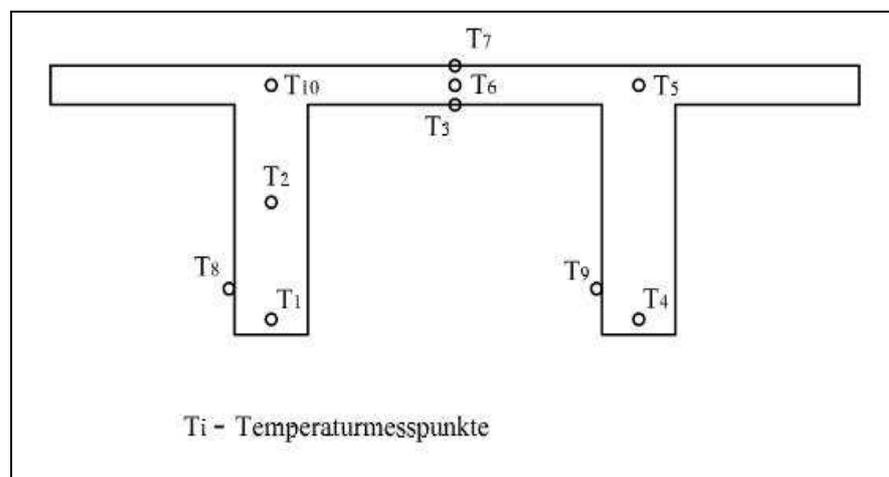


Abb. 11: Verteilung der Temperatursensoren im vereinfachten Querschnitt

Auswertungsansätze und Ergebnisse

Die Messdaten wurden vor Ort vorausgewertet, was eine Reduzierung der Datenmenge beinhaltete. Die verbliebenen Messdaten konnten für weitere Untersuchungen via Mobilfunkverbindung zur Auswertstation übertragen werden.

Zur Bestimmung der Temperaturbeanspruchung wurde das gemessene Temperaturfeld mit Hilfe der Finiten-Element-Methode in einem dreidimensionalen Modell abgebildet. Darüber konnten die resultierende Beanspruchung des Querschnitts und Rissbewegungen bestimmt werden. Es konnte festgestellt werden, dass sich unter Einfluss von Temperatur der Riss schloss oder öffnete. Gleiches galt für die Verkehrseinwirkung unter entsprechender Temperatureinwirkung. Des Weiteren zeigte sich, dass das Querschnittsverhalten bei geöffnetem Riss nicht durch die Bernoulli-Hypothese beschrieben werden konnte.

Da mit den durchgeführten Messungen eine Beschreibung der tatsächlichen Spannungsschwingbreite der Bewehrung nicht möglich war, wurde auch das Tragverhalten des Bauwerks mit einem entsprechenden finiten Rechenmodell simuliert. Dabei wurde das statische System und Werkstoffverhalten so wirklichkeitsnah wie möglich diskretisiert.

Die Verkehrsbelastung des Bauwerks war sehr gering. Anhand der Dehnungsdoppelamplituden konnte festgestellt werden, ob ein Fahrzeug die Brücke überfuhr. Zur Auswertung der Messergebnisse wurden nur Dehnungen eines bestimmten Wertebereiches herangezogen. Somit sollte der Einfluss der unterschiedlichen Fahrzeuggewichte begrenzt werden.

Im Rechenmodell wurde eine äquivalente Beanspruchung erzeugt und anhand der Messwerte kalibriert. Unter Berücksichtigung des Herstellungsprozesses, von Kriechen und Schwinden und unter Annahme der aktuellen Verkehrsbelastung wurde das Tragverhalten für einen Zeitraum von 100 Jahren simuliert. Dabei wurde einerseits für den Beton keine und andererseits für die Spanngliedkopplungen eine sehr geringe Ermüdungsgefährdung prognostiziert.

Bewertung des Messsystems

Das hier gezeigte Messkonzept erlaubt eine zerstörungsfreie Erfassung des Tragverhaltens. Das ermöglicht die Messung des wirklichen, unbeeinflussten Dehnungsverhaltens. Der Temperaturverlauf im Tragwerk wurde sehr genau erfasst, was eine ziemlich exakte Ermittlung der daraus resultierenden Beanspruchung erlaubt. Dafür ist wiederum ein entsprechend aufwändiges Berechnungsmodell notwendig. In Kombination mit der Rissweitenmessung und den Dehnungsmessungen an ungestörten Bereichen sind die Zusammenhänge von Bauwerksreaktionen an verschiedenen Stellen und den entsprechenden Einwirkungen sehr gut darstellbar. Allerdings ist der Messzeitraum zur Beschreibung des Verkehrsaufkommens zu kurz, da evtl. saisonale Veränderungen nicht berücksichtigt werden können. Des Weiteren wurde die Verkehrsbelastung als gegeben hingenommen und zusätzlich die Unterschiede der Fahrzeuggewichte durch Auswahl von bestimmten Wertebereichen beschränkt. Somit verliert der Einfluss des Verkehrs in seiner Vielfältigkeit an Bedeutung.

Wie beschrieben ist es hiermit nicht möglich, die tatsächlichen Spannungsänderungen der Bewehrung zu erfassen. Diese mussten nachträglich durch eine sehr aufwändige Modellrechnung simuliert werden. Die durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich des Ermüdungsrisikos unterlagen der Annahme einer über die Lebensdauer konstanten Verkehrsbelastung. Dabei wurde die gegenwärtige Verkehrssituation sowohl für den bisherigen als auch den zukünftigen Lebenszeitraum als konstant angenommen. Das bedeutet, die vermutlich geringere Verkehrsbelastung der ersten Jahrzehnte wurde erhöht und die zukünftig mögliche Steigerung vernachlässigt. Somit kann die Ermüdungsgefährdung überschlagen werden. Allerdings sind die Ergebnisse nur bedingt aussagekräftig, da hier nicht abgeschätzt werden kann, wie ein steigender Anteil an Schwerverkehr mit gleichzeitig steigenden Achslasten das Ermüdungsrisiko beeinflusst.

2.1.6 Prüfen von Konstruktionslösungen

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [6] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Johannes-Paul-II-Brücke Brücke des III. Jahrtausends ist eine Einpylon-Schrägseilkonstruktion mit Spannweiten von 117,00 m, 230,00 m und 25,00 m. Es ergibt sich eine Gesamtlänge von 38,00 m bei einer Breite von 20,31 m. Das Hauptbrückenfeld besteht aus zwei Kastenträgern und einer 0,23 m dicken Stahlbetonplatte. Die Höhe der Verbundkonstruktion ist konstant und beträgt 2,39 m. Im Abstand von 4,00 m (Hauptbrückenfeld) bzw. 4,33 m (Brückenendfeld) wurden die beiden Kastenträger durch Querblechträger miteinander verbunden.

Die aus 55 x 7 Ø 5 mm Seilen bestehenden Kabel sind im Pylon passiv und in der Brückenplatte aktiv verankert. In Abständen von 13,00 m in den Brückenendfeldern und 12,00 m im Brückenhauptfeld werden die Seile mit der Brückenplatte verbunden.

Der A-förmige Pylon hat eine Höhe von 99,89 m. Er besitzt eine kastenförmige Querschnittsform, die im Bereich der Kabelverankerung zusätzlich horizontal verbunden ist.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Durch das installierte Überwachungssystem sollten die hier angewandten Konstruktionslösungen in ihrer Korrektheit bestätigt und allgemeine Schlussfolgerungen den Entwurf von Schrägseilkonstruktionen betreffend gezogen werden. Weiterhin sollte das Verhalten der Brücke unter dem Einfluss der Belastung während des Betriebes verifiziert werden.

Dem Untersuchungsziel entsprechend wurden am Tragwerk unterschiedliche Parameter messtechnisch erfasst. An sechzehn Messpunkten, verteilt auf zwei Messquerschnitte, wurden die Dehnungen am Ober- und Untergurt der Brückenhauptträger dynamisch mit einer Frequenz von 100 Hz registriert. In drei Messquerschnitten wurden mit Hilfe von acht Beschleunigungssensoren die Schwingungen der Brückenplatte und durch zwei am

Pylonenkopf angebrachte Beschleunigungssensoren die Schwingungen des Pylon gemessen. Diese Sensoren registrierten Beschleunigungen im Bereich von $\pm 0,04$ bis 40 m/s^2 bei einer Abtastrate von 100 Hz . Des Weiteren wurden auf der Brückenplatte und am Pylonenkopf jeweils die Lufttemperaturen, die Windrichtungen und die Windgeschwindigkeiten erfasst. Die Temperatursensoren ermöglichten einen Messbereich von $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+70 \text{ }^\circ\text{C}$. Der Messbereich des Windmessers erfasste Windgeschwindigkeiten von $0,4 \text{ m/s}$ bis 60 m/s und Windrichtungen von 0° bis 360° . Die genaue Anordnung der Messinstrumente und ein Längsschnitt des Bauwerks sind in Abb. 12 dargestellt.

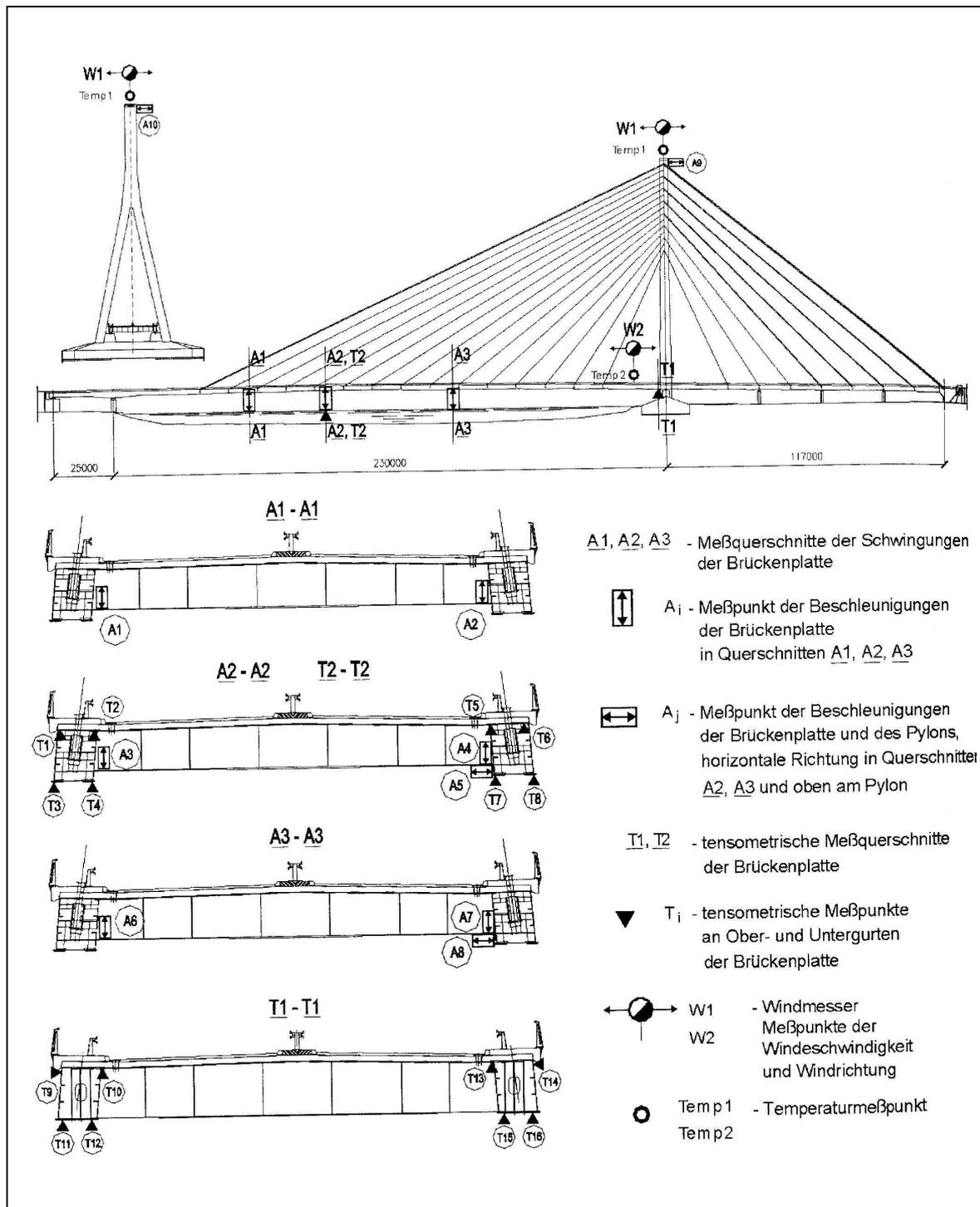


Abb. 12: Anordnung der Messpunkte innerhalb der Messquerschnitte [6]

Ergebnisse und Auswertungsansätze

Dem Messsystem wurden zur Steuerung der Datenerfassung fünf mögliche Prozeduren zugrunde gelegt. So war es dem Nutzer möglich, für bestimmte Messpunkte in vorher definierten Zeiträumen (z.B. 1 s) kontinuierlich Extremwerte aufzuzeichnen. Die gespeicherten Werte setzten sich aus dem Maximum, dem Minimum und dem Durchschnitt des gewählten Parameters und Messzeitraumes zusammen.

Eine weitere Funktion umfasste die Aufzeichnung von Momentanwerten. Hier wurden alle Messwerte des gewählten Messpunktes für den vorher definierten Zeitraum (z.B. 30 s) gesichert.

Eine Kontrollfunktion ermöglichte einen fortlaufenden Vergleich der aktuellen Messungen mit angenommenen Extremwerten (z.B. für Windgeschwindigkeiten oder Dehnungen usw.). Sollten Grenzwerte überschritten werden, wurde automatisch mit der Aufzeichnung von Momentanwerten begonnen.

Um die Anzahl der zusätzlich registrierten Daten zu beschränken, konnten Grenzwerte angepasst werden. Das bedeutet, bei häufiger Überschreitung der Grenzwerte innerhalb kurzer Zeit, wurden sie um einen angemessenen Prozentsatz erhöht. Im Umkehrschluss wurden die Grenzwerte auf ein entsprechendes Niveau reduziert, sofern sie innerhalb festgelegter längerer Zeit nicht erreicht wurden.

Die letzte Aufgabe umfasste die laufende Darstellung der Messergebnisse. Zur Optimierung von Speicherzeit und Speicherkapazität wurden die gemessenen Werte binär gespeichert. Zur weiteren Verarbeitung der Ergebnisse, konnten die Daten in den CSV-Standard, der von den meisten Rechenprogrammen akzeptiert wird, konvertiert werden.

Auf Grund geometrischer und mechanischer Eigenschaften der Brücke und aus Schlussfolgerungen einer durchgeführten Probelastung wurden folgende Grenzwerte definiert: Im Bereich der Untergurte beider Hauptträger für den Messquerschnitt T2 wurde die Spannungsamplitude zu $\Delta\sigma_D = 12 \text{ MPa}$ ($\hat{=} 12 \text{ MN/m}^2$) definiert. Der Grenzwert für die Windgeschwindigkeit lag bei $v = 12 \text{ m/s}$. Diese Grenzwerte ließen sich jederzeit modifizieren.

Von den gemessenen Parametern wurden der Verlauf der Extremwerte sowie der Verlauf der Veränderungen in gewählten Zeitabschnitten registriert. Somit bot sich die Möglichkeit, Charakteristiken von Fahrzeugen einzuschätzen und Windeinwirkungen auf die Konstruktion zu beurteilen.

Der bisherige Messbereich des Überwachungssystems könnte unproblematisch erweitert werden.

Bewertung des Messsystems

Das hier vorgestellte Messkonzept zeichnet sich durch eine kombinierte Überwachung des dynamischen und mechanischen Tragverhaltens der Brücke aus. Die Verteilung der Messquerschnitte erlaubt eine relativ genaue Beschreibung des Schwingungsverhaltens des Fahrbahnträgers. Auch das Schwingverhalten des Pylons wird während der Überwachung berücksichtigt. Die Messaufnehmer sind innerhalb der jeweiligen Messquerschnitte an entsprechend kritischen Bereichen verteilt. In den hier ermittelten Messwerten sind kombinierte Einflüsse aus Wind und Verkehr enthalten. Die Temperaturmessungen beschränken sich auf die Ermittlung der Lufttemperatur in Höhe der Fahrbahn und am Pylonkopf, so dass damit prinzipielle Zusammenhänge ermittelt werden können. Zur Abschätzung der Charakteristiken von Fahrzeugen und der Beurteilung von Windeinwirkungen ist dieses Konzept sehr gut geeignet.

Im Rahmen dieser Arbeit ist weniger die messtechnische Umsetzung als vielmehr das hierfür entwickelte Steuerungssystem zur Datenerfassung und -verwaltung von Bedeutung. Die darin programmierten Prozeduren reduzieren die anfallende Datenmenge eines solch komplexen Messsystems auf ein sinnvolles Maß. Dies ermöglicht eine wirtschaftliche Nutzung von Speicherkapazitäten und reduziert den Aufwand der Auswertung erheblich. Die Grundlegenden zwei Prozeduren sind ausreichend, um Messdaten in entsprechender Qualität und Quantität zur Beschreibung des Bauwerksverhaltens zu erhalten. Die Steuerung der beiden Aufzeichnungsvarianten ermöglicht es, gezielt Daten auf Grund bestimmter Ereignisse zu erfassen.

Dieses System kann sich selbstständig an bestimmte Einwirkungssituationen durch Verändern der entsprechenden Datenerfassungskriterien anpassen. Eine Konvertierung der Messdaten in einen für die meisten Rechenprogramme akzeptierten Standard (CSV-Standard), erleichtert dem Nutzer die weitere Auswertung der Messdaten ohne speziell erforderliche Software. Ein weiterer Vorteil des Systems ist die Möglichkeit, es bei Bedarf ohne großen Aufwand zu erweitern.

2.2 Untersuchungen an Lagerungspunkten

2.2.1 Messung der Lagerreaktionen während einer Fahrzeugüberfahrt

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [7] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Talbrücke Schwarza überspannt als Teil der Autobahn A 71 das gleichnamige Tal auf einer Länge von 675 m und folgt dabei einer in Grundriss und Ansicht gekrümmten Trassierung. Der in Stahl-Verbundbauweise gefertigte Überbauquerschnitt überführt dabei je zwei Fahrbahnen pro Fahrtrichtung über neun Felder mit Stützweiten zwischen 55 m und 85 m. Der Hohlkasten wurde nach dem Prinzip der Tangentiallagerung auf Kalottengleitlager gesetzt. Der Festpunkt des Bauwerks befindet sich mittig in Längsrichtung des Tragwerks zwischen der vierten und fünften Stützung.

Ziel der Untersuchung und verwendete Messgrößen

Mit Hilfe konventioneller Messtechnik sollte die Funktionsfähigkeit von Kalottengleitlagern nachgewiesen werden. Dabei wurde versucht, Schwerpunkte, die für eine solche Problemstellung von Bedeutung sind, aufzuzeigen.

So sollten im Zeitraum einer Brückenquerung durch ein Fahrzeug die Lagerreaktionen gemessen werden. Es wurde vermutet, dass die Geschwindigkeit der Überfahrt, die Laststellung sowie die Einwirkungsdauer der Last einen Einfluss auf die Lagerreaktionen ausüben könnten. Aus diesem Grund wurden alle Freiheitsgrade der gewählten Lager und für eine evtl. dynamische Analyse zusätzlich horizontale und vertikale Schwingungen messtechnisch erfasst. Die Lagerreihe des westlichen Widerlagers sowie die Lagerreihe der mittleren Stützung wurden messtechnisch ausgestattet. Dies beinhaltete ein allseitig festes, ein längsverschiebliches, ein querverschiebliches und ein allseits frei bewegliches Lager. Somit wurden alle möglichen Lagerkonfigurationen abgedeckt. Da die Messungen der gewählten Lagerreihen an beiden Lagerachsen durchgeführt wurden, konnten Quervergleiche in Abhängigkeit der belasteten Fahrspur durchgeführt werden.

Zur Messwerterfassung stand eine mobile Vielstellenmessanlage mit nur 10 Kanälen der versuchstechnischen Einrichtung der Bauhaus-Universität Weimar zur Verfügung. Da somit nicht alle Messgrößen zeitgleich erfasst werden konnten, wurden für das westliche Widerlager zwei Messkonfigurationen vorgesehen. In der ersten Konfiguration wurden an drei Eckpunkten jedes Lagers die vertikalen Verschiebungen durch induktive Wegaufnehmer erfasst. Des Weiteren wurden, sofern möglich, die horizontalen Verschiebungen in Längs- und Querrichtung gemessen. In der zweiten Messkonfiguration ersetzte man die Messung der Vertikalverschiebungen des Nordlagers durch horizontale und vertikale Schwingungsmessungen. An der Lagerreihe der mittleren Stützung wurden lediglich die Vertikalverschiebungen in drei Eckpunkten der Lager sowie horizontale und vertikale Schwingungen gemessen. Da hier lediglich das nördlich Lager Querverschiebungen zulässt, wurde auf die Verschiebungsmessung verzichtet. Die Abtastrate für alle Messungen betrug 60 Hz.

Auswertung der Ergebnisse

Zur Simulation der Überfahrten diente ein beladener, 4-achsiger LKW, dessen Gewicht im Voraus bestimmt wurde. Es war vorgesehen mit Schrittgeschwindigkeit, einer langsamen Fahrt mit einem Halt von 15 Sekunden in jeder Feldmitte, 10 km/h, 30 km/h und 50 km/h die Brücke in beide Fahrtrichtungen zu befahren.

Durch die an drei Punkten gemessene Vertikalverschiebung des Lagers konnten die Verdrehungen in Brückenlängs- und Brückenquerachse ermittelt werden. Auf Grundlage der gewonnenen Ergebnisse wurde festgestellt, dass der prinzipielle Verlauf der Einflusslinie der Lagerrotationen immer gleich ist. Bei der Überfahrt mit einem Stopp in Feldmitte zeigten sich ähnliche Verdrehungen wie bei kontinuierlicher Fahrt. Dementsprechend konnte kein entscheidender Einfluss auf die Lagerrotationen durch die Fahrzeuggeschwindigkeit festgestellt werden.

Da es keine gesonderten Temperaturmessungen gab, wurden die entsprechenden Daten von einer in der Nähe liegenden Wetterstation erfragt. Somit konnten die temperaturbedingten Horizontalverschiebungen zumindest abgeschätzt werden. Der vermutete Verlauf konnte allerdings nur teilweise bestätigt werden. Die Verkehrseinflüsse zeigten eine Behinderung der durch Temperatur erwarteten Verschiebungen. Bei Annäherung des Testfahrzeuges an Messstellen bzw. beim Entfernen wurden Längsverschiebungen infolge der Durchlaufwirkung des Trägers deutlich. Weiterhin wurde beobachtet, dass beim Erreichen des Feldes vor der Widerlagerachse in selbiger Fahrtrichtung bisher „angestautes“ Verschiebungspotential initiiert wurde. Die gemessenen Querverschiebungen waren so gering, dass sie allein durch das Lagerspiel hervorgerufen worden sein konnten. Dementsprechend war es an dieser Stelle nicht möglich, auf Überbaubewegungen zu schließen.

Die gemessenen Beschleunigungen ergaben keine relevanten Verläufe, die auf eine Lagerreaktion hindeuteten. Daraufhin wurden die Ergebnisse der Wegmessung in Beschleunigungen umgerechnet und mit den gemessenen Werten verglichen. So konnten, als das Testfahrzeug die entsprechende Messstelle erreichte, ähnliche Verläufe hinsichtlich der Horizontalbeschleunigungen festgestellt werden. Jedoch bestätigte sich dieser Sachverhalt bei den Vertikalbeschleunigungen nicht.

Zur Prüfung der Messergebnisse wurde eine Vergleichsrechnung an einem geeigneten Tragwerksmodell durchgeführt. Hinsichtlich der Rotationen konnten die gemessenen Werte qualitativ bestätigt werden. Da die errechneten Verläufe der Verschiebungen eine gänzlich andere Charakteristik aufwiesen, waren hier keine Vergleiche möglich.

Bewertung des Messsystems

Die hier durchgeführten Messungen sind sehr ausführlich, da vorab die Einflüsse der Fahrzeugüberfahrt nur vermutet werden konnten. Die hochfrequente Datenerfassung der Vertikalverschiebungen in drei Eckpunkten des Lagers ist eine sehr gute Möglichkeit, die Verdrehungen der Lager durch die Fahrzeugüberfahrt abzubilden. In der zusätzlichen Bestimmung der Horizontalverschiebungen konnte auch festgestellt werden, dass die Verkehrseinflüsse durch temperaturbedingte Verschiebungen beeinträchtigt werden. Leider wurde der Temperaturverlauf während des Versuches nicht aufgezeichnet, sodass keine genauen Angaben hinsichtlich der daraus resultierenden Lagerbewegungen gemacht werden konnten. Die erfragten Temperaturdaten einer in näherer Umgebung liegenden Wetterstation erlauben lediglich eine Abschätzung des prinzipiellen Verhaltens. Des Weiteren waren durch Erfassen der Lagerreaktionen an beiden Lagerachsen Aussagen bezüglich des Verhaltens in Querrichtung möglich. Das Messkonzept erfüllt folglich alle gestellten Aufgaben sehr gut.

2.2.2 Langzeitmessungen von Lagerbewegungen

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [8] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Torminbrücke über den Aasee in Münster besteht aus zwei nebeneinander angeordneten, über drei Felder durchlaufenden Spannbeton-Hohlkästen mit Spannweiten von 81,0 m im Mittelfeld und 32,3 m in den Randfeldern. Es führt eine Hauptverkehrsader über den Aasee.

Die Brücke wurde verformungsgerecht gelagert. Zur messtechnischen Überwachung wurden am nördlichen Widerlager des östlichen Überbaus zwei Neotopf-Gleitlager eingebaut. In der Festpunktachse befindet sich ein einseitig bewegliches Lager und in der anderen Achse ein freibewegliches Lager.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Mit Hilfe der Überwachung sollten die Zustandsgrößen der Lager während des Baus und im Verlauf des Nutzungszeitraumes erfasst werden. So sollten Veränderungen des Gleit- und Kippspaltes sowie auf die Lager wirkende Vertikalkräfte erfasst werden.

An den Lagern selbst wurden die Größen des Gleit- und des Kippspaltes gemessen. Zusätzlich ermittelte eine Messeinrichtung den Druck des Silikonöls unter dem Eleastomerkissen. Des Weiteren wurden die Bauwerks- und Lufttemperaturen sowie die Längenänderung des Bauwerks erfasst.

Ergebnisse und Auswertungsansätze

Vor dem Einbau wurden die Lager durch eine Probelastung auf ihre Funktion hin überprüft und die Messinstrumentation kalibriert. Hierbei wurde hinsichtlich des Gleitspaltes eine bleibende Verformung nachgewiesen. Die im unbelasteten Zustand ermittelten Spalthöhen mussten um diesen Betrag vermindert werden.

Durch die Messung der vertikalen Lagerkräfte konnte deren Verlauf während der Herstellung dokumentiert werden. Es zeigte sich, dass die in der Ausführungsplanung errechneten Vertikalkräfte deutlich über den gemessenen Werten lagen. Im Verlauf der Herstellung des Bauwerks verringerten sich die Gleitspalte um etwa 0,13 mm im Mittel. Während des Nutzungszeitraumes wurden die kurzfristigen Änderungen der vertikalen Lagerkräfte infolge Verkehrs erfasst. Da die Messtechnik nur auf einem Überbauquerschnitt angebracht wurde, konnten auch nur Ereignisse für eine Fahrtrichtung festgehalten werden. So zeigte sich, wie in Abb. 13 dargestellt, dass sich während des Auffahrens schwerer Fahrzeuge ein kleiner Sprung und beim Überfahren des Messlagers bzw. bei Abfahren von der Brücke ein deutlich ausgeprägter Sprung in den Werten der Lagerkräften einstellte.

Zwischen den Ergebnissen der Temperaturmessung und denen der Messung der Längenänderung des Bauwerks konnte ein direkter Zusammenhang nachgewiesen werden. So zeigte sich bei Veränderungen der mittleren Bauwerkstemperatur eine dazu korrelierende Verlängerung bzw. Verkürzung des Bauwerks. Durch über die Bauhöhe verteilte Temperaturunterschiede, stellten sich Verkrümmungen des Überbaus ein. Daraus ergaben sich messbare Verdrehungen der Lager, auf die jedoch nicht eingegangen wurde. Durch eine Gegenüberstellung der gemessenen Längenänderung und der gemessenen mittleren Bauwerkstemperatur, konnte der tatsächliche Wärmeausdehnungskoeffizient des Bauwerks ermittelt werden. Dieser lag unter den normativen Vorgaben.

Zur Beschreibung des Langzeitverhaltens der Lager, wurde beispielhaft die Verminderung des Gleitspaltes erläutert. Während der 17-jährigen Nutzung der Brücke ergaben sich keine relevanten Veränderungen des Gleitspaltes.

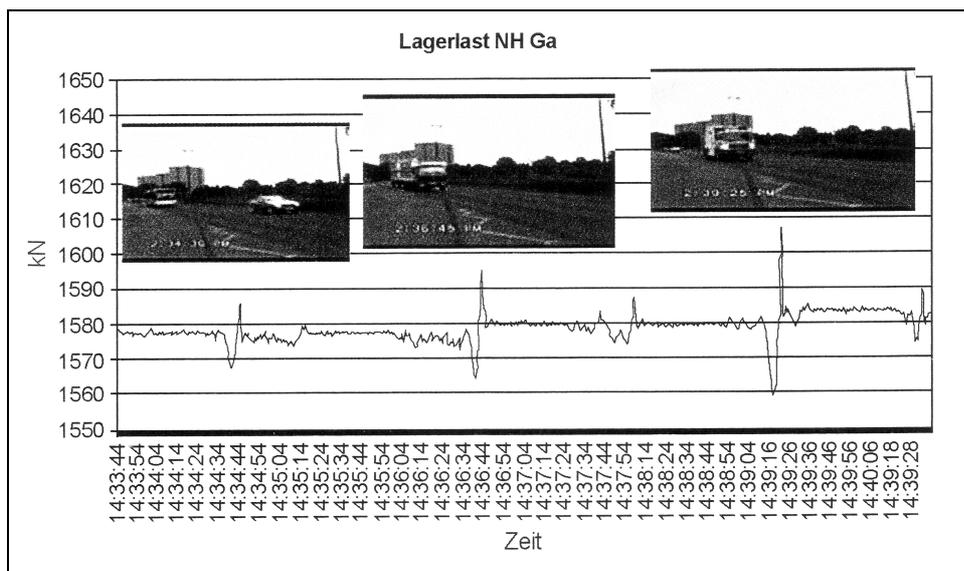


Abb. 13: Lagerreaktionen bei Überfahrt verschiedener Fahrzeuge [10]

Bewertung des Messsystems

In dem hier vorgestellten Messkonzept wird einzig die Messung der spezifischen Lagergrößen näher erläutert. Es wird erwähnt, dass zusätzlich die Bauwerks- und Lufttemperaturen und die entsprechenden Längenänderungen des Bauwerks erfasst wurden. Es fehlten jedoch Angaben, die eine genaue Anordnung und entsprechende Positionierung der Messsensoren beschreiben. Somit ist nicht nachvollziehbar, wie die hier beschriebenen Ergebnisse ermittelt wurden und folglich keine Bewertung durchführbar.

Des Weiteren wurden die Änderungen der vertikalen Lagerkräfte während einer Fahrzeugüberfahrt gemessen. Die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse zeigen die Lagerreaktionen bei der Überfahrt mehrerer Fahrzeuge. Jedoch ist die zur Darstellung gewählte Zeiteinteilung sehr unvorteilhaft, um die angeführten Aussagen nachzuvollziehen. Bei genauerer Betrachtung lässt sich ein Einfluss der Durchlaufwirkung des Systems auf die Lagerkräfte erahnen. Die beigefügten Fotografien ermöglichen es nicht, die entsprechenden Ereignisse exakt zuzuordnen, da im innerstädtischen Bereich in den seltensten Fällen Fahrzeuge einzeln das Bauwerk befahren.

Weiterhin werden keine Angaben gemacht, die beschreiben, ob das vorhandene Messkonzept in irgendeiner Form erweitert wurde oder in wie weit die im Jahre 1988 verbauten Messinstrumente über den gesamten Messzeitraum funktionsfähig waren. Zusammenfassend sind die hier beschriebenen Erkenntnisse aus den durchgeführten Messungen auf Grund mangelnder Informationen hinsichtlich der messtechnischen Umsetzung nur schwer nachvollziehbar.

2.3 Untersuchungen hinsichtlich des temperaturbedingten und zeitabhängigen Verformungsverhaltens von Beton

2.3.1 Verifizierung von Konstruktionslösungen für Hochleistungsbetone

Die nachstehenden Erläuterungen wurden der unter [9] und [10] aufgeführten Quelle entnommen.

Die Brücke über die Zwickauer Mulde ist eine aus Hochleistungsbeton der Festigkeitsklasse C70/85 hergestellte, über fünf Felder durchlaufende Spannbetonbrücke mit einer maximalen Spannweite von 39 m. Das 171 m lange Bauwerk hat eine konstante Plattendicke von 1,05 m und stellt im Querschnitt eine Vollplatte mit Kragarmen dar. Die maximale Schlankheit des Bauwerkes beträgt 37 und liegt somit außerhalb des üblichen Erfahrungsbereiches. Die zwei getrennten Überbauten wurden abschnittsweise auf konventionellen Traggerüsten hergestellt und haben je vier Koppelfugen. Längs der Bauwerksachse wurde der Überbau elastisch auf Verformungslager gebettet. Dabei war pro Widerlagerseite ein querfestes Lager angeordnet. Durch die im Grundriss gekrümmte Trassierung sind die einseitig verschieblichen Lager tangential ausgerichtet.

Ziel der Überwachung und verwendete Messgrößen

Auf Grund der hohen Schlankheit und der Verwendung von hochfestem Beton in großem Umfang entschloss man sich dazu die Brücke durch Langzeitmessungen während und nach der Herstellung wissenschaftlich zu begleiten.

Das Aufgabenfeld der Überwachung enthielt mehrere Schwerpunkte. Die Maßgaben hinsichtlich der geforderten Maßgaben der Hydratationswärmeentwicklung waren zu kontrollieren. Es sollten Informationen über den Temperaturgang in der Brücke gesammelt werden. Weiterhin wollte man Erkenntnissen über das zeitabhängige Verformungsverhalten infolge Kriechen und Schwinden des Betons auf lokaler und integraler Basis gewinnen und die Verformungen durch eine Probelastung prüfen.

So wurden im ersten Bauabschnitt die Temperaturen durch 28 im Querschnitt verteilte Messpunkte erfasst (Abb. 14). Die Messung der Gesamtdehnungen des Überbaus, bestehend aus Temperatureinwirkung, elastischen Dehnungsänderungen sowie Kriechen und Schwinden des Betons, erfolgte in drei Messquerschnitten. Diese verteilten sich auf die Mitte der ersten beiden Felder sowie auf die erste Stützung. Zusätzlich wurden in der zweiten Koppelfuge die Dehnungen quer zur Brückenachse erfasst. Die Messinstrumente waren sowohl am oberen als auch am unteren Querschnittsrand positioniert und zeichneten in einem beliebigen Zeitintervall von $\Delta T \geq 4$ s Daten auf. Zeitgleich wurde an jedem Messpunkt die Temperatur ermittelt. In Abb. 15 sind die genauen Sensorpositionen abgebildet.

Um lokalen Abweichungen in den Messergebnissen entgegenzuwirken, wurden zusätzlich die Lagerverschiebungen, wie in Abb. 16 dargestellt, gemessen und in einem Intervall von 30 Minuten abgefragt.

Im Rahmen einer Probelastung mit zwei 34 t-Fahrzeugen konnten die bereits verbauten Messinstrumente zur Dehnungsmessung verwendet werden. Zur Bestimmung der Durchbiegungen des Bauwerkes wurde zusätzlich ein Feinnivelliment durchgeführt.

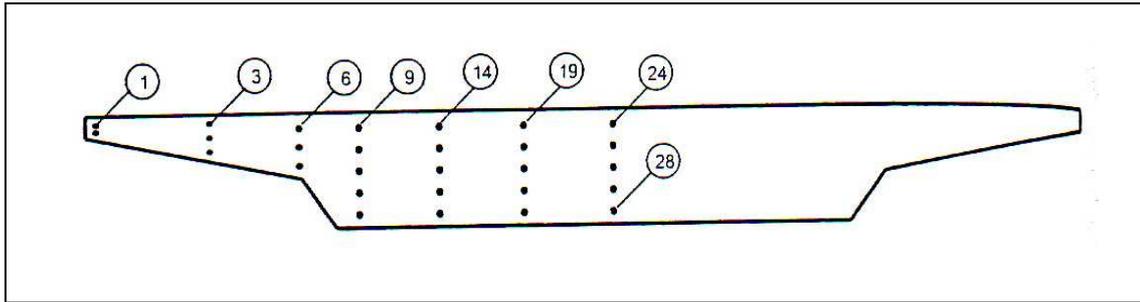


Abb. 14: Position der Temperatursensoren innerhalb des Querschnitts [11]

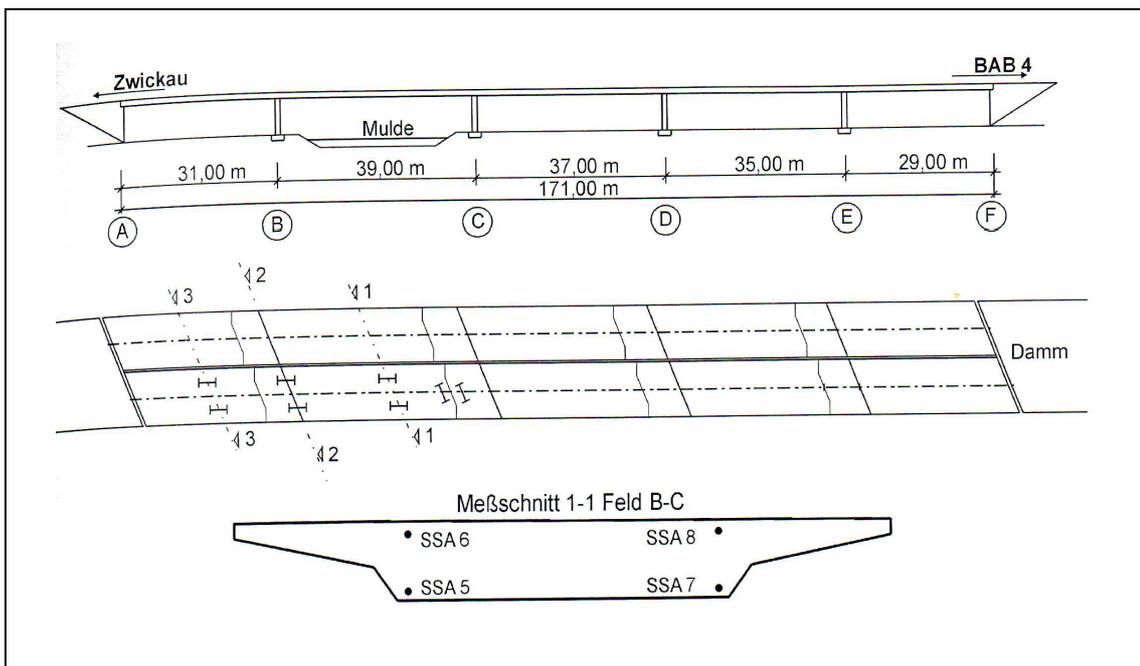


Abb. 15: Lage und Bezeichnung der Dehnungsmesssensoren [11]

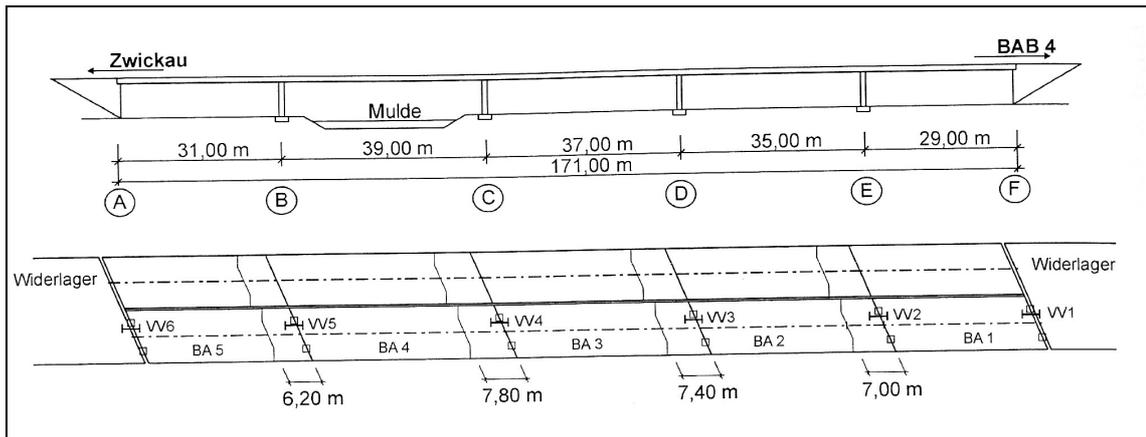


Abb. 16: Wegaufnehmer zur Messung der Lagerverschiebung [11]

Ergebnisse und Auswertungsansätze

Mit Hilfe der 28 Temperatursensoren konnte festgestellt werden, dass die maximale Bauteiltemperatur als geforderte Maßgabe die 70 °C nicht überschritt. Die über den gesamten Messzeitraum aufgezeichneten Extremwerte wurden mit den charakteristischen Werten der Temperatureinwirkung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ verglichen. Die gemessenen Temperaturfelder wurden aufgeteilt in

- einen konstanten Anteil T_N :

$$T_N = \frac{1}{h} \int_{-0,5h}^{0,5h} \Delta T_{(z)} \cdot dz \quad (1.1)$$

- einen linear veränderlichen Anteil $\Delta T_{M(z)}$:

$$\Delta T_{M(z)} = \frac{12}{h^2} \int_{-0,5h}^{0,5h} \Delta T_{(z)} \cdot z \cdot dz \quad (1.2)$$

- einen nichtlinear veränderlichen Anteil $\Delta T_{E(z)}$:

$$\Delta T_{E(z)} = \Delta T_{(z)} - \left[\Delta T_N + \Delta T_{M(z)} \right] \quad (1.3)$$

Zusätzlich wurden die Temperaturen der oberen und unteren Messfühler sowie die Lufttemperatur in die Auswertung einbezogen. Dadurch waren sehr detaillierte Vergleiche mit den normativen Vorgaben möglich.

Innerhalb der verschiedenen Querschnittsbereiche konnten Abhängigkeiten der Bauteildicken hinsichtlich der Temperaturgänge festgestellt werden. Die daraus abgeleiteten Eigenspannungen wurden unter allgemein gültigen Annahmen der statischen Berechnung abgeschätzt mit

$$\sigma_E = -\alpha_T \cdot T_E \cdot E \quad (1.4)$$

Da bei den Dehnungsmessungen zeitgleich die Temperatur erfasst wurde, ließ sich der daraus resultierende Anteil herausfiltern. Weiterhin beinhalteten die Messwerte Anteile aus elastischen Spannungsänderungen und Anteile aus Kriechen und Schwinden. Der temperaturbedingte Dehnungsverlauf während der Hydratation konnte sehr gut nachvollzogen werden. In den Messkurven zeigte sich eine starke Anfangsverkürzung des Betons, was auf autogenes Schwinden zurückgeführt werden konnte. Als so genannter Nullpunkt der Messung diente die, infolge des Temperaturanstieges während der Hydratation des Betons, maximal erreichte Dehnung. Trotz symmetrischer Anordnung der Messinstrumente im Querschnitt, wiesen die gemessenen Dehnungen teilweise deutliche Abweichungen auf.

Zur Auswertung der Lagerverschiebungen wurde ein Schubmodul von $G = 1,0 \text{ MN/m}^2$ angenommen. Der rechnerische Ruhepunkt des Überbaus wurde daraufhin in einer Entfernung von 83,45 m zur Widerlagerachse F bestimmt. In den Ergebnissen der Lagerverschiebungen waren sowohl die täglichen, als auch die jahreszeitlichen Schwankungen gut erkennbar. Durch Darstellung der einzelnen Verschiebungsanteile konnten auch an dieser Stelle Vergleiche zwischen den theoretisch errechneten und tatsächlich gemessenen Verschiebungen gezogen werden.

Mit Hilfe einer Probelastung wurde das Tragverhalten des Bauwerks überprüft. Es wurden mit definierten Belastungsfahrzeugen mehrere statische Laststellungen realisiert. Die dabei ermittelten Werte wurden mit einer auf Balkenstatik basierenden Vergleichsrechnung bestätigt. Dabei konnte der im Tragwerk vorhandene E-Modul auf 52.000 MN/m² bestimmt werden. Die im Querschnitt gemessenen Dehnungen verhalten sich entsprechend den grundlegenden Definitionen der Balkenstatik.

$$\sigma = \frac{N}{A_i} + \frac{M}{W_i} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1.5)$$

Dem Brückenquerschnitt konnte eine hohe Torsionssteifigkeit und Tragfähigkeit nachgewiesen werden.

Bewertung des Messsystems

Das hier vorgestellte Überwachungssystem ist den im Voraus gestellten Aufgaben sehr gut gewachsen. Allerdings sind an dieser Stelle weniger die Messungen zum zeitabhängigen Betonverhalten als viel mehr die Angaben und Ausführungen zur Temperaturmessung und den daraus resultierenden Verformungsanteilen von Bedeutung.

Wie in Abbildung 15 zu sehen, ist die Erfassung des Temperaturfeldes sehr detailliert und ausführlich. Das entsprechend entwickelte und verwendete Sensorenraster zur Temperaturmessung infolge freigesetzter Hydratationswärme war sehr dicht. Hierdurch kann der Temperaturgang auf Grund der Hydratationswärmeentwicklung und auch bezüglich der täglichen und jahreszeitlichen Temperaturschwankungen im Bauteil sehr gut nachvollzogen werden. Des Weiteren wurde hier ein Weg vorgestellt, der es ermöglicht, das gemessene Temperaturfeld zur besseren Verständlichkeit in seine Bestandteile zu zerlegen.

Um die in den Dehnungsmessungen enthaltenen Temperaturanteile zu eliminieren, wurden gleichzeitig die Bauwerkstemperaturen gemessen. Auf Grund dieser zusätzlichen Informationen ist es möglich, die entsprechenden Dehnungsanteile zu ermitteln.

In den Messungen der Lagerverschiebungen als integrale Verformungsgröße sind ebenfalls Verschiebungsanteile enthalten, die auf Temperaturveränderungen zurückgeführt werden können. Auch diese können mit Hilfe der zusätzlichen Messung der Temperaturen bestimmt und aus den Messwerten herausgerechnet werden. Diesem Schritt wurde zugrunde gelegt, dass die mittlere Bauwerkstemperatur über die gesamte Überbaulänge konstant ist. Auf Grundlage einer elastischen Lagerung wurde für die Lager ein konstanter Schubmodul angenommen. Dieser ermöglichte die Bestimmung des rechnerischen Ruhepunktes des Überbaus.

2.4 Zusammenfassung

In den hier vorgestellten Messkonzepten erwiesen sich Systemparameter erster Ordnung, wie z. B. Dehnungen und Wegänderungen, als sehr gut geeignet, das Tragverhalten von Brücken unter Einwirkungen aus Verkehr und Temperatur zu erfassen. Dabei wurde die Messtechnik aufgabenbezogen unter Berücksichtigung der mechanischen und baustoffbedingten Zusammenhänge an den entsprechenden Tragwerkspositionen angeordnet. Allerdings zeigte sich auch, dass unter bestimmten Zielsetzungen die Messwert-erfassung an nicht ausreichend aussagekräftigen Bereichen erfolgte, so dass der Informationsgehalt der Messdaten für problembezogene Aussagen zu gering war.

In mehreren Fällen sollte der Schwerverkehr anhand der Messdaten klassifiziert werden. Dabei ergaben sich Schwierigkeiten, mit Hilfe von zusätzlichen Messungen die entsprechenden Fahrzeuge zu identifizieren und im Weiteren den Messwerten des Hauptmessquerschnitts zuzuordnen. Auch fehlten Aussagen über den grundlegenden Vorgang vom Messwert zur Bestimmung des Fahrzeuggewichtes, um die angestrebte Kategorisierung durchzuführen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich gewünschte Untersuchungsziele zumeist nur durch Ermittlung bestimmter Kenngrößen erreichen lassen. Entscheidend hierbei sind die zur Ableitung problembezogener Aussagen enthaltenen Informationen des Kennwertes. Häufig ist es notwendig, mehrere Kennwerte zu erfassen, da einzelne Kenngrößen nicht ausreichend Informationen beinhalten. Im Umkehrschluss besteht

auch die Möglichkeit, dass in einem Kennwert mehrere Informationen enthalten sind, die es herauszufiltern gilt.

Dementsprechend ist die Wahl der Kennwerte abhängig vom Untersuchungsziel und den daraus abgeleiteten verursachenden Einwirkungen bzw. zu beobachtenden Bauwerksreaktionen. Der Informationsgehalt der Kenngrößen richtet sich unter anderem nach der Tragwerksposition, an der sie messtechnisch erfasst werden. Dabei sind die mechanischen Eigenschaften des Systems in Längs- und Querrichtung, die Querschnittsgeometrie und der verwendete Baustoff des zu untersuchenden Tragwerks von Bedeutung. Auch die zeitlichen Abstände, in der die Messwerte erfasst werden, gilt es hierbei zu berücksichtigen.

Nachstehend soll an einem Beispieltragwerk unter Berücksichtigung festgelegter Untersuchungsziele analysiert werden, inwieweit problembezogene Aussagen abgeleitet werden können und welche Einflussparameter es dabei zu berücksichtigen gilt. Weiterhin werden die mechanischen Zusammenhänge erläutert und eine Möglichkeit der messtechnischen Umsetzung gezeigt. Schließlich soll ein Konzept für ein aufgabenbezogenes Überwachungssystem aufgestellt werden.