

Roadtraffic Management System (RTMS)

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 100

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are thick and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Roadtraffic Management System (RTMS)

von

Ursula Freundt
Ralf Vogt
Sebastian Böning
Christian Pierson

Bauhaus-Universität Weimar,
Fakultät Bauingenieurwesen,
Professur Verkehrsbau

Peter Ehrle

AVK infotec GmbH
Meiningen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 100

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv [ELBA](http://elba.bast.opus.hbz-nrw.de) zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 88.0106/2010:
Roadtraffic Management System (RTMS)

Fachbetreuung:
Rolf Kaschner

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-083-0

Bergisch Gladbach, Juli 2014

Kurzfassung – Abstract

Road-Traffic-Management-System (RTMS)

Ziel des Projektes ist ein Konzept und ein an einem Beispiel umgesetztes technisches Equipment, welches eine Ermittlung von Einwirkungen auf Brücken, Widerstand und Zustand der Brücken in Echtzeit ermöglicht und gleichzeitig Datenlieferant für Verkehrszählungen und Achslastermittlungen ist.

Technische Basis für die Datenerfassung der Verkehrsmengen und deren einzelnen Fahrzeuge ist der Einsatz von Traffic-Sensoren der Firma AVK GmbH und technische Basis für die Datenerfassung der Achslasten und der brückenspezifischen Kenngrößen ist eine konventionelle Messtechnik von Wegaufnehmern, Dehnmessstreifen und Beschleunigungssensoren.

Für die praktische Anwendung der genannten beiden unabhängigen Messsysteme wurden während des Projektes an einer Testbrücke Erfahrungen gesammelt. Diese werden gegenwärtig genutzt, um ein System, in dem Datenerfassung, Weiterverarbeitung und Ergebnisbereitstellung auf einer einheitlichen Basis erfolgen, zu realisieren. Schwerpunkt wird neben der Weiterentwicklung der Algorithmen zur Verkehrserfassung und Bauwerkszustandsbewertung das Postprocessing werden, also die Bereitstellung der Daten in verteilten Umgebungen (webbasiert, Client-Server-Anwendungen), zur Zusammenarbeit z. B. mit den Straßenbauverwaltungen.

Auf der Grundlage der gemessenen Daten und am mechanischen Modell ermittelten Daten werden die Algorithmen zur Achslasterkennung und der Zustandsdaten der Brücke entwickelt, die hier nur als Prototypen beschrieben werden und einer steten Entwicklung unterliegen.

Sowohl aus den gemessenen Daten als auch aus der Interaktion von Messung und Simulation werden unter Anwendung statistischer Methoden charakteristische Werte und Ziellastniveaus abgeleitet. Ein stets mitlaufendes Auswerteregime optimiert ein Grundzeitintervall der Messungen hinsichtlich der Aussagequalität.

An einer Testbrücke wurden die einzelnen Komponenten des Systems in der praktischen Anwendung überprüft und weiterentwickelt.

Es wurden Folgerungen für die Anforderungen an die Messhardware, Software und die Auswertelgorithmen für einen weitergehenden professionellen Einsatz abgeleitet.

Eine angezielte Echtzeitauswertung konnte bisher zwar installiert, aber noch nicht praktisch erprobt werden. Dies wird im Zusammenhang mit der weiteren Softwareentwicklung vorgesehen.

Am Projektende liegt ein einsatzfähiges Equipment mit den entsprechenden Auswertemodulen vor, jedoch muss dieses erweitert und professionalisiert werden.

Roadtraffic Management System (RTMS)

Objective of the project is a concept and implemented technical equipment at a sample bridge that allows real-time identification of actions on bridges, resistance and state of bridges and that provides simultaneous data for traffic counting and determination of axle loads of vehicles.

Technical base of data acquisition of traffic volume and of single vehicles is the use of traffic sensors from the company AVK GmbH. Technical base of data acquisition of axle loads and bridge-specific parameters is conventional measurement technology consisting of displacement transducers, strain gauges and acceleration sensors.

Experiences for practical application of these two independent measurement systems are gained inside the project during a test installation at a real road bridge. These experiences are currently used to enhance a system that realises data acquisition, data processing and supply of results on a consistent base. The focus will be set in addition to the enhancement and improvement of the algorithms for traffic detection and evaluation of the state of the bridge on the post-processing, the supply of the results in distributed environments to co-operate for example with road authorities.

Based on measured data and data from a mechanical model of the bridge algorithms for axle load detection and for parameters describing the state of the bridge are developed. They are

described here only as prototypes and are subjected to a continuous development.

The single components of the system are verified and enhanced in a practical application at a test bridge. Conclusions are derived for the requirements on measurement hardware, software and analysis algorithms for a future professional use of the system.

The real-time processing of the data could be installed, but not tested in the practical application. This is scheduled in combination with the further development of the software. At the end of the project an operational equipment with appropriate analysis modules is available. It has to be expanded und brought to a professional level.

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	7	4.5	Ziellastniveau entsprechend Nachrechnungsrichtlinie	16
2	Stand von Wissenschaft und Technik	8	4.6	Ermittlung von Auslastungsgraden.	17
2.1	Verkehrszählungen und Achslastwägungen im Verkehr.	8	4.7	Auswertung der Kennwert-Zeitverläufe.	17
2.2	Achslastwägungen durch Brückenmessungen	9	4.8	Ermittlung charakteristischer Werte aus gemessenen Zeitverläufen	17
2.3	Auslastungsgrade und Verhaltensmodelle	9	4.9	Bestimmung charakteristischer Kennwerte aus Simulationsrechnungen.	18
3	Messtechnik, Software und Datenmanagement	10	4.10	Zeitanalysen für die Ermittlung charakteristischer Werte des Verkehrs	19
3.1	Messtechnik für Verkehrszählungen	10	4.11	Analyse von Temperaturmessungen	19
3.1.1	Grundlagen und Ausgangsbasis zum Projektbeginn	10	4.12	Ergebnisstruktur für Verkehrszählung und Achslastwägung.	19
3.1.2	Forschungsziel im Projekt	10	5	Praktische Erprobung	20
3.1.3	Projektansatz	11	5.1	Auswahl einer Testbrücke.	20
3.2	Messtechnik für Kennwerte der Brücken.	12	5.2	Messtechnik	21
3.2.1	Grundlagen und Ausgangsbasis zum Projektbeginn	12	5.2.1	Verkehrsdaten.	21
3.2.2	Anforderungen bezüglich der Erfassung der Brückenkennwerte	12	5.2.2	Brückenkennwerte	21
3.2.3	Projektansatz	12	5.2.3	Datenmanagement	24
3.3	Datenmanagement.	13	5.3	Auswertealgorithmen für die Testbrücke	25
3.3.1	Ausgangsbasis	13	5.3.1	Tragwerksmodell	25
3.3.2	Projektansatz	13	5.3.2	Kalibrieren.	25
4	Grundlagen der mathematischen Verarbeitung	13	5.3.3	Einflussfunktionen.	26
4.1	Einflussfunktionen für Brücken-Kennwerte	13	5.3.4	Verkehrszählung über Traffic-Sensoren	26
4.2	Verkehrszählung aus Traffic-Sensoren	14	5.3.5	Verkehrszählung über Traffic-Sensoren und Brückenkennwerte	26
4.3	Verkehrszählung mit Traffic-Sensoren und Brückenkennwerten	15	5.3.6	Gesamtgewichtsbestimmung und Achslastermittlung	26
4.4	Ermittlung der Achslasten und der Gesamtgewichte	16	5.3.7	Ermittlung des Ziellastniveaus der Nachrechnungsrichtlinie	27
			5.3.8	Ermittlung von Auslastungsgraden.	27

5.3.9	Auswertung Kennwert-Zeitverläufe	27
5.3.10	Ermittlung charakteristischer Kennwerte	27
5.3.11	Analyse des Zeitverhaltens für charakteristische Kennwerte	27
6	Ergebnisse der praktischen Erprobung	27
6.1	Zeiträume mit ausgewerteten Messdaten	27
6.2	Verkehrszählung aus Traffic-Sensoren	27
6.3	Verkehrszählung und Achslastwägung aus Brücken Kennwerten	30
6.4	Vergleich der ermittelten Gesamtgewichtverteilungen mit vorliegenden Daten	33
6.5	Einschätzung der Genauigkeit der Gesamtgewichte und Achslasten	35
6.6	Auswertung des Ziellastniveaus	37
6.7	Zeitverhalten	38
6.8	Auslastungsgrade des Tragwerks . . .	41
6.9	Charakteristische Werte	42
7	Zielstellung und Ergebnis – ein Quervergleich	43
7.1	Zielstellung nach Kapitel 1	43
7.2	Ergebnis am Projektende	43
7.3	Danksagung	44
8	Literatur	44

Die Anlagen zum Bericht sind im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter

<http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung und Zielstellung

Deutschland verfügt über eine gut ausgebaute Infrastruktur. Deutschland ist auch ein hoch frequentiertes Transitland. Der Verkehr allgemein und der Straßenverkehr insbesondere sind relevante Wirtschaftsfaktoren.

Die kontinuierliche Schaffung und Erhaltung eines Netzes von Ingenieurbauwerken im Verkehrssystem Straße, das dem Nutzer gute Verkehrsverbindung, hohe Sicherheit bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten sowie größtmöglicher Umweltverträglichkeit bietet, sind Ziele des Bauwerks-Management-Systems (BMS) und des Pavement-Management-Systems (PMS). Die Systeme leben von den vorhandenen Daten.

Verkehrsdaten werden gegenwärtig vielfältig erhoben. Die grundlegenden Informationsquellen sind flächendeckende Verkehrszählungen und punktuelle Achslasterfassungen im Straßennetz. Die Daten beider Quellen werden zentral oder dezentral gesammelt und durch die jeweiligen Sachgebiete weiter verwertet.

Unabhängig vom BMS bzw. zusätzlich werden punktuell Brücken (bestimmte Brückenreaktionen) automatisch überwacht (Monitoring). Ein interaktives System der unterschiedlich erfassten Verkehrsdaten und der Brückenmessungen gibt es nicht.

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist ein Konzept und ein umgesetztes technisches Equipment für Straßenbrücken, welches eine Ermittlung und Auswertung der Daten des überfahrenden Verkehrs erlaubt. Es handelt sich somit um die Entwicklung eines modularen automatisierten Systems zur Verkehrserfassung, zur indirekten Wägung der Gesamtgewichte und der Achsen des Schwerverkehrs. Die Messdaten werden unmittelbar ausgewertet, um die Datenmengen zu reduzieren. Da die indirekte Wägung über brückenspezifische Kenndaten realisiert wird (Verformungen oder Dehnungen), werden diese Daten auch als Grundlage zur Zustandsbeschreibung und -entwicklung bereitgestellt.

Damit sind zwei Kernbereiche beschrieben. Es handelt sich einerseits um eine sensorbasierte Verkehrs- und Bauwerksdatenermittlung im laufenden Verkehr und andererseits um die Datenaufbereitung und -auswertung zur multiplen Verwendung.

Als Mittler ist der Einsatz adaptiver messtechnischer Software erforderlich.

Das Projekt wird in drei Stufen bearbeitet und beschrieben. Anfangs wird der Stand der Technik zu den einzelnen Kernbereichen aufgearbeitet. Danach wird ein Konzept für das erforderliche messtechnische Equipment und den projektspezifischen Auswertelgorithmen erarbeitet.

Eine Spezifik des Projektes liegt im Einsatz von Traffic-Sensoren der Firma AVK GmbH zur Detektion von Verkehrskennwerten, die parallel mit der Erfassung von Kennwerten der Brücke (Verdrehungen, Dehnungen etc.) im Einsatz sind. Die Traffic-Sensoren sind eine Neuentwicklung und bedürfen noch weiterer Forschung.

Die Auswertelgorithmen bauen auf den Daten beider Messsysteme auf. Transmitter ist die Zeit. Deshalb gehört zum Konzept auch die Erarbeitung der Anforderungen an eine applizierte Messsoftware.

In der dritten Stufe, die parallel zu den vorgenannten Stufen bearbeitet wird, erfolgt die Erprobung des Konzeptes in der Praxis. Dafür wurde eine Testbrücke ausgewählt. Für die Erprobung kommen an der Bauhaus-Universität verfügbare Messtechnik und Messsoftware in Einsatz sowie gesondert gefertigte Testmuster von Traffic-Sensoren der AVK GmbH. Erprobt werden soll das Gesamtkonzept vom Einsatz unterschiedlicher Messsysteme bis zur automatisierten Auswertung. Erfahrungen und Ergebnisse des praktischen Einsatzes sollen der Weiterentwicklung des Systems dienen.

Das Road-Traffic-Management-System (RTMS) ist modular aufgebaut. In diesem Projekt werden die Grundmodule erarbeitet. Diese sind

- die Verkehrserkennung durch Traffic-Sensoren,
- die Erfassung von Brückenreaktionen,
- Basisauswertelgorithmen,
- die Bewertung der gemessenen und ausgewerteten Daten,
- die Anforderungen an eine applizierte Messsoftware.

Am Ende dieses Projektes steht ein praktisch einsetzbares Grundsystem zur Verfügung, welches

- auf der Basis der Traffic-Sensoren Verkehrszählungen der Stufe 2+1 online aus gibt,
- auf der Basis beider Messsysteme Achslastwägungen und Verkehrszählungen der Stufe 5+1 online realisiert,
- charakteristische Kennwerte, abgeleitet aus den gemessenen Kennwerten für unterschiedliche Bezugszeiträume, online bereitstellt. Diese sind für die Berechnung von Auslastungsgraden der Brücke verwendbar,
- das Ziellastniveau entsprechend Nachrechnungsrichtlinie auf der Basis der Verkehrszählungen einschließlich einer Prognose ermittelt,
- die genannten Ergebnisse so weit wie möglich evaluiert.

Aus der Erprobungsphase während der Projektlaufzeit werden für beide Kernbereiche Erfahrungen gewonnen und die nächsten Schritte zur Weiterbearbeitung abgeleitet. Es wird ebenso versucht, ein relevantes Zeitregime für Online-Auswertungen abzuleiten. Die erfassten Verkehrsdaten dienen der Ableitung und/oder Überprüfung der Einwirkungen infolge Verkehrs auf Brücken.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Verkehrszählungen und Achslastwägungen im Verkehr

Verkehrserhebungen dienen verschiedenen Zwecken und es ist deshalb auch eine Vielzahl von Erhebungsmethoden im praktischen Einsatz. An den Erhebungszweck und dessen notwendige Aussagegenauigkeit ist die Erhebungsdauer gekoppelt. Es können Stichproben oder kurzzeitige Erhebungen bzw. turnusgemäße Wiederholungs-, Langzeit- oder Dauererhebungen notwendig werden.

Verkehrszählungen an automatischen Dauermessstellen werden derzeit flächendeckend vor allem im Bundesfernstraßennetz und nur vereinzelt auf Landesstraßen durchgeführt. Sie dienen neben der Verkehrsstatistik und Beurteilung der Entwicklung der Verkehrsstärken nach Verkehrsarten teilweise auch der Verkehrsbeeinflussung durch automatische Verkehrsbeeinflussungsanlagen.

Generell werden die Sensoren (Detektoren) je nach Einsatzzweck und örtlicher Gegebenheit in ver-

schiedenen Positionen im Straßenraum angeordnet:

- Systeme auf, in oder unter der Fahrbahn (Drucksensoren, Induktionsschleifen, Magnetfeld-Sensoren),
- Systeme neben oder über der Fahrbahn (Lichtschranken, Ultraschall-, Infrarot-, Radar-, Laser-Sensoren, akustische Detektoren).

Einige dieser Systeme sind nur für den kurzzeitigen Einsatz geeignet. An den automatisierten Dauerzählstellen kommen zumindest im Land Thüringen ausschließlich Induktionsschleifen zum Einsatz.

Begleitet werden die automatischen Dauerzählungen durch manuelle Straßenverkehrszählungen, welche alle 5 Jahre bundesweit nach einheitlichen Standards durchgeführt werden.

Die Auswertungen der automatischen Dauerzählstellen werden durch die Bundesländer erfasst und aufbereitet und durch die BASt in der Regel jährlich sowohl als Berichtsband als auch in digitaler Form veröffentlicht. Somit werden Aussagen über die Verkehrsentwicklung im Bundesfernstraßennetz ermöglicht, zusätzlich liegen differenzierte Einzelergebnisse für über 1.300 Zählstellen (Stand 2005) vor. Die Daten werden auch in einigen Bundesländern online veröffentlicht.

Neben den Ergebnissen für Verkehrsstärken und -verteilungen klassifizierter Fahrzeuggruppen ist die Ermittlung der Entwicklung der Fahrzeuggesamtgewichte und der Achsgewichte von großer Bedeutung für die Bestimmung der Verkehrseinwirkungen auf die Bauwerke des Verkehrs.

Um diese Verkehrsdaten im fließenden Verkehr zu erfassen, sind Systeme erforderlich, mit denen es möglich ist, das Fahrzeuggesamtgewicht sowie die Achslasten im fließenden Verkehr zu ermitteln. Solche Systeme werden international als Weigh in Motion (WIM) bezeichnet. Diese Systeme, die in die Fahrbahnkonstruktion eingebaut sind, bestehen prinzipiell aus einer Wiegeeinrichtung (Achslastsensor) und Induktionsschleifen vor und hinter dieser. Die Achslastsensoren können als Platten- oder Streifensensoren ausgebildet sein. Als Sensortypen kommen Wiegeplatten mit Dehnmessstreifen, piezo-elektrische Sensoren, kapazitive Wiegeplatten oder piezo-optische Sensoren zum Einsatz. Durch den Achslastsensor werden sowohl die Achslasten als auch die Zeitpunkte des Auftre-

tens der einzelnen Achsen ermittelt. Aus Induktionsschleifen vor und hinter dem Achslastsensor kann die Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge bestimmt werden. Das Gesamtgewicht eines Fahrzeuges ergibt sich aus der Summe der Einzelachslasten. Aus den Zeitlücken zwischen den Achsen und der Fahrzeuggeschwindigkeit lassen sich Achsabstände und Fahrzeugabstände (zwischen hinterer Achse des vorherigen und vorderer Achse des folgenden Fahrzeuges) bestimmen. Die erfassten Fahrzeuge werden in Fahrzeugtypen klassifiziert.

Aufgrund des hohen Aufwandes für die Installation und den Betrieb solcher Anlagen werden Weigh-in-Motion-Systeme nur vereinzelt eingesetzt. Ein Netz solcher Achslasterfassungsanlagen im Zuge von Bundesautobahnen ist in Deutschland seit 1997 im Aufbau. Die ersten Messstellen wurden dabei in Hessen eingerichtet und in weiteren Ausbaustufen werden zusätzliche Messstellen installiert.

Für jedes Fahrzeug, das die Achslasterfassungseinrichtung passiert, werden detaillierte Informationen wie Geschwindigkeit, Gesamtgewicht, Achslast und -abstände sowie Fahrzeugabstände und der zugeordnete Code für den Fahrzeugtyp abgespeichert (Einzelfahrzeugdaten). Diese „Rohdaten“ müssen anschließend in geeigneter Weise ausgewertet werden. Weigh-in-Motion-Anlagen arbeiten in gewissen Genauigkeitsbereichen. Die Genauigkeit hängt unter anderem von der Oberflächenbeschaffenheit des Fahrbelages im Bereich der Messanlage ab. Eine Spurrinnenbildung, die sich bei großer Beanspruchung des Fahrbelages über die Zeit einstellt, führt zu Unebenheiten zwischen dem Achslastsensor und dem Fahrbelag. Diese Unebenheit führt zu Ungenauigkeiten bei der Lastermittlung durch dynamische Effekte, die beim Überfahren erzeugt werden.

2.2 Achslastwägungen durch Brückenmessungen

Brückenbauwerke durchsetzen das gesamte Straßennetz. Es ist deshalb naheliegend, Brücken zur Datengewinnung und Wägung zu nutzen. Derartige Systeme wurden bereits entwickelt und in Forschungsprojekten erprobt [3, 8, 11, 14, 15, 17, 19].

Bei einer Überfahrt eines Fahrzeuges werden die Lasten von dem Überbau über die Widerlager in die

Gründung abgeleitet. Das Tragwerk reagiert mit Dehnungen bzw. Verformungen. Diese Weggrößen stehen beim intakten Tragwerk im linearen Zusammenhang zur Einwirkung, die sich über das Gesamtgewicht in Verbindung mit den Achsabständen und Achslasten der überfahrenden Fahrzeuge äußern.

Bei den bisher eingesetzten Systemen ist die Ermittlung der Achszahl und der Fahrzeuggeschwindigkeit auf Kennwertmessungen direkt befahrener Bauteile (z. B. Fahrbahnplatte eines Hohlkastenquerschnittes) angewiesen, die jedoch nicht immer gegeben sind und bei den typischen Tragwerken des Nebennetzes gänzlich fehlt.

2.3 Auslastungsgrade und Verhaltensmodelle

Auslastungsgrade eines Tragwerks werden im Allgemeinen definiert über das Verhältnis der aktuellen Einwirkungen zu den vorhandenen Widerständen des Tragwerks oder eines Tragwerksteils. Dabei spielen das Sicherheitskonzept und die in den Tragwerkswiderständen enthaltenen Sicherheiten eine große Rolle. In der Nachrechnungsrichtlinie ist z. B. der Auslastungsgrad definiert zu:

$$\kappa_i = E_{d,i,LM-Ziel} / R_{d,i}$$

mit:

E_d Bemessungswert der Einwirkungen

R_d Bemessungswert des Widerstandes

Für Bauwerke, welche nach der alten Normengeneration bemessen wurden, kann das Verhältnis zwischen einwirkenden Schnittgrößen zu den in der Statik ausgewiesenen oder neu ermittelten Bruchschnittgrößen überprüft werden. Die Bruchschnittgrößen M_{aufn} wurden mit den Mittelwerten der Baustofffestigkeiten bestimmt. Der Auslastungsgrad wird dann mit den 1,75-fachen Schnittgrößen M_u bestimmt zu:

$$\kappa_i = M_u / M_{aufn}$$

Daraus kann ein Auslastungsgrad für die derzeitige Verkehrsbeanspruchung abgeleitet werden, indem auf der Einwirkungsseite die Schnittgrößen aus dem Verkehr als charakteristische Werte aus der Auswertung der Messergebnisse (siehe Kapitel 4.8) zusammen mit den Schnittgrößen der weiteren

zu betrachtenden Einwirkungen wie Eigen- und Ausbaulasten zur Bildung von M_u verwendet werden.

In jedem Fall ist zur Bestimmung der aufnehmbaren Schnittgrößen der aktuelle Bauwerkszustand zu berücksichtigen. Im Ergebnis liegt dann ein Auslastungsgrad für den aktuellen, das heißt gegenwärtigen Bauzustand vor.

Zur Beurteilung der Sicherheit des Tragwerkes ist die Kenntnis des Bauzustandsverlaufes und seines Einflusses auf den Auslastungsgrad erforderlich.

Trotz einiger bereits existierender Verhaltensmodelle von Schädigungen steckt die Entwicklung der Modelle zur Bestimmung der zeitlichen Verläufe von Schäden noch in ihrer Anfangsphase. So sind bisher nur für eine geringe Anzahl von Bauteilen und Schädigungsmechanismen Modelle erstellt worden.

Für Brückenbauwerke können zwei Kategorien von Verhaltensmodellen unterschieden werden: Verhaltensmodelle, welche die Anzahl der Schäden an Bauwerken sowie unterschiedliche Schadensverläufe incl. oder excl. von Instandsetzungsmaßnahmen aufzeigen, und chemisch-physikalische Verhaltensmodelle für Betonbauteile.

Im aktuellen Projekt sollen durch einen Vergleich von gemessenen Kennwert-Zeitverläufen zu gerechneten Kennwert-Zeitverläufen Grundlagen zur Entwicklung von weiteren Modellen geschaffen werden.

3 Messtechnik, Software und Datenmanagement

3.1 Messtechnik für Verkehrszählungen

3.1.1 Grundlagen und Ausgangsbasis zum Projektbeginn

Die Erfassung der Verkehrsdaten wird durch Sensoren der Firma AVK Infotec GmbH geplant, welche basierend auf dem Produkt des Wireless-Traffic-Sensor-Systems zu entwickeln sind.

WTS-Sensoren basieren auf der Messung und der Detektion von Störungen des Erdmagnetfeldes, die durch den Eisenanteil der Fahrzeuge hervorgerufen werden.

Kennwerte des Wireless-Sensor-Systems:

- Offline-System für Verkehrsdaten, wobei die Speicherung der Verkehrsdaten im Sensor erfolgt und diese sporadisch über eine Funkverbindung ausgelesen werden können.
- Fahrzeugerkennung und Fahrzeugklassifikation in Schwerlastverkehr und sonstigen Fahrzeuge (2+1) mit einer Klassifikationsgenauigkeit von ca. 80 % in einem definiertem Geschwindigkeitsbereich.
- Zählgenauigkeit > 97 %.

3.1.2 Forschungsziel im Projekt

Zielstellungen der Verkehrsdatenerfassung:

- Bereitstellung der Verkehrsdaten (Fahrzeugart, Geschwindigkeit, Achsanzahl und Achsab-

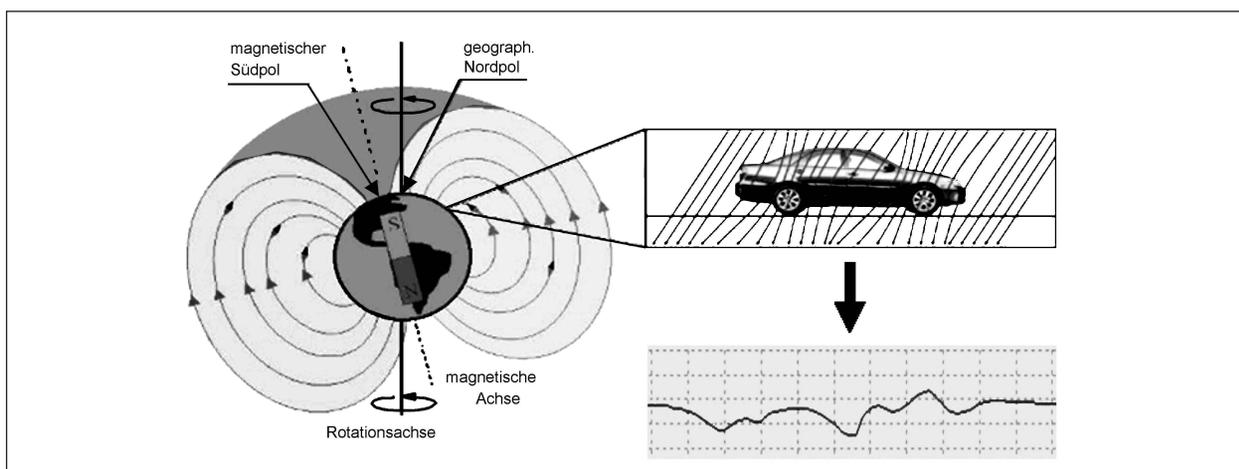


Bild 1: Messprinzip der Traffic-Sensoren [10]

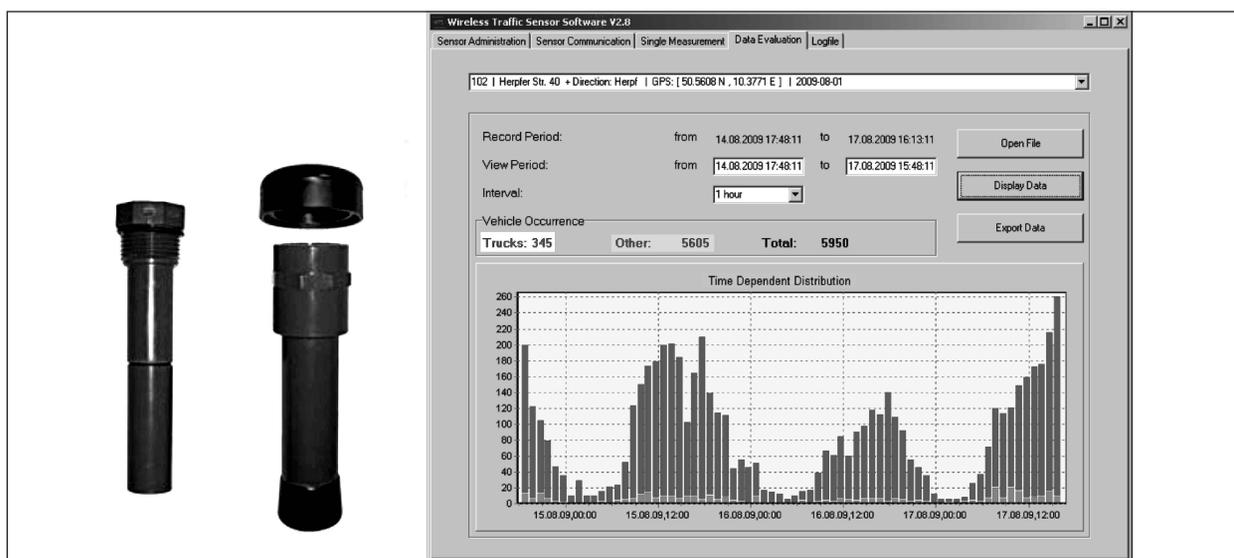


Bild 2: Wireless-Sensor-System mit Auswertesoftware

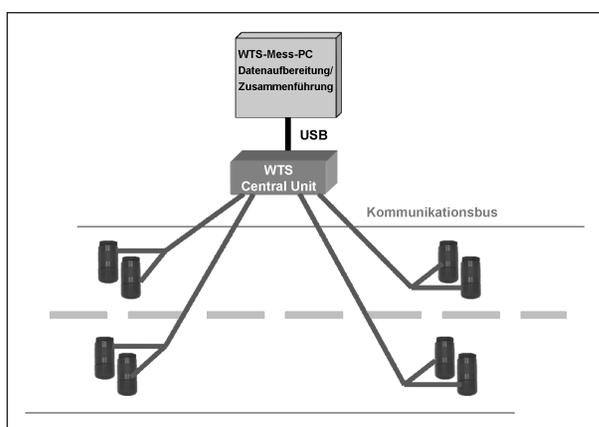


Bild 3: Traffic-Sensor System

stände) in Echtzeit und Triggerung des Messsystems zur Erfassung der Brückenkenwerte.

- Fahrzeugklassifizierung, möglichst entsprechend TLS 2002 [18] in 8+1-Klassen:
 1. Motorrad,
 2. Pkw,
 3. Lieferwagen,
 4. Pkw mit Anhänger,
 5. Lkw,
 6. Lkw mit Anhänger,
 7. Sattelzugkraftfahrzeuge,
 8. Busse,
 9. nicht klassifizierbar.

3.1.3 Projektansatz

Die Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit stellt eine entscheidende Eingangsgröße für die rechnerische Ermittlung der Achslasten über Brückenkenwerte dar und sie ist Voraussetzung zur Fahrzeugklassifizierung.

Die Geschwindigkeitsermittlung der einzelnen Fahrzeuge erfolgt über die Anordnung von zwei Sensoren mit definiertem Abstand, welche nachfolgend als Sensorpaar bezeichnet werden. Da anfangs alle Messkurven der Fahrzeuge zur Analyse und Erstellung eines Datenpools aufgezeichnet und archiviert werden müssen, ergibt sich ein hohes Datenaufkommen. So wurde ein kabelgebundenes Sensorsystem, basierend auf dem WTS, entwickelt.

Um das System und die Detektionsalgorithmen während der Projektlaufzeit möglichst flexibel zu halten und relativ schnell anpassen zu können, wurde folgende 3-schichtige Architektur gewählt:

- Die unterste Schicht stellt die Sensoren selbst dar, welche mit einer Abtastrate von 512 Hz ständig das Erdmagnetfeld messen und mittels einer Firmware die Fahrzeuge durch entsprechende Algorithmen erfassen und die vorverarbeiteten Fahrzeugkenwerte zwischenspeichern.
- Die zweite Schicht ist die WTS-CentralUnit, die für die Datenübermittlung und Zeitsynchronisation zwischen den Sensoren und dem WTS-Mess-PC zuständig ist.

- Die dritte Schicht ist der WTS-Mess-PC mittels speziell entwickelter Windows-Software. Dieser übernimmt die abschließende Auswertung der Messdaten einschließlich der Geschwindigkeitsberechnung, Klassifikation, Triggerung zur Datensynchronisation und das Abspeichern der Detektionsergebnisse.

3.2 Messtechnik für Kennwerte der Brücken

3.2.1 Grundlagen und Ausgangsbasis zum Projektbeginn

Ausgangsbasis des Projektes waren langjährige Erfahrungen bei der Anwendung konventioneller Messtechnik zur Erfassung von Brückenreaktionen und insbesondere von Bewegungen an Brückenlagern.

Aus mehreren Forschungsprojekten und praktischen Einsätzen liegen Erfahrungen über die Applizierbarkeit, Auswertung und für den Dauerbetrieb einzelner Komponenten zur Datenerfassung vor. Diese Erfahrungen sind Basis des Einsatzes der konventionellen Messtechnik. Erst nach Funktionsabsicherung des Gesamtsystems kann moderne Messtechnik erprobt werden.

3.2.2 Anforderungen bezüglich der Erfassung der Brückenkennwerte

Brückenkennwerte sind für zwei Zielstellungen erforderlich:

- Der gemessene Verlauf der Kennwerte bei Überfahrt eines Fahrzeuges und der rechnerische Verlauf der gleichen Kennwerte stellen die Grundlage der Ermittlung der Achslasten. Dabei sind die Verkehrsdaten aus den Traffic-Sensoren Eingangsdaten der rechnerischen Kennwertverläufe.
- Der gemessene Verlauf der Kennwerte bei Überfahrt eines Fahrzeuges und der rechnerische Verlauf der gleichen Kennwerte sind Basis zur Beurteilung des Bauwerkszustandes.

Während aus dem Ziel des ersten Anstriches die Anforderung nach absoluter Zeitübereinstimmung der Verkehrsdaten und der Bauwerksdaten während der Überfahrt ableitbar ist, steht beim Ziel des zweiten Anstriches der konsistente Verlauf der gemessenen Kennwertverläufe über die gesamte

Zeit, also auch bei unbelasteter Brücke, im Vordergrund.

Die Messtechnik und Applikation für die Erfassung der Kennwerte ist Handwerk, welches keinen Forschungsanspruch erhebt. Das ist eine Aufgabe, die bei späteren praktischen Anwendungen des Konzeptes nach konkreter Anforderungsvorgabe durch Vor-Ort-Anbieter übernommen werden kann. Erforderlich ist die witterungsunabhängige Stabilität der Technik.

3.2.3 Projektansatz

Für die Projektbearbeitung kommt vorhandene und bewährte Messtechnik zum Einsatz, um für die Weiterentwicklung über den Prototyp eines Messsystems hinaus Erfahrungen zu sammeln und weitergehende Anforderungen an ein Messsystem zum professionellen Einsatz zu spezifizieren.

Bauwerkskenngößen sind

- Verformungen (Durchbiegungen, Verdrehungen, Neigungen),
- Verschiebungen an ausgewählten Stellen,
- Dehnungen am Beton,
- Dehnungen am Bewehrungs- und Spannstahl.

Zusätzlich werden die klimatischen Einflüsse (Außenlufttemperatur, Wind, Feuchtigkeit) und die Bauwerksreaktionen, wie Bauwerkstemperatur und -feuchte, an ausgewählten Bauwerksstellen messtechnisch erfasst. Sie dienen der Ableitung von Umwelteinwirkungen.

Für die genannten Kenngrößen steht verschiedene Messtechnik bereit. Für das Forschungsprojekt wurde auf die bewährte konventionelle Messtechnik

- induktive Wegaufnehmer,
- Folien-DMS mit eingebettetem Messgitter,
- Anlagewiderstandsthermometer Pt100

zurückgegriffen.

Bei der beschriebenen konventionellen Messtechnik handelt es sich im Gegensatz zu den Traffic-Sensoren nicht um intelligente Sensoren. Der Aufbau kann jedoch auch als 3-schichtige Architektur bezeichnet werden:

- Die unterste Schicht stellt die Sensoren dar, welche mit einer Abtastrate von 600 Hz ständig messen.
- Die zweite Schicht ist ein Messverstärkersystem, welches die Wandlung der physikalischen Messgröße zum gesuchten Kennwert realisiert und die Datenweiterleitung zum Mess-PC übernimmt.
- Die dritte Schicht ist der Mess-PC. Dieser übernimmt die Zeitsynchronisation und das Abspeichern. Bei Online-Bearbeitung wird hier die Auswertung angeschlossen.

Zur Ermittlung der Brücken Kennwerte wurde auf bewährte Bestandshardware incl. Messsoftware zurückgegriffen

Für die Weiterentwicklung des Systems hin zu einem professionellen Einsatz sind Untersuchungen zum Einsatz „modernerer“ robuster Messtechnik z. B. auf faseroptischer Basis oder intelligenter Sensoren mit eigener Stromversorgung vorgesehen.

3.3 Datenmanagement

3.3.1 Ausgangsbasis

Die Messsysteme für die Verkehrsdaten und Brücken Kennwerte sind zwei unabhängige und eigenständige Systeme. Die Messwerte müssen zur Weiterverarbeitung zeitsynchronisiert und zusammengeführt werden.

Während der Testphase sollten die Messsysteme weitestgehend unabhängig und autark betrieben werden, um von den jeweils unterschiedlichen Teilprojektverantwortlichen unabhängig vom anderen System während der Projektlaufzeit angepasst und modifiziert werden zu können.

Bei einer späteren Professionalisierung des Systems müssen hier wesentliche Veränderungen vorgenommen werden. Alle Anforderungen dafür müssen in der Testphase erkannt werden.

3.3.2 Projektansatz

Das Datenmanagement kann grob in 2 Teilgebiete unterteilt werden:

1. Datensynchronisation und -aufbereitung,
2. Datenauswertung und -publikation.

Die Datensynchronisation und -aufbereitung beinhalten alle notwendigen Maßnahmen, um die Mess-

daten der zwei unterschiedlichen Messsysteme zu synchronisieren, zusammenzuführen und für die Weiterverarbeitung bereitzustellen.

Um die Datensynchronisation der diskontinuierlich gemessenen Verkehrsdaten und der kontinuierlich gemessenen Brücken Kennwerte zu ermöglichen, werden die Datenstrukturen jeweils mit einer Zeitangabe versehen.

Die Datensynchronisation erfolgt gegenwärtig innerhalb der Datenauswertung.

Die Datenauswertung beinhaltet die Ermittlung der Achslasten und der Gesamtgewichte, die Auslastungsgrade und die Modellzeitverläufe. Die Datenauswertung ist online vorgesehen, allerdings ist während der Testphase eine Offline-Auswertung aus Kontrollzwecken erforderlich.

Die Datenpublikation ist mit den späteren Auftraggebern abzustimmen.

Dabei sollen die Daten sowohl in bereits definierten bzw. normierten Formaten (z. B. lt. TLS 2002 [18]) als auch über selbst definierte Datenformate bereitgestellt werden.

Die Weiterentwicklung des Systems erfordert die Zusammenführung der Daten der beiden Teilsysteme Traffic-Sensoren und Brücken Kennwerte in einem System, in dem Datenerfassung, Weiterverarbeitung und Ergebnisbereitstellung auf einer einheitlichen Basis erfolgen.

Perspektivisch ist die Erstellung eines Paketes Brückenauswertung im Rahmen der professionellen Messsoftware jBEAM vorgesehen. jBEAM beinhaltet Komponenten zum Import von Messdaten, der mathematischen Verarbeitung sowie der grafischen Darstellung.

Schwerpunkt wird neben der mathematischen Verarbeitung das Postprocessing werden, also die Bereitstellung der Daten in verteilten Umgebungen (webbasiert, Client-Server-Anwendungen), zur Zusammenarbeit z. B. mit den Straßenbauverwaltungen.

4 Grundlagen der mathematischen Verarbeitung

4.1 Einflussfunktionen für Brücken Kennwerte

Die rechnerischen Einflussfunktionen der Brücken Kennwerte stellen die fundamentale Grundlage für

die Ermittlung der Achslasten bzw. des Fahrzeuggesamtgewichtes dar. Die Realitätsnähe dieser, bezogen auf die gemessenen Kennwerte, beeinflusst die Genauigkeit der Wägung erheblich.

Um die Einflussfunktion zu ermitteln, wird ein möglichst wirklichkeitsnahes mechanisches Modell der Brücke erstellt und durch gezielte Überfahrten mit definierten Fahrzeugen (Kalibrierfahrten) evaluiert. Dieser ingenieurtechnische Vorgang muss für jede Brücke durchgeführt werden.

4.2 Verkehrszählung aus Traffic-Sensoren

Durch die Verwendung von Sensorpaaren lassen sich Geschwindigkeit und Fahrzeuglänge durch Korrelationsbetrachtungen der Sensorkennkurven im Zeitbereich bestimmen.

Die vom WTS-System bekannten Algorithmen wurden mithilfe der zusätzlichen Kenngrößen Geschwindigkeit und Fahrzeuglänge weiterentwickelt. Es wurden sowohl einfache wie auch komplexe Verfahren der Neuronalen Netzen angewendet, um die Klassifikation auf 8+1-Klassen laut TLS 2002 [18] zu erweitern. So wurden K-Nearest-Neighbour (KNN), Error-Back-Propagation (EBP), Optimized Learning Vector Quantization (OLVQ) und Support Vector Machine (SVM) jeweils mit unterschiedlichen Neuronenzahlen untersucht, wobei Merkmale des Zeitbereichs wie auch des Frequenzbereichs in die Untersuchungen aufgenommen wurden.

Im Projektrahmen ist eine Einteilung in 8+1-Klassen nicht gelungen. Es wird aktuell an der Weiterentwicklung gearbeitet. Gegenwärtig wurde mit optimierter Sensortechnik als bestes Ergebnis eine Fehlerrate von 27,9 % erreicht, wie Tabelle 1 zu entnehmen ist. Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der untersuchten Verfahren mit unterschiedlichen Parametern, wie Merkmalsanzahl, Anzahl der Neuronen bzw. der nächsten Nachbarn (k). Die Minimum-, Mittel- und Maximumwerte stellen die Wahrscheinlichkeit der Fehler (Nichtererkennung) dar, die sich aus 100 Berechnungsdurchläufen ergeben, wobei die Datenmenge jeweils zufällig in 80 % Trainingsdaten und 20 % Testdaten unterteilt wurde.

Gegenwärtig werden die Achsen des Fahrzeuges nicht erkannt.

Zur Weiterentwicklung des Erkennens der Achsen eines Fahrzeugs wurden Ansätze im Zeitbereich

KNN	k	Minimum	Mittel	Maximum
Zeitbereich				
27 Merkmale	6	33,05	37,21	41,21
72 Merkmale	12	41,90	44,08	46,33
Frequenzbereich ohne Bandmittlung				
0 % Überlappung	18	40,25	42,94	45,78
25 % Überlappung	11	41,49	43,89	47,86
50 % Überlappung	2	40,94	45,36	49,65
Frequenzbereich mit Bandmittlung				
0 % Überlappung	2	39,28	42,69	45,37
25 % Überlappung	1	41,91	44,73	47,99
50 % Überlappung	1	43,98	47,42	52,28
EBP	Neuron	Minimum	Mittel	Maximum
Zeitbereich				
27 Merkmale	9	50,96	55,35	60,22
72 Merkmale	7	61,18	65,85	72,09
Frequenzbereich ohne Bandmittlung				
0 % Überlappung	12	76,93	85,16	91,71
25 % Überlappung	11	76,93	85,34	90,47
50 % Überlappung	15	77,90	84,56	91,02
Frequenzbereich mit Bandmittlung				
0 % Überlappung	8	71,96	80,41	91,30
25 % Überlappung	6	70,72	81,03	89,92
50 % Überlappung	7	71,55	81,70	89,64
OLVQ	Neuron	Minimum	Mittel	Maximum
Zeitbereich				
27 Merkmale	197	30,11	33,77	38,67
72 Merkmale	198	42,82	46,79	50,83
Frequenzbereich ohne Bandmittlung				
0 % Überlappung	198	50,28	56,69	62,43
25 % Überlappung	198	49,31	54,65	60,64
50 % Überlappung	196	45,86	51,18	56,08
Frequenzbereich mit Bandmittlung				
0 % Überlappung	196	49,45	55,03	60,36
25 % Überlappung	200	50,00	53,48	58,70
50 % Überlappung	194	45,99	50,17	57,46
SVM			Mittel	
Zeitbereich				
27 Merkmale			27,90	
72 Merkmale			27,11	
Frequenzbereich ohne Bandmittlung				
0 % Überlappung			44,15	
Frequenzbereich mit Bandmittlung				
0 % Überlappung			46,25	

Tab. 1: Fehlerraten der untersuchten Klassifikationsverfahren

verfolgt, welche aber aufgrund der mangelnden Zuverlässigkeit des Auftretens von lokalen Maxima bzw. Minima an den entsprechenden Achspositionen keine sicheren Aussagen brachten.

Dies zeigte sich sowohl in der Gegenüberstellung der realen Achsverteilung mit dem Zeitverlauf der einzelnen Sensorkennlinien als auch im Vergleich der Sensorkennlinien der vier Sensoren einer Fahrspur bezogen auf eine Überfahrt eines Fahrzeugs.

Es stellte sich heraus, dass die vier Kurvenverläufe bei einigen Fahrzeugen sehr stark korrelierten, bei anderen jedoch nur teilweise oder kaum. Bild 4 zeigt die Kurvenverläufe aller 4 Sensoren einer Fahrspur, die während einer Überfahrt eines Lkw erfasst wurden. Dies ist ein Beispiel für wünschenswerte weitestgehend deckungsgleiche Messkurven der Sensoren, wobei aber hier auch bei rein visueller Auswertung eine konkrete Detektion aller Achsen kaum möglich ist.

Im Gegensatz dazu zeigt Bild 5 beispielsweise die zwei Messkurven eines Sensorpaares einer Pkw-Überfahrt. Hier korrelieren die Messkurven kaum. Trotzdem lassen sich bei rein visueller Auswertung die Achsen in beiden Messkurven relativ eindeutig zuordnen.

Diese Beispiele zeigen das zum Teil sehr unterschiedliche Erscheinungsbild der Messkurven und

welche Interpretationsfreiheitsgrade daraus entstehen, was auch maßgeblich zur Auswahl Neuronaler Netze als Auswertemethode führte.

Die genaue Ursache dieser Messcharakteristik konnte noch nicht spezifiziert werden.

4.3 Verkehrszählung mit Traffic-Sensoren und Brückenkennwerten

Da gegenwärtig eine Ermittlung der Verkehrsdaten mithilfe der Traffic-Sensoren nur eingeschränkt möglich ist, müssen andere Wege aufgezeigt und vorübergehend genutzt werden.

Ein weiterer Weg ist die Ermittlung von Fahrzeugart, Achsen und Achsabständen aus beiden Messsystemen. Ein geeigneter Brückenkennwert zu diesem Zweck entsteht aus einer Messung eines direkt befahrenen Bauteiles wie zum Beispiel der Dehnung der Traverse eines Fahrbahnüberganges oder der Dehnung einer direkt befahrenen Fahrbahnplatte, die Nebentragglied des Überbaues ist.

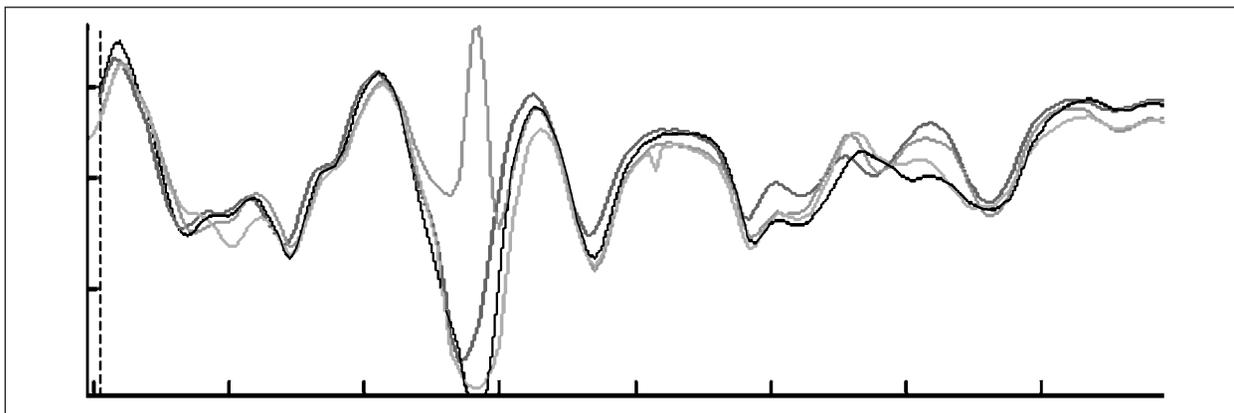


Bild 4: Vergleich der Messkurven aller 4 Sensoren (2 Sensorpaare) einer Fahrspur von einer Lkw-Überfahrt

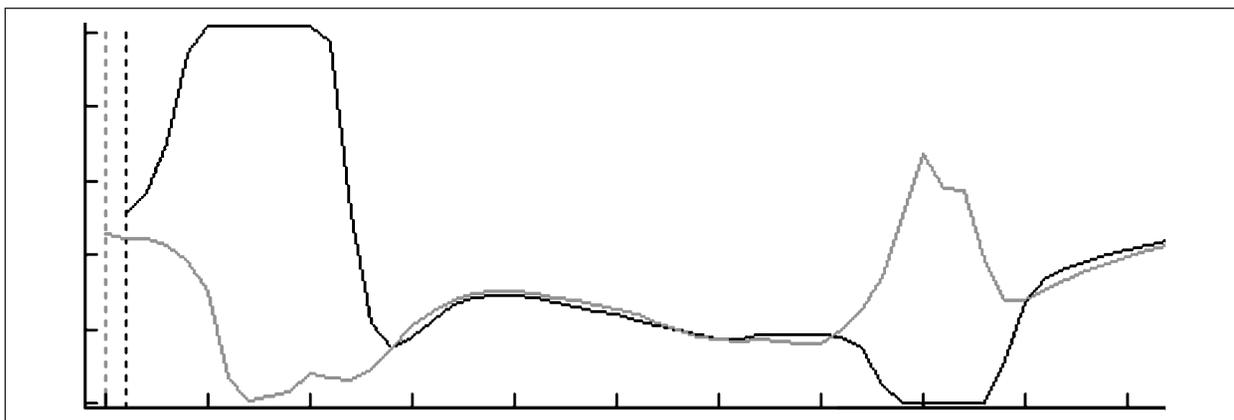


Bild 5: Vergleich der Messkurven eines Sensorpaares von einer Pkw-Überfahrt

Dabei werden benötigt

vom Traffic-Sensor:

- Fahrzeugüberfahrt durch Pkw oder Lkw,
- Überfahrtszeit, Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeuglänge pro Überfahrt,

vom Brückenkenwert:

- eindeutige Kennwertmaxima (zum Beispiel Dehnungsspitzen).

Aus den Kennwertmaxima wird auf die Anzahl der Achsen und deren Abstände geschlossen. Mit der Anzahl der Achsen und den Achsabständen eines Fahrzeugs wird jedes Fahrzeug einem Fahrzeugtyp des TLS-Codes (vgl. [18]) zugeordnet.

Die ausgewählten Fahrzeugtypen sowie die Kriterien zur Typzuordnung auf Basis der Achsabstände sind in der Anlage B zusammengestellt.

4.4 Ermittlung der Achslasten und der Gesamtgewichte

Die Ermittlung der Achslasten wird über ein Optimierungsverfahren (Gradientenverfahren) unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate realisiert. Die Ausgleichsrechnung erfolgt zwischen einem gemessenen Kennwert-Zeitverlauf und einem gerechneten Kennwert-Zeitverlauf. Der gerechnete Kennwert-Zeitverlauf basiert auf einer modellierten und durch Kalibrierung evaluierten Kennwert-Einflussfunktion des Tragwerks und auf den erkannten Fahrzeugtypen und Fahrzeuggeschwindigkeiten während der Messung.

Die Achslasten werden über die Minimierung der Fehlerquadratsumme E zwischen den aus den berechneten Einflussfunktionen gewonnenen Kenngrößen ε^T und den gemessenen Kenngrößen ε^M für jeden betrachteten Zeitpunkt k bezogen auf die betrachtete Stelle bestimmt.

$$E = \sum_{k=1}^K [\varepsilon_k^M - \varepsilon_k^T]^2$$

In der Fehlerfunktion ist ε_k^M die gemessene Kenngröße. Bei Annahme von Punktlasten als Achslasten und balkenartigen Tragwerken ist die rechnerische Kenngröße ε_k^T die Summe der einzelnen erkannten Achslasten P_i multipliziert mit der zugehörigen Einflussordinate I_k .

$$E = \sum_{k=1}^K [\varepsilon_k^M - (P_1 I_k^1 + P_2 I_k^2 + \dots + P_N I_k^N)]^2$$

Bei Flächenlasten (Radaufstandsfläche) und/oder mehrdimensionalen Tragstrukturen wird die Einflussordinate zum Volumen.

Bei der Ermittlung des rechnerischen Kenngrößen-Zeitverlaufes ist die Berücksichtigung aller sich im betrachteten Zeitraum auf der Brücke befindenden Fahrzeuge notwendig.

Neben den einzelnen Achslasten als zu optimierende Variablen ist die Berücksichtigung weiterer Parameter wie Position des Fahrzeugs in Querrichtung auf der Brücke und die Fahrzeuggeschwindigkeit erforderlich.

Ergebnisse der Ausgleichsfunktion sind die Lasten der einzelnen berücksichtigten Achsen. Als Ausgleichsfunktion sind die so gewonnenen Lasten physikalisch nicht durchweg sinnvoll, aber die Summe und somit das Gesamtgewicht sind korrekt.

Das Problem ist durch eine Mehrfachoptimierung (mehrfaches Durchlaufen des Prozesses) lösbar.

Für die Testphase des Projektes werden lediglich die Achslasten aller sich auf der Brücke befindenden Fahrzeuge als Variable eingeführt, um Fehler bei der Fahrzeugerkennung schneller verfolgen zu können. Das gewonnene Gesamtgewicht wird in der Testphase genutzt. Durch eine prozentuale Aufteilung des Gesamtgewichtes auf die einzelnen Achsen entsprechend den am Fahrbahnübergang bestimmten Dehnungsverhältnissen der Achsen untereinander werden die Achslasten gewonnen.

Das bisher eingesetzte Optimierungsverfahren auf der Basis des in der MKL-Library enthaltenen „Trusted-Region-Algorithmus“ erzielte gute Ergebnisse. Eine Untersuchung von Optimierungsstrategien hinsichtlich Effizienz und Genauigkeit ist im Rahmen dieses Projektes zugunsten des Gesamtsystems nicht vorgesehen.

4.5 Ziellastniveau entsprechend Nachrechnungsrichtlinie

Die Festlegung des Ziellastniveaus in [12] erfolgt objektbezogen über die prozentuale Verkehrszusammensetzung des Schwerverkehrs (Lkw, Bus und Lkw mit Anhänger und Sattelzüge) und dem durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr (DTV-SV). Diese Verkehrsdaten sind Ergebnisse des RTMS.

Für die Festlegung des Ziellastniveaus ist zusätzlich die Entwicklung des Schwerverkehrsaufkommens für den Prognosezeitraum zu berücksichtigen. Dafür stehen Daten in [12] zur Verfügung und es kann somit eine Einordnung in ein Ziellastniveau erfolgen.

4.6 Ermittlung von Auslastungsgraden

Auslastungsgrade werden im Rahmen des Projektes nicht bestimmt. Es werden lediglich aus den gemessenen Verdrehungs-Zeitverläufen charakteristische Werte entsprechend Kapitel 4.8 ermittelt und diese in Ermangelung einer vorliegenden Lagerstatik der rechnerischen Verdrehung aus der Anwendung des Lastmodells BK60 gegenübergestellt.

4.7 Auswertung der Kennwert-Zeitverläufe

Experimentell ermittelte Kennwerte, wie Dehnungen oder Verformungen beinhalten auch vorhandene Bauwerksschädigungen. Bei Langzeitmessungen können Bauwerksschädigungen über Veränderungen der Kennwerte erkannt und bewertet werden.

Dies setzt ursachenbezogene Kennwert-Zeitverläufe voraus. Zu diesem Zweck müssen die Messreihen der Kennwerte hinsichtlich der Anteile aus Verkehr und Temperatur getrennt werden. Das setzt eine Erkennung der Anteile voraus. Die Reaktionen der Temperatureinwirkungen sind tageszeitliche

Schwankungen, wohingegen die Reaktionen infolge Verkehrs kurzzeitigen und dynamischen Charakter haben. Zur Trennung wird eine Filterung der Messreihen im Frequenzbereich mittels Frequenzfiltern vorgenommen. Zur Erhöhung der Effizienz der Rechnerleistung werden gegenwärtig Mittelwerte von Messdaten über Zeiträume im Minutenbereich zur Identifizierung des Temperaturanteils herangezogen.

Ein Abgleich zwischen gemessenen Temperatur- und Verkehrseinwirkungen und rechnerischen Temperatur- und Verkehrseinwirkungen bei bekannten Einwirkungen soll schadigungsrelevante Einflüsse erkennen lassen.

Im gegenwärtigen Projekt werden lediglich die Trennungen vorgenommen.

4.8 Ermittlung charakteristischer Werte aus gemessenen Zeitverläufen

Für die Nachweisführung von Brückenbauwerken werden Maximalwerte der Einwirkungen benötigt, die innerhalb eines langen Betrachtungszeitraumes auftreten. Dieser Betrachtungszeitraum wird anhand der normativen Definitionen des charakteristischen Wertes von Einwirkungen deutlich. Im Eurocode 1, Teil 2 [13] wird für den charakteristischen Wert der Verkehrseinwirkungen eine mittlere Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren gegeben. Für den charakteristischen Wert der Temperatureinwirkungen wird im Eurocode 1, Teil 5 eine mittlere Wiederkehrperiode von 50 Jahren gegeben.

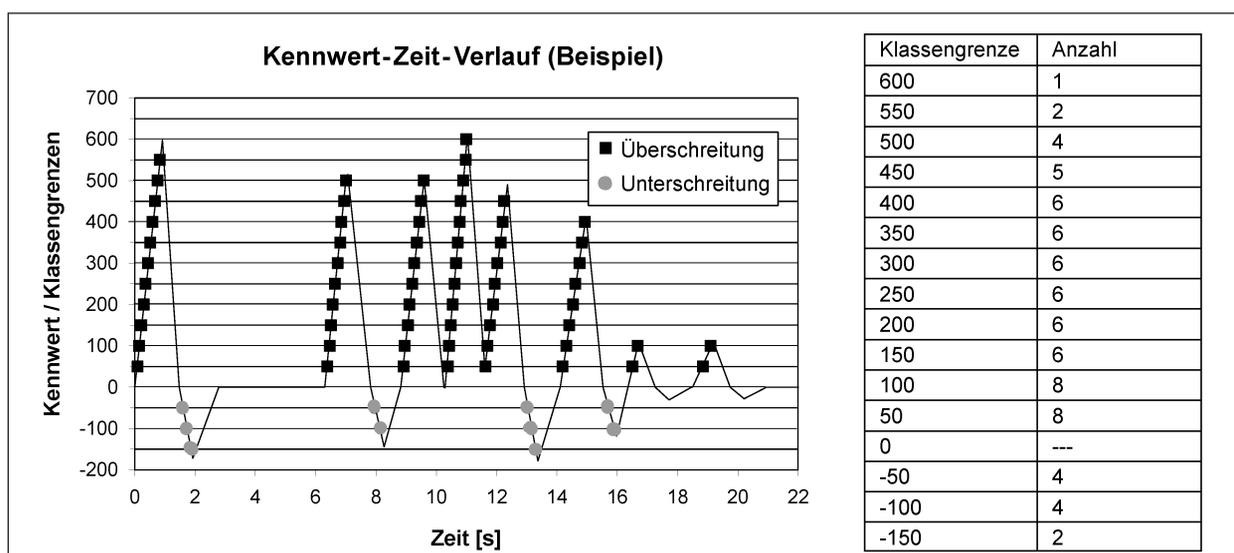


Bild 6: Kennwert-Zeitverlauf mit eingetragenen Klassengrenzendurchgängen

Da gemessene Zeitverläufe von Kennwerten im Vergleich dazu einen sehr kurzen Bezugszeitraum (Messzeitraum) aufweisen, ist eine statistische Auswertung der Messwerte mit einer anschließenden Extrapolation erforderlich.

Für die Ermittlung charakteristischer Werte unterschiedlicher Einwirkungen und Kennwerte aus Einwirkungen kommen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung.

Für Einwirkungen aus Verkehr wurde in [6] für diese Auswertung und Extrapolation eine Klassengrenzendurchgangszählung mit anschließender Anpassung der Auszählergebnisse durch eine Rice-Funktion angewendet (basierend auf [5]). Hierbei werden Durchgänge eines Kennwert-Zeitverlaufes durch definierte Klassengrenzen gezählt und anschließend in einem Histogramm aufgetragen.

Bild 6 zeigt ein Beispiel für eine solche Zählung von Überschreitungen (auf der positiven Seite – positive Werte auf der y-Achse im Diagramm) und Unterschreitungen (auf der negativen Seite) definierter Klassengrenzen. Die Darstellung eines Auszählergebnisses von Klassengrenzenüberschreitungen ist in Bild 7 exemplarisch aufgeführt.

An dieses Histogramm (s. Bild 7) wird eine Rice-Funktion angepasst. Diese Rice-Funktion ergibt sich zu:

$$v(x) = v_0 \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Die Anpassung (Identifikation der Parameter) erfolgt mit der Methode der kleinsten Quadrate, indem durch die Bildung des Logarithmus der Ausgangsgleichung eine Polynomfunktion zweiten Grades erzeugt wird:

$$y = \ln(v(x)) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

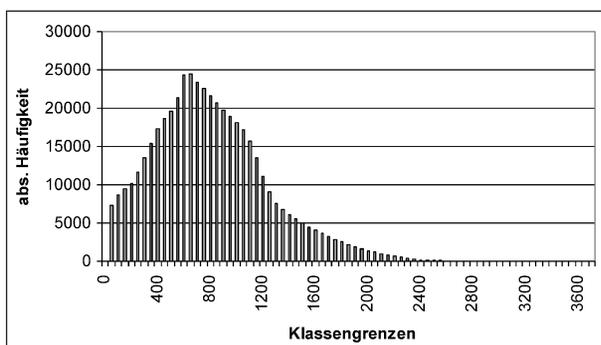


Bild 7: Beispiel für ein Histogramm von Klassengrenzenüberschreitungen

mit:

$$a_0 = \ln(v_0) - \frac{m^2}{2\sigma^2}$$

$$a_1 = \frac{m}{\sigma^2}$$

$$a_2 = -\frac{1}{2\sigma^2}$$

Für diese Annäherung soll dabei gelten:

$$\sum_1^n \left(\ln(y_{LCC}(x)) - (a_0 + a_1x + a_2x^2) \right)^2 = \min$$

Durch partielle Ableitung nach a_0 , a_1 und a_2 ergibt sich ein Gleichungssystem mit drei Gleichungen und den drei Unbekannten a_0 , a_1 und a_2 , aus denen die Parameter der Rice-Verteilung ermittelt werden können. Die Annäherung erfolgt von einem Klassenwert x_0 aus nach oben (betragsmäßig). x_0 wird dabei schrittweise erhöht, um einen Wert für x_0 zu ermitteln, für den sich eine optimale Anpassung an das Ausgangshistogramm ergibt. Ist dieses x_0 gefunden, so können mit den Parametern der Rice-Funktion Werte mit einer beliebigen Wiederkehrperiode berechnet werden.

Wertet man definierte Abschnitte eines gemessenen Zeitverlaufes (z. B. ein Tag oder einige Stunden) mit diesem Verfahren statistisch aus und ermittelt charakteristische Werte (mittlere Wiederkehrperiode 1.000 Jahre), so werden diese Werte gewissen Streuungen unterliegen sein. Auf die Analyse dieser Streuungen wird im Kapitel 4.10 näher eingegangen.

Für Einwirkungen aus Temperatur wird entweder für die gemessene Kenngröße (Verdrehung oder Verschiebung) aus Temperatur oder für die ermittelten Temperaturanteile der Brücke (T_N oder T_M) aus den stündlichen Maximal- und Minimalwerten ein Histogramm erstellt und einer Extremwertverteilung Typ III angenähert. Die Ermittlung des 98%-Quantils entspricht dann einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren.

4.9 Bestimmung charakteristischer Kennwerte aus Simulationsrechnungen

Die direkte statistische Auswertung gemessener Kennwert-Zeitverläufe hat den Nachteil, dass zukünftige Entwicklungen des Verkehrsaufkommens, z. B. der Veränderung der Verkehrsstärke oder der

Verkehrszusammensetzungen, nicht betrachtet werden können.

Im Vergleich dazu können bei Simulationsrechnungen Entwicklungen des Verkehrsaufkommens berücksichtigt werden. Ergebnisse solcher Simulationen sind Fahrzeugfolgen. Hierzu sind Eingangsdaten in Form von Verkehrszusammensetzung, Abstandsverhalten und Gesamtgewichtsverteilung definierter Fahrzeugtypen erforderlich. Diese sind Ergebnisse des RTMS. Die Entwicklung verschiedener Szenarien für den zukünftigen Verkehr erfolgt auf Basis des aktuell erfassten Verkehrsaufkommens.

Die simulierten Fahrzeugfolgen werden rechnerisch über das Tragwerksmodell der Brücke geleitet und Kennwerte berechnet. Ergebnisse sind Kennwert-Zeitverläufe analog der Kennwert-Zeitverläufe der Messungen. Der Umfang der Simulationsrechnungen, d. h. die Länge der simulierten Fahrzeugfolgen, ist wie die Messungen auch begrenzt und eine statistische Auswertung mit Extrapolation ist erforderlich. Die Vorgehensweise für diese statistische Auswertung ist analog zu Kapitel 4.8.

Simulationen der Temperatureinwirkungen sind angesichts der Änderungen über längere Zeiten als der Verkehr besonders sinnvoll. Die Verwendung der lokalen Messungen der klimatischen Einflüsse garantiert die regionale und lokale Besonderheit. Nahe gelegene meteorologische Stationen garantieren die Auswahl geeigneter Zeiträume. Auch hier ist eine Extrapolation erforderlich (s. Kapitel 4.8).

4.10 Zeitanalysen für die Ermittlung charakteristischer Werte des Verkehrs

Extrapolationen sind die Bestimmung eines Verhaltens über den bekannten Bereich hinaus. Die Qualität des bekannten Bereiches hängt vom Ausgangszeitraum (Messdauer bzw. Simulationslänge) ab. Vergleicht man z. B. statistische Auswertergebnisse von verschiedenen 6-Stunden-Messreihen, so werden diese Abweichungen zueinander aufweisen. Die Größe solcher Abweichungen kann aber ohne entsprechende Untersuchungen nicht quantifiziert werden.

Um eine Beurteilung des Einflusses der Messdauer auf die Ergebnisse statistischer Auswertungen zu ermöglichen, werden die gemessenen Zeitverläufe in definierte Abschnitte (z. B. 6 Stunden) aufgeteilt

und für jeden Abschnitt eine statistische Auswertung durchgeführt. Anschließend werden die Abschnitte vergrößert (z. B. 12 Stunden, 24 Stunden, 1 Woche, 1 Monat) und ebenfalls eine statistische Auswertung durchgeführt. Die Ergebnisse werden miteinander verglichen und eine Analyse der auftretenden Abweichungen zueinander durchgeführt. Analog wird mit Ergebnissen von Simulationsrechnungen verfahren. Als Auswertergebnis wird der charakteristische Wert genutzt.

4.11 Analyse von Temperaturmessungen

Temperaturmessungen im Projektsinne umfassen die Messung der Schattenaußenlufttemperatur und Temperaturen in der Brücke. Zur Beurteilung des Gesamttragverhaltens sind die normativ definierten Temperaturanteile des Bauwerkes interessant. Die gemessenen Verformungen am Stützpunkt einer Brücke sind die relativen Verformungen aus Unterbau und Überbau. Sie beinhalten immer Temperaturanteile. Eine experimentelle Erfassung der Temperaturverteilungen im Querschnitt von Überbau und Unterbau ist sowohl messtechnisch als auch rechnerisch aufwändig.

Im Rahmen einer Dissertation am Lehrstuhl [9] wurden deshalb für die wesentlichen Betonüberbauquerschnitte und Pfeilerquerschnitte empirische Beziehungen zwischen Schattenlufttemperaturen und den Temperaturanteilen entwickelt. Damit ist es möglich, auch wenn nur Lufttemperaturen gemessen werden können, relevante Temperaturanteile zu bestimmen.

4.12 Ergebnisstruktur für Verkehrszählung und Achslastwägung

Die Ergebnisse der Auswertungen der Verkehrszählungen und der Achslastwägungen werden in Tabellenform bereitgestellt. Analog zu Auswertungen bisheriger Forschungsprojekte orientiert sich die Auswertung an dem Format, welches von den installierten WIM-Systemen geliefert wird. Die Daten werden als Textdateien im ASCII-Code erstellt, wobei jeder Datensatz durch einen Zeilenumbruch und jeder Einzelwert durch ein Semikolon getrennt werden (csv-Format). Dieses Format gestattet sowohl die automatisierte Weiterverarbeitung durch elektronische Systeme als auch die

Ergebnisdarstellung mittels gebräuchlicher Tabellenkalkulations- oder Statistikprogramme wie z. B. MS-EXCEL, SPSS o. Ä.)

Die Definition der Ergebnisstruktur ist in der Anlage D dargestellt.

5 Praktische Erprobung

5.1 Auswahl einer Testbrücke

Bei der Testbrücke (vgl. Bild 8) handelt es sich um eine dreifeldrige Spannbeton-Plattenbalkenbrücke



Bild 8: Ansicht Brücke ü. d. Kreisell bei Bronzell/Fulda

mit einer Gesamtlänge von 91 m. Das Bauwerk überführt die B 27 über einen Verkehrskreisel südlich von Fulda. In der Grundrissgeometrie weist die Brücke einen Radius von 700 m in der Straßenachse auf. Die Breite des Überbaus weitet sich mit 16,00 m vom Widerlager Richtung Fulda bis auf 17,58 m am Widerlager Richtung Würzburg auf.

Die Anzahl der Fahrstreifen wurde gegenüber der Planung von einem Fahrstreifen in jede Richtung mit jeweiligen Nothaltestreifen auf 2 Fahrstreifen in Richtung Würzburg verändert, wobei der zweite Fahrstreifen in Richtung Würzburg auf der Brücke als Einfädelstreifen dient. Der zweistegige Plattenbalkenquerschnitt mit den Einzelstützweiten von 28,5-34, 0-28,5 m (vgl. Bild 10, Bild 9) ist in Längs- und Querrichtung vorgespannt.

Die 1977 erbaute Brücke wurde auf der Grundlage der damals gültigen Norm DIN 1072 für eine Brückenklasse 60 geplant. Die Bauwerks- als auch umgebungsspezifischen Randbedingungen sind für eine Verwendung des Bauwerks als Testbrücke ausgezeichnet. Die Brücke befindet sich derzeit in einem guten Zustand.

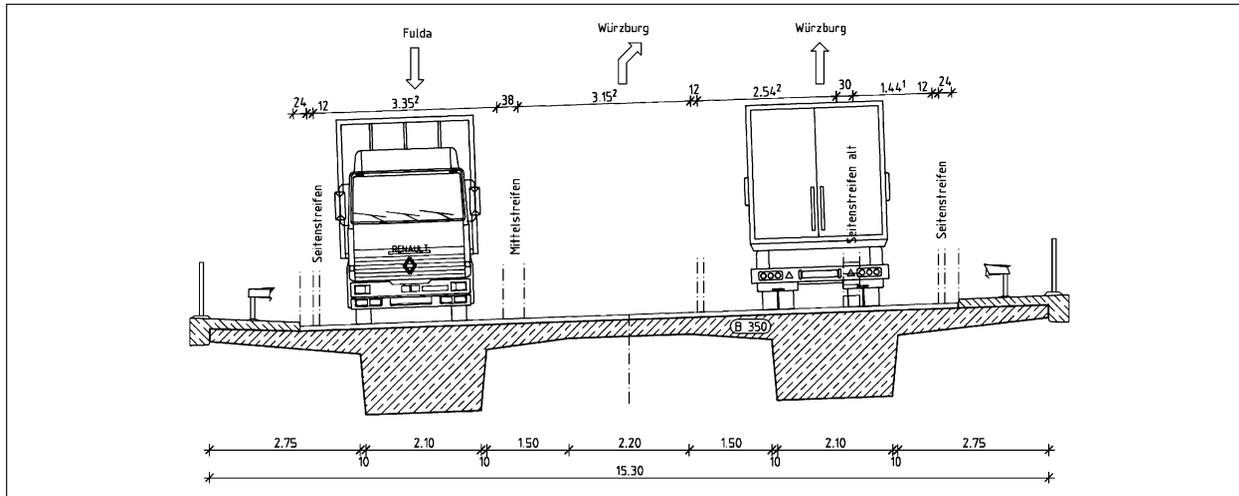


Bild 9: Überbauquerschnitt mit Spurlage der Fahrzeuge

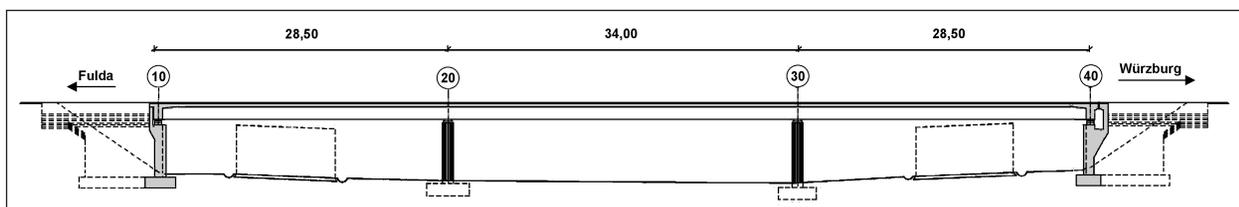


Bild 10: Längsschnitt Brücke ü. d. Kreisell bei Bronzell/Fulda

5.2 Messtechnik

5.2.1 Verkehrsdaten

Die Verkehrsdaten werden über Traffic-Sensoren ermittelt. Der strukturelle Aufbau der einzelnen Traffic-Sensoren lässt sich wie folgt beschreiben:

Herzstück bildet ein Mikrocontroller, auf dem die Detektionsalgorithmen und auch das Kommunikationsmodul firmwareseitig implementiert sind, so dass ein Großteil der Messwertanalyse bereits im Sensor erfolgt.

Die Geschwindigkeitsberechnung erfolgt zentral im WTS-Mess-PC anhand der Messdaten der im Abstand von 2,5 m installierten Sensoren eines Sensorpaars.

5.2.2 Brückenkenwerte

Das Messkonzept für die Testbrücke sieht vor:

- Messungen vertikaler Relativverschiebungen zwischen Überbau und Stützenkopf an den Lagern in der Achse 30 zur Bestimmung von Auflagerverdrehungen und -einsenkungen,
- Messung der Horizontalverschiebungen in Längs- und Querrichtung an einem Pfeiler der Achse 30,

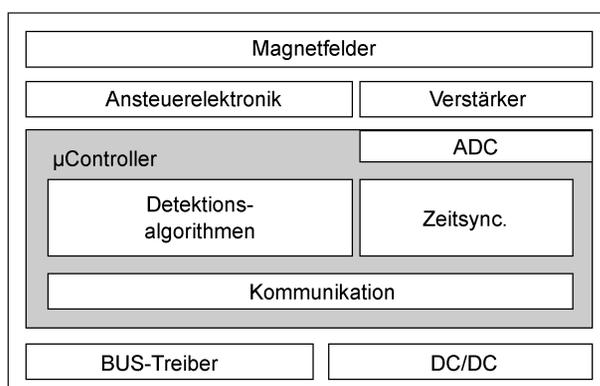


Bild 11: Traffic-Sensor-Blockschaltbild

- Messung von Betondehnungen an der Stegunterseite und an der Unterseite der Fahrbahnplatte,
- Messung von Dehnungen an den Traversen der Fahrbahnübergangskonstruktion,
- Temperaturmessungen an ausgewählten Stellen.

Alle anfallenden Messwerte der applizierten Sensoren für

- Dehnungsmessungen,
- Verschiebung und
- Temperatur

wurden mit dem Messverstärker-System MGCplus der Fa. Hottinger Baldiwin (HBM) erfasst.

Die Lage der Messquerschnitte ist in Bild 12 dargestellt. Zusätzlich wird an der Achse 40 gemessen. Die einzelnen Messstellen werden nachfolgend detaillierter beschrieben.

Ermittlung der Vertikalverschiebungen und der Rotation in Achse 30

Mittels induktiver Wegaufnehmer werden die relativen Vertikalverschiebungen zwischen oberem und unterem Lagersockel in Achse 30 jeweils an 3 definierten Punkten gemessen. Aus den 3 Messwerten der vertikalen Verschiebungen werden über die Ebenengleichung die Verdrehungen um die Quer- und Längsachse bezogen auf den Überbau sowie die Einsenkung im rechnerischen Stützpunkt bestimmt.

An den beiden Pfeilerköpfen der Achse 30 wurden IWT-Aufnehmer vom Typ WA10-T und WA50-T der Fa. HBM eingesetzt. Die induktiven Wegaufnehmer haben eine Linearitätsabweichung von 0,1 % (größte Abweichung zwischen Anfangs- und Endpunkt, einschließlich Hysterese bezogen auf den Nennwert).

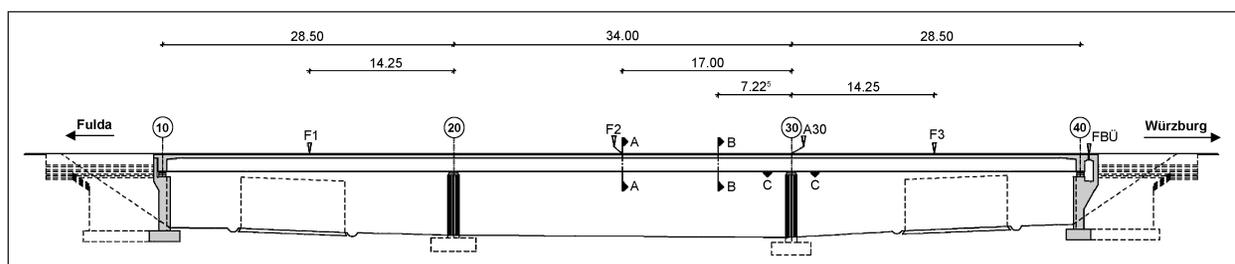


Bild 12: Lage der Sensorik im Längsschnitt

Die Befestigung der induktiven Wegaufnehmer an den Pfeilerköpfen erfolgte mit Magnetstativen aus Invarstahl, um Fehler durch Temperatureinflüsse zu vermeiden. Zur Befestigung wurden Stahlplatten an den Messpunkten der Pfeilerköpfe aufgeklebt.

Die induktiven Wegaufnehmer wurden in 6-Leiterschaltung an das Messverstärkersystem MGCplus

angeschlossen, wodurch Messfehler durch Spannungsverluste in den Kabeln ausgeschlossen waren.

Neben den vertikalen Einsenkungen wurde bei dem westlichen Pfeiler die horizontale Relativbewegung zwischen dem Überbau und dem Stützenkopf mit Hilfe von 2 horizontal montierten induktiven Wegaufnehmern bestimmt.

Im Bild 13 sind die induktiven Wegaufnehmer am Stützenkopf der Achse 30 abgebildet.

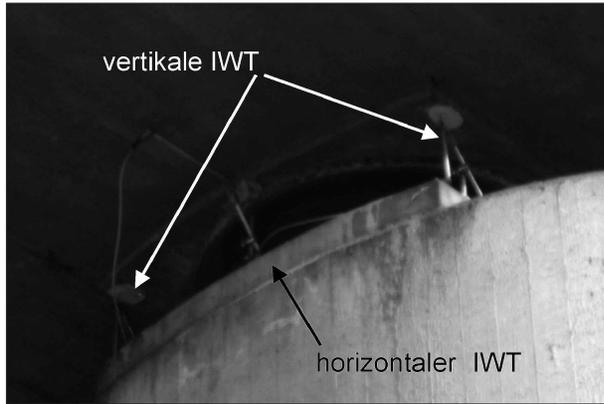


Bild 13: Lage der induktiven Wegaufnehmer am Stützenkopf

Messung der Betondehnungen am Steg des Plattenbalkens

Um bei der Testbrücke Referenzwerte zu haben, wurden die Betondehnungen am Steg des Plattenbalkens (vgl. Bild 15) aufgezeichnet. Die Dehnungen wurden mit Hilfe eines Dehnmessstreifen mittig im Feld 2 gemessen.

In Bild 14 sind die Dehnung am Steg des östlichen Plattenbalkens in Fahrrichtung Fulda sowie die dazugehörige Verdrehung φ_y dargestellt. Die Messwerte wurden im Rahmen der Kalibrierfahrt bei der Überfahrt eines 5-Achs-Kalibrierfahrzeuges mit einem Gesamtgewicht von 38,5 t aufgezeichnet.

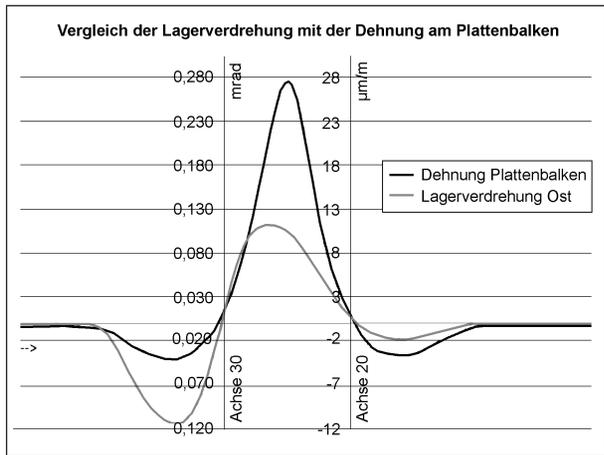


Bild 14: Lagerverdrehung und Betondehnungen am Steg

Ermittlung der Betondehnungen an der Fahrbahnplatte

Neben den Betondehnungen am Steg des Plattenbalkens wurden die Betondehnungen am Kragarmanschnitt sowie in der Mitte der Fahrbahnplatte gemessen (vgl. Bilder 16 bis 18). Die Anordnung der Dehnmessstreifen erfolgte im Nullpunkt des Biegemomentes bezogen auf die Längstragwirkung des Überbaus.

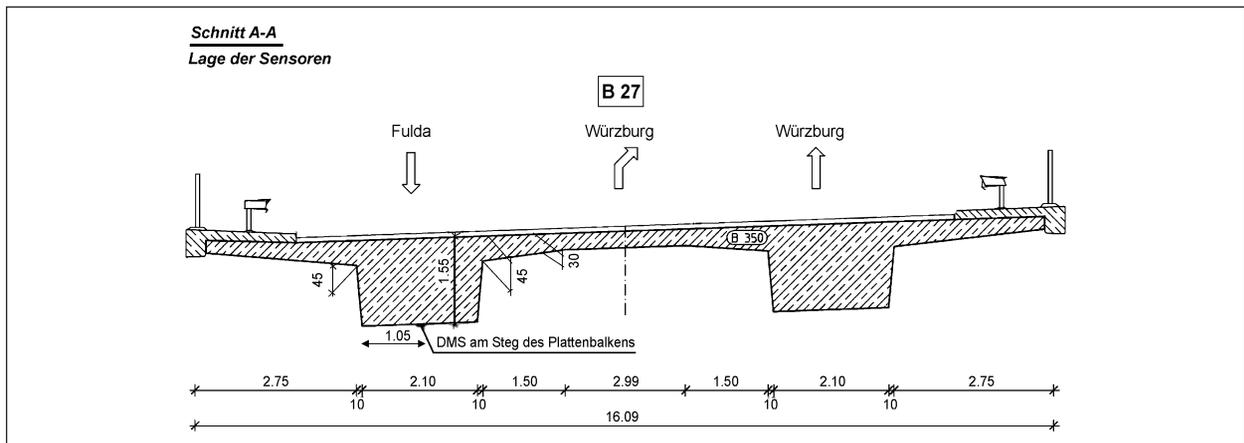


Bild 15: Querschnitt mit Lage des Dehnmessstreifens

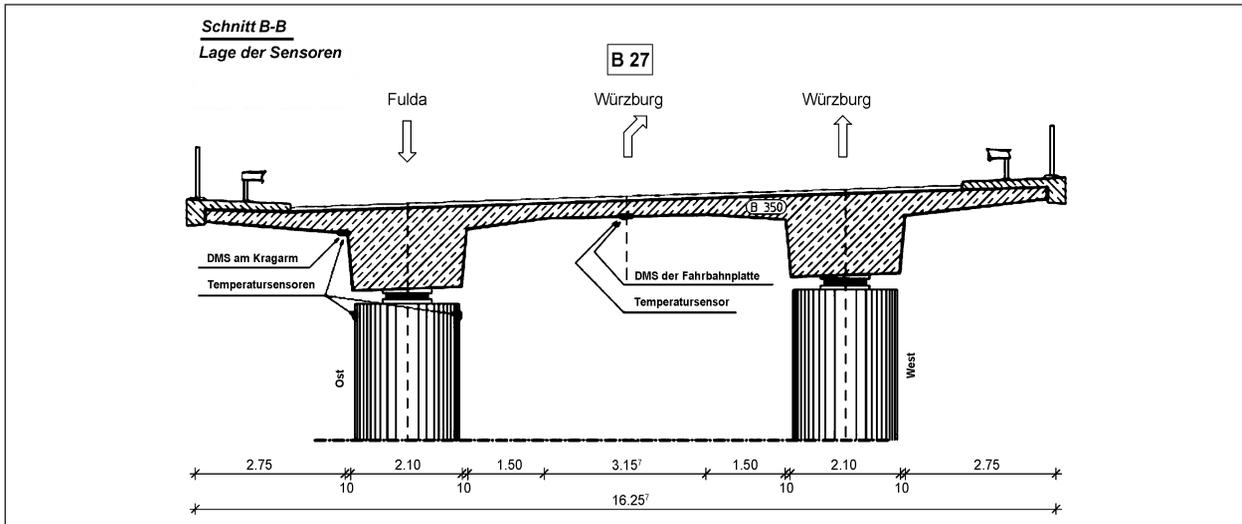


Bild 16: Querschnitt mit Lage der Dehnmessstreifen und der Temperatursensoren

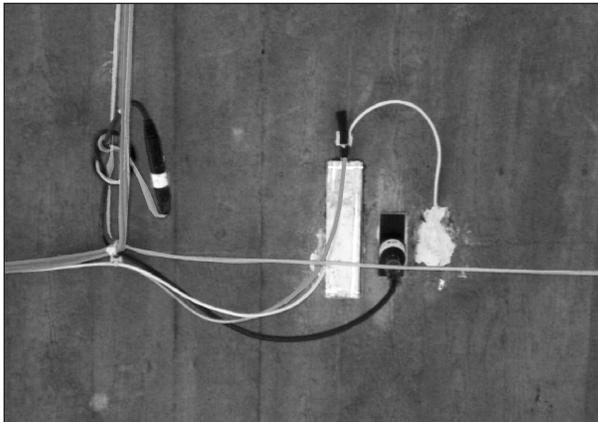


Bild 17: Dehnmessstreifen/Temperaturfühler und Beschleunigungsaufnehmer an der Fahrbahnplatte

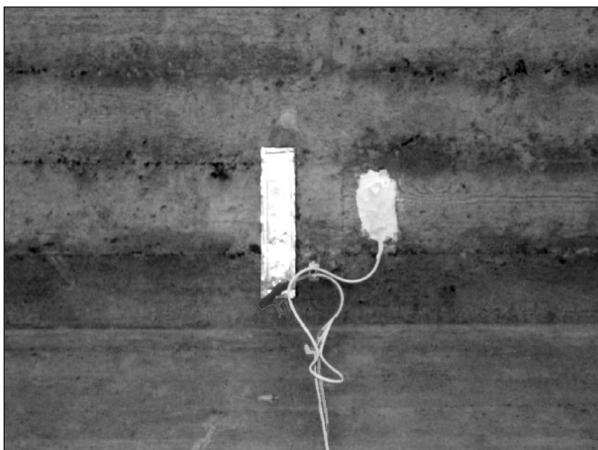


Bild 18: Dehnmessstreifen/Temperaturfühler am Anschnitt des Kragarms

Die Dehnung wurde mit drei Dehnmessstreifen (DMS) vom Typ LY41-100/120 in Plattenmitte quer, in Plattenrandmitte quer und in Balkenmitte längs gemessen.

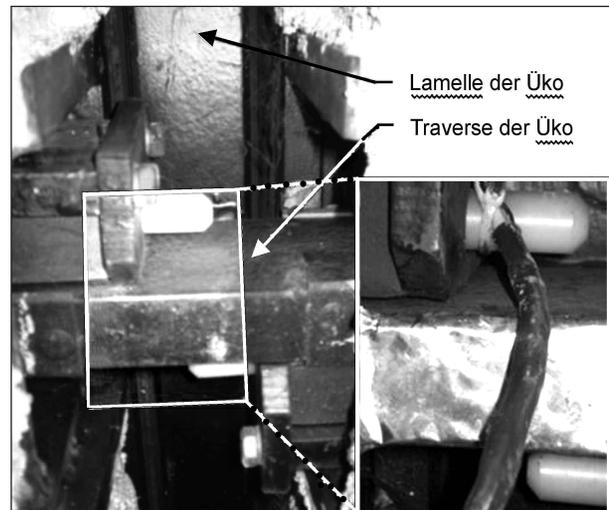


Bild 19: Traverse der Fahrbahnübergangskonstruktion mit Dehnmessstreifen (Ansicht von unten)

Ermittlung der Traversendehnungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion

An je 2 Traversen der Ost- und Westseite der Fahrbahnübergangskonstruktion wurden die Dehnungen mit vier DMS LY11-6/120 gemessen (vgl. Bild 19 und Bild 20).

Die Dehnmessstreifen wurden in einer 6-Leiterschaltung an das Messverstärkersystem MGCplus angeschlossen, wodurch Messfehler durch Spannungsverluste in den Kabeln ausgeschlossen waren. Die Traversen wurden so ausgewählt, dass die Dehnungen jedem Fahrstreifen direkt zugeordnet werden können. Infolge der kurzen Berührungsphase der Achsen während der Überfahrt eines Fahrzeuges wurden die Dehnungen mit 600 Hz abgetastet.

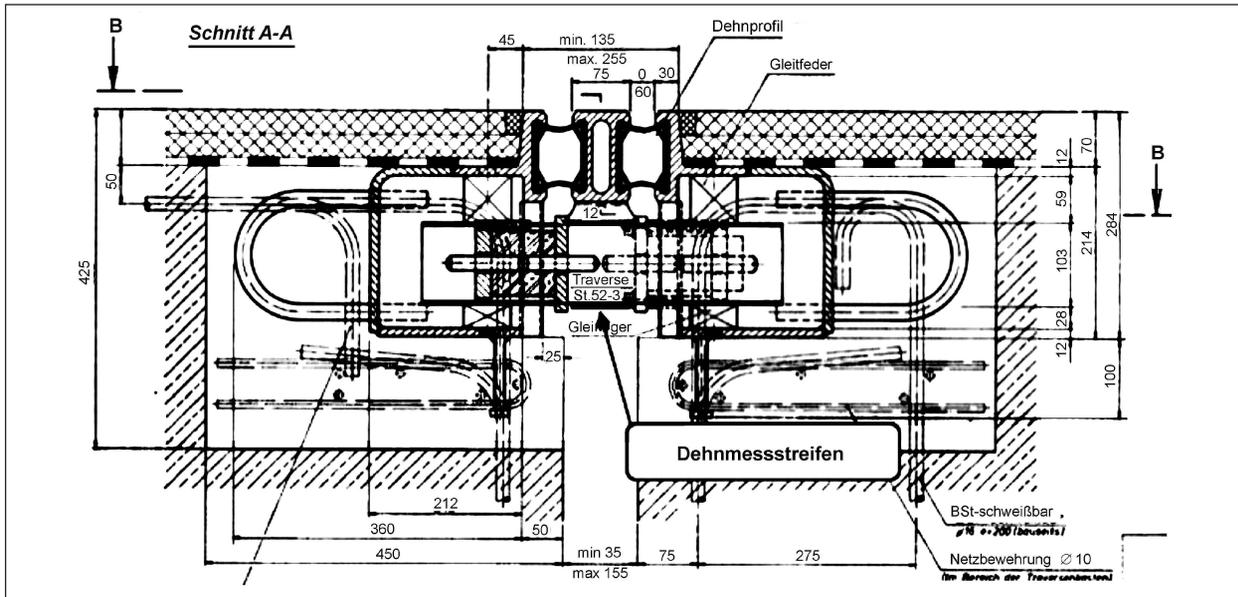


Bild 20: Schnitt durch die Fahrbahnübergangskonstruktion

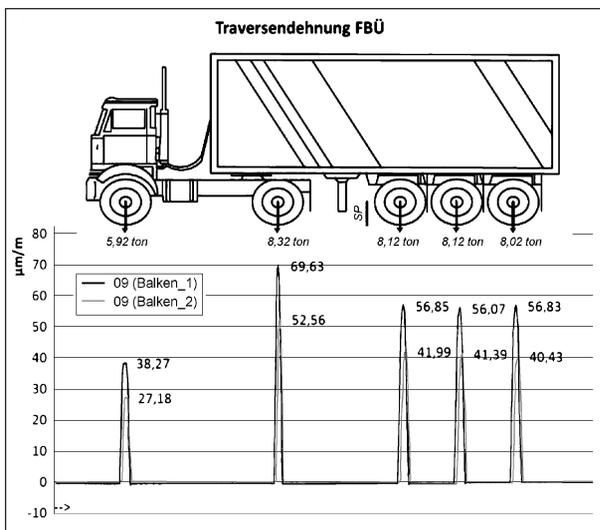


Bild 21: Dehnungen der Traverse der Fahrbahnübergangskonstruktion infolge der Achslasten (Kalibrierfahrt)

In Bild 21 sind die gemessenen Dehnungen an der Traverse der FÜK während der Überfahrt eines 5-Achs-Lkw dargestellt und den Achsen zugeordnet.

Die Dehnungen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit sind in Bild 22 für das 5-Achs-Kalibrierfahrzeug in Fahrtrichtung Fulda dargestellt.

Die gesamte Messtechnik zur Aufnahme der Kennwerte der Brücken einschließlich der Rechnersteuerung ist vorhandene Technik der Bauhaus-Universität und somit nicht optimal für das Projekt. Die Rechnersteuerung der Messanlage erfolgte mit der Software Beam für MGCplus der Fa. AMS. Die Messwerte aller Messaufnehmer mussten mit einer Abtastfrequenz von 600 Hz gemessen werden.

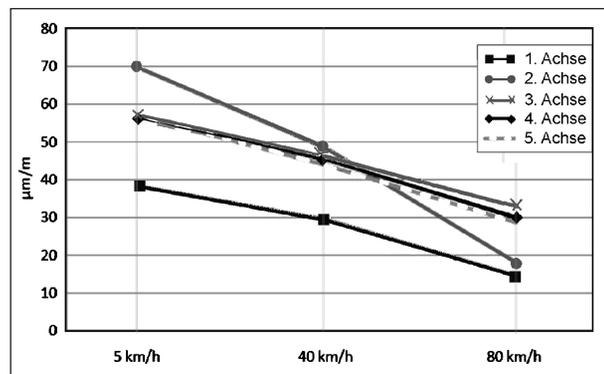


Bild 22: Dehnungen an der Traverse in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit

Eine Einstellung von unterschiedlichen Abtastfrequenzen für die Messkanäle ist mit dem Messverstärker-System MGCplus nicht möglich.

Die zentrale Messstation der Fa. AVK Infotech GmbH und die gesamte Messtechnik bestehend aus Messverstärkersystem MGCplus, Steuerrechner und UMTS-Router wurden in einem Stahlcontainer unter der Brücke neben Pfeiler Ost, Achse 30 installiert.

5.2.3 Datenmanagement

Wie schon unter Kapitel 3.3 erwähnt, basiert das Gesamtsystem auf zwei weitestgehend unabhängig voneinander laufenden Messsystemen für die Brückenkennwerte und Umgebungsbedingungen zum einen und die Messung des Verkehrsaufkommens zum anderen.

Dieser Ansatz bietet einige Vorteile bezüglich Flexibilität und Handhabbarkeit – birgt aber auch einige Risiken bezüglich zeitlicher Synchronisation der Messwerte, wie sich im Verlauf der Testphase zeigte.

5.3 Auswertalgorithmen für die Testbrücke

5.3.1 Tragwerksmodell

Die Modellbildung des Überbaus erfolgt im Rahmen einer Finiten-Elemente-Berechnung mit Stab- und Flächenelementen. Die Flächenelemente, die die Eigenschaften von Schalen aufweisen, werden exzentrisch an die Stabelemente gekoppelt. Das Modell (vgl. Bild 23) wird durch Messergebnisse aus den Kalibrierfahrten evaluiert und durch Steifigkeitsänderungen adaptiert.

Um auszuschließen, dass sich der Stützenkopf unter der Verkehrsbelastung verdreht und es damit nur zur Ermittlung der Differenzverdrehungen zwischen Stützenkopf und dem Überbau kommt, werden die Stützen inklusive der Gründung mit in das Berechnungsmodell einbezogen.

Die Lager werden hierbei als Federelemente modelliert, die die Widerstände der Lager aufweisen.

5.3.2 Kalibrieren

Für die Abgleichung des Messsystems an der Testbrücke sind Kalibrierfahrten unter definierten Randbedingungen erforderlich. Hierzu wurde ein umfangreiches Kalibrierprogramm aufgestellt, welches neben einer Nullmessung und definierten Laststellungen auch dynamische Bauwerksreaktionen sowie unterschiedliche Belastungsszenarien berücksichtigt.

Die Kalibrierung wurde mit 2 unterschiedlichen Fahrzeugen in beide Fahrtrichtungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Spurlagen

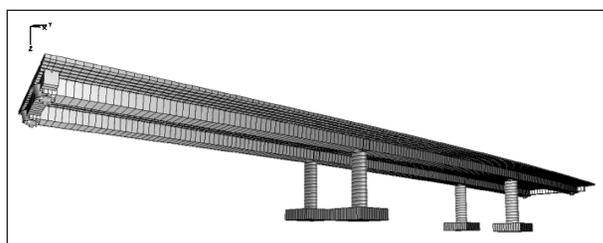


Bild 23: Isometrie des statischen Modells mit den Stützen der Lagerachse 20/30

durchgeführt. Es wurden Alleinfahrten und Begegnungsverkehr organisiert. Im Schwerpunkt standen Überfahrten der Fahrzeuge mit drei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, ca. 5 km/h, 40 km/h und 80 km/h, in mittiger Spurlage. Dies erforderte eine Vollsperrung der Brücke, was nur in den Nachtstunden möglich war. Überfahrten bei unterschiedlichen Witterungs- und Temperaturbedingungen waren deshalb nicht möglich.

In den Bildern 24 und 25 sowie Tabellen 2 und 3 sind die Kalibrierfahrzeuge sowie die Achslasten und Reifenabmessungen dargestellt.

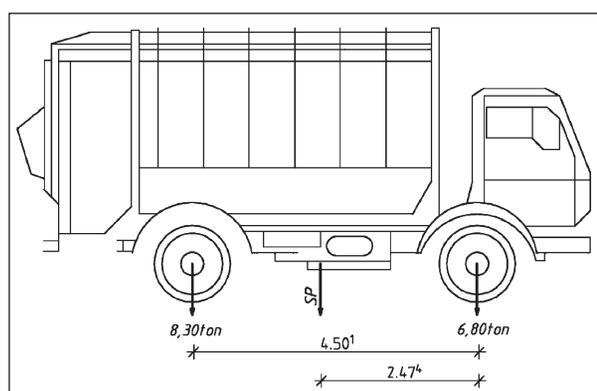


Bild 24: 2-Achs-Fahrzeug mit Achslasten und Achsabständen

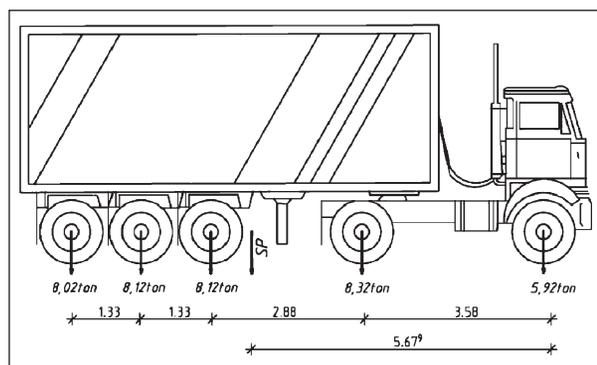


Bild 25: 5-Achs-Fahrzeug mit Achslasten und Achsabständen

MAN TGS 18.360	1. Achse	2. Achse
Achslast [ton]	6,80	8,30
Reifen	385/65 R22.5	315/80 R22.5 (Zwilling)

Tab. 2: 2-Achs-Fahrzeug mit Achslast und Reifenabmessungen

MB 1843	1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse
Achslast [ton]	5,92	8,32	8,12	8,12	8,02
Reifen	315/65 R22.5	315/80 R22.5 (Zwilling)	385/60 R22.5	385/60 R22.5	385/60 R22.5

Tab. 3: 5-Achs-Fahrzeug mit Achslast und Reifenabmessungen

Bei den Fahrten wurden mittige und linke Spurlagen in beide Fahrtrichtungen gefahren.

5.3.3 Einflussfunktionen

Die Ermittlung der Einflussfunktionen erfolgte am kalibrierten Tragwerksmodell. In Bild 26 sind die Einflusslinien der Überbauverdrehung der Achse 30 des befahrenen Fahrstreifens sowie die dazugehörige Überbauverdrehung des nicht befahrenen Fahrstreifens dargestellt.

Für die Testphase wurden Einflusslinien zur Bestimmung der Auflagerverdrehungen an der Achse 30 benutzt. Damit kann die Spurlage des jeweiligen Fahrzeugs nicht in die Optimierung einbezogen werden. Die Testphase ist eine Phase zur Erprobung des Gesamtsystems. Es wurde deshalb eine überschaubare Anzahl von Variablen angestrebt. Die Auswirkungen dieser Vereinfachungen werden bewertet und Empfehlungen für die praktische Anwendung abgeleitet.

5.3.4 Verkehrszählung über Traffic-Sensoren

Die Algorithmen zur Verkehrszählung aus den Traffic-Sensoren sind in Kapitel 4.2 beschrieben. Für die Testbrücke wurden keine darüber hinausgehenden Modifikationen vorgenommen.

5.3.5 Verkehrszählung über Traffic-Sensoren und Brücken Kennwerte

Die Verkehrszählung erfolgt über die Traffic-Sensoren, die in die Straßendecke ca. 50 m vor und hin-

ter der Brücke eingebracht sind, sowie über die Kennwert-Zeitverläufe der Bauwerksreaktion infolge einer Überfahrt eines Fahrzeuges. Der Ablauf ist unter Kapitel 4.3 beschrieben.

Neben der Anzahl der Achsen und den Achsabständen eines Fahrzeugs werden über die Differenzen der Maximalwerte der Dehnungen der Traverse der Fahrbahnübergangskonstruktion die Achslastverhältnisse jedes erkannten Fahrzeuges ermittelt.

5.3.6 Gesamtgewichtsbestimmung und Achslastermittlung

Der Grundalgorithmus ist in Kapitel 4.4 dargestellt. Für jedes erkannte Fahrzeug wird unter Berücksichtigung aller im Überfahrtszeitraum sich gleichzeitig auf der Brücke befindlichen Fahrzeuge die Einflusslinienmatrix unter Verwendung der in Kapitel 5.3.3 dargestellten Einflussfunktionen aufgestellt. Als Ergebnis liefert der Optimierungsalgorithmus die Achslasten, zu denen die kleinste Abweichung des berechneten Kennwert-Zeitverlaufes zum Kennwert-Zeitverlauf aus den Messdaten auftritt.

Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Erfassung der Geschwindigkeit der Fahrzeuge oder nicht erkannter Achsen ist eine direkte Bestimmung der Achslasten mittels des Algorithmus nicht möglich. Die Summe der Achslasten eines Fahrzeugs liefert jedoch einen guten Wert für das Fahrzeugesamtgewicht.

Gegenwärtig werden die einzelnen Achslasten aus dem Verhältnis der gemessenen Ausschläge für

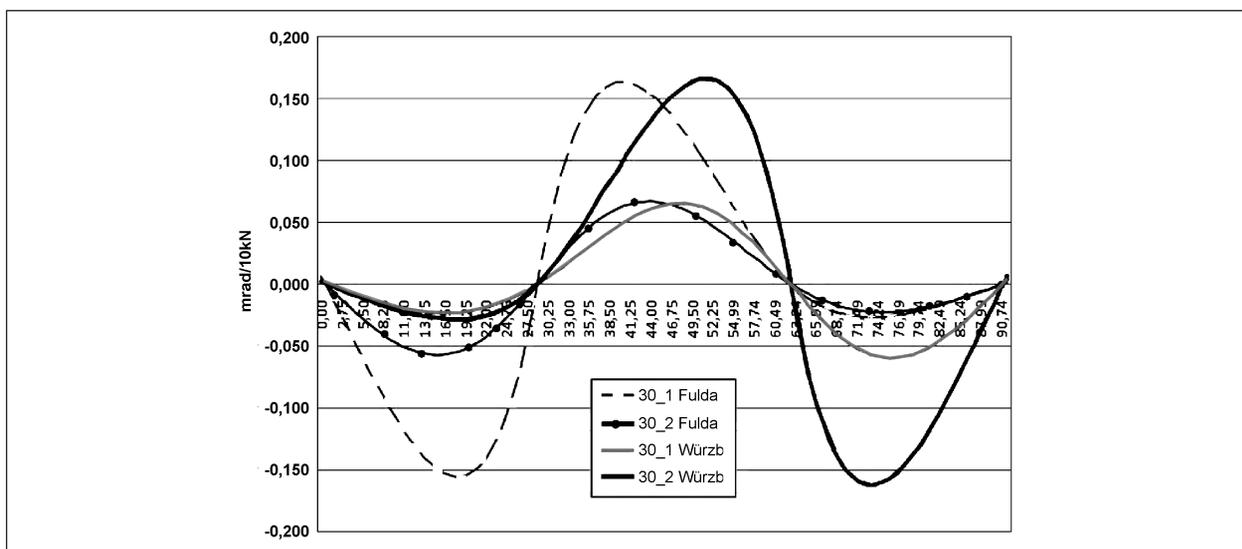


Bild 26: Einflusslinien der Überbauverdrehung φ_y [mrad/10 kN]

jede Achse am Fahrbahnübergang anteilig vom Gesamtgewicht bestimmt.

5.3.7 Ermittlung des Ziellastniveaus der Nachrechnungsrichtlinie

Die Zuordnung des Schwerverkehrs für die Ermittlung des Ziellastniveaus erfolgt aus den Daten der Verkehrszählung aus Traffic-Sensoren und Brückenkennwerten und der ermittelten Fahrzeugesamtgewichte. Die entsprechenden Algorithmen sind im Kapitel 4.5 dargestellt.

5.3.8 Ermittlung von Auslastungsgraden

Innerhalb des Projektes an der Testbrücke wird das Verhältnis des charakteristischen Wertes der Verdrehung aus Verkehr zur Verdrehung aus der Anwendung des Lastmodells BK60 ermittelt.

5.3.9 Auswertung Kennwert-Zeitverläufe

Um Kennwert-Zeitverlaufsveränderungen zu erkennen, sind lange Messperioden erforderlich. Dies kann nicht im Rahmen einer Testphase realisiert werden.

5.3.10 Ermittlung charakteristischer Kennwerte

Diese wird hier für die Verdrehung des Überbaus und die Lagereinsenkung entsprechend Kapitel 4.8 ausgeführt.

5.3.11 Analyse des Zeitverhaltens für charakteristische Kennwerte

Die Auswertung erfolgt am Beispiel von 1-Stunden-, 6-Stunden- und 24-Stunden-Messreihen der Verdrehung des Überbaus und der Lagereinsenkung in Achse 30 entsprechend Kapitel 4.9.

6 Ergebnisse der praktischen Erprobung

6.1 Zeiträume mit ausgewerteten Messdaten

Brückenkennwerte wurden seit dem 18.08.2011 gemessen. Vollständige Daten, d. h. sowohl Daten aus den Traffic-Sensoren als auch aus den Brückenkennwerten, liegen in auswertbarer Form vor:

- vom 03.11. bis 31.11.2011,
- vom 01.12. bis 19.12.2011,
- vom 01.01. bis 19.01.2012.

Damit stehen 10 Wochen zur Auswertung zur Verfügung.

Nach dem 19.01.2012 wurden nach einer umfangreichen Auswertung und Erfahrungssammlung Modifikationen erprobt. Als Hauptproblem der Auswertung stellte sich eine nicht synchrone Zeiterfassung der beiden Messsysteme heraus. Deshalb wurden zusätzliche Triggerzeiten erprobt, die sich jedoch nicht als Lösung anbieten.

6.2 Verkehrszählung aus Traffic-Sensoren

Das Traffic-Sensor-Messsystem konnte durch ständige Weiterentwicklung der Hard- und Softwarekomponenten und Verbesserung der Algorithmen während der Projektlaufzeit weitestgehend stabilisiert werden. Die Zuverlässigkeit der Fahrzeugdetektion konnte auf über 99 % erhöht werden und die Geschwindigkeit wird im Mittel mit einer Genauigkeit von +/-10 % ermittelt.

Bezüglich der Bestimmung der Achsposition bzw. Achsverteilung der Fahrzeuge und somit auch der Fahrzeugklassifikation in Richtung 8+1 zeigten die verwendeten Sensoren aber Schwächen bezüglich Spezifika und Reproduzierbarkeit der Kennlinienverläufe. Erste Untersuchungen im Labor deuten darauf hin, dass sich dies durch Verwendung von 3-achsigen Magnetfeldsensoren deutlich verbessern lässt. Weiterhin ist die Erweiterung der Detektoren mit weiteren Sensorarten wie z. B. hoch empfindlichen Beschleunigungssensoren zu untersuchen.

Bild 27 und Bild 28 geben einen Überblick über das erfasste summarische Verkehrsaufkommen (Pkw und Lkw) auf der Brücke (die Bilder sind aus Anschauungsgründen nur Auszüge). Deutlich zu erkennen sind richtungsabhängige Verkehrsspitzen, verursacht durch den Berufsverkehr am Vormittag, in Richtung Fulda bzw. am Nachmittag stadtauswärts. Die Grafik zur Geschwindigkeitsverteilung zeigt weiterhin deutlich einen Einbruch der mittleren Geschwindigkeit werktags zwischen 7 und 8 Uhr, während gleichzeitig das Verkehrsaufkommen sein Maximum von mehr als 1.000 Fahrzeugen pro Stunde erreicht. Dies deutet auf zum Teil zähl-

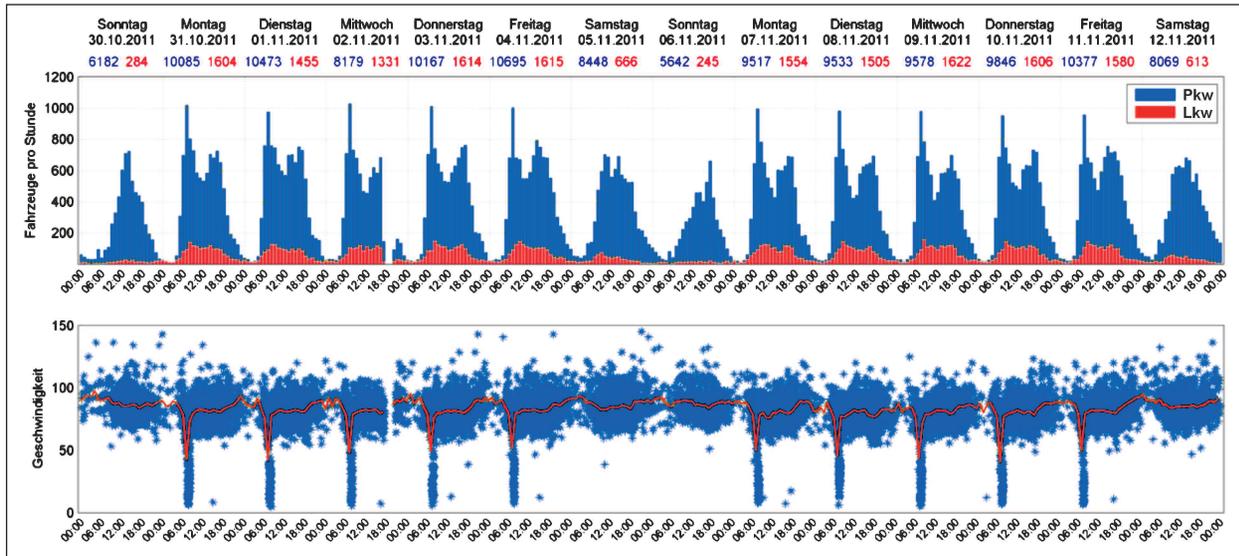


Bild 27: Auszug der Fahrzeuganzahl in Richtung Fulda

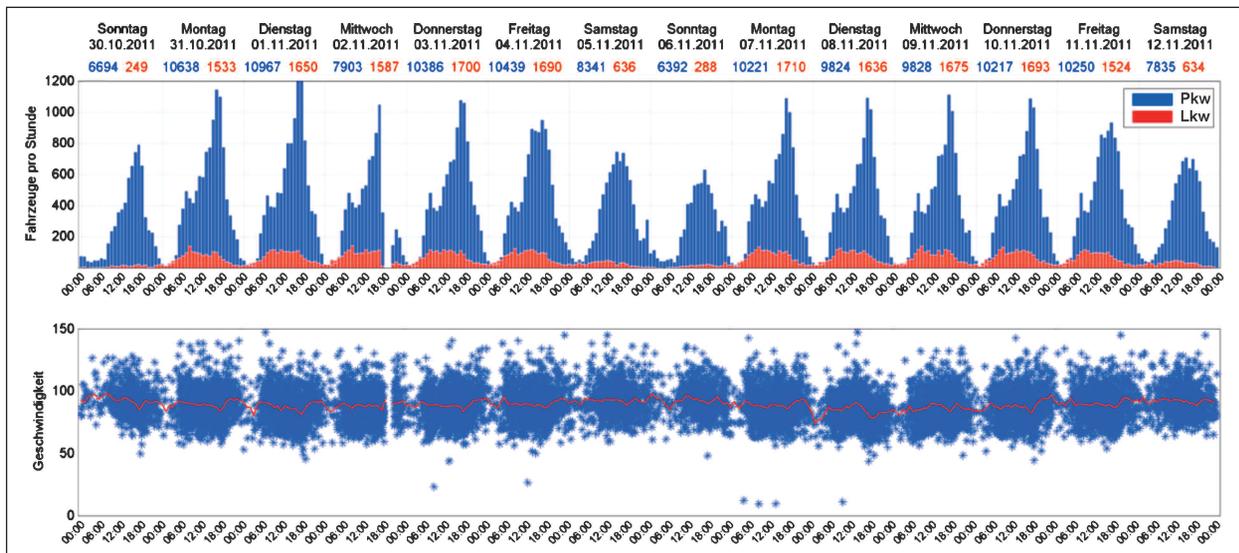


Bild 28: Auszug der Fahrzeuganzahl in Richtung Würzburg

fließenden Verkehr zur morgendlichen Rushhour hin.

Im Gegensatz zum Pkw-Verkehrsaufkommen, welches deutlich den Pendlerstrom widerspiegelt, zeigt der Schwerlastverkehr unabhängig von der Verkehrsrichtung sein Maximum zwischen 8 und 9 Uhr morgens, wobei das Verkehrsaufkommen des Schwerlastverkehrs zwischen 7 und 18 Uhr wesentlich ausgeglichener ist und nicht so starken Schwankungen unterliegt wie der Pkw-Verkehr.

Auch im Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Gesamtverkehrsaufkommens (vgl. Bild 29 und Bild 30) zeigen sich anhand der dargestellten Erfassungszeiträume sowohl für die Wochenbetrachtung als auch für die einzelnen Wochentage charakteris-

tische Verläufe, wobei der Verlauf der einzelnen Wochen des dargestellten Zeitraums in Richtung Würzburg nahezu deckungsgleich ist.

Vorhandene Ausreißer und Unstetigkeitsstellen in der grafischen Darstellung der Verkehrsdaten begründen sich im Wesentlichen auf temporären Messabweichungen des Sensorsystems oder auf Serviceeinsätzen vor Ort, da das System während der gesamten Projektlaufzeit immer weiterentwickelt wurde und sowohl softwareseitig wie auch firmwareseitig neue Ansätze und Algorithmen getestet wurden.

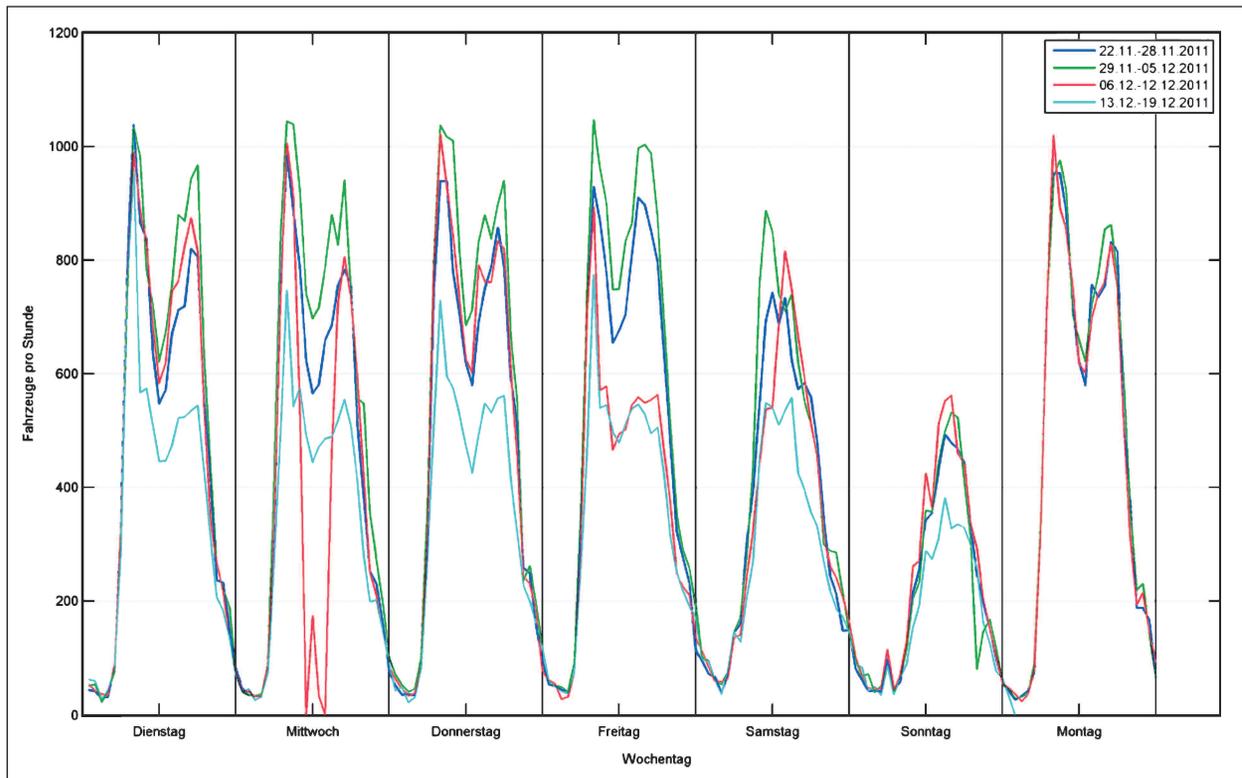


Bild 29: Gesamt-Verkehrsaufkommen im Wochenvergleich Richtung Fulda (22.11.-19.12.)

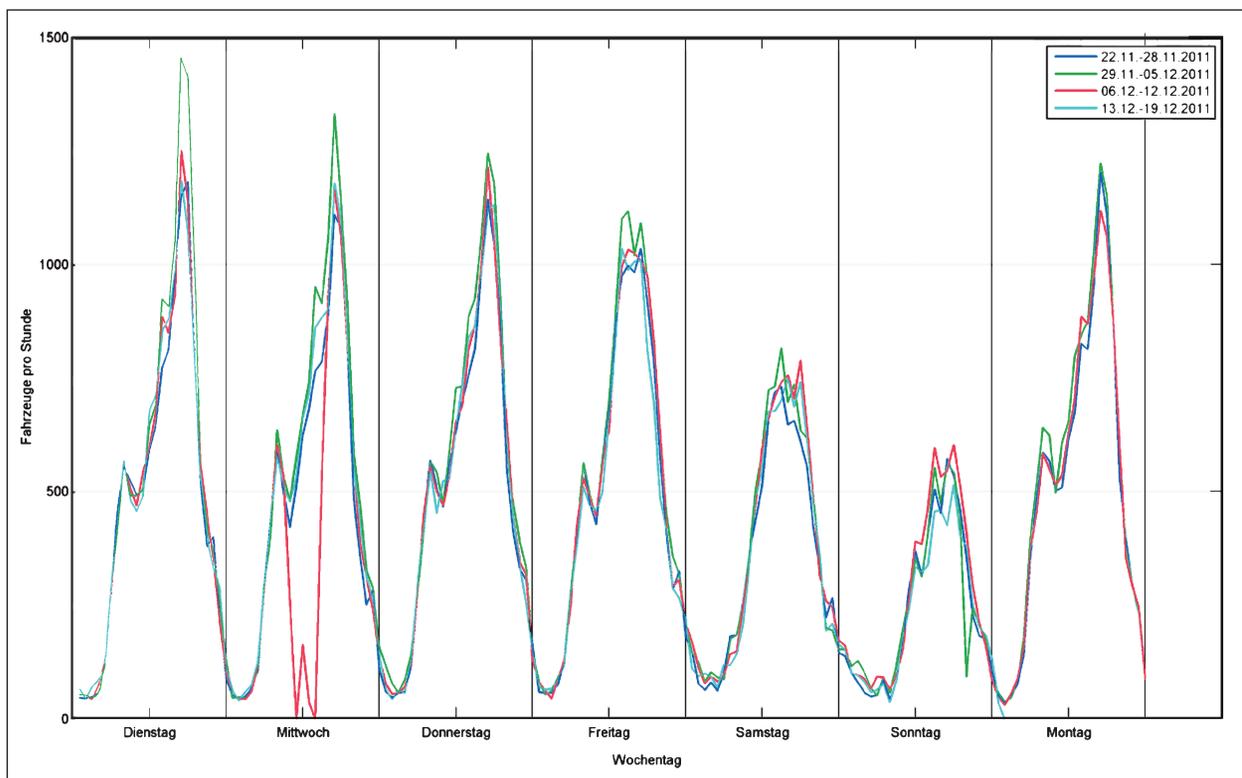


Bild 30: Gesamt-Verkehrsaufkommen im Wochenvergleich Richtung Würzburg (22.11.-19.12.)

6.3 Verkehrszählung und Achslastwägung aus BrückenKennwerten

Die Ergebnisse der Fahrzeugerkennung und Achslastermittlung werden in einer in Kapitel 4.12 beschriebenen Struktur für jede Fahrtrichtung getrennt gespeichert und zur weiteren Auswertung zur Verfügung gestellt. Ein Auszug aus der verwendeten Datei, die die Erfassungsdaten enthält, ist in Anhang D dargestellt.

Die erfassten Verkehrsdaten werden nachfolgend hinsichtlich folgender Punkte ausgewertet:

- Fahrzeuganzahl pro Tag,
- durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr (DTV-SV, bezogen auf Montag bis Freitag, Montag bis Sonntag sowie Samstage, Sonntage und Feiertage),
- Verkehrszusammensetzung (Anteil definierter Fahrzeugtypen am Gesamtverkehr).

Die Auswertung der erfassten Fahrzeugdaten erfolgte während der Testphase nicht in Echtzeit vor Ort, sondern im Nachgang. Die verwendeten Auswerteverfahren (Zählung, Mittelwertbildung, Klassierung) legen aber als Softwaremodule vor.

In den Diagrammen (Bilder 31 bis 33) sind die ermittelten Tageswerte der Verkehrsstärke (Schwerverkehr, Fahrzeuge pro 24 h) für die beiden Fahrtrichtungen getrennt (Bild 31 und Bild 32) und den Gesamtquerschnitt (Bild 33) dargestellt. Grundlage

der Fahrzeugidentifizierung (Fahrzeugtyp) und der Bestimmung der Achslasten und Gesamtgewichte sind die vom Traffic-Sensor als Lkw identifizierte Fahrzeuge. Diese Anzahl wird in den Diagrammen in der „Gesamthöhe“ der Balken wiedergespiegelt. Eine geringe Anzahl der vom Traffic-Sensor erkannten Fahrzeuge kann nicht im Algorithmus für die Fahrzeugtypenidentifizierung und Gesamtgewichtsbestimmung verarbeitet werden, weil während der notwendigen Unterbrechungen zur Abspeicherung der Daten keine BrückenKennwerte vorliegen. Diese Anzahl ist in den Diagrammbalken als weißer Abschnitt (Bezeichnung „Rest (AW TS)“) gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf der Fahrzeugerkennung konnten für einen gewissen Anteil der vom Traffic-Sensor identifizierten Lkw anhand der Messungen am Fahrbahnübergang keine Achsen erkannt werden. Der Anteil dieser Fahrzeuge an der Gesamtzahl ist in den Diagrammen eingetragen und mit „Rest (AW BUW)“ bezeichnet. Für Fahrzeuge mit nur einer erkannten Achse wurde die Typennummer -1 verwendet und in den Diagrammen mit der Bezeichnung „Typ -1“ berücksichtigt. Die Fahrzeuge, für die anhand der Achskonfiguration (Zahl und Abstände) keine Typenzuordnung entsprechend der Tabelle im Anhang B möglich war und die daher als „Typ 0“ identifiziert wurden, sind in den Diagrammen aufgeführt. Hierbei handelt es sich aufgrund der verwendeten Wertebereiche der Achsabstände für die Typenzuordnung um Fahrzeuge mit 5 oder mehr erkannten Achsen. Abschließend ist die Anzahl der Fahrzeuge mit Typenzuordnung „Typ 8 bis 122“ in den Diagrammen auf-

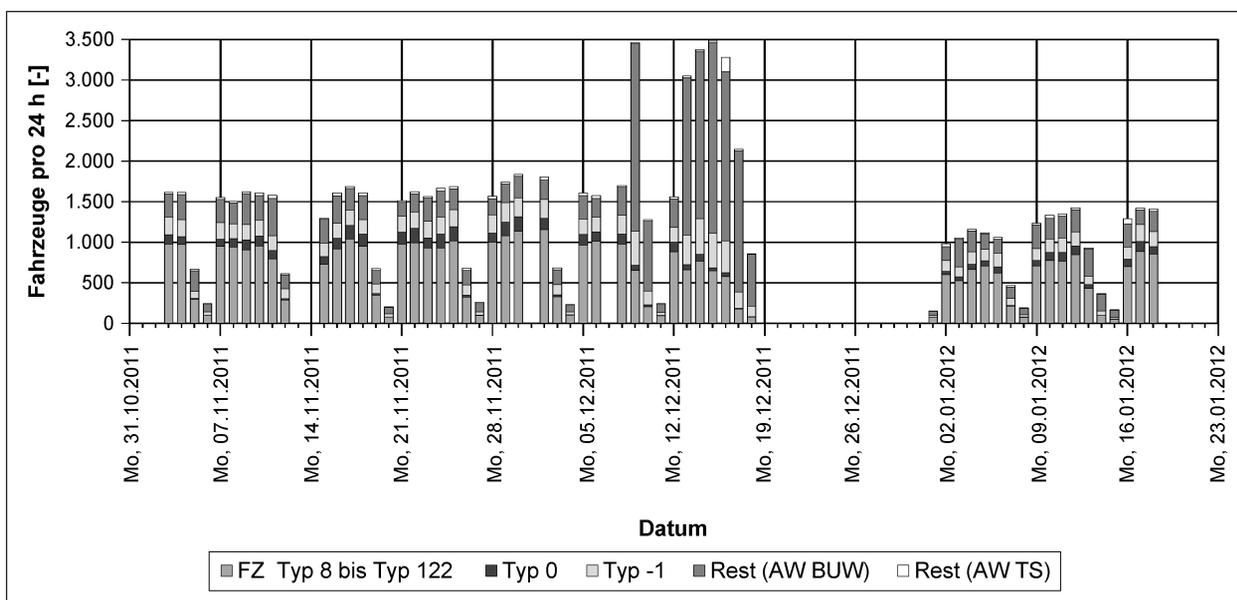


Bild 31: Tageswerte der Verkehrsstärke Schwerverkehr (FZ pro 24 h) für den Zeitraum November 2011 bis Januar 2012, Fahrtrichtung Fulda

geführt. An den Tagen, für die in den Diagrammen keine Balken eingetragen sind, lagen entweder keine Daten (19.12.2011 bis 31.12.2011) vor oder es wurde kein kompletter Tag erfasst.

Aufbauend auf den in Bild 33 dargestellten Tageswerten der Verkehrsstärke für den Gesamtquerschnitt wurden Werte des durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrs (DTV-SV) für jeden der drei berücksichtigten Monate ermittelt. In Bild 34 sind diese Werte grafisch dargestellt. Zunächst wurde zwischen dem durchschnittlichen täglichen Verkehr

an den Tagen Montag bis Freitag („DTV-SV Mo-Fr“), an allen Tagen („DTV-SV Mo-So“) und an Samstagen, Sonntagen und Feiertagen („DTV-SV Sa, So, FT“) unterschieden. In anderen Auswertungen wird zum Teil auch eine davon abweichende Differenzierung zwischen Werktagen (Montag bis Samstag) und Sonn- und Feiertagen vorgenommen. Anhand des in den dargestellten Bildern ersichtlichen Wochenganges (starker Abfall der Zahl an Sonntagen und Samstagen) erscheint die hier verwendete Differenzierung aber sinnvoller. Des Weiteren zeigt sich in den Bildern oben der ver-

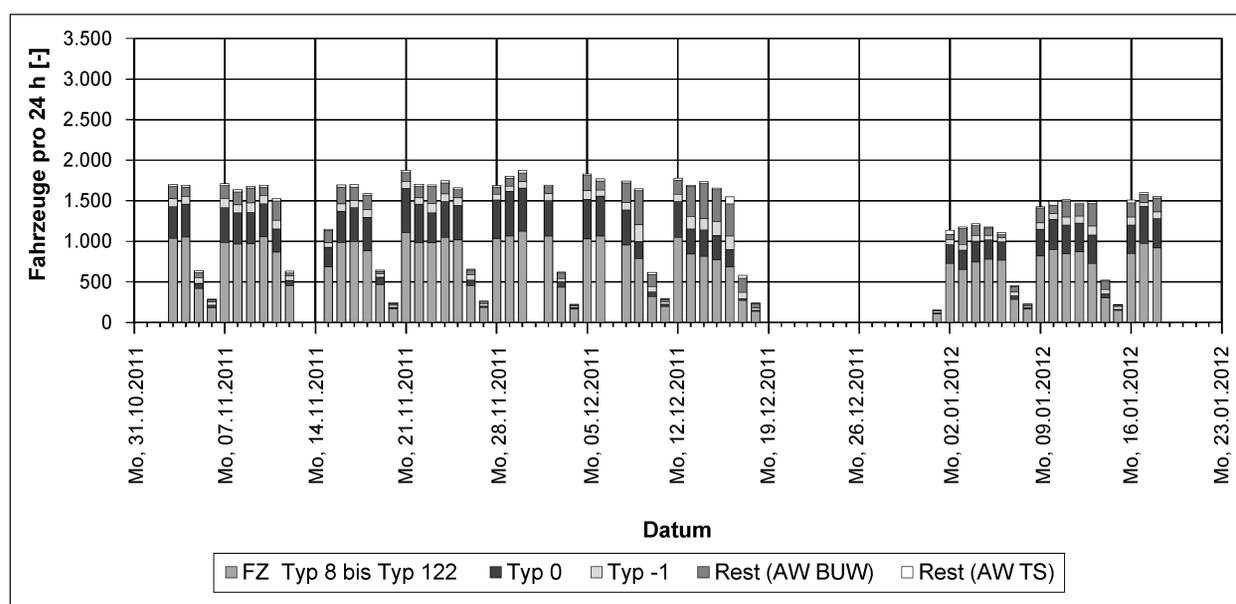


Bild 32: Tageswerte der Verkehrsstärke Schwerverkehr (FZ pro 24 h) für den Zeitraum November 2011 bis Januar 2012, Fahrtrichtung Würzburg

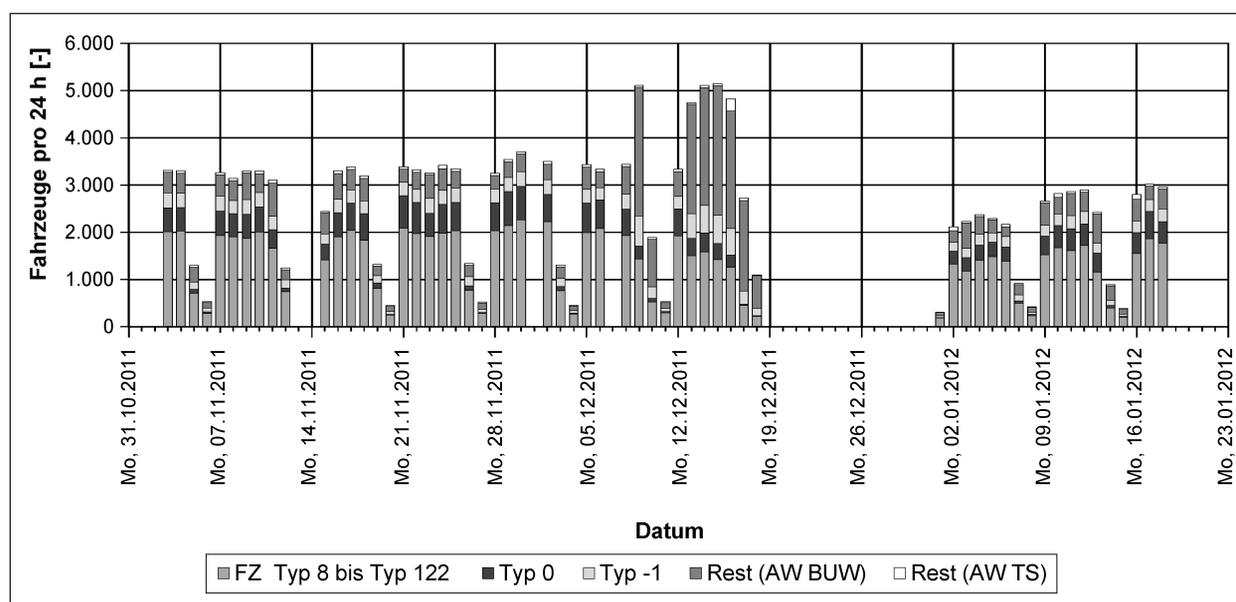


Bild 33: Tageswerte der Verkehrsstärke Schwerverkehr (FZ pro 24 h) für den Zeitraum November 2011 bis Januar 2012, Gesamtquerschnitt

gleichsweisse hohe Anteil von Fahrzeugen ohne Typenzuordnung (Typ 0) und derer mit nur einer erkannten Achse (Typ -1). Es ist davon auszugehen, dass es sich bei den als „Typ 0“ identifizierten Fahrzeugen zu einem wesentlichen Anteil und bei den als „Typ -1“ identifizierten Fahrzeugen zu einem nicht näher bestimmbar Anteil um Lkw-Fahrzeuge handelt. Vor diesem Hintergrund sind in Bild 34 drei verschiedene Varianten der DTV-SV-Werte dargestellt. Bild 34a) beinhaltet nur Fahrzeuge mit erfolgreicher Typenzuordnung (Typ 8 bis 122). Die Berücksichtigung von Fahrzeugen des „Typs 0“ in Bild 34b) führt zu einem deutlichen Anstieg der DTV-SV Werte, der in Bild 34c) durch den zusätz-

lichen Ansatz der Fahrzeuge des „Typs -1“ noch etwas fortgesetzt wird. Der Vergleich mit vorliegenden Daten aus einer Dauerzählstelle in der Nähe der hier untersuchten Brücke (Messstelle Löschenrod, DTV-SV Mo-So 2.506, Daten aus 2009, aus [4]) zeigt, dass sich die ermittelten DTV-SV-Werte mit Berücksichtigung der nicht vollständig erkannten Fahrzeuge in die Daten der Dauerzählstelle einordnen.

In Bild 35 ist der Anteil der einzelnen Fahrzeugtypen aus allen erkannten Fahrzeugen (mit erfolgreicher Typenzuordnung) für den Gesamtquerschnitt bezogen auf die Tage Montag bis Freitag

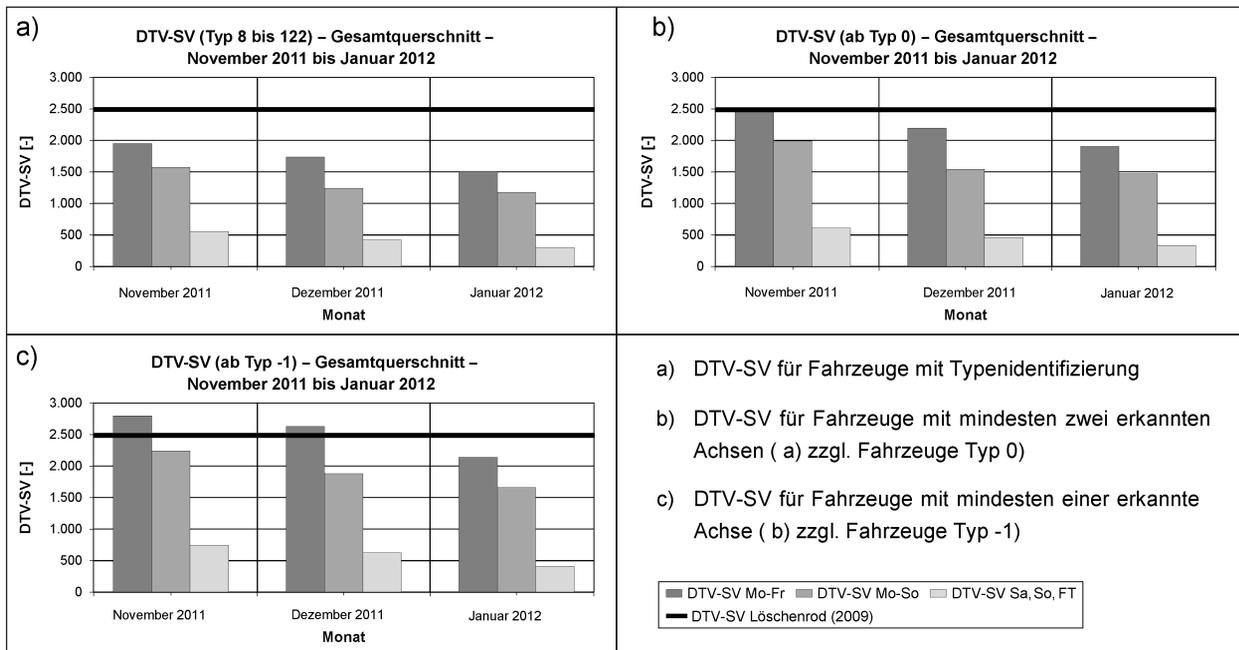


Bild 34: Ermittelte DTV-SV-Werte für den Gesamtquerschnitt

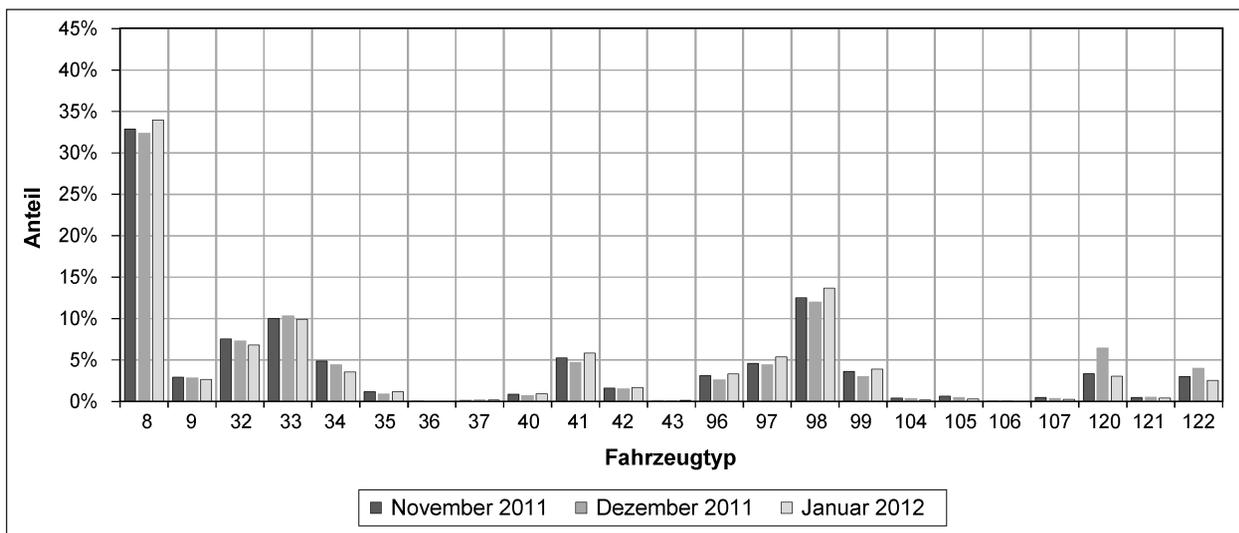


Bild 35: Detaillierte Verkehrszusammensetzung (Typ 8 bis 122) Mo-Fr – Gesamtquerschnitt

dargestellt. Hier zeigt sich ein deutlicher Anteil des Fahrzeugtyps 8 (zweiachsiger Lkw ohne Anhänger). Der an anderen Messstellen, jedoch im Autobahnnetz, sehr häufig auftretende Fahrzeugtyp 98 (Sattelzug mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsigem Auflieger) tritt hier nur mit einem Anteil von rund 12 % auf, ist aber dennoch nach dem Fahrzeugtyp 8 das zweithäufigste Fahrzeug.

6.4 Vergleich der ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen mit vorliegenden Daten

Die Festlegung der Ziellastniveaus in der Nachrechnungsrichtlinie (vgl. Kapitel 4.5 und Kapitel 4.6) beruht auf in [7] durchgeführten Untersuchungen der Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehrs (Schwerverkehr) verschiedener Charakteristiken. Diese Charakteristiken unterscheiden sich dabei neben der Verkehrszusammensetzung in den Verteilungsfunktionen der Gesamtgewichte verschiedener definierter Fahrzeugtypen. In Bild 36 sind die ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 98 für die beiden Fahrrichtungen den für die o. g. Untersuchungen verwendeten Verteilungsfunktionen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt, dass die hier ermittelten Verteilungen qualitativ zwischen den verwendeten Verteilungen der Verkehrscharakteristik „GE“ (große Entfernung) und „ME“ (mittlere Entfernung) liegen. Die Werte für die Fahrtrichtung Fulda ähneln dabei mehr der Ausgangsverteilung für GE und die der Fahrtrichtung Würzburg mehr der Ausgangsverteilung für ME. In analoger Weise sind in Bild 37 die Gesamtgewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 41 gegenübergestellt. Dieser Fahrzeugtyp wurde für den Vergleich gewählt, da er in den

Untersuchungen in [7] zur Abbildung von Lkw mit Anhänger verwendet wurde und sich in anderen Verkehrserfassungen als relativ häufiges Fahrzeug zeigt. In den Erfassungen hier ist der Fahrzeugtyp 33 aber etwas häufiger. Für den Fahrzeugtyp 41 zeigt sich analog zu Fahrzeugtyp 98 eine qualitative Einordnung der am Bauwerk ermittelten Ergebnisse zwischen den Annahmen für GE und ME, wobei auch hier wieder die Daten für die Fahrtrichtung Fulda mehr zu GE und die für die Fahrtrichtung Würzburg mehr zu ME tendieren.

Eine vergrößerte Darstellung dieser Abbildungen ist zusammen mit Vergleichen für drei weitere Fahrzeugtypen im Anhang D enthalten. Abgesehen vom Fahrzeugtyp 8 (zweiachsiger Lkw ohne Anhänger) zeigen sich analoge Tendenzen. Während sich für die Fahrtrichtung Würzburg die Gesamtgewichte der Fahrzeuge, die als Typ 8 (zweiachsiger Lkw ohne Anhänger) identifiziert wurden, im Bereich der Annahmen für GE, ME und OV bewegen, sind diese für die Fahrtrichtung Fulda häufig deutlich kleiner.

Während in den oben dargestellten Gesamtgewichtsverteilungen ausgewählter Fahrzeugtypen lediglich eine qualitative Gegenüberstellung möglich ist, kann anhand einiger ermittelter Verkehrsdaten ein detaillierter Vergleich erfolgen. In Tabelle 4 sind die Mittelwerte (arithmetisches Mittel) der Gesamtgewichte und der Achslasten ausgewählter Fahrzeugtypen aufgeführt und den in [7] verwendeten Daten (basierend auf anderen Verkehrserfassungen) gegenübergestellt.

Der weiß hinterlegte Bereich in Tabelle 4 enthält die Vergleichsdaten für GE, ME und OV aus [7]. Der blau hinterlegte Bereich (hell- und dunkelblau) enthält die Ergebnisse aus der Analyse der erfassten Fahrzeuge in Fahrtrichtung Fulda. Aus den berech-

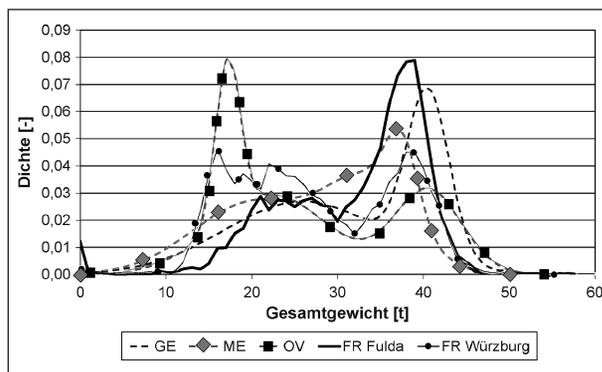


Bild 36: Vergleich der ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 98 mit den Annahmen für die Ziellastniveaus der Nachrechnungsrichtlinie

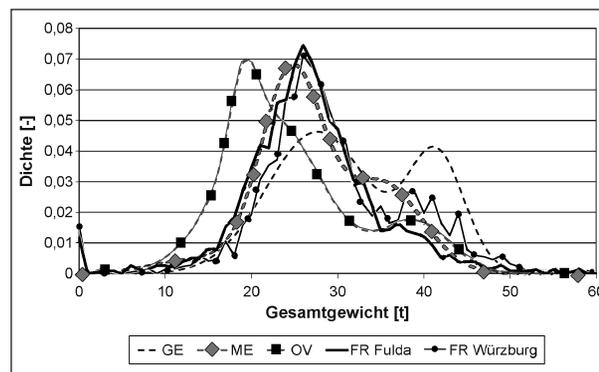


Bild 37: Vergleich der ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps 41 mit den Annahmen für die Ziellastniveaus der Nachrechnungsrichtlinie

Datengrundlage Nachrechnungsrichtlinie													
Fahrzeugtyp	Mittelwert Gesamtgewicht [kN]			Achslastverteilung									
	GE	ME	OV	A1	A2	A3	A4	A5					
8	76,0	83,2	76,3	44,9%	55,1%								
9	191,6	191,6	194,7	34,2%	38,1%	27,7%							
41	319,5	276,1	247,1	20,9%	25,8%	16,1%	19,5%	17,7%					
97	192,8	217,9	166,1	30,6%	30,9%	19,1%	19,4%						
98	315,0	277,9	268,3	20,8%	28,1%	17,0%	17,0%	17,1%					
Ergebnisse FR Fulda													
Fahrzeugtyp	Mittelwert Gesamtgewicht [kN]			Achslastverteilung					Mittelwert Achslast [kN]				
				A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
8	66,3			48,4%	51,4%				32,1	34,1			
9	178,0			33,3%	39,3%	27,5%			59,2	70,0	48,9		
41	299,9			20,2%	27,4%	16,1%	19,6%	16,7%	60,5	82,2	48,4	58,8	50,0
97	200,1			31,7%	31,1%	19,1%	18,0%		63,4	62,2	38,3	36,1	
98	324,5			18,3%	28,2%	18,8%	17,5%	17,2%	59,3	91,5	61,0	56,9	55,7
Fahrzeugtyp	Differenz zu Vergleichsdaten [kN]			Differenz zu Vergleichsdaten [% -Punkte]									
	GE	ME	OV	A1	A2	A3	A4	A5					
8	-9,7	-16,9	-10,0	+3,5%	-3,7%								
9	-13,6	-13,6	-16,7	-0,9%	+1,2%	-0,2%							
41	-19,6	+23,8	+52,8	-0,7%	+1,6%	0,0%	+0,1%	-1,0%					
97	+7,3	-17,8	+34,0	+1,1%	+0,2%	0,0%	-1,4%						
98	+9,5	+46,6	+56,2	-2,5%	+0,1%	+1,8%	+0,5%	+0,1%					
Ergebnisse FR Würzburg													
Fahrzeugtyp	Mittelwert Gesamtgewicht [kN]			Achslastverteilung					Mittelwert Achslast [kN]				
				A1	A2	A3	A4	A5	A1	A2	A3	A4	A5
8	79,3			46,2%	53,8%				36,6	42,7			
9	186,4			32,2%	41,7%	26,1%			60,0	77,7	48,7		
41	273,9			22,4%	28,6%	16,3%	17,5%	15,3%	61,3	78,2	44,6	47,9	42,0
97	199,9			31,1%	31,3%	19,4%	18,2%		62,2	62,6	38,7	36,4	
98	278,4			22,1%	29,9%	16,8%	15,8%	15,4%	61,6	83,2	46,8	44,0	42,8
Fahrzeugtyp	Differenz zu Vergleichsdaten [kN]			Differenz zu Vergleichsdaten [% -Punkte]									
	GE	ME	OV	A1	A2	A3	A4	A5					
8	+3,3	-3,9	+3,0	+1,3%	-1,3%								
9	-5,2	-5,2	-8,3	-2,0%	+3,6%	-1,6%							
41	-45,6	-2,2	+26,8	+1,5%	+2,8%	+0,2%	-2,0%	-2,4%					
97	+7,1	-18,0	+33,8	+0,5%	+0,4%	+0,3%	-1,2%						
98	-36,6	+0,5	+10,1	+1,3%	+1,8%	-0,2%	-1,2%	-1,7%					

Tab. 4: Detaillierter Ergebnisvergleich

neten Mittelwerten der Gesamtgewichte und der Achslasten wurden die Werte der Achslastverteilung bestimmt. Für den Fahrzeugtyp 98 liegt bei den Verkehrsdaten der Mittelwert etwas über dem für Verkehrsart GE. Ursache hierfür ist die größere Häufigkeit von Gesamtgewichten im Bereich um 40 t (vgl. Gesamtgewichtsverteilung in Bild 36). Für den Fahrzeugtyp 41 liegt der Mittelwert der Gesamtgewichte zwischen den Daten für GE und ME. Der olivgrün hinterlegte Bereich (hell und dunkel) in Tabelle 4 enthält die Ergebnisse für die Auswertung der Fahrzeugdaten in Fahrtrichtung Würzburg. Analog zu den oben beschriebenen und im Anhang D dargestellten Gesamtgewichtsverteilungen zeigen sich hier Unterschiede der errechneten Mittel-

werte der Gesamtgewichte im Vergleich zu den Daten in [12] und den Verkehrsdaten in Fahrtrichtung Fulda. Für die Fahrzeugtypen 8 und 9 sind die Mittelwerte der Gesamtgewichte größer als für Fahrtrichtung Fulda, für die Typen 41 und 98 sind diese kleiner.

Die ermittelten Achslastverteilungen (mittlere Achslasten dividiert durch mittlere Gesamtgewichte) folgen in der Tendenz den Vergleichswerten aus [7]. Abweichungen zu diesen Vergleichswerten sind in der Tabelle als Prozentpunkt (Werte der Achslastverteilung FR Fulda bzw. FR Würzburg minus Wert der Achslastverteilung Vergleichsdaten) aufgeführt. Die Abweichungen liegen maximal bei

+3,5 %-Punkten bzw. -3,7 %-Punkten und können damit als gering eingeschätzt werden.

6.5 Einschätzung der Genauigkeit der Gesamtgewichte und Achslasten

Zur Beurteilung der Genauigkeit ermittelter Gesamtgewichte und Achslasten werden im Folgenden die COST323-Empfehlungen (in [1]) verwendet. Die Empfehlungen dienen der Beurteilung der Verwendung der ermittelten Gewichte im rechtlichen Sinn. Die Absicht des Projektes ist eine Verwendung zur Ableitung von Einwirkungen auf Bauwerke.

In COST323 werden Genauigkeitsklassen A-E definiert. Diesen sind Toleranzgrenzen zugeordnet. Es wird die Zuordnung der Toleranzen der relativen Messfehler für einzelne Messgrößen zu den Genauigkeitsklassen nach Tabelle 5 vorgenommen.

Die Genauigkeitsanforderungen stehen in engem Zusammenhang mit dem jeweils gewünschten Einsatzgebiet.

Für die Verkehrsüberwachung und strafrechtliche Verfolgung sind Systeme der Klassen A und in bestimmten Fällen B+ direkt geeignet. Systeme der Klassen B und C können zur Vorauswahl von Fahrzeugen für eine anschließend statische Wägung dienen.

Für den Bereich Infrastruktur/Bautechnik, z. B. zur Ableitung der maßgebenden Verkehrsbelastung für Brücken, können nach [1] Wiegedaten mit einem akzeptierten Toleranzintervall δ von maximal 15 % entsprechend der Genauigkeitsklasse C(15) verwendet werden.

Zur Kontrolle der ermittelten Gewichte werden die Messdaten-Zeitverläufe der Kalibrierfahrten heran-

gezogen und die Gesamtgewichte und Achslasten dabei als unbekannte Größen betrachtet. Da während der Kalibrierfahrten die Fahrzeugermittlung aus den Daten der Traffic-Sensoren noch nicht möglich war, ist der Algorithmus zur Fahrzeugerkennung modifiziert worden. Die Daten zur Identifikation eines Fahrzeuges werden allein aus den Dehnungen an der FÜK gewonnen, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird aus der Differenz der Nullstellen der Verdrehungen an den Lagern in der Achse 30 ermittelt.

Die Ermittlung der Genauigkeiten für die Gesamtgewichte und Achslasten erfolgt durch den Vergleich der ermittelten Gewichte mit den aus statischen Achslastwägungen ermittelten Gewichten. Zur Genauigkeitsklassifikation wird für unterschiedliche Genauigkeitsklassen eine Toleranz δ festgelegt, innerhalb welcher der relative Messfehler einer individuellen dynamischen Messung unter Voraussetzung einer von Test- und Umweltbedingungen festgesetzten unteren Vertrauensgrenze liegen darf. Diese unterste Vertrauensgrenze wird beschrieben durch die Wahrscheinlichkeit π_0 , welche als Funktion des Stichprobenumfangs n und der jeweiligen Test- und Umweltbedingung festgelegt wird. Für jede Stichprobe relativer Messfehler mit dem Umfang n , dem Mittelwert m und der Standardabweichung s lässt sich die Wahrscheinlichkeit π ermitteln, mit der ein individueller Messfehler innerhalb eines Intervalls $[\pm\delta, -\delta]$ liegt. Auf der gleichen Grundlage kann für jede Stichprobe der Wert δ_{\min} von δ ermittelt werden, für den $\pi = \pi_{\min} = \pi_0$ ist. Das ermittelte π_{\min} muss kleiner sein als das für die entsprechende Genauigkeitsklasse vorgegebene δ , um eine Einordnung in die entsprechende Klasse zu ermöglichen (aus [1]).

Es wurden für die Ermittlung der Genauigkeiten dieselben Messwerte wie zur Kalibrierung des Berech-

Messgröße		Genauigkeitsklasse						
		Toleranzgrenze δ (%)						
		A(5)	B+(7)	B(10)	C(15)	D+(20)	D(25)	E
1	Gesamtgewicht	5	7	10	15	20	25	> 25
2	Achslast							
2.1	Einzelachse	8	11	15	20	25	30	> 30
2.2	Achsgruppe	7	10	13	18	23	28	> 28
2.3	Achse einer Achsgruppe	10	14	20	25	30	35	> 35

Tab. 5: Toleranzgrenzen (δ in %) der Genauigkeitsklassen für das dynamische Wiegen von Fahrzeugen während der Fahrt (COST323, 1999) aus [1]

nungsmodells verwendet. Dies wird bei der Beurteilung berücksichtigt, indem gemäß [1] die Toleranzwerte der jeweiligen Klasse δ mit einem Faktor $k = 0,8$ multipliziert werden.

Für die Bestimmung der Genauigkeitsklassifikation werden als Test- und Umweltbedingungen berücksichtigt:

Die umweltbezogene Wiederholbarkeit erfüllt die Bedingungen der Gruppe I (Testperiode ist auf wenige Stunden eines einzelnen Tages beschränkt).

Da für die Kalibrierfahrten zwei unterschiedliche Fahrzeuge mit unterschiedlicher Beladung jeweils mit verschiedenen Geschwindigkeiten über die Brücke fahren, wird die Auswertung für die Klasse „R1 – Limitierte Vergleichbarkeitsbedingungen“ durchgeführt. Zum Vergleich wird die Auswertung für jedes Fahrzeug getrennt wiederholt. Hierbei wird die Klasse „r1-“ volle Wiederholbarkeit der Testbedingungen eingestuft.

Die Ergebnisse für die Auswertung der Gesamtgewichte und der Achslasten sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Die Bezeichnungen entsprechen [1] und sind oben erläutert.

Für die Gesamtgewichte liegen die mittleren relativen Messfehler über alle Fahrzeuge bei 6 % bei einer Standardabweichung von 3 %. Das bedeutet nach [1] die Klasse C(15). Das minimale Vertrauensintervall δ_{\min} ergibt sich bei Betrachtung aller Fahrzeuge zu 11,1 %. Zur Einordnung in die Klasse C(15) ist unter Berücksichtigung des Faktors $k = 0,8$ ein $\delta_{\min} < 12$ % erforderlich. Betrachtet man die erreichten Genauigkeiten der beiden betrachteten Fahrzeugtypen einzeln, so zeigt sich, dass für das 2-Achs-Fahrzeug mit einem δ_{\min} von 7,7 % eine Genauigkeitsklasse B(10) ($\delta_{\min} < 8$ %) erreicht werden kann, wohingegen für das 5-Achs-Fahrzeug sich ein δ_{\min} von 10,5 % ergibt.

Die relativen Messfehler der ermittelten Gesamtgewichte (Tabelle 6) lassen sich durch Weiterent-

wicklungen der Algorithmen zur Gesamtgewichtsbestimmung minimieren.

Genauigkeitssteigerungen der ermittelten Fahrzeuggesamtgewichte sind möglich durch die Einbeziehung der Querposition und der Fahrzeuggeschwindigkeiten in den vorhandenen Optimierungsalgorithmus.

Die Achslasten werden durch die prozentuale Aufteilung des Gesamtgewichts auf die Achsen ermittelt. Die prozentuale Zuordnung wird den Dehnungsdifferenzen am Fahrbahnübergang entnommen. Der ausgewiesene relative Messfehler bezieht sich somit auf die Dehnungsdifferenzen am Fahrbahnübergang. Die Standardabweichung für die Achslasten in Tabelle 6 zeigt, dass dieser Weg nicht akzeptabel ist. Die Streuungen sind nicht vertretbar. Die Dehnungen an den Traversen des Fahrbahnübergangs sind wesentlich durch Geschwindigkeit des Fahrzeugs, Querposition auf dem Fahrbahnübergang, Achsfolge und Reifentyp beeinflusst und streuen bei mehreren Überfahrten desselben Fahrzeugs erheblich. Während der Fahrbahnübergang eine gute Möglichkeit der Erkennung von Fahrzeugachsen darstellt, können die Dehnungen mit dem heutigen Wissensstand zu Fahrbahnübergängen nicht zur Bestimmung der Achslasten herangezogen werden.

Für die Weiterentwicklung des Systems müssen für die Bestimmung der Achslasten andere Möglichkeiten zur Bestimmung der Achslasten gefunden werden. Ein Ansatz ist die Ermittlung und Auswertung geeigneter Bauwerkskenngrößen, welche nicht so sensibel auf die für den Fahrbahnübergang genannten Einflüsse reagieren. Ein zweiter Weg ist die Aufteilung der Gesamtgewichte auf die einzelnen Achsen analog der Daten in [7] (vgl. Gegenüberstellung mit Daten des Kalibrierfahrzeugs in Tabelle 7). Mit diesen Werten wird die Berechnung der Genauigkeit wiederholt. Das Ergebnis ist in Tabelle 8 dargestellt.

Kriterium	n	m	s	π_0	δ	π	δ_{\min}	π_{\min}	Klasse	Bemerkung
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	
GG	10	-3,52	1,66	95,0	10	99,5	7,7	95,0	B(10)	2-Achs-FZ
GG	10	-8,31	0,88	95,0	15	100,0	10,5	95,0	C(15)	5-Achs-FZ
GG	20	-5,91	2,77	91,0	15	99,5	11,1	91,0	C(15)	2+5-Achs-FZ
AL	50	-8,87	13,91	98,1	30	88,1	42,7	98,1	E(> 30)	5-Achs-FZ
AL	20	-5,73	11,84	97,2	30	92,6	36,0	97,2	E(> 30)	2-Achs-FZ

Tab. 6: Genauigkeitsklassifikation der Messungen für Gesamtgewichte und Achslasten

Prozentuale Aufteilung der Gesamtgewichte auf die Achsen – 5-Achs-FZ					
Achse	1	2	3	4	5
Kalibrierfahrzeug	15,4	21,6	21,1	21,1	20,8
aus [7]	20,8	28,1	17	17	17,1
Prozentuale Aufteilung – 2-Achs-FZ					
Achse	1	2			
Kalibrierfahrzeug	45,0	55,0			
aus [5]	44,9	55,1			

Tab. 7: Prozentuale Aufteilung des Fahrzeuggesamtgewichtes auf die Achsen für die Kalibrierfahrzeuge und nach [7]

Kriterium	n	m	s	π_0	δ	π	δ_{\min}	π_{\min}	Klasse	Bemerkung
	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	
AL	50	-6,49	23,53	98,1	30	65,6	65,6	98,1	E(> 30)	5-Achs-FZ
AL	20	-4,82	1,61	97,2	10	99,4	8,9	97,2	E(> 30)	2-Achs-FZ

Tab. 8: Genauigkeitsklassifikation der Messungen für Achslasten bei Aufteilung der Fahrzeuggesamtgewichte auf die Achsen nach [7]

Es ist ersichtlich, dass für das 2-Achs-Fahrzeug, bei dem die Aufteilung des Gesamtgewichtes auf die Achslasten dem Durchschnitt entspricht, mit dieser Vorgehensweise eine akzeptable Genauigkeit der Achslasten entsprechend der Klasse B(10) ermöglicht wird.

Das für die Kalibrierfahrten verwendete 5-Achs-Fahrzeug entspricht in der Achslastverteilung nicht den Mittelwerten aus [7]. Deshalb kann die Aufteilung für die tatsächlichen Achslasten des Fahrzeugs keine bessere Genauigkeit erzielen. Für die Weiterentwicklung des Systems sind weitergehende Untersuchungen zur Verbesserung der Bestimmung der Achslasten erforderlich.

6.6 Auswertung des Ziellastniveaus

Die Auswahl des in der Nachrechnungsrichtlinie vorgegebenen Ziellastniveaus erfolgt anhand der objektspezifischen Verkehrszusammensetzung und der objektspezifischen prognostizierten Verkehrsstärke für den Gesamtquerschnitt (DTV-SV). Hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung wird in der Nachrechnungsrichtlinie lediglich zwischen zwei Fahrzeuggruppen unterschieden (Gruppe 1 Lkw ohne Anhänger und Busse, Gruppe 2 Lkw mit Anhänger und Sattelfahrzeuge) und auf dieser Grundlage die Einordnung in der Verkehrsart realisiert. In Bild 38 ist diese vereinfachte Verkehrszusammensetzung für den Gesamtquerschnitt dargestellt. Hieraus kann eine Einordnung

in der Verkehrsart „Mittlere Entfernung“ abgeleitet werden.

Die prognostizierte Verkehrsstärke ist in Bild 39 angeführt. Aufbauend auf den DTV-SV-Werten incl. Berücksichtigung von nicht vollständig erkannten Fahrzeugen und einer anhand vorliegender Verkehrsprognosen ermittelten jährlichen Zuwachsrates (zwei Varianten) ist hier die angenommene zukünftige Verkehrsstärke (20 Jahre) aufgeführt. Für die Ermittlung der verwendeten jährlichen Zuwachsrates (1,145 % p. a. bzw. 2,496 % p. a.) wurde auf die in [16] veröffentlichten Verkehrsprognose für das Jahr 2025 zurückgegriffen. Für den Straßengüterverkehr werden darin folgende Prognosen aufgeführt:

- Verkehrsaufkommen (Mio. t)
 - Straßengüterverkehr gesamt

2004	3.065,5	
2025	3.908,4	(+27 %)
 - Straßengüterfernverkehr

2004	1.450,4	
2025	2.249,1	(+55 %)
- Verkehrsleistung (Mrd. tkm)
 - Straßengüterverkehr gesamt

2004	392,5	
2025	704,3	(+79 %)
 - Straßengüterfernverkehr:

2004	366,5	
2025	675,6	(+84 %).

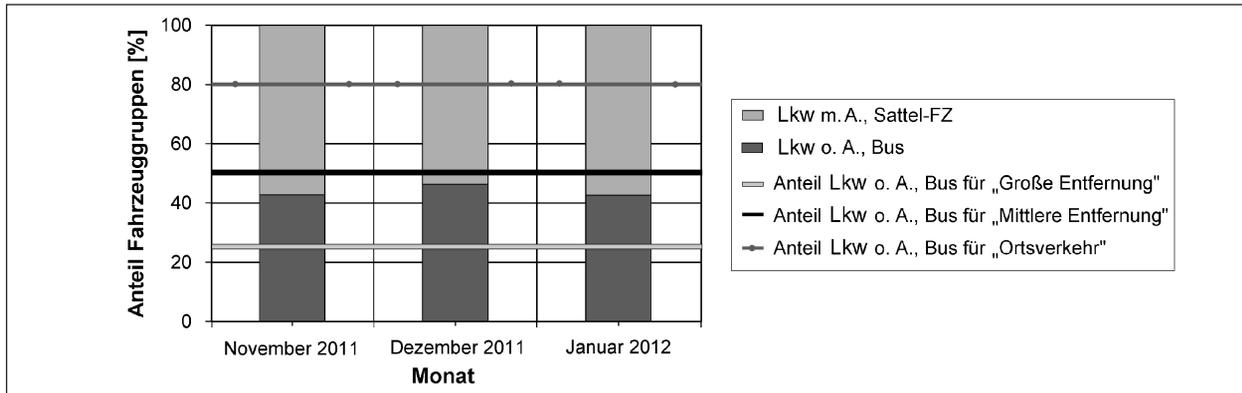


Bild 38: Verkehrszusammensetzung (vereinfachte Gruppeneinteilung) Mo-Fr, Gesamtquerschnitt

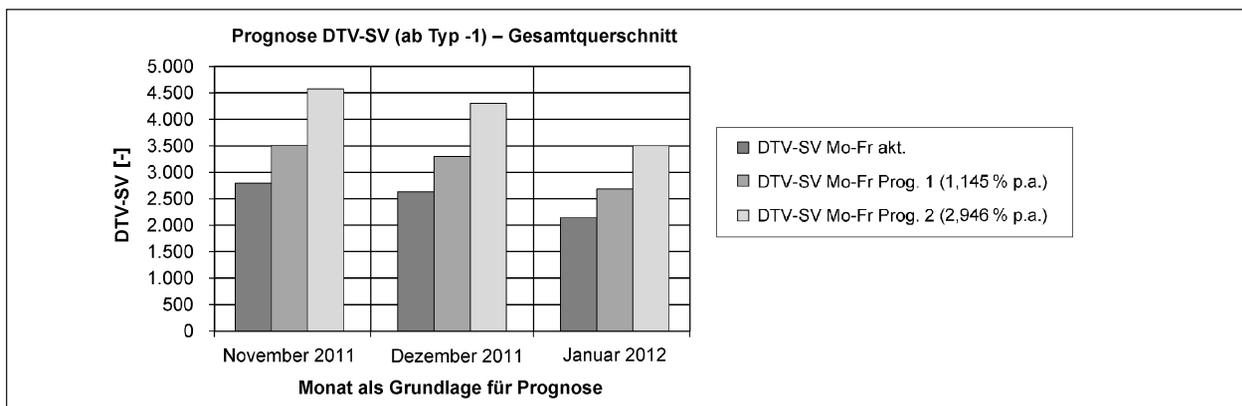


Bild 39: Prognostizierte Verkehrsstärke (DTV-SV)

Verteilt man die angegebenen prozentualen Veränderungen des Verkehrsaufkommens und der Verkehrsleistung auf den Prognosezeitraum (2004 bis 2025), so erhält man einen jährlichen Zuwachs zwischen 1,145 % $((1 + 0,27)^{1/21a} - 1)$ und 2,946 % $((1 + 0,84)^{1/21a} - 1)$. Diese Prognosen beschreiben die Entwicklung des Verkehrsaufkommens in Mio. t (also die transportierte Gütermenge) und der Verkehrsleistung in Mrd. tkm (also das Produkt aus transportierter Gütermenge und mittlerer Transportweite). Aussagen zu einer zukünftigen Verkehrsstärke (DTV-SV) lassen sich daraus nicht direkt ableiten. Ersatzweise wird daher die aktuell ermittelte Verkehrsstärke mit den oben ermittelten jährlichen Zuwächsen erhöht. Verkehrszusammensetzung und prognostizierte Verkehrsstärke führen anhand der Nachrechnungsrichtlinie zum Ziellastniveau BK 60/30.

6.7 Zeitverhalten

Aus den durchgeführten Messungen am Brückenbauwerk liegen unter anderem Zeitverläufe der Verdrehungen (x- und y-Achse) und der Einsenkung der Lager an Achse 30 (West und Ost) vor. Die Zeit-

verläufe wurden durch Frequenzfilterung in die Ursachen Verkehr und Temperatur getrennt und die Zeitverläufe aus Verkehr mit dem in Kapitel 4.8 erläuterten Verfahren ausgewertet und charakteristische Werte (mittlere Wiederkehrperiode 1.000 Jahre) bestimmt. Hierbei wurde zur Analyse des Einflusses des Betrachtungszeitraumes, d. h. der Streuungen der Ergebnisse in Abhängigkeit der Betrachtungszeit, die Gesamtdaten aus dem Messzeitraum von Anfang November 2011 bis Mitte Januar 2012 in Einzelabschnitte von 1 Stunde, 6 Stunden (0 bis 6 Uhr, 6 bis 12 Uhr usw.) und 24 Stunden aufgeteilt und jeder Abschnitt getrennt voneinander ausgewertet.

Ohne statistische Auswertung und Extrapolation zeigen Bild 40 und Bild 41 die absoluten Maximal- bzw. Minimalwerte der Verdrehung um die y-Achse am Lager West für die Stunden-, 6-Stunden- und Tagesdaten in einer Übersicht. Die 6-Stunden-Werte wurden dabei auf der x-Achse bei 3 Uhr, 9 Uhr, 15 Uhr und 21 Uhr eingetragen und die Tageswerte bei 12 Uhr. Daher sind die zueinander gehörenden Maximalwerte (Stundenwerte zu 6-Stunden-Werte, 6-Stunden-Werte zu Tageswert) nicht immer deckungsgleich. In den Stundenwer-

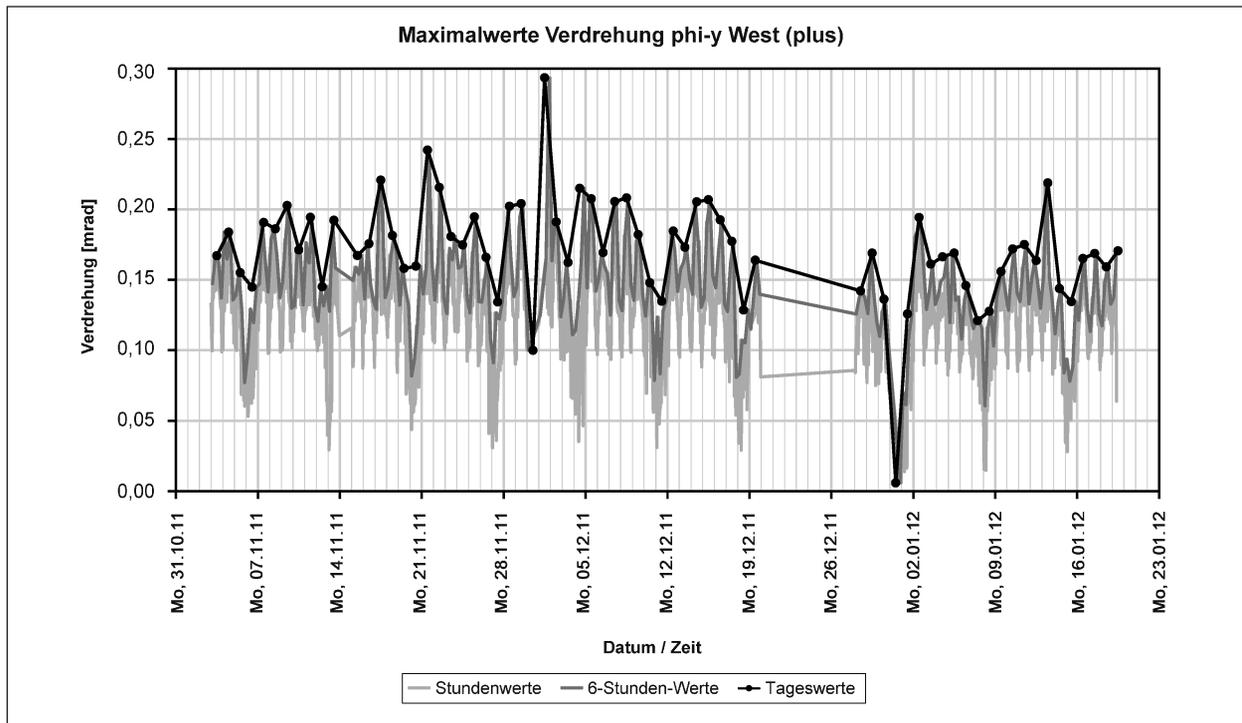


Bild 40: Maximalwerte der Verdrehung phi-y – Lager West, Plusbereich

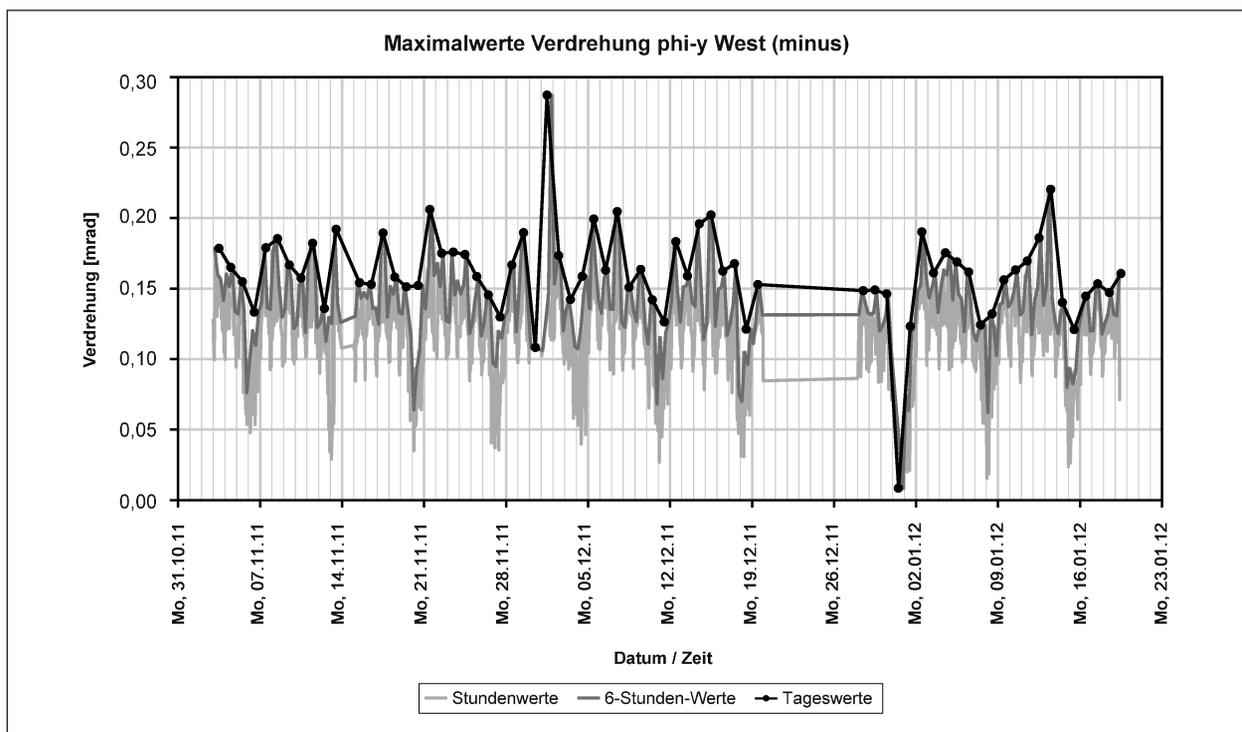


Bild 41: Maximalwerte der Verdrehung phi-y – Lager West, Minusbereich (Absolutwerte)

ten lässt sich deutlich ein Wochengang der Werte erkennen (Samstag, Sonntag die kleineren Werte) während es bei den 6-Stunden-Werten und Tageswerten nicht mehr eindeutig der Fall ist.

In Bild 42 ist zusätzlich der Verlauf der Tagesmaximal- und -minimalwerte der Lufttemperatur aufgetragen, um gegebenenfalls Einflüsse aus temperaturbedingten Steifigkeitsänderungen der Lager zu erkennen. Es ist zu erkennen, dass im Messzeitraum keine extremen Temperaturen vorkamen.

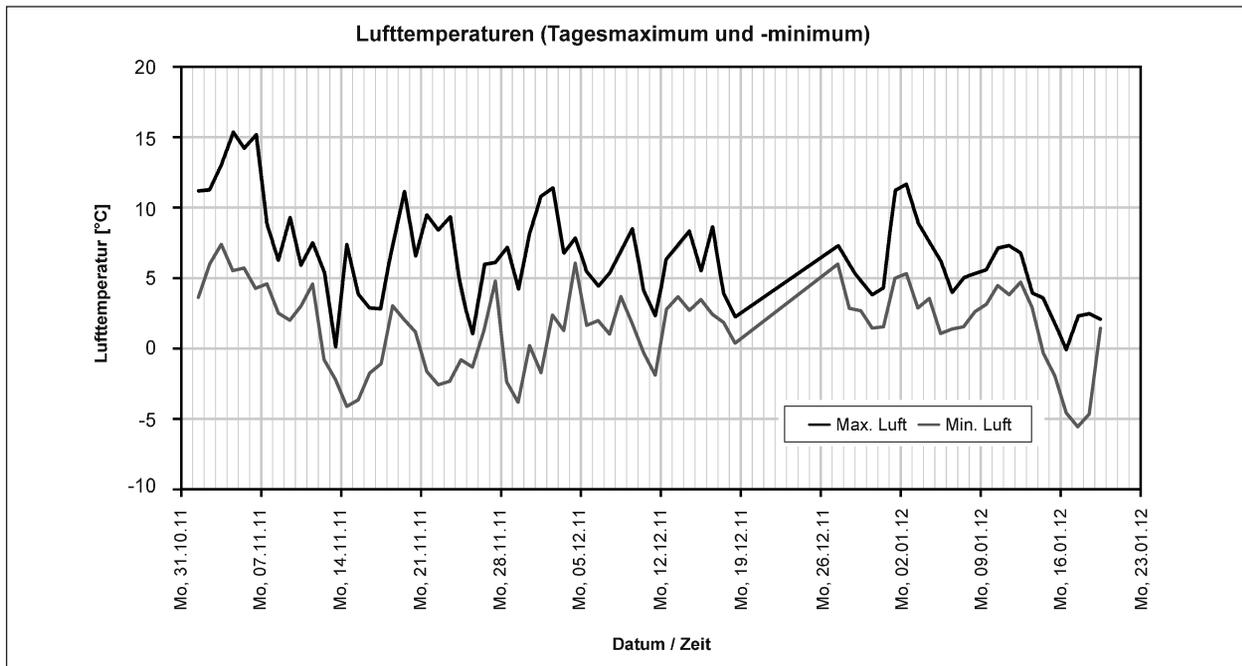


Bild 42: Tagesmaximum und -minimum der Lufttemperatur

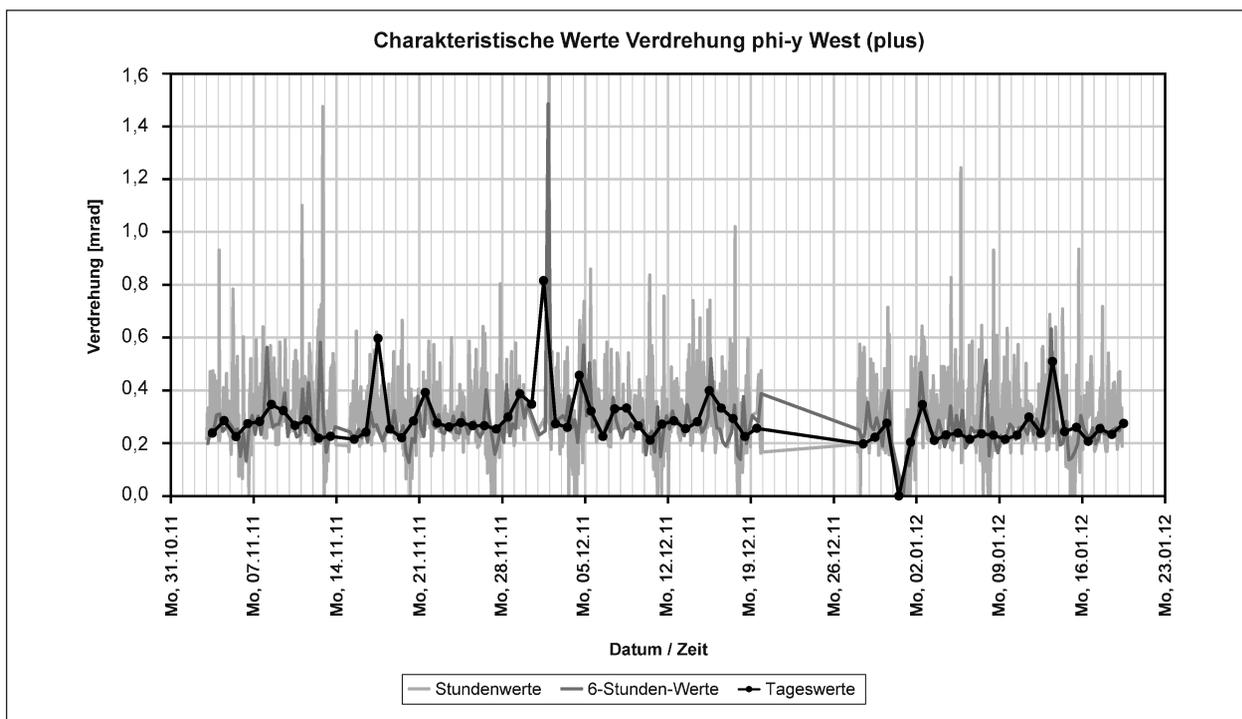


Bild 43: Charakteristische Werte der Verdrehung phi-y – Lager West, Plusbereich

Die aus den einzelnen Zeitabschnitten mit der oben beschriebenen Auswertung ermittelten charakteristischen Werte der Verdrehung phi-y (Lager West) sind in Bild 43 für den Plusbereich und in Bild 44 für den Minusbereich (hier als Absolutwerte dargestellt) aufgeführt. Auch hier lassen sich zunächst prinzipielle Wochengänge der Stundenwerte (cha-

rakteristische Werte aus einer Stunde Messdaten) erkennen. Zu beachten ist hierbei aber, dass zu einem gewissen Anteil aufgrund des geringen Datenumfanges an Sonntagen (besonders in den Nachtstunden) die statistische Auswertung keinen charakteristischen Wert lieferte und hier in den Diagrammen der Wert zu 0 gesetzt ist.

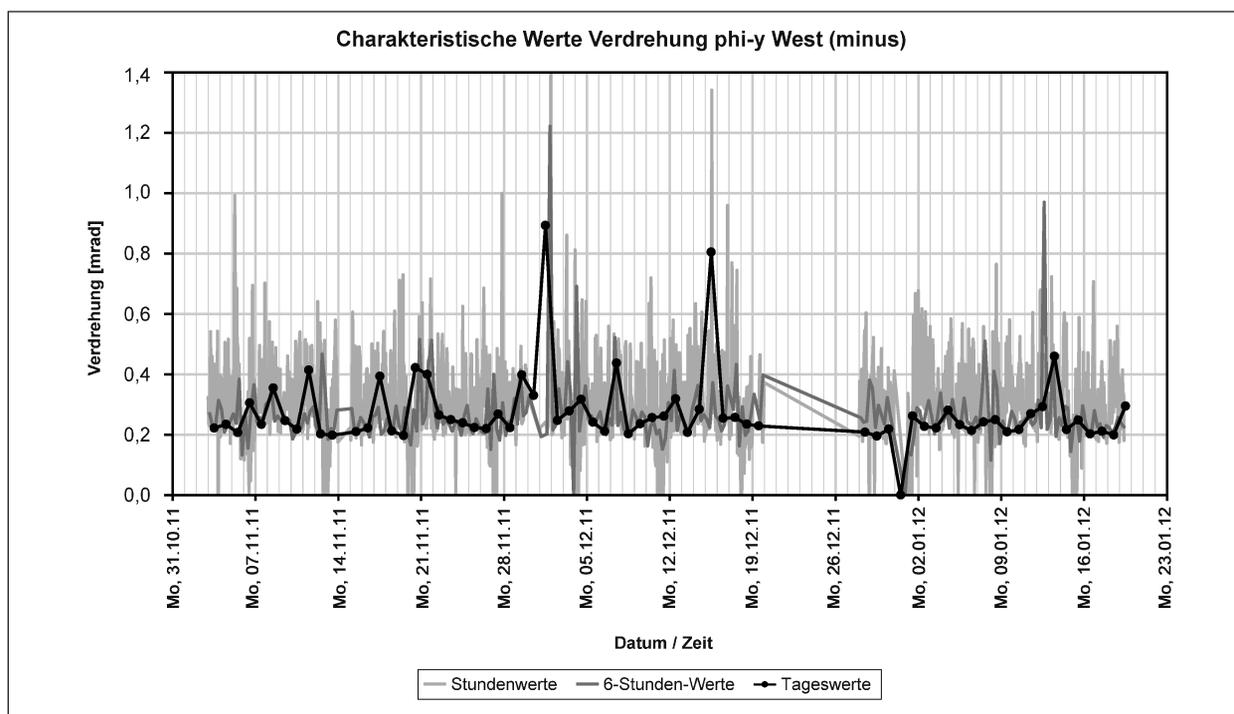


Bild 44: Charakteristische Werte der Verdrehung phi-y – Lager West, Minusbereich (Absolutwerte)

Die Stundenwerte zeigen eine große Streuung innerhalb eines großen Wertebereiches. Mit zunehmendem Betrachtungszeitraum (6 Stunden) werden die Streuungen kleiner und auch die Werte nehmen deutlich ab. Eine weitere Vergrößerung des Betrachtungszeitraumes (auf 24 Stunden) führt zu einer weiteren Verringerung der Streuungen. Wochengänge der Ergebnisse lassen sich hier aber nicht mehr erkennen.

Analoge Darstellungen der ermittelten charakteristischen Werte für die Verdrehungen phi-x und die Vertikalverschiebungen v-z sind im Anhang D enthalten. Hier zeigen sich vergleichbare Bilder in der Gegenüberstellung von Stundenwerten, 6-Stunden-Werten und Tageswerten.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass auch bei einem Betrachtungszeitraum von 24 Stunden keine als zuverlässig anzusehenden Ergebnisse aus der Auswertung der Messdaten ermittelt werden können.

Dies entspricht den Untersuchungsergebnissen aus Simulationen in [2], die den Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit der Verkehrsstärke differenzieren. Danach ergeben sich zuverlässige charakteristische Werte bei hohen Verkehrsstärken (DTV-SV pro Richtung > 10.000) bei einem Betrachtungszeitraum von einem Tag und bei kleinen

Verkehrsstärken sind mehr als 10 Tage erforderlich.

Der Weg der Auswertung des Zeitverhaltens von Kennwert-Zeitverläufen zur Bewertung von Betrachtungszeiträumen hat sich bewährt. Derartige Algorithmen werden als feste Bestandteile des Systems aufgenommen.

6.8 Auslastungsgrade des Tragwerks

Auslastungsgrade sind die Gegenüberstellung von aktuellen Einwirkungen und aktuellen Widerständen unter Beachtung des aktuellen Bauzustandes. Im Zuge des Zeitverhaltens (siehe Kapitel 6.7) wurden aktuelle charakteristische Verdrehungen aus Verkehr für die Achse 30 ermittelt. Verdrehungen sind relevante Kennwerte zum Nachweis der Lager. Die Achse 30 ist auf bewehrten Elastomerlagern nach DIN 4141-14 mit einem Durchmesser von 800 mm und einer Gesamthöhe von 171 mm gelagert. Das Lager hat eine Verdrehkapazität nach DIN 4141 von 14 mrad. Eine Lagerstatik und eine Ermittlung der Bauwerksverdrehung aus der Bauzeit liegen nicht vor. Deshalb wird ersatzweise die Verdrehung infolge Verkehrs für eine BK60 rechnerisch ermittelt und mit den charakteristischen Werten verglichen. Aus den Tageswerten gewonnene charakteristische Werte der Verdrehung infolge Verkehrs

und die Verdrehung infolge einer BK60 sind in Bild 45 und Bild 46 dargestellt (Lager West, Verdrehung phi-y).

6.9 Charakteristische Werte

Die Ermittlung charakteristischer Werte auf der Basis von Simulationen oder gemessenen Achslastfolgen wird für die Projektphase nicht ausgeführt. Algorithmen und deren Automatisierung liegen aber vor und sind mehrfach getestet.

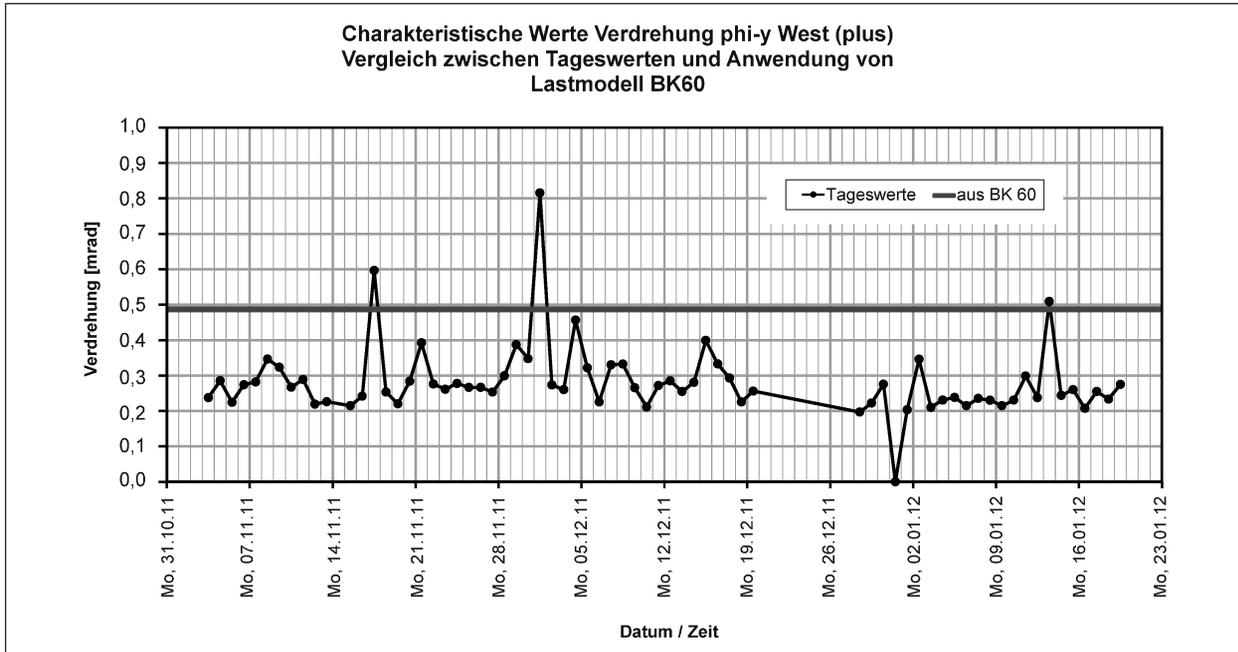


Bild 45: Charakteristische Werte der Verdrehung phi-y – Lager West aus Tageswerten und Lastmodell BK60, Plusbereich

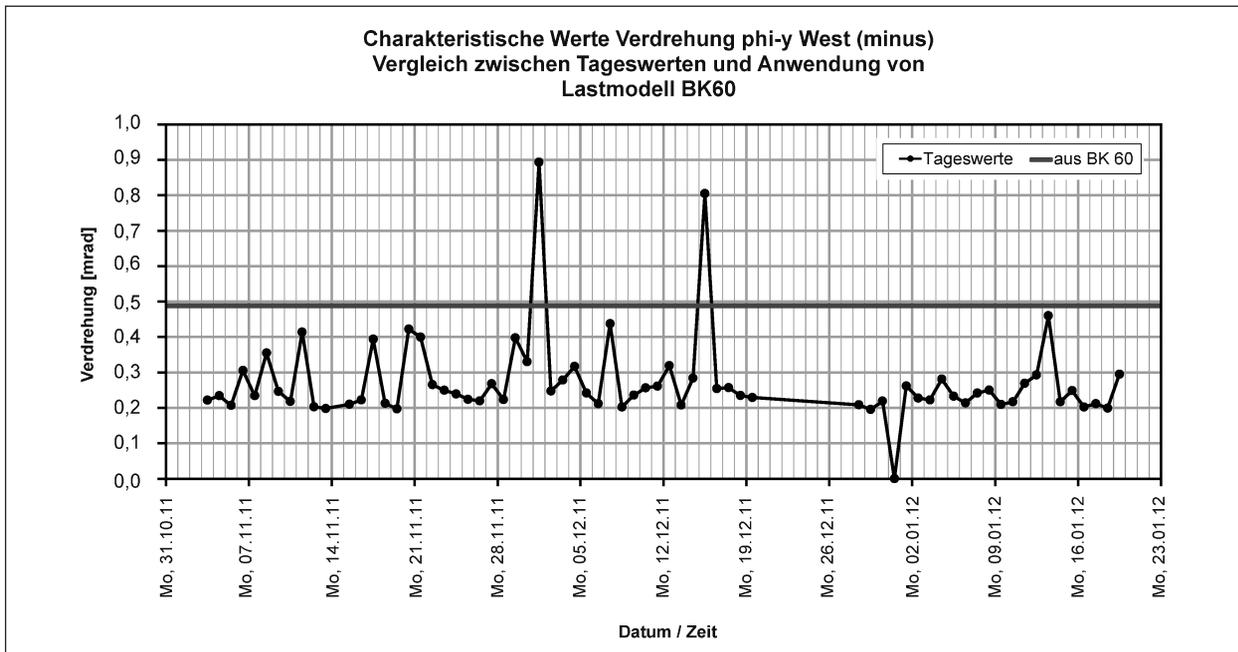


Bild 46: Charakteristische Werte der Verdrehung phi-y – Lager West aus Tageswerten und Lastmodell BK60, Minusbereich (Absolutwerte)

7 Zielstellung und Ergebnis – ein Quervergleich

7.1 Zielstellung nach Kapitel 1

Das Ziel des vorliegenden Projektes ist ein Konzept und ein umgesetztes technisches Equipment für Straßenbrücken

- zur Ermittlung von Einwirkungen, Widerstand und Zustand in Echtzeit,
- als Datenlieferant für Verkehrszählungen und Achslastermittlungen,
- zur Ableitung von Modellen zur Zustandsentwicklung über Kennwert-Zeitbeziehungen.

Das bedeutet, die Entwicklung eines modularen automatisierten Systems zur Verkehrserfassung, zur indirekten Achslastwägung der Achsen des Schwerverkehrs und die teilweise Echtzeitauswertung und externe Auswertung der Daten

7.2 Ergebnis am Projektende

Es wurde ein Konzept entwickelt und ein auf verfügbarer Messtechnik aufgebautes technisches Equipment an der Brücke ü. d. Kreisell bei Bronnzell/Fulda praktisch erprobt.

Das Konzept umfasste die Messtechnik zur Datenerfassung und Auswertemodule, die insgesamt in ein Datenmanagement eingebunden sind.

Die Messtechnik besteht aus Traffic-Sensoren der Firma AVK Infotec GmbH und konventioneller Messtechnik für Bauwerksmessungen. Die Traffic-Sensoren sind intelligente Sensoren und die konventionelle Technik (induktive Wegaufnehmer, Dehnungsmessrosetten usw.) benötigen Messverstärker. Damit waren zwei getrennte Messsysteme im Einsatz, die lediglich über die jeweiligen Messcomputer verbunden wurden. Die Zeitsynchronisation sollte der Zeitstempel nach Funkuhr übernehmen. Die verfügbare Messsoftware gestattete keine unterschiedlichen Abstraten, was durch unterschiedliche Datenkomprimierung gelöst wurde.

Das Konzept ist so angelegt, dass es für alle Straßenbrücken geeignet und auch wirtschaftlich ist. Bisherige Systeme auf der Basis eines Brückenmonitorings waren für Autobahnbrücken mit Richtungsverkehr im Einsatz.

Die ausgewählte Testbrücke liegt im Zug einer Bundesstraße, der Querschnitt ist mit zwei Fahrstreifen in Richtung Würzburg und einem Fahrstreifen in Richtung Fulda ausgelegt. Die Hauptfahrstreifen befinden sich direkt über den Hauptträgern.

Ermittlung von Einwirkungen, Widerstand und Zustand in Echtzeit

Ziel sind Einwirkungen aus Verkehr und Temperatur. Unter Einwirkungen werden bei Verkehr die charakteristischen Werte für die vertikalen Verkehrslasten und/oder das Ziellastniveau nach der Nachrechnungsrichtlinie verstanden. Die entsprechenden Berechnungen setzen die Kenntnis des realen Verkehrs voraus. Der Stand wird im nächsten Anstrich dargestellt. Bei Kenntnis des Verkehrs sind die charakteristischen Werte sowohl über Simulationsrechnungen als auch über die Verwendung der direkten Achslastfolgen möglich. Die Algorithmen liegen erprobt vor.

Charakteristische Werte der Temperatureinwirkungen (konstanter Anteil und linearer Anteil) werden über Korrelationsbeziehungen aus der Lufttemperatur und Oberflächentemperaturen abgeleitet und durch Extrapolation gerechnet. Sowohl die Korrelationsbeziehungen als auch die Extrapolationen liegen erprobt vor.

Zu Widerständen und Zustand kann infolge der Testphase von 3 Monaten keine Aussage gemacht werden. Angedacht ist die Analyse der aufgenommenen Kennwert-Zeitbeziehungen hinsichtlich Stetigkeit und Konformität mit gerechneten Werten. Abgeleitet daraus folgt z. B. ein lineares Widerstandsverhalten.

Die ständige Weiterentwicklung der Hard- und Software während der Testphase forderte eine „Nachauswertung“. Diese wurde automatisiert, aber nicht online getestet. Eine Echtzeitermittlung liegt bisher nicht vor.

Datenlieferant für Verkehrszählungen und Achslastermittlungen

Dies ist und war der Schwerpunkt während der Projektphase. Der aktuelle Stand dazu ist wie folgt beschreibbar:

Die Traffic-Sensoren identifizieren zuverlässig das Vorhandensein eines Fahrzeuges und seine Geschwindigkeit, klassifizieren jedoch nur Lkw und Pkw. Von Beginn an lag hier Forschungsbedarf vor.

Es gab eine positive Entwicklung in der Projektzeit. Verkehrszählungen sind in der Qualität der Dauerzählstellen gegeben. Das Ziel 8+1 wurde noch nicht erfüllt. Die Firma wird daran auch nach Ablauf des Projektes arbeiten. Das Einbringen der Sensoren ist mit geringem Aufwand verbunden und der Eingriff in die Straße minimal. Eine Schädigung der Sensoren durch Überfahrten ist infolge des geringen Kontaktes ausgeschlossen.

Bis zur praxisreifen Entwicklung des Sensors für eine 8+1-Erkennung ist ein „Ersatzweg“ zur Bestimmung von Achsen, Achsabständen und Fahrzeugtypen erforderlich. Gegenwärtig wurde zur Fahrzeugtypenermittlung der Fahrbahnübergang genutzt. Dieser ist gut geeignet, um Achsen und Achsabstände mit anschließender Fahrzeugzuordnung zu ermitteln, aber ungeeignet für die prozentuale Achslastaufteilung. Die prozentuale Aufteilung kann vorübergehend durch die Aufteilung aus bekannten Messserien realisiert werden. Die Notwendigkeit eines Fahrbahnüberganges ist aber eine Einschränkung, da viele Brücken im Nebennetz damit nicht ausgestattet sind. Es ist ein direkt befahrenes Bauteil zwingend erforderlich. Dieses muss individuell und objektbezogen gewählt werden, damit auch das Nebennetz abgedeckt werden kann.

Gesamtgewichte und Achslasten werden algorithmisch unter Kenntnis des Vorhandenseins von Fahrzeugen auf der Brücke, ihrer Richtung, ihres Typs und Geschwindigkeit bestimmt. Dieses Gebiet wird beherrscht. Mängel in der Gesamtgewichtsbestimmung können durch erweiterte Optimierungen ausgeglichen werden. Die Module werden objektorientiert angepasst. Gegenwärtige Schwierigkeiten sind der verwendeten vorrätigen Messsoftware geschuldet. Es wird aktuell an einer Software gearbeitet, die Verkehrsdaten und Brückendaten schon auf der physikalischen Messebene synchronisiert. Sowohl AVK als auch das Ingenieurbüro Freundt arbeiten auch nach Projektende intensiv an der Weiterentwicklung.

Zur Ableitung von Modellen zur Zustandsentwicklung über Kennwert-Zeitbeziehungen

Die kurze Testphase kann nicht zur Ableitung von Entwicklungen der Kennwerte führen. Es handelt sich um Auswertungen der Brücken Kennwerte und basiert auf den kontinuierlich gemessenen Kennwerten. Das führt zu notwendigen Systemen, die

auch unterschiedliche Abstraten garantieren. Moderne Messsysteme gestatten dies.

Summarisch wird eingeschätzt, das Hauptanliegen eines Brücken-Weight-in-Motion-Systems ist realisiert. Es muss aber professionalisiert und weiterentwickelt werden. Beide Projektpartner arbeiten daran. Das System ist für Brücken des Nebennetzes geeignet, jedoch gegenwärtig aus der Notwendigkeit eines direkt befahrenen Bauteils noch systemabhängig. Wir hoffen, auch in der gegenwärtigen Phase auf einen baldigen praktischen Einsatz. Eine verbesserte Systemsoftware liegt vor. Es ist allerdings auch dann noch eine Art Testeinsatz notwendig.

7.3 Danksagung

Das Projekt ist durch ein Zusammenfügen von in Entwicklung befindlicher Sensorik und konventioneller Sensorik auf der einen Seite und von messdatenabhängigen Auswertalgorithmen auf der anderen Seite geprägt. Dennoch ist es gelungen, Verkehrsdaten abzuleiten, die durch unabhängige Zählungen evaluierbar sind. Das eingesetzte Grundsystem ist nur ein Prototyp. Der Weg zum professionellen System setzt noch Weiterentwicklungen voraus.

Wir wollen diesen Weg verfolgen.

Das wäre ohne diesen nun bewiesenen „Grundeinsatz“ nicht möglich gewesen. Wir bedanken uns bei dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, für die Förderung im Rahmen des Innovationsprogrammes Straße.

8 Literatur

- [1] BLAB, R., LITZKA, T., KALINA, T., NEUMAYER, T.: Europäischer Test von Achslastwiegesystemen, Straßenforschung, Heft 540, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien 2004
- [2] BÖNING, S.: Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2012 (in Bearbeitung)

- [3] BUSCHMEYER, W., SCHNELLENBACH-HELDT, M., LUBASCH, P.: Schwerlastverkehr auf Bundesfernstraßen, Erfassung, Erhaltungsbedarf für Brücken (Schlussbericht FE 15.0388/203/GRB) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen: Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen, Homepage BAST: www.bast.de (aufgerufen am 04.05.2012)
- [5] CREMONA, C.: Optimal extrapolation of traffic load effects. In: Structural Safety 23 (2001), Heft 1, S. 31-46
- [6] FREUNDT, U., BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes – Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 77. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2011
- [7] FREUNDT, U., BÖNING, S.: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 82. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2011
- [8] FREUNDT, U., GRÜNBERG, J., u. a.: Auswirkungen des Schwerverkehrs auf Brückenbauwerke (Schlussbericht FE 15.0395/2004/HRB) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010
- [9] HASAN, H.: Temperaturbeanspruchung von Betonbrücken, Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2012 (in Bearbeitung)
- [10] HONEYWELL: Application Note – AN218: Vehicle Detection Using AMR Sensors. Plymouth (MN): Honeywell International Inc., 2005
- [11] JACOB, B., O'BRIEN, E., JEHAES, S.: Weigh in Motion of Road Vehicles, Final Report (1993 – 1998) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris 2002
- [12] Nachrechnungsrichtlinie: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Ausgabe 05/2011). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Abteilung Straßenbau, 2011
- [13] Norm DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Beuth Verlag, Fassung 12/2010
- [14] O'BRIEN, E., ŽNIDARIČN, A.: Weighing in Motion of Axles and Vehicles for Europe (WAVE), University College Dublin, 2001
- [15] PETERS, R. J.: The Accuracy of Australian and European Culvert Weigh-in Motion System; National Traffic Data Acquisition Conference, New Mexico 1996
- [16] Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025 (Schlussbericht FE 96.0857/2005) (Forschungsbericht). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2007
- [17] QUILLIGAN, M.: Bridges Weigh-in Motion, Development of a 2-D Multi-Vehicle Algorithm, Department of Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridge Division, Royal Institute of Technology, Stockholm 2003
- [18] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2002). Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2002
- [19] ZHAO, H., UDDIN, M.: Algorithm to identify axle weights for an innovative BWIM system – Part I + II, IABSE – JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering – II, Dhaka, Bangladesh 2010

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau

Krause, Rath, Sawade, Dumat

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung

Steinauer, Mayer, Kündig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel

Sistenich

€ 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme

Schröder

€ 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewehrung

Schröder

€ 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten

Schröder, Staack

€ 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff

Eilers

€ 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau

Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4

Bramshuber, Spörel, Warkus

€ 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln

Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann,

Baltzer, Riepe, Kündig

€ 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln

Blosfeld

€ 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln

Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger

€ 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Tauscher

€ 14,50

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

Kuhlmann, Euler

€ 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen

Weschpennig, Kropf, von Witzhausen

€ 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller

€ 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum

€ 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller,

Steinauer, Scharnigg

€ 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“

Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“

Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“

Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller,

Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier,

Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Kuhlmann, Günther, Krauss

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los

€ 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann

€ 14,50

- B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00
- B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00
- B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50
- B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

- B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00
- B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50
- B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50
- B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013

- B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00
- B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00
- B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reiß € 17,50
- B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00
- B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00
- B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

- B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen
Friedrich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen
Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)
Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen
Tel. (0421) 3 69 03-53
Fax (0421) 3 69 03-48
www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.