

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

**Synchronisation
von Sensorik und
automatisierte Auswertung
von Messdaten**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 177

bast

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

von

Ursula Freundt
Sebastian Böning

Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt
Weimar

Stefan Fischer
Florian-Lennert Lau

Universität zu Lübeck
Institut für Telematik

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 177

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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, 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 Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0631
Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke
Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung
von Messdaten

Fachbetreuung
Sarah Windmann

Referat
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
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 978-3-95606-687-0

Bergisch Gladbach, April 2022

Kurzfassung – Abstract

Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

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

Die kontinuierliche Schaffung und Erhaltung eines Netzes von Ingenieurbauwerken im Verkehrssystem Straße sind Ziele des verschiedener Management Systeme. Die Systeme leben von den vorhandenen Daten. Hierzu zählen Daten des Verkehrs und Daten des Status des Bauwerkes.

Im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms „Straße im 21. Jahrhundert“ des Bundesministeriums (BMVI) wurden Forschungsvorhaben gefördert, die sich u. a. mit der Entwicklung neuer Konzepte und Technologien zur Bereitstellung solcher Datenbestände befassen.

Alle bisherigen Forschungs- und Praxisprojekte betrafen Bestandsbrücken und verfolgten das Ziel eines objektspezifischen Verkehrslastmodells bzw. einer Überwachung eines vorhandenen Schadens.

Eine Weiterentwicklung des Einsatzes für Brücken von Beginn der Verkehrsfreigabe für einen weiteren Dauerbetrieb fehlt (national und international).

Mit der Pilotstudie „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ sollen gemäß einer Konzeption der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die bisherigen Entwicklungen des BASt-Forschungscluster „Intelligente Brücke“ umfänglich demonstriert und damit bundesweit zugänglich gemacht werden.

Zu diesem Zweck hat die Bayerische Straßenbauverwaltung im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geplanten Digitalen Testfeldes Autobahn das Bauwerk BW402e im Bereich des AK Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg (Verbindungsrampe A3 zur A9) zum Ausbau zur intelligenten Brücke vorgesehen. Die Brücke ist ein Neubau.

Im Fokus der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ stehen die Schwerpunkte „Einwirkungsüberwachung und Analyse“, „Intelligente Fahrbahnübergänge und Lager“ sowie „Intelligente Sensornetze“.

Den Kern der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ bilden die Messsysteme neben der Datenanalyse, Bewertung und Visualisierung von Ergebnissen sowie dem Datenmanagement.

Im Bauwerk 402e am Autobahnkreuz Nürnberg sind fünf verschiedene Messsysteme installiert. Dabei sind konventionelle Systeme und Systeme in Erprobung kombiniert.

Die unterschiedlichen Systeme, die unabhängig voneinander entwickelt wurden, dienen so einem gemeinsamen Ziel, gestatten Referenzen und einem ganzheitlichen Erfahrungsgewinn.

Der vorliegende Schlussbericht dokumentiert in diesem Gesamtkontext die Bearbeitung des Forschungsprojektes „Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten“.

Im Rahmen der Bearbeitung werden vorhandene Algorithmen und Methoden angewendet und weiterentwickelt, um aus den Messdaten sowohl die Erkennung von überfahrenden Fahrzeugen zu realisieren als auch Kennwerte des Status des Bauwerkes zu ermitteln. Wesentlicher Projektschwerpunkt ist dabei die Realisierung der vollständig automatisierten Datenauswertung, Datenaufbereitung und Datenpublikation vor Ort.

Die Messdaten für diese Auswertungen stammen dabei aus dem Messsystem an der Brücke, am Lager und am Fahrbahnübergang. Daten aus den anderen Messsystemen werden als Referenzquellen herangezogen. Aus diesem Ansatz heraus ist die zeitliche Synchronisation von Messdaten aus verschiedenen, heterogenen Systemen ein zusätzlicher Schwerpunkt des Projektes.

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erprobung und Weiterentwicklung des drahtlosen Sensornetzes. Auch hieraus können Referenzdaten für die anderen Systeme gewonnen werden.

Alle erfassten und aufbereiteten Daten müssen systematisch gehalten, gesichert und publiziert werden. Diese Anforderungen bilden einen weiteren Schwerpunkt der Projektbearbeitung. Die Entwicklung einer Web-basierten Ergebnispublikation ist dabei eine wesentliche Zielstellung.

Digitales Testfeld Autobahn – Smart Bridge - Synchronization of sensor technology and automated analysis of measurement data

Germany has a well-developed infrastructure. Germany is also a highly frequented transit country. Traffic in general and road traffic in particular are relevant economic factors.

The continuous operation and maintenance of a network of engineering structures in the road transport system are the objectives of the various

management systems. The systems depend on the available data. This includes data on traffic and data on the status of the structure.

Within the framework of the National Innovation Program "Straße im 21. Jahrhundert" of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI), research projects have been funded which, among other things, deal with the development of new concepts and technologies for the provision of such data sets.

All previous research and practical projects concerned existing bridges and pursued the goal of an object-specific traffic load model or monitoring of existing damage.

Systems for continuous operation at bridges from the beginning of traffic release are missing (national and international).

The pilot study "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" is intended to comprehensively demonstrate the previous developments of the BASt research cluster "Smart Bridge" according to a concept of the Federal Highway Research Institute (BASt) and thus make them accessible nationwide.

For this purpose, the Bavarian Road Construction Administration has planned the BW402e structure in the area of the Nuremberg freeway junction, directional roadway Regensburg (connecting ramp A3 to the A9 motorway) for expansion into a Smart Bridge within the framework of the "Digitales Testfeld Autobahn" planned by BMVI. The bridge is a new construction.

The focus of the "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" is on "Monitoring and Analysis of Structure Actions and Reactions", "Intelligent Expansion Joints for roadway bridges and Bearings" and "Intelligent Sensor Networks".

The core of the "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" is formed by the measuring systems in addition to data analysis, evaluation and visualization of results and data management.

Five different measuring systems are installed in structure BW 402e at the Nuremberg freeway junction. Conventional systems and systems under test are combined.

The different systems, which were developed independently from each other, thus serve a common goal, allow references and a holistic gain of experience.

In this overall context, the final report documents the processing of the research project "Digitales Testfeld Autobahn - Smart Bridge - Synchronization of

sensor technology and automated analysis of measurement data".

Within the scope of the project, existing algorithms and methods are applied and further developed in order to realize the detection of passing vehicles and to determine characteristic values in relation to the status of the structure from the measured data. The main focus of the project is the realization of fully automated data evaluation, data preparation and data publication on site.

Measurement data generated by sensors on the bridge, bearing and expansion joint are used for the above mentioned evaluations. Data from the other measuring systems are used as reference sources. Based on this approach, the temporal synchronization of measurement data from different, heterogeneous systems is an additional focus of the project.

Another focus is the testing and further development of the wireless sensor network. Reference data for the other systems can also be obtained from this.

All collected and processed data must be systematically stored, secured and published. These requirements are a further focus of the project work. The development of a web-based publication of results is a major goal.

Summary

Digitales Testfeld Autobahn – Smart Bridge - Synchronization of sensor technology and automated analysis of measurement data

1 Introduction

Germany has a well-developed infrastructure. Germany is also a highly frequented transit country. Traffic in general and road traffic in particular are relevant economic factors.

The continuous operation and maintenance of a network of engineering structures in the traffic system road, which offers the user good traffic connections, high safety at minimum overall economic costs and maximum environmental compatibility, are the goals of the Building Management System (BMS) and the Pavement Management System (PMS). The systems depend on existing data.

Traffic data is currently being collected in a variety of ways. The basic sources of information are comprehensive traffic censuses and selective axle load measurements in the road network. The data from both sources are collected centrally or decentrally and further processed by the respective subject areas.

Independently of the BMS or PMS, bridges (certain bridge reactions) are also monitored by sensor technology. There is no interactive system of differently collected traffic data and bridge measurements.

Within the framework of the National Innovation Program "Straße im 21. Jahrhundert" of the Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure (BMVI), research projects have been funded which, among other things, deal with the development of new concepts and technologies for the above-mentioned problem.

In the research project Roadtraffic Management System (RTMS, see [11]) financed by the innovation program "Straße im 21. Jahrhundert" a concept and implemented technical equipment for road bridges was developed, which allows the determination and evaluation of data of the passing traffic.

In the research project iBAST from the innovation program the use of wireless sensor networks was tested. The project iBAST was carried out by the Institute for Telematics of the University of Lübeck.

All previous research and practical projects concerned existing bridges and pursued the goal of an object-specific traffic load model or monitoring of existing damage.

Systems for continuous operation at bridges from the beginning of traffic release are missing (national and international).

With the "Digitale Testfeld Autobahn – Smart Bridge" - projects, relevant developments are to be comprehensively demonstrated according to a concept of the Federal Highway Research Institute (BASt) within the research cluster "Smart Bridges" and thus made accessible nationwide.

For this purpose, the Bavarian Road Construction Administration has planned the BW402e structure in the area of the Nuremberg freeway junction, Regensburg (connecting ramp A3 to the A9 motorway) as part of the Digitales Testfeld Autobahn for freeways planned by the BMVI.

The focus of the "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" is on "Monitoring and Analysis of Structure Actions and Reactions", "Intelligent Expansion Joints for roadway bridges" and "Intelligent Sensor Networks".

For technical and formal reasons, the research projects "Synchronization of Sensor Technology and Automated Evaluation of Measurement Data" and the projects "Traffic Data Acquisition Based on Sensor-Equipped Expansion Joints" and "Data Collection Strategies and Data Analysis for Smart Spherical Bearings" are separate projects, which only describe the contents of the "Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" as a whole. The project work is done in close cooperation.

The measuring systems form the core of the "Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn".

Five different measuring systems are installed in structure 402e at the Nürnberg freeway junction. Conventional measuring systems and systems in testing are combined.

The five measuring systems are:

- A measuring system integrated in and on the spherical bearing (Maurer Engineering GmbH)
- A measuring system integrated in and at the expansion joint (Maurer Engineering GmbH)
- A measuring system at the bridge, at the bearing and at the expansion joint (RTMS)
- An optical measuring system (camera) for the supply of references for vehicle detection (RTMS)
- A wireless sensor network at the bridge with recording of temperatures, crack changes and movements (iBAST)

The different systems, which were developed independently of each other, thus serve a common goal, allow references and a holistic gain of experience.

2 Installed measuring systems

2.1 Measuring system RTMS

The measurement concept is designed to record characteristic values of the bridge, which allow the condition of the structure to be recognized and also allow traffic data to be derived indirectly with sufficient accuracy. The installed sensors are concentrated in the superstructure at 4 measuring cross sections, the transition structure and the northern bearing of the A 40 structure axis. In addition, both external tendons and the superstructure itself are equipped with acceleration sensors. HBM's CatMan program, which is compatible with the amplifiers, is used to record the measurement data by evaluating the sensor data and storing it.

2.2 Wireless sensor network

The sensor network consists of a total of 13 different sensor nodes, which record different environmental parameters and characteristic values of the bridge. Sometimes up to 6 different physical parameters are recorded at one sensor node. The sensor nodes are identified both by the identification numbers (ID) of the individual sensor nodes in the database and by the MAC addresses of the respective nodes in Hexadecimal representation clearly addressed.

The sensor nodes record the parameters crack widths, temperature, humidity, inclination, surface temperature, wind, wind direction and impact. With the exception of the environmental data, these were recorded continuously over the measuring period. The weather station is an exception, as it failed again and again. The weather station was working for half of the measuring period and collected 100% of the data in this period. The failure was not repaired because the loss of data could be compensated by the availability of weather data from the German Weather Service at the nearby airport.

The sensor nodes form a multi-hop network in which data is communicated to a central node via several nodes. The central node communicates the data to a remote database via a "BridgeConnector" component.

The "BridgeConnector" component receives the raw data from the sensor network and processes them in different ways. The encryption and compression

of the data is done by the "BridgeConnector" component so that the data can be used directly e.g. in the web application.

An SQL database is used for the final persistent storage of the data. This is accessed and managed by a "Database Interface". All communication with the database takes place via the interface. Only approved and specified data to ensure the required data security.

3 Time-synchronization between the systems

Five different measurement systems are installed at the "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn", which were developed independently by different research groups with partly different objectives. New findings and quality-tested evaluation results are expected through reference evaluations. A mandatory requirement for this is the time synchronization of the different, often heterogeneous sensor systems.

The Network Attached Storage (NAS) at the Intelligent Bridge in the Digital Test Field Highway represents a Stratum 2 server. All connected systems are therefore Stratum 3 computers. Thus, the NAS is located as close as possible to a time server, as a peripherally installed device can be. It is synchronized to the Internet time of the Stratum 0 servers with an accuracy of about 10 ms.

Since all the systems involved obtain their own system time from the NAS as the central server, the local time of all systems is logically synchronized like stratum 1 servers.

Even if there is a deviation of more than 10 ms to the Internet time in total, this deviation is identical on all hierarchically subordinated systems. The data are therefore comparable with each other, even if the absolute time may differ by a few milliseconds.

4 Traffic detection from measurement data RTMS

The detection of vehicles passing over the structure is based on a suitable evaluation of the measured data. The methods of data evaluation and data assignment between the different measuring points on the structure are based on algorithms developed in previous investigations ([11], [9], [7], [8], [10]), which were adapted to the concrete case at hand.

The determination of the total weight of an identified vehicle is realized by an optimization procedure using the method of least squares. The compensation

calculation is carried out between a measured characteristic value-time curve and a calculated characteristic value-time curve. Different global structure parameters can be used for this.

The calculated characteristic value-time curve is based either on a characteristic value influence function determined from a structural model and evaluated by calibration or on a characteristic value influence function which was determined without a structural model, solely from the data of the calibrations.

At the time of writing this short report, data of the traffic detection at the bridge from February 2017 to August 2020 are available. In the following some selected results are presented.

In figure 1 the average daily heavy traffic volumes determined over the entire evaluation period are shown separately for the individual months, based on the weekdays Monday to Friday. Thereby a yearly decrease of the heavy traffic intensity can be seen. In the months December and January as well as in the summer months (July/August) lower heavy traffic strengths are shown compared to the other months. A clear "long-term" change in the number of heavy goods vehicles can be seen in the available data at least until February 2020. A change in the number of heavy goods vehicles is clearly visible in the months March to June 2020, which is the period in which the various measures in Germany and Europe will be implemented in spring 2020 to contain the SARS-COV-2 pandemic. The effects on the economy and thus directly on the volume of heavy traffic are clearly visible.

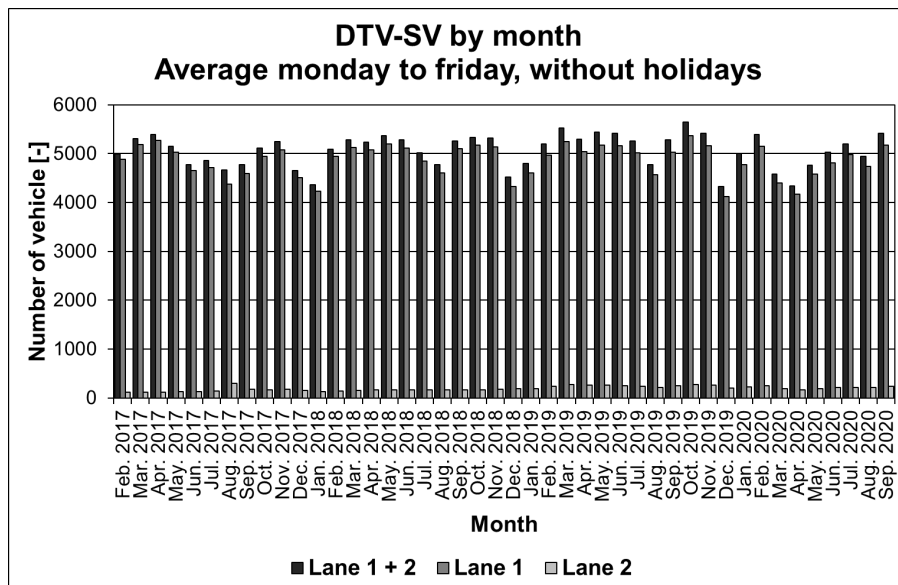


Figure 1: Average daily heavy traffic volume DTV-SV without consideration of weekends and holidays - Separated by month

5 Determination of structure parameters (resistance) from RTMS measurement data

The derivation of characteristic values of the resistance of the structure is done by a continuous evaluation of measured data of the installed acceleration sensors by calculating amplitude spectra via a Fast Fourier Transformation (FFT). The peaks of these spectra correspond to different natural frequencies. These peaks are also determined automatically on site from the amplitude spectra.

For the acceleration measurements on the external tendon, the natural frequencies of the tendon are thus obtained. The acceleration measurement at the superstructure provides natural frequencies of the bridge.

The natural frequencies of the tendon correspond to the prestressing force in the tendon and the natural frequencies of the bridge correspond to the cumulative stiffness of the structure.

For a practicable monitoring of the natural frequencies it is necessary to determine the long-, medium- and short-term effects in the recorded measurement data within the scope of evaluation and preparation.

For this purpose, a methodology was developed in which, on the basis of the accumulated measurement data and under the basic assumption that no damage to the structure has occurred so far, such effects can be filtered out of the data. As a result, status values for the external prestressing or the

structure stiffness are determined. Figure 2 shows an example of the course of a measuring point on an external tendon. A change of the prestressing force, e.g. due to the breakage of individual strands in the tendon, can be detected by means of the data.

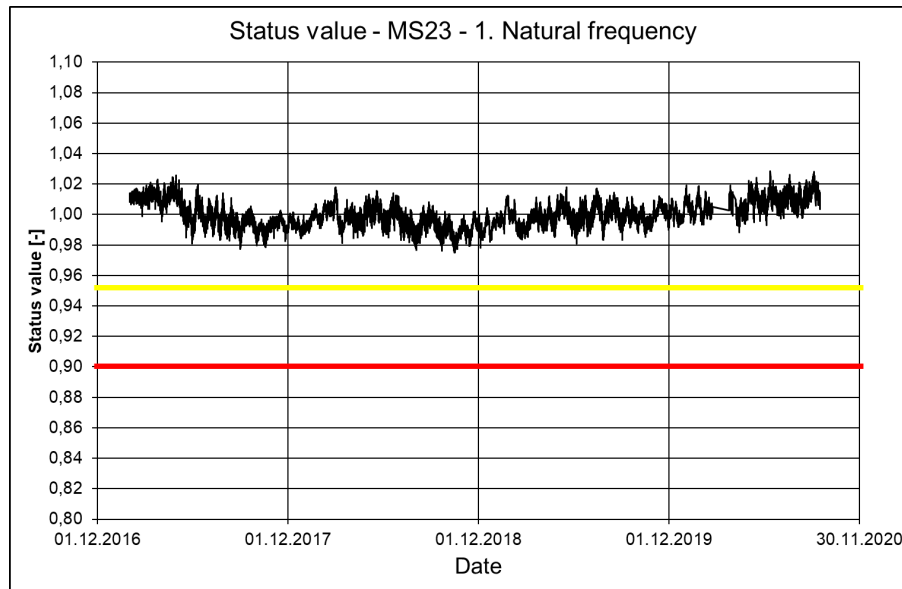


Figure 2: MS 23 - external tendon - 1st natural frequency - course Status values - period from February 2017 to September 2020

6 Determination of structure parameters (actions) from measurement data RTMS

6.1 Static loads from traffic

The determination of characteristic values of the static loads from traffic is done by a statistical evaluation of the time courses at selected measuring points. The method used for this purpose was applied in numerous previous studies with different objectives (see [3], [4], [1], [11], [7], [8], [10], [5], [6]). In the course of the static evaluation, characteristic value-time curves are fed into a class boundary transition count. Thus, it is counted how often the course exceeds or falls below defined class limits. The result of this count is a histogram, in which the

absolute number of times each class limit is exceeded or undercut is plotted. For further evaluation it is then necessary to approximate this histogram with a suitable function. For this purpose, the Rice distribution is used in this procedure and the parameters of this function are determined using the method of least squares. If these parameters are known, values with an arbitrary return period, i.e. also values with a return period of 1000 years, which are defined as characteristic values, can be calculated. To derive relevant statements about the determined static stress values from traffic, the comparison with the values from the approach of the load model used for the design of the structure is necessary. These values were determined for the structure.

Figure 3 shows an example of the result for a measuring point as a ratio to the comparison value from the approach of the load model LM 1.

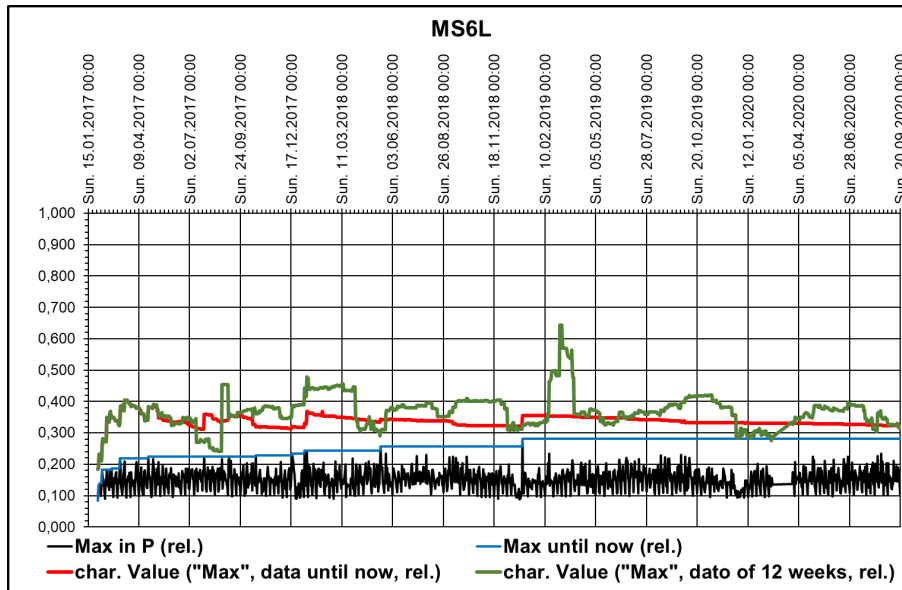


Figure 3: MS6L - hourly maximum values, envelope and characteristic values - relative to the value from the LM 1 approach

6.2 Fatigue loads from traffic

To identify fatigue-relevant stress changes, the measurement data of selected measuring points are evaluated. The considered points are the measuring points with strain measurements on the installed slack reinforcement. For the determination of fatigue-relevant stress cycles, the measured data are subjected to a Rainflow count. The algorithm used for this was taken from [2]. Before the Rainflow count is carried out, the measured data is adjusted for temperature. Accordingly, the obtained oscillation cycles are considered to be purely traffic-induced. The application of the Rainflow-count provides a Rainflow matrix. By mirroring this matrix on the main diagonal, the number of closed loops with different strain oscillation widths is obtained. These are then converted into tension oscillation amplitudes. The calculation of damages and damage sums from the determined oscillating cycles is car-

ried out on the basis of the Wöhler line for reinforcing steel according to standard with the technically usual procedures. Comparable analyses were carried out in [7], [8] and [10]. The evaluations mentioned lead first to damage sums in the considered evaluation period. For the derivation of practical comparative values, these damage sums are converted to damage-equivalent vibration amplitudes in the further course of the analysis. This is done according to the Eurocode's verification concept. The damage-equivalent vibration amplitudes determined in this way are compared with the corresponding values resulting from the fatigue proof for the considered points on the structure. Corresponding investigations were also carried out in [7], [8] and [10]. Figure 4 shows an example of the results for one measuring point. For the damage calculations, different observation periods are examined (entire previous measurement, last 52 weeks, 12 weeks, 1 week). For shorter observation periods, certain changes in the values are apparent, since seasonal effects are more strongly reflected in the results.

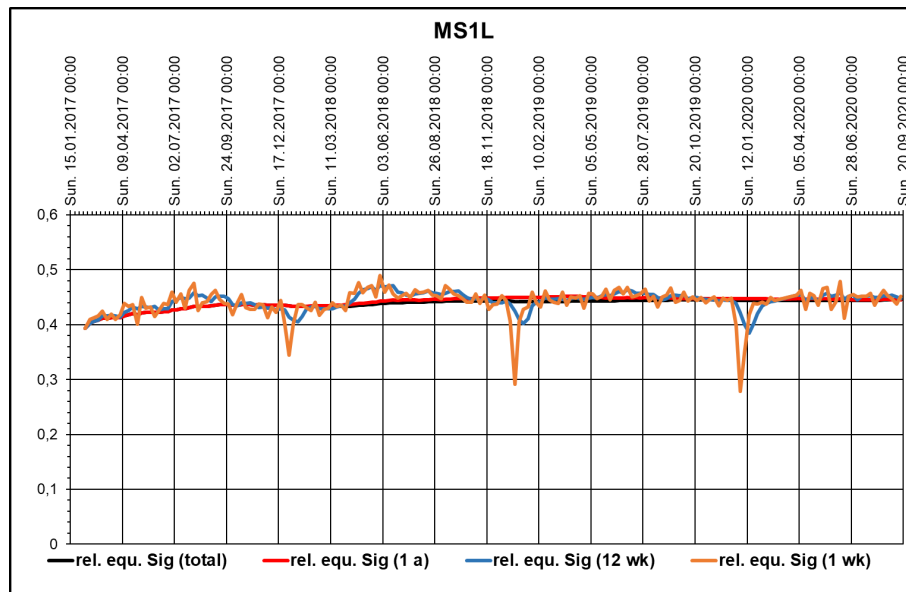


Figure 4: MS1L - Determined damage-equivalent vibration amplitudes in relation to comparative values for different observation periods

7 Sensor development

For the "Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn" a tilt sensor was designed and installed. Like the other sensors, the inclination sensor consists of four main components. These include a power supply, a main board, an expansion board and the actual sensor hardware (External Sensor).

To ensure that the sensor nodes remain compatible with each other, the same type of sensor node was used as the other sensor nodes. The difference is consequently in parts of the used hardware and an adapted software. For the operation at the "Smart Bridge" in Nuremberg, the University of Lübeck (UzL) has chosen an inclination sensor of the type KB-5DB from Preusser Messtechnik.

The measuring accuracy of the inclination sensor is designed to detect the maximum and minimum inclinations. This requirement is fulfilled. The inclination sensor can be used in the temperature range from minus 20 °C to plus 60 °C. The temperatures mentioned are not reached at the sensor location (hollow box inside). In case of an incident, the hardware does not suffer any damage, but switches off. The working range of the sensor is between 2 and 5 volts, the batteries used provide a voltage of 3.6 V.

A high-frequency measuring frequency is required to reliably detect inclinations caused by traffic.

In the course of the project, high-frequency measurements with a wireless sensor network have not

proved to be feasible. The main challenges are the calibration of the sensor nodes and the operation at a high measuring frequency (600 Hz or more, with strongly limited battery power).

In order to generate useful data with a high reliability, the inclination sensor would have to be tested for several days and under different environmental conditions. The calibration for the measurement object has to be performed again for each location and should at least reflect the temperature data of a whole year.

With the available battery power, high-frequency measurements are not feasible within the scope of this project.

8 On-site automation

8.1 Measuring system RTMS

The overall process of automated on-site data processing by the RTMS system is shown in the following figure 5, together with information on the frequency of the evaluations carried out. Both in the course of the automated on-site evaluation of the measuring data and in advance in the course of the storage of the measuring data by the measuring software a multiplicity of data runs up, which must be held within the measuring system RTMS in suitable way.

The data stored in the RTMS measurement system is backed up by mirroring both the measurement data and the determined result data on the NAS.

Practically the entire folder structure of the measuring computer is synchronized with the corresponding folder structure on the NAS every 60 minutes.

The first step of the program sequence is to check the measurement data. If errors are identified in the

measurement data, an e-mail is sent to defined recipients. Similarly, if errors occur in the processing of the data and errors occur during the transfer of the result data to the application, corresponding warning or information messages are sent.

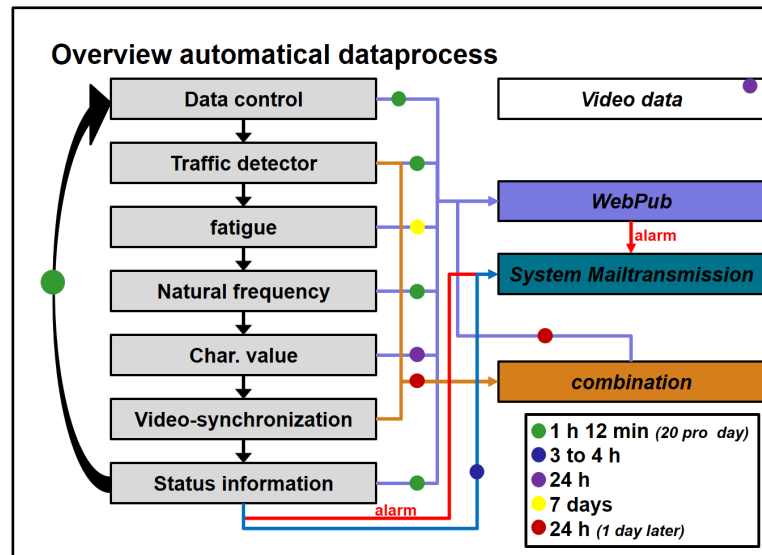


Figure 5: Flow chart of automated data processing of the RTMS system

A VNC software runs in the measuring computer, which allows remote access to the measuring computer. For this purpose, a secure connection to the overall system must be established in advance, either via the router or the NAS. Of course, all control and access options require an existing internet connection of the entire system. In the course of the automated evaluation of the measured data, status messages are regularly sent by e-mail to defined recipients in addition to any warnings or notifications that may have been generated. If these status messages are not sent, there is either a malfunction of the internet connection, a malfunction of the measuring computer or an overall system failure due to a power failure. In the course of the project, the vast majority of such failures were due to an interruption of the Internet connection. Even without this internet connection, the described data evaluation is still being realized.

8.2 Sensor network

Since August 2019 it is possible to write various data directly into the UzL database via a REST interface. This is used as a central storage point for all aggregated data. The sensor network performs all necessary steps automatically and performs pre-

calculations such as averaging and transformations already on the devices to save bandwidth. The data is transferred directly and automatically to the database and displayed in the web application.

9 Web-based result publication

The results of the individual projects are visualized by a web application. A visualization offers the end users the possibility to quickly capture and process the data and to estimate the status of the structure.

The goal is a web application that can be accessed from as many end devices as possible in order to provide the authorized user group with the greatest possible flexibility..

On the start page, the most important information for authorized users to assess the structure status is presented in tabular form.

There are four different categories displayed. Weather and climate data, the status of the measuring systems, the status of the structure (including expansion joints and bearings), traffic data and status data. These categories contain further subcategories. Figure 6 shows a screenshot of the status page and the categories.

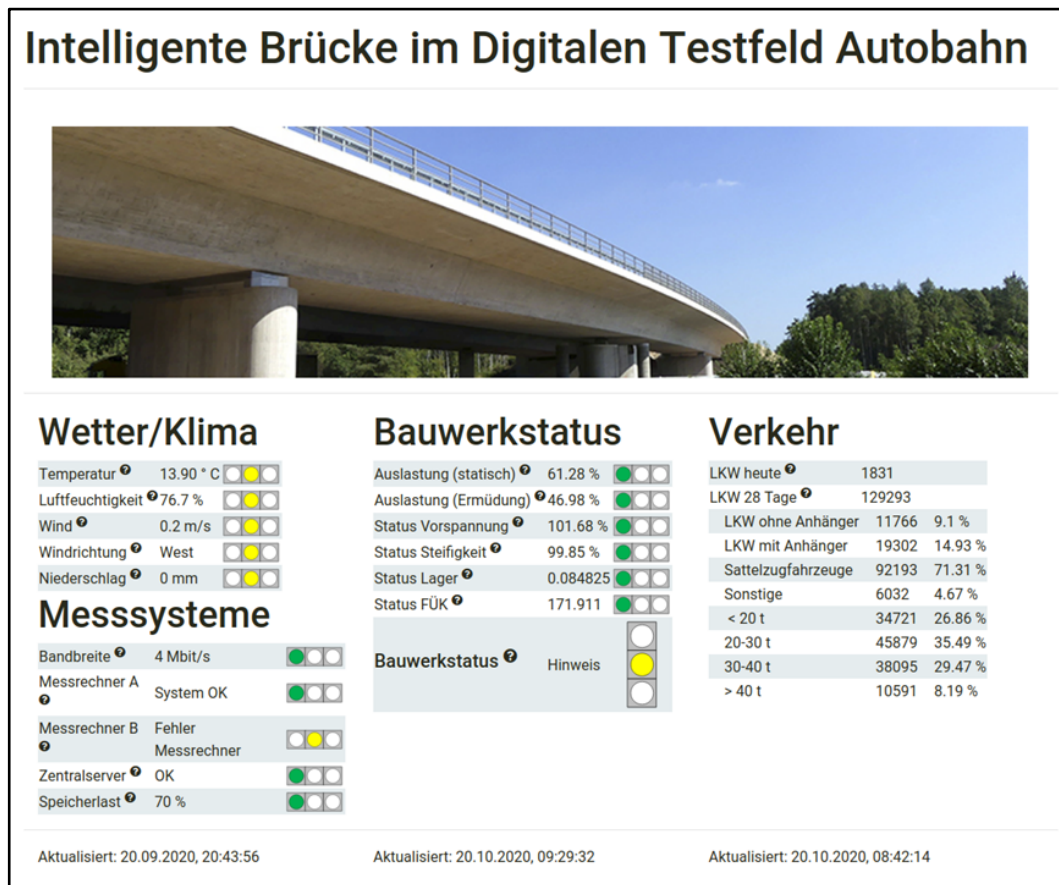


Figure 6 Overview of the categories (screenshot of the web-based result publication)

Only the most important data are presented in order to make the cognitive load manageable for the users.

For a user-friendly operation, ample metaphors are used to indicate the status of the individual subsystems. The overall status results from a logical AND operation of the subsystem statuses. The threshold values of the individual traffic lights are represented by a suitable information modal.

By using the navigation function selected user groups can get to the overview of the installed measurement systems.

Here general information for all subsystems is available. The sub-systems are described and on request their individual components are shown and explained.

It is also possible to navigate to the sensor data and processed data of the individual systems.

The views of the sensor data are similar to each other in order to provide a uniform impression and a quick overview. A schematic bridge section is used to illustrate where a measuring point is located. This is further specified by means of a measuring cross section.

The displayed measuring range can be selected by a mouse click on a data range field. In a popup a calendar is shown, which presents different defined intervals as a selection option. Self-defined intervals can be realized by mouse clicks in the calendar display itself. A mouse click on the button "Reload" updates the view.

The web application can be reached via an Apache proxy on port 80 and 443. All requests to subordinate components are managed by the Apache proxy.

All components are stored in docker containers. These are minimally equipped virtual machines, which are encapsulated by virtual networks. This has the advantage that in case of corruption only single components are affected. Furthermore, the deployment of a new system instance can be realized by a few console commands on a computer with any operating system.

The weather data of the German Weather Service is managed by an extra server, because for offering the data an FTP server must be integrated, which in turn makes the data available via REST.

Additionally, administration tools like PhpMyAdmin are available for direct administration of the database.

The web application itself is supported by a nginx server and is delivered to requesting clients. The delivered web application makes corresponding requests to the Apache Proxy and thus requests dynamic content and processed measurement data. The request is sent to the HTTP-REST interface and from there it communicates with the SQL database.

The Angular 7 framework was used to develop the frontend. With this framework it is possible to create modularized web applications. Furthermore, it contains numerous standardized tools, such as Bootstrap 4.3, which can be used to design a web application for multiple devices. Angular 7 is based on the principle of modularization, taking into account the separation of areas of responsibility. Each sense component, which is displayed in the browser, is assigned a set of components that manage it.

10 Summary

This short report documents the processing of the research project "Digitales Testfeld Autobahn – Smart Bridge - Synchronization of several encoders".

Within the scope of the project, existing algorithms and methods were applied and further developed in order to detect vehicles driving over the bridge and to determine characteristic values of the condition of the bridge from the measurement data of the RTMS measurement system. The main focus of the project was the realization of the fully automated data evaluation, data preparation and data publication on site.

The result shows that this goal could be achieved comprehensively. All evaluations of the considered parameters and data are running in an automated form. Furthermore, it shows that the measuring system RTMS has delivered and continues to deliver reliable data and results over a very long period of time (at the status of the final report over 4 years) with almost no failures.

The synchronization of measurement data and results from different, heterogeneous measurement systems, which was considered an additional focus at the beginning of the project, could be solved by implementing existing technologies for synchronization of computer clocks (NTP). Conceivable optimizations for future applications can only be found in

the design of redundancies in case of failures of individual central components of the overall system.

With regard to the wireless sensor network, possible applications and limits of use could be shown.

The web application was continuously developed in an iterative process to meet the requirements of all project partners. All aggregated data are made available through a suitable navigation structure and are summarized and displayed on a status page.

Within the parallel running project "Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm" the entire system will be operated for another year under.

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	18	4.5	Testbetrieb der erarbeiteten Synchronisationslösung	45
2	Untersuchtes Referenzbauwerk.....	20	4.5.1	Technische Grundlagen	45
3	Installierte Messsysteme.....	21	4.5.2	Evaluierung der Zeitsynchronisation.....	45
3.1	Messsystem RTMS.....	21	5	Verkehrserkennung aus Messdaten RTMS	54
3.1.1	Installation	21	5.1	Eingesetzte Methodik der Verkehrserkennung.....	54
3.1.2	Komplettsystem.....	23	5.1.1	Grundlagen	54
3.2	Videosystem.....	31	5.1.2	Prinzipielle Umsetzung.....	54
3.2.1	Installation	31	5.1.3	Ermittlung der Fahrzeuggesamtgewichte	54
3.2.2	Komplettsystem.....	31	5.1.4	Auswertung von Kalibrierfahrten.....	56
3.3	Drahtloses Sensornetz.....	32	5.2	Erprobung der umgesetzten Methodik...	77
3.3.1	Bestandteile.....	32	5.2.1	Fahrzeugidentifikation	77
3.3.2	Topologie	32	5.2.2	Gesamtgewichte	82
3.3.3	BridgeConnector.....	37	5.2.3	Validierung mit Daten der Kalibrierfahrten vom 30.09.2016.....	84
3.3.4	Datenbank.....	37	5.2.4	Validierung mit Daten der Kalibrierfahrten am 22.04.2018	86
3.4	Architektur des Gesamtsystems.....	39	5.3	Ergebnisse der Verkehrserkennung RTMS	90
4	Zeitsynchronisation zwischen den Systemen	41	5.4	Quervergleich der Ergebnisse der Verkehrserkennung.....	97
4.1	Grundlagen	41	5.4.1	Daten aus April 2018.....	97
4.2	Problemanalyse.....	41	5.4.2	Daten aus Januar 2019.....	99
4.3	Zeitsynchronisationslösungen	41	6	Ermittlung von Bauwerkskennwerten (Widerstand) aus Messdaten RTMS	101
4.3.1	Algorithmen	42	6.1	Vorbemerkungen	101
4.3.2	NTP an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn	43	6.2	Ermittlung der Eigenfrequenzen	101
4.4	Technische Umsetzung	44	6.3	Aufbereitung der Eigenfrequenzen	104
4.4.1	Kompatibilitätsprüfung von Zeitsynchronisationsmethoden für heterogene Sensornetzwerke	44	6.3.1	Entwicklung der Eigenfrequenzen über die Zeit.....	104
4.4.2	Entwicklung und Implementation einer Zeitsynchronisationsmethodik für die beschriebene Problematik	44	6.3.2	Beziehung zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft.....	106
4.4.3	Software und Betriebssystemanpassungen der Projektpartner für die Ermöglichung einer Zeitsynchronisationslösung	44	6.3.3	Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzzeiteffekten	107
4.4.4	Integration der Zeitinformation in die Messdatenerhebung	44			

6.4	Ableitung von Statuskennwerten für den Widerstand	119	10.2	Entwicklung eines Neigungssensorknotens für den Ergebnisvergleich	142
6.4.1	Vorspannung	119	10.2.1	Maximale Leistungsfähigkeit der Sensorknoten Hardware	142
6.4.2	Bauwerkssteifigkeit	121	10.2.2	Kalibrierung des Neigungssensors	142
7	Ermittlung von Bauwerkskennwerten (Einwirkungen) aus Messdaten RTMS.....	122	10.2.3	Übertragungsbandbreite im Sensornetzwerk	143
7.1	Vorbemerkungen	122	10.2.4	Flaschenhals durch Baudraten	143
7.2	Statische Beanspruchungen aus Verkehr	122	10.2.5	Flaschenhals durch freien Gerätespeicher	143
7.2.1	Methodik der Ermittlung	122	10.2.6	Flaschenhals durch Batterieleistung	143
7.2.2	Aufbereitung	123	10.2.7	Messkonzept	143
7.2.3	Ableitung von Statuskennwerten für statische Beanspruchungen aus Verkehr	127	10.3	Testbetrieb des entwickelten Neigungssensorknotens vor Ort	144
7.3	Ermüdungsbeanspruchungen aus Verkehr	127	10.4	Evaluation von Performanz sowie Energieverbrauch des entwickelten Sensorknotens	144
7.3.1	Methodik der Ermittlung	127	11	Automatisierung Vor-Ort	146
7.3.2	Aufbereitung	128	11.1	Vorbemerkungen	146
7.3.3	Ableitung von Statuskennwerten für die Ermüdungsbeanspruchungen aus Verkehr	132	11.2	Messsystem RTMS	146
8	Bauwerkskenndaten aus dem Sensornetz.....	133	11.2.1	Ablauf der Auswertungen vor Ort	146
8.1	Risse	133	11.2.2	Datenmanagement systemintern	148
8.2	Neigung	133	11.2.3	Datensicherung	148
8.3	Rissbreiten mittels Kraftsensoren	133	11.2.4	Kontroll- und Zugriffsmöglichkeiten	148
8.4	Temperaturen	134	11.3	Sensornetzwerk	149
9	Referenzmöglichkeiten für einen Ergebnisvergleich der Kennwerte ...	135	11.3.1	Erprobung und Optimierung der entwickelten Methoden, Ansätze und Algorithmen für das Sensornetz	149
10	Sensorentwicklung.....	139	11.3.2	Automatisierte Uploads mit REST	151
10.1	Erstellung eines Konzeptes für einen Neigungssensor	139	11.4	Verarbeitung der auflaufenden Daten..	152
10.1.1	Prototyp Neigungssensor Segeberg....	139	11.4.1	Vorbemerkungen	152
10.1.2	Konzeption Neigungssensor Nürnberg	140	11.4.2	Netzwerkspeicher und Datenbanken ...	152
10.1.3	Prototyp Neigungssensor Nürnberg	141	11.4.3	Drahtloses Sensornetzwerk	152
			12	Ergebnisse als Web-Publikation	154
			12.1	Allgemeines	154
			12.2	Konzeption der Web-Publikation	154
			12.2.1	Allgemeines	154

12.2.2	Die WEB-Publikation der intelligenten Brücke.....	155
12.2.3	Der Aufbau	155
12.2.4	Architektur	157
12.2.5	Datenmodell	158
12.2.6	REST-Schnittstelle	169
12.3	Entwicklung einer Webbasieren Ergebnispublikationsplattform für verschiedene Endgeräte	170
12.3.1	Allgemeines.....	170
12.3.2	Smartphones.....	170
12.3.3	Desktop-PC.....	170
12.3.4	Tablets	172
12.4	Einarbeitung von neuen Auswertungs- und Ergebnisdaten in die entwickelte Webbasierte Ergebnispublikationsplattform	173
12.5	Evaluation und Testbetrieb der Ergebnisplattform	173
13	Zusammenfassung	174
	Literatur	175
	Bilder	177
	Tabellen	186

Der Anhang zum Bericht ist im elektronischen
BAST-Archiv ELBA unter:

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

1 Einleitung und Zielstellung

Deutschland verfügt über eine gut ausgebaute Infrastruktur. Deutschland ist auch ein hochfrequentiertes 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.

Im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Straße des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) wurden Forschungsvorhaben gefördert, die sich u. a. mit der Entwicklung neuer Konzepte und Technologien zur o. g. Fragestellung befassen.

Mit dem Forschungsprojekt Roadtraffic Management System (RTMS, vgl. [16]) aus dem Innovationsprogramm Straße wurde ein Konzept und ein umgesetztes technisches Equipment für Straßenbrücken entwickelt, welches eine Ermittlung und Auswertung der Daten des überfahrenden Verkehrs erlaubt. Es handelt sich um die Entwicklung eines modularen automatisierten Systems zur Verkehrserfassung, zur indirekten Wägung der Gesamtgewichte und der Achsen des Schwerverkehrs. Da die indirekte Wägung über brückenspezifische Kenndaten realisiert wird (Verformungen oder Dehnungen), dienen diese Daten als Grundlage zur Beschreibung und Entwicklung von Zustandsmerkmalen der Brücke.

Im Ergebnis der Forschung zu RTMS, die von der Professur Verkehrsbau der Bauhaus-Universität Weimar und dem Ingenieurbüro Prof. U. Freundt (IBF) getragen wurde, konnten eine Reihe kommerzieller Projekte durch das IBF akquiriert werden. Es

wurden Messsysteme an Brückenbauwerken installiert, Messdaten über mehrere Monate aufgezeichnet und die Daten zur Identifikation von Fahrzeugen, die die Brückenbauwerke passierten, mit Eigenentwicklungen von Auswertungsalgorithmen abgeleitet. Diese Daten dienen als Grundlage für weitere Analysen zur Bestimmung des Verkehrslastniveaus, der Auslastung des Brückenbauwerkes und von Ermüdungsbeanspruchungen.

Mit dem Forschungsprojekt iBAST aus dem Innovationsprogramm wurde der Einsatz von drahtlosen Sensornetzen getestet.

Langfristiges Ziel des Forschungsprojektes ist es, von einzelnen Fallstudien zu einer flächendeckenden Überwachung von Brücken mittels Sensornetzen überzugehen. Dafür muss der Aufwand für den Einsatz eines Sensornetzes für die Überwachung einer Brücke substanziell reduziert werden. Da jede Brücke ein Unikat mit individuellen Schäden und Besonderheiten darstellt, soll das zu entwickelnde Überwachungssystem einfach und kostengünstig an eine Brücke individuell angepasst werden können, indem ähnlich einem Baukastensystem aus einer Menge vorgefertigter Hardware- und Softwarekomponenten diejenigen zusammengestellt werden können, die für eine bestimmte Brücke notwendig sind.

Das Projekt iBAST wurde durch das Institut für Telematik der Universität zu Lübeck getragen.

Alle bisherigen Projekte betrafen Bestandsbrücken und verfolgten das Ziel eines objektspezifischen Verkehrslastmodells bzw. einer Überwachung eines vorhandenen Schadens.

Eine Weiterentwicklung des Einsatzes von Überwachungssystemen für Brücken, die von Beginn der Verkehrsfreigabe an und folgend für einen Dauerbetrieb bestimmt sind, fehlt (national und international).

Mit der Pilotstudie „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ Brücke sollen gemäß einer Konzeption der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die ausgewählten, bisherigen Entwicklungen umfangreich demonstriert und damit bundesweit zugänglich gemacht werden.

Zu diesem Zweck hat die Bayerische Straßenbauverwaltung im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geplanten Digitalen Testfeldes Autobahn das Bauwerk BW402e im Bereich des AK Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg (Verbindungsrampe A3 zur A9) zur Demonstration, Erprobung und Weiterentwicklung ausgewählter Bausteine einer Intelli-

genten Brücke vorgesehen. Die Brücke ist ein Neubau, der Bauherr ist die Autobahndirektion Nordbayern, die Bauausführung lag bei der Firmengruppe Max Bögl und die Ausführungsplanung erfolgte durch die Fa. HFR Ingenieure GmbH.

Im Fokus der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ stehen die Schwerpunkte „Einwirkungsüberwachung und Analyse“, „Intelligente Fahrbahnübergänge und Lager“ sowie „Intelligente Sensornetze“.

Der Schwerpunkt Einwirkungsüberwachung und Analyse ist Inhalt des Projektes RTMS und wird durch das Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt (IBF) bearbeitet.

Der Schwerpunkt „Intelligente Sensornetze“ ist Inhalt des Projektes iBAST und wird durch das Institut für Telematik der Universität zu Lübeck (UzL) bearbeitet.

Der Schwerpunkt „Intelligente Fahrbahnübergänge und Lager“ ist Inhalt des Projektes „Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge u. intelligentes Kalottenlager“, welches auch im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Straße des BMVI gefördert wurde. Er wird durch die Maurer Engineering GmbH in einem gesonderten Forschungsprojekt bearbeitet.

Die Forschungsprojekte „Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten“ und die Projekte „Intelligente Schwenktraversen-Dehnfuge und intelligentes Kalottenlager“ sind aus technischen und formalen Gründen getrennte Projekte, die jedoch nur als Ganzes die Inhalte der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ beschreiben. Deshalb werden in den Berichten zu den genannten Projekten entsprechende Querbeziehungen dargestellt. Die Projektbearbeitung geschieht in enger Kooperation.

Den Kern der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ bilden die Messsysteme mit der Datenanalyse, Bewertung und Visualisierung von Ergebnissen sowie dem Datenmanagement.

Im Bauwerk 402e am Autobahnkreuz Nürnberg sind fünf verschiedene Messsysteme installiert. Dabei sind konventionelle Systeme und Systeme in Erprobung kombiniert. Die Messfrequenzen variieren zwischen 0,25 Hz und 2000 Hz.

Die fünf Messsysteme sind:

Ein im und am Kalottenlager integriertes Lagermesssystem (Maurer Engineering GmbH)

Ein im und am Fahrbahnübergang integriertes Fahrbahnübergangsmesssystem Maurer Engineering GmbH)

Ein Messsystem an der Brücke, am Lager und am Fahrbahnübergang (RTMS)

Ein optisches Messsystem (Kamera) zur Lieferung von Referenzen für die Fahrzeugerkennung (RTMS)

Ein drahtloses Sensornetz an der Brücke mit Erfassungen von Temperaturen, Rissveränderungen und Bewegungen (iBAST)

Die unterschiedlichen Systeme, die unabhängig voneinander entwickelt wurden, dienen so einem gemeinsamen Ziel, gestatten Referenzen und einem ganzheitlichen Erfahrungsgewinn.

Dies setzt jedoch eine Synchronisation der Messdaten voraus.

Die Lösung dieser Aufgabe wird in einem gestuften, aber konsistenten Verfahren mit folgenden Schwerpunkten realisiert.

Analyse der vorhandenen Messsysteme hinsichtlich Technik und erforderlicher exakter Zeitsynchronisation und Analyse möglicher Zeitsynchronisationsverfahren

Analyse der Messdaten des fließenden Verkehrs aus dem Informationsmesssystem RTMS und Applikation der Ergebnisse in die Auswertalgorithmen zur Verkehrserkennung

Ableich der Verkehrserkennung aus RTMS mit den Ergebnissen aus dem Fahrbahnübergang und der Anzahl der Fahrzeuge aus dem System Kalottenlager

Ermittlung der Verkehrserkennung aus den synchronisierten Daten RTMS, Kalottenlager und Fahrbahnübergang

Ermittlung von Kennwerten der Beanspruchungen aus Verkehr und des Widerstandes des Bauwerkes

Automatisierung der Algorithmen

Weiterentwicklung relevanter Sensoren und des Sensornetzes im Rahmen eines Baukastensystems

Optimierung und Weiterentwicklung der Web-basierten Publikationen von Daten und Ergebnissen

2 Untersuchtes Referenzbauwerk

Von der Bayerischen Straßenbauverwaltung wurde das im Jahr 2016 neu errichtete Bauwerk 402e im Bereich des AK Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg vorgeschlagen (Verbindungsrampe A3 zur A9).

Es handelt sich um eine gekrümmte vierfeldrige Spannbeton-Hohlkastenbrücke mit begehbarem einzelligen Hohlkasten, mit einer maximalen Stützweite von 45 m und einer Gesamtlänge zwischen den Endauflägern von 155,75 m, einer Gesamtbreite des Überbaus von 15,40 m und einer Brückenfläche von 2445,3 m². Die Querneigung beträgt 5,5 %. Das Bauwerk (Bild 1) ist sowohl intern als auch extern in Längsrichtung vorgespannt. Die Herstellung erfolgte im Taktschiebverfahren.

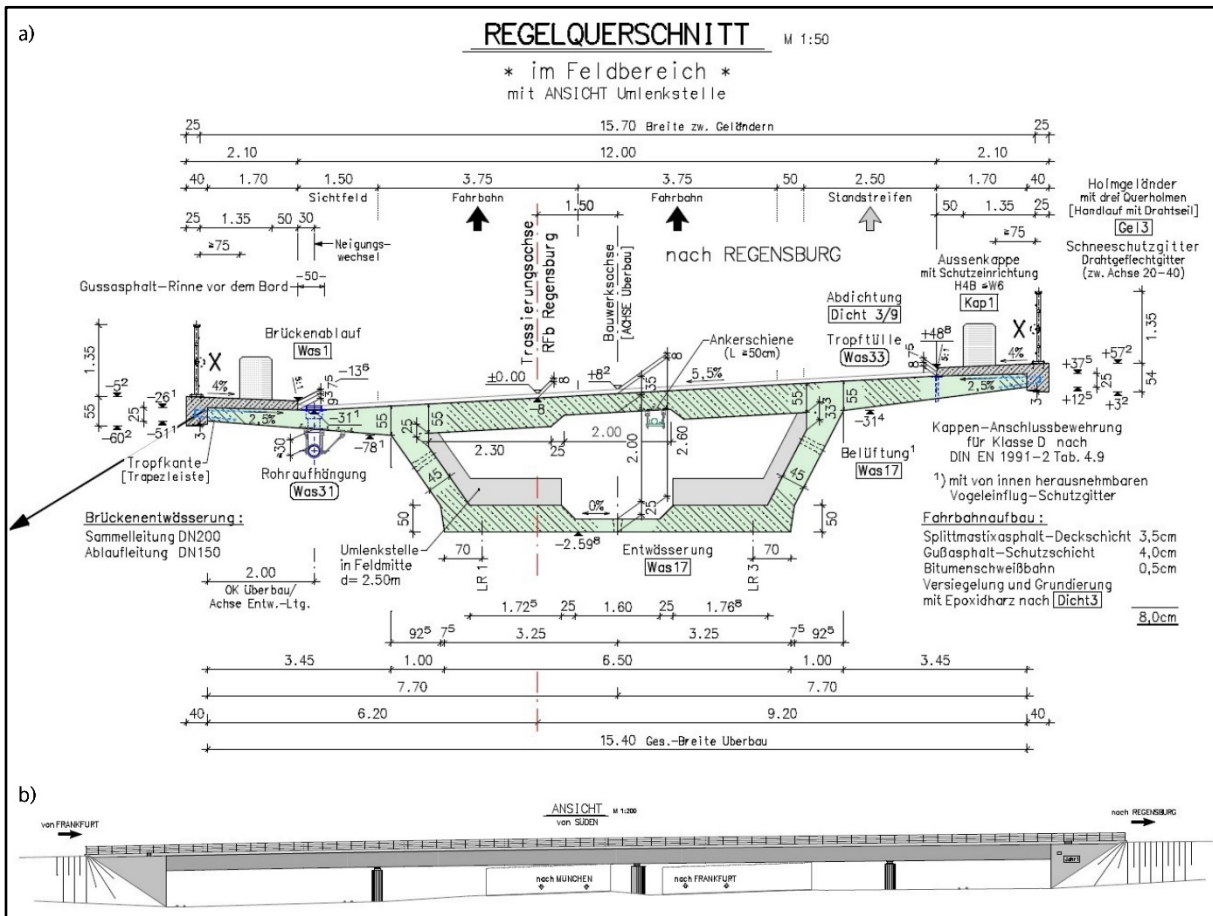


Bild 1: Übersicht Bauwerk, (a) Regelquerschnitt und (b) Ansicht aus Richtung Süden

3 Installierte Messsysteme

3.1 Messsystem RTMS

3.1.1 Installation

Die Installation des Messsystems kann in zwei Abschnitte unterschieden werden. Da es erstmals möglich war eine neu errichtete Brücke zu in-

strumentieren, bestand die Möglichkeit, auch Sensoren direkt im Betonquerschnitt zu installieren. Hierbei wurden Dehnungsmessungen an der schlaffen Bewehrung sowie Temperaturerfassungen im Querschnitt realisiert. Aus diesem Grund war es erforderlich diese Sensoren schon in der Bauphase für das Messsystem in Labor und Werkstatt vorzubereiten und im Bauwerk zu installieren.

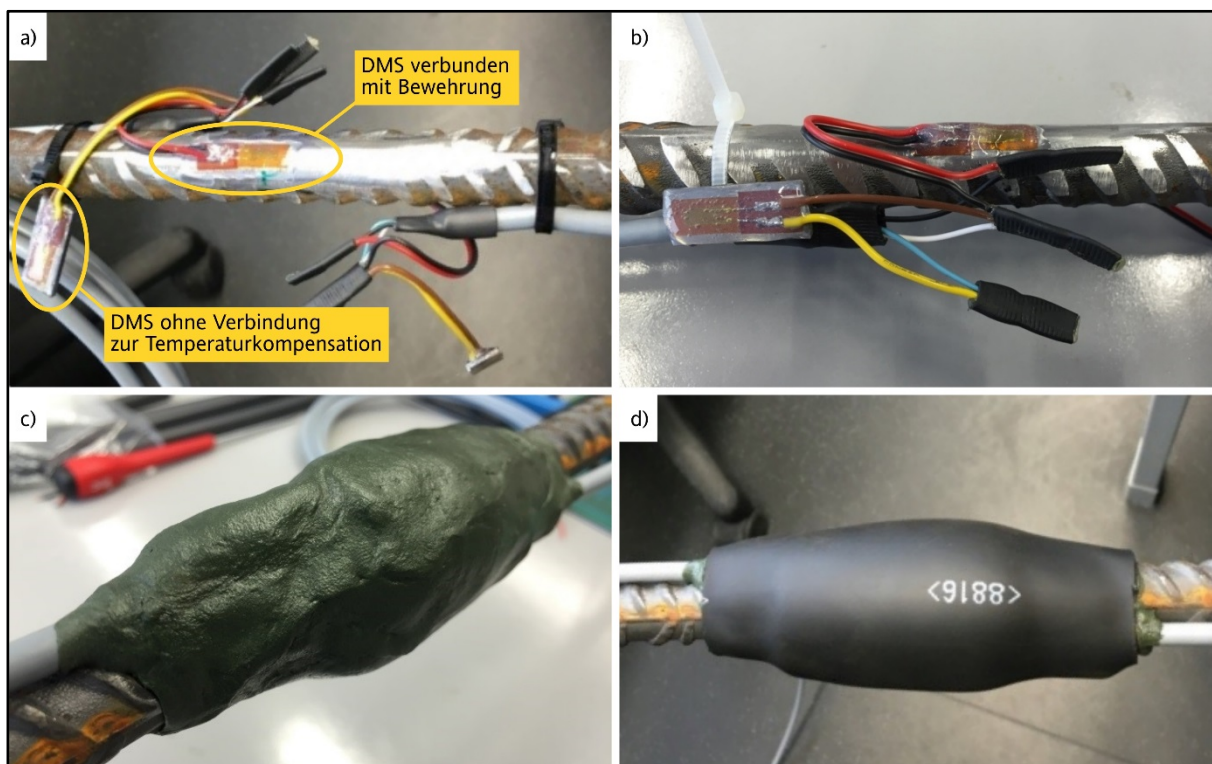


Bild 2: Herstellung der Dehnungssensoren zur Installation im Betonquerschnitt. (a, b) DMS verklebt auf vorbereitetem Bewehrungsstab und entkoppelt zur Kompensation der Temperatureinflüsse. (c) Dauerelastische Dichtungsmasse zum Schutz der Elektrik und (d) Stutzhülle zur Sicherung gegen mechanische Beschädigung während des Einbaus auf der Baustelle und der Betonarbeiten.

Bild 2 zeigt die vorbereitenden Arbeiten in Labor und Werkstatt für die im Betonquerschnitt zu installierenden Dehnungssensoren. Die Fertigung der Sensoren erfolgte im Oktober 2015. Verwendung fanden je Messstelle zwei Dehnmessstreifen (DMS), von denen einer auf einem Bewehrungsstab geklebt wurde und ein zweiter, zur Kompensation von Temperatureinflüssen auf die Messung, mechanisch entkoppelt angeschlossen ist (Bild 2 a, b). Der Einbau der Dehnungssensoren in die Brücke erfolgte in Anpassung an den Baufortschritt am 03.11.2015. Aufgrund möglicher Beschädigungen der DMS während der Bauarbeiten (Betonage) wurden an den ausgestatteten Bewehrungsstäben auf

der Ober- und Unterseite DMS angebracht. Nach der Fertigstellung des Bauwerkes konnte festgestellt werden, dass alle an den Bewehrungsstäben installierten DMS korrekt Werte liefern. Für die laufenden Messungen werden gegenwärtig die DMS an der Unterseite der Bewehrungsstäbe verwendet. Eine zukünftige dauerhafte oder auch temporäre Aufzeichnung der Werte der DMS auf der Oberseite der Bewehrungsstäbe ist möglich. Bild 3 zeigt die Situation bei Einbau der Sensoren während des Verlegens der Bewehrung im Vorschubelement 2 des Brückenüberbaus. Zu erkennen ist, dass die Verkabelung geschützt in Hüllrohren verlegt ist.

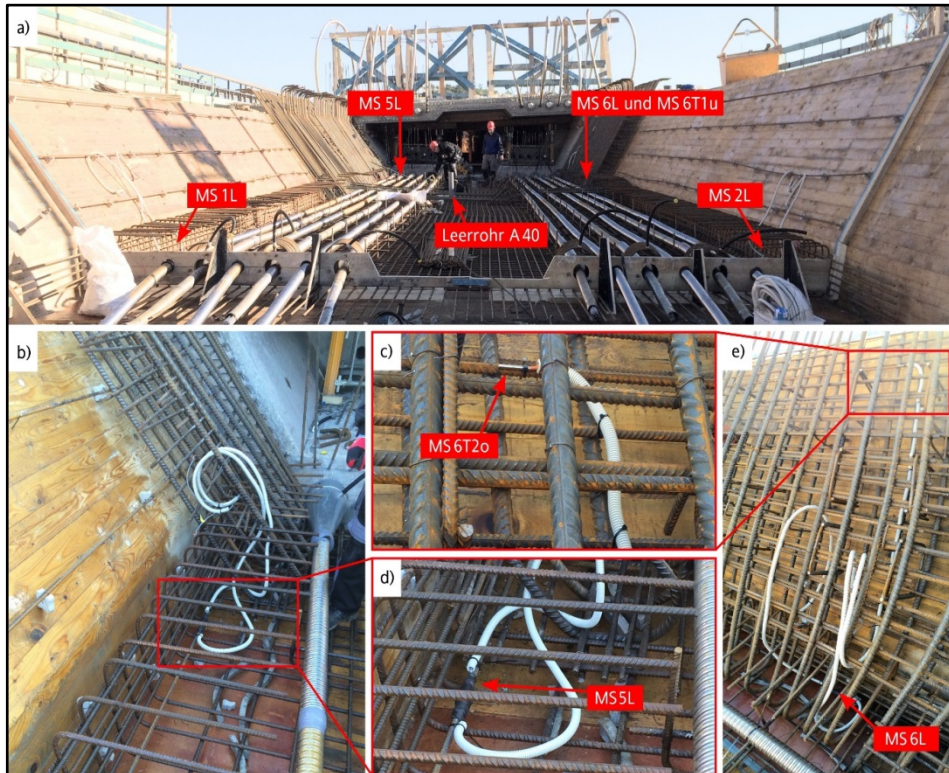


Bild 3: Einbau der im Brückenquerschnitt befindlichen Dehnungs- und Temperatursensoren in den Fertigungstakt/Vorschubelement 2. (a) Untere Messstellen der Messachsen A und B. (b, d) Dehnmesssensor MS 5L, (d) Temperatur MS 6T2o und (e) Messstellen MS 6T2o, MS 6T1u und MS 6L.

Die Installation der Messtechnik, die nicht in den Brückenquerschnitt integriert ist, erfolgte nach der Fertigstellung der Brücke in der 27. KW gemäß dem Messkonzept. Die betroffenen Sensoren sind:

Dehnmessstreifen (DMS) und induktive Wegaufnehmer (IWT), die an Messstellen im inneren Brückenüberbaus an der Unterseite der Fahrbahnplatte installiert sind,

Dehnmessstreifen (DMS), die an der Unterseite der Quertraversen der Fahrbahnübergangskonstruktion (FÜK) installiert sind,

induktive Wegaufnehmer (IWT), die am nördlichen Lager der Achse 40 installiert sind,

Beschleunigungssensoren (PBC), die auf den externen Spanngliedern und einem Umlenksattel installiert sind,

zwei Messschränke im Brückenüberbau an Achse 40 und 50, welche Messrechner, Medienwandler, Messverstärker, Netzwerktechnik und Stromversorgung beinhalten und

die Verkabelung der Komponenten untereinander.

3.1.2 Komplettsystem

Das Messkonzept ist daraufhin ausgelegt, Kenngrößen der Brücke zu erfassen, die eine Zustandserkennung des Bauwerks ermöglichen und es zudem erlauben, Verkehrsdaten mit hinreichender Genauigkeit indirekt abzuleiten. Die installierten Sensoren konzentrieren sich im Überbau an 4 Messquerschnitten (A, B, C und D), der Übergangskonstruktion (Messachse E) und dem nördlichen Lager der Bauwerksachse A40 (vgl. Bild 4, Bild 5 und Bild 6).

Zusätzlich sind die externen Spannglieder mit Beschleunigungssensoren ausgestattet (vgl. Bild 4). Diese dienen der Ermittlung der Spannkraft über die Zeit. Die Vorspannkraft kann indirekt anhand des Schwingverhaltens der externen Spannglieder abgeleitet und damit messtechnisch erfasst werden. Ein weiterer Beschleunigungssensor (PBC) ist auf dem zugehörigen Umlenksattel (Nordseite) in Feld 4 der

Brücke analog montiert und dient dazu, dynamische Anregungen identifizieren und zuordnen zu können. Bild 4 zeigt die Positionen und Bezeichnungen der Beschleunigungssensoren (PBC) im Brückenlängsschnitt.

Am nördlichen/kurveninneren Kalottenlager von Achse 40 werden an allen 4 Punkten des Lagers induktive Wegaufnehmer (IWT) installiert. Drei dieser Sensoren (MS 27v, 28v und 29v) messen in vertikaler Richtung und ermöglichen die Ermittlung der räumlichen Überbauverdrehung und der Lagerkompression. Der vierte Sensor misst die relative Verschiebung des Überbaus an dieser Stelle in horizontaler Richtung entlang der Brückenlängsachse (MS 30h).

In den Bild 7 und Bild 8 Fotos der installierten Messtechnik aufgeführt.

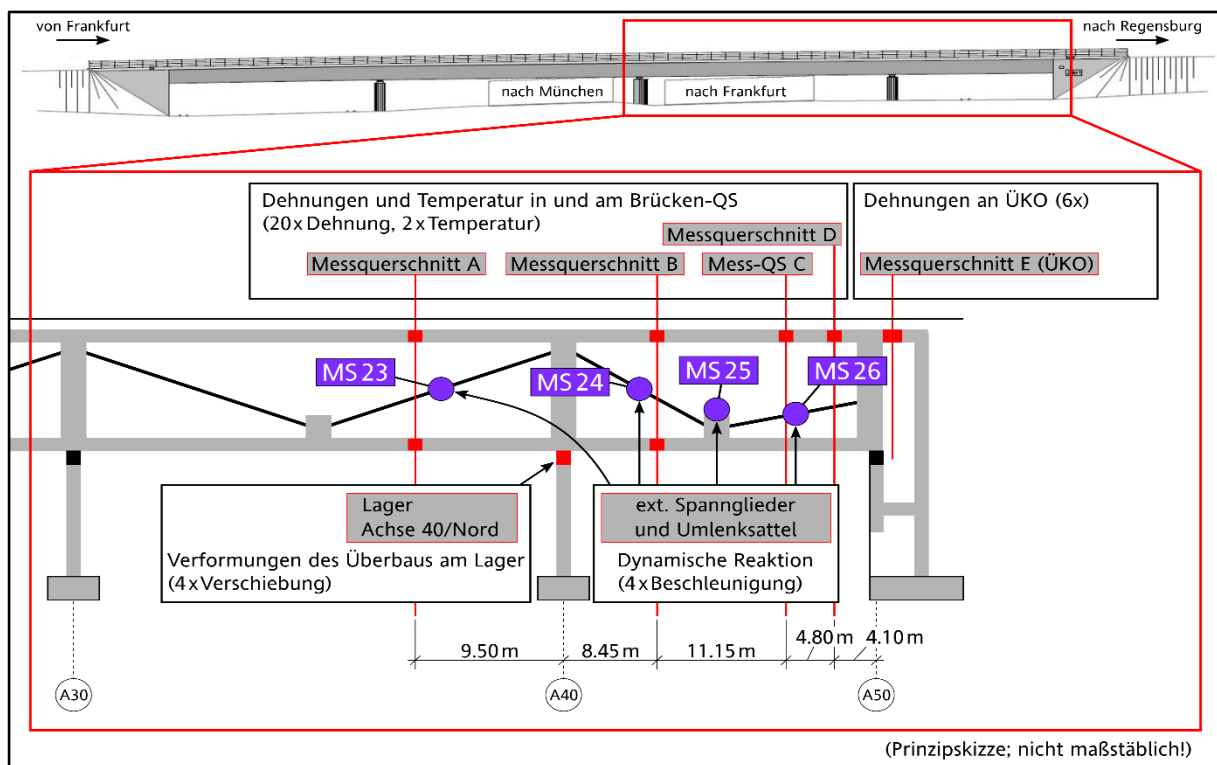


Bild 4: Lage der RTMS Sensoren im Bauwerk.

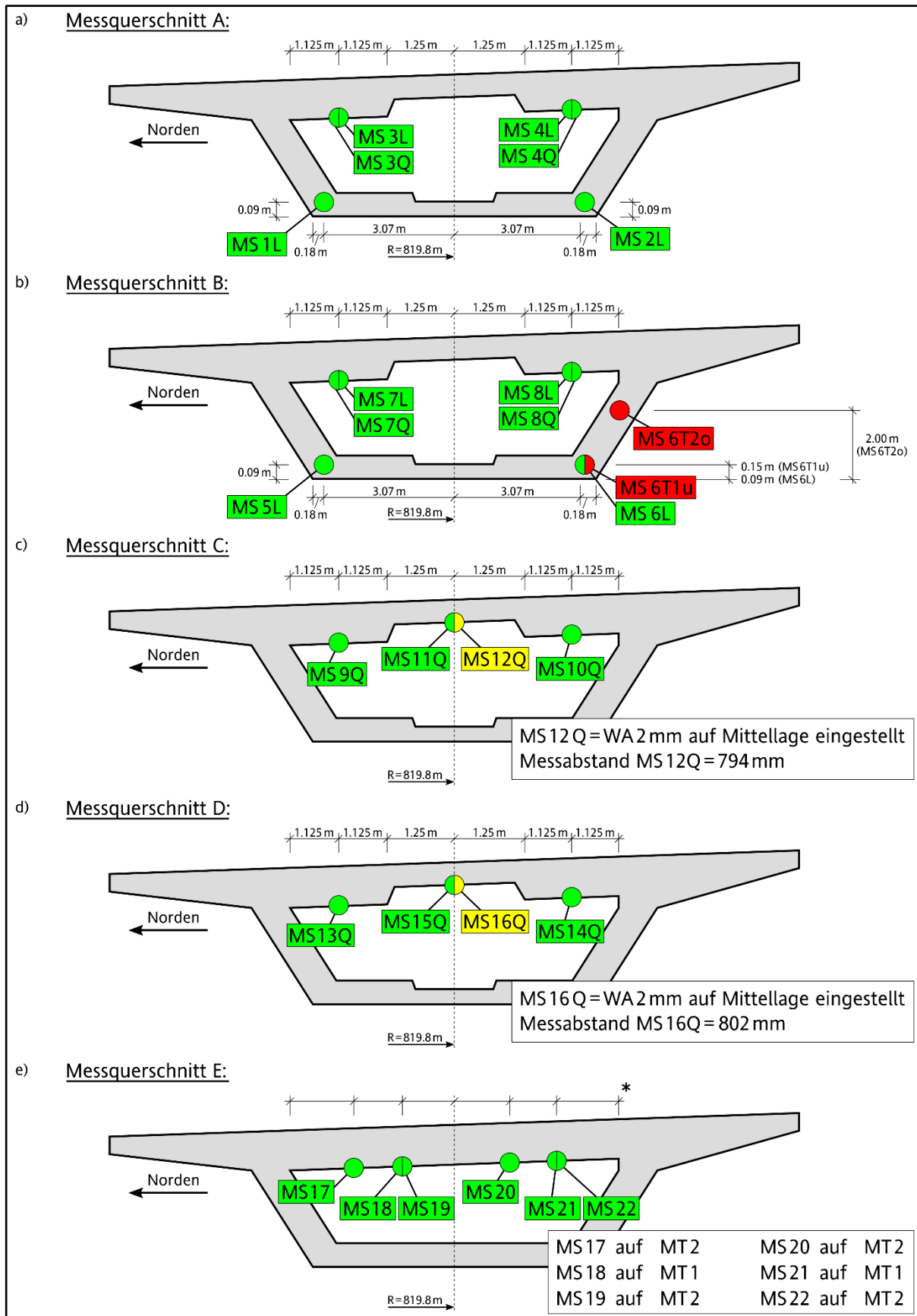


Bild 5: Lage und Bezeichnung der Messstellen in den Messquerschnitten des Überbaus

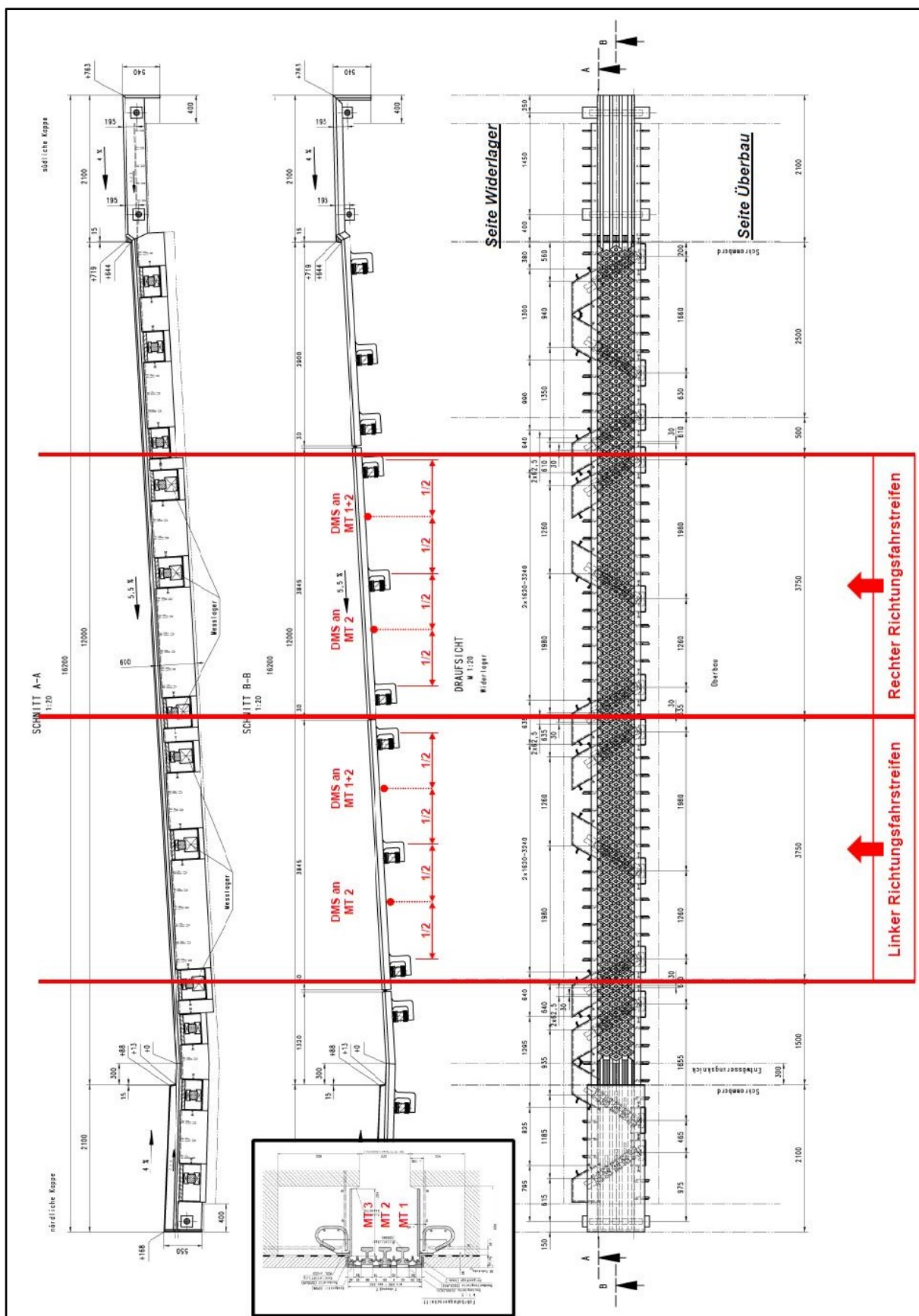


Bild 6: Lage der Messstellen an der Übergangskonstruktion.

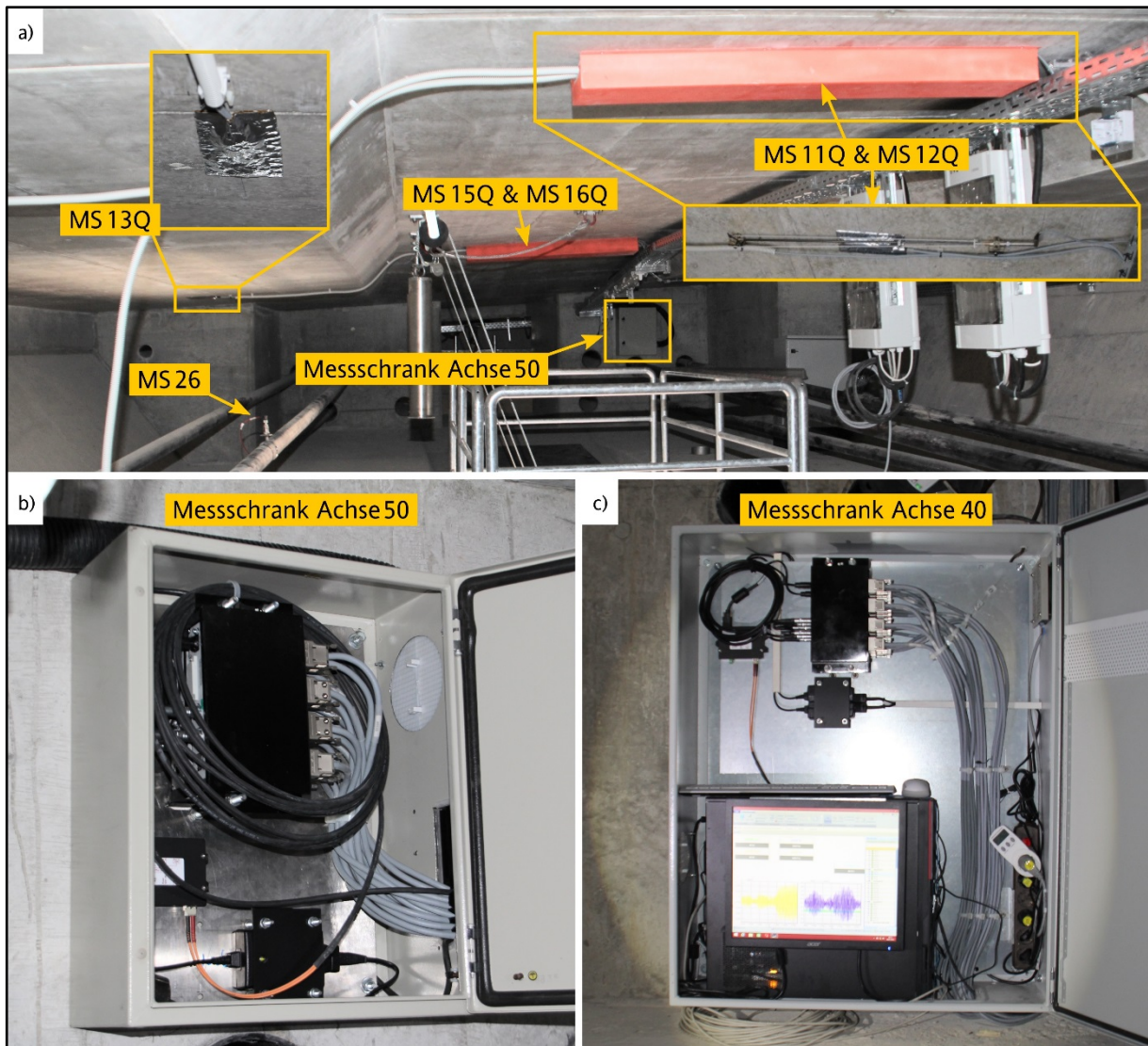


Bild 7: (a) Blick in Richtung Achse 50 auf die Messachsen C und D mit Dehnmessstreifen (DMS; z.B. MS 13Q) und induktiven Wegaufnehmern (IWT; unter roter Abdeckung), (b) Messschrank an Achse 50 und (c) Messschrank an Achse 40.

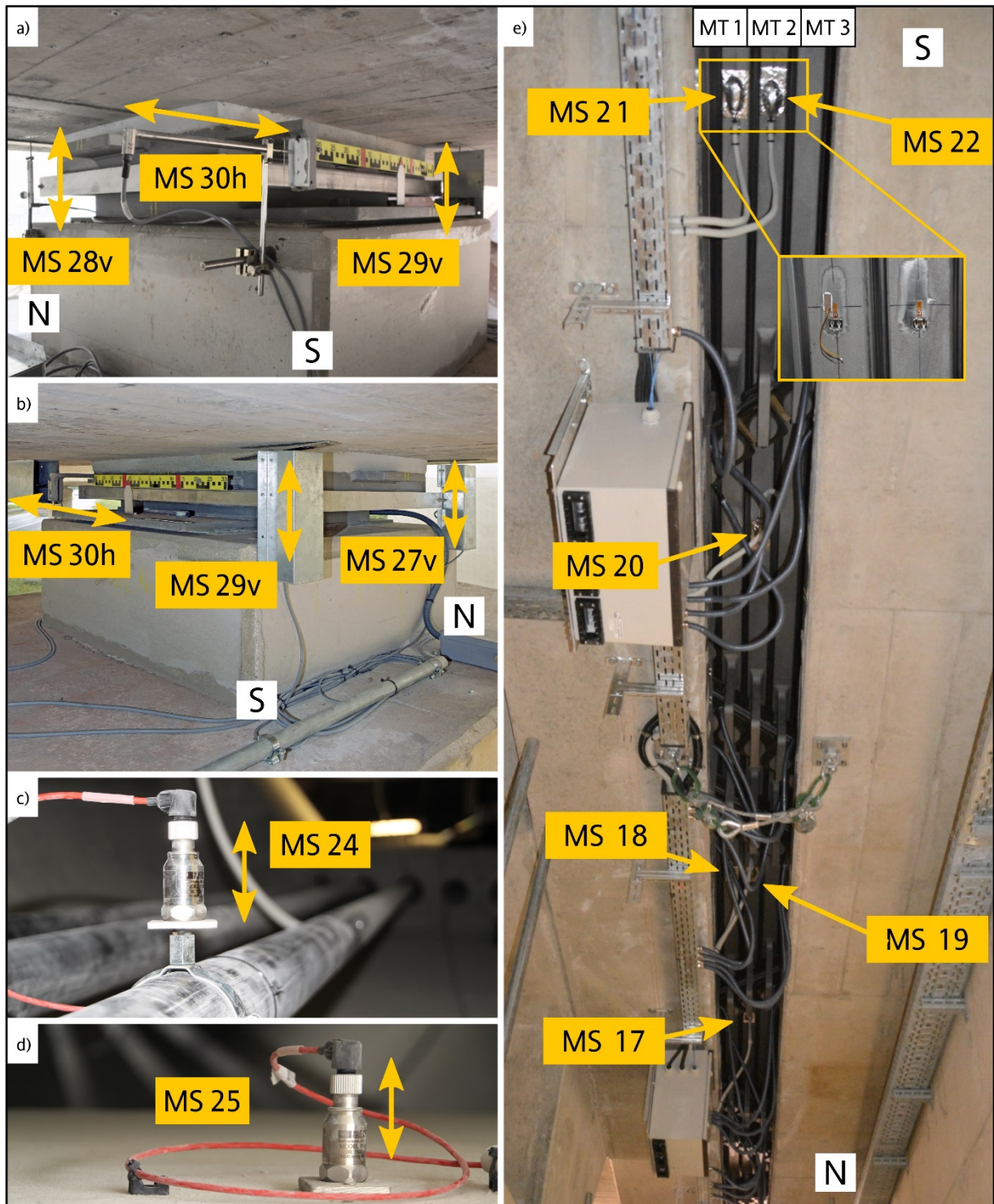


Bild 8: Messstellen (a, b) am nördlichen Lager der Achse 40 in Form von induktiven Wegaufnehmern (IWT), (c) Beschleunigungssensor (PBC) zentrisch auf ein externes Spanglied montiert, (d) Beschleunigungssensor (PBC) zentrisch auf den zum instrumentierten Spanglied gehörenden Umlenksattel im östlichsten Feld 4 und (e) Dehnmessstreifen (DMS) an der Unterseite des Fahrbahnübergangs.

Die Aufzeichnung der Messdaten durch Auswertung der Sensordaten und Datenspeicherung erfolgt mit dem zu den Messverstärkern kompatiblen Programm CatMan von HBM. Das gewählte Speicherformat ist Diadem, das sich dadurch auszeichnet, die Messdaten selbst gruppiert entsprechend ihrer numerischen Darstellung byteweise in separate Dateien zu speichern (Binärdateien). Zusätzlich wird zu den reinen Messwertdateien eine Art Headerdatei erzeugt, welche Informationen zu den Messkanälen enthält und die logische Verknüpfung zu den Messdateien herstellt (*.dat). Neben dem Bezeichner des Messkanals sind in der Headerdatei unter anderem der Verweis auf die dem Kanal zugehörige Messdatei und die Positionsangaben der Messdaten innerhalb der Messdatei gegeben. Die Positionsangaben enthalten das Startbyte und die Anzahl der folgenden zusammenhängenden Bytes.

Die Headerdatei ist ohne Zuhilfenahme proprietärer Software lesbar und damit auch der Zugriff auf die Messdaten selbst ohne proprietäre Software möglich. Zusätzlich werden zwei weitere Dateien in jeden Messzyklus gespeichert. Das Set der gespeicherten Dateien besteht somit aus einer Headerdatei (*.dat), einer Binärdatei mit den Messwerten (*.r32), einer Protokolldatei mit Angaben zum Messjob (*.tsx) und einer Logdatei mit Statusauskünften der Messanlage über den Zeitraum der Datenerfassung (*.events). Die Dateinamen sind für jedes Set identisch und sind zusammengesetzt aus Namen des Messjobs und der Speicherzeit des Messjobs.

In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind alle Kanäle zusammengestellt, die in den Messdateien enthalten sind.

Messverstärker	Bezeichnung Messkanal	Einheit	Messfrequenz	Bedeutung
1	Zeit 1 - Standardmessrate	s	75 Hz	dateibezogene Zeitkoordinate für 75 Hz Messungen an Messverstärker 1
1	MS1L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 1 längs
1	MS2L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 2 längs
1	MS3Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 3 längs
1	MS3L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 3 längs
1	MS4Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 4 quer
1	MS4L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 4 längs
1	MS5L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 5 längs
1	MS6L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 6 längs
2	Zeit 2 - Standardmessrate	s	75 Hz	dateibezogene Zeitkoordinate für 75 Hz Messungen an Messverstärker 2
2	MS7Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 7 quer
2	MS7L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 7 längs
2	MS8Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 8 quer
2	MS8L	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 8 längs
2	MS27v	mm	75 Hz	Relativverschiebung MS 27 vertikal
2	MS28v	mm	75 Hz	Relativverschiebung MS 28 vertikal
2	MS29v	mm	75 Hz	Relativverschiebung MS 29 vertikal
2	MS30h	mm	75 Hz	Relativverschiebung MS 30 horizontal
3	Zeit 3 - Schnelle Messrate	s	600 Hz	dateibezogene Zeitkoordinate für 600 Hz Messungen an Messverstärker 3
3	MS23	m/s ²	600 Hz	Beschleunigung an MS 23
3	MS24	m/s ²	600 Hz	Beschleunigung an MS 24
3	MS25	m/s ²	600 Hz	Beschleunigung an MS 25
3	MS26	m/s ²	600 Hz	Beschleunigung an MS 26
4	Zeit 4 - Standardmessrate	s	75 Hz	dateibezogene Zeitkoordinate für 75 Hz Messungen an Messverstärker 4
4	MS9Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 9 quer
4	MS10Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 10 quer
4	MS11Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 11 quer
4	MS12Q	mm	75 Hz	Relativverschiebung an MS 12 quer
4	MS13Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 13 quer
4	MS14Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 14 quer
4	MS15Q	µm/m	75 Hz	Dehnung an MS 15 quer
4	MS16Q	mm	75 Hz	Relativverschiebung an MS 16 quer

Tabelle 1: Datenerhebung der RTMS-Anlage – Teil 1

Messverstärker	Bezeichnung Messkanal	Einheit	Messfrequenz	Bedeutung
5	Zeit 5 - Langsame Messrate	s	1 Hz	datebezogene Zeitkoordinate für 1 Hz Messungen an Messverstärker 5
5	Zeit 5 - Schnelle Messrate	s	600 Hz	datebezogene Zeitkoordinate für 600 Hz Messungen an Messverstärker 5
5	MS17	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 17
5	MS18	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 18
5	MS19	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 19
5	MS20	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 20
5	MS21	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 21
5	MS22	µm/m	600 Hz	Dehnung an MS 22
5	MS6T1u	°C	1 Hz	Temperatur an MS 6 unten
5	MS6T2o	°C	1 Hz	Temperatur an MS 6 oben
1	Gesamt_75Hz_NTP_ Zeit_VollTageSeitBasis_QD	d	75 Hz	Tage nach UNIX-Zeit, 75 Hz Auflösung, NTP basiert
1	Gesamt_75Hz_NTP_ Zeit_VollSekundenSeitTagStart_QD	s	75 Hz	Sekunden des aktuellen Tages nach UNIX-Zeit, 75 Hz Auflösung, NTP basiert
1	Gesamt_75Hz_NTP_ Zeit_TeilSekundenSeitTagStart_QD	s	75 Hz	Millisekunden der aktuellen Sekunde nach UNIX-Zeit, 75 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_600Hz_NTP_ Zeit_VollTageSeitBasis_QE	d	600 Hz	Tage nach UNIX-Zeit, 600 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_600Hz_NTP_ Zeit_VollSekundenSeitTagStart_QE	s	600 Hz	Sekunden des aktuellen Tages nach UNIX-Zeit, 600 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_600Hz_NTP_ Zeit_TeilSekundenSeitTagStart_QE	s	600 Hz	Millisekunden der aktuellen Sekunde nach UNIX-Zeit, 600 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_1Hz_NTP_ Zeit_VollTageSeitBasis_QE	d	1 Hz	Tage nach UNIX-Zeit, 1 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_1Hz_NTP_ Zeit_VollSekundenSeitTagStart_QE	s	1 Hz	Sekunden des aktuellen Tages nach UNIX-Zeit, 1 Hz Auflösung, NTP basiert
5	Gesamt_1Hz_NTP_ Zeit_TeilSekundenSeitTagStart_QE	s	1 Hz	Millisekunden der aktuellen Sekunde nach UNIX-Zeit, 1 Hz Auflösung, NTP basiert

Tabelle 2 : Datenerhebung der RTMS-Anlage – Teil 2

3.2 Videosystem

3.2.1 Installation

Die Projektvorbereitung insbesondere bezüglich der Planung und Konfiguration der 2 Kameras und Aufzeichnungsgeräte erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma Messtechnik-Mehl GmbH. Dazu wurde u. a. das Messsystem im Labor aufgebaut und mehrere Tage erfolgreich getestet. Die Befestigung der Kameras am Überbau der Brücke sowie die Verlegung der Verbindungskabel im und in den Hohlkasten wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Boschung Mecatronic GmbH vorbereitet. Als Tragkonstruktion für die Kameras wurden 4 m hohe Kippmasten verwendet.

Die Installation des optischen Messsystems wurde an mehreren Tagen durchgeführt. Am 23.09.2016

wurden der Schaltschrank mit Aufzeichnungseinheit und Switch im Hohlkasten durch die Firma Messtechnik-Mehl installiert. Weiterhin wurden die Kameras vormontiert und mit der Aufzeichnungseinheit verbunden. Die Montage der Masten als Befestigungskonstruktion für die Kameras am Überbau der Brücke erfolgte am 26.09.2016 und 27.09.2016 mit Hilfe eines Brücken-Untersichtgerät und einer Hebebühne. Die Installation der Kameras, inklusive der Ausrichtung und Kalibrierung, wurde am 29.09.2016 durchgeführt. Dabei wurde die Kameraperspektive mit Hilfe eines Schwenk-Neige-Mechanismus (Kugelkopf) am Kamerafuß eingestellt.

3.2.2 Komplettsystem

Im Bild 9 ist das installierte Videosystem dargestellt.

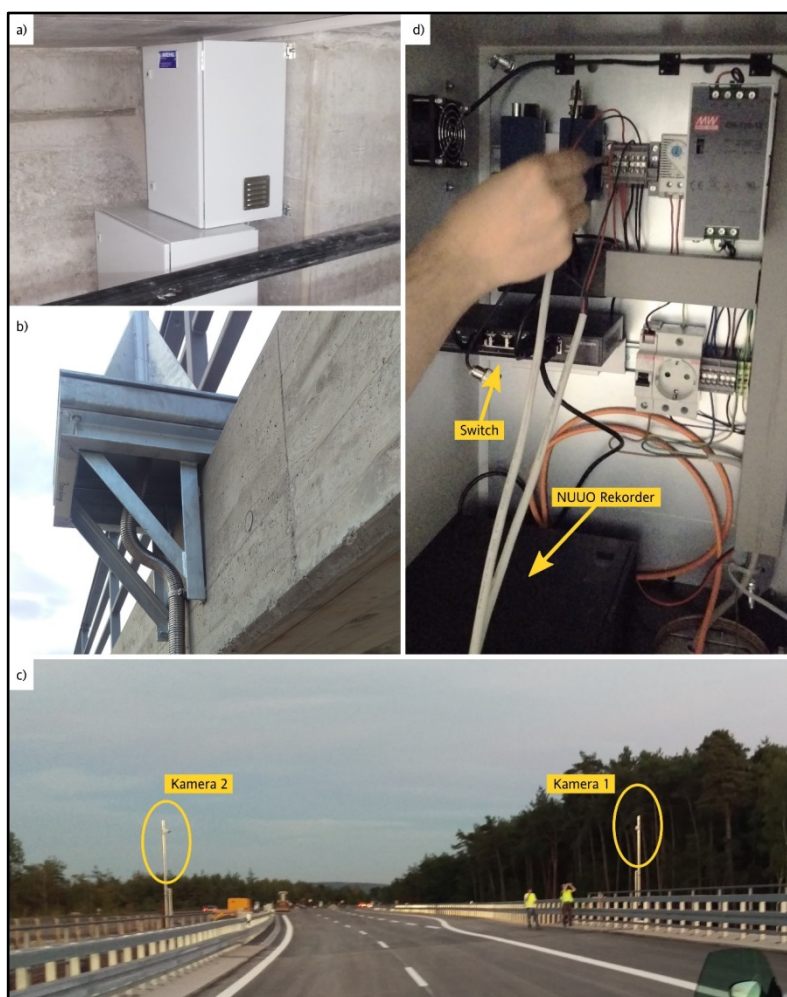


Bild 9: Installation des Videosystems. (a, d) Schaltschrank mit Switch und Datenrekorder, (b) Befestigung des Kippmastes an der Brücke und (c) Blick auf die installierten Kameras in Fahrtrichtung.

3.3 Drahtloses Sensornetz

3.3.1 Bestandteile

Das Sensornetzwerk besteht aus den in Tabelle 3 aufgeführten Sensorknoten. Die Tabelle zeigt sowohl die Identifikationsnummern (ID) der einzel-

nen Sensorknoten in der Datenbank, die MAC-Adressen der jeweiligen Knoten in Hexadezimaldarstellung und eine kurze Beschreibung des Typs. Die Knoten werden im Folgenden der Einfachheit halber eindeutig über die letzten vier Stellen der MAC-Adresse identifiziert (Suffix).

ID	MAC	MAC (Suffix)	Typ
59	0x158D000046CC70	CC70	Gateway
60	0x158D000046CBEB	CBEB	Typ K (Oberflächentemperatur)
61	0x158D000046CBF4	CBF4	Wetterstation
62	0x158D000046CC14	CC14	Typ K (Oberflächentemperatur)
63	0x158D000046CBF3	CBF3	SHT (Außentemperatur + Luftfeuchtigkeit)
64	0x158D000046CC29	CC29	Riss 1: Weggeber
65	0x158D000046CC66	CC66	Repeater
67	0x158D000046CC73	CC73	Repeater
68	0x158D000046CC8C	CC8C	Riss 2: Weggeber + Kraft
69	0x158D000046CCA3	CCA3	Riss 2: Weggeber + Kraft
70	0x158D000046CC9F	CC9F	Riss 1: Weggeber
71	0x158D000046CC88	CC88	Ausdehnung
72	0x158D000046CC8A	CC8A	Neigung

Tabelle 3: Tabelle mit den MAC-Adressen der einzelnen Knoten, deren Datenbank-IDs und der dazugehörigen Bezeichnung.

3.3.2 Topologie

Die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Komponenten sind, wie in Bild 10 gezeigt, verbunden. Es existieren weitere, redundante, Verbindungen zwischen den Sensorknoten. Aufgezeigt sind nur die stärksten Signale.

In Bild 11 bis Bild 14 sind die Sensorpositionen dargestellt. Die stärksten Funkverbindungen werden über Verbindungen durch Pfeile dargestellt.

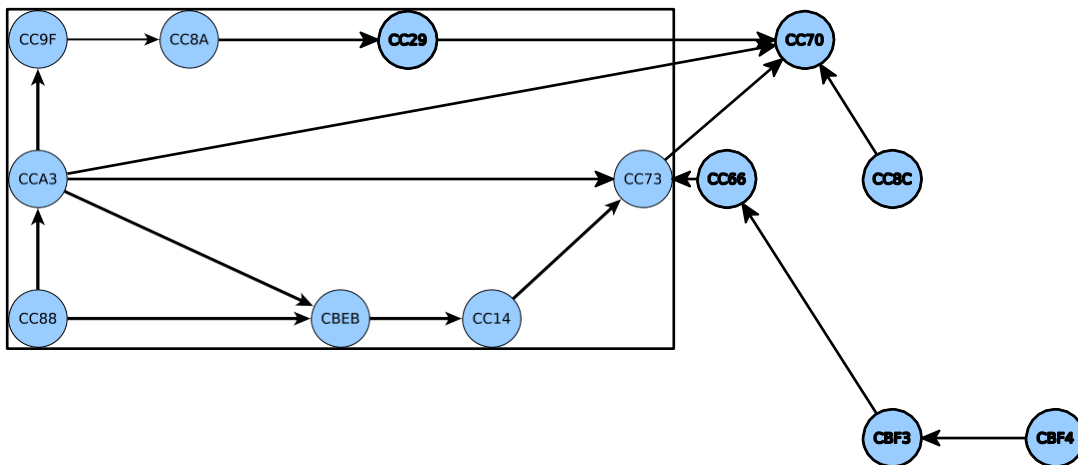


Bild 10: Schematische Darstellung des installierten Sensornetzwerkes und die stärksten Verbindungen zwischen den Sensorknoten

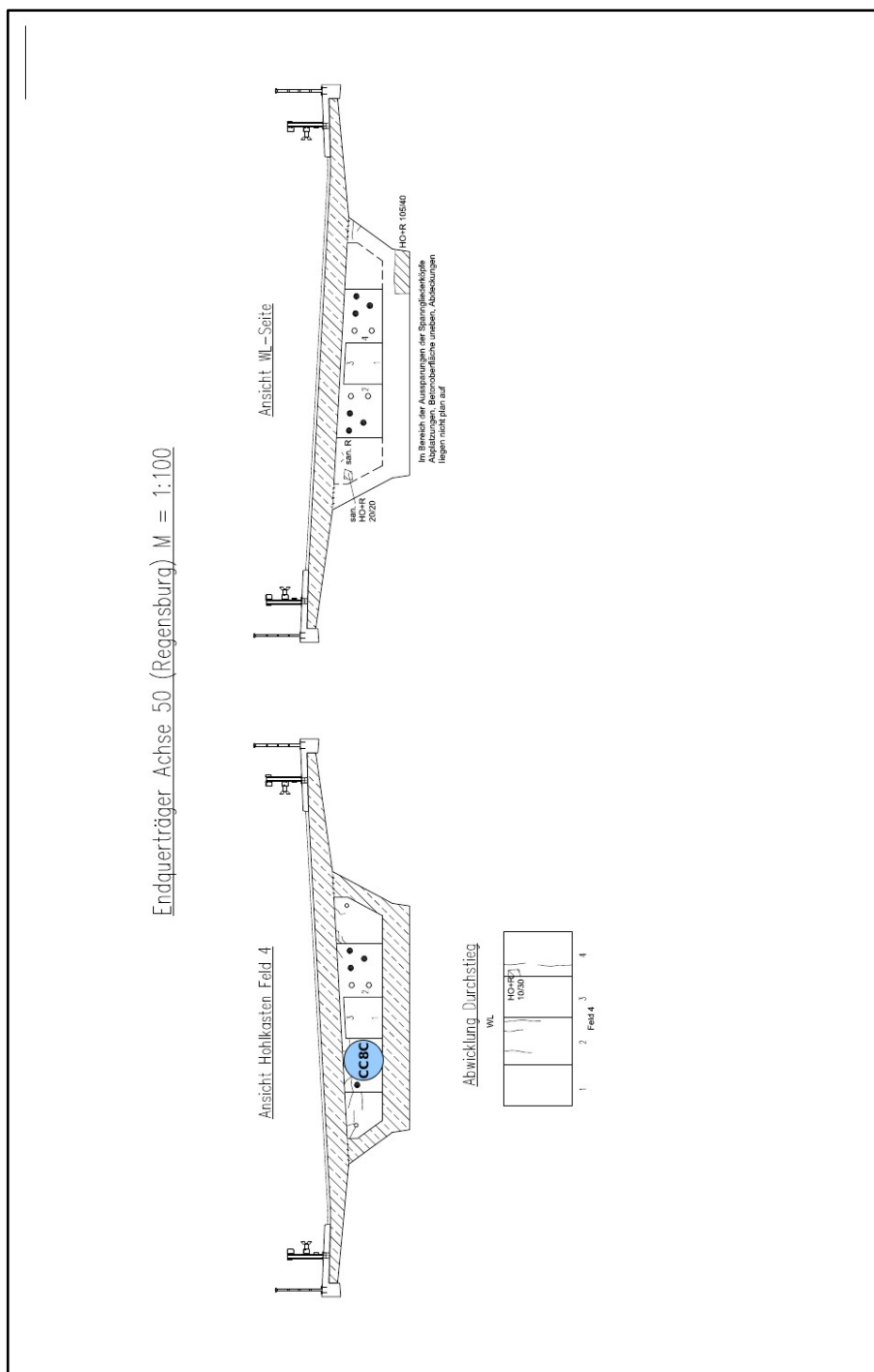


Bild 11: Darstellung Verortung des Riss-/Kraftsensors CC8C in der Brückenskizze

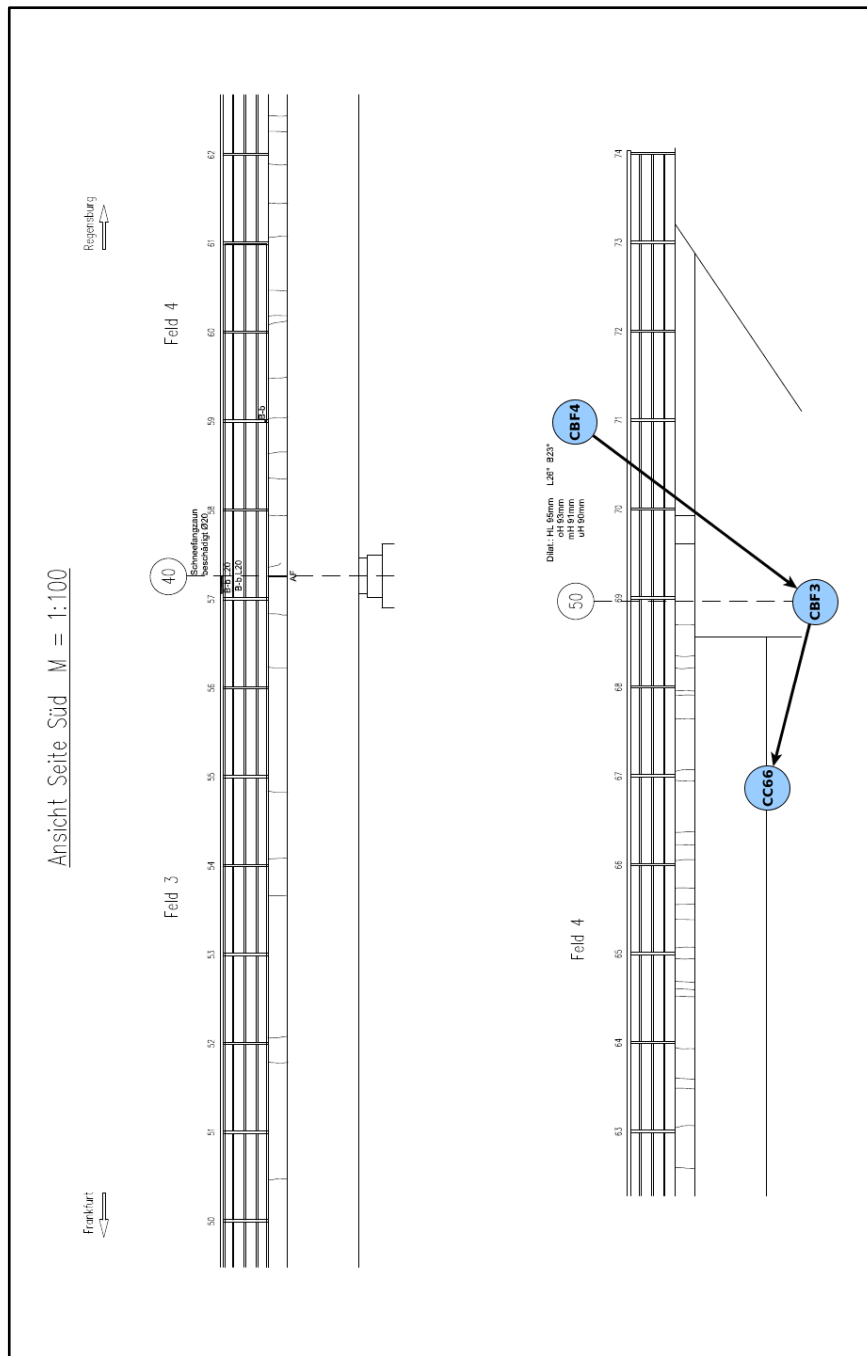


Bild 12: Darstellung der Verortung des Repeaters CC66 eines Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensors CBF3 und der Wetterstation CBF4 sowie ihre angenommene Konnektivität

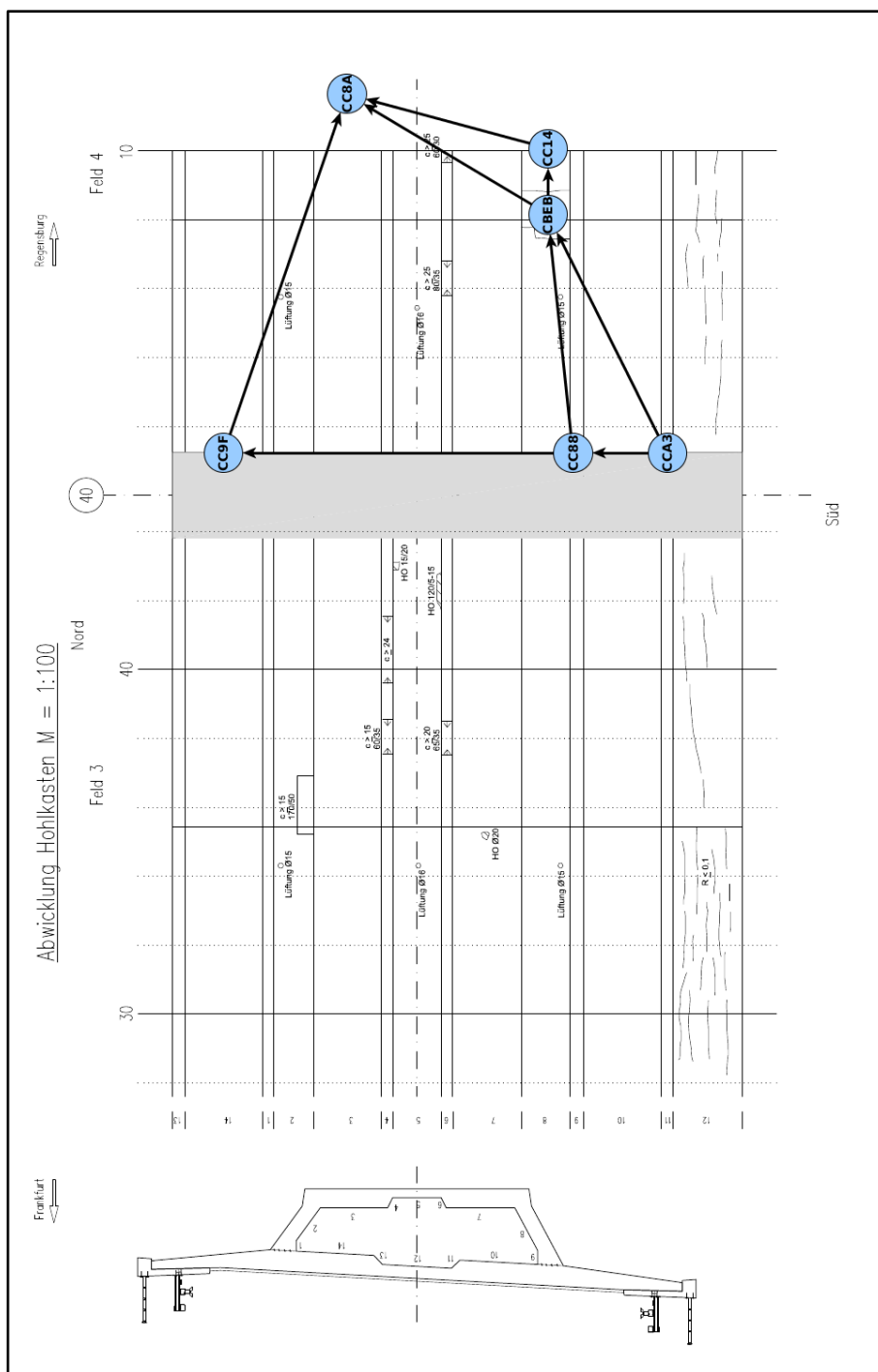


Bild 13: Darstellung der Verortung des potentiometrischen Weggebers CC9F, des Riss-/Kraftsensors CCA3, des Ausdehnungssensors CC88, der Materialtemperatursensoren CBEB & CC14, des Neigungssensors CC8A und die angenommene Konnektivität. Die Weggeber und Ausdehnungssensoren befinden sich an der Wand zur Achse 40.

3.3.3 BridgeConnector

Der BridgeConnector ist die zentrale Komponente zwischen Sensornetzwerk und Datenbank. Er nimmt Datenpakete, welche die gemessenen Sensorwerte beinhalten, aus dem Sensornetzwerk entgegen und schreibt die Pakete anschließend (mittels Representational state transfer (REST)) in die Datenbank (vgl. Bild 16). Der BridgeConnector ist in Java implementiert und basiert im Kern auf den folgenden Java- Technologien: Google Guava als EventBus, Netty zur Erstellung eines Kommunikationsstacks und Jersey (JAX-RS) zum Eintragen der Daten mittels REST in eine Datenbank. Der verwendete Netty-Stack ist in Bild 15 zu sehen und besteht aus den folgenden Komponenten:

WsnConnector: Die unterste Schicht ist der WsnConnector, welche eine generische Komponente ist. Im Vorgängerprojekt iBAST wurden die Daten mittels Global System for Mobile Communications (GSM) von der Brücke über Transmission Control Protocol and the Internet Protocol (TCP/IP) an einen BridgeConnector übertragen. Der BridgeConnector musste entsprechend auf einem TCP/IP-Socket lauschen. Entsprechend wurde die unterste Schicht durch ein WsnViaTcplpConnector realisiert. Dies ist im Rahmen dieses Projekts nicht möglich bzw. nötig; vielmehr müssen die Daten vom Gateway des Sensornetzes über eine serielle Schnittstelle (in unserem Fall USB) an den BridgeConnector übertragen werden. Daher wurde in diesem Projekt die unterste Schicht durch ein WsnViaSerialConnector ersetzt, welcher mittels der Java-Technologie RXTX realisiert ist.

DleStxEtxFrameDecoder: Die Sensornetzwerk-Pakete sind mittels SLE-STX-ETX-Frames kodiert und werden als erstes ausgepackt. DLE-STX-ETX-Frames haben das folgende Format:

```
DLE  STX ... DLE  ETX
0x10 0x02 ... 0x10 0x03
```

IntegrityCheck: Die Integrität des Pakets wird mittels CRC16 sichergestellt und hier überprüft.

AesCcmDecrypter: Hier wird das Paket entschlüsselt und es wird eine Instanz vom Typ RawPacket erstellt.

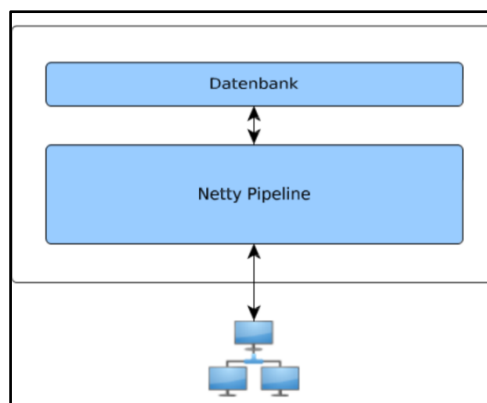


Bild 15: Übersicht der auf dem NAS laufenden Komponenten. Dargestellt sind Bridge-Connector, Sensornetz und Datenbank, sowie die Richtung des Informationsaustausches.

MessageSerializer: Hier wird das RawPacket mit Hilfe einer PacketFactory in ein Java-Objekt umgewandelt. Dieses Objekt wird anschließend auf den EventBus geschrieben.

DatabaseConnector: Der DatabaseConnector lauscht auf dem EventBus und nimmt die Java-Pakete entgegen. Diese werden anschließend mittels REST an die Datenbank übertragen.

Zum Senden von Paketen, z. B. zum Synchronisieren der Zeit im Sensornetzwerk, werden die vorherigen Schritte in umgekehrter Reihenfolge benötigt:

MessageSerializer: Hier wird ein beliebiges Paket in ein RawPacket umgewandelt.

AesCcmEncrypter: Dieses Paket wird anschließend mittels AES verschlüsselt.

IntegrityCalculation: Danach wird mittels CRC16 die Integrität berechnet.

DleStxEtxFrameEncoder: Zum Schluss wird das Paket mittels SLE-STX-ETX-Frames kodiert und auf den WsnConnector geschrieben.

3.3.4 Datenbank

Die Datenbank ist dieselbe, wie sie bereits im BAST-Projekt verwendet wurde. Für das Sensornetzwerk ist diese im Moment auf einem Entwicklungsserver in der Universität zu Lübeck installiert.

Bei der Datenbank handelt es sich um eine SQL-Datenbank, welche durch eine Java-Applikation (Database-Interface) mit dem Internet verbunden wird.

Wird ein neuer Sensorknoten dem Sensornetzwerk hinzugefügt, werden automatisch neue Tabellen in der Datenbank angelegt.

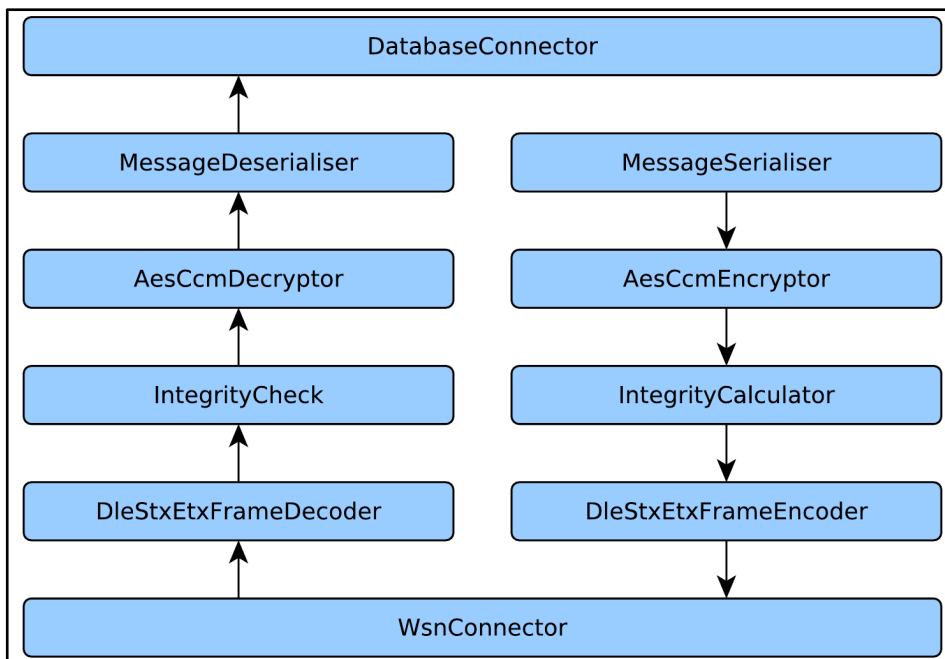


Bild 16: Die verwendete Netty-Pipeline.

3.4 Architektur des Gesamtsystems

Dieser Abschnitt erläutert die Systemarchitektur der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Bild 17 zeigt diese in der schematischen Übersicht. Folgende Komponenten sind aufgezeigt:

NAS: Das Network Attached Storage (NAS) bildet die Kernkomponente des Gesamtsystems. Es verbindet Internet und internes System miteinander, indem ein Zugriff über einen SSH-Tunnel ermöglicht wird. Alle erfassten Messdaten werden hier auf dem NAS hinterlegt und tagesweise auf externe Festplatten gespiegelt.

USV: Eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) ist per USB an das NAS angeschlossen. Die USV sendet über USB Signale an das NAS, wenn der Strom ausfällt und sobald wieder Strom vorhanden ist. Damit kann das NAS im Falle eines Stromausfalls ohne Datenverlust herunter- und wieder hochgefahren werden.

Switch: Das Switch verbindet alle Komponenten im System miteinander und ermöglicht so die Fernwartung und Fernzugriff auf das Gesamtsystem.

Router: Der Router stellt eine Verbindung mit dem Internet her und bietet eine Firewall an.

Arduino: Im Schaltschrank UzL befindet sich ein Arduino Nano mit einem DHT22-Sensor, welcher die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit misst. Damit wird eine dynamische Lüftersteuerung im Schaltschrank der UzL ermöglicht. Der Arduino ist per USB an das NAS angeschlossen. Es verfügt somit über keine eigene IP-Adresse.

WSN UzL: Hierbei handelt es sich um das drahtlose Sensornetzwerk (engl. Wireless Sensor Network - kurz WSN) der UzL. Dies schließt das Gateway UzL mit ein.

Gateway UzL: Das Gateway UzL ist ein spezieller Sensorknoten im Sensornetz der UzL. Der Gateway-Knoten ist der einzige Sensorknoten, welcher über einen Serielle-Schnittstelle-zu-

UBS-Konverter per USB an das NAS angeschlossen ist. Es verfügt somit über keine eigene IP-Adresse.

Messrechner IBF: Über den Messrechner des IBF werden alle erforderlichen Wartungs- und Steuerarbeiten an der entsprechenden Sensorik vorgenommen.

Sensorik IBF: Diese stellt die vom IBF installierte Sensorik dar.

Rechner „Kamera“: Dieser Rechner wird verwendet, um die Kameras anzusteuern.

Kamera 1/2: Hierbei handelt es sich um die Kameras, welche zur Referenzdatenerzeugung für die Fahrzeuergenkennung eingesetzt werden.

Messrechner Maurer SE (MSE): Über den Messrechner MSE werden alle erforderlichen Wartungs- und Steuerarbeiten an der entsprechenden Sensorik vorgenommen.

Poseidon: Hierbei handelt es sich um einen zweiten Rechner im Schaltschrank der MSE. Er wird zur Überwachung (z.B. Messrechner-Ausfall) des Messrechners und des Schaltschranks verwendet. Unter anderem bietet der Poseidon2 3268 die Möglichkeit E-Mail- und SMS-Alarmsignale zu senden, sollten Fehler auftreten. Des Weiteren läuft ein Webserver auf dem Poseidon, welcher eine grafische Benutzungsoberfläche für die Steuerung (u.a. zum Neustarten des Messrechners) zur Verfügung stellt.

Sensorik MSE: Diese stellt die von der MSE installierte Sensorik dar, siehe [3] [23].

Externe Festplatten: Insgesamt sind im Gesamtsystem vier externe Festplatten vorgesehen, von denen maximal zwei zu jeder Zeit im NAS angeschlossen sind. Die zwei übrigen Festplatten dienen der manuellen Abholung erfasster Messdaten (Rohdaten), welche aufgrund der Größe nicht über den Internetanschluss abtransportiert werden können. Die Festplatten werden entsprechend ausgetauscht. Jeweils eine der Festplatten wird von der MSE und vom IBF verwendet.

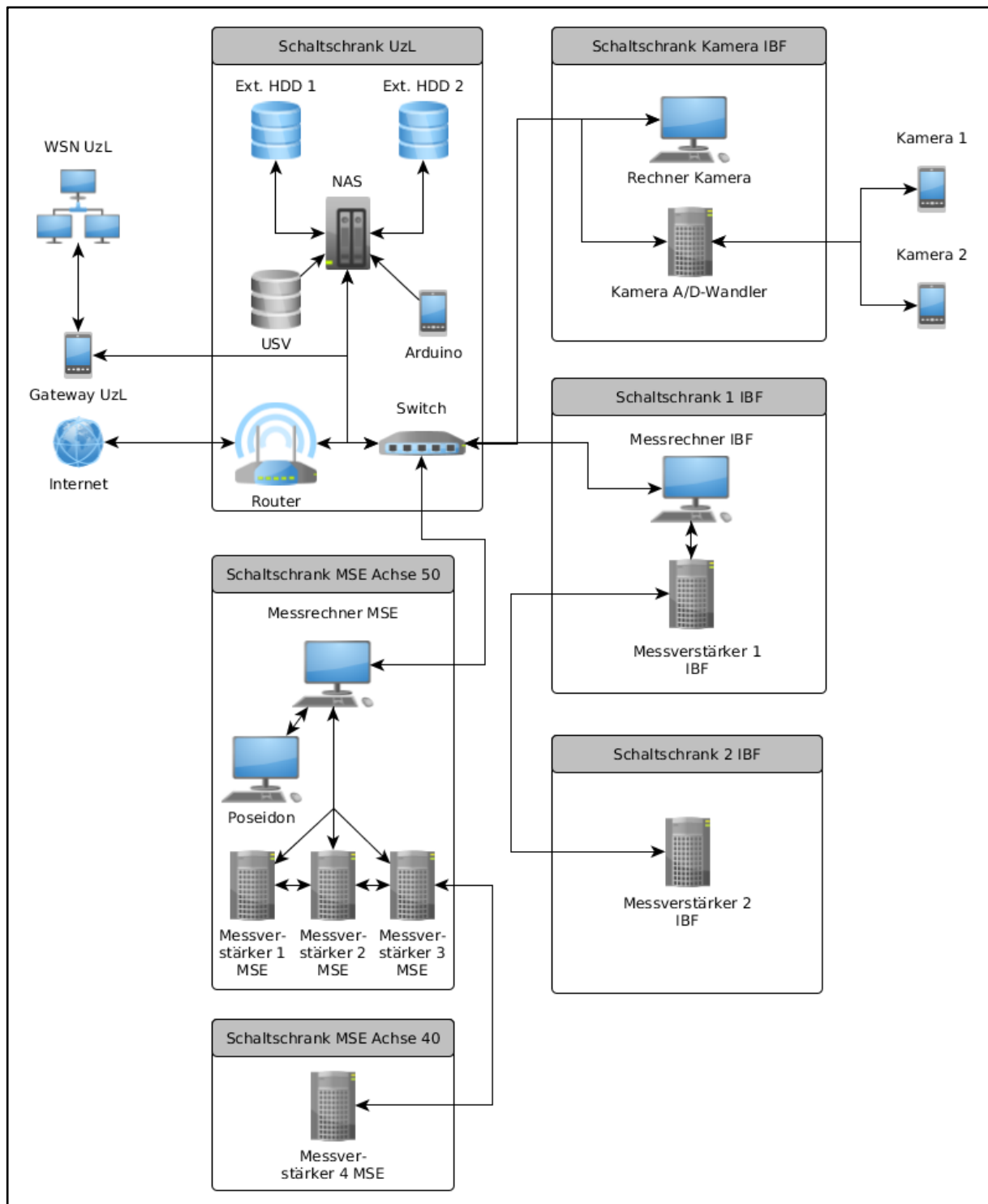


Bild 17: Systemarchitektur der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Dargestellt sind die verwendeten Geräte und ihre Verbindungen. An das NAS und an den Messrechnern ist jeweils die Sensorik der Projektpartner angeschlossen.

4 Zeitsynchronisation zwischen den Systemen

4.1 Grundlagen

Es sind fünf unterschiedliche Messsysteme, die durch unterschiedliche Forschergruppen unabhängig voneinander entwickelt wurden und sowohl gleiche als auch unterschiedliche Ziele anstreben, installiert. Neue Erkenntnisse und qualitätsgeprüfte Auswertergebnisse werden durch Referenzauswertungen erwartet. Eine zwingende Voraussetzung dafür ist die Zeitsynchronisation der verschiedenen, oft heterogenen Sensorsysteme. Hierfür ist es zuerst nötig, Publikationen und bestehende Lösungen zu recherchieren, um ein geeignetes Konzept erstellen zu können.

Im Anschluss daran wird das Konzept auf Funktionsfähigkeit im Anwendungskontext geprüft und im Erfolgsfall implementiert.

Hierfür kann es nötig sein, dass etwaige Änderungen an Hard- oder Software aller Beteiligten vorgenommen werden müssen.

Zuletzt folgen Testbetrieb und Installation vor Ort und im Anschluss daran eine Evaluation.

Im Ergebnis der Stufe 1

wurden diverse Veröffentlichungen recherchiert und die darin präsentierten Lösungsansätze validiert ([1], [21] und [24]). Die Network Time Protocol (NTP)-Dokumentation wurde für den präsentierten Anwendungsfall analysiert.

Auf dem NAS wurde prototypisch NTP eingerichtet. Alle Systeme beziehen ihre lokale Zeit vom NAS und sind damit logisch synchronisiert.

Alle verwendeten Systeme unterstützen das NTP-Protokoll.

Sollte eine ausreichend genaue Synchronisation nicht möglich sein, so müssen die Daten nachbearbeitet werden.

4.2 Problemanalyse

An der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn sind Systeme verschiedener Hersteller installiert. Diese verfügen alle über unterschiedliche Systemuhren, welche nicht über identische Uhrendrifts (Ungenauigkeiten, Abweichung) verfügen. Mit zunehmender Zeit werden die Uhren also einen immer größeren Abstand zueinander haben.

Da es notwendig ist, dass Daten verschiedener Sensorsysteme als Redundanzen und für Vergleiche eingesetzt werden können, müssen die Uhren der Systeme möglichst identisch gehen.

4.3 Zeitsynchronisationslösungen

Für die Analyse bestehender Zeitsynchronisationslösungen wurden verschiedene Quellen konsultiert. Neben den thematisch passenden Veröffentlichungen [1], [21] und [24] wurden die Vorlesungsskripte der Universitätsprofessoren Prof. Dr. Stefan Fischer und Prof. Dr. Kai Römer zu Rate gezogen ([7]).

Die vielversprechendste Lösung stellt das Network Time Protocol (NTP) dar. Die Version 4 dieses Protokolls ist in RFC 5905 ([19]) erstmals niedergeschrieben worden.

NTP ist vor allem deshalb von Interesse, da alle teilnehmenden Systeme theoretisch in der Lage sind dieses Protokoll umzusetzen und die Genauigkeitsanforderungen für statische Sensornetzwerke den Anforderungen gerecht werden.

NTPv4 nutzt einen hierarchischen, schichtenbasierten Ansatz um verschiedene, heterogene Systeme miteinander zu synchronisieren.

Jede Schicht wird durch „Stratum“ und eine fortlaufende Nummer gekennzeichnet. Die Nummer bezeichnet dabei den Abstand zur obersten Hierarchieebene.

Stratum 0: Stratum 0 Server bezeichnen Geräte, welche das zurzeit höchstmögliche Präzisionsmaß für eine Zeitsynchronisation bereitstellen. Diese sind oft mit Atomuhren auf Basis von Cäsium oder Rubidium ausgestattet. Sie erzeugen sehr genaue, äquidistante Pulse und geben diese an angeschlossene Computergeräte weiter. Stratum 0 Server werden auch „Referenzuhren“ genannt.

Stratum 1: Stratum 1 Server sind Server deren Systemuhren bis auf wenige Millisekunden genau mit Stratum 0 Uhren synchron laufen. Oft werden Stratum 1 Server mit anderen Stratum 1 Servern vernetzt, um weitere Redundanzen zur Validierung einer korrekten Synchronisation bereit zu stellen. Sie werden auch „Primäre Zeitserver“ genannt.

Stratum 2: Stratum 2 Server sind Server, welche über ein Netzwerk mit Stratum 1 Servern verbunden sind. In der Regel fragt ein Stratum 2 Server die Zeiten bei mehreren Stratum 1 Servern an, um Redundanzen zu schaffen und gegebenenfalls auszumerzen. Zusätzlich sind Stratum 2 Server oft mit weiteren Stratum 2

Servern verbunden, um noch mehr Redundanz zu ermöglichen.

Stratum 3: Stratum 3 Server sind Server, welche mit einem Stratum 2 Server über ein Netzwerk synchronisiert werden. Prinzipiell sind sie genau so organisiert wie Stratum 2 Server und verwenden identische Algorithmen. Sie können ihrerseits als Zeitgeber für Stratum 4 Server dienen.

Stratum 4-15: Die Stratum-Kette wird nur bis ins 15. Glied geführt. Stratum 16 signalisiert dabei, dass ein Gerät nicht synchronisiert ist. Alle Varianten verwenden den Bellman-Ford Algorithmus, um einen minimal spannenden Baum (MST) zu erzeugen, welche eine einfache Bestimmung der minimalen Distanzen bis zu einem Stratum 1 Server ermöglichen. Alternativ kann der Dijkstra-Algorithmus verwendet werden.

Es ist anzumerken, dass Stratum $n+1$ Server nie genauer sein können als Stratum n Server. Unter NTP gelten Server als NTP-synchronisiert, wenn die Uhren-Drift weniger als 128 ms beträgt. Typische Genauigkeiten über das Internet liegen bei ca. 5-100 ms. Bild 18 zeigt den hierarchisch organisierten Schichtenstapel der Stratum 0-3 Server und mögliche Netzwerkverbindungen.

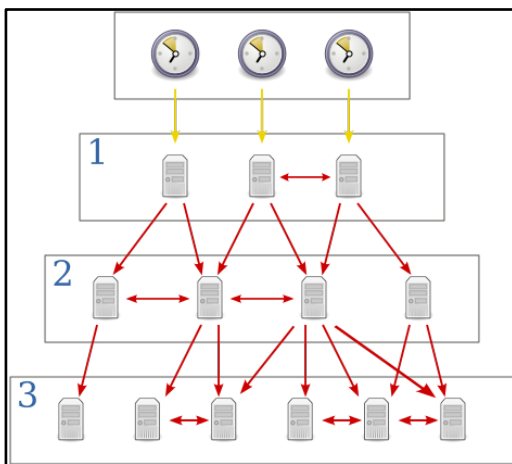


Bild 18: Dargestellt sind Atomuhren und die ersten drei Stratum-Schichten. Gelbe Pfeile beschreiben eine direkte Verbindung zu einer Uhr, rote stellen Netzwerkverbindungen dar

NTPv4 kann die lokale Zeit eines Systems über das öffentliche Internet mit einer Genauigkeit von 10 ms halten, in lokalen Netzwerken unter idealen Bedingungen sogar von weniger als 1 ms. Dies bezieht sich auf stationäre Systeme. Bei einem hinreichend stabilen lokalen Frequenznormal als Taktgeber (thermostatgesteuerter Quarzoszillator, Rubidium-Oszillator etc.) lässt sich unter Verwendung der

Kernel-PLL der Fehler zwischen Referenzzeitgeber und lokaler Uhr bis in die Größenordnung weniger Mikrosekunden reduzieren. Da die absolute Zeit nicht von Relevanz ist, sollte die logische Lokalzeit auf bis zu wenige Mikrosekunden genau synchronisierbar sein.

Die lokalen Abweichungen infolge der Latenzzeit der stochastisch bestimmten Übertragungswege, werden durch Messverfahren der Paketumlaufzeit vom Server (Berkeley-Algorithmus – vgl. Abs. 4.3.1.1) oder vom Client (Cristians-Algorithmus – vgl. Abs. 4.3.1.2) kompensiert.

Die kurzzeitigen pseudo-stochastischen Abweichungen der lokalen Systemuhr können nur durch eine bessere weitere Systemuhr (Frequenznormal) und direkten Empfang von Satellitensignalen (GPS) oder von anderen Zeitnormalen (DCF77) kompensiert werden.

NTP benutzt für die interne Fehlerkompensation der Prozessorumgebung den Marzullo-Algorithmus (vgl. Abs. 4.3.1.3) und auch einen Algorithmus, um s.g. Byzantinische Fehler zu behandeln. NTP wird im Kontext der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn mit einer UTC-Zeitskala eingesetzt.

4.3.1 Algorithmen

4.3.1.1 Berkeley Algorithmus

Der Berkeley Algorithmus stellt eine Methode zur Synchronisation von Uhren in verteilten Systemen dar. Er kommt unter anderem im NTPv4 Protokoll zum Einsatz. Im Algorithmus wird davon ausgegangen, dass keine Maschine eine akkurate Zeit-Quelle besitzt. Er wurde von GUSELLA & ZATTI entwickelt ([17]). Der Algorithmus besteht aus 5 Schritten:

1. Ein Master Server wird gewählt. Dafür wird ein beliebiger Wahl-Prozess unter allen Teilnehmern eingesetzt (z. B. der Chang und Robert Algorithmus).
2. Der Master erfragt bei allen übrigen Teilnehmern die Systemzeiten und sammelt diese lokal bei sich.
3. Der Master merkt sich die Round Trip Zeiten (RTT) der Nachrichten und schätzt auf Basis dessen die Zeiten aller Teilnehmer und seine eigene.
4. Der Master Server bildet dann den Durchschnitt der Uhren unter Ausschluss von groben Ausreißern.

- Der Master sendet nun an alle Teilnehmer den Zeitunterschied, um den die Uhren der beteiligten Prozesse angepasst werden müssen. Dadurch können weitere Ungenauigkeiten durch RTT vermieden werden.

4.3.1.2 Cristians Algorithmus

Der Cristians Algorithmus ([6]) wird ebenfalls zur Synchronisation von Computersystemen eingesetzt. Es wird vorrangig in Computer Netzwerken mit geringen Latenzen eingesetzt. Der Algorithmus hat den Nachteil, dass nur ein einzelner Server vorgesehen ist. Der Algorithmus besteht aus drei Schritten und vermittelt zwischen einem Prozess P und einem Server S. Es werden UTC Zeiten verwendet:

- P fordert eine Zeit vom Zeitserver S an.
- S ermittelt die eigene Zeit T und hängt diese an die Antwort an P.
- P setzt die eigene Uhr auf die Zeit $T + RTT/2$.

Diese Methode ist besonders gut geeignet, wenn es nur eine mögliche Verbindung zwischen den zu synchronisierenden Partnern gibt. Dies ist an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn der Fall.

4.3.1.3 Marzullu Algorithmus

Dieser Algorithmus stellt das effizienteste Verfahren zur Zeitsynchronisation dar. Es hält beweisbare Schranken ein und ist Teil von NTPv4. Er wurde in [18] vorgestellt und schafft ein Einverständnis über die Lokalzeit aus verschiedenen ungenauen Zeitquellen. Er teilt sich in folgende Schritte auf:

- Eine Liste der Uhren-Drifts aller zu synchronisierender Partner wird angefertigt, die enthält um wie viele Millisekunden die Uhren positiv oder negativ falsch gehen.
- Es werden Intervalle erzeugt, welche die Ungenauigkeiten der Uhren widerspiegeln.
- Nun werden alle Intervalle mit einander „geschnitten“ und der Zeitraum bestimmt, der mit den meisten Intervallen übereinstimmt.
- Vom ermittelten neuen Intervall wird der Mittelpunkt bestimmt und als neue Systemzeit verwendet.

4.3.1.4 Chandy-Lampport Algorithmus und Vektorkuhren

Anders als die bisherigen Algorithmen wird der Chandy-Lampport Algorithmus ([4]) nicht eingesetzt,

um eine exakte absolute Systemzeit herzustellen. Er schafft lediglich eine konsistente logische Zeit auf allen Systemen. Er funktioniert wie folgt:

- Jeder Kommunikationsteilnehmer (Rechner) verfügt über einen Zähler.
- Immer wenn eine Kommunikation stattfindet wird die eigene Uhr um 1 hochgezählt und an den Partner geschickt.
- Der Kommunikationspartner bestimmt das Maximum aus der empfangenen Zeit und dem eigenen inkrementierten Zähler und verwendet dieses.

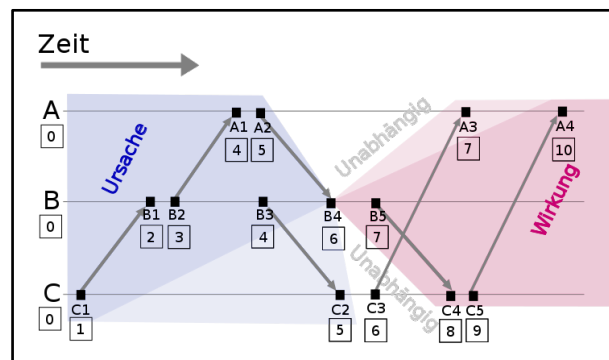


Bild 19: Beispiel für den Austausch logischer Zeiten mittels Lamport Uhren

Bild 19 zeigt eine beispielhafte Ausführung der Uhr. Alle Prozesse starten mit einem auf null gesetztem Zähler. Bei der Kommunikation wird der inkrementierte Zähler beim Partner gesetzt.

Mit diesem Verfahren kann bestimmt werden, welche Ereignisse vor welchen anderen stattfinden. Es kann folglich logische Konsistenz sichergestellt werden.

4.3.2 NTP an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Das NAS an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn stellt einen Stratum 2 Server dar. Alle angeschlossenen Systeme sind damit Stratum 3 Computer. Damit ist das NAS so nah wie möglich an einem Zeitserver gelegen, wie ein peripher installiertes Gerät sein kann. Es ist bis auf ca. 10 ms genau mit der Internetzeit der Stratum 0 Server synchronisiert.

Da alle beteiligten Systeme ihre eigene Systemzeit vom NAS als Zentralserver beziehen, ist die lokale Zeit aller Systeme logisch so synchronisiert, wie Stratum 1 Server.

Auch wenn eine Abweichung von mehr als 10 ms zur Internetzeit insgesamt besteht, so ist diese Abweichung auf allen hierarchisch untergeordneten

Systemen identisch. Die Daten sind folglich miteinander vergleichbar, auch wenn die absolute Zeit um wenige Millisekunden abweichen kann.

4.4 Technische Umsetzung

4.4.1 Kompatibilitätsprüfung von Zeitsynchronisationsmethoden für heterogene Sensornetzwerke

Wie Bild 17 darstellt, gibt es drei unterschiedliche Messrechner, welche jeweils über unterschiedliche Systemzeiten und Uhren verfügen. Diese wiederum laufen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und müssen synchronisiert werden, damit die Daten der Systeme verglichen werden können. Folgende Betriebssysteme werden verwendet:

Das NAS wird mit einer speziellen Linux Version (Synology DSM) betrieben.

Der Messrechner IBF läuft unter mit Windows 8.

Der Messrechner der Maurer SE läuft unter Windows XP Embedded.

Durch die verschiedenen Betriebssysteme und die unterschiedliche Hardware handelt es sich beim Gesamtsystem um ein stark heterogenes Sensornetzwerk.

Stark heterogene Sensornetzwerke werden herkömmliche mit NTPv4 synchronisiert, sollten diese eine absolute Zeit benötigen. Da alle Systeme NTP-Clients verwenden können, ist auch das Gesamtsystem NTPv4-kompatibel.

4.4.2 Entwicklung und Implementation einer Zeitsynchronisationsmethodik für die beschriebene Problematik

Es gibt zwei weiterführende Optionen. Die interne Logik der einzelnen Sensoren und Sensornetze kann mit einer hohen Genauigkeit synchronisiert werden, wenn ein Zeitstempel von außen bereitgestellt wird. Die zweite Option besteht in der Nachbearbeitung der gemessenen Daten. Dabei werden die Zeitstempel entsprechend der Drift, auf Basis von Referenzsignalen, angepasst.

Bei der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn wird NTPv4 verwendet.

Sollte die NTPv4 Lösung nicht ausreichend sein, kann es notwendig werden, dass die Datensätze nachbearbeitet werden müssen, um der entstehenden Uhren-Drift gerecht zu werden.

Hierfür können Testsignale verwendet werden, welche von allen Systemen gleichzeitig wahrgenommen werden. Im Anschluss daran kann eine Drift

bestimmt werden, die in allen Systemen appliziert wird.

4.4.3 Software und Betriebssystemanpassungen der Projektpartner für die Ermöglichung einer Zeitsynchronisationslösung

Für den reibungslosen Betrieb eines NTPv4-Clients ist es notwendig, gesondert Software auf den Messrechnern zu installieren. Als Teil des Betriebssystems vom Synology NAS DSM6.1+ wird ein NTP-Dienst bereitgestellt.

Die IP des NAS muss nun bei den beteiligten NTP-Clients (Messrechnern) als NTP-Server eingestellt werden.

Zur Synchronisation der Systemuhr des Messrechners der Anlage des IBF ist das Programm NTP für Windows der Fa. Meinberg installiert. Damit ist es möglich eine Hierarchie von Zeitservern im Netzwerk zu definieren, mit denen die Synchronisation erfolgen soll. Primärer Zeitserver ist der auf der NAS in der Brücke Installierte. Sollte die NAS als Zeitserver ausfallen, erfolgt die Synchronisation der Systemuhr anhand öffentlicher Zeitserver der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) Braunschweig und der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (Regionales Rechenzentrum Erlangen - RRZE).

4.4.4 Integration der Zeitinformation in die Messdatenerhebung

Die in den vorhergehenden Absätzen beschriebene Technologie der der Zeitsynchronisation zwischen den verschiedenen Messsystemen an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn bezieht sich zunächst lediglich auf die Uhren der jeweiligen Messrechner. Von zentraler Bedeutung ist dabei aber, diese Zeitinformationen in geeigneter Weise mit den aufgezeichneten Messdaten zu verknüpfen.

Das RTMS Messsystem mit Sensoren am Überbau der Brücke, am Lager an Achse 40 und am Fahrbahnübergang, realisiert diese Verknüpfung in der Art, dass die eingesetzten Messverstärker ihre Systemzeit vom Messrechner beziehen und dieser kontinuierlich, wie oben beschrieben, seine eigene Systemzeit per NTP mit der Systemzeit der NAS synchronisiert.

Unter Verwendung dieses Zeitsignals ist die Anlage so konfiguriert, dass neben den Messkanälen zu jeder im System definierten Messfrequenz Zeitkanäle generiert werden. Diese sogenannten Echtzeitkanäle werden mit den Messdaten zusammen in den

Ausgabedateien gespeichert. Im Ergebnis wird so erreicht, dass für jeden Messwert ein Zeitstempel vorhanden ist, der die zeitliche Zuordnung zulässt. Für die Umsetzung dieser Lösung war eine Neukonfiguration der Messsoftware erforderlich, die am 23.01.2018 über den Fernzugriff realisiert wurde. Die erforderlichen Konfigurationsschritte wurden auch an den Projektpartner Maurer übermittelt und dort umgesetzt. Somit existieren nunmehr in beiden Messsystemen Zeitkanäle, die für die Zusammenführung bzw. den Abgleich der Messdaten aus den beiden Systemen eingesetzt werden können.

Um im Zuge dieser Umstellung der Messanlage die Handhabung der aufgezeichneten Messdaten, vordergründig hinsichtlich der verwendeten Genauigkeit der Abbildung von Gleitkommazahlen, nicht grundsätzlich zu ändern, wurde die Zeitinformation auf 3 Gleitkommazahlen in 4-Byte (32 Bit) Genauigkeit aufgeteilt.

Der Ausgangspunkt der Echtzeitdarstellung ist eine Zeitdefinition nach der sogenannten Unixzeit, die die vergangenen Sekunden seit Donnerstag, dem 1. Januar 1970, 00:00 Uhr UTC zählt. Die Umschaltung von einer Sekunde zur nächsten ist synchron zur UTC. Die Aufteilung dieser Information ist wie folgt:

- Berechnung der vollen Tage seit Start der Unixzeit,

- Berechnung der vergangenen Sekunden des aktuellen Tages und

- Ermittlung der vergangenen Millisekunden der aktuellen Sekunde.

Diese Informationen werden zu jeder in der RTMS-Anlage verwendeten Messfrequenz (1 Hz, 75 Hz und 600 Hz) ermittelt. Zur Realisierung der Zeitstempel für alle Messdaten sind somit 9 zusätzliche Berechnungskanäle erforderlich, die wie die Messkanäle in die Binärdatei geschrieben werden.

4.5 Testbetrieb der erarbeiteten Synchronisationslösung

4.5.1 Technische Grundlagen

Seit dem 19.07.2017 läuft auf dem Synology NAS ein NTP-Server, welcher zur Zeitsynchronisation eingesetzt wird.

Der NTP-Server auf dem Synology NAS läuft unterbrechungsfrei.

Seit Mitte 2018 verwenden die Systeme aller Projektpartner das NAS als NTPv4 Zeitserver. Dies schließt das drahtlose Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck, das Messsystem RTMS und

Kamerasystem des Ingenieurbüro Prof. U. Freundt und die Messsysteme Maurer SE mit ein.

Die Systeme weisen aufgrund der geringen physikalischen Distanzen zum NAS und der statischen Verbindungen eine sehr geringe Latenz auf. Dies wirkt sich ebenso auf das Delta aus. Hierbei handelt es sich um ein Maß, das die Unterschiede der einzelnen Systemuhren im Vergleich zum Bezugssystem, in diesem Fall das NAS, beschreibt. Folglich sind die Messsysteme aller Projektpartner bis auf wenige Sekundenbruchteile genau logisch synchronisiert.

Für die Synchronisation der Messsysteme mit den Stratum 0 Uhren (Atomuhren) können lediglich die klassischen NTPv4 Garantien gewährleistet werden.

Bei der Verwendung von NTPv4 kann im lokalen Netzwerk in der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn im Optimalfall eine Synchronisation auf bis zu 200 Mikrosekunden erfolgen. Dies hängt jedoch von den intern verbauten Systemuhren ab. Sollten diese eine hohe Drift (Ungenauigkeit, Abweichung) aufweisen, sind die Systeme häufiger zu synchronisieren oder die Qualität der Garantie verschiebt sich.

Für die Differenz zur Internetzeit gilt, dass eine Genauigkeit von ca. 10 ms eingehalten werden kann, was für alle Problemstellungen im Projektrahmen ausreichend ist.

4.5.2 Evaluierung der Zeitsynchronisation

Die Evaluierung der umgesetzten Zeitsynchronisation erfolgte in zwei Stufen. Die erste Stufe bezieht sich dabei auf eine Kontrolle der Zeitdifferenzen zwischen den internen Uhren der Messsysteme und die zweite Stufe auf die Integration der Zeitinformationen in die eigentlichen Messdaten (System RTMS und Maurer, vgl. Abs. 4.4.4).

Die nachfolgenden Ausführungen zur Evaluierung der Zeitsynchronisation in der genannten ersten Stufe basieren auf Datenerfassungen durch den Messrechner des Messsystems RTMS. Auf dem Messrechner läuft seit kurz nach der Einrichtung der Internetanbindung der Gesamtanlage im Januar 2017 eine NTP-Implementation, sowohl zur Zeitsynchronisation der Rechneruhr selbst mit beliebigen NTP-Servern als auch zur Bereitstellung von Zeitinformationen für andere Systeme (Kamera, Messverstärker.) Die NTP-Implementierung erlaubt außerdem die Protokollierung der durchgeführten Zeitsynchronisation. Darüber hinaus wurde ein selbstentwickeltes Software-Tool eingesetzt, das über eine Abfrage

von Zeitinformationen von definierten Zeitquellen und ebenfalls zur Protokollierung von Zeitdifferenzen zwischen dem Messrechner und den betrachteten Zeitquellen realisiert. Die erfassten Ergebnisse dieser vereinfachten Umsetzung der Vergleiche der Zeiten, weisen jedoch gegenüber der vollständigen NTP-Implementierung generell etwas geringere Genauigkeiten auf, da zum Beispiel die Laufzeiten der Informationen zwischen den abgefragten Zeitquellen und dem Messrechner keine Berücksichtigung finden.

Hinsichtlich der verwendeten Zeitquellen für den Messrechner des Messsystems RTMS wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

Nach Herstellung der Internetanbindung im Januar 2017 bis Mitte Juli 2017 wurden verschiedene externe NTP-Zeitserver zur Synchronisation der Rechneruhr verwendet.

Ab Juli 2017 bis Oktober 2017 wurde ausschließlich das NAS als NTP-Zeitserver verwendet, der Ausfall des NAS im September/Oktober 2017 führte damit dazu, dass trotz bestehender Internetanbindung keine Zeitsynchronisation erfolgte.

Als Verbesserung wird daher seit Oktober 2017 das NAS als bevorzugter NTP-Zeitserver verwendet, bei einem Ausfall des NAS und dennoch weiterhin bestehender Internetanbindung werden definierte „Reserve-Server“ genutzt.

Hinsichtlich der verwendeten Zeitquellen für den Zeitabgleich des Video-Systems wurden folgende Anpassungen vorgenommen:

Von Februar 2017 bis Juli 2017 wurde ein öffentlicher NTP-Server verwendet.

Zwischen Juli 2017 und November 2017 wurde das NAS als NTP-Server verwendet (Problematik des Ausfalls des NAS analog Messrechner.)

Als Verbesserung wird daher seit November 2017 der Messrechner des Messsystems RTMS als NTP-Server verwendet, um bei einem Ausfall des NAS oder der Internetanbindung innerhalb der Systemkombination Messdaten/Video eine stabile Zeitquelle zu erzeugen.

Hinsichtlich der Aufzeichnung der realisierten Zeitsynchronisationen und der Zeitdifferenzen wurden folgende Anpassungen und Ergänzungen umgesetzt:

Seit Beginn des Betriebes der NTP-Implementierung auf dem Messrechner des Messsystems RTMS wird durch die NTP-Implementierung

täglich eine sogenannte LoopStats-Datei angelegt. Diese enthält eine Protokollierung der durchgeführten Zeitsynchronisationen zwischen Rechner und der im Zuge der Synchronisation verwendeten Zeitquelle (u.a. Datum/Zeit der Synchronisation, Zeitdifferenz). Die verwendete Zeitquelle wird dabei nicht mit aufgezeichnet.

Seit Februar 2017 erfolgte die Synchronisation der Uhr des Videosystems automatisiert über festgelegte NTP-Server. Die Synchronisation erfolgt dabei täglich um 02:00 Uhr (UTC), verfeinerte Einstellungen lässt die proprietäre Konfigurationssoftware des Videosystems nicht zu. Die in einer Log-Datei erfassten Zeitdifferenzen beim Abgleich wurden für die Auswertung und Zuordnung aufbereitet.

Seit November 2017 wird vor dem Hintergrund der gesammelten Erfahrungen zu Ausfallcharakteristiken zusätzlich durch die NTP-Implementierung täglich eine sogenannte PeerStats-Datei angelegt. Darin werden die ermittelten Zeitdifferenzen zu allen festgelegten NTP-Servern protokolliert (u.a. Datum/Zeit der Abfrage, IP-Adresse, Zeitdifferenz).

Unabhängig von den Protokollierungsmöglichkeiten der NTP-Implementierung erfolgt die Ermittlung von Zeitdifferenzen zu definierten Zeitquellen durch die oben genannte Eigenentwicklung. Die Abfragen erfolgen dabei stündlich. Bis Oktober 2017 wurde dabei der Zeitunterschied zwischen Messrechner und einem externen NTP-Zeitserver protokolliert (Stratum 0 Quelle). Danach wurden die Ergebnisse für mehrere externe NTP-Server ermittelt und aufgezeichnet. Seit Januar 2018 werden zusätzlich die Zeitinformationen des NAS und des Messrechners Maurer (sofern verfügbar) abgefragt.

In den Darstellungen Bild 20 bis Bild 30 sind Daten von Zeitdifferenzen zwischen dem Messrechner RTMS und verschiedenen Zeitquellen zusammengestellt. Zunächst enthält Bild 20 die vorhandenen Zeitdifferenzen bei der Synchronisation des Messrechners mit verschiedenen Zeitquellen (entsprechend der vorhergehenden Erläuterungen) über die gesamte bisherige Projektlaufzeit mit bestehender Internetanbindung. Ersichtlich wird darin, dass die Werte des Zeit-Offsets insgesamt sehr klein sind, darin aber Phasen mit kleineren und auch größeren Werten vorliegen. Die Daten in Bild 20 beziehen sich dabei stets auf den im jeweiligen Synchronisationsvorgang verwendeten NTP-Server. Sowohl durch die Erfassung der Protokolldaten *PeerStats* als auch durch das betriebene selbst entwickelte

Programm, können Informationen zu anderen Zeitquellen, die nicht unmittelbar von der NTP-Implementierung zur Synchronisation verwendet wurden, erfasst werden (vgl. Bild 21 und Bild 22). Aus den Erfassungsdaten der Eigenentwicklung wurden zusätzlich die Informationen der Zeitdifferenzen

zwischen Messrechner RTMS und NAS bzw. zwischen Messrechner RTMS und Messrechner Mauer herausgefiltert. Die Aufbereitung hierzu ist in Bild 23 bzw. Bild 24 dargestellt. Informationen zum Zeit-Abgleich des Video-Systems mit verschiedenen Zeitquellen (entsprechend der vorhergehenden Erläuterungen) sind in Bild 25 enthalten.

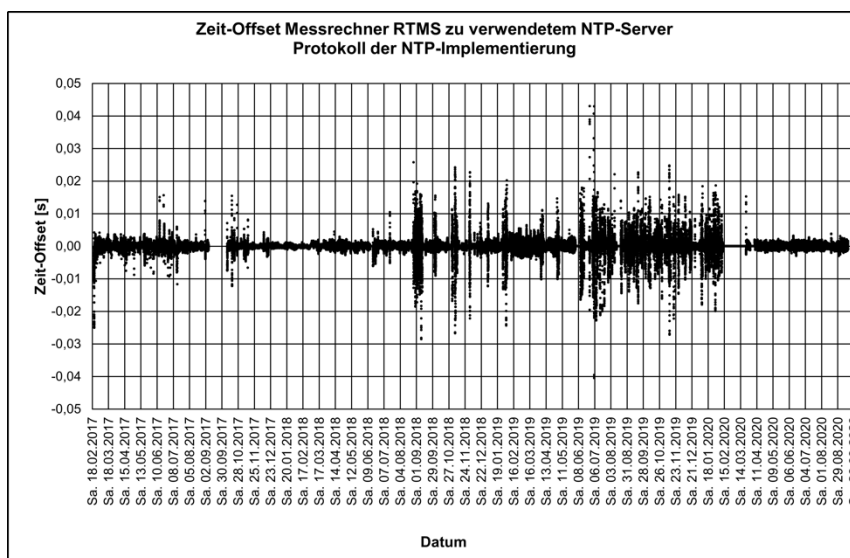


Bild 20: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisation verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll *LoopStats* der NTP-Implementierung

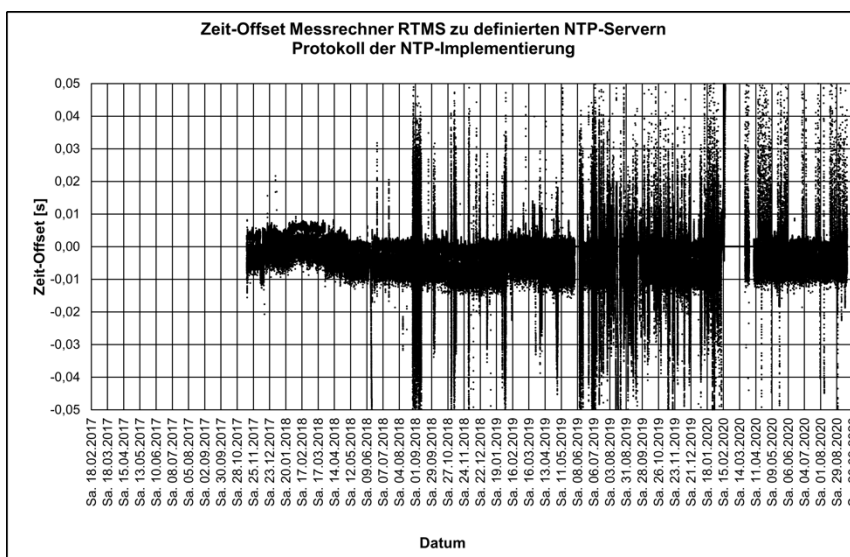


Bild 21: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und aller in der NTP-Implementierung hinterlegten Zeitquellen, unabhängig von deren tatsächlicher Verwendung – aus Protokoll *PeerStats* der NTP-Implementierung

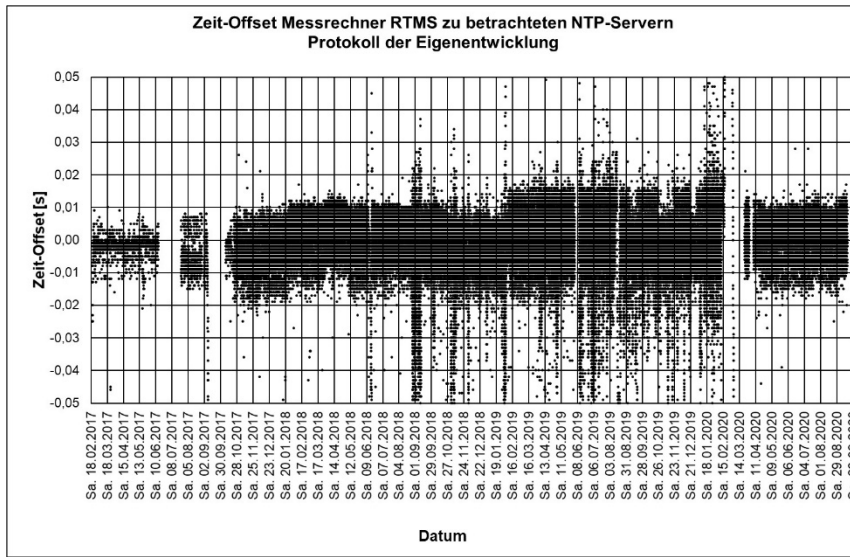


Bild 22: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und verschiedenen Zeitquellen – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung

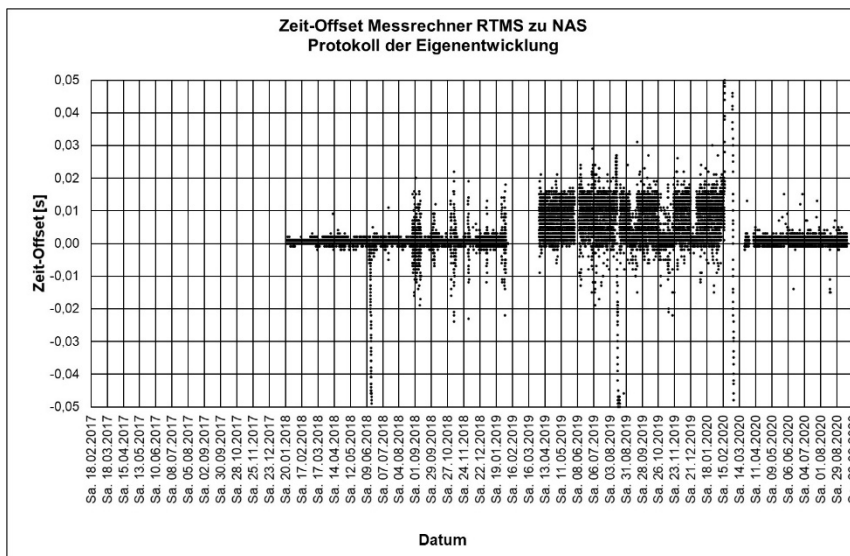


Bild 23: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem NAS – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung

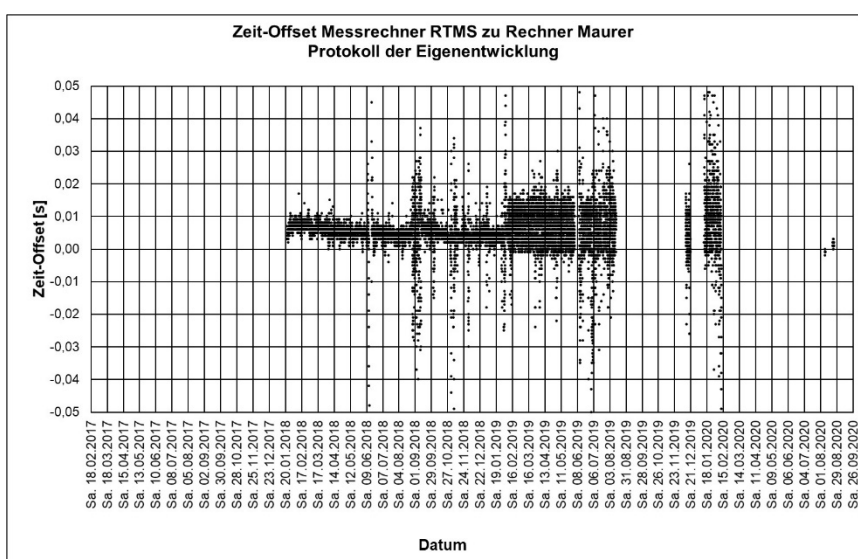


Bild 24: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem Messrechner Maurer – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung

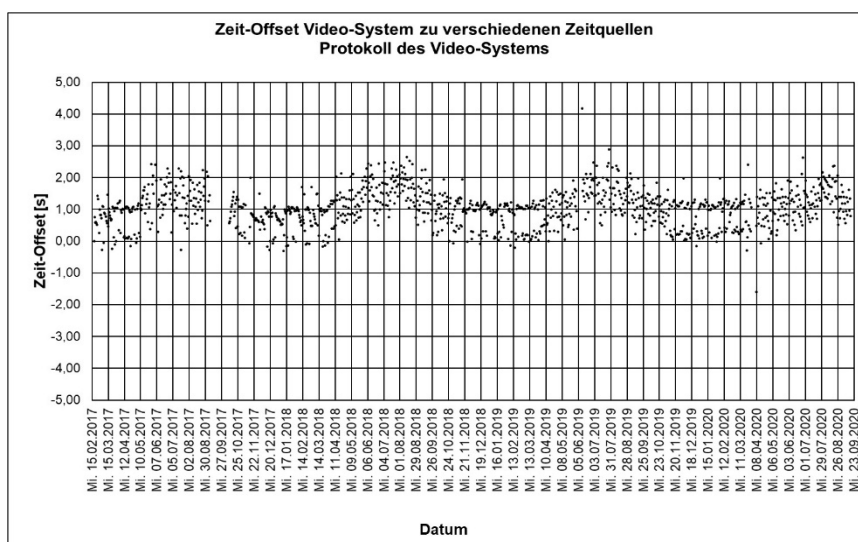


Bild 25: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Video-System und verschiedenen Zeitquellen – aus Protokoll des Video-Systems

Für eine Einschätzung der technischen Lösung zur Zeitsynchronisation sind im Gesamtdatenbestand mehrere Zeiträume von vordergründigem Interesse, in denen sich verschiedene Ausfallcharakteristiken eingestellt haben.

In Bild 20 und Bild 22 wird im Zeitraum September/Oktober 2017 ein längerer Ausfall des NAS ersichtlich. In diesem Zeitraum erfolgte durch die Festlegung des NAS als alleiniger NTP-Server keine Zeitsynchronisation des Messrechners RTMS. Gleichzeitig wurde jedoch aufgrund der unverändert bestehenden Internetanbindung durch die Eigenentwicklung die Zeitdifferenz des Messrechners zu anderen NTP-Servern ermittelt. In

Bild 26 ist diese Phase dargestellt. Es wird ersichtlich, dass in diesem Zeitraum eine sich fortwährend betragsmäßig vergrößernde Abweichung zwischen der Uhr des Messrechners und der Zeitquelle vorhanden ist. Am 28.09.2018 kam es zu einem Stromausfall mit einer Dauer von knapp über 24 h Dauer. Mit dem planmäßigen Neustart des Messrechners nach dem Stromausfall stellte sich ein Sprung in der ermittelten Zeitdifferenz zu einem externen NTP-Server ein. In dieser Phase war aufgrund des Ausfalls des NAS kein korrigierender Eingriff möglich. Nach der Wiederherstellung der Zugangsmöglichkeit wurden entsprechend der oben aufgeführten Erläuterungen zusätzliche NTP-Server festgelegt,

jedoch das NAS als bevorzugter Server definiert. Die Notwendigkeit der fortwährenden Zeitsynchronisation wird hier besonders deutlich. Im Februar 2019 kam es zu einem weiteren längeren Ausfall des NAS. Die beschriebene Konfiguration der zusätzlichen NTP-Server wirkte hierbei planmäßig. In Bild 27 ist der genannte Zeitraum dargestellt. Farblich unterschieden wird

darin zwischen den NTP-Daten des NAS (blaue Punkte) und den Daten der übrigen definierten externen NTP-Server (orangene Punkte). Für den Zeitabgleich wurden von der NTP-Implementierung auf dem Messrechner somit die externen NTP-Server verwendet und damit der Ausfall des NAS entsprechend kompensiert.

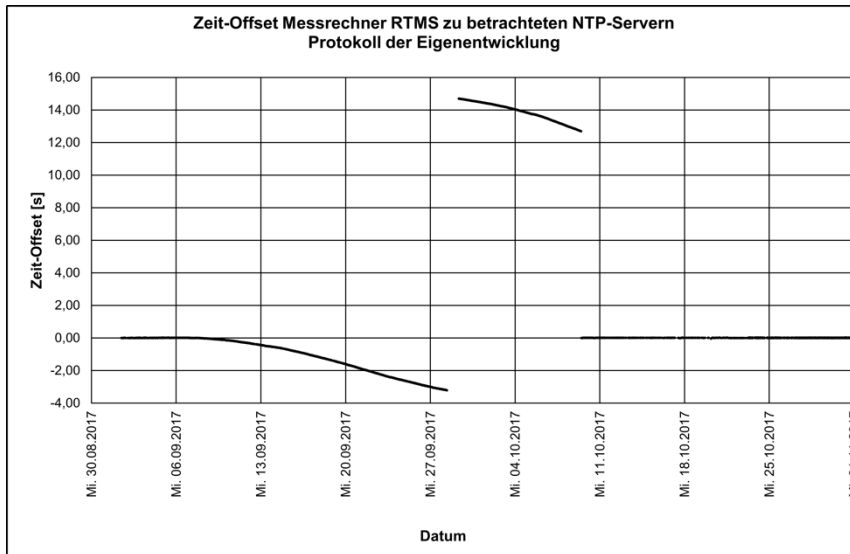


Bild 26: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und verschiedener Zeitquellen – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung – Phase des Ausfalls des NAS Sep./Okt. 2017

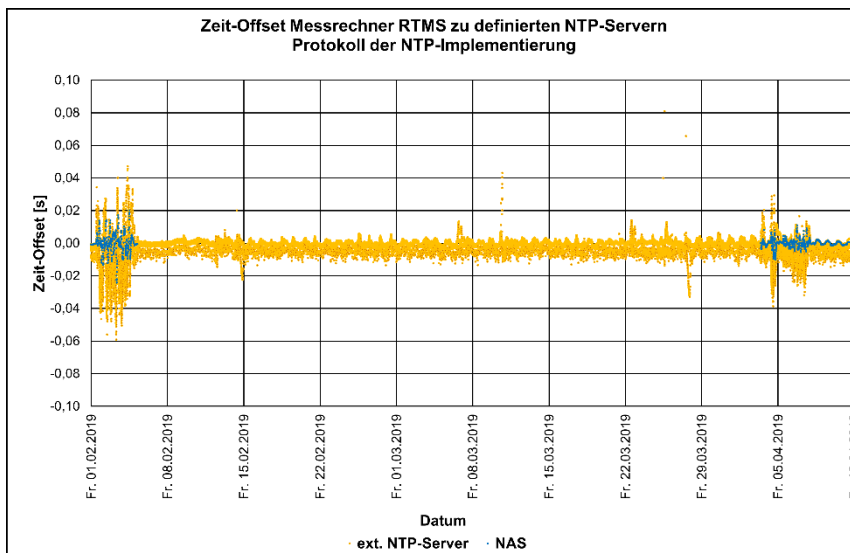


Bild 27: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und allen in der NTP-Implementierung hinterlegten Zeitquellen, unabhängig von deren tatsächlichen Verwendung – aus Protokoll *PeerStats* der NTP-Implementierung – Phase des Ausfalls des NAS zwischen Februar 2019 und April 2019

Ein weiterer relevanter Zeitraum liegt im Juni 2018. Hier kam es zu einer Unterbrechung der Internetverbindung für einige Tage. In Bild 28 bis Bild 30 ist diese Phase dargestellt. Bild 28 zeigt dabei, dass während der Ausfallszeit der Internetverbindung keine Synchronisation der Rechneruhr mit einer Zeitquelle erfolgt ist. Im internen Netz waren aber sowohl das NAS als auch der Messrechner Maurer erreichbar. In Bild 29 ist eine differenzierte Darstellung der Zeitdifferenzen zu verschiedenen externen NTP-Servern und des NAS dargestellt. Bis zum Ausfall der Internetanbindung gegen 08:00 Uhr (UTC) des 12.06.2018 liegen Daten für das NAS und für externe Server vor. Ab dem 13.06.2018 gegen 10:00 Uhr (UTC) erfolgte keine weitere Synchronisation des Messrechners zur NAS. Stattdessen wurde die lokale Uhr als Zeitquelle verwendet (schwarze Linie im Diagramm). Gleichzeitig erfolgte eine fortwährende Vergrößerung der Zeitdifferenz zur NAS. Zum Messrechner Maurer stellte sich ebenfalls eine fortwährende Vergrößerung der Zeitdifferenz ein, deren Umfang noch größer war (vgl. Bild 30). Diese Charakteristik entspricht nicht der geplanten Auslegung. Vorgehensehen ist in diesem Fall, die unveränderte Synchronisation der Systeme

zur NAS und damit die Bildung einer im System geschlossenen, konsistenten Zeitinformation, unabhängig von einer möglichen Abweichung zur *realen* Zeit. Es ist davon auszugehen, dass im Fall des Ausfalls der Internetverbindung das NAS als NTP-Server *sich selbst* einen hohen Stratum-Wert zuweist und damit die NTP-Implementation auf dem Messrechner die eigene Systemzeit als zuverlässiger *ansieht* als die Zeitinformation des NTP-Servers (NAS). Bild 29 zeigt diese Charakteristik der Verwendung der lokalen Uhr anstelle der Zeitinformation des NAS eindeutig. Ein weiteres Beispiel für die Effekte der Zeitsynchronisation bei Ausfall der Internetanbindung ist in Bild 31 für einen Zeitraum im August 2019 dargestellt. Die Charakteristik ist hier analog. Problematisch ist in diesen Fällen, dass im Linux-basierten Betriebssystem des NAS zwar prinzipiell die Konfiguration und damit das Verhalten des NTP-Servers modifiziert werden kann, diese Änderung der Konfiguration aber zum Beispiel im Zuge der Einspielung eines automatischen Updates des Betriebssystems des NAS wieder verloren geht.

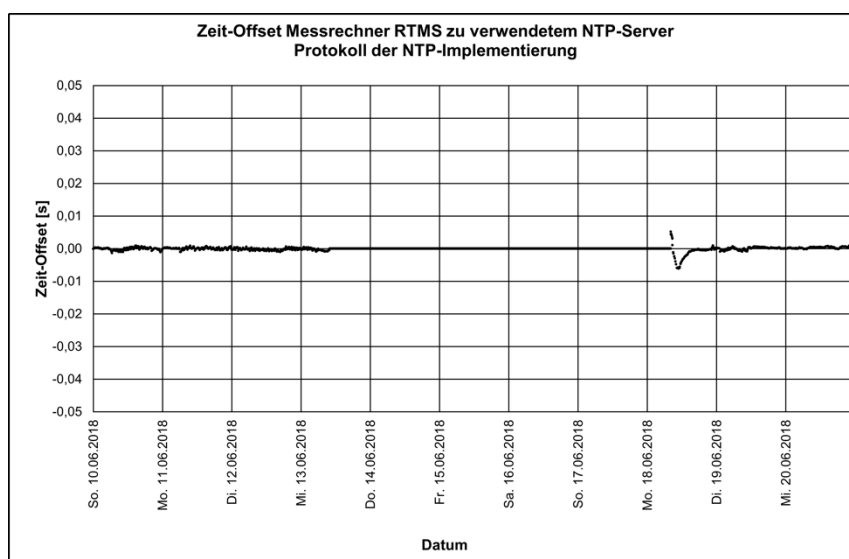


Bild 28: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle aus Protokoll *LoopStats* der NTP-Implementierung – Phase des längeren Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018

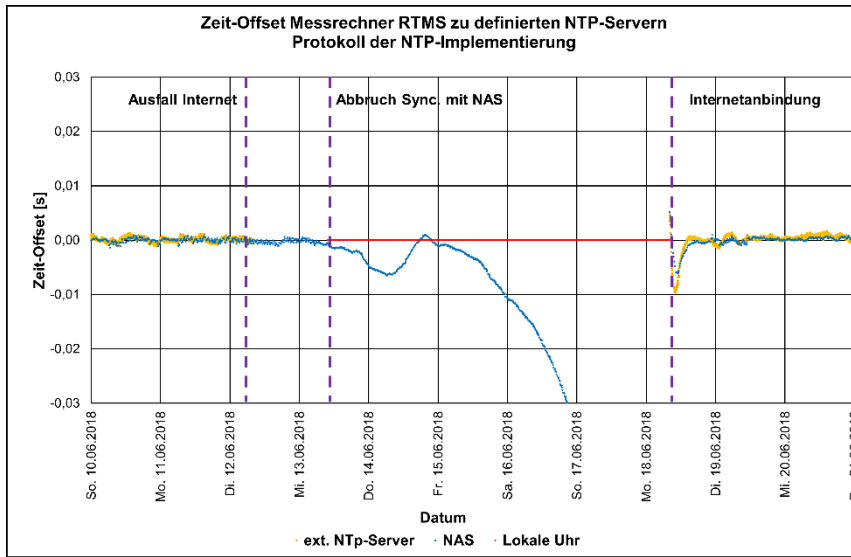


Bild 29: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll *PeerStats* der NTP-Implementierung – Phase des längere Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018

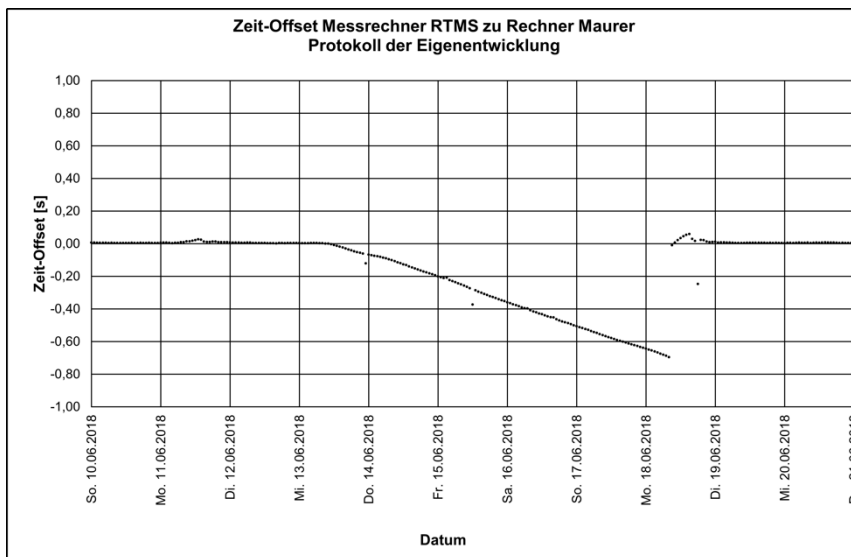


Bild 30: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem Messrechner Maurer – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung – Phase des längeren Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018

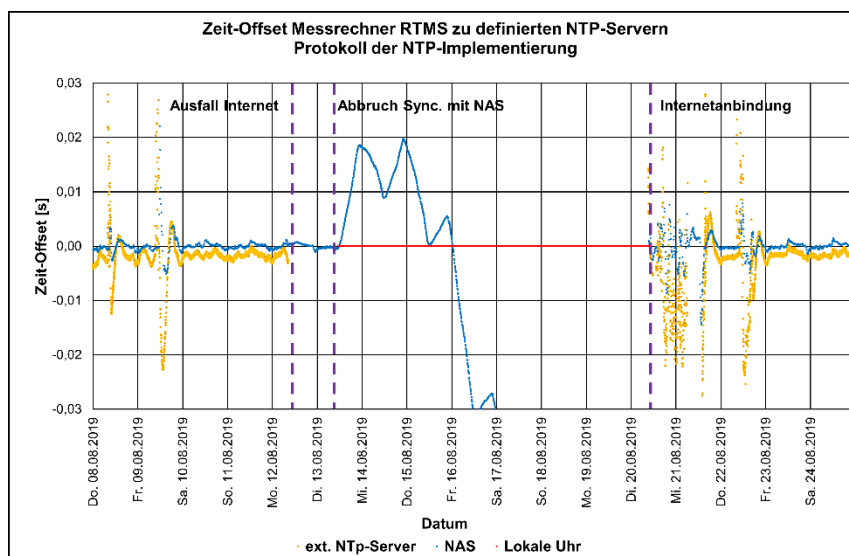


Bild 31: Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll *PeerStats* der NTP-Implementierung – Phase des längere Ausfalls der Internetverbindung im August 2019

Die vorhergehende Betrachtung der erfolgten Zeitsynchronisationen, ausgehend von dem vom Messrechner RTMS erfassbaren und protokollierten Daten, zeigt auf, dass bei einem vollständig ungestörten Zustand des Gesamtsystems einschließlich der Anbindung an das Internet zur Versorgung mit *realen* Zeitinformationen, hinsichtlich der internen Uhren der Rechnersysteme, eine hinreichend genaue einheitliche Zeitinformation zur Verfügung steht. Ein Ausfall des NAS als im Gesamtsystem definierten zentralen NTP-Server bei gleichzeitiger unveränderter Internetanbindung kann durch die Messrechner kompensiert werden, indem externe Zeitquellen verwendet werden. Bei einem alleinigen Ausfall der Internetanbindung zeigt sich ein ungewolltes Systemverhalten, dass aufgrund der technischen Randbedingungen unter Beibehaltung des NAS als zentralen NTP-Server nicht zuverlässig behoben werden kann. Das Verhalten, in dem der Messrechner bei einem vollständigen Ausfall sowohl des Internets als auch des NAS als interner NTP-Server die eigene Rechnerzeit verwendete und auch *nach außen* weitergibt (an Messverstärker und Kamerasystem) sollte beibehalten werden, damit in diesem Fall die Messung inkl. der Möglichkeit der Zuordnung der Video-Informationen erhalten bleibt.

5 Verkehrserkennung aus Messdaten RTMS

5.1 Eingesetzte Methodik der Verkehrserkennung

5.1.1 Grundlagen

Die Erkennung der Fahrzeuge, die das Bauwerk überfahren, erfolgt anhand einer geeigneten Auswertung der Messdaten. Die dabei eingesetzten Verfahren der Messdatenauswertung und Messdatenzuordnung zwischen den verschiedenen Messstellen am Bauwerk basieren im Kern auf in vorhergehenden Untersuchungen ([16], [14], [12], [13], [15]) entwickelte Algorithmen, die für den hier konkret vorliegenden Fall angepasst wurden.

Die Erkennung und Identifikation von überfahrenden Fahrzeugen setzt einen hohen Informationsgehalt, insbesondere lokaler und globaler Bauwerkskenngrößen im Zusammenspiel voraus. Die Betrachtung lokaler und globaler Bauwerkskenngrößen ermöglicht dann die Fahrzeugidentifikation. Über den Messzeitraum hinweg werden so bei der Auswertung der Messdaten Fahrzeuge identifiziert, die das Brückenbauwerk passieren. Für jedes erkannte Fahrzeug wird dabei ein Datensatz ermittelt, der folgende Einzelinformationen zum Fahrzeug enthält:

Auftretenszeitpunkt (Datum und Uhrzeit) des Fahrzeuges

Fahrspur

Fahrzeuglänge (anhand erkannter Achsen)

Achszahl

Fahrzeugabstand

Achsabstände

Fahrzeuggesamtgewicht

Fahrzeugtyp (basierend auf Typenbezeichnungen in den Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS 2012 vgl. [28]) anhand erkannter Achsen)

Die Zuordnung von Fahrzeugtypen erfolgt lediglich für eine Untermenge möglicher Fahrzeugtypen, die jedoch anhand anderer Verkehrserfassungsdaten als am häufigsten vorkommend eingeschätzt werden können.

Eine Aufstellung der betrachteten Fahrzeugtypen sowie die Kriterien zur Typzuordnung auf Basis der Achsabstände sind im Anhang A zusammengestellt. Die Fahrzeuge sind standardisierte Typen.

Sonderfahrzeuge sind infolge der hohen Individualität nicht enthalten. Diese werden auch erfasst aber gesondert ausgewertet.

5.1.2 Prinzipielle Umsetzung

Die vorhandenen Algorithmen basieren auf einer speziellen Anordnung von Messstellen am Bauwerk. Dabei wird zwischen Messstellen unterschieden, deren Verlauf der auflaufenden Messdaten infolge der Überfahrt von Fahrzeugen eine gewisse Charakteristik aufweisen. Bei den Messdaten an sogenannten *globalen Messstellen* ergibt sich ein ausgeprägter Verlauf infolge der Überfahrt des Fahrzeuges jedoch nicht infolge der einzelnen Achsen oder Achsgruppen des Fahrzeuges. Diese Messdaten werden zur grundsätzlichen Fahrzeugerkennung hinsichtlich der Fahrspur bzw. Fahrtrichtung, der Fahrzeuggeschwindigkeit und im Nachlauf zur Bestimmung der Fahrzeuggewichte herangezogen. Im Gegensatz dazu zeigen die Verläufe der Messdaten an den sogenannten *lokalen Messstellen* eine ausgeprägte Charakteristik infolge der Überfahrt der einzelnen Achsen der Fahrzeuge. Diese Daten werden zur Achserkennung (Achszahl, Achsabstände) und zur grundlegenden Bestimmung der Achslastverteilung herangezogen. Die gesamte Fahrzeugerkennung basiert im einfachsten Fall auf erkannten Peaks in den Messverläufen. Für verfeinerte Auswertungen liegen auch Algorithmen vor, in denen nicht die isolierten Peaks analysiert werden, sondern Teilbereiche der Messverläufe. Zu Darstellungszwecken und dem Aufzeigen der prinzipiellen Anwendbarkeit der vorhandenen Methoden werden die nachfolgenden Erläuterungen jedoch lediglich auf der Basis von Peaks in den Messverläufen gegeben.

5.1.3 Ermittlung der Fahrzeuggesamtgewichte

5.1.3.1 Grundlagen

Die Ermittlung des Gesamtgewichtes eines identifizierten Fahrzeuges wird über ein Optimierungsverfahren unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate realisiert. Die Ausgleichsrechnung erfolgt zwischen einem gemessenen Kennwert-Zeitverlauf und einem gerechneten Kennwert-Zeitverlauf. Hierfür können unterschiedliche globale Bauwerkskenngrößen verwendet werden.

Der gerechnete Kennwert-Zeitverlauf basiert dabei entweder auf einer aus einem Tragwerksmodell ermittelten und durch Kalibrierung evaluierten Kennwert-Einflussfunktion oder auf einer Kennwert-Einflussfunktion, die ohne Tragwerksmodell, lediglich

aus den Daten der Kalibrierungen ermittelt wurde. Erläuterungen hierzu finden sich in den beiden nachfolgenden Absätzen 5.1.3.2 und 5.1.3.3.

Bei der Ermittlung des rechnerischen Kenngrößen-Zeitverlaufes ist hierbei die Berücksichtigung aller sich im betrachteten Zeitraum auf der Brücke befindenden Fahrzeuge bzw. Achsen notwendig. Aus den über lokale Messungen ermittelten Achskonfigurationen (Achsabstände und Achslastverteilung) der Fahrzeuge werden summarische Kennwert-Zeitverläufe rechnerisch ermittelt. Diese wiederum finden Eingang in das Optimierungsverfahren. Aufgrund der spezifischen Charakteristiken der Verläufe der Messgrößen bei der Überfahrt der Fahrzeuge sind zusätzlich zur Optimierung über die Methode der kleinsten Quadrate (geschlossene Berechnung über Matrix-Operationen) mehrere iterative Durchläufe mit Variation der Geschwindigkeit, des Startpunktes der Anpassung und des Null-Niveaus der Anpassung erforderlich.

5.1.3.2 Kennwert-Einflussfunktion aus Tragwerksmodell

Die Modellierung der Brücke BW 402e erfolgte auf Basis der von der Autobahndirektion Nordbayern (ABDNB) zur Verfügung gestellten Planungsunterlagen. Die Umsetzung der Modellierung und der anschließenden Simulation erfolgte mit dem Computerprogramm InfoCad V.12.

Bild 32 gibt einen Eindruck über das Modell, das den Überbau über die gesamte Brückenlänge abbildet. Die Geometrie wurde entsprechend der Planungsunterlagen entlang eines Kreisbogens mit dem Radius von $R = 819,8$ m bezogen auf die Querschnittsmitte (vgl. Bild 32) über die Bogenlänge vom $L = 157,758$ m extrudiert. Querschnittsänderungen im Trog und der Fahrbahnplatte, Öffnungen im Überbau, die Kappen zu beiden Seiten der Fahrbahn und der Fahrbahnbelag sind in der Geometrie des Modells explizit berücksichtigt. Bild 32 zeigt auch die Lage der vier Messquerschnitte im Überbau, in denen die Sensorik des RTMS konzentriert installiert ist.

Die Vernetzung des Brückenüberbaus zum FE-Modell erfolgte unter Verwendung von Volumenelementen. Die zugewiesenen Materialeigenschaften entsprechen dem von Beton der Klasse C40/50, welcher laut Planunterlagen für den Überbau zur Anwendung kam.

Die Wirkung der externen Spannglieder (Drahtspannsystem SUSPA EX66; St 1570/1770; $A_{\text{Seil}} = 23,18 \text{ cm}^2$) fand in der Art Berücksichtigung, dass die vertikale Komponente der Federsteifigkeit der Spannglieder in Abhängigkeit der Einbausituation am jeweiligen Umlenksattel als Ersatzfeder modelliert ist.

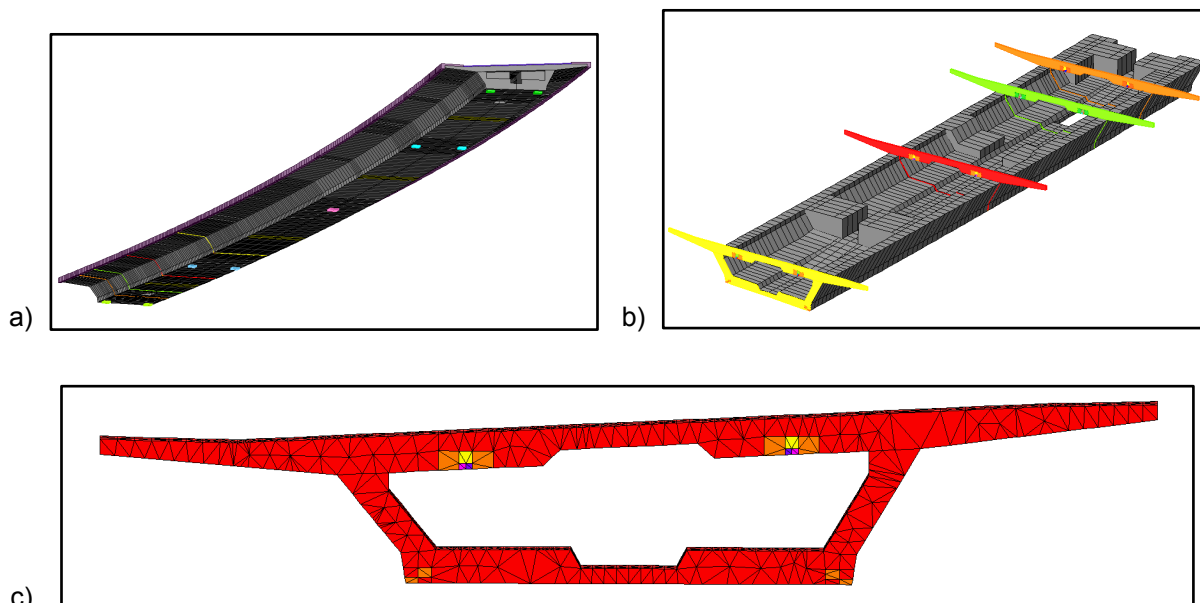


Bild 32: FE-Modell der Brücke. (a) Geometrie des kompletten Modells, (b) Trog des Hohlkastens incl. der auf die Messstellen angepassten Messquerschnitte A-D und (c) FE-Netz des Hohlkastens im Querschnitt

Das FE-Modell dient als Grundlage für die Ermittlung von Kennwert-Einflussfunktionen. Diese ermittelten Einflussfunktionen sind mit real gemessenen Zeitverläufen aus Kalibrierfahrten zu vergleichen. Entsprechend des Vergleichsergebnisses ist eine Anpassung des Tragwerksmodells erforderlich. Zielstellung ist dabei eine möglichst genaue Abbildung der gemessenen Verläufe durch die ermittelten Einflussfunktionen.

5.1.3.3 Kennwert-Einflussfunktion aus Kennwert-Zeit-Verläufen

Neben der Methodik der Ermittlung von Kennwert-Einflussfunktionen aus einem Tragwerksmodell mit anschließender bzw. paralleler Anpassung des Modells zur optimalen Abbildung von Kalibrierdaten besteht auch die Möglichkeit, Kennwert-Einflussfunktionen ohne Tragwerksmodell direkt aus Kennwert-Zeit-Verläufen aus der Überfahrt bekannter Fahrzeuge zu ermitteln.

In [20] wurde hierzu eine Methodik aus [22] für den konkreten Anwendungsfall in den Untersuchungen in [16] aufbereitete und erprobt. Prinzipiell werden in dieser Methodik über eine Matrix-Berechnung die Ordinatenwerten einer gesuchten Einflusslinie bei gegebenem Zeitverlauf und gegebenen Informationen zum überfahrenden Fahrzeug (Achslasten, Achsabstände, Geschwindigkeit) berechnet. Die Berechnung ist dabei unabhängig vom Tragsystem (1-Feld-System, Mehrfeld-System), jedoch handelt es sich um einen zweidimensionalen Ansatz. Dies bedeutet, dass Effekte von unterschiedlichen Fahrzeugpositionen in Querrichtung auf dem Bauwerk nicht direkt betrachtet werden können. Ersatzweise ist es jedoch möglich, für verschiedene bekannte Querpositionen eines überfahrenden Kalibrierfahrzeuges jeweils getrennt Einflusslinien zu ermitteln und diese dann im Nachlauf zu Einflussflächen zusammenzustellen.

Im nachfolgenden Absatz 5.1.4.2 werden die auf Basis der Messdaten aus den Kalibrierfahrten am 30.09.2016 ermittelten Kennwert-Einflussfunktionen dargestellt. Diese wurden im aktuellen Entwicklungsstand der Algorithmen zur Bestimmung der Fahrzeuggesamtgewichte eingesetzt. In Absatz 5.1.4.3 sind zu Vergleichszwecken ermittelten Kennwert-Einflussfunktionen aus den Messdaten der zusätzlichen Kalibrierfahrten am 22.04.2018 dargestellt.

5.1.4 Auswertung von Kalibrierfahrten

5.1.4.1 Aufbereitung der Kalibrierfahrten am 30.09.2016

Die Kalibrierfahrten wurden am 30.09.2016 mit insgesamt 36 Überfahrten durchgeführt. Neben der Verwendung von zwei unterschiedlichen Fahrzeugen (Fz. 1 und Fz. 2), unterscheiden sich die Überfahrten nach Geschwindigkeit und Spurlage der Fahrzeuge sowie der Art der Überfahrt. Von 36 Überfahrten sind 31 Überfahrten so genannte Einzelüberfahrten, d.h. es befand sich während der Messung ausschließlich ein Belastungsfahrzeug auf der Brücke. Die verbleibenden 5 Überfahrten wurden mit beiden Fahrzeugen gleichzeitig als Parallel- oder Reihenfahrt durchgeführt. Die Variation der Spurlage ist notwendig, um zu ermitteln in welchem Maß die Position quer zur Fahrtrichtung eines die Brücke passierenden Fahrzeugs Einfluss hat auf die Messungen der Messstellen, die im Überbau an der Unterseite der Fahrbahnplatte montiert sind.

Das installierte Messsystem liefert zeitbasierte Daten, die für Teilaspekte der Auswertung in Positionskordinaten auf der Fahrbahn überführt werden müssen. Notwendig ist diese Transformation z.B. um die Sensoraufzeichnungen unabhängig von der Überfahrgeschwindigkeit darstellen und vergleichen zu können. Durchgeführt wird dies unter der Annahme, dass die Überfahrten mit konstanter Geschwindigkeit erfolgen und mit Bezug auf diejenigen Sensormessungen, deren Einwirkungs-Reaktions-Beziehung (Einflussfunktion) eine Lokalisierung der Einwirkung auf der Fahrbahn prinzipiell zulässt. Geeignete Messstellen sind solche, welche die Brückenreaktion infolge einer Überfahrt im globalen Sinn wiedergeben. Eine solche Messstelle definiert sich dadurch, dass es nicht möglich ist, einzelne Achsen im Messverlauf separat darzustellen. Der Ansatz ist, dass beispielsweise ein auf diese Weise gemessener Maximalwert (Peak) direkt einem Fahrzeug zugeordnet werden kann. Aufgrund der durch die Installation festgelegten Lage der Sensoren relativ zueinander, ist es weiterhin möglich mit Hilfe der gemessenen Zeitdifferenzen in der Signalmessung verschiedener Sensoren die Geschwindigkeit des überfahrenden Fahrzeugs zu bestimmen. Bild 33 und Bild 34 zeigen für verschiedene Überfahrgeschwindigkeiten von Fahrzeug 1 (3-Achser) die Messverläufe geeigneter Messstellen.

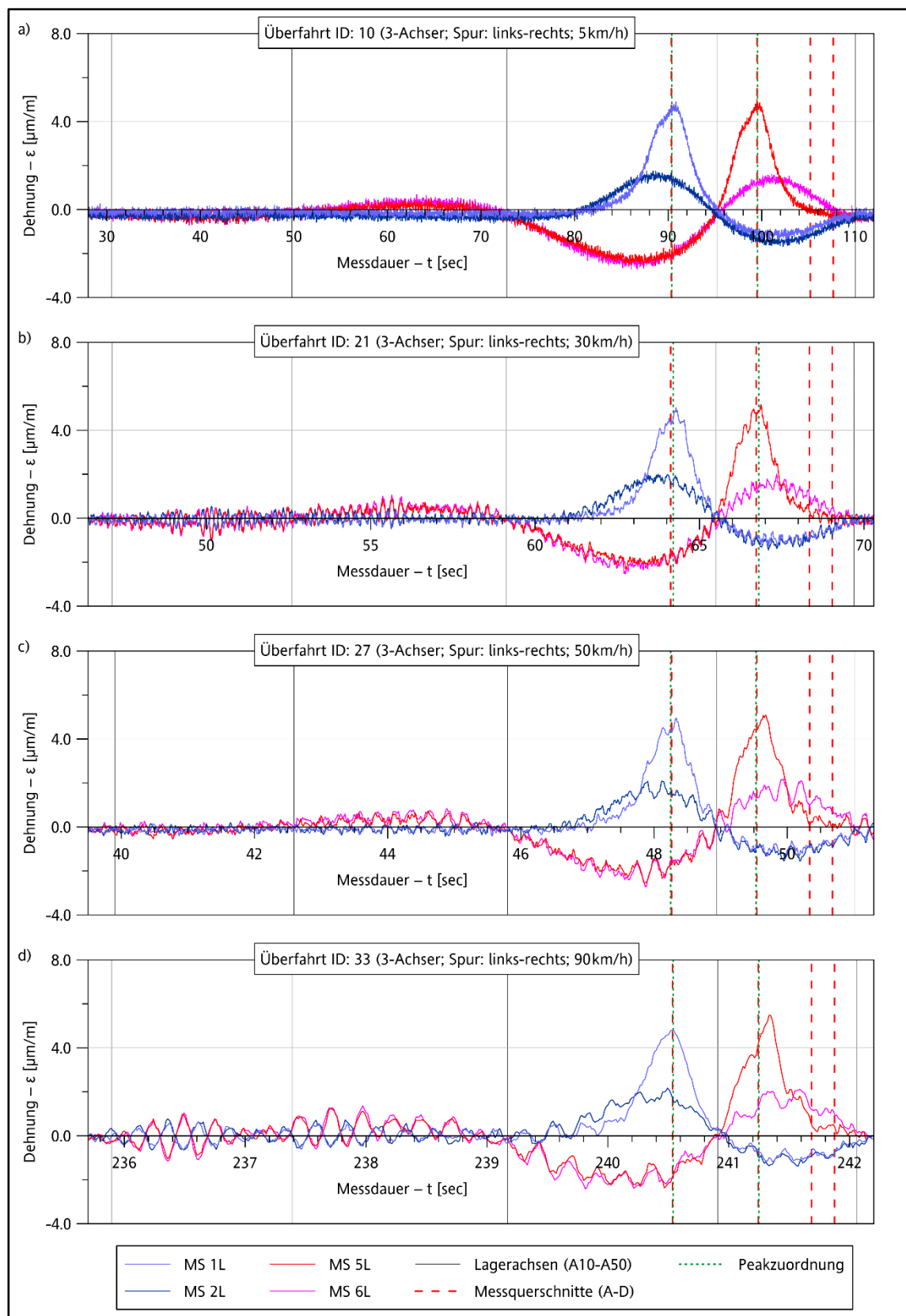


Bild 33: Basislinienkorrigierte Dehnungsmessungen der an der Längsbewehrung im inneren des Betonquerschnittes angebrachten DMS. Dargestellt sind die Fahrten des Kalibrierfahrzeuges 1 (3-Achser) in der linken Fahrspur rechts orientiert mit der Überfahrgeschwindigkeit von (a) 5 km/h, (b) 30 km/h, (c) 50 km/h und (d) 90 km/h.

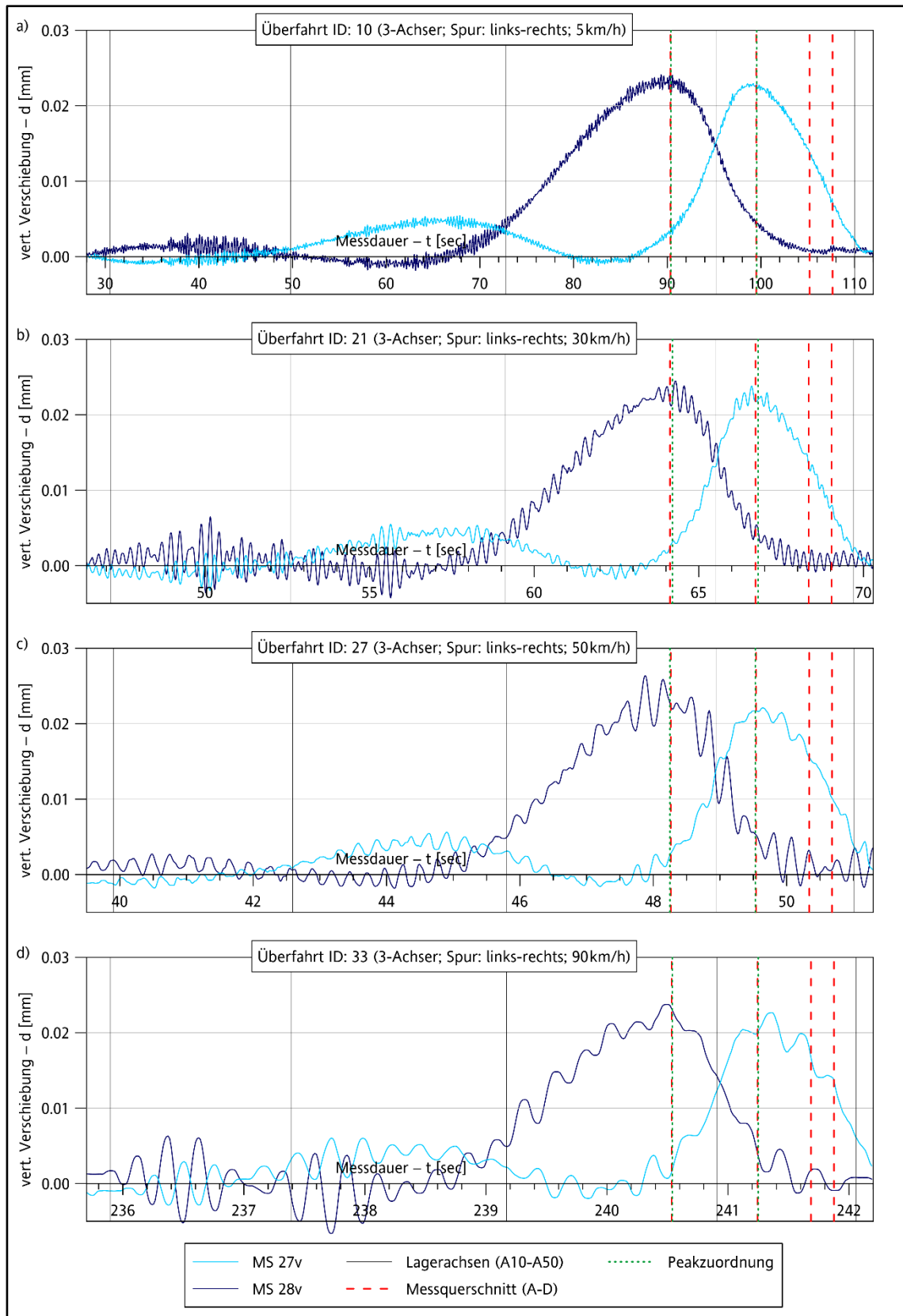


Bild 34: Basislinienkorrigierte Messungen der induktiven Wegausnehmer am Lager der Achse 40/Nord in vert. Richtung. Dargestellt sind die Fahrten des Kalibrierfahrzeuges 1 (3-Achser) in der linken Fahrspur rechts orientiert mit der Überfahrgeschwindigkeit von (a) 5 km/h, (b) 30 km/h, (c) 50 km/h und (d) 90 km/h.

5.1.4.2 Einflusslinien aus Kalibrierfahrten am 30.09.2016

Mit der in Absatz 5.1.3.3 genannten Methodik zur Ermittlung von Kennwert-Einflussfunktionen, nachfolgend als Einflusslinien bezeichnet, wurden die Messdaten aus den am 30.09.2016 durchgeführten Kalibrierfahrten ausgewertet. Die Ermittlung der Einflusslinien erfolgte für eine Untermenge der Sensoren des Messsystems für jede Kalibrierfahrt, in der lediglich eines der beiden Kalibrierfahrzeuge die Brücke passierte.

In nachfolgendem Bild 35 sind die ermittelten Einflusslinien für die Messstelle MS1L aus der Überfahrt des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges auf Fahrstreifen 1 (in Fahrtrichtung rechte Seite) für 6 Kalibrierfahrten (unterschiedliche Geschwindigkeiten) aufgetragen. Zusätzlich ist der gemittelte Verlauf der einzelnen Einflusslinien als rote Linie eingetragen. Die Verläufe zeigen gewisse Streuungen um den eingetragenen Verlauf des Mittelwertes

herum. Ursache hierfür sind einerseits Effekte aus dynamischen Anregungen infolge der Überfahrt des Fahrzeuges und andererseits auch unvermeidbare Streuungen der Messwerte selbst. In analoger Weise sind in Bild 36 die ermittelten Einflusslinien für die Messstelle MS1L aus den Überfahrten des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges in Fahrstreifen 2 dargestellt. Aufgrund der Lage des Fahrstreifens in Querrichtung relativ zur Messstelle MS1L sind die Ordinatenwerte der Einflusslinie hier im Vergleich zur Überfahrt in Fahrstreifen 1 erwartungsgemäß im Bereich des Maximalwertes höher. Für die Messstellen MS2L, MS5L und MS6L sind die ermittelten Einflusslinien aus den Überfahrten des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges in Fahrstreifen 1 bzw. 2 in den weiter nachfolgenden Abbildungen dargestellt (für MS2L – Bild 37 und Bild 38, für MS5L – Bild 39 und Bild 40, für MS6L – Bild 41 und Bild 42).

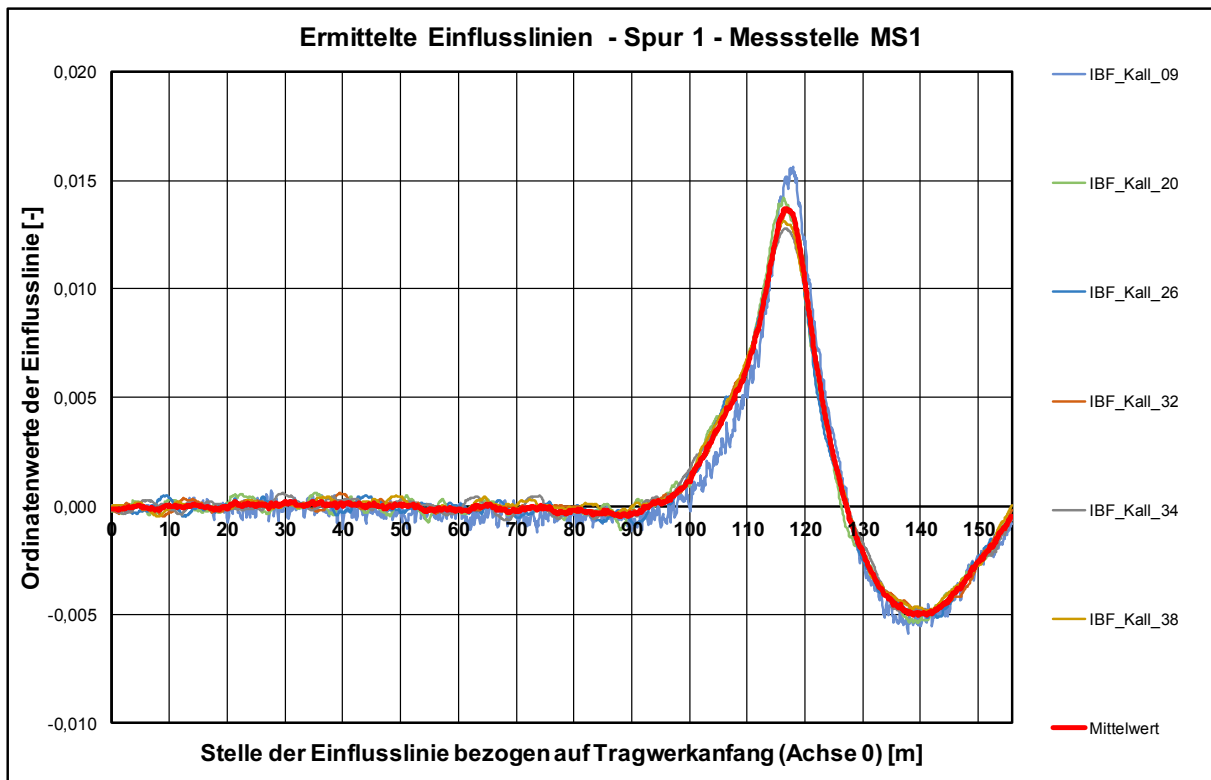


Bild 35: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug

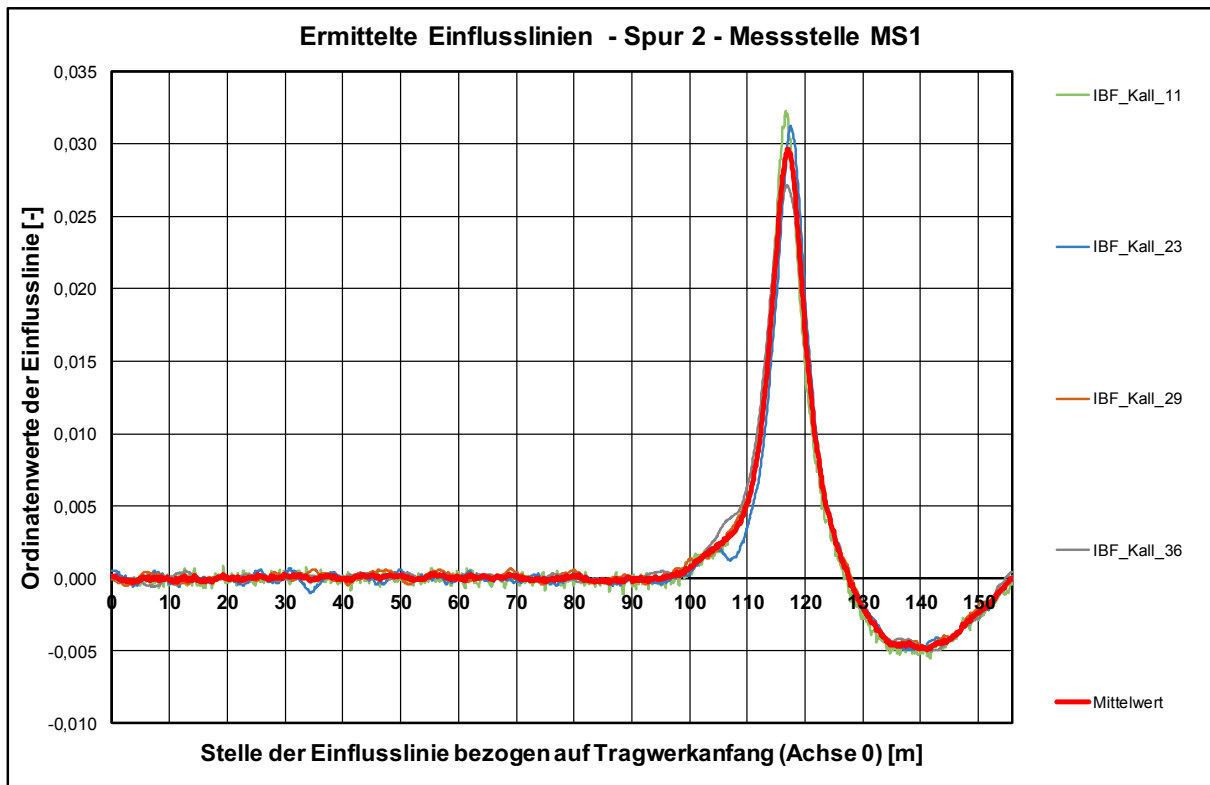


Bild 36: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug

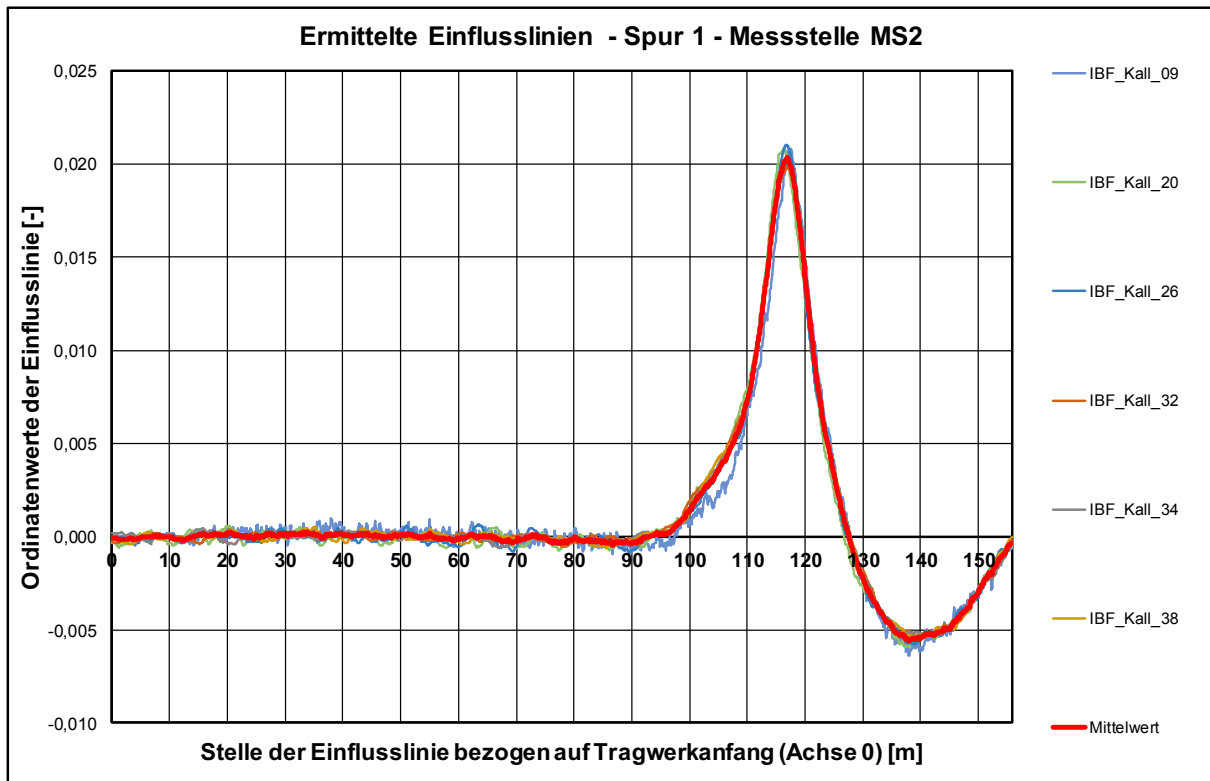


Bild 37: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug

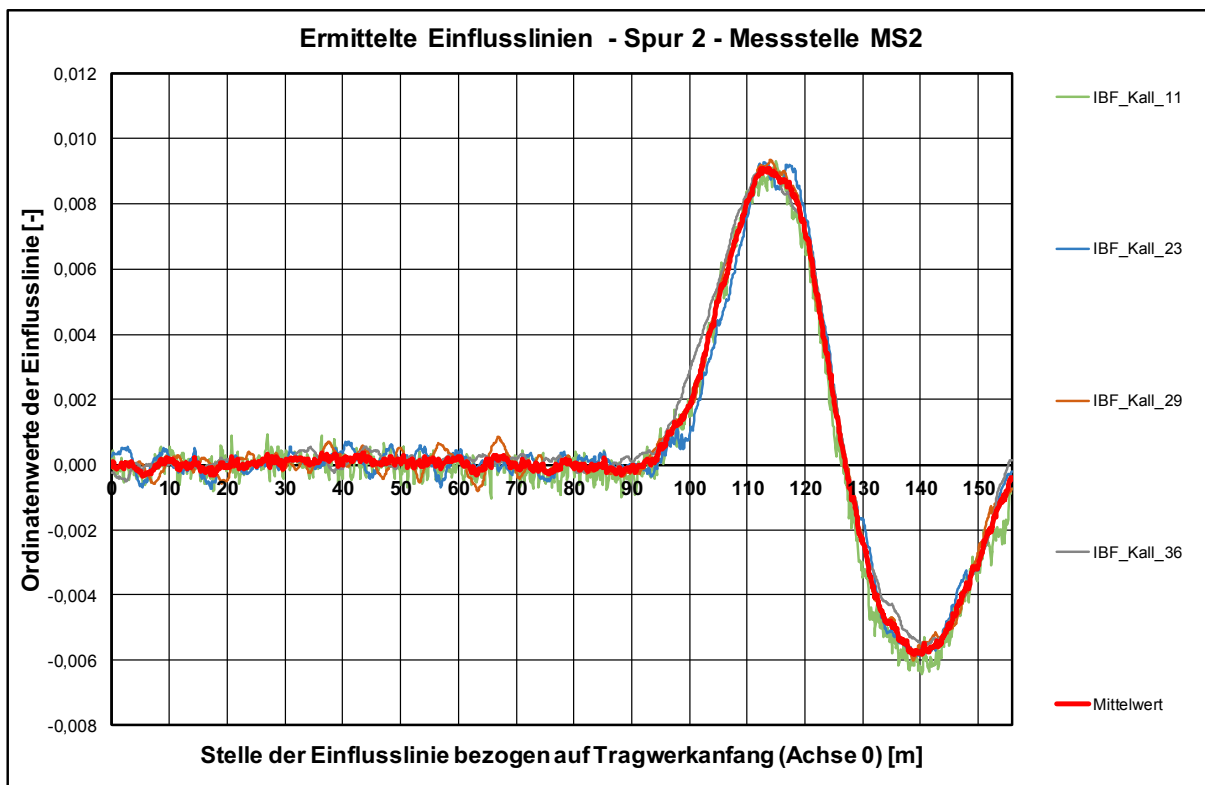


Bild 38: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug

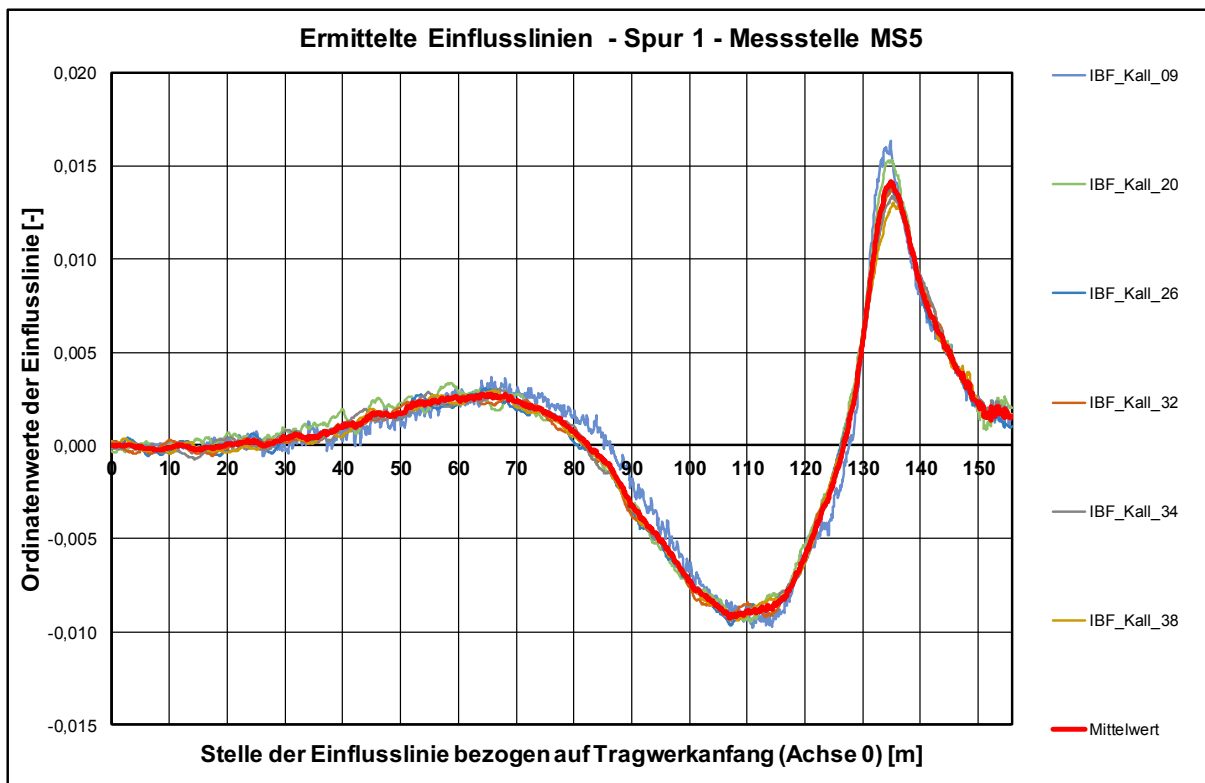


Bild 39: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug

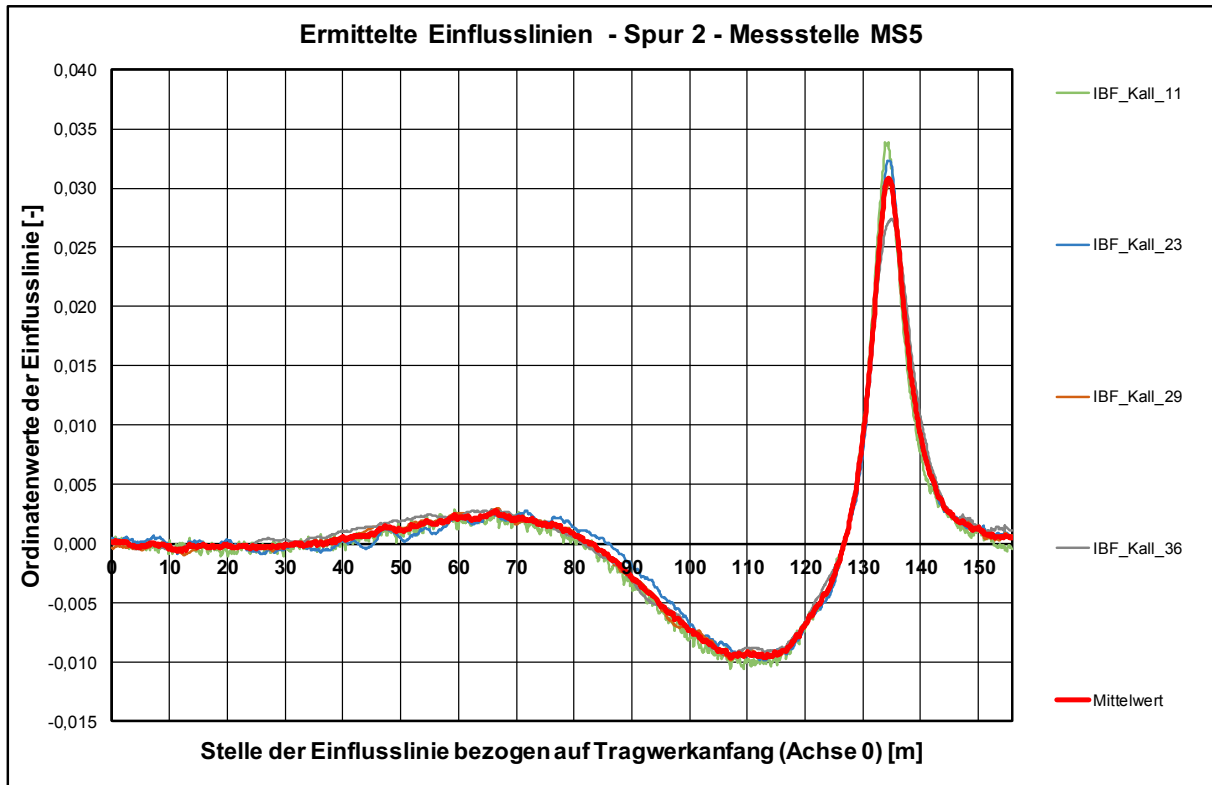


Bild 40: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug

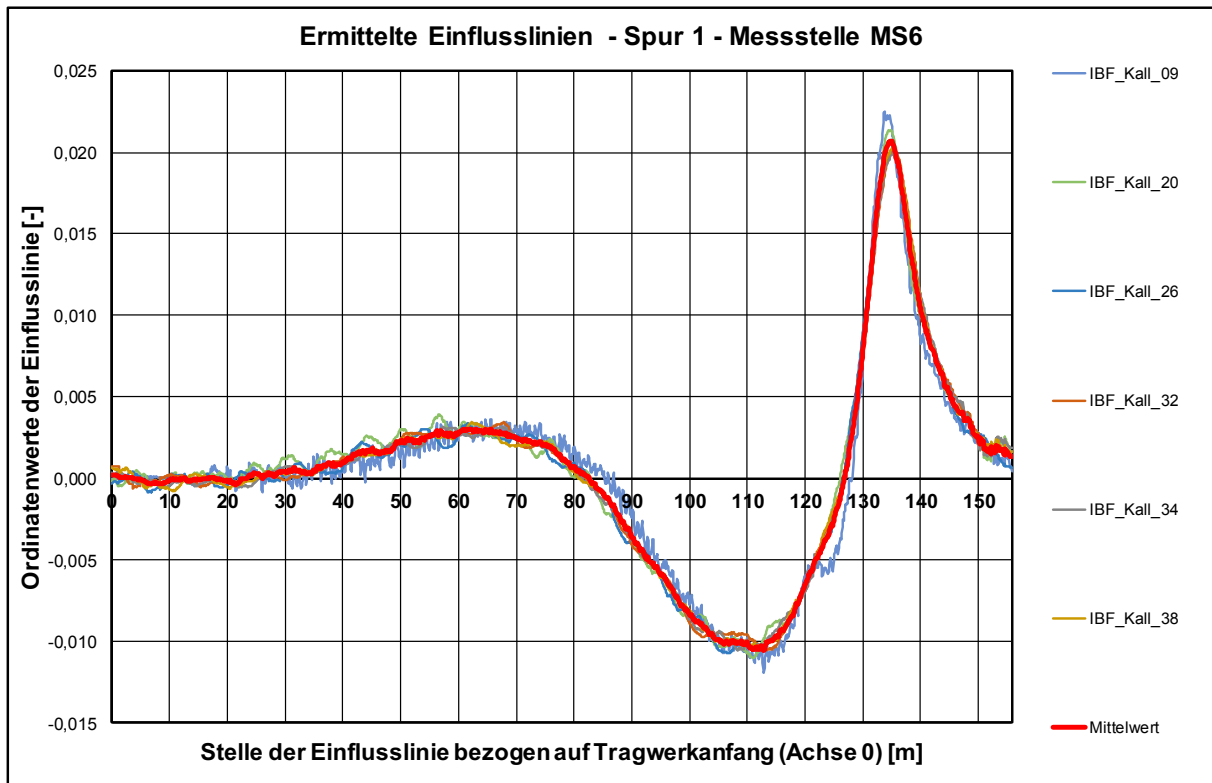


Bild 41: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug

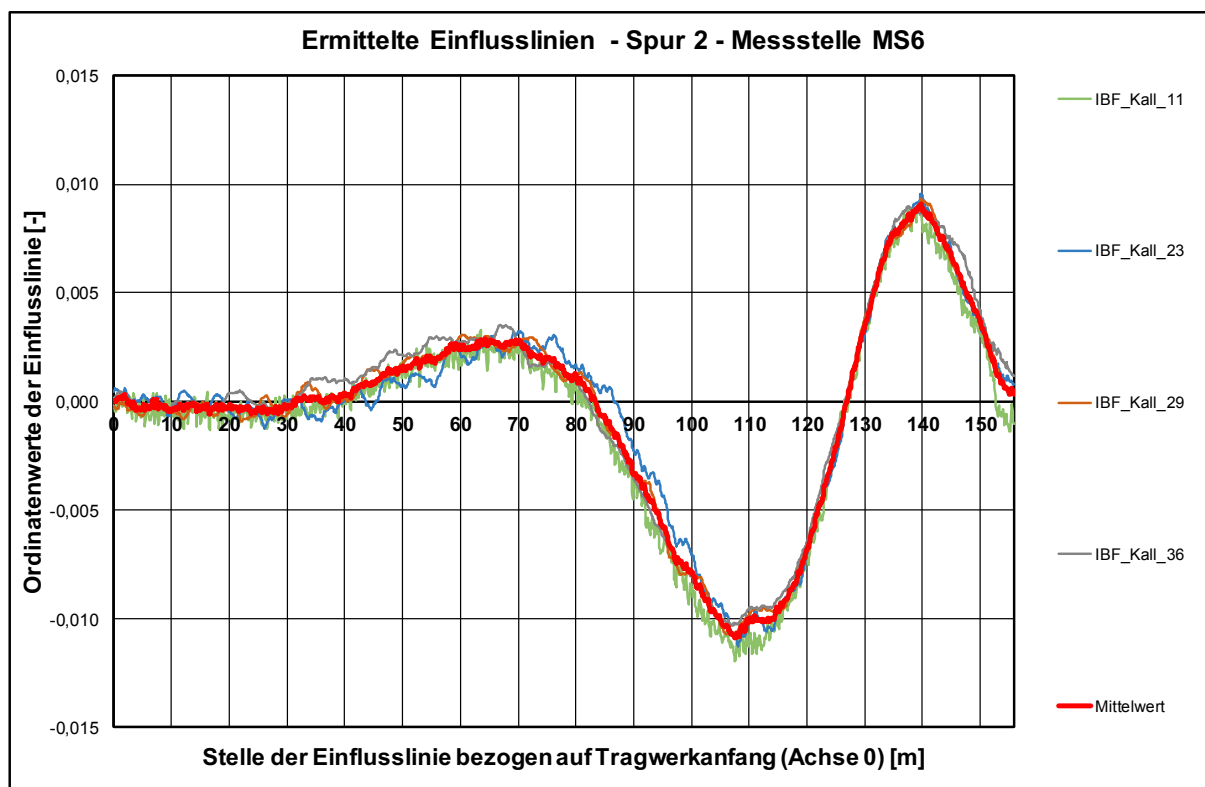


Bild 42: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug

Die in Bild 35 bis Bild 42 dargestellten Verläufe des Mittelwertes aus den ermittelten Einflusslinien aus den Überfahrten des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges werden in den weiteren Darstellungen als Referenzverläufe verwendet. In Bild 43 und Bild 44 ist der Mittelwert der berechneten Einflusslinien für die Messstelle MS1L aus den Überfahrten des 3-achsigen Kalibrierfahrzeuges in Fahrspur 1 bzw. 2 dem entsprechenden Referenzwert aus der Überfahrt des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges (Bild 35 und Bild 36) gegenüber gestellt. Es wird ersichtlich, dass die Verläufe vor allem im Bereich des jeweiligen Maximalwertes der Einflusslinien Abweichungen aufweisen. Konkret liegt der Maximalwert hinsichtlich der Ordinate unterhalb des Referenzwertes und auf der x-Achse auch etwas vor dem x-Wert des Referenzwertes. Für die Messstelle MS2L zeigt sich in Bild 45 und Bild 46 eine etwas andere Charakteristik. Für Fahrstreifen 1 liegt der Maximalwert auf der x-Achse zwar ebenso vor dem Referenzwert, der Ordinatenwert selbst ist jedoch etwas größer. Für Fahrstreifen 2 zeigt sich ein nahezu identischer Verlauf. Für die Messstellen MS5L (Bild 47 und Bild 48) und MS6L (Bild 49 und Bild 50) zeigen sich im Quervergleich zu den Verläufen der Referenzwerte die gleichen Charakteristiken wie bei den Messstellen MS1L und MS2L.

Vor dem Hintergrund der alleinig bei mehreren Überfahrten des gleichen Kalibrierfahrzeuges mit jeweils bekannter Geschwindigkeit und nahezu bekannter Lage des Fahrzeuges in Querrichtung bereits auftretenden Streuungen der ermittelten Einflusslinien liegen die aufgezeigten Unterschiede der ermittelten Einflusslinien aus den Überfahrten verschiedener Fahrzeuge in einer realistischen Größenordnung.

Die aus den Überfahrten des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges ermittelten „mittleren“ Einflusslinien für die Messstellen MS1L, MS2L, MS5L und MS6L (Bild 35 bis Bild 42) werden als Basis für die Bestimmung der Gesamtgewichte der identifizierten Fahrzeuge eingesetzt. Die aufgezeigten Unterschiede der ermittelten Einflusslinien aus der Überfahrt des 3-achsigen Kalibrierfahrzeuges, die einen systematischen Charakter aufzeigen, führend damit zu einer ungenaueren Ermittlung des Gesamtgewichtes für Fahrzeuge, die eher dem Typ des 3-achsigen Kalibrierfahrzeuges ähneln. Aufgrund der generell großen Häufigkeit von 5-achsigen Sattelzugfahrzeugen wird jedoch die Verwendung der Einflusslinien aus den Analysen des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges als zielführend eingeschätzt.

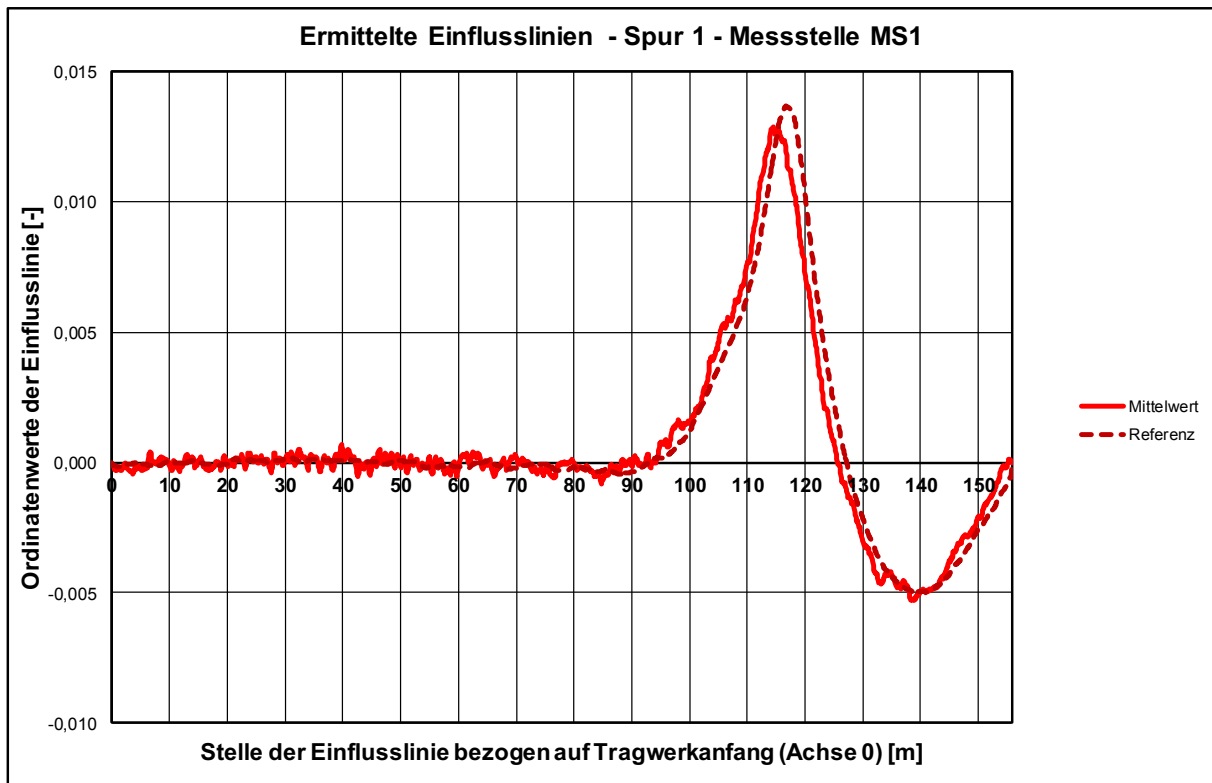


Bild 43: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

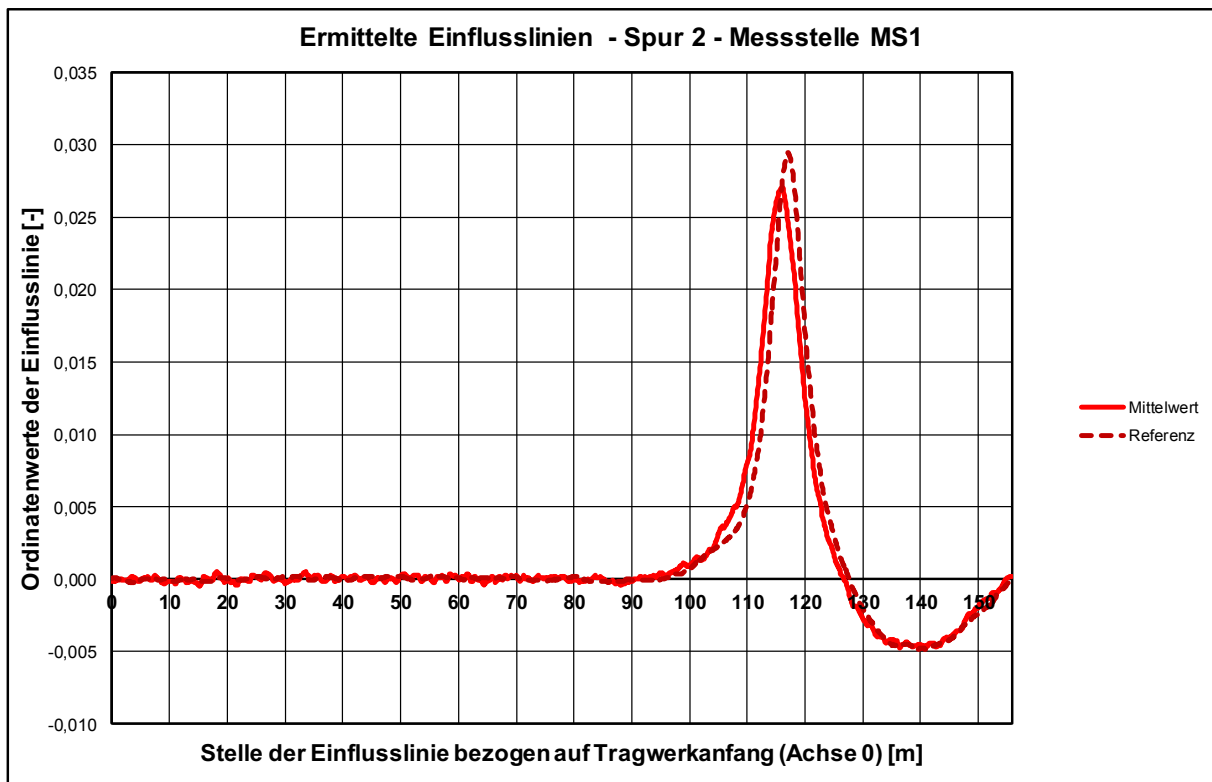


Bild 44: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

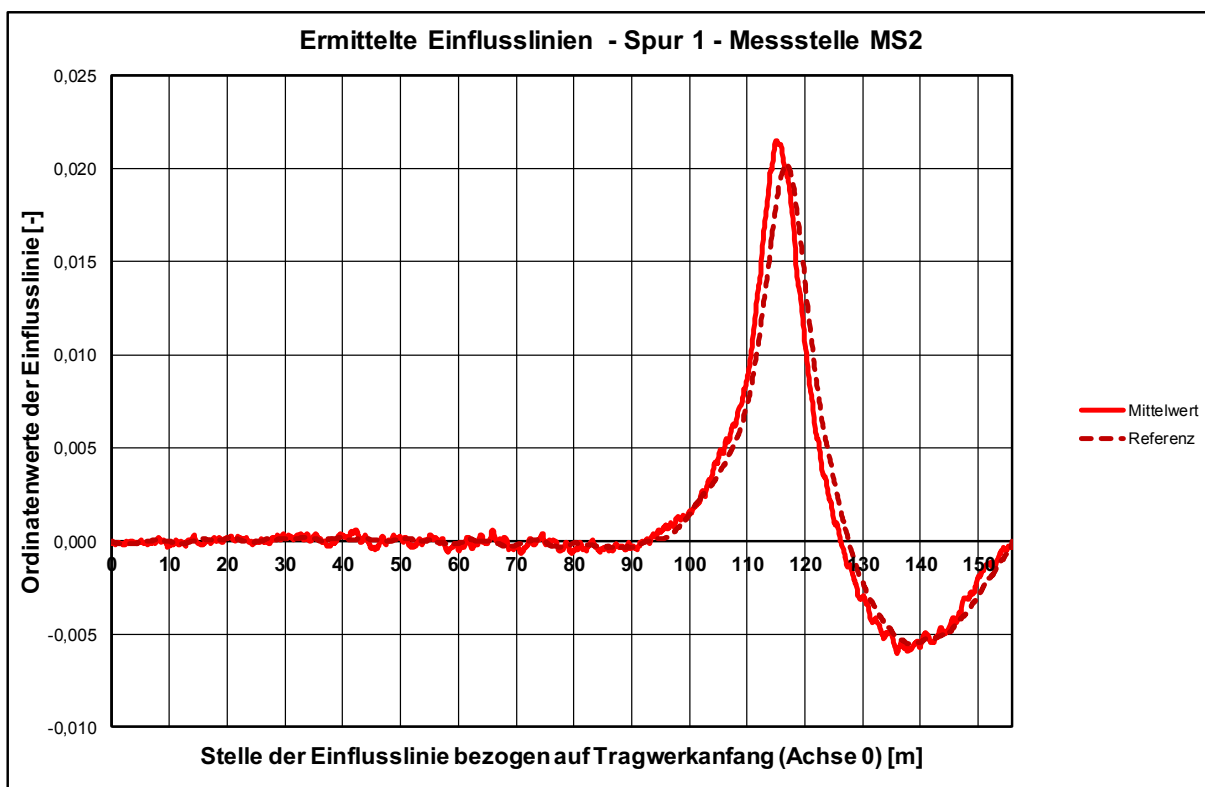


Bild 45: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

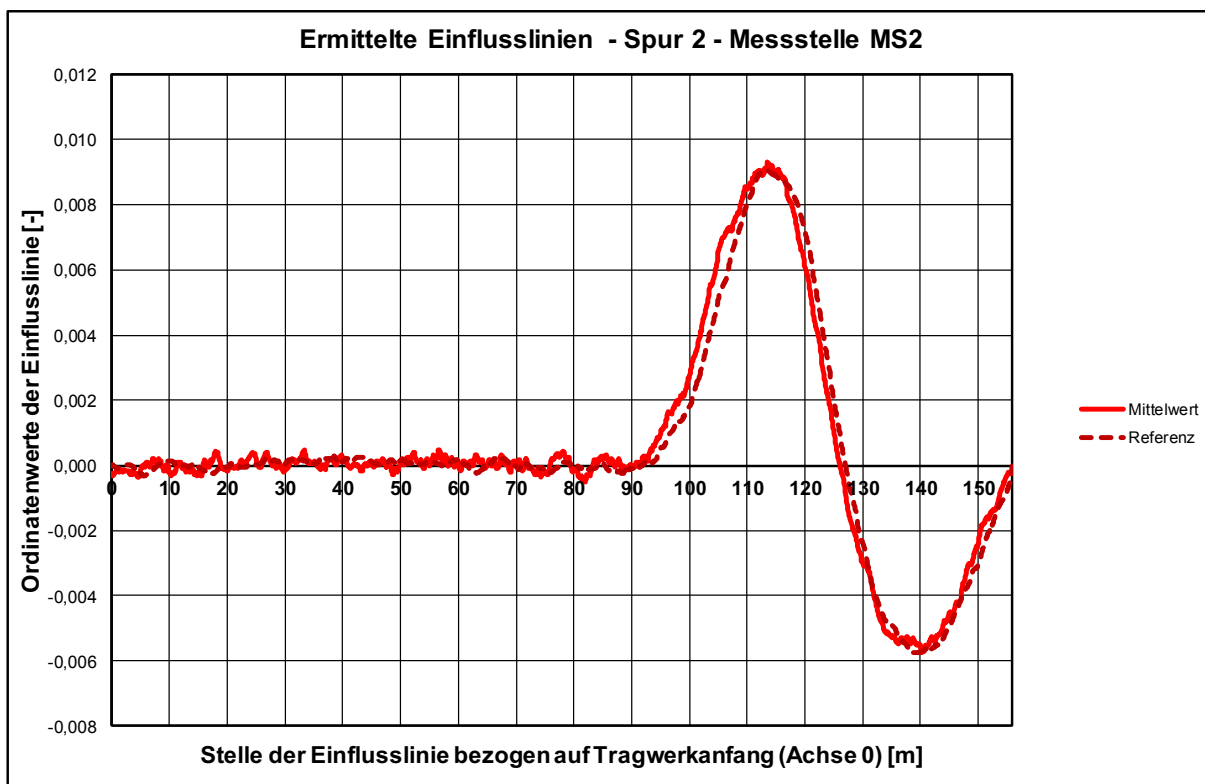


Bild 46: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

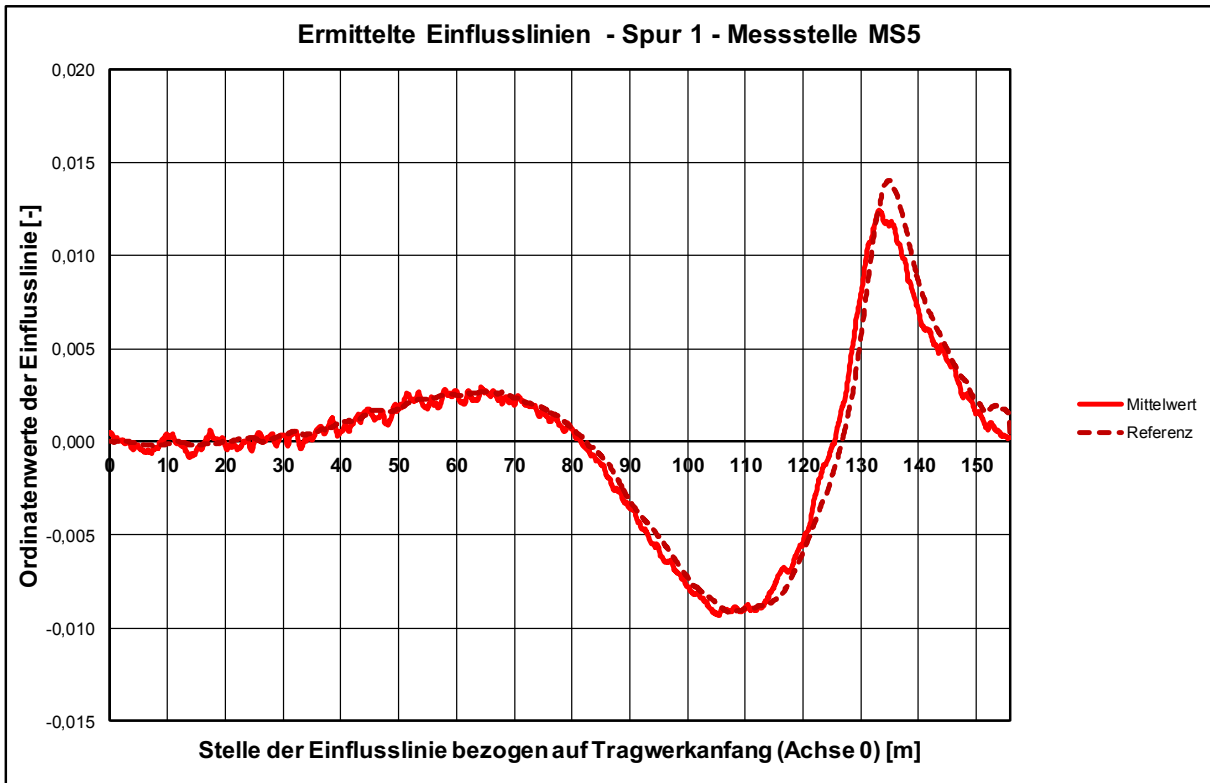


Bild 47: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

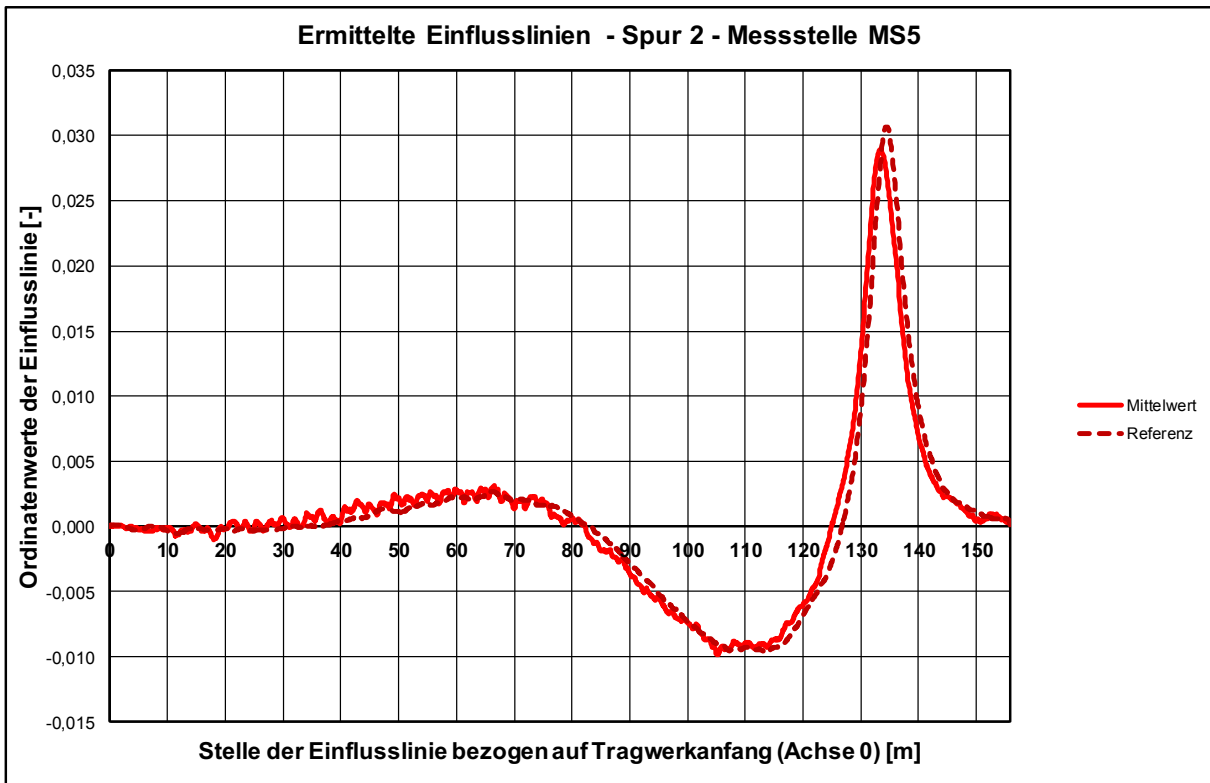


Bild 48: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

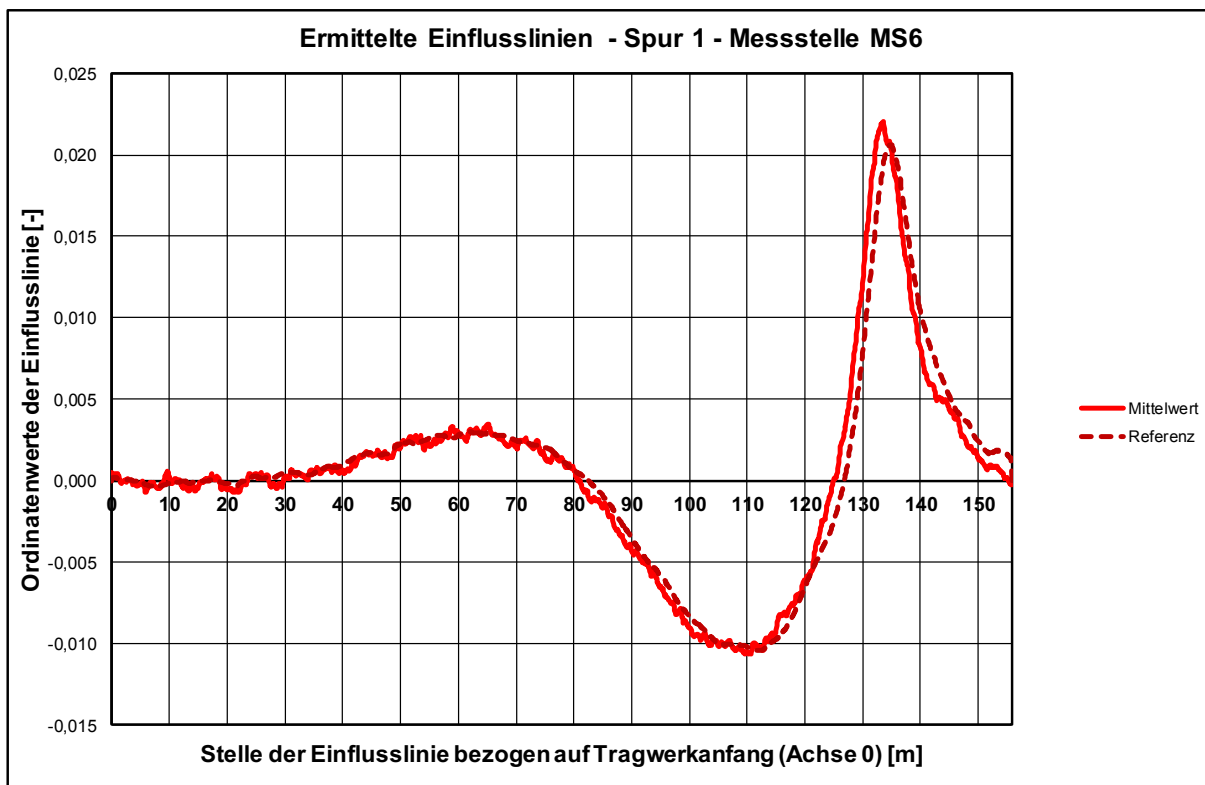


Bild 49: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

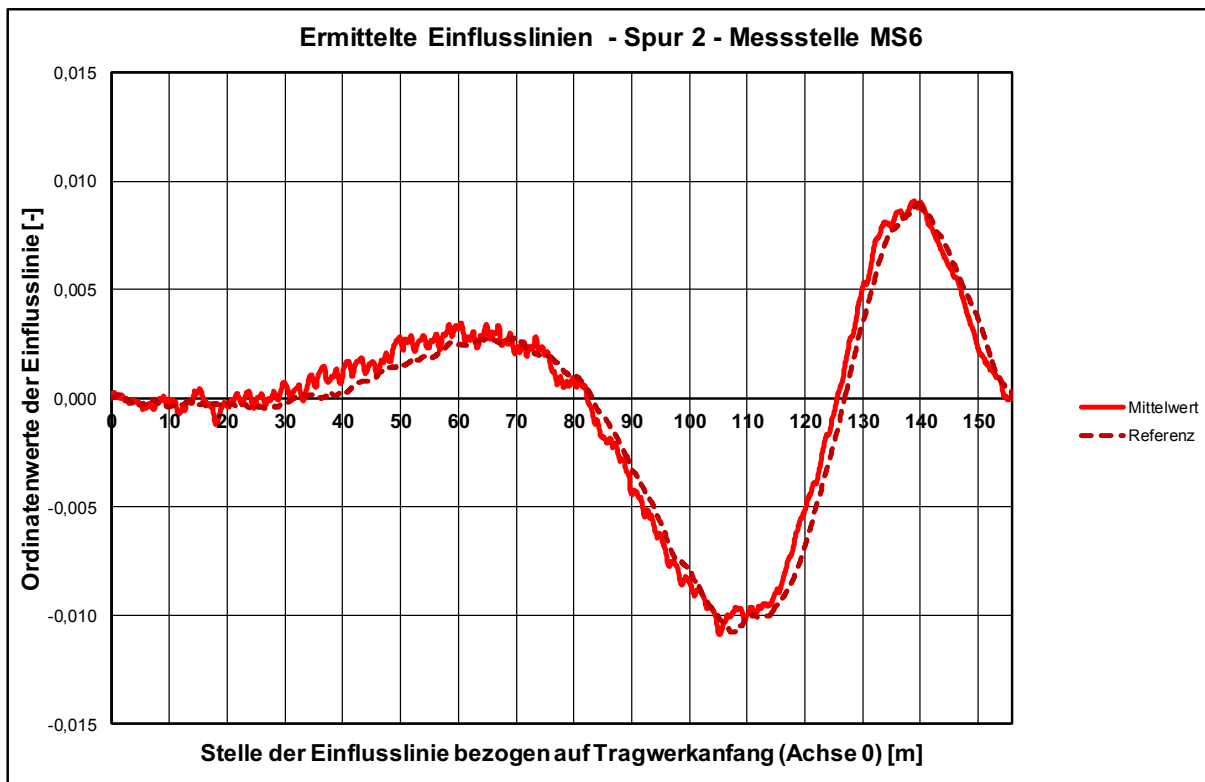


Bild 50: Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

5.1.4.3 Einflusslinien aus Kalibrierfahrten am 22.04.2018

Am 22.04.2018 wurden durch die Firma Maurer zusätzliche Kalibrierfahrten mit zwei definierten Kalibrierfahrzeugen (3-achsiges und 5-achsiges Fahrzeug) mit Einzelüberfahrten auf dem jeweiligen Fahrstreifen und definierten Geschwindigkeiten durchgeführt (vgl. auch Erläuterungen in Absatz 5.2.4). Auf Grundlage der erhaltenen Daten der Kalibrierfahrten wurden die durch das System RTMS aufgezeichneten Messdaten entsprechend ausgewertet und Einflusslinien für die Messstellen MS1L, MS2L, MS5L sowie MS6L in gleicher Methodik wie für die Kalibrierfahrten am 30.09.2016 bestimmt.

In den nachfolgenden Darstellung wird sich wiederum auf den Vergleich der berechneten „mittleren“ Einflusslinien aus den verschiedenen Überfahrten der Kalibrierfahrzeuge mit den Verläufen der definierten Referenzeinflusslinien (Bild 35 bis Bild 42) beschränkt.

In den beiden nachfolgenden Diagrammen (Bild 51 und Bild 52) sind die Vergleiche der ermittelten Einflusslinien für Messstellen MS1L aus den Überfahrten des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges dargestellt. Im Vergleich zum Verlauf des Referenzwertes zeigt sich hier im Bereich des Maximalwertes eine Abweichung. Die Ordinatenwerte der Einflusslinien sind hier gegenüber dem Referenzverlauf etwas geringer. Für die Messstelle MS2L zeigt sich für den Fahrstreifen 1 ein gegenüber dem Referenzverlauf etwas größerer Maximalwert (Bild 53) während sich für Fahrstreifen 2 ein nahezu identischer Verlauf einstellt (Bild 54). Für die Messstelle MS5L ergeben sich aus den Auswertungen der Daten gegenüber den Referenzverläufen im Bereich der jeweiligen Maximalwerte etwas geringere Ordinatenwerte (Bild 55 und Bild 56). Für die Messstelle MS6L zeigt sich im Gegensatz dazu ein nahezu identischer Verlauf der Ergebnisse gegenüber den Referenzverläufen (Bild 57 und Bild 58).

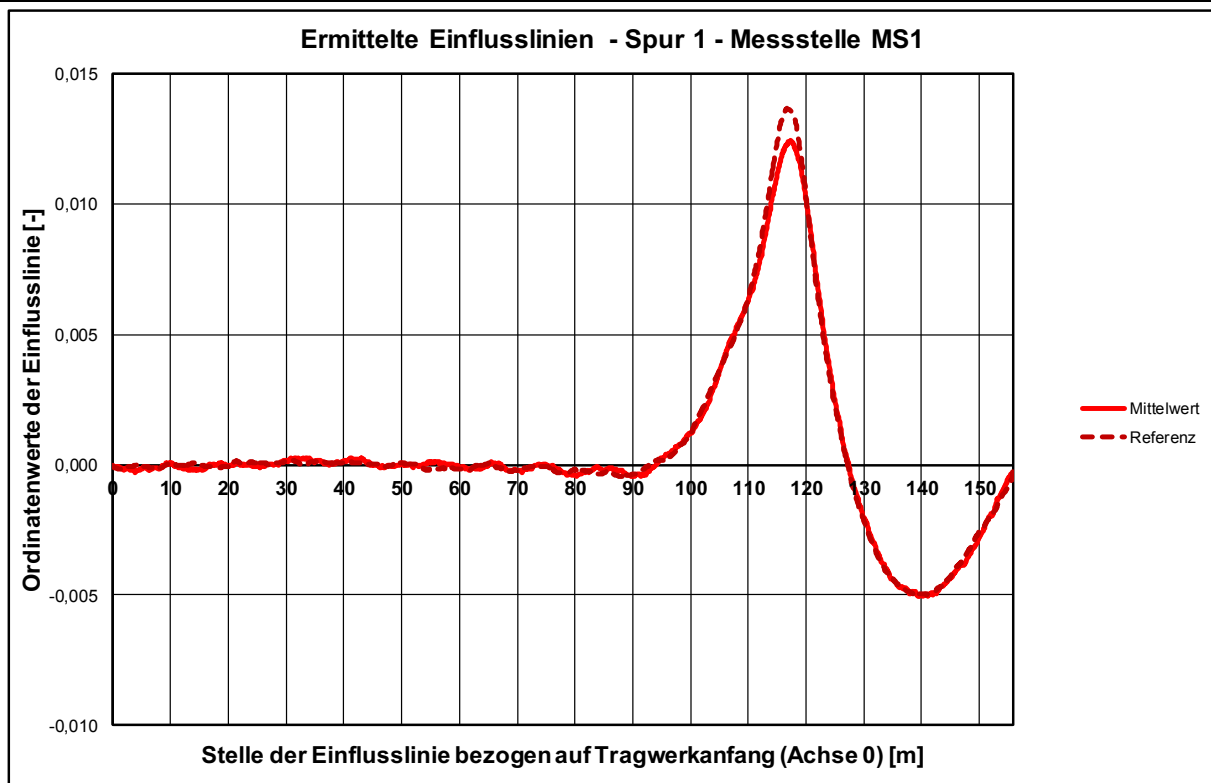


Bild 51: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

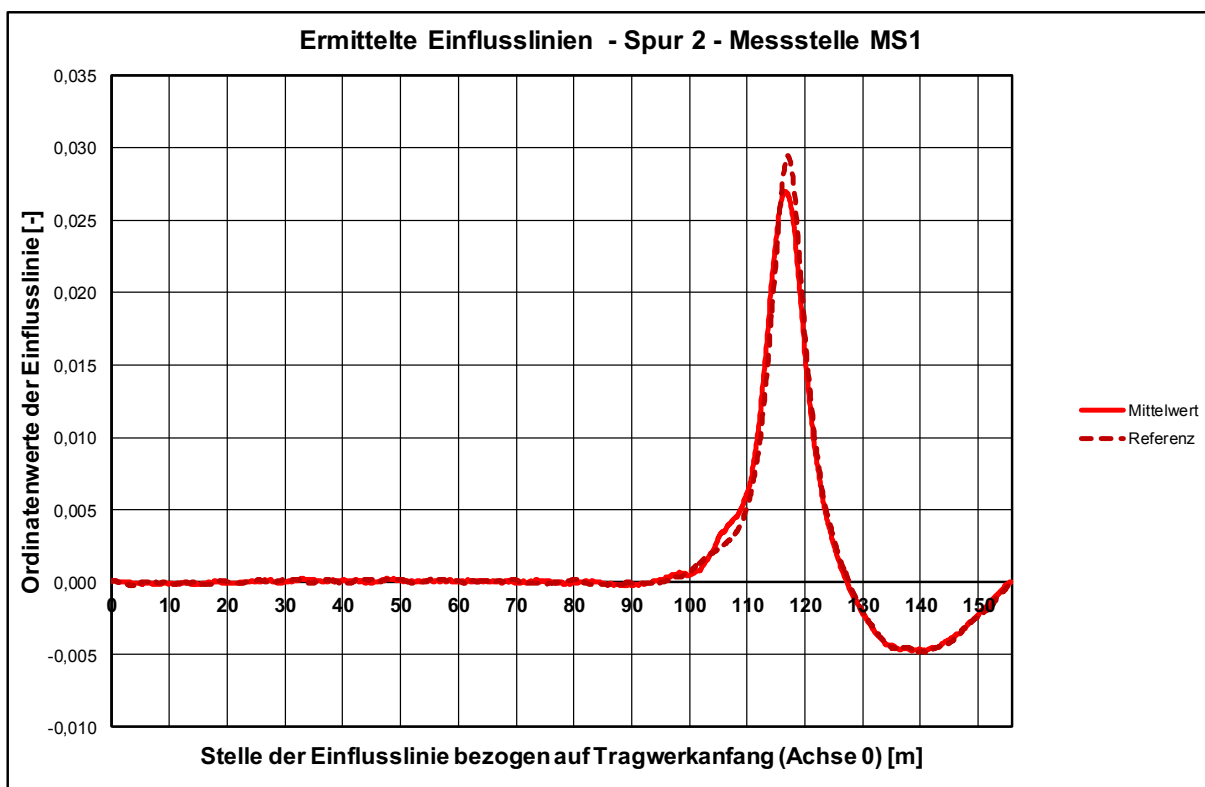


Bild 52: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

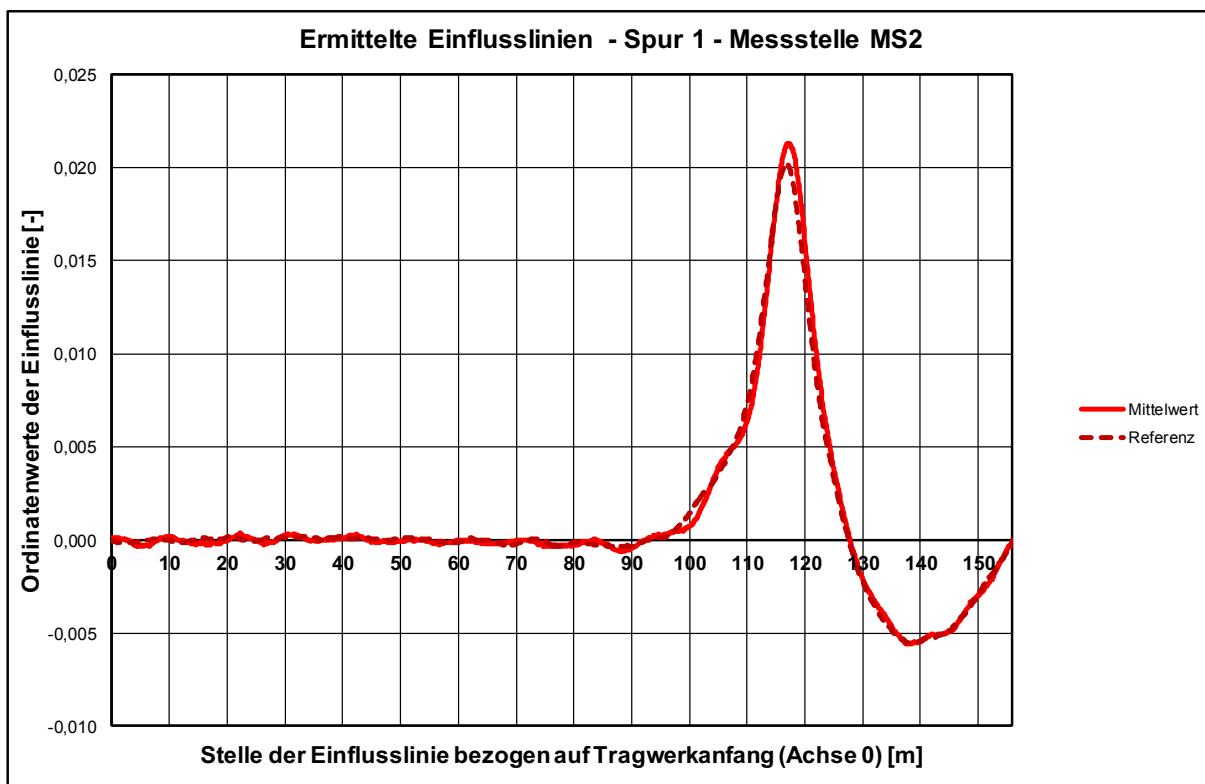


Bild 53: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

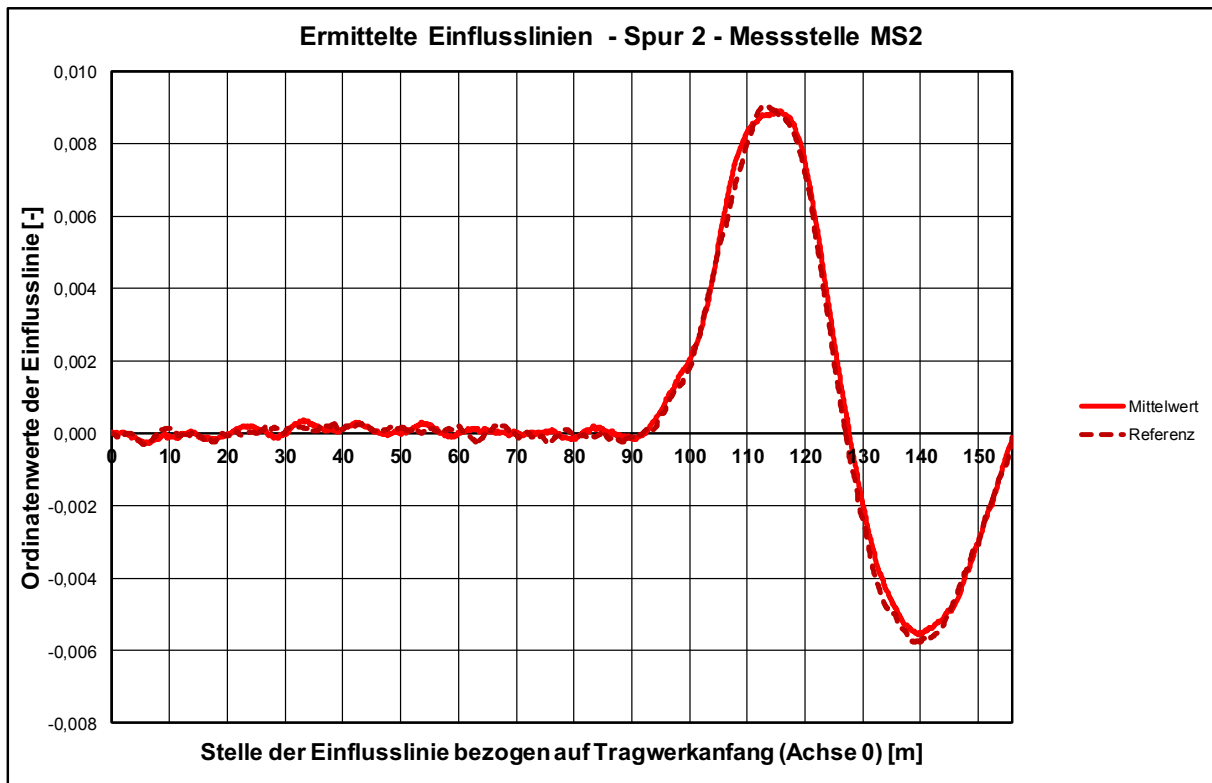


Bild 54: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

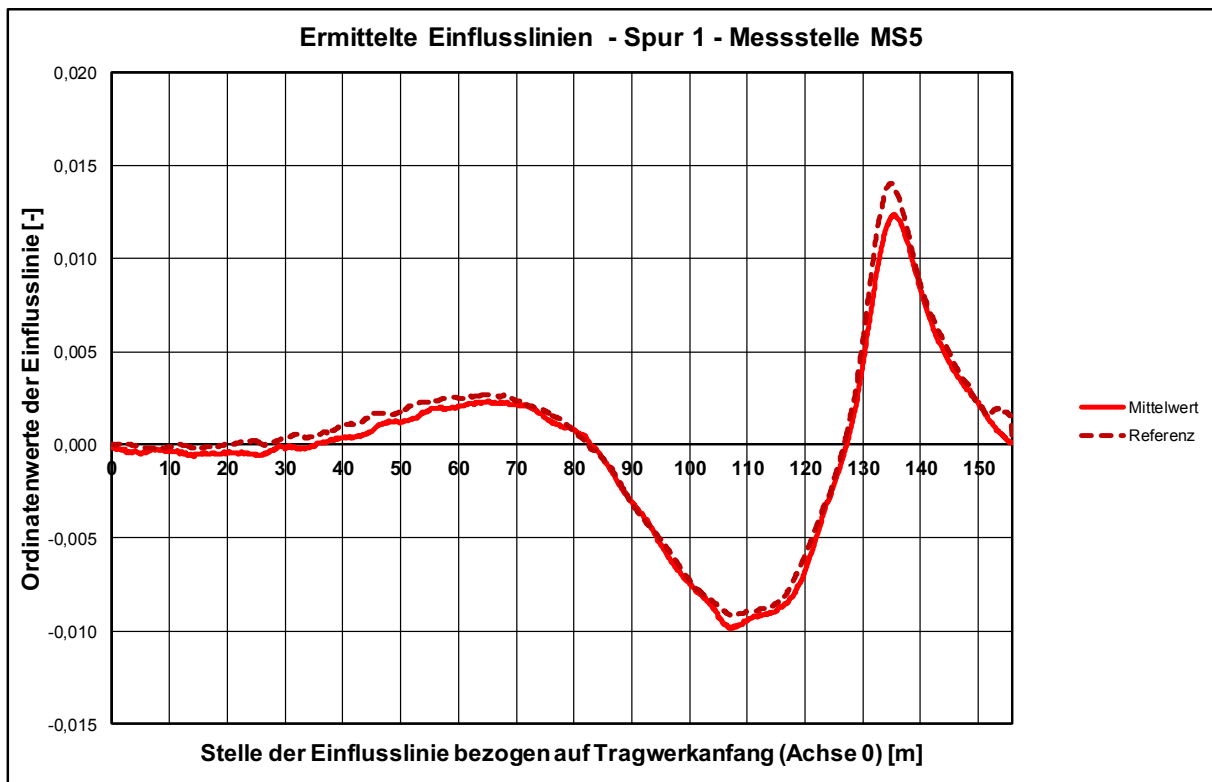


Bild 55: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

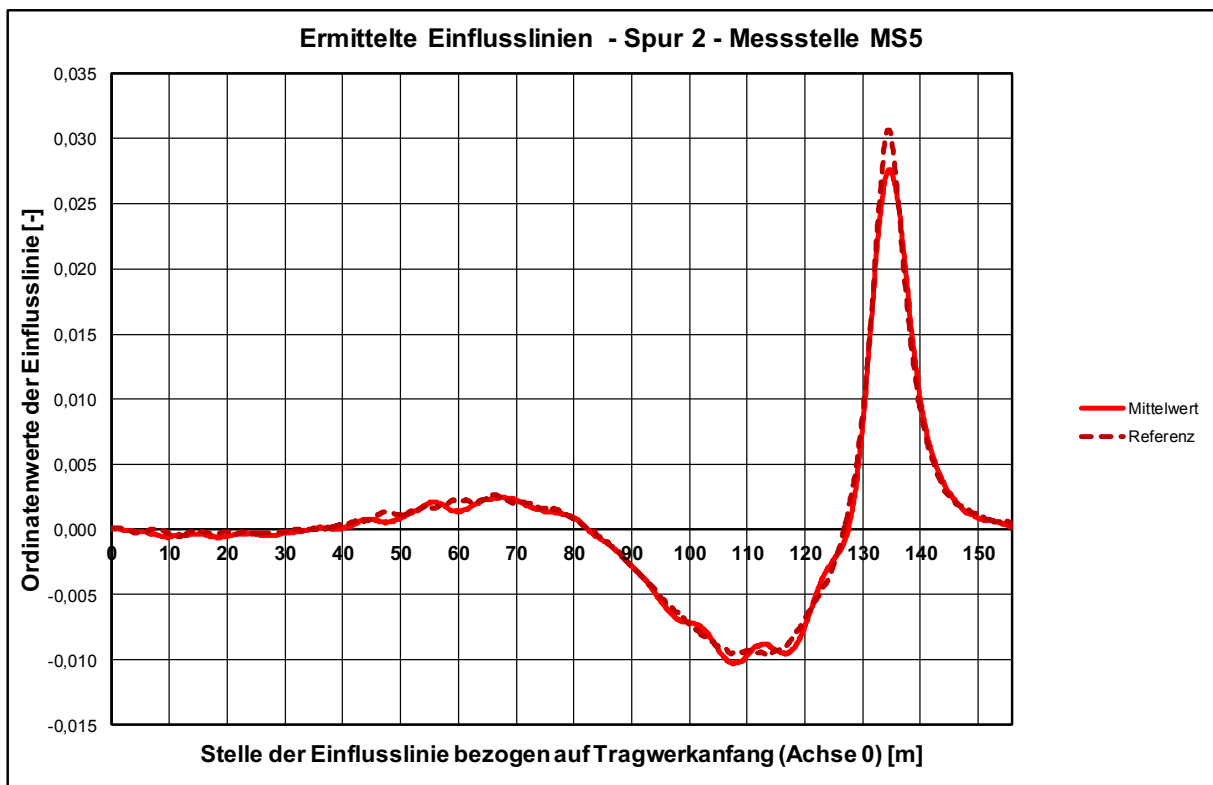


Bild 56: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

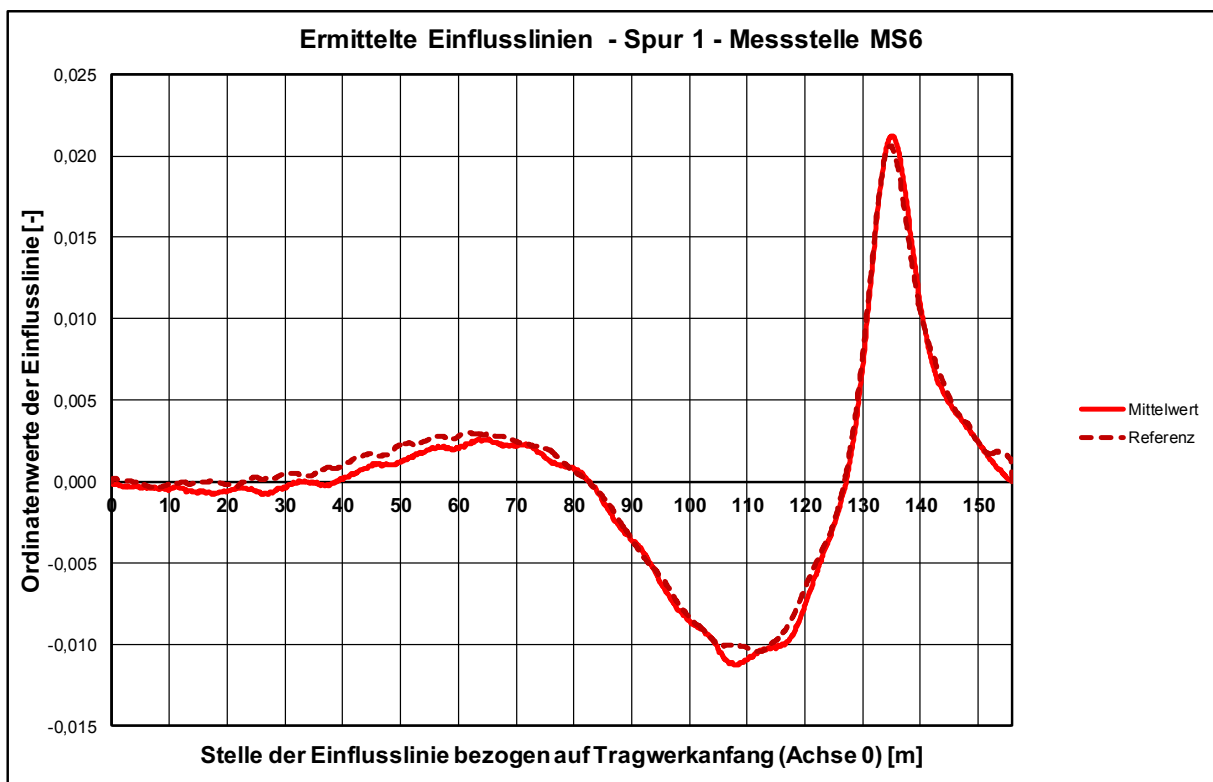


Bild 57: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

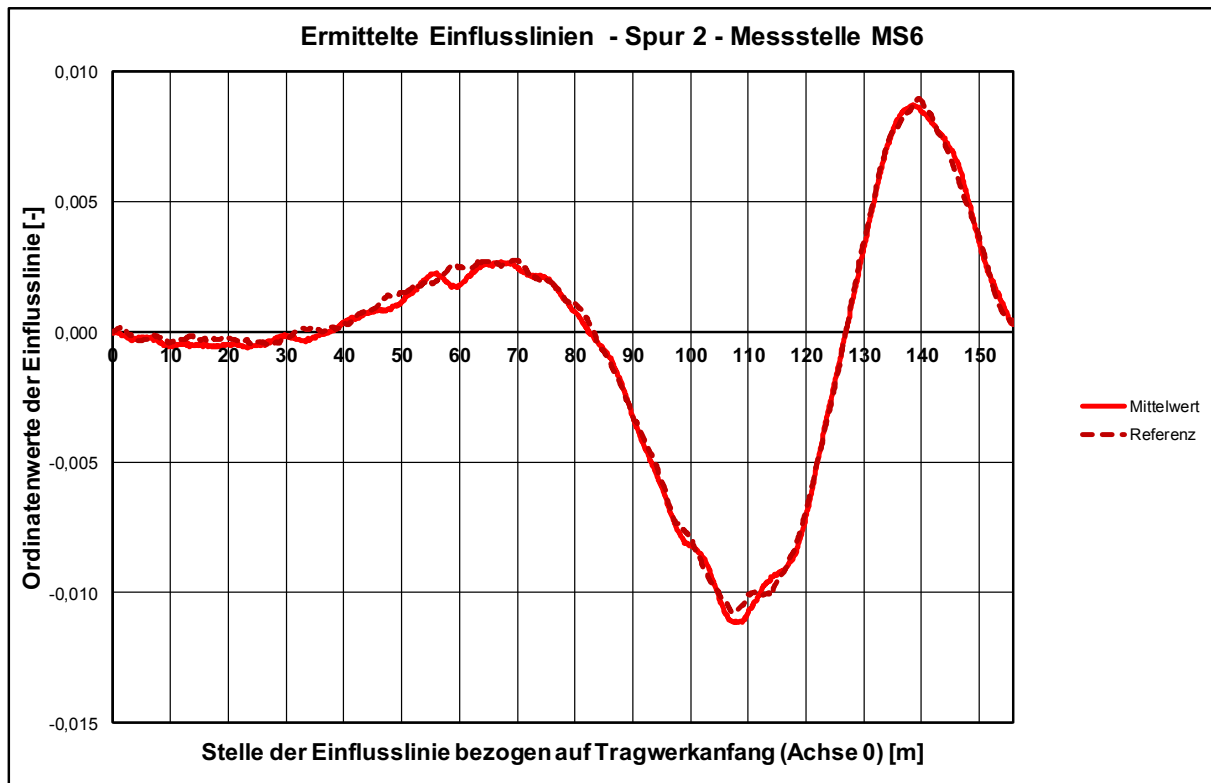


Bild 58: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

Für die aus den Überfahrten des 3-achsigen Kalibrierfahrzeuges ermittelten Einflusslinien sind die Vergleiche zu den Referenzverläufen für die betrachteten Messstellen in den Diagrammen in Bild 59 bis Bild 66 dargestellt. Auch hier zeigen sich gewisse Unterschiede zu den Referenzverläufen die in ihrer Charakteristik den Abweichungen aus den Auswertungen der Kalibrierfahrten am 30.09.2016 des 3-achsigen Fahrzeuges (vgl. vorhergehender Absatz) entsprechen.

Zusammenfassend zeigen die Auswertungen der Kalibrierfahrten am 22.04.2018 gegenüber den Auswertungen der Kalibrierfahrten am 30.09.2016 auf, dass die Verläufe der Einflusslinien für die verschiedenen Messstellen unterschiedlich stark ausgeprägte Abweichungen zueinander aufweisen. Die wesentlichen Ursachen für die Abweichungen liegen dabei in den unvermeidlichen Streuungen der zugrundeliegenden Messdaten. Die aufgeführten Einflusslinien aus den einzelnen Überfahrten eines 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges am 30.09.2016 in Absatz 5.1.4.2, Bild 35 bis Bild 42 zeigen Streuungen um den eingetragenen mittleren Verlauf der Einflusslinien in ähnlicher Größenordnung wie die Unterschiede zwischen den Referenzverläufen und den

Ergebnissen

der Auswertungen der Kalibrierfahrten des 3-achsigen Fahrzeuges am 30.09.2019 sowie der Kalibrierfahrten am 22.04.2018.

Aufgrund der Steifigkeitsverhältnisse am Bauwerk und den daraus resultierenden zahlenmäßig sehr kleinen gemessenen Dehnungswerten kann festgestellt werden, dass genauere Ableitungen von Einflusslinien nicht praktisch realisierbar sind. Diese Feststellung ist dabei unabhängig von der Methodik der Ermittlung der Einflusslinien (direkt aus den Messdaten, wie hier aufgezeigt, oder aus einem Tragwerksmodell wie in Absatz 5.1.3.2 genannt). In beiden Ansätzen bilden die von Streuungen beeinflussten Messdaten aus den Kalibrierfahrten die Daten- bzw. Vergleichsbasis und führen damit zwangsläufig zu Streuungen in abgeleiteten Ergebnissen.

Die Verwendung der abgeleiteten Einflusslinien für die Gewichtsbestimmung führt damit aufgrund im normalen Verkehrsablauf ebenso vorkommenden Streuungen der Messdaten zu Unschärfen in den ermittelten Gesamtgewichten. In Absatz 5.2.3 und 5.2.4 werden entsprechende Validierung der ermittelten Gesamtgewichte anhand der durchgeführten Kalibrierfahrten aufgezeigt und die Streuungen der ermittelten Gesamtgewichte dokumentiert.

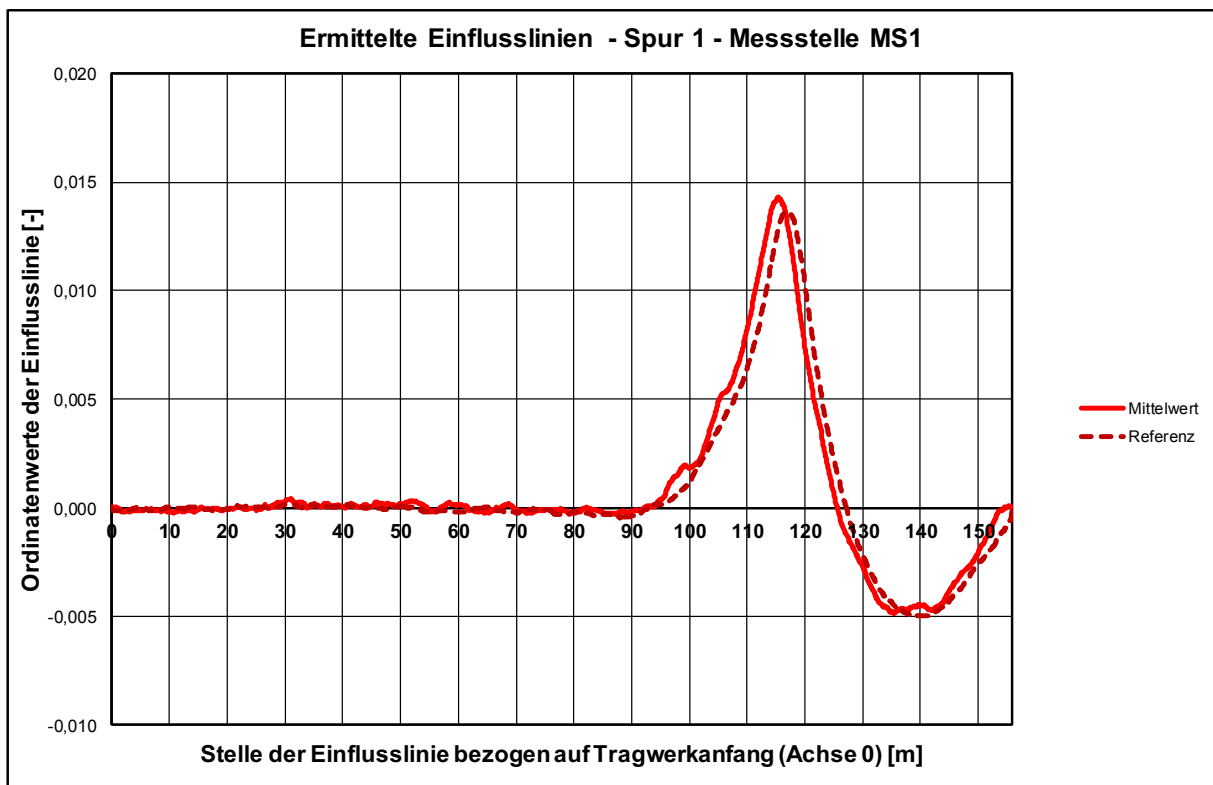


Bild 59: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

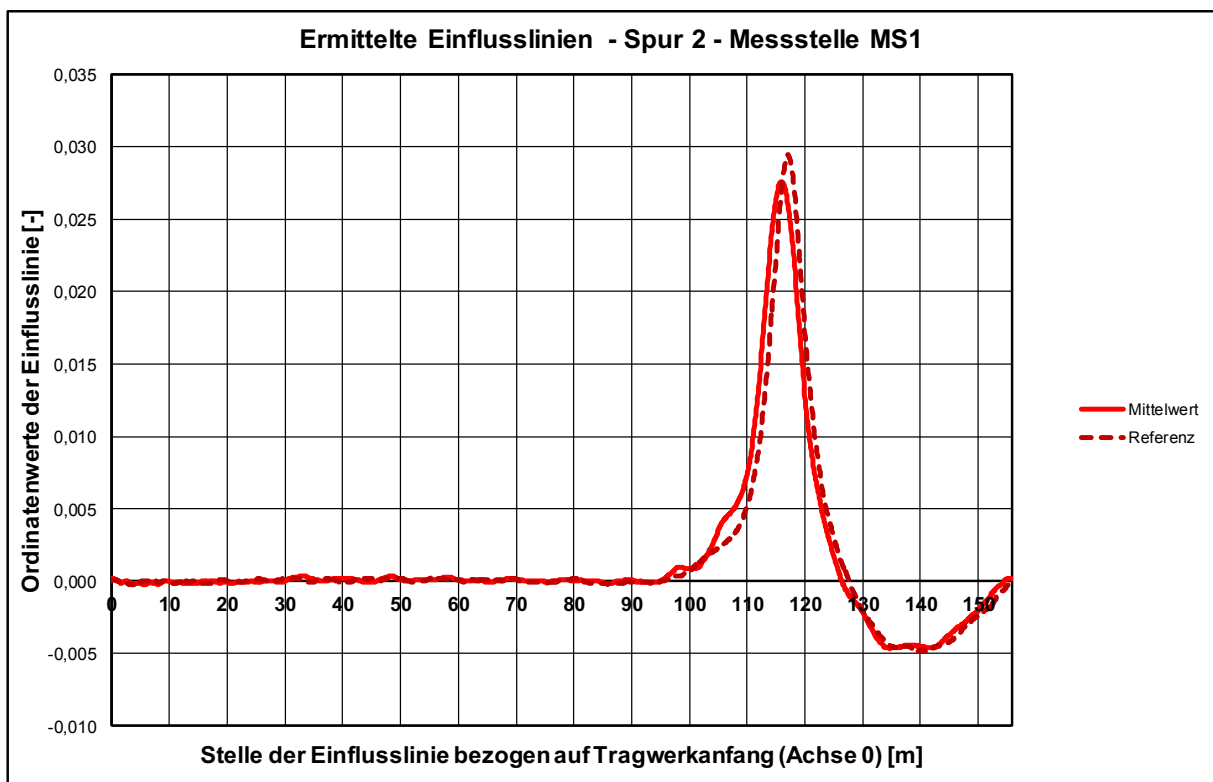


Bild 60: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

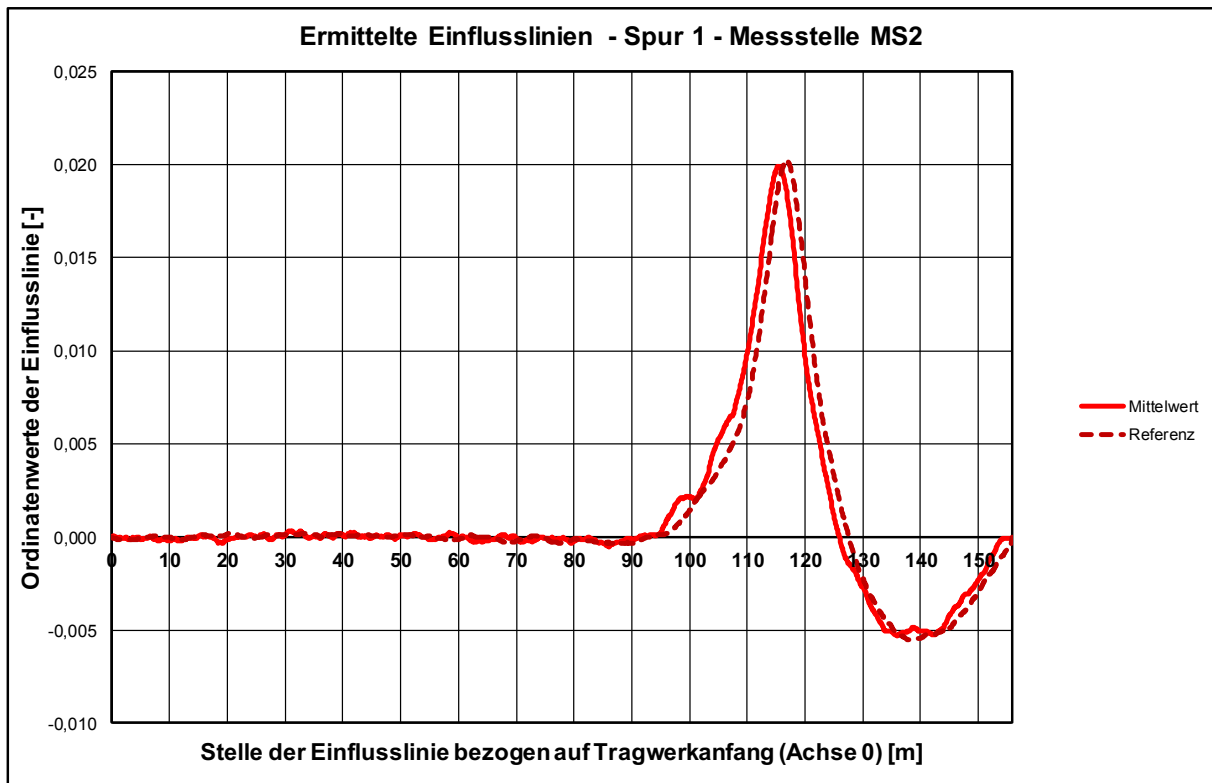


Bild 61: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

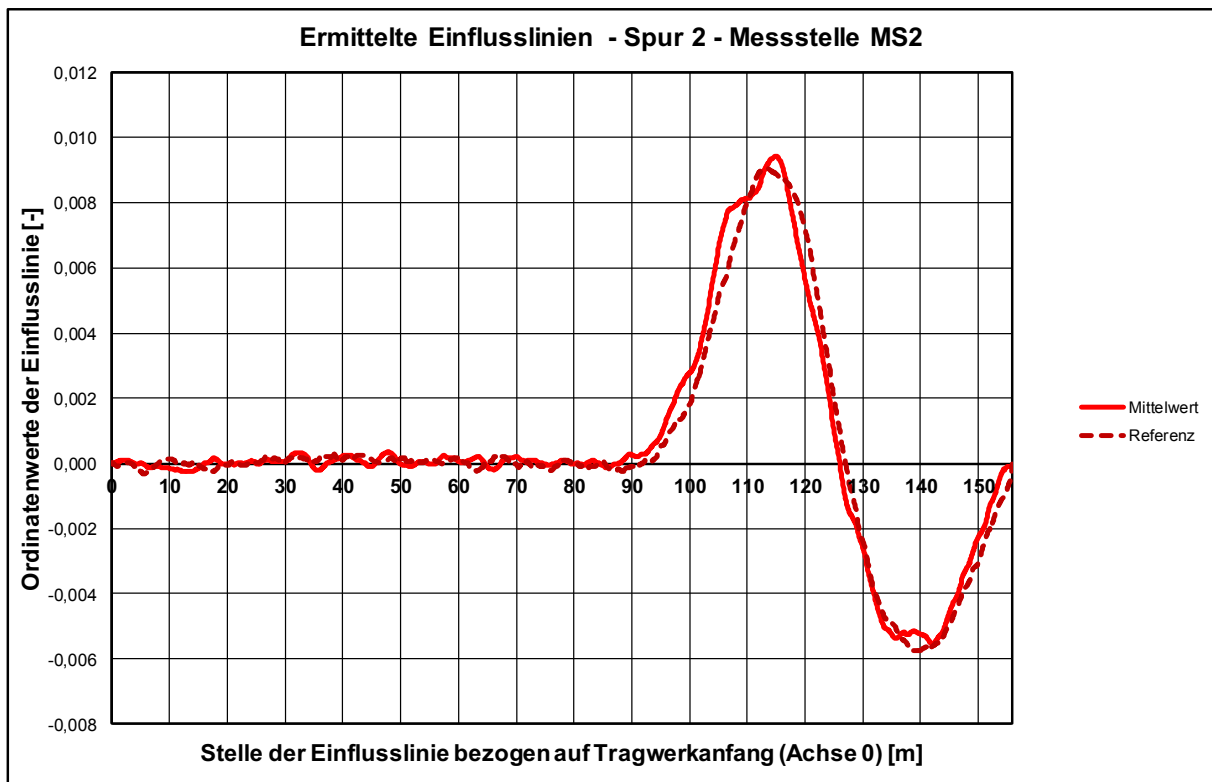


Bild 62: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

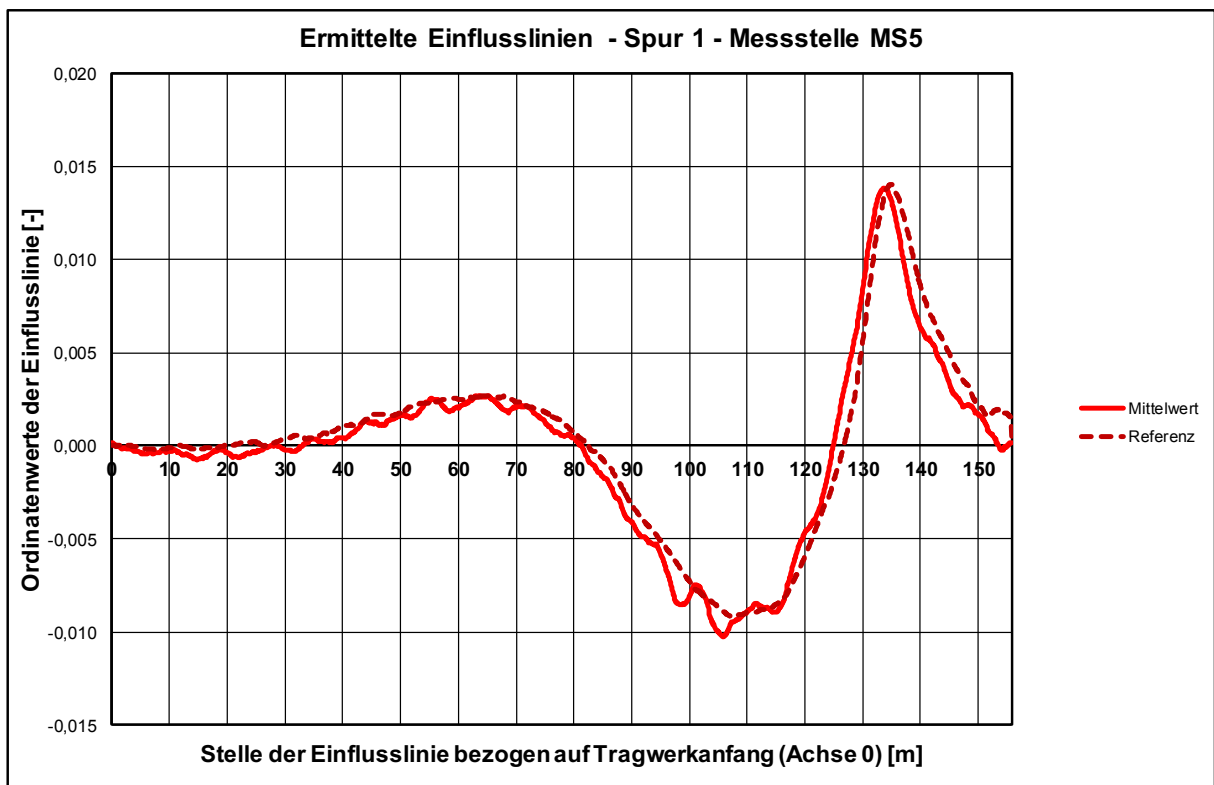


Bild 63: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

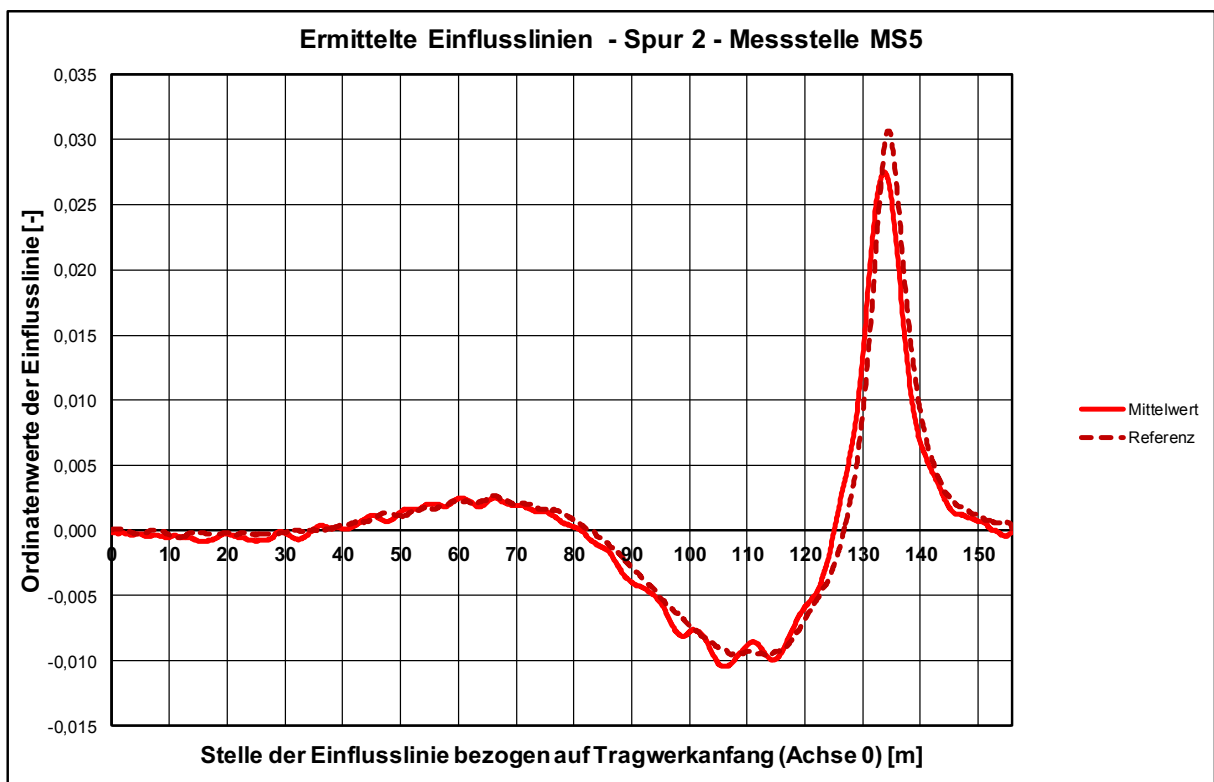


Bild 64: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

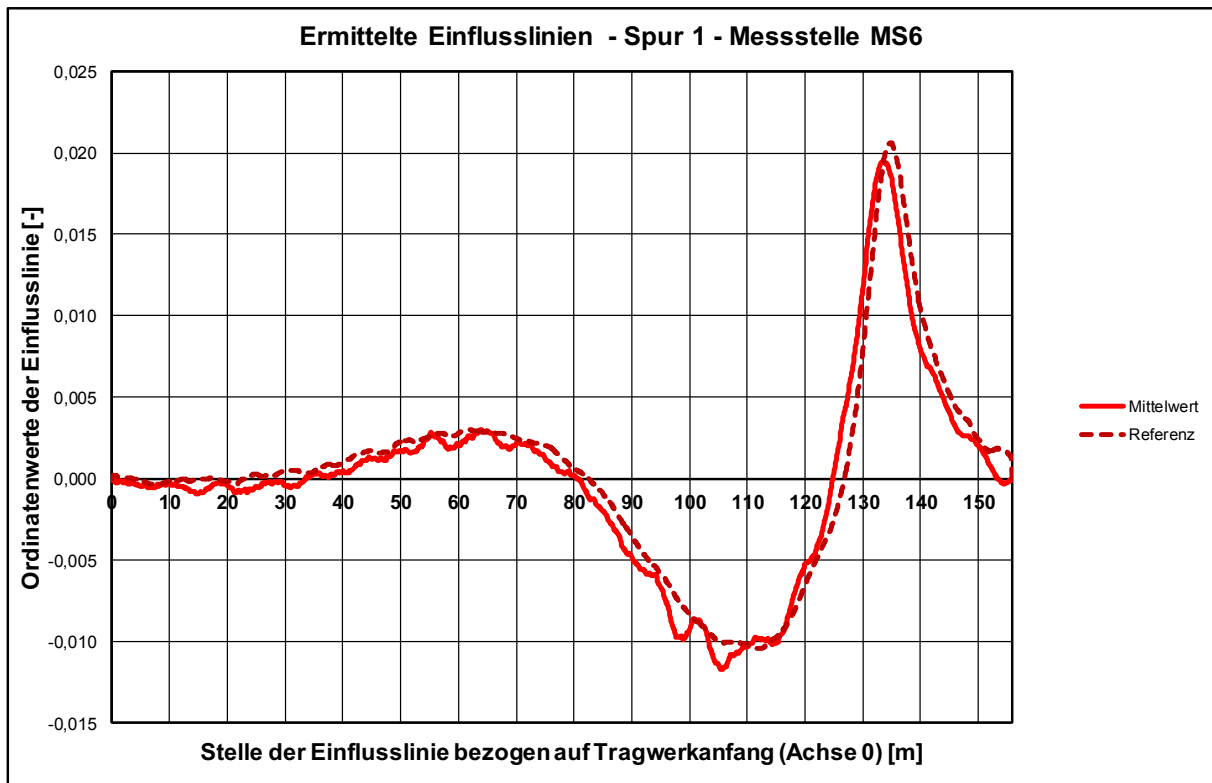


Bild 65: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

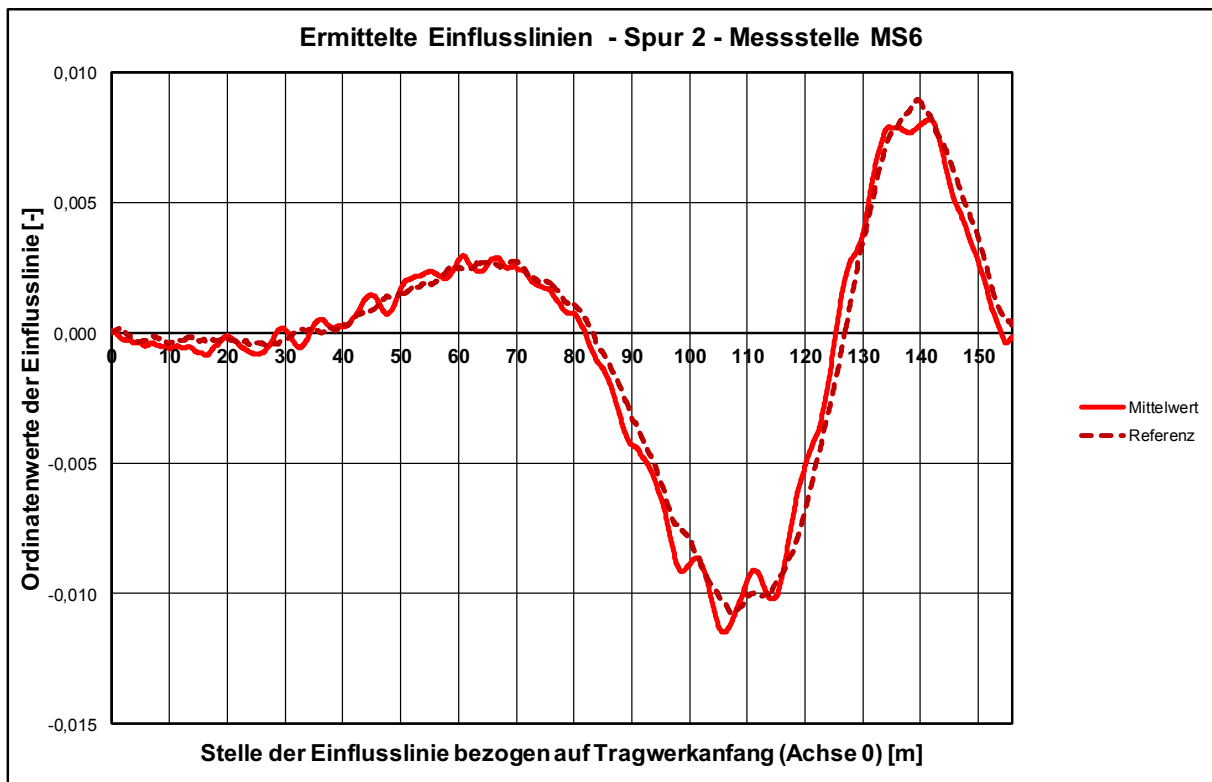


Bild 66: Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf

5.2 Erprobung der umgesetzten Methodik

5.2.1 Fahrzeugidentifikation

In Bild 67 ist der prinzipielle Ablauf der Fahrzeugerkennung exemplarisch dargestellt. Nach einer Glättung der Messverläufe und einer Basislinienkorrektur, werden Peaks in den resultierenden Verläufen identifiziert und weiterverarbeitet. Die messtechnische Ausstattung beinhaltet pro Messquerschnitt mindestens zwei Messstellen.

Die Ansätze, die Fahrspur und die Geschwindigkeit eines die Brücke passierenden Fahrzeugs festzustellen, sind sich sehr ähnlich. Wie in Bild 67 dargestellt, ist die Basis für die Ermittlung der Fahrspur eine Synchronisierung von Peaks in Querrichtung während die Ermittlung der Geschwindigkeit einer Synchronisierung in Längsrichtung bedarf. Die Synchronisierung verknüpft die in den Aufzeichnungen verschiedener Messstellen identifizierten Peaks, die als Bauwerksreaktion einem einzelnen Fahrzeug zugeordnet werden können. Zur Ermittlung der Fahrspur werden die Peakordinaten verglichen und für die Geschwindigkeit der Zeitversatz zwischen synchronisierten Peaks.

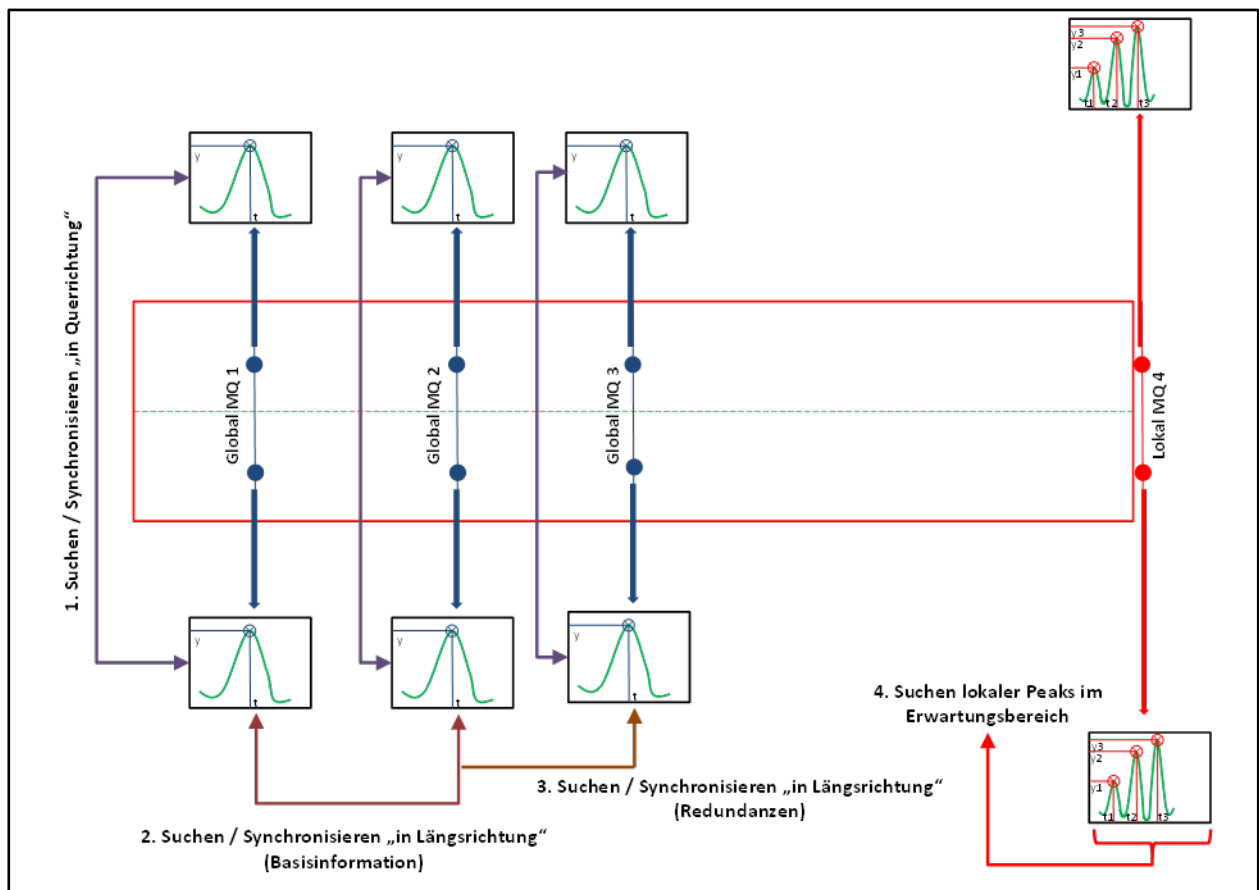


Bild 67: Prinzipdarstellung der Fahrzeugerkennung aus Bauwerksmessungen

Im Ergebnis gilt es, die Achsabstände des Fahrzeugs zu erhalten, welche benötigt werden, um die Fahrzeugklassifikation durchzuführen. Der Ablauf lässt sich in drei Schritten darstellen.

Im ersten Schritt werden die ermittelten Peaks an den Messquerschnitten in Querrichtung gesucht und synchronisiert. Die Verhältniszahlen zwischen

den Peaks von zwei Messstellen an einem Messquerschnitt bilden die Grundlage für die Erkennung der Fahrspur, in dem sich das Fahrzeug befindet. Diese Synchronisation in Querrichtung wird zunächst für alle relevanten Messquerschnitte mit globalen Messstellen unabhängig voneinander realisiert.

Im zweiten Schritt erfolgt eine Synchronisation der Daten von zwei ausgewählten Messquerschnitten in Längsrichtung. Der Ansatz ist dabei, dass die Charakteristik der Verläufe infolge der Überfahrt eines Fahrzeuges an den aufeinander folgenden Messquerschnitten direkt vergleichbar ist. Zu einem Peak an z.B. Messquerschnitt 1, wird somit ein entsprechender Peak an Messquerschnitt 2 gesucht. Die Suche erfolgt dabei anhand des bekannten Abstandes zwischen den Messquerschnitten und einer angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Das Suchfenster wird dabei so groß gewählt, dass auch bei stärkeren Abweichungen von der angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeit der korrespondierende Peak am zweiten Messquerschnitt hinreichend zuverlässig gefunden werden kann. Nach erfolgreicher Synchronisation in Längsrichtung kann die Geschwindigkeit des Fahrzeuges bestimmt werden (aus der Zeitdifferenz zwischen den Peaks an den beiden Messquerschnitten und dem bekannten Abstand zwischen den Messquerschnitten). Die Basis für diese einfache Geschwindigkeitsbestimmung ist dabei, dass das Auftreten der Peaks an den verschiedenen Messquerschnitten bei einer identischen relativen Lage des Fahrzeuges zum Messquerschnitt stattfindet.

Zur Verfeinerung der Ergebnisse und der Nutzung von Redundanzen kann die Synchronisation in Längsrichtung mit mehreren Paaren von Messquerschnitten erfolgen. Dies entspricht dem in Bild 67 dargestellten optionalen 3. Schritt der Verarbeitung der Messdaten.

Im letzten erforderlichen Schritt werden die Daten der lokalen Messstellen verarbeitet. Anhand der vorher ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit, der bekannten geometrischen Lage der Messstellen und der identifizierten Fahrspur werden sowohl die relevanten lokalen Messstellen ausgewählt als auch ein Suchfenster gebildet, innerhalb dem der Verlauf der Messdaten analysiert wird. Die Peaks im Suchfenster werden dann ermittelt. Diese bilden die Zeitinformation für die auftretenden Achsen. Daraus abgeleitet werden die Achsabstände (Zeitdifferenz zwischen den Peaks und ermittelte Geschwindigkeit) und die Achslastverhältnisse als Basis für die nachlaufende Gewichtsbestimmung.

Mit diesem Schritt ist die komplette Fahrzeugerkennung realisiert. Weitere Daten wie die Achsanzahl, die Typenidentifikation und die Bestimmung von Auffahrts- und Abfahrtszeitpunkt erfolgen auf dieser Datengrundlage.

In den vorhergehenden Erläuterungen wurde das technisch umgesetzte Grundprinzip der Fahrzeugerkennung beschrieben. Tragwerksspezifisch erge-

ben sich jedoch stets Besonderheiten und individueller Anpassungsbedarf. Daher wird nachfolgend zunächst auf Basis der Kalibrierfahrten die Verwendbarkeit der vorhandenen Methoden und Algorithmen geprüft.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen (Bild 68 und Bild 69) sind die Verläufe von Dehnungsmessungen an der eingebauten Bewehrung (MS 1L, MS 2L, MS 5L, MS 6L) infolge der Überfahrt des 5-achsigen Kalibrierfahrzeuges dargestellt. Es handelt sich um Kalibrierfahrt 9 (Fahrzeug auf rechtem Fahrstreifen, mittig in endgültiger abmarkierter Fahrspur).

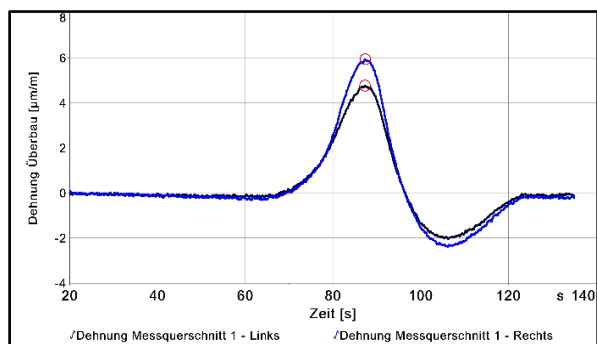


Bild 68: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 9

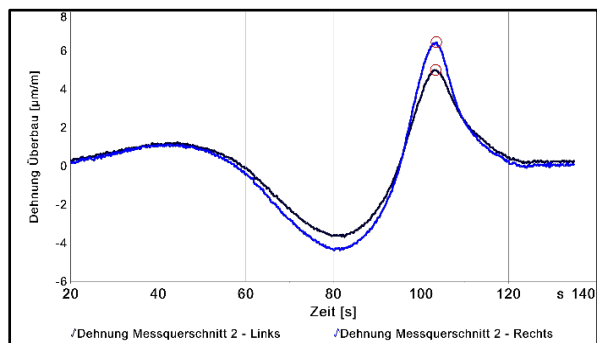


Bild 69: Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 9

Die erste Analyse basiert hier, analog zu den Beschreibungen oben, auf den identifizierten Peaks in den Verläufen (rot markiert in den Diagrammen).

Im ersten Auswertungsschritt erfolgt für die Messquerschnitte unabhängig voneinander die Synchronisation in Querrichtung. Diese ist am BW 402e hier realisierbar. Die markierten Peaks liegen an den Messquerschnitten nahezu beim gleichen Zeitpunkt vor. Des Weiteren sind die Peaks rechts etwas höher als die Peaks links. Dies ist so zu erwarten, da sich der rechte Fahrstreifen nur wenig von der Mitte des Gesamtquerschnittes entfernt befindet.

Der nächste Schritt ist die Synchronisation in Längsrichtung. Die Grundlage dafür ist in nachfolgender Bild 70 dargestellt. Für die dargestellten Peaks in MS 2L und MS 6L ergibt sich eine Zeitdifferenz von 16,133s. Der Abstand zwischen den Messquerschnitten beträgt 17,8 m. Dies führt zu einer errechneten Geschwindigkeit von rund 4 km/h (planmäßig 5 km/h in Kalibrierfahrt ID 9).

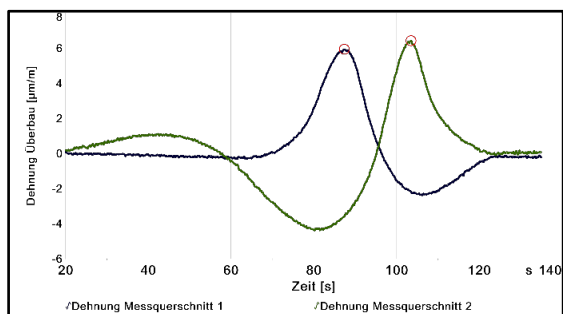


Bild 70: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 2L und Messquerschnitt B (2) – MS 6L – Kalibrierfahrt ID 9

Mit diesem Schritt wäre somit die Fahrspur identifiziert und die Fahrzeuggeschwindigkeit ermittelt. Der optionale 3. Schritt (redundante Synchronisationen anderer Messquerschnitte) wird hier zunächst nicht betrachtet.

Im nächsten Schritt erfolgt die Identifikation der Achsen anhand der lokalen Messungen. In diesem Fall sind dies die Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion. Aufgrund der identifizierten Spur kommen hierbei die Messstellen MS 20 bis MS 22 in Frage. In nachfolgendem Bild 71 ist exemplarisch der Werteverlauf für MS 21 dargestellt.

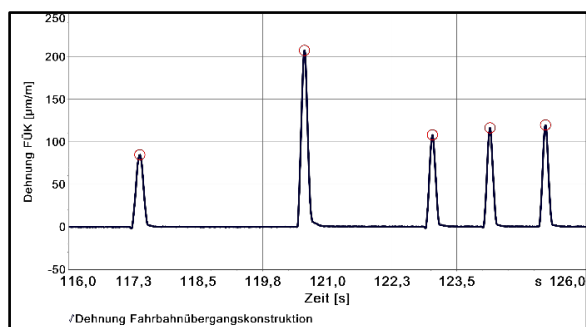


Bild 71: Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 9

Es wird ersichtlich, dass die 5 Achsen des Fahrzeuges klar erkannt werden können. In der hier betrachteten Kalibrierfahrt ist das Nachschwingen der Übergangskonstruktion aufgrund der geringen Fahrzeuggeschwindigkeit kaum vorhanden.

Aus den Zeitabständen zwischen den Peaks ergeben sich mit der ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit

keit von 4 km/h folgende Achsabstände (die tatsächlichen am Fahrzeug gemessenen Abstände sind in Klammern angegeben):

A1-A2	3,54 m	(3,63 m)
A2-A3	2,75 m	(2,85 m)
A3-A4	1,24 m	(1,33 m)
A4-A5	1,19 m	(1,33 m)

Daraus zeigt sich, dass die ermittelte Geschwindigkeit etwas zu gering ist. Die Geschwindigkeit beträgt tatsächlich auf Grundlage der bekannten Fahrzeuggeometrie und der ermittelten Zeitabstände zwischen den Peaks 4,4 km/h und liegt damit etwas 10% höher als aus den vorhergehenden Messungen ermittelt.

Anzumerken ist dabei, dass die dargestellte Geschwindigkeitsermittlung allein auf Basis der beschriebenen Peaks beruht. Erfahrungen aus vorhergehenden Projekten zeigen, dass eine Verarbeitung von Teilkurven um die Peaks herum zu verbesserten Ergebnissen führt.

Für das gleiche Fahrzeug (5-achsiger Sattelzug), sind in den nachfolgenden Abbildungen (Bild 72 bis Bild 75) die Messdatenverläufe bei einer Überfahrt auf dem linken Fahrstreifen aufgeführt (Kalibrierfahrt ID 11).

Analog zu den vorhergehenden Ausführungen sind in Bild 72 und Bild 73 die Datengrundlagen für den ersten Auswertungsschritt der Synchronisation in Querrichtung aufgeführt. Während bei der vorhergehenden Überfahrt ID 9 auf dem rechten Fahrstreifen die Peakhöhe auf den beiden Seiten fast gleich waren, zeigen sich hier deutliche Unterschiede. Auf der linken Seite (MS 1L und MS 5L) ergeben sich aufgrund der Spurlage, nahe über dem linken Steg des Hohlkastenquerschnittes, deutlich höhere Werte.

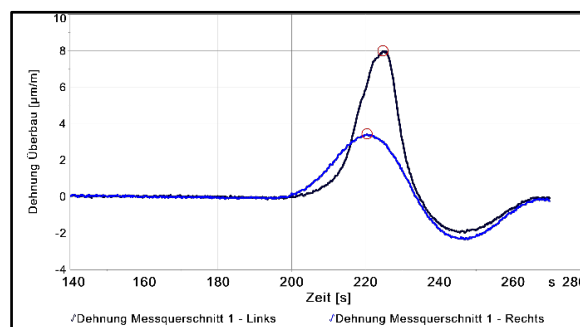


Bild 72: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 11

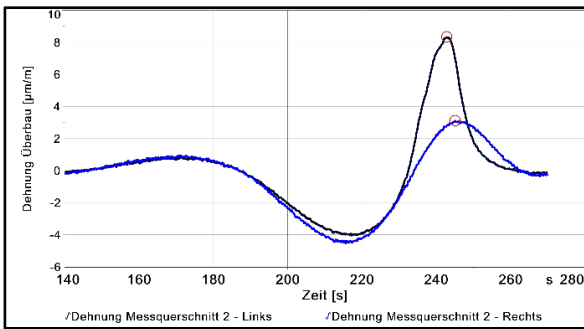


Bild 73: Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 11

Die Identifikation der Spur über die Verhältnisse zwischen den Peaks ist damit realisierbar. Das Prinzip lautet dabei, dass eine näherungsweise gleiche Peakhöhe bei einer Fahrt auf der rechten Spur auftritt und bei deutlich höheren Peaks an den Messstellen des linken Steges auch die Fahrt auf der linken Spur abläuft. Dies ist durchgehend erwartungsgerecht.

Der nächste Schritt ist wiederum die Synchronisation in Längsrichtung, dargestellt in Bild 74 (MS 1L und MS 5L). Die Zeitdifferenz zwischen den Peaks beträgt hier 18,107 s und führt damit zu einer errechneten Geschwindigkeit von 3,54 km/h.

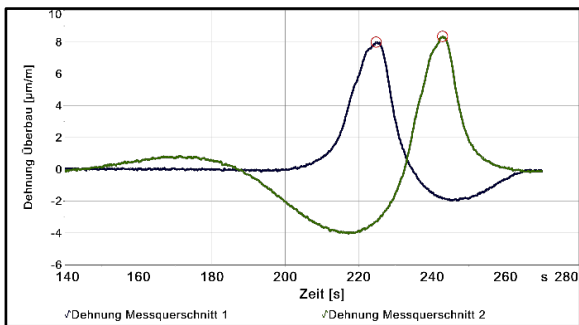


Bild 74: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 11

Der Verlauf der Dehnungsmessung an der Fahrbahnübergangskonstruktion ist in Bild 75 dargestellt. Mit der ermittelten Geschwindigkeit von 3,54 km/h ergeben sich folgende Achsabstände aus den zeitlichen Abständen der Peaks:

A1-A2	3,60 m	(3,63 m)
A2-A3	2,84 m	(2,85 m)
A3-A4	1,32 m	(1,33 m)
A4-A5	1,31 m	(1,33 m)

Die so ermittelte Geschwindigkeit ist damit praktisch exakt.

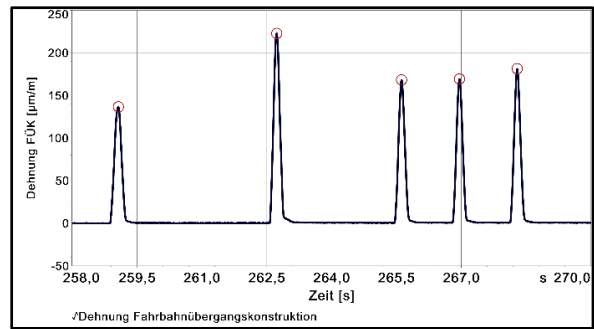


Bild 75: Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 18 – Kalibrierfahrt ID 11

In der weiteren Analyse ist zu prüfen, ob die aufgezeigte Anwendbarkeit der vorhandenen Algorithmen auch bei Überfahrten mit realen Fahrzeuggeschwindigkeiten gegeben ist. Hierzu werden zunächst die Kalibrierfahrten ID 34 und ID 36 herangezogen (Überfahrt 5-achsiger Sattelzug auf dem rechten und dem linken Fahrstreifen).

Bild 76 und Bild 77 zeigen erneut die Datengrundlage für den ersten Schritt der Auswertung, der Synchronisation in Querrichtung. Das Fahrzeug befuhr hier den rechten Fahrstreifen. Entsprechend sind die Peaks rechts etwas größer. Die Charakteristik entspricht den oben aufgeführten Verläufen für die langsame Kalibrierfahrt ID 9.

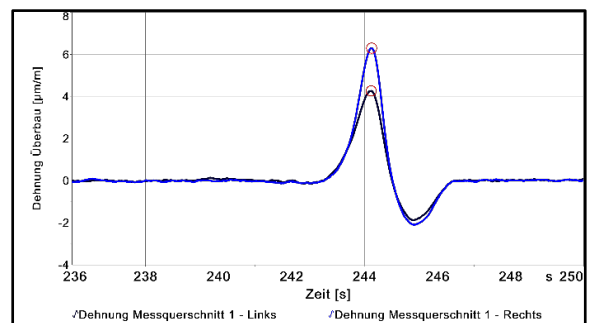


Bild 76: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 34

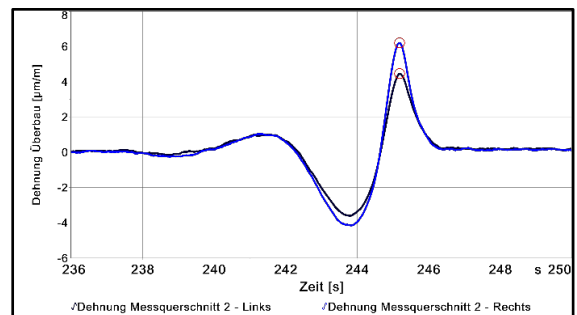


Bild 77: Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 34

In der weiteren Auswertung, der Synchronisation in Längsrichtung ergibt sich aus der in Bild 78 dargestellten Datengrundlagen eine Zeitdifferenz zwischen den eingetragenen Peaks von 0,987 s und damit eine errechnete Geschwindigkeit von 64,9 km/h.

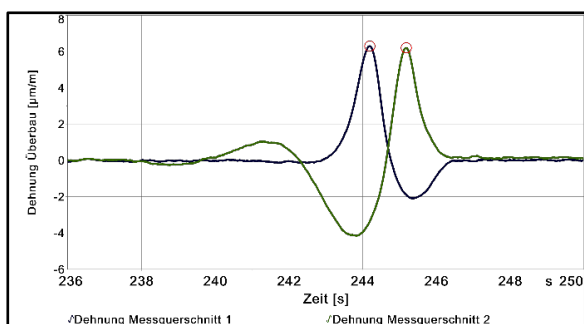


Bild 78: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 34

Der zugehörige Verlauf der Dehnungsmessung an der Fahrbahnübergangskonstruktion ist in Bild 79 dargestellt. Hier wird aufgrund der höheren Fahrzeuggeschwindigkeit, verglichen mit Kalibrierfahrt ID 9 auf der gleichen Fahrspur, das Nachschwingen der Fahrbahnübergangskonstruktion ersichtlich.

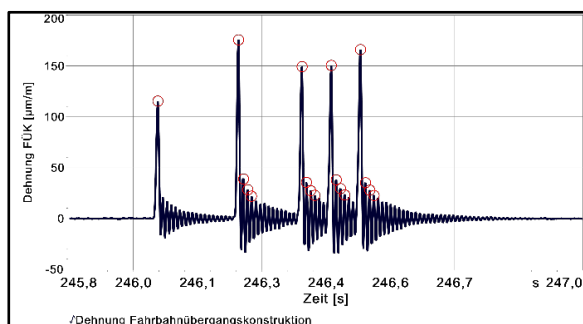


Bild 79: Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 34

Dies führt zunächst zu einer Reihe zusätzlich identifizierter Peaks. Um diesen Effekt für die Peakermittlung zu entfernen, wird aus dem Messverlauf eine obere Hüllkurve über eine geringe Anzahl von Messwerten errechnet (hier 10 Werte, d. h. bei der vorhandenen Messfrequenz von 600 Hz 0,0167 s). Das Ergebnis ist in Bild 80 dargestellt.

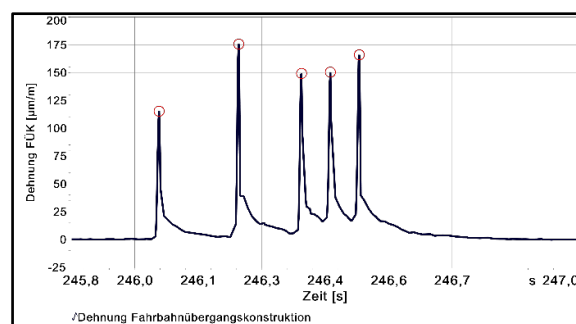


Bild 80: Obere Hüllkurve der Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 34

Mit der ermittelten Geschwindigkeit von 64,9 km/h ergeben sich auf Basis der an der Hüllkurve ermittelten Peaks folgende Achsabstände aus den Zeitabständen:

A1-A2	3,40 m	(3,63 m)
A2-A3	2,67 m	(2,85 m)
A3-A4	1,23 m	(1,33 m)
A4-A5	1,23 m	(1,33 m)

Daraus zeigt sich erneut, dass die ermittelte Geschwindigkeit etwas zu gering ermittelt ist. Die Geschwindigkeit betrug tatsächlich auf Grundlage der bekannten Fahrzeuggeometrie und der gemessenen Zeitabstände zwischen den Peaks rund 70 km/h und liegt damit etwa 8 % höher als aus den Messungen berechnet.

Abschließend sind die Verläufe für Kalibrierfahrt ID 36 (5-achsiger Sattelzug, linker Fahrstreifen) zusammengestellt. Bild 81, Bild 82 und Bild 83 zeigen analoges Verhalten zur langsamen Kalibrierfahrt ID 11 auf dem linken Fahrstreifen.

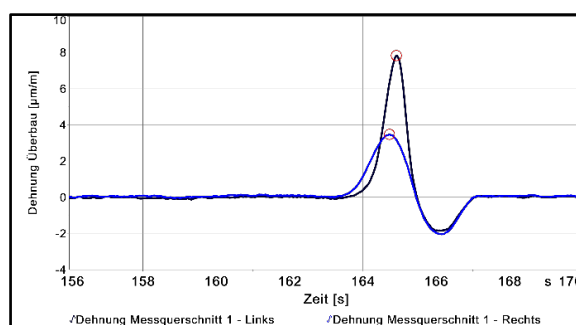


Bild 81: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 36

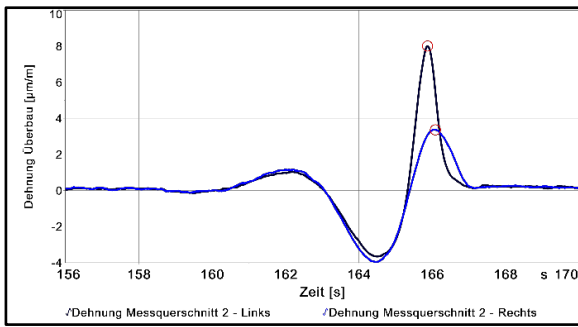


Bild 82: Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 36

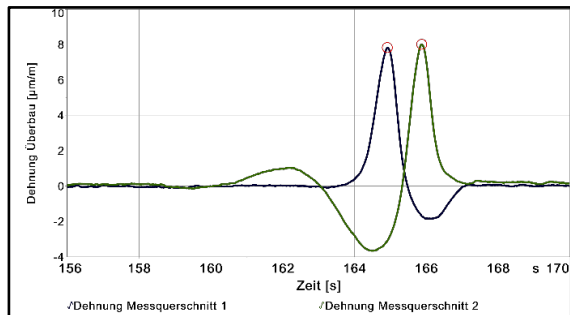


Bild 83: Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 36

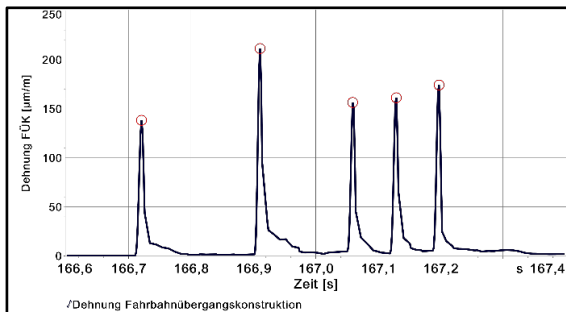


Bild 84: Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 18 – Kalibrierfahrt ID 36

Die ermittelte Geschwindigkeit aus der Zeitdifferenz zwischen den eingetragenen Peaks in Bild 84 beträgt 66,7 km/h. Anhand der in Bild 84 dargestellten Peaks der Hüllkurve der Messungen an MS 18 mit der ermittelten Geschwindigkeit ergeben sich folgende Achsabstände:

A1-A2	3,52 m	(3,63 m)
A2-A3	2,75 m	(2,85 m)
A3-A4	1,30 m	(1,33 m)
A4-A5	1,27 m	(1,33 m)

Die Geschwindigkeit betrug tatsächlich auf Grundlage der bekannten Fahrzeuggeometrie und der ermittelten Zeitdifferenzen zwischen den Peaks rund 70 km/h und liegt damit etwa 5% höher als aus den Messungen ermittelt.

Insgesamt zeigt sich damit, dass die Fahrzeugerkennung mit den vorhandenen Methoden und Algorithmen bereits relativ zuverlässig funktioniert. Verbesserungen in der Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeiten sind auf Basis weiterer vorliegender Methoden und Algorithmen möglich und sinnvoll.

5.2.2 Gesamtgewichte

Die Ermittlung des Gesamtgewichtes erfolgt über die in Absatz 5.1.3 beschriebene Methodik. Mit den im vorhergehenden Absatz beschriebenen Schritten liegen die hierfür erforderlichen Informationen zum Fahrzeug, für das das Gesamtgewicht zu bestimmen ist, vor. Zusätzlich sind damit auch Informationen zu anderen auf dem Bauwerk befindlichen Fahrzeugen vorhanden. In der umgesetzten Methodik erfolgt die Bestimmung des Gesamtgewichtes eines Fahrzeugs insgesamt. Damit ist es erforderlich, die Verteilung des Gesamtgewichtes auf die einzelnen Achsen des Fahrzeuges vorab initial festzulegen. Hierzu wird auf die Verhältnisse der Ordinatenwerte der erkannten Peaks infolge der überfahrenden Achsen an der Fahrbahnübergangskonstruktion (FÜK) zurückgegriffen. In nachfolgendem Bild 85 ist dieser Ansatz exemplarisch für die Kalibrierfahrt ID 1 dargestellt.

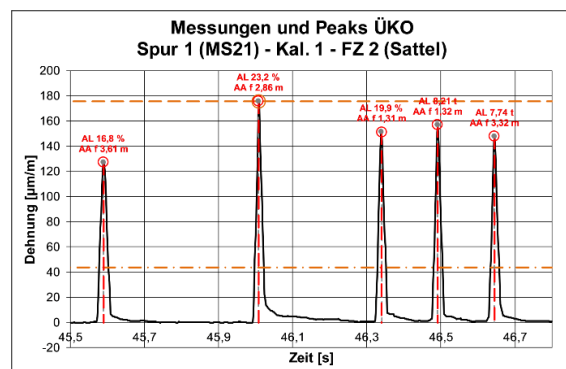


Bild 85: Achslastenverteilung anhand der Peakkoordinaten der erkannten Einzelachsen an der FÜK MS 21 (rechts) – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug)

Die zur Gesamtgewichtsbestimmung herangezogenen Messstellen sind MS2L und MS6L bei Überfahrten auf der rechten, der LKW-Spur und analog MS 1L und MS 5L bei Überfahrten auf der linken Fahrspur.

Bild 86 und Bild 87 zeigen die gemessenen und die anhand der ermittelten Kennwert-Einflussfunktionen berechneten Dehnungsverläufe der Messstellen MS2L und MS6L. Die berechneten Dehnungsverläufe sind dabei durch Ausgleichsrechnung an die Messwerte gefittet.

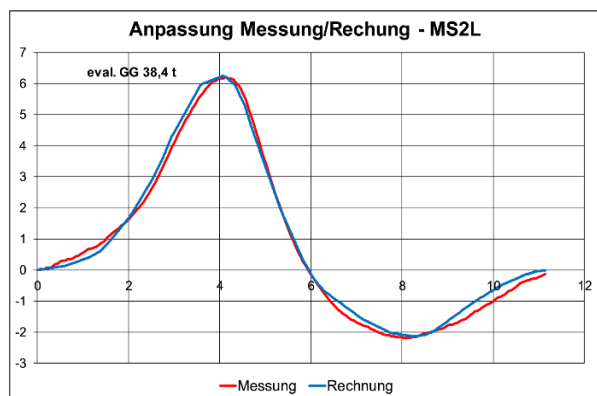


Bild 86: Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 2L (*rechts*) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug)

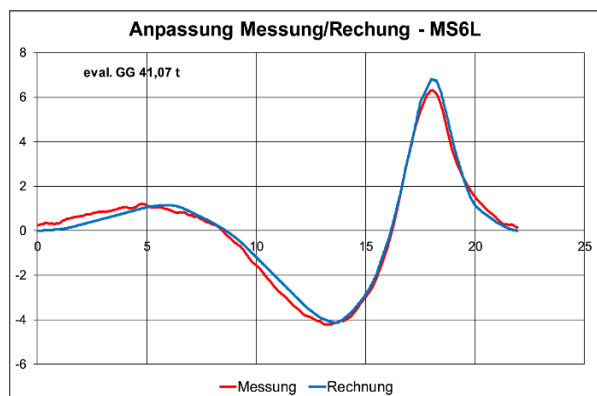


Bild 87: Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 6L (*rechts*) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug)

Im dargestellten Beispiel der Kalibrierfahrt ID 1 wurde somit aus MS2L ein Gesamtgewicht von 38,4 t und aus MS6L ein Gesamtgewicht von 41,1 t errechnet. Im Mittel aus beiden Ergebnissen ergibt sich damit ein Gesamtgewicht von 39,7 t. Das tatsächliche Gesamtgewicht des Kalibrierfahrzeuges betrug 40,2 t. Damit ergibt sich eine prozentuale Abweichung des errechneten Ergebnisses zum tatsächlichen Gesamtgewicht von 1,2 %.

Bild 88 und Bild 89 zeigen den Sachverhalt analog für eine Überfahrt auf der linken Fahrspur an den Messstellen MS 1L und MS 5L für ein 3-Achsiges Fahrzeug. Die vorab ermittelte und für die Berechnung verwendete Achslastverteilung ist in Bild 90 dargestellt.

Im Ergebnis ergibt sich hier im Mittel ein errechnetes Gesamtgewicht von 19,6 t. Im Vergleich zum tatsächlichen Gesamtgewicht des Kalibrierfahrzeuges von 20,3 t ergibt sich damit eine prozentuale Abweichung von 3,4 %.

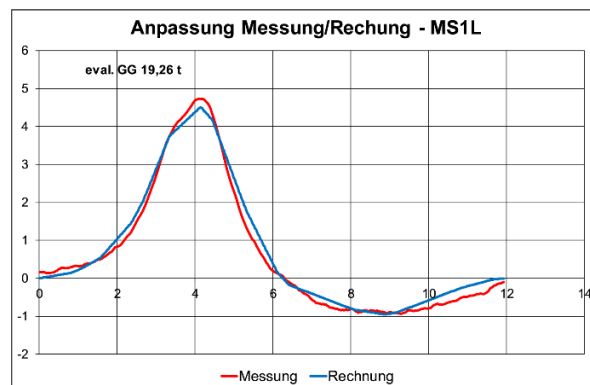


Bild 88: Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 1L (*links*) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser)

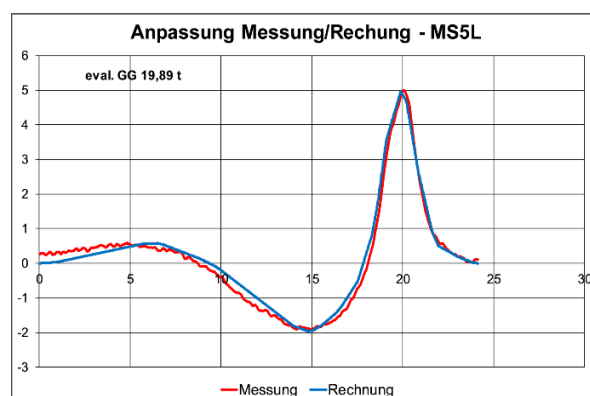


Bild 89: Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 5L (*links*) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser)

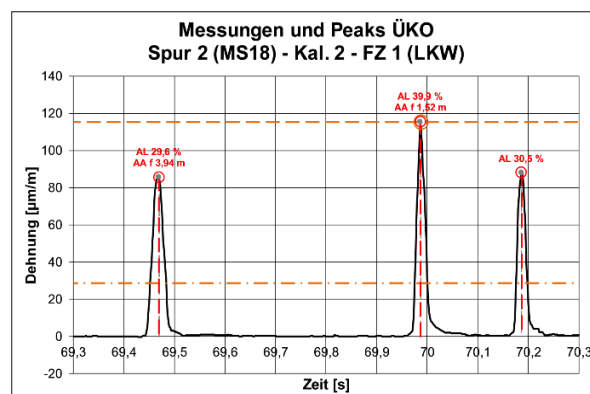


Bild 90: Achslastverteilung anhand der Peakkoordinaten der erkannten Einzelachsen der FÜK MS 18 (*links*) – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser)

5.2.3 Validierung mit Daten der Kalibrierfahrten vom 30.09.2016

In den vorhergehenden Absätzen 5.2.1 und 5.2.2 wurde prinzipiell aufgezeigt, dass mit der eingesetzten Methodik zur Fahrzeugerkennung und Gesamtgewichtsbestimmung eine praktikable Verkehrserkennung realisierbar ist. Die Genauigkeit der Methodik ist dabei von verschiedenen Parametern wie der ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit und der Achslastverteilung abhängig. Hinsichtlich der Ermittlung der Gesamtgewichte sind die zugrundeliegenden Kennwert-Einflussfunktionen von Bedeutung. Entsprechend den Erläuterungen in Absatz 5.1.4.2 und 5.1.4.3 wird dabei deutlich, dass aufgrund der zwangsläufig vorhandenen Streuungen der Messdaten eine exakte Ermittlung der Gesamtgewichte der Fahrzeuge unter Verwendung der Messdaten praktikabel nicht möglich ist. Damit ergibt sich die Fragestellung, in welcher Größenordnung die Abweichungen der ermittelten Gesamtgewichte zu den tatsächlichen Gesamtgewichten liegen.

Die Grundlage für diese Untersuchungen sind im ersten Schritt in diesem Absatz die am 30.09.2016 durchgeführten Kalibrierfahrten. In nachfolgender Tabelle (Tabelle 4) sind die Ergebnisse der mit den eingesetzten Algorithmen realisierten Fahrzeugerkennungen einschließlich Bestimmung der Gesamtgewichte den bekannten Daten der eingesetzten Kalibrierfahrzeuge gegenüber gestellt.

Im Zuge der Kalibrierfahrten wurden Einzelüberfahrten der Kalibrierfahrzeuge in verschiedenen Geschwindigkeiten sowie Reihen- und Parallelfahrten durchgeführt. In der dargestellten Tabelle sind diese Varianten entsprechend kenntlich gemacht. In der Tabelle ist ersichtlich, dass abgesehen von einer durchgeführten Parallelfahrt (rot hinterlegte Zeile in der Tabelle) in allen Fällen die Fahrzeuge hinsichtlich der Anzahl der Achse korrekt erkannt wurden. Die Zuordnung des Fahrzeugtyps auf Grundlage der Achskonfiguration (Achszahl und Achsabstände) ist bis auf einen Fall ebenfalls korrekt. Die auf Basis der Zeitlücken zwischen

den Peaks in den Messungen an der FÜK und der ermittelten Fahrzeuggeschwindigkeit errechneten Achsabstände sind im Vergleich zu den ausgemessenen Achsabständen der Kalibrierfahrzeuge im Wesentlichen im Dezimeterbereich korrekt. Für das 3-achsige Fahrzeug werden tendenziell etwas zu große Achsabstände ermittelt. Die ermittelten Verteilungen des Gesamtgewichtes auf die Achsen des Fahrzeuges, errechnet aus den Verhältnissen der Peaks in den Messungen an der FÜK zueinander, zeigen für das 5-achsige Kalibrierfahrzeug eine gute Übereinstimmung zu den tatsächlichen Werten (ermittelt aus statischer Radlastwiegung). Für das 3-achsige Kalibrierfahrzeug wird die Last der ersten Achslast durchgehend etwas unterschätzt und die Lasten der beiden übrigen Achsen entsprechend etwas überschätzt.

Hinsichtlich der ermittelten Gesamtgewichte zeigen sich für die Kalibrierfahrten in Einzelüberfahrt Abweichungen der aus den Messdaten abgeleiteten Gesamtgewichte gegenüber den statischen Gesamtgewichten im einstelligen Prozentbereich. Vor dem Hintergrund der in Absatz 5.1.4.2 und 5.1.4.3 beschriebenen Unschärfen in der Ermittlung der Gesamtgewichte ist diese Größenordnung zu erwarten. Die eingesetzten Algorithmen zeigen gewisse Defizite bei der Ermittlung der Gesamtgewichte von parallel fahrenden Fahrzeugen auf. Die ermittelten Gesamtgewichte sind hier für das Fahrzeug auf dem zweiten Fahrstreifen (in den Kalibrierfahrten der 3-achsige LKW) deutlich zu groß.

Zusammenfassend zeigt sich in der aufgeführten Validierung der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 30.09.2016 eine sehr gute Erkennung der Fahrzeuge selbst und für Fälle, in denen nicht unmittelbar zwei Fahrzeuge parallel auf dem Bauwerk fahren auch eine gute Genauigkeit der Ermittlung der Fahrzeuggesamtgewichte. Im nachfolgenden Absatz werden weitere Validierungen auf Basis von zusätzlichen Kalibrierfahrten dargestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 30.09.2016

Datum		Zeit		Kalibrierfahrten - IST-Werte										Kalibrierfahrten - Soll-Werte										Anmerkung					
				Typ	Spur	Geschw	GG	Achszahl	ALA1	ALA2	ALA3	ALA4	ALA5	Abweichung	Typ	GG	Achszahl	ALA1	ALA2	ALA3	ALA4	ALA5							
30.09.2016	10:36:04,857	98	1	31,042	40020	5	16,8%	354	23,2%	280	19,9%	128	20,7%	129	19,5%	-0,5%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	Einzelüberfahrten 30 km/h
30.09.2016	10:38:12,337	96	2	27,429	20915	3	29,6%	388	39,9%	150	30,3%					3,0%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	10:44:22,888	98	2	30,554	41852	5	16,1%	393	25,9%	309	19,8%	142	19,0%	144	19,2%	4,1%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	13:02:49,878	9	1	33,809	20994	3	30,3%	374	32,6%	140	37,1%					3,4%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	10:53:44,853	98	1	47,56	40875	5	16,7%	365	22,9%	291	19,8%	134	19,8%	134	20,7%	1,7%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	10:55:03,075	9	2	50,824	20230	3	24,9%	371	38,9%	141	36,2%					-0,3%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:01:50,227	98	2	49,846	41217	5	17,5%	378	20,8%	301	20,3%	139	20,7%	137	20,9%	2,5%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	Einzelüberfahrten 50 km/h
30.09.2016	11:03:25,287	9	1	50,33	21059	3	26,5%	362	30,9%	134	42,7%					3,7%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:10:41,203	9	2	79,754	19101	3	17,1%	362	45,6%	134	37,3%					-5,9%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:16:47,377	98	1	65,889	39445	5	15,2%	353	22,8%	275	19,2%	128	20,3%	125	22,7%	-1,9%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	11:26:03,552	9	2	87,371	19503	3	19,9%	380	44,6%	145	35,4%					-3,9%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:30:40,845	98	1	69,112	40249	5	14,6%	357	23,0%	281	20,4%	129	19,8%	129	22,1%	0,1%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	Einzelüberfahrten 90 km/h (65 km/h Sattelz.)
30.09.2016	11:39:16,413	98	1	26,86	48588	5	17,1%	370	23,6%	294	19,1%	137	19,3%	137	20,9%	8,4%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	11:39:16,418	9	2	29,124	27594	3	28,6%	388	36,6%	147	34,8%					35,9%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:44:56,318	98	1	26,494	36314	5	16,1%	352	24,4%	278	19,9%	129	19,2%	128	20,4%	-9,7%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	11:44:56,320	9	2	28,641	24045	3	35,9%	372	32,6%	140	31,9%					18,4%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	11:51:50,043	98	1	48,6	40377	5	15,7%	360	22,7%	284	19,7%	131	20,5%	131	21,4%	0,4%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	Parallelfahrt
30.09.2016	11:51:50,120	9	2	51,668	21404	3	19,1%	374	38,8%	141	42,1%					5,4%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	12:26:34,047	9	1	82,286	20268	3	31,5%	366	37,6%	134	30,9%					-0,2%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	12:29:56,720	98	2	72	40396	5	16,0%	364	24,5%	290	19,0%	132	19,5%	132	20,9%	0,5%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	12:37:58,358	9	2	85,449	19464	3	19,6%	376	43,7%	141	36,7%					-4,1%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	12:41:56,622	98	1	71,668	40845	5	17,5%	361	26,3%	286	18,3%	132	17,6%	132	20,2%	1,6%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	Einzelüberfahrten 90 km/h
30.09.2016	13:09:09,568	98	2	30,675	39724	5	16,3%	396	25,5%	312	19,6%	147	19,6%	145	19,0%	-1,2%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	13:16:41,343	98	1	29,069	36670	5	17,2%	392	23,2%	308	19,3%	142	19,9%	143	20,1%	-8,8%	98	40205	5	17,5%	363	28,1%	285	18,3%	133	17,6%	133	18,5%	
30.09.2016	13:16:46,130	32	1	31,674	21916	3	41,6%	441	24,6%	165	33,8%					8,0%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					
30.09.2016	13:16:46,130	32	1	31,674	21916	3	41,6%	441	24,6%	165	33,8%					8,0%	9	20300	3	36,2%	358	32,6%	136	31,2%					

5.2.4 Validierung mit Daten der Kalibrierfahrten am 22.04.2018

Am 22.04.2018 wurden von der Fa. Maurer mit einem 3-Achsigem LKW und einem Sattelzug koordinierte Brückenüberfahrten durchgeführt. Während der Fahrten war die Brücke für den Verkehr gesperrt. Somit war es möglich einige Fahrten mit sehr geringer Geschwindigkeit und auch Parallelfahrten durchzuführen, wie sie auch bei den erstmaligen am 30.09.2016 stattgefundenen Kalibrierfahrten durchgeführt wurden. Während der Durchführung dieser Kalibrierfahrten lief das Messsystem RTMS im Normalbetrieb und die überfahrenden Fahrzeuge wurden analog zum normalen Verkehrsablauf erfasst. Insgesamt standen die Protokolldaten von 59 Überfahrten zu Verfügung, von denen für die Validierung 55 berücksichtigt wurden. Die durchgeführten Kalibrierfahrten in sehr geringer Geschwindigkeit wurden nicht berücksichtigt.

Nachfolgend sind in Tabelle 5 Tabelle 5: die Ergebnisse der Fahrzeugerkennung für die durchgeführten Kalibrierfahrten mit rund 60 km/h zusammengestellt. In diesen Fällen wurden alle Fahrzeuge hinsichtlich der Achszahl und des Fahrzeugtyps korrekt erkannt. Die ermittelten Achsabstände liegen leicht über den tatsächlichen Werten, sind aber im Dezimeterbereich nahezu exakt. Für die Werte der Verteilung des Gesamtgewichtes auf die Achsen zeigt sich für das 5-achsige Fahrzeug eine leichte Unterschätzung der Last der zweiten Achse und eine entsprechende Überschätzung der Lasten der hinteren drei Achsen. Für das 3-achsige Fahrzeug zeigen sich eine leichte Überschätzung der Last der ersten Achse und eine Unterschätzung der Last der zweiten Achse. Hinsichtlich des ermittelten Gesamtgewichtes liefern die eingesetzten Algorithmen im Wesentlichen etwas größere Gesamtgewichte, die Abweichungen bleiben jedoch im mittleren einstelligen Prozentbereich.

Für die durchgeführten Kalibrierfahrten mit Geschwindigkeiten zwischen 75 und 95 km/h sind die Ergebnisse der Fahrzeugerkennungen durch das System RTMS in Tabelle 6 zusammengestellt. Auch hier zeigt sich eine durchgehende erfolgreiche Erkennung der Fahrzeuge hinsichtlich Achszahl und Fahrzeugtyp. Die ermittelten Werte der Achsabstände zeigen eine gleiche Charakteristik wie bei den Fahrten mit rund 60 km/h auf. Für das 5-achsige Fahrzeug werden nahezu exakte Werte ermittelt, für das 3-achsige Fahrzeug sind die Achsabstände teilweise geringfügig zu groß. Hinsichtlich der ermittelten Gesamtgewichte zeigen sich im Ver-

gleich zu den Fahrten mit 60 km/h tendenziell geringere Abweichungen zu den tatsächlichen Gesamtgewichten.

In Tabelle 7 sind in den ersten 8 Ergebniszeilen die Fahrzeugerkennungen während der durchgeführten Parallelfahrten zusammengestellt. Hier wird, analog zu den Ergebnissen der Kalibrierfahrten vom 30.09.2016, die Problematik der Erkennung dieser Parallelfahrten durch die eingesetzten Algorithmen deutlich. In den weiter folgenden Zeilen in Tabelle 7 sind die Fahrzeugerkennungen während der durchgeführten Kalibrierfahrten mit 30 km/h aufgeführt. In einem Fall konnte keine Fahrzeugerkennung realisiert werden, in den übrigen Fällen zeigen sich hinsichtlich der Erkennung der Fahrzeuge hinsichtlich Achszahl, Fahrzeugtyp, Achsabstände und Achslastverteilung vergleichbare Charakteristiken wie bei den Fahrten mit 60 km/h und 75 bis 95 km/h.

Zusammenfassend kann aus den Validierungen mit den Kalibrierfahrten vom 30.09.2016 und vom 22.04.2018 aufgezeigt werden, dass die Erkennung von Fahrzeugen abgesehen von den Fällen der Parallelfahrten praktisch durchgehend erfolgreich realisiert wird. Die Bestimmung der Gesamtgewichte ist durch gewisse Abweichungen charakterisiert, die aber durchgehend im einstelligen Prozentbereich bleiben.

Hinsichtlich der Defizite der Erkennung von Parallelfahrten wurden in den Algorithmen entsprechenden Modifikationen vorgenommen, die jedoch bereits in den dargestellten Ergebnissen Verwendung fanden. Die Modifikationen führend zu einer Verbesserung der Erkennung von Parallelfahrten, die in hier nicht dargestellten manuellen Abgleichen mit den Videoaufzeichnungen identifiziert werden konnten. Für die konkreten Situationen der bewusst „gesteuerten“ Parallelfahrten im Zuge der Kalibrierfahrten führen diese Modifikationen jedoch nicht zu einer deutlichen Verbesserung der Erkennung, vorwiegend für das Fahrzeug auf dem zweiten Fahrstreifen.

Für die weiterführenden Auswertungen und die Umsetzung der entwickelten und validierten Algorithmen in der automatisierten Vor-Ort-Auswertung der wird dennoch der vorliegende Entwicklungsstand herangezogen. Für die aus den Messdatenauswertungen abzuleitenden Daten des Verkehrsaufkommens wird das Defizit der Erkennung der Parallelfahrten als nachrangig angesehen, da ohnehin der wesentliche Teil des Schwerverkehrs auf dem ersten Fahrstreifen verkehrt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 22.04.2018

IST-Werte (aus Daten-AW)														Soll-Werte (Doku. Kalib.-Fahrten)																
Datum/Zeit	Spur	Typ	Geschw	GG	Achszahl	ALA1	ALA2	ALA3	ALA4	ALA5	Abweichung		Delta (s)		Uhrzeit	Spur	Typ	Geschw	GG	Achszahl	ALA1	ALA2	ALA3	ALA4	ALA5					
22.04.2018 01:16:16	2	98	63	42630	5	21,5%	378	22,7%	283	19,0%	139	18,4%	139	18,4%	0,18	01:16:16,000	2	98	60	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 01:19:17	2	9	65	28331	3	34,8%	382	30,8%	141	34,4%					-0,20	01:19:17,000	2	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:26:10	2	98	65	42608	5	22,5%	381	22,7%	284	19,4%	139	17,5%	139	17,5%	0,70	01:26:09,000	2	98	61	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 01:27:47	1	9	62	27801	3	32,4%	363	32,3%	134	35,3%					0,31	01:27:47,000	1	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:30:59	2	98	64	42422	5	21,1%	383	21,9%	286	19,5%	139	19,0%	139	19,0%	-0,55	01:31:00,000	2	98	60	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 01:32:46	1	9	62	27410	3	36,1%	364	31,6%	134	32,3%					-7,43	01:32:53,000	1	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:37:10	1	9	63	27838	3	32,4%	365	32,9%	139	34,8%					4,84	01:37:05,000	1	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:40:25	1	98	61	42423	5	23,1%	371	22,1%	277	18,5%	134	17,5%	134	17,5%	-4,81	01:40:30,000	1	98	60	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 01:41:35	2	9	65	29016	3	31,5%	384	33,2%	142	35,3%					0,17	01:41:35,000	2	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:44:27	1	98	61	42825	5	20,8%	370	22,5%	273	19,1%	133	18,6%	133	18,6%	0,30	01:44:27,000	1	98	61	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 01:45:34	2	9	65	29172	3	35,3%	380	30,7%	141	34,0%					0,23	01:45:34,000	2	9	60	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 01:48:28	1	98	61	42064	5	22,2%	369	22,5%	272	18,7%	136	18,4%	136	18,4%	-0,09	01:48:28,000	1	98	61	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%

Tabelle 7: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 22.04.2018

Datum/Zeit	IST-Werte (aus Daten-AW)										Abweichung Gesamtwicht	Deltat (s)	Soll-Werte (Doku. Kalib.-Fahrten)																		
	Spur	Typ	Geschw	Gg	Achszahl	ALA1	AA1-2	AA2	AA2-3	AA3			AA3-4	AA4	AA4-5	AA5	Spur	Typ	Geschw	Gg	Achszahl	ALA1	AA1-2	AA2	AA2-3	AA3	AA3-4	AA4	AA4-5	AA5	
22.04.2018 03:26:41	2	98	32	63640	5	25,7%	365	24,3%	270	18,8%	131	17,8%	131	13,4%	56,4%	-0,14	03:26:41,000	2	98	30	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
																	03:26:41,000	1	9	31	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:31:25	1	98	29	46479	5	23,8%	388	25,5%	265	17,2%	130	16,6%	130	16,8%	15,7%	-0,04	03:31:25,000	1	98	30	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
																	03:31:25,000	2	9	31	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:35:50	2	98	61	63132	5	22,3%	376	20,8%	284	19,1%	135	19,3%	139	18,4%	57,1%	0,44	03:35:50,000	2	98	60	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
																	03:35:50,000	1	9	59	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:39:53	1	98	56	42388	5	12,5%	352	37,7%	262	16,1%	129	16,3%	128	17,6%	5,5%	0,68	03:39:52,000	1	98	60	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
																	03:39:52,000	2	9	58	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:49:16	2	9	33	29386	3	37,1%	391	34,1%	146	28,8%					6,2%	-0,16	03:49:16,000	2	9	29	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:51:14	1	98	30	41151	5	25,8%	386	23,7%	265	17,2%	131	17,2%	131	16,1%	2,4%	0,21	03:51:14,000	1	98	30	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 03:50:35	2	9	32	32091	3	35,5%	372	34,2%	140	30,5%					15,9%	-0,15	03:50:35,000	2	9	30	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:51:47	2	9	33	30472	3	34,9%	388	33,7%	147	31,3%					10,1%	0,50	03:51:47,000	2	9	33	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:53:18	1	98	30	43357	5	26,7%	343	26,0%	253	16,2%	127	16,1%	124	15,1%	7,9%	0,17	03:53:18,000	1	98	31	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 03:53:29	1	9	32	28520	3	43,3%	344	29,8%	130	26,9%					3,0%	-0,21	03:53:29,000	1	9	34	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
																	03:54:30,000	1	9	32	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:55:32	2	98	29	41510	5	25,1%	341	22,8%	253	19,5%	125	18,2%	124	14,4%	3,3%	-0,48	03:55:32,000	2	98	29	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 03:55:41	1	9	31	27728	3	37,9%	365	31,0%	137	31,2%					0,2%	-0,53	03:55:42,000	1	9	31	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:57:13	2	98	31	43790	5	24,4%	377	23,4%	281	19,1%	138	18,1%	138	15,0%	9,0%	0,43	03:57:13,000	2	98	29	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%
22.04.2018 03:57:24	1	9	33	28304	3	36,3%	385	32,9%	144	30,8%					2,3%	-0,46	03:57:24,000	1	9	32	27680	3	28,0%	360	36,6%	135	35,4%	X	X	X	X
22.04.2018 03:59:23	2	98	30	41629	5	24,5%	347	23,8%	260	19,8%	128	17,7%	128	14,2%	3,6%	0,07	03:59:23,000	2	98	29	40180	5	19,5%	360	35,2%	265	12,1%	135	16,9%	135	16,3%

5.3 Ergebnisse der Verkehrserkennung RTMS

Die in den vorhergehenden Absätzen erläuterten und verifizierten Algorithmen zur Verkehrserkennung (Fahrzeugidentifikation und Gesamtgewichtsbestimmung) wurden im ersten Schritt im Nachlauf auf die Messdaten vom Februar 2017 bis November 2018 angewendet. Ab Januar 2019 erfolgte die Auswertung der Messdaten vor Ort, rückwirkend ab den Messdaten vom Dezember 2018. Zusätzlich wurden im Zuge der Implementierung der Vor-Ort-Auswertung Optimierungen in den Algorithmen umgesetzt, die zu einer verbesserten Ermittlung des Gesamtgewichtes und einer verbesserten Erkennung von Parallelfahrten führten. Ab März 2019 wurden die verbesserten Algorithmen in der Vor-Ort-Auswertung für die neu auflaufenden Messdaten angewendet.

Insgesamt liegen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Schlussberichtes Daten der Verkehrserkennung an der Brücke von Februar 2017 bis August 2020 vor. Nachfolgend werden hieraus einige ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

In Bild 91 sind die über den gesamten vorliegenden Auswertungszeitraum ermittelten durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrsstärken getrennt für die einzelnen Monaten dargestellt. In Analogie dazu zeigt Bild 92 die durchschnittlichen täglichen Schwerverkehrsstärken bezogen auf die Wochentage Montag bis Freitag (ohne Feiertage). In beiden Aufbereitungsformen ist ein Jahresgang der Schwerverkehrsstärke ersichtlich. In den Monaten Dezember und Januar sowie in den Sommermonaten (Juli/August) zeigen sich gegenüber den anderen Monaten niedrigere Schwerverkehrsstärken. Eine deutliche „langfristige“ Veränderung der Schwerverkehrsstärke zeigt sich in den vorliegenden Datenbeständen zumindest bis Februar 2020 nicht.

Deutlich sichtbar wird eine Veränderung der Schwerverkehrsstärke in den Monaten März bis Juni 2020. In diesem Zeitraum liegen die vielfältigen Maßnahmen in Deutschland und Europa im Frühjahr 2020 zur Eindämmung der SARS-COV-2-Pandemie. Die Auswirkungen auf die Wirtschaft und damit direkt auch auf das Schwerverkehrsaufkommen zeigen sich deutlich.

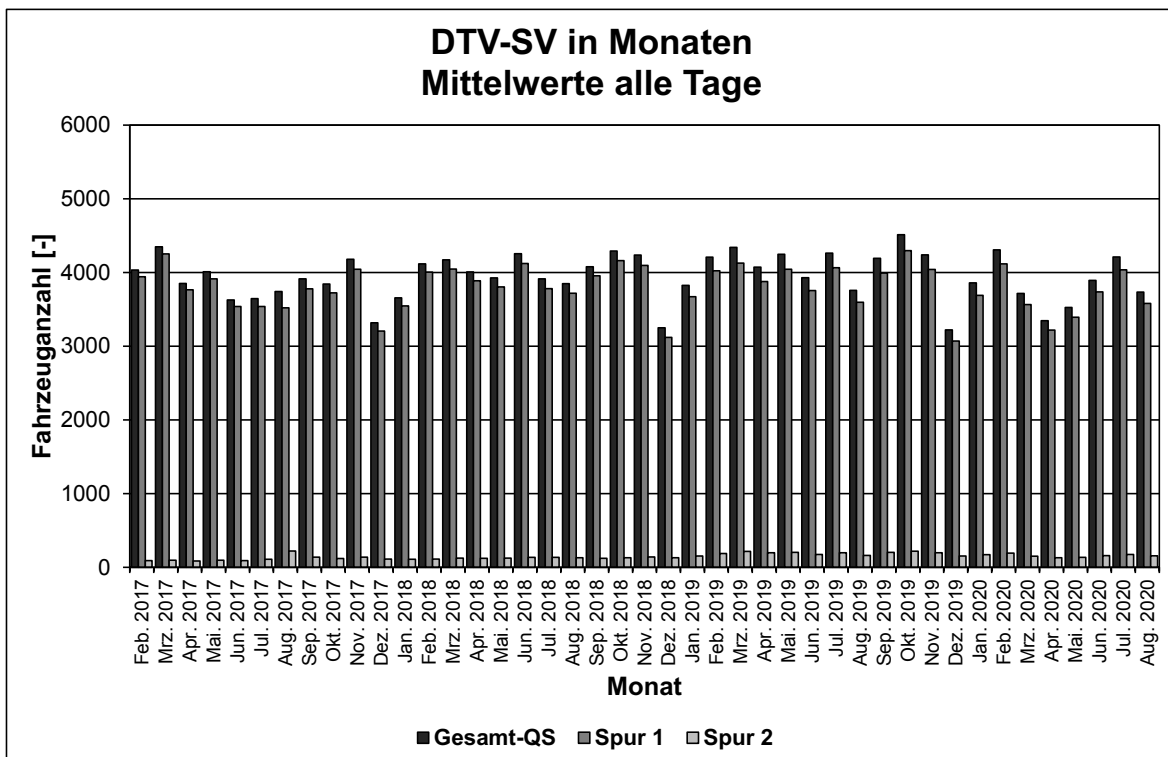


Bild 91: Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen DTV-SV unter Berücksichtigung aller Wochentage – Monatsweise getrennt

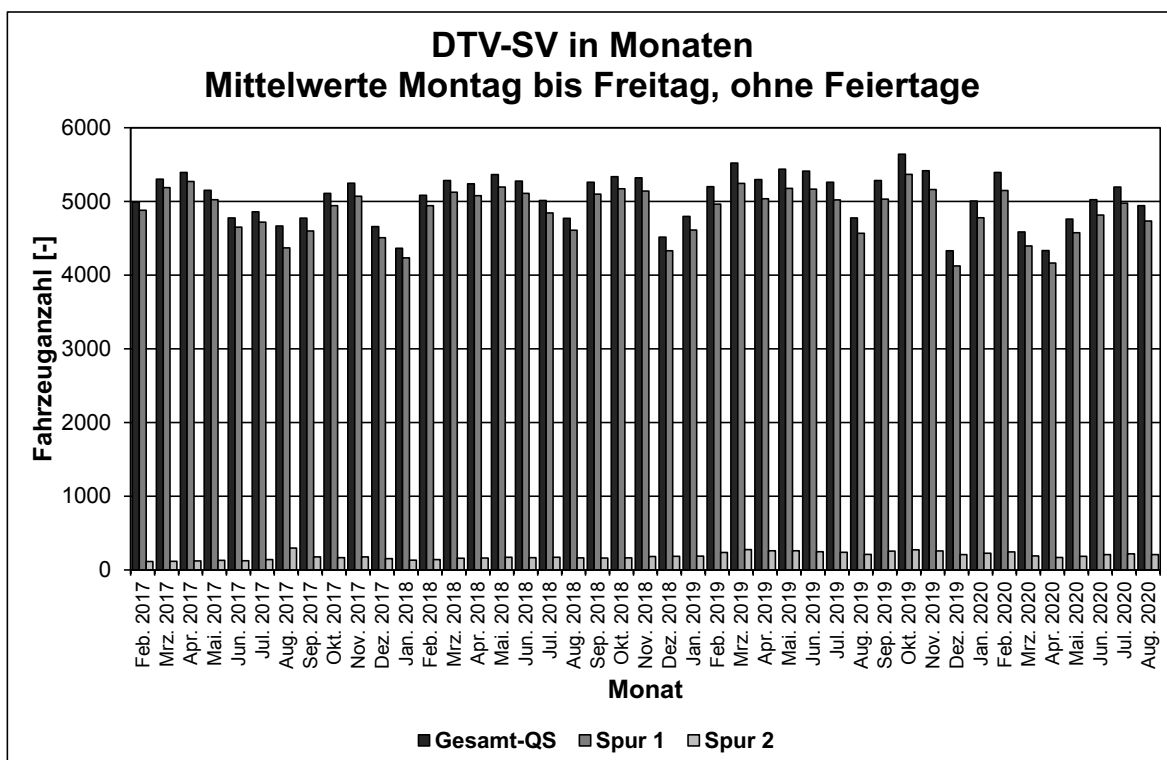


Bild 92: Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen DTV-SV ohne Berücksichtigung von Wochenende und Feiertagen – Monatsweise getrennt

Eine weitere Differenzierung der ermittelten Fahrzeugtage hin zu der Darstellung der pro Kalendertag identifizierten Schwerverkehrsstärke ist für den gesamten Auswertungszeitraum in den nachfolgenden Diagrammen (Bild 93 bis Bild 96) dargestellt. Der Gesamtzeitraum ist hierzu in den Diagrammen in Abschnitte zu je 52 Wochen aufgeteilt. In dieser Darstellungsform sind die saisonalen Charakteristiken der Schwerverkehrsstärke deutlich erkennbar. In Bild 93 zeigt sich zum Beispiel im Zeitraum zwischen Anfang Juli 2017 und Mitte August 2017 eine abnehmende Schwerverkehrsstärke. Ab Mitte August steigt die Schwerverkehrsstärke dann wieder an. In diesem Zeitraum lagen in den meisten Bundesländern die Sommerferien 2017. Eine analoge Charakteristik zeigt sich in Bild 94 und Bild 95 in den Jahren 2018 und 2019. Ebenfalls sehr deutlich erkennbar ist die signifikant geringere Schwerverkehrsstärke im Bereich der Jahreswechsel. Bild 96 zeigt die bisher erfassten Daten für das laufende Jahr 2020. Im Zeitraum zwischen dem 23.02.2020 und dem 24.03.2020 sowie zwischen dem 02.04.2020 und dem 06.04.2020 kam es zu einem Ausfall der Messung, die aufgrund einer nicht vorhandenen Internetanbindung der Gesamtanlage

(Februar/März 2020) bzw. des Messrechners selbst (April 2020) nicht zeitnah behoben werden konnte. Deutlich werden wiederum die Auswirkungen der Pandemie-Maßnahmen auf die Schwerverkehrsstärke.

In Bild 97 sind die monatsweise ermittelten Werte der Schwerverkehrszusammensetzung für den gesamten Auswertungszeitraum dargestellt. Hier zeigen sich im Vergleich zur Schwerverkehrsstärke nur sehr gering ausgeprägte saisonale Einflüsse. Den wesentlichen Anteil am gesamten Schwerverkehrsaufkommen haben, wie auch an anderen Erfassungsstellen des Verkehrsaufkommens, Sattelzugfahrzeuge. Über den Gesamtzeitraum hinweg lag der Anteil dieser Fahrzeuge am gesamten Schwerverkehrsaufkommen bei rund 72 %. Der Anteil von LKW mit Anhängern lag bei rund 17 % und der Anteil von LKW ohne Anhänger bei rund 8 %. Diese Werte ordnen sich in vorliegenden Vergleichsdaten ein (Vergleichsdaten aus Erfassungen an einer Autobahn: 67% / 22% / 11%).

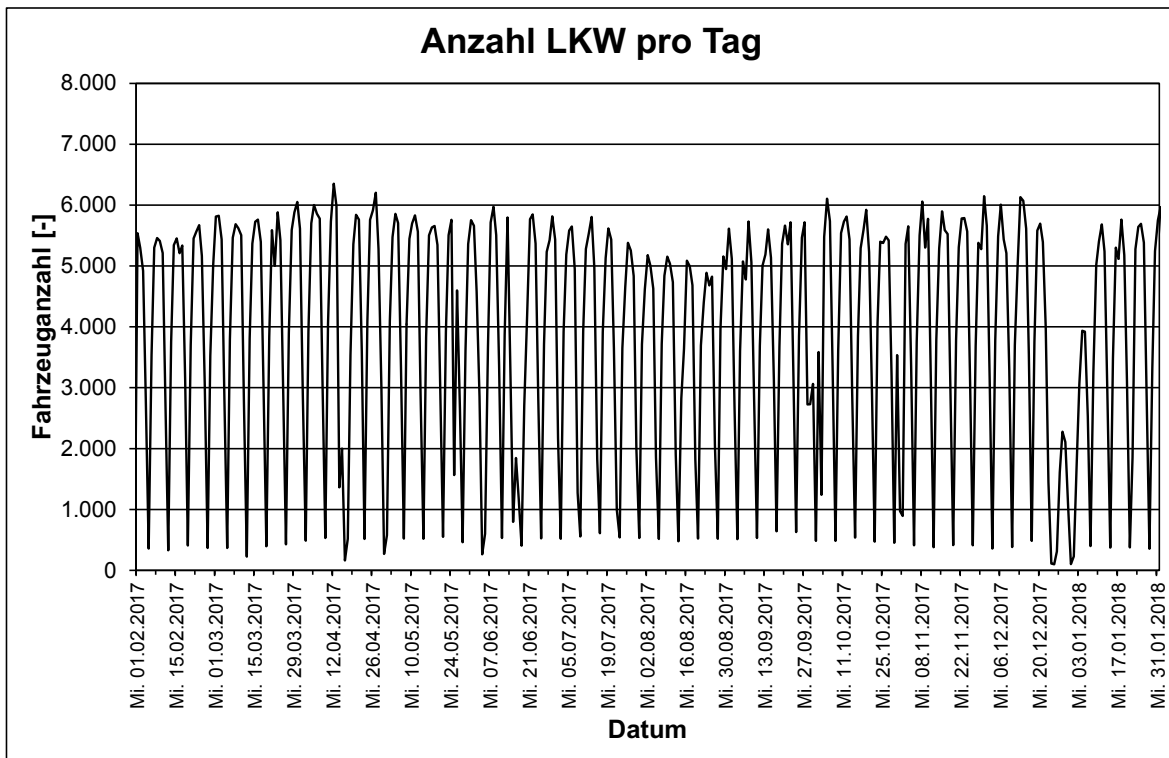


Bild 93: Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (01.02.2017 bis 31.01.2018)

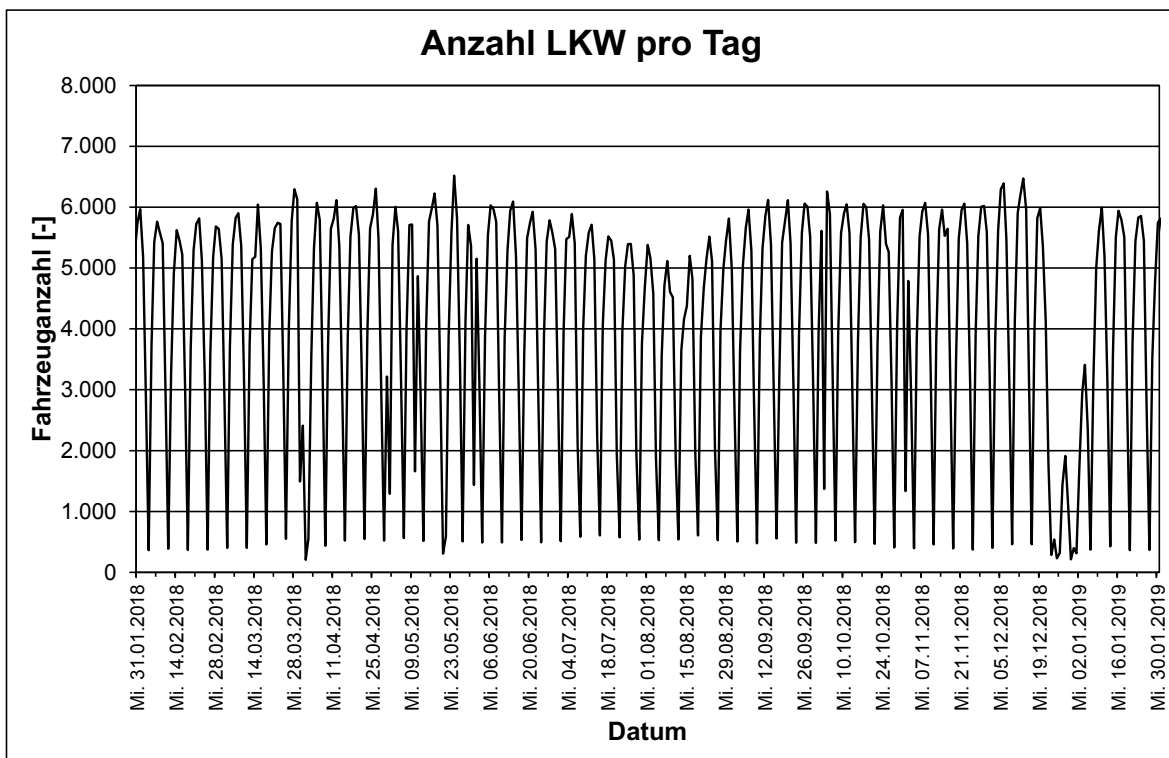


Bild 94: Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (31.01.2018 bis 30.01.2019)

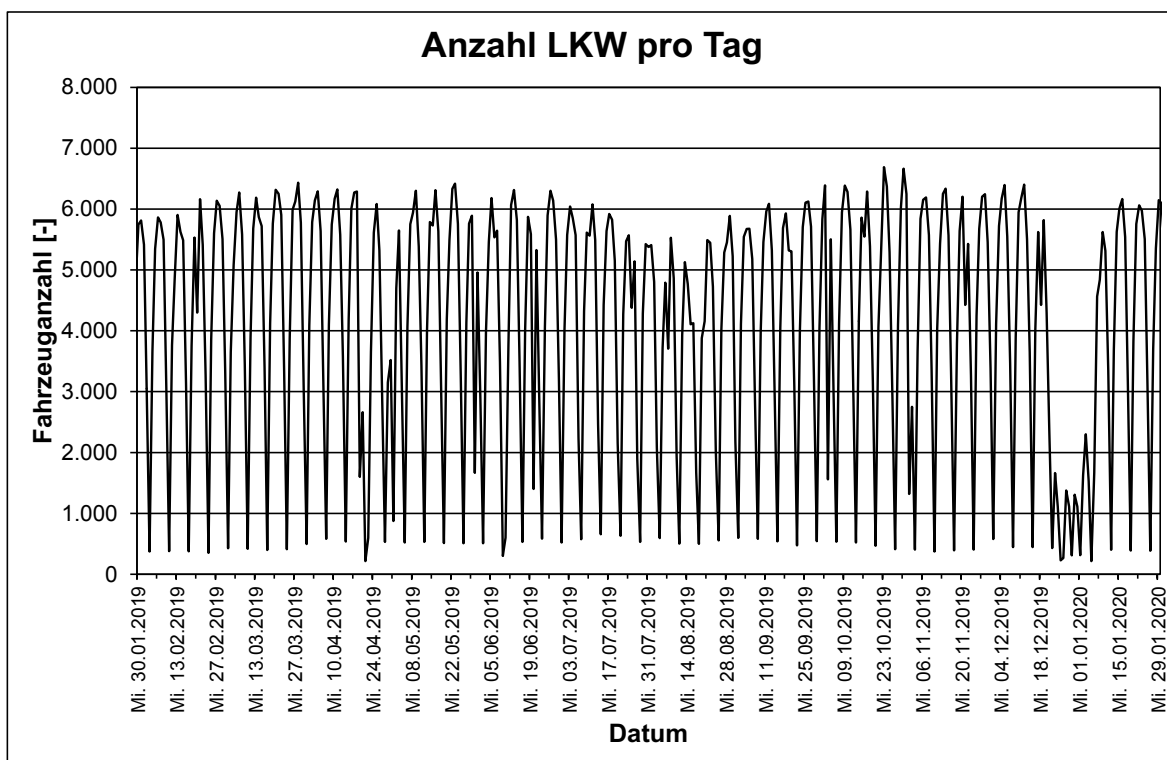


Bild 95: Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (30.01.2019 bis 29.01.2020)

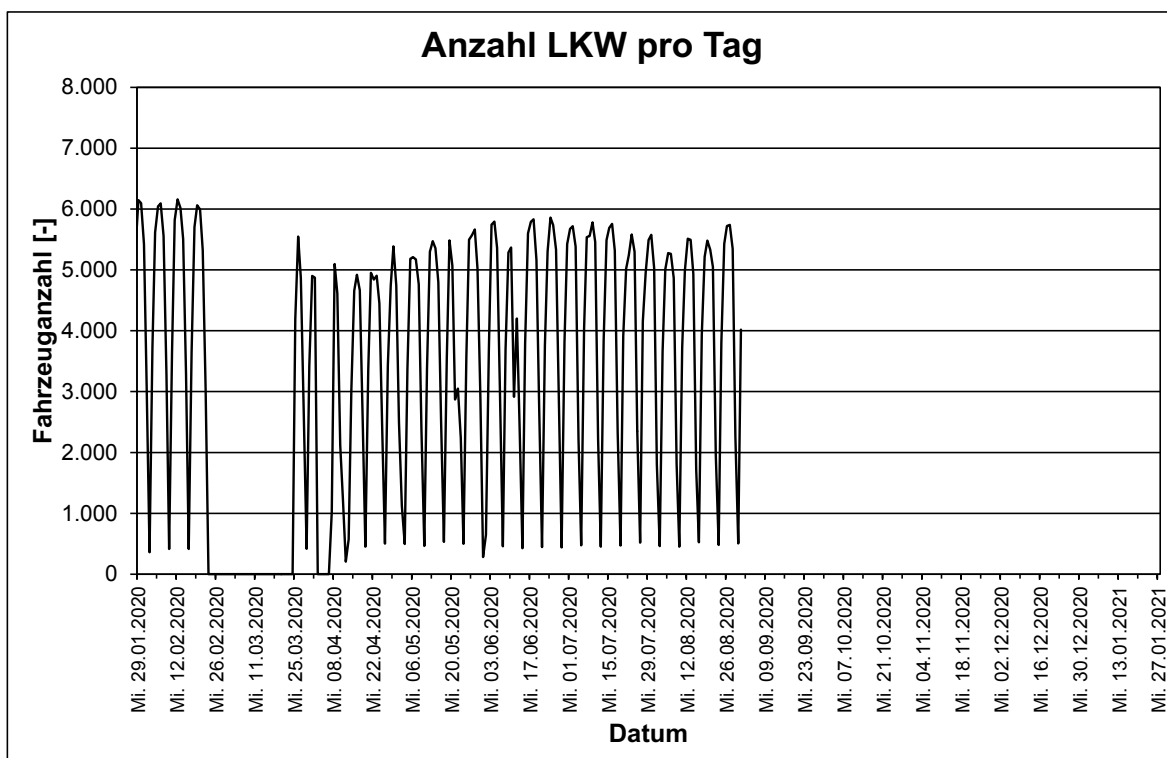


Bild 96: Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (29.01.2020 bis 31.08.2020)

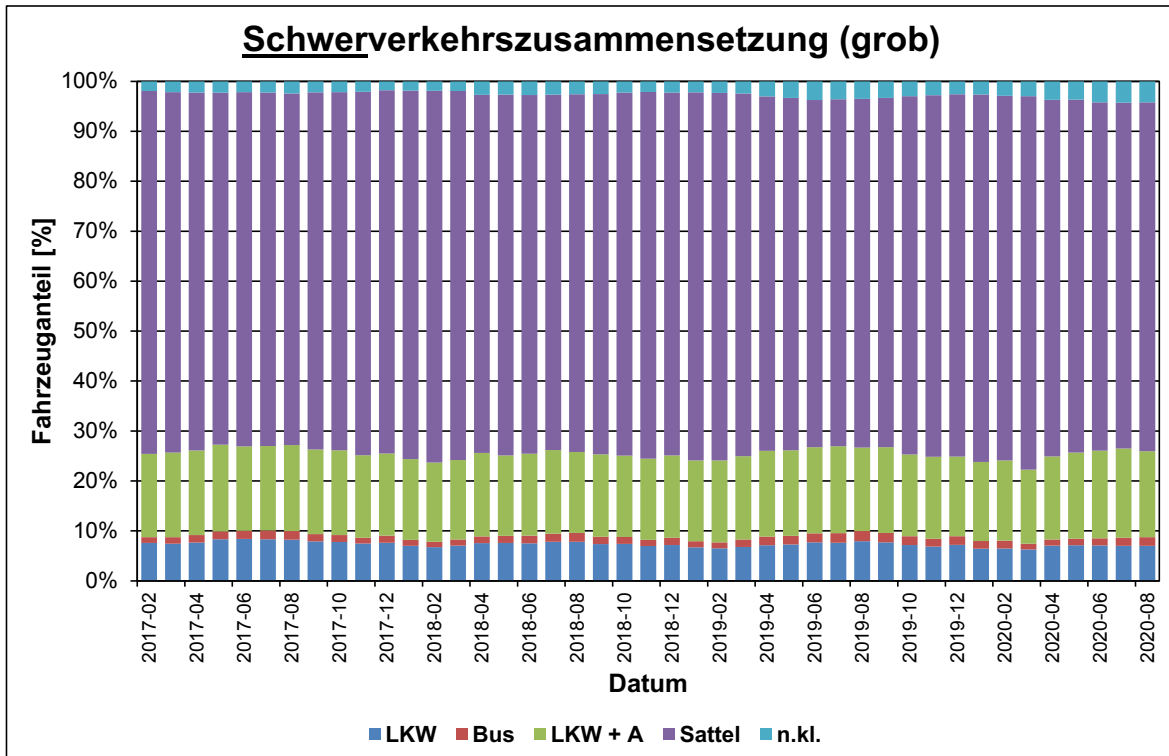


Bild 97: Zusammensetzung des Schwerverkehrs – Monatsweise getrennt

Hinsichtlich der ermittelten Gesamtgewichte der identifizierten Fahrzeuge sind in den Diagrammen in Bild 98 bis Bild 100 Gesamtgewichtsverteilungen von drei ausgewählten Fahrzeugtypen (Typ 41, 97 und 98) dargestellt. Entsprechend den vorhergehenden Erläuterungen ist dabei zu berücksichtigen, dass die eingesetzten Algorithmen zur Ermittlung der Gesamtgewichte im Zuge der Projektbearbeitung verbessert wurden, jedoch zum gegenwärtigen Bearbeitungsstand des Gesamtprojektes noch nicht die früheren Messdaten mit den aktuellen Algorithmen ausgewertet werden konnten. Dies wird im Vergleich zwischen den einzelnen Diagrammen ersichtlich. In Bild 98 und Bild 99 sind die ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen für Oktober 2017 und Oktober 2018 dargestellt. Die Messdaten aus diesen Zeiträumen wurden bisher lediglich mit der initialen Umsetzung der Algorithmen zur Gesamtgewichtsbestimmung ausgewertet. Die aus den Mes-

sungen im Oktober 2019 ermittelten Gesamtgewichtsverteilungen (Bild 100) basieren auf dem aktuellen Entwicklungsstand der Algorithmen. Erkennbar ist dies vordergründig an der Lage des Modalwertes der Gesamtgewichtsverteilung für Fahrzeugtyp 98. Im Oktober 2017 und 2018 lag dieser Modalwert (größte relative Häufigkeit bzw. Dichte im Diagramm) bei 36 t Gesamtgewicht. Im Oktober 2019 lag der Modalwert hingegen bei 38 t Gesamtgewicht. Die Ursache liegt hier in der verbesserten Ermittlung der Gesamtgewichte und nicht in einer Änderung der realen Gesamtgewichte der Fahrzeuge.

Generell zeigen sich in den Diagrammen deutliche Unterschiede zu den eingetragenen Vergleichsdaten. Die Ursache liegt vordergründig in einer nach wie vor nicht vollkommen exakten Ermittlung des Gesamtgewichtes der Fahrzeuge.

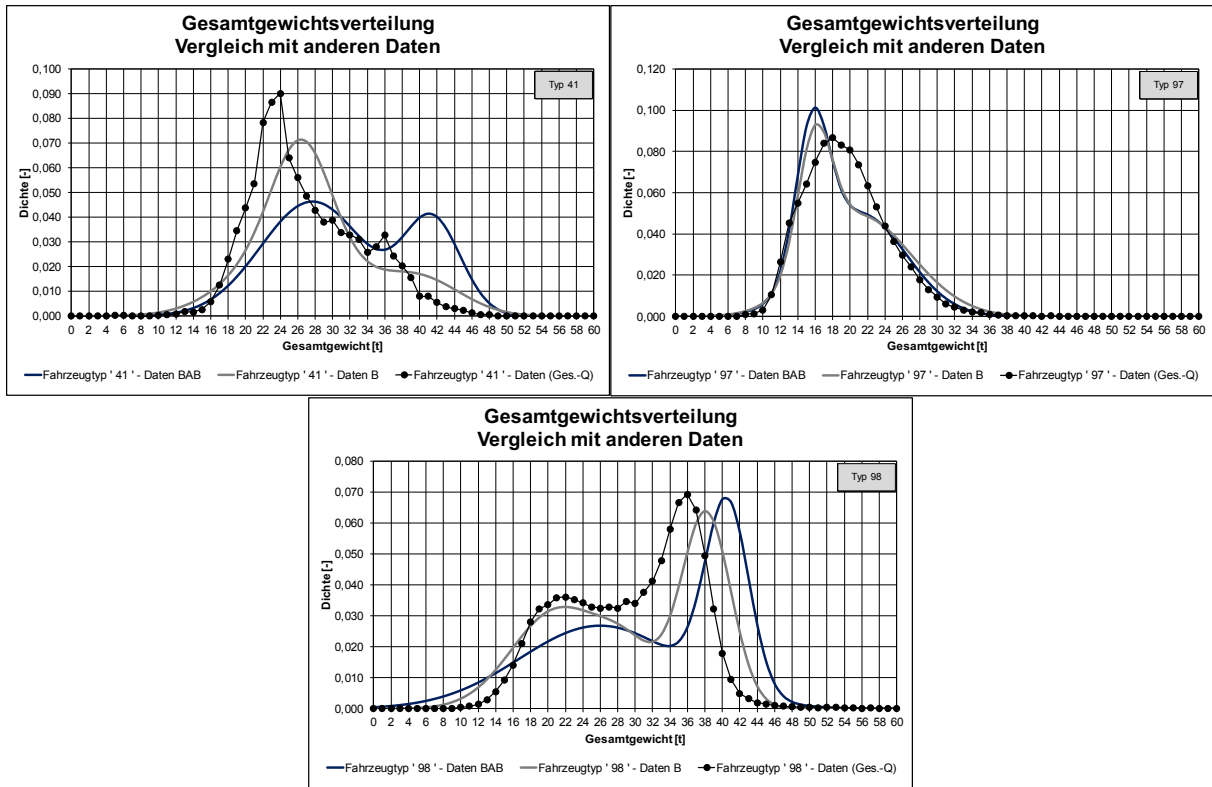


Bild 98: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2017 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

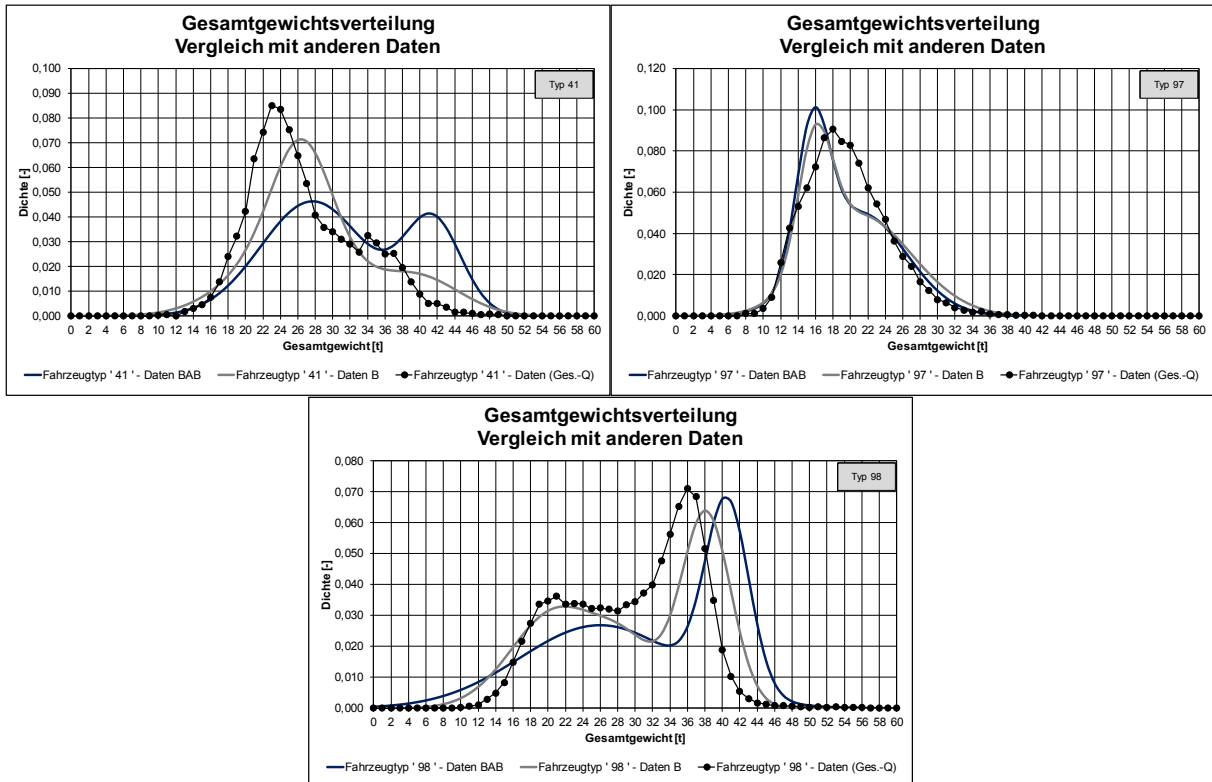


Bild 99: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2018 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

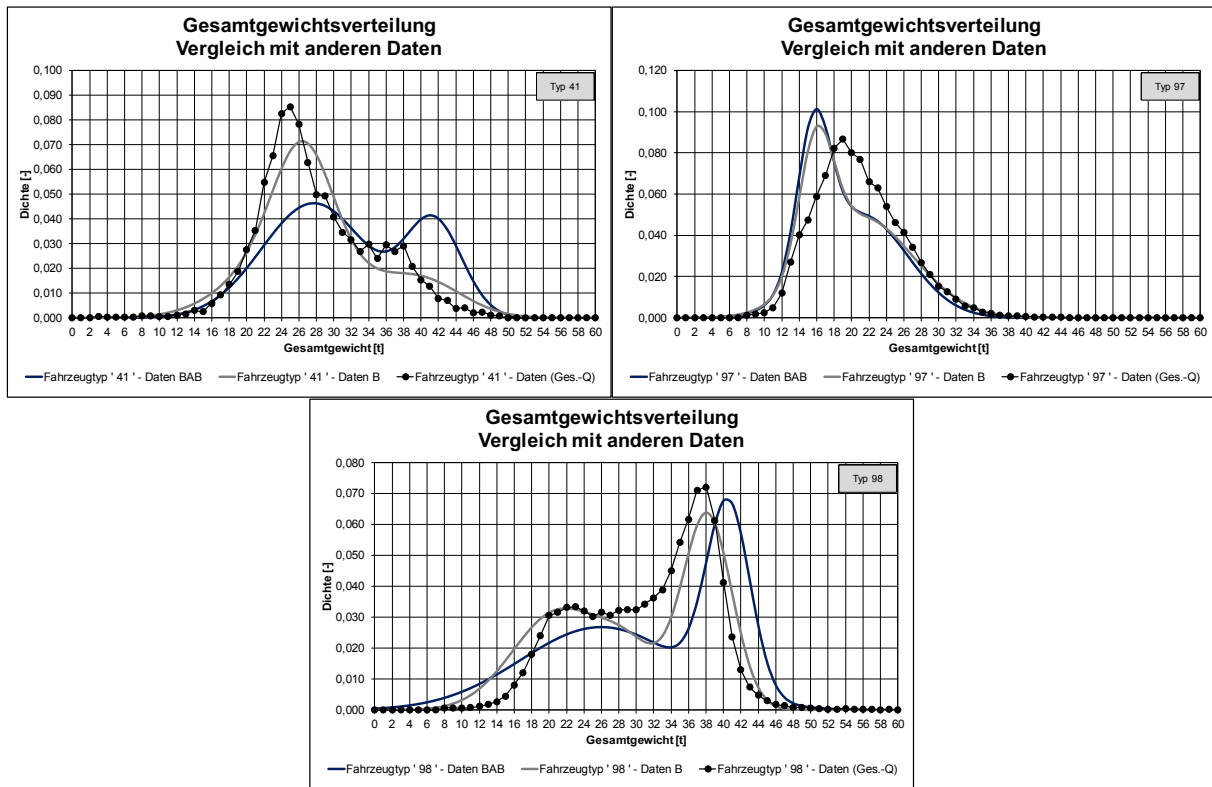


Bild 100: Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2019 – Algorithmen aktuelle Entwicklungsstufe – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen

5.4 Quervergleich der Ergebnisse der Verkehrserkennung

5.4.1 Daten aus April 2018

Nachfolgend werden Ergebnisse eines Vergleiches zwischen den Verkehrserfassungsdaten aus dem System RTMS und aus dem System der Firma Maurer an der Fahrbahnübergangskonstruktion (nachfolgend mit RTMS und MSE abgekürzt) zusammengestellt. Hierzu wurde ein Tag definiert, für den die jeweiligen Daten ausgetauscht wurden. Hierbei handelt es sich um den 10.04.2018 zwischen 00:00:00 Uhr und 22:00:00 Uhr (UTC).

Die Verkehrserfassungsdaten liegen für beide Systeme für die beiden Fahrspuren getrennt vor. Die Verschneidung der Daten, also die Zuordnung der einzelnen Datensätze erkannter Fahrzeuge zueinander, erfolgte anhand der in den jeweiligen Datensätzen enthaltenen Zeitangaben der Passage der ersten Achse eines Fahrzeuges am Fahrbahnübergang. Aufgrund der laufenden Zeitsynchronisation der einzelnen Messrechner und der jeweiligen Integration der Zeitinformationen in die Messdaten konnten diese Verschneidung zuverlässig realisiert werden.

Die Datensätze der einzelnen erkannten Fahrzeuge beinhalteten folgende Informationen:

RTMS:

- Datum/Zeit
- Fahrzeugtyp (TLS-Code)
- Fahrspur
- Geschwindigkeit
- Gesamtgewicht
- Abstand zum vorhergehenden Fahrzeug
- Achszahl
- Achslastverhältnisse/Achsabstände

MSE

- Datum/Zeit
- Fahrspur
- Achszahl
- Geschwindigkeit
- Achslasten (Addition zu Gesamtgewichten im Zuge des Datenvergleiches)

Folgende Anzahl an Datensätzen (erfasste Fahrzeuge) wurden durch die beiden Systeme realisiert:

Spur 1:	RTMS	5.639
	MSE	16.479
Spur 2:	RTMS	165
	MSE	9.983

Die deutlichen Unterschiede zwischen den Zahlenwerten sind darin begründet, dass durch das System RTMS anhand der Messungen am Bauwerk erwartungs- und auslegungsgemäß, keine Erkennung von PKW realisiert werden kann. Die gemessenen Tragwerksreaktionen bei der Überfahrt eines PKW sind zu gering, um diese sinnvoll zu erfassen und auszuwerten.

Vor diesem Hintergrund beziehen sich die folgenden Datenvergleiche auf LKW-Fahrzeuge. Hierzu wurden aus dem Datenbestand MSE alle Datensätze herausgefiltert, für die ein Gesamtgewicht kleiner als 7,5 t ermittelt wurde und keine zeitliche Zuordnung zu einem Datensatz aus dem Datenbestand RTMS möglich war.

Mit dieser Auswahl der zu betrachtenden Datensätze, ergeben sich folgende Zahlenwerte von zugeordneten Datensätzen:

Spur 1:	6.181	Datensätze insgesamt
	5.453	Zugeordnet
	185	Erkennungen RTMS
	543	Erkennung MSE
Spur 2:	397	Datensätze insgesamt
	156	Zugeordnet
	9	Erkennungen RTMS
	232	Erkennung MSE

Die Auflistung zeigt für beide Spuren Unterschiede auf, die für Spur 2 stark ausgeprägt sind. Eine wesentliche Ursache liegt dabei darin, dass im gegenwärtigen Projektbearbeitungsstand die Messdaten aus April 2018 bisher lediglich mit der initialen Umsetzung der Algorithmen zur Verkehrserkennung ausgewertet wurden. Dieser Entwicklungsstand hat gewisse Defizite in der Erkennung von Parallelfahrten auf dem Bauwerk.

Hinsichtlich der zugeordneten Datensätze für Spur 1 sind in Bild 101 die absoluten Häufigkeiten der errechneten Zeitdifferenzen bei der Zuordnung (Verschneidung) der Datensätze aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass für die Mehrzahl der Datensätze eine Zeitdifferenz im Bereich von 0,0 s auftritt (genauer zwischen +0,02 s und -0,02 s, also +/- 20 ms). Absolut liegen 5.274 der 5.453 zugeordneten Datensätze (96,7 %) in diesem Bereich. Dies zeigt auf, dass, sofern eine Erkennung des

Fahrzeuges realisiert werden kann, die vorhandenen Informationen aus dem NTP- synchronisierten Zeitkanal eine zuverlässige Zuordnung der Daten erlaubt. In den zugeordneten Datensätzen mit größeren Zeitdifferenzen, kann zum Beispiel eine fehlerhafte Erkennung der ersten Achse vorliegen (größere Wertebereiche der Zeitdifferenzen) oder die erforderliche Glättung der Messdaten, die an der Fahrbahnübergangskonstruktion (FÜK) erhoben wurden, kann zu leichten Zeitversätzen führen. Im Mittel liegen die Zeitdifferenzen bei +0,0012 s mit einem Maximum von +0,48 s und einem Minimum von -0,21 s.

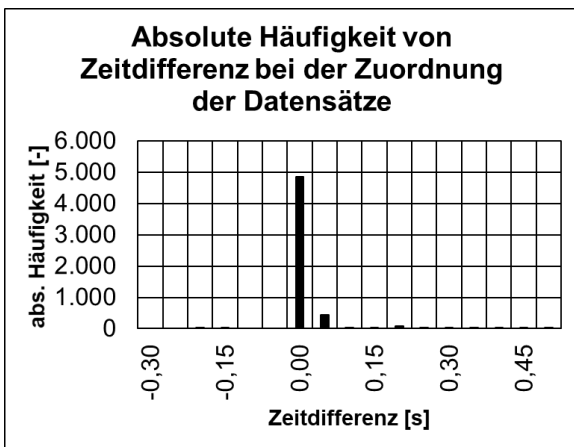


Bild 101: Absolute Häufigkeit von Zeitdifferenzen bei der Zuordnung von Datensätzen

Zur weiteren Auswertung der zugeordneten Datensätze sind in Bild 102 die Häufigkeiten der Differenzen der Anzahl der Achsen der erkannten Fahrzeuge aufgetragen. Negative Zahlenwerte bedeuten, dass für ein erkanntes Fahrzeug im Datensatz RTMS eine um diese Zahl geringere Achszahl ermittelt wurde als im Datensatz MSE.

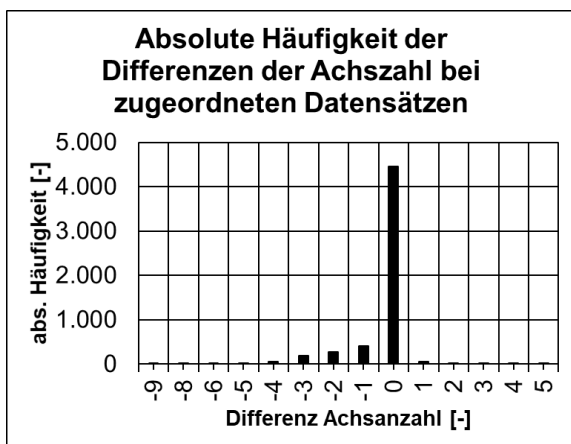


Bild 102: Absolute Häufigkeit der Differenzen der Achszahl bei zugeordneten Datensätzen

Für rund 81% der Fahrzeuge wurde eine identische Achszahl ermittelt. Vergleichsweise häufig kommen weitere Werte zwischen -1 und -3 vor. Hier ist vordergründig davon auszugehen, dass die einzelnen Achsen von Achsgruppen nicht erkannt wurden. Hintergrund sind relativ eng gefasste Grenzwerte im Algorithmus bei der Erkennung der Einzelachsen in den Messdaten der Fahrbahnübergangskonstruktion, die insbesondere bei leichteren Fahrzeugen mit Achsgruppe zu einer ausbleibenden Erkennung einer einzelnen Achse der Gruppe führen kann (z. B. bei un- oder leichtbeladenen Sattelzügen).

Hinsichtlich der ermittelten Gesamtgewichte sind im nachfolgenden Bild 103 errechnete Verhältniswerte zwischen dem zugeordneten Datensätzen RTMS und MSE aufgetragen. Werte kleiner als 1,0 bedeuten, dass im für ein erkanntes Fahrzeug durch die Algorithmen im System RTMS ein geringeres Gesamtgewicht ermittelt wurde als im System MSE. Es wird ersichtlich, dass im Diagramm die größte absolute Häufigkeit bei einem Abszissenwerte von 1,1 auftritt und ansonsten ein Verlauf ähnlich einer Glockenkurve vorhanden ist. Im Mittel wurden also durch die initialen Umsetzungen der Algorithmen zur Gewichtsbestimmung im System RTMS kleinere Gesamtgewichte ermittelt als im Algorithmus MSE.

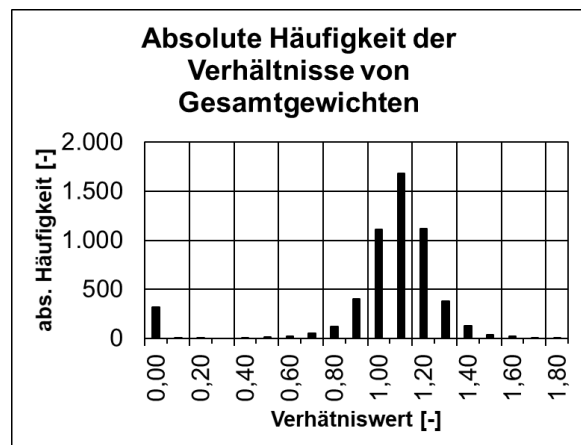


Bild 103: Absolute Häufigkeit der Verhältnisse von ermittelten Gesamtgewichten bei zugeordneten Datensätzen

Die Ausführungen im vorhergehenden Absatz zeigen auf, dass die Ermittlung der Gesamtgewichte mit den modifizierten Algorithmen deutlich verbessert wurde. Die hier dargestellten Daten wurden bisher noch nicht mit diesen modifizierten Algorithmen ausgewertet.

5.4.2 Daten aus Januar 2019

Im Zuge der weiteren Projektbearbeitung wurden zusätzliche Datenbestände der Verkehrserfassung aus RTMS und MSE verglichen. Hierbei wurden Erfassungsdaten aus Januar 2019 herangezogen. Aus dem System RTMS lagen hierbei durchgehende Daten vor, aus dem System MSE Daten vom 07.01.2019 bis 13.01.2019 sowie ab 16.01.2019.

Insgesamt wurden 95.205 verschnittene Datensätze betrachtet (Fahrzeugerkennung durch beide Systeme). Darin wurde für 77.394 Datensätze die gleiche Anzahl von Achsen ermittelt (81 %).

Die verschnittenen Datensätze wurden hinsichtlich der ermittelten Gesamtgewichte weiterführend analysiert. In nachfolgendem Bild 104 sind für verschnittene Datensätzen von Fahrzeugen auf dem rechten Fahrstreifen diese Werte in einem Diagramm gegenübergestellt. Die rote Linie verdeutlicht den „Idealfall“ von gleichen Gesamtgewichtswerten aus beiden Systemen. Die Lage und die visuelle Dichte der Punktwolke in Bild 104 zeigt auf, dass durch das System RTMS in der Mehrzahl der Fälle größere Gesamtgewichte für ein erkanntes Fahrzeug ermittelt werden als durch das System

MSE. Eine Einschränkung der Vergleiche auf erkannte Fahrzeuge mit 5 Achsen führt zu dem in Bild 105 dargestellten Diagramm. Hier werden die Unterschiede zwischen den ermittelten Gesamtgewichten noch deutlicher. Die Ausführungen im vorhergehenden Absatz 5.3 verdeutlichen, dass die durch das System RTMS ermittelten Gesamtgewichte, aufbereitet in Gesamtgewichtsverteilung für ausgewählte Fahrzeugtypen, gegenüber vorliegenden Vergleichsdaten aus anderen Verkehrserfassungen generell als „niedriger“ einzuschätzen sind. Vor dem Hintergrund der Art der Ermittlung der Gesamtgewichte (vgl. Erläuterungen in Absatz 5.1.4.2 und 5.1.4.3) kann davon ausgegangen werden, dass die realen Fahrzeuggesamtgewichte durch die Auswertung der Messdaten durch das System RTMS etwas unterschätzt werden. Die durch das System MSE ermittelten Gesamtgewichte liegen nochmals im Mittel unterhalb der Werte aus dem System RTMS. Eine weitere Visualisierung der Unterschiede der ermittelten Gesamtgewichte aus den beiden Systemen ist in Bild 106 in Form von Gesamtgewichtsverteilungen für Fahrzeuge mit 5 Achsen dargestellt.

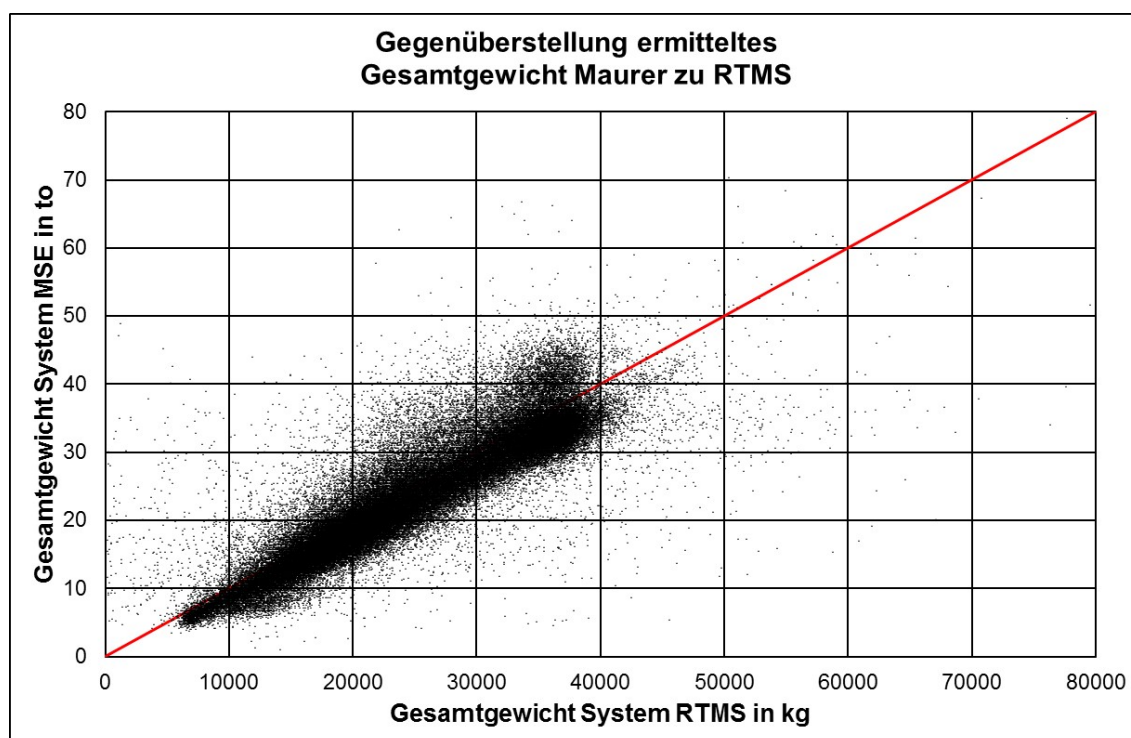


Bild 104: Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtgewichte RTMS vs. Maurer – Nur verschnittene Datensätze rechter FS

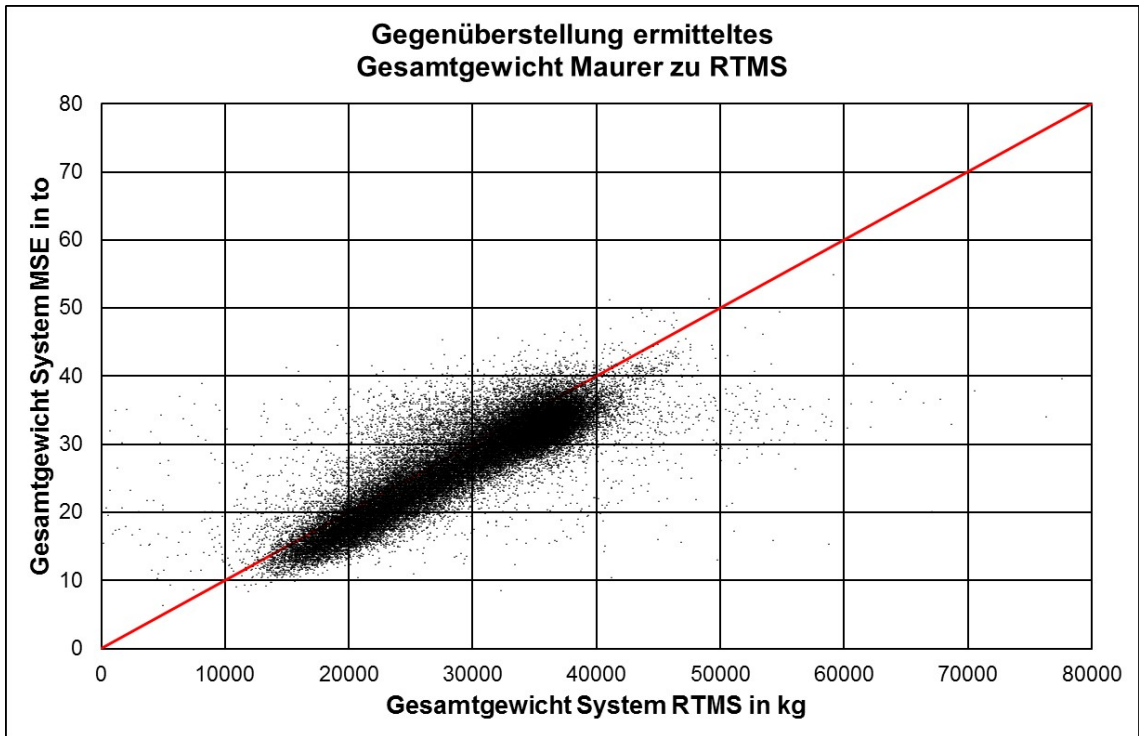


Bild 105: Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtgewichte RTMS vs. Maurer – Nur verschnittene Datensätze rechter FS – Fahrzeuge mit 5 Achsen (gleiche Achszahl an beiden Systemen erkannt)

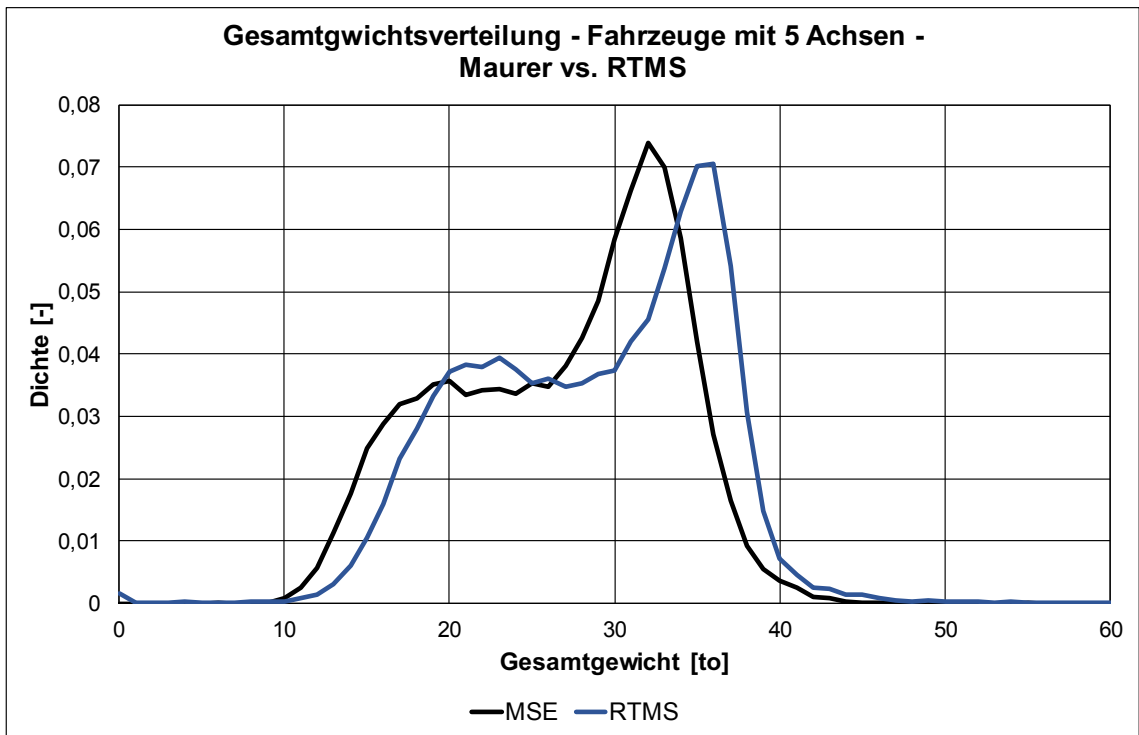


Bild 106: Vergleich Gesamtgewichtsverteilung – Fahrzeuge mit 5 erkannten Achsen

6 Ermittlung von Bauwerkskennwerten (Widerstand) aus Messdaten RTMS

6.1 Vorbemerkungen

Nachfolgend wird die Ableitung von Kennwerten des Widerstandes des Bauwerkes aus der laufenden Auswertung der Messdaten beschrieben. Hierzu werden aus den Messdaten der installierten Beschleunigungssensoren (MS 23 bis MS 26 – vgl. Bild 4 auf Seite 23) automatisierte vor Ort durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) Amplitudenspektren berechnet. Die Peaks dieser Spektren entsprechend verschiedenen Eigenfrequenzen. Diese Peaks werden ebenfalls automatisiert vor Ort aus den Amplitudenspektren ermittelt.

Für die Beschleunigungsmessungen an einem externen Spannglied (MS23, MS 24 und MS 26) ergeben sich damit Eigenfrequenzen des Spanngliedes. Die Beschleunigungsmessung am Umlenksattel des externen Spanngliedes liefert Eigenfrequenzen der Brücke.

Die Eigenfrequenzen des Spanngliedes korrespondieren zur Vorspannkraft im Spannglied und die Eigenfrequenzen der Brücke korrespondieren zur kumulierten Steifigkeit des Bauwerkes.

Im nachfolgenden Absatz wird zunächst auf die grundlegende Ermittlung der Eigenfrequenzen eingegangen. Anschließend wird die Weiterverarbeitung der ermittelten Eigenfrequenzen hin zu Kennwerten des Widerstandes des Bauwerkes erläutert.

6.2 Ermittlung der Eigenfrequenzen

Die Darstellung der Ermittlung der Eigenfrequenzen erfolgt anhand von Messdaten der Kalibrierfahrten am 30.09.2016 und anhand von ausgewählten Messdaten aus der laufenden Datenerfassung.

Aus den Messdaten der Kalibrierfahrten wurde zur Ermittlung der Eigenfrequenzen ein Zeitbereich t_1 des Schwingungsverlaufs (vgl. Bild 107 a), der nicht durch eine externe Anregung mit überlagernder Frequenz gestört ist, und damit ein freies Schwingen des Spanngliedes vorausgesetzt werden kann, ausgewertet.

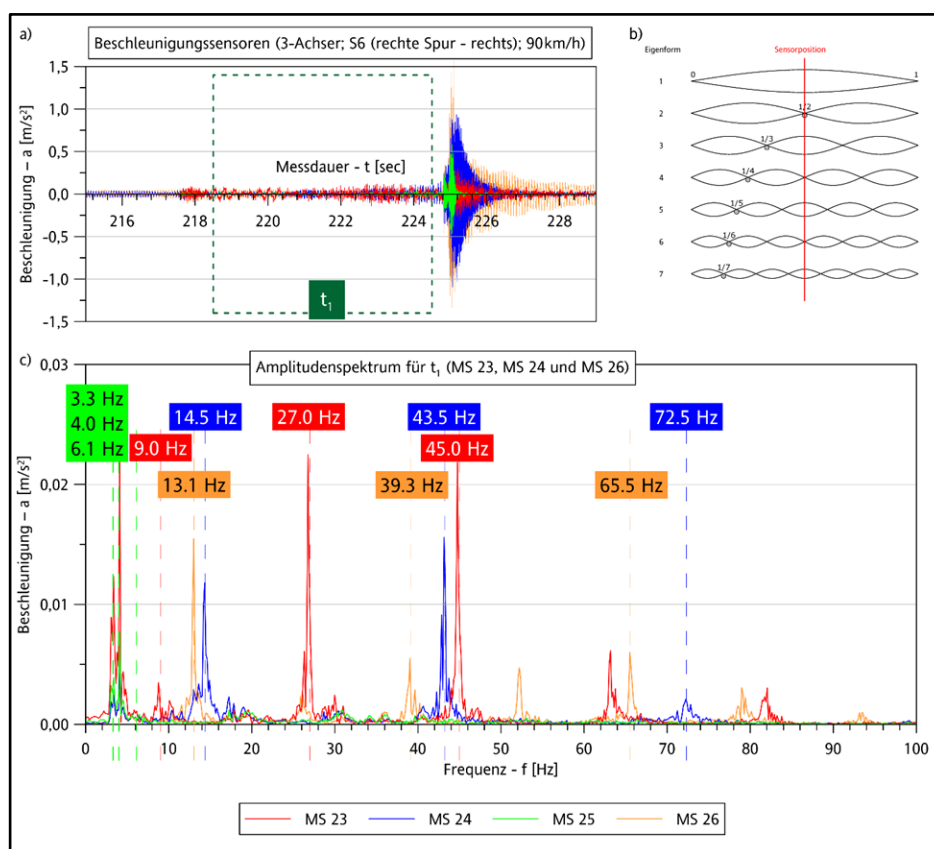


Bild 107: (a) Messverlauf der Beschleunigungssensoren (MS 23-26) bei Kalibrierfahrt ID 35 (Fz. 1, linke Spur – rechts orientiert, 90 km/h). (b) Die ersten sieben Eigenformen der ext. Spannglieder entsprechend einer harmonischen Schwingung. (c) Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für den Zeitbereich t_1 .

Bild 107 c zeigt die Amplitudenspektren für den Zeitbereich t_1 , der vor dem Zeitpunkt liegt, zu dem ein Fahrzeug die FÜK erreicht hat. Ohne die störenden, von außen induzierten Schwingungen, welche die Eigenschwingungen der Spannglieder überlagern, treten alle messbaren Eigenfrequenzen deutlicher hervor. Da das Schwingverhalten der Spannglieder näherungsweise dem einer harmonischen Schwingung gleichkommt (vgl. Bild 107b), hat die Installation der Beschleunigungssensoren in Spanngliedmitte zur Folge, dass nur jeweils die 1., 3., 5., ... Eigenfrequenzen detektiert werden können. Bei den geradzahigen Eigenformen befindet sich der Nulldurchgang einer harmonischen Schwingung an der Position des Sensors. Die unterschiedlichen Eigenfrequenzen der Spanngliedbereiche sind auf die verschiedenen Spanngliedlängen in den instrumentierten Bereichen zurückzuführen. Bild 107 c zeigt dementsprechend jeweils die 1., 3. und 5. Eigenfrequenz der Spannglieder.

Für den Sensor MS 25, der direkt auf dem Umlenkstapel installiert ist, gilt, dass dieser das Schwingverhalten des Brückenüberbaus abbildet. Dessen 1., 2. und 5. Eigenform führen an dieser Sensorposition

zu Bewegungen, die mit dem Sensor messbar sind. Die dazugehörigen Eigenfrequenzen sind in Bild 107 c im Spektrum sichtbar, zusätzlich sind die numerischen Werte dargestellt.

Für den Fall des unregelmäßig fließenden Verkehrs erfolgt die Auswertung der Messungen der Sensoren auf den externen Spanngliedern ebenfalls mittels FFT zu Amplitudenspektren (vgl. Bild 108; MS 23, MS 24, MS 26). Der Unterschied zur Auswertung der bei den Kalibrierfahrten erhaltenen Messdaten besteht darin, dass nicht versucht wurde, Zeitabschnitte aus den Messdaten zu extrahieren, die ein ungestörtes Schwingen der des Brückenüberbaus bzw. der Spannglieder beinhalten. Sinnvoll für die Situation des unregelmäßig fließenden Verkehrs ist es, zu prüfen, ob es für die kontinuierliche Eigenfrequenzüberwachung überhaupt notwendig ist, gezielt Zeitbereiche der Messung zu berücksichtigen. Für eine ausreichend genaue Eigenfrequenzbestimmung muss lediglich sichergestellt sein, dass die Zeitbereiche, in denen die ungestörten Schwingungen enthalten sind, im ausreichenden Verhältnis zur gesamten Zeitspanne stehen, für die die Auswertung durchgeführt wird.

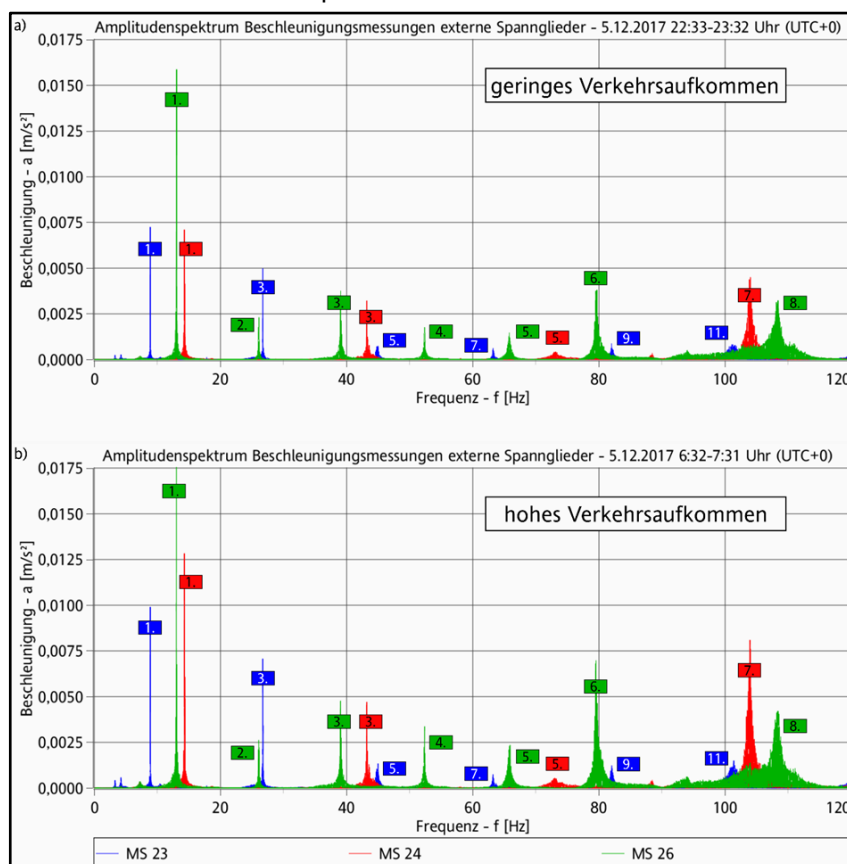


Bild 108: Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für die Zeitbereiche (a) nachts mit relativ geringem Verkehrsaufkommen und (b) tagsüber mit relativ hohem Verkehrsaufkommen. Gekennzeichnet sind die durch Peaks sichtbaren Eigenfrequenzen der den Sensoren zugehörigen Spanngliedabschnitten.

In Bild 108 sind für jeweils 1 h Messdauer die Amplitudenspektren der Beschleunigungsmessungen an den Spanngliedern dargestellt. Die gewählten Zeitbereiche unterscheiden sich hinsichtlich der Verkehrssituation auf der Brücke. Ein Zeitbereich liegt nachts in der Zeit von 23:33-00:32 Uhr (UTC +1) und ist gekennzeichnet durch relativ geringes Verkehrsaufkommen. Der Vergleichszeitraum ist am selben Tag, jedoch morgens mit stark erhöhtem Verkehrsaufkommen von 7:32-8:31 Uhr (UTC +1). Es ist damit davon auszugehen, dass sich die gewählten Auswerteziträume deutlich unterscheiden hinsichtlich der Zeitanteile, in denen keine ungestörte Schwingung der Spannglieder möglich war. Die Gegenüberstellung der in beiden Zeiträumen ermittelten Eigenfrequenzen gibt somit Auskunft darüber, ob die Strategie praktikabel ist, ungeachtet der Störeinwirkung die Messdaten ohne Selektion in die Frequenzberechnung einzubeziehen.

Bild 108 stellt die Amplitudenspektren mit Kennzeichnung der gefundenen Eigenfrequenzen für diese beiden Zeitbereiche gegenüber. Deutlich zu erkennen ist, dass für beide Verkehrssituationen die 1. und 3. Eigenfrequenz für alle drei Messstellen zuverlässig ermittelt werden können. Die Peaks stellen sich bei den 1. Eigenfrequenzen fast als einzelne Spektrallinie dar, was auf einen hohen Anteil ungestörter Schwingungen hindeutet.

Höhere Eigenfrequenzen sind deutlich sichtbar, jedoch mit zunehmender Nähe zur Fahrbahnübergangskonstruktion wird der störende Einfluss infolge des überfahrenden Verkehrs dominanter und erschwert die präzise Quantifizierung der Eigenfrequenzen. Unter Nähe wird hier sowohl die Entfernung der Messstelle zur Fahrbahnübergangskonstruktion, als auch der Abstand der Eigenfrequenzen der Spanngliedbereiche zum für diese Auswertung störenden Frequenzband verstanden, welches sich aus den Eigenschwingungen der Fahrbahnübergangskonstruktion selbst ergibt und etwa im Bereich um 100 Hz liegt.

In Tabelle 8 sind die numerischen Werte zusammengefasst. Die Abweichungen in der Eigenfrequenzbestimmung für die zwei ausgewerteten Zeitbereiche sind für die 1. und 3. Eigenform kleiner als 0.15 % bzw. die ermittelten 1. Eigenfrequenzen differieren nur maximal um 0,02 Hz.

Für die Anwendung dieser Auswertungen der Beschleunigungsmessungen zur Ermittlung von Eigenfrequenzen und daraus abzuteilenden Kennwerten des Bauwerkswiderstandes sind diese Abweichungen hinreichend gering. Es ist damit nicht erforderlich, explizite Bereiche aus den Beschleunigungsmessungen mit geringem bzw. keinem Verkehr zu betrachten. Dies vereinfacht die automatisierte Messdatenauswertung erheblich.

Messstelle	MS 23		MS 24		MS 26	
	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$	t_{nachts}	$t_{\text{tagsüber}}$
1. Eigenfrequenz [Hz]	8,88	8,87	14,26	14,28	13,02	13,01
2. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	26,08	26,07
3. Eigenfrequenz [Hz]	26,72	26,70	43,19	43,20	39,06	39,03
4. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	52,34	52,04
5. Eigenfrequenz [Hz]	44,98	44,96	73,11	72,99	65,69	65,88
6. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	79,68	79,54
7. Eigenfrequenz [Hz]	63,22	63,19	104,00	103,93	–	–
8. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	104,36	108,39
9. Eigenfrequenz [Hz]	82,00	82,02	–	–	–	–
10. Eigenfrequenz [Hz]	–	–	–	–	–	–
11. Eigenfrequenz [Hz]	101,22	101,38	–	–	–	–

Tabelle 8: Messtechnisch ermittelte Eigenfrequenzen der erfassten Spanngliedabschnitte auf Basis der in Bild 108 dargestellten Amplitudenspektren.

6.3 Aufbereitung der Eigenfrequenzen

6.3.1 Entwicklung der Eigenfrequenzen über die Zeit

Anhand der durchgeführten Auswertungen der Beschleunigungsmessungen hin zur Ermittlung von Eigenfrequenzen werden im Folgenden die Verläufe dieser ermittelten Eigenfrequenzen über die bisherige Messdauer (Februar 2017 bis September 2020 im vorliegenden Schlussbericht) grafisch dargestellt. Es wird sich dabei auf die jeweils ersten ermittelten Eigenfrequenzen an den Messstellen beschränkt (MS23, MS24 und MS26 – erste Eigenfrequenz, MS25 – dritte Eigenfrequenz).

In den Diagrammen in Bild 109 bis Bild 111 sind die Verläufe der ermittelten ersten Eigenfrequenzen an den Messstellen MS23, MS24 und MS26 dargestellt. Diese Messstellen befinden sich an einem externen Spannglied und liefern damit die Eigenfrequenz des Spanngliedes. Es wird ersichtlich, dass die Verläufe einen ausgeprägten Jahresgang aufweisen. Zusätzlich wird ersichtlich, dass an allen

drei Messstellen die Eigenfrequenzen über den gesamten dargestellten Zeitraum tendenziell geringer werden.

Im Gegensatz dazu zeigt sich in dem in Bild 112 dargestellten Verlauf der dritten Eigenfrequenz an Messstelle MS25 (Umlenksattel des externen Spanngliedes) analog zu den Eigenfrequenzen an den Messstellen am externen Spannglied selbst ein ausgeprägter Jahresgang. Die zusätzliche Veränderung der Eigenfrequenz über den gesamten Betrachtungszeitraum ist hier jedoch kaum vorhanden.

Hinsichtlich der Eigenfrequenzen am externen Spannglied wird im nachfolgenden Absatz zunächst der Zusammenhang zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft erläutert. Anschließend werden Analysen der aufgezeigten Verlaufscharakteristik (Jahresgang sowie Langzeitverhalten) dargestellt. Beide Schwerpunkte bilden die Grundlage für eine Überwachung der Eigenfrequenzen und damit der zugehörigen Parameter des Bauwerkswiderstandes.

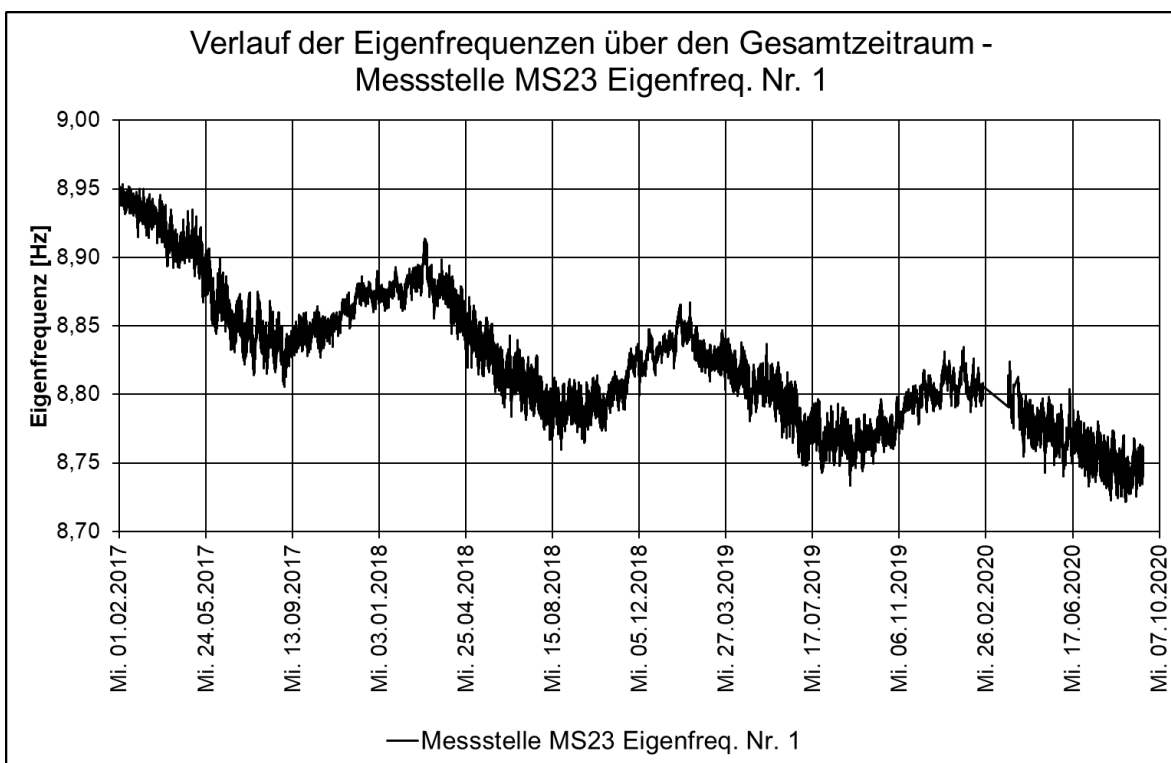


Bild 109: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS23 – Februar 2017 bis September 2020

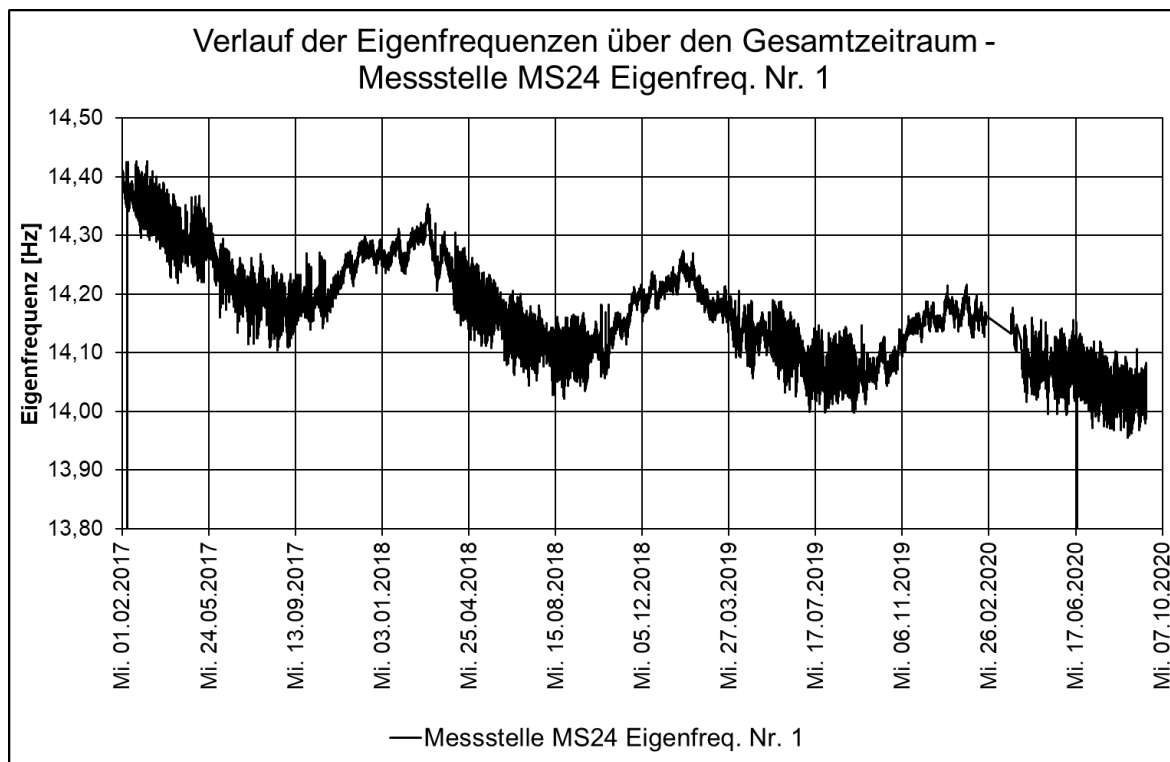


Bild 110: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS24 – Februar 2017 bis September 2020

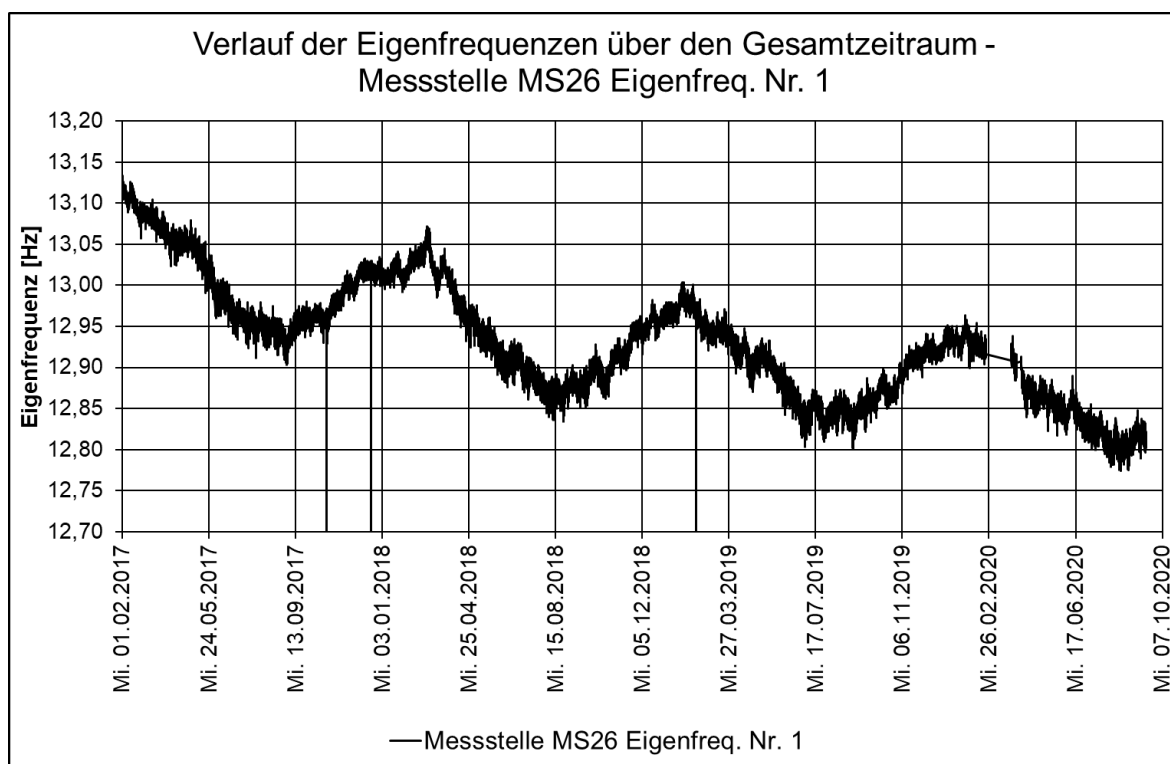


Bild 111: Ermittelte 1. Eigenfrequenzen - MS26 – Februar 2017 bis September 2020

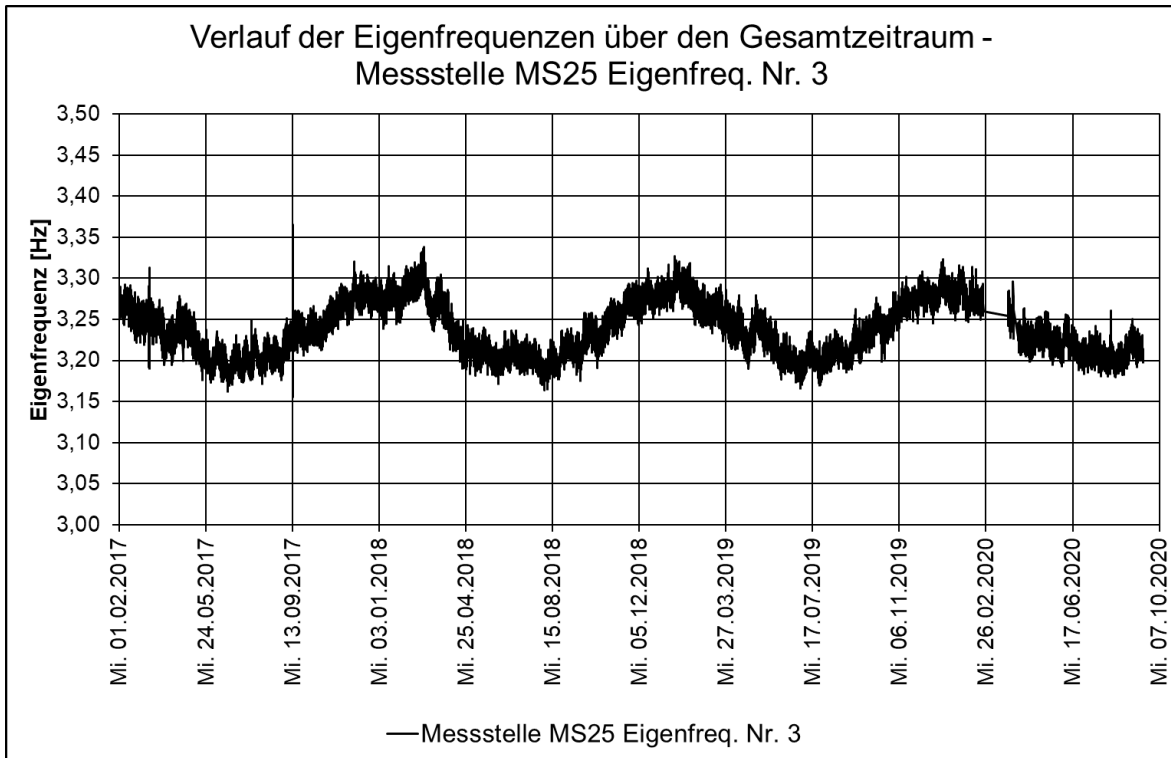


Bild 112: Ermittelte 3. Eigenfrequenzen – MS25 – Februar 2017 bis September 2020

6.3.2 Beziehung zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft

Für die ermittelten Eigenfrequenzen der externen Spannglieder existiert ein Zusammenhang zwischen den Eigenfrequenzen und der Vorspannkraft im Spannglied. Aufgrund der geometrischen Eigenschaften der Spanngliedabschnitte zwischen den Umlenkstellen kann die mechanische Grundlage einer Saitenschwingung für die Beziehung zwischen Eigenfrequenz und Vorspannkraft angenommen werden. Die Richtung der Schwingungen ist orthogonal zur Spannrichtung. In diese Richtung besitzt das Spannglied eine vernachlässigbar geringe Steifigkeit. Der Zusammenhang zwischen Vorspannkraft und 1. Eigenfrequenz f_1 der sogenannten Grundschwingung ergibt sich nach [25] wie folgt:

$$f_1 = \frac{1}{d_{\text{äq}} L} \times \sqrt{\frac{P_{m0}}{\pi \times \rho}} \quad (6.1)$$

Hierin bezeichnen $d_{\text{äq}}$ den äquivalenten Durchmesser des Spanngliedes. Die Länge des jeweiligen Spanngliedabschnittes ist die Länge zwischen den Umlenkpunkten und mit L bezeichnet.

Die Vorspannkraft des Spanngliedes fließt mit P_{m0} und die Materialdichte mit ρ in die Berechnung ein. Höhere Eigenfrequenzen ergeben sich als ganzzahlige Vielfache der nach Gl. (6.1) ermittelten 1. Eigenfrequenz f_1 .

Im vorhergehenden Absatz 6.2 wurde die Ermittlung der Eigenfrequenzen dargestellt und aufgezeigt, dass die direkte Auswertung der auflaufenden Messdaten aus dem fließenden Verkehr verwendbare Ergebnisse liefert.

Für eine praktikable Überwachung der Eigenfrequenzen bzw. der daraus abgeleiteten Vorspannkraft ist es zunächst erforderlich, die Größenordnung einer Änderung der Eigenfrequenzen bei einer Veränderung der Vorspannkraft infolge einer möglichen Schädigung des Spanngliedes abzuschätzen. Gl. (6.1) bildet hierzu die Basis. Hierzu wird die rechnerische Änderung der Vorspannkraft P_{m0} bei einem Ausfall von einzelnen Litzen des Spanngliedes betrachtet. Die Vorspannkraft ergibt sich nach nachfolgender Gleichung (6.2).

$$\frac{n_{\text{wirksam}}}{n_{\text{gesamt}}} \cdot P_{m0} \quad (6.2)$$

Unter der weiteren Annahme, dass im Fall eines Ausfalles einzelner Litzen des Spanngliedes Änderungen der übrigen Parameter in Gleichung (6.1)

vernachlässigbar klein sind, so ergeben sich die in nachfolgender Tabelle 9 aufgeführten exemplarischen Werte der ersten und dritten Eigenfrequenz an den Messstellen am externen Spannglied. Betrachtet wurden ein angenommener Ausfall von 1 von 60 Litzen sowie ein Ausfall von 20 von 60 Litzen. Die Vorspannkraft P_{m0} verringert sich entsprechend und es ergeben sich die aufgeführten Eigenfrequenzen. Für die Analysen hier ist dabei vordergründig die absolute Änderung der Eigenfrequenz von Bedeutung. So ergibt sich zum Beispiel für die erste Eigenfrequenz an Messstelle MS23 bei einem Ausfall von 1 von 60 Litzen eine

absolute Änderung der Eigenfrequenz von -0,074 Hz.

Der Vergleich dieser Größenordnung mit dem Verlauf der ersten Eigenfrequenz der Messstelle MS23 in Bild 109 zeigt auf, dass bereits aus dem ersichtlichen Jahresgang größere Änderungen der Eigenfrequenz, und damit der Vorspannung im Spannglied, einher gehen als aus einem rechnerischen Ausfall einer Litze. Für die Messstellen MS24 und MS26 sind diese Zusammenhänge für die erste Eigenfrequenz ähnlich.

	$d_{aq} \cdot L$	Eigenfrequenz	unbeschädigt	Ausfall von 1 Litze		Ausfall von 20 Litzen	
				Abs.	Delta	Abs.	Delta
P_{m0}			3240 kN	3186 kN	-54	2160 kN	-1080
Sensor MS 23	1,29 m ²	f_1	8,88 Hz	8,80 Hz	-0,074	7,25 Hz	-1,629
		f_3	26,62 Hz	26,41 Hz	-0,223	21,75 Hz	-4,887
Sensor MS 24	0,80 m ²	f_1	14,26 Hz	14,14 Hz	-0,119	11,64 Hz	-2,616
		f_3	42,77 Hz	42,42 Hz	-0,358	34,92 Hz	-7,849
Sensor MS 26	0,88 m ²	f_1	13,00 Hz	12,89 Hz	-0,109	10,61 Hz	-2,385
		f_3	38,99 Hz	38,66 Hz	-0,326	31,83 Hz	-7,154

Tabelle 9: Berechnete 1. und 3. Eigenfrequenz der instrumentierten Spanngliedabschnitte und die zugehörigen Systemparameter für den Ausfall von keiner, einer und 20 Litzen des Spanngliedes.

6.3.3 Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzeffekten

6.3.3.1 Grundannahmen

Für eine praktikable Überwachung der Eigenfrequenzen ist es erforderlich, die in Absatz 6.3.1 aufgezeigten lang-, mittel- und kurzfristigen Effekte im Rahmen der Messdatenauswertung und Aufbereitung zu kompensieren. Die umgesetzte und nachfolgend dargestellte Kompensationsmethodik beruht dabei auf der Annahme, dass bisher am Bauwerk keine Schädigungen eingetreten sind und die ersichtlichen Effekte aus der veränderlichen Temperaturbeanspruchung und aus regulären Effekten wie Kriechen und Schwinden resultieren. Der bisherige Verlauf dient damit als Basis das reguläre Verhalten des Tragwerkes abzubilden und zukünftige Änderungen dieses Verhaltens identifizieren zu können. Die eingesetzte Methodik wird nachfolgend anhand der ermittelten Werte der ersten Eigenfrequenz an Messstelle MS23 erläutert. Dabei wird zunächst in Absatz 6.3.3.2 auf die initiale Aufbereitung der von Daten für den Zeitraum von Februar 2020

bis Oktober 2019 eingegangen. Anhand dieser Aufbereitung erfolgte die technische Umsetzung der Kompensationsrechnungen in der Vor-Ort-Implementierung. Des Weiteren wird darauf eingegangen, wie sich Änderungen des Langzeitverhaltens auf die ermittelten Ergebnisse auswirken würden.

In Absatz 6.3.3.3 wird dann anhand der seit Oktober 2019 neu aufgelaufenen Daten eine mögliche Änderung des Langzeitverhaltens überprüft.

6.3.3.2 Initiale Datenaufbereitung

In Bild 113 ist der aus den Messdaten ermittelte Verlauf dargestellt und zusätzlich eine lineare Trendlinien eingetragen. Die Neigung dieser Trendlinie dient als Kompensationsgerade für die Langzeiteffekte (Kriechen und Schwinden). Der resultierende, kompensierte Verlauf ist im Diagramm in blau eingetragen. Die Ermittlung des Verlaufes erfolgt nach nachfolgender Gleichung (6.3). Vom aus der Messung ermittelten Wert der Eigenfrequenz EF_{mess} wird ein Wert abgezogen, der sich aus dem Anstieg der Trendlinie m_{LZ} und der Anzahl der Tage seit dem 01.02.2017 ($\Delta t_{01.02.2017}$) ergibt.

$$EF_{rech,oLZ,mT} = EF_{mess} - \Delta t_{01.02.2017} \cdot m_{LZ} \quad (6.3)$$

$$EF_{rech,oLZ,oT} = \overline{EF_{rech,oLZ,mT}} \cdot Komp_{Temp} \quad (6.4)$$

$$Komp_{Temp} = \{1 + b \cdot (T_{akt} - \bar{T})^2 + c \cdot (T_{akt} - \bar{T}) + e \cdot (T_{30d} - \bar{T})^2 + f \cdot (T_{30d} - \bar{T}) + g\} \quad (6.5)$$

$$EF_{rech,mLZ,mT} = \overline{EF_{rech,oLZ,mT}} \cdot Komp_{Temp} + \Delta t_{01.02.2017} \cdot m_{LZ} \quad (6.6)$$

Das Ergebnis ist dann in der entwickelten Methodik ein um die genannten Langzeiteffekte bereinigter rechnerischer Wert der Eigenfrequenz $EF_{rech,oLZ,mT}$, der aber noch die Mittel- und Kurzeiteffekte enthält. Für die weitere Kompensation der mittel- und kurzfristigen Effekte, die offenbar im Wesentlichen aus den Temperaturbeanspruchungen resultieren, werden die Gleichungen (6.4) und (6.5) verwendet. Ausgehend vom mittleren rechnerischen Wert der Eigenfrequenz $EF_{rech,oLZ,mT}$ wird der rechnerische Wert der Eigenfrequenz ohne Langzeit- und Temperatureffekte $EF_{rech,oLZ,oT}$ durch Multiplikation mit dem eingeführten Kompensationsfaktor $Komp_{Temp}$ ermittelt.

Grundlage für die Berechnung dieses Faktors ist der für einen Auswertungszeitpunkt aktuelle mittlere Stundenwert der Temperatur T_{akt} und der Mittelwert dieser über die letzten 30Tage (T_{30d}). Der mittlere Stundenwert der Temperatur T_{akt} wird aus dem Mittelwert der Stundenmittelwerte der Temperatur an den Messstellen M6T1u und M6t2o gebildet.

Mit diesen Werten sowie des Mittelwertes der Temperatur über den Gesamtzeitraum (\bar{T}) sind für Gleichung (6.5) noch die Parameter b , c , e , f und g zu definieren. Diese Parameterbestimmung wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate und dem Gauß-Algorithmus realisiert. In Bild 114 ist der Verlauf von $EF_{rech,oLZ,mT}$ sowie von $EF_{rech,oLZ,oT}$ dargestellt.

Im weiteren Verlauf wird in der eingesetzten Methodik der rechnerische Verlauf der Eigenfrequenz mit den zuvor kompensierten Effekten $EF_{rech,mLZ,mT}$ nach Gleichung (6.6) ermittelt. Dieser Verlauf ist für das hier aufgeführte Beispiel in Bild 115 (orange Linie) dargestellt. Für den nicht realistischen Fall, dass durch die oben aufgeführten Formeln der Verlauf der Eigenfrequenz infolge der betrachteten Effekte vollständig abgebildet werden würde und keine weiteren Effekte vorhanden sein würde, wären die beiden Verläufe in Bild 115 deckungsgleich. Dies ist erwartungsgemäß nicht der Fall. In Bild 116 ist daher für den dargestellten Zeitraum der absolute Unterschied zwischen dem rechnerischen Verlauf $EF_{rech,mLZ,mT}$ und dem aus den Auswertungen der Messdaten ermittelten Verlauf EF_{mess} dargestellt. Zusätzlich ist dort eine lineare Trendlinie sowie das Wertenniveau einer Änderung der Eigenfrequenz beim Ausfall einer Litze (-0,074 Hz) eingetragen. Der Anstieg der Trendlinien ist quasi Null, die verbleibenden Unterschiede zwischen gemessenem Verlauf und berechnetem Verlauf streuen um diese Trendlinie. Der in Bild 116 dargestellte Verlauf verdeutlicht, dass mit den eingeführten Kompensationen der Lang-, Mittel- und Kurzeiteffekte die verbleibende Änderung der Eigenfrequenz deutlich kleiner ist als eine durch den Ausfall einer Litze verursachte Änderung.

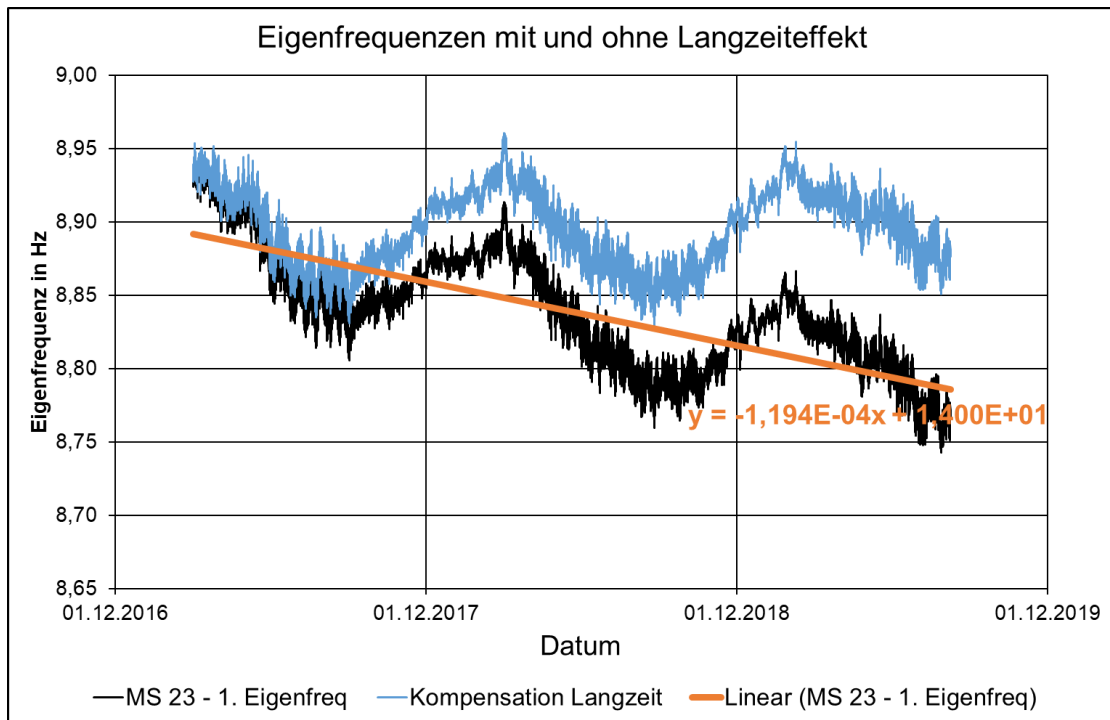


Bild 113: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend)

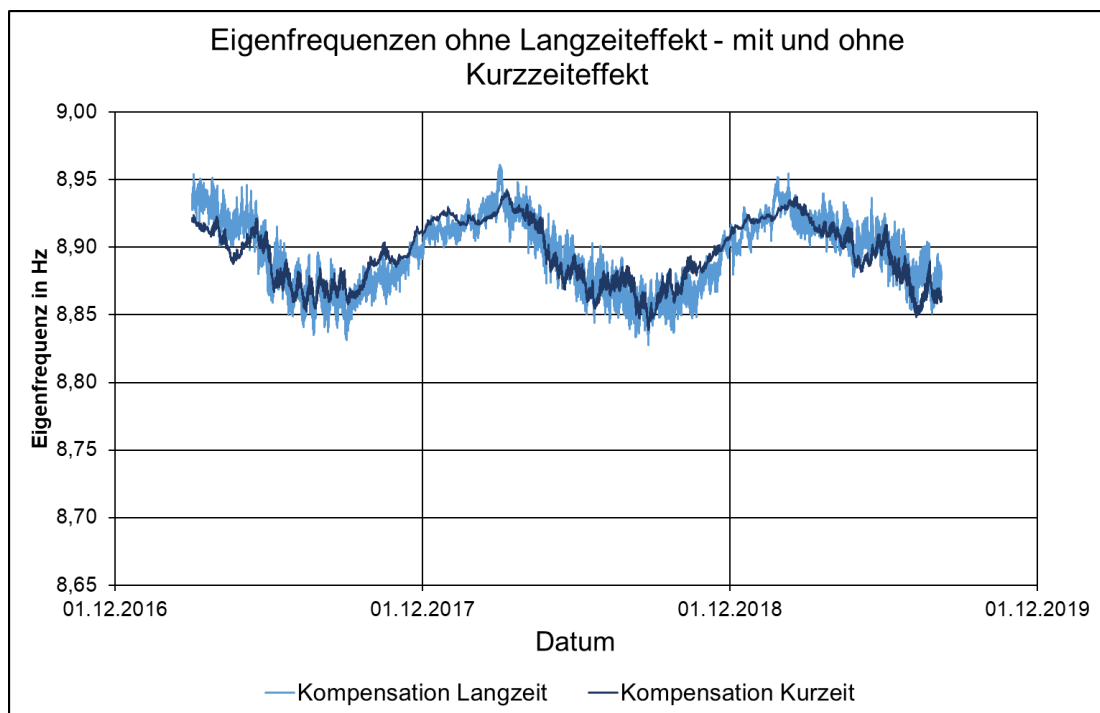


Bild 114: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell)

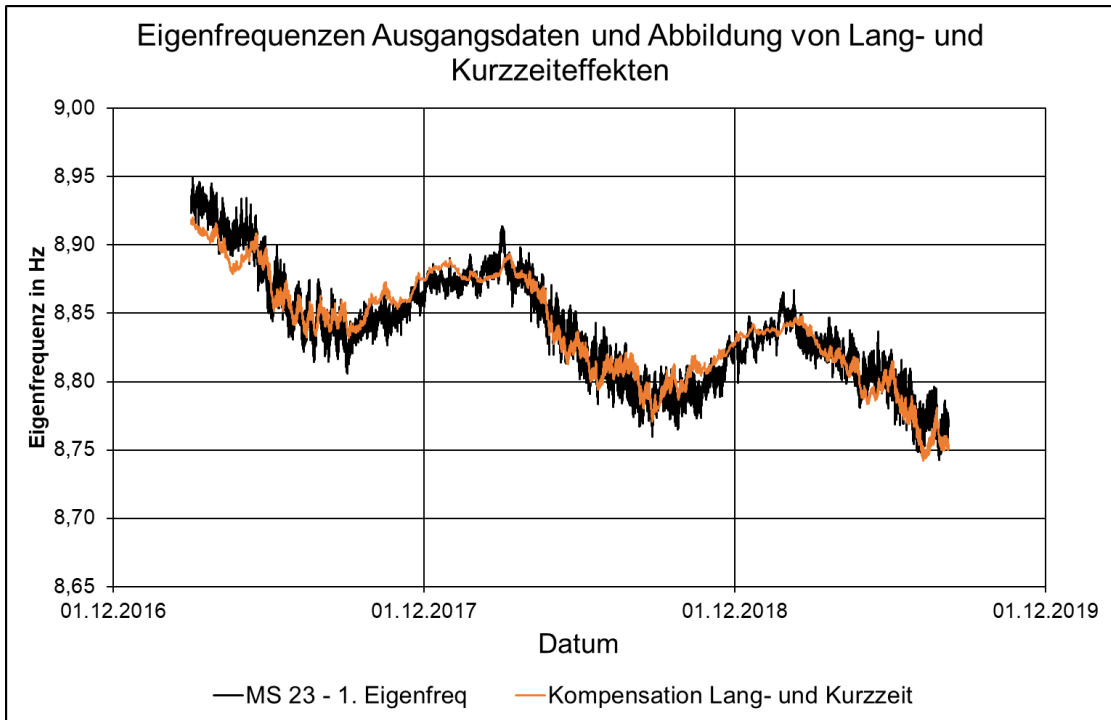


Bild 115: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzeffekte

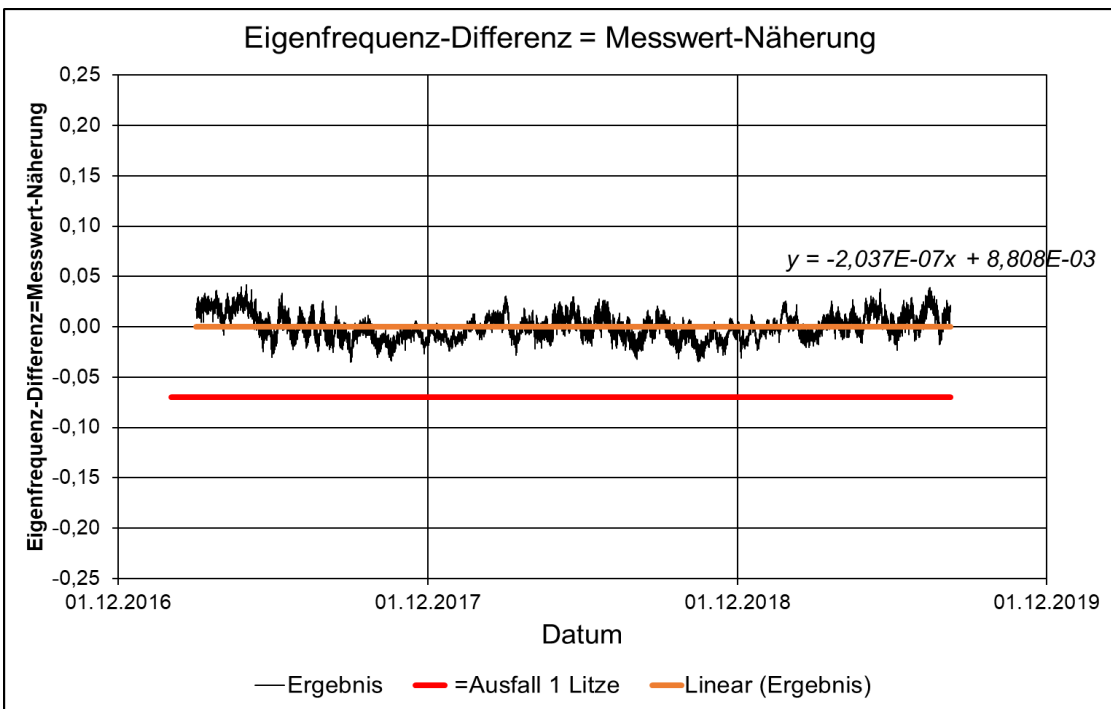


Bild 116: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße

Zu Testzwecken wurde in den aufgezeichneten Originalverlauf der Eigenfrequenzen künstlich eine Änderung des Wertes um -0,07 Hz eingefügt. Im nachfolgenden Bild 117 ist das Ergebnis der Kompensation mit den aus dem Originalverlauf ermittelten Parametern dargestellt. Die Einführung der künstlichen Änderung erfolgte zu dem mit einer blauen Strichlinie gekennzeichneten Zeitpunkt. Es wird ersichtlich, dass sich die eingeführte künstliche Änderung des Wertes direkt im resultierenden Verlauf widerspiegelt und das ausgezeichnete Niveau des Ausfalls einer Litze (rote Linie) direkt erreicht und unterschritten wird. Eine plötzliche Änderung der Eigenfrequenzwerte wird damit auch im kompensierten Verlauf unmittelbar deutlich und kann in der automatisierten Auswertung detektiert werden.

Neben der aufgeführten plötzlichen Änderung der Eigenfrequenz infolge eines Ausfalls einzelner Litzen des Spanngliedes und der damit verbundenen Änderung der Vorspannung ist es ebenfalls vorstellbar bzw. wahrscheinlich, dass sich das aufgezeigte

Langzeitverhalten zukünftig ändert. Zeiteffekte wie Kriechen und Schwinden nehmen planmäßig mit dem Alter des Bauwerkes ab. Zur Darstellung, wie solche Änderungen in der eingesetzten Methodik zu Kompensation detektiert werden, wurde im aufgezeichneten Originalverlauf ab dem in Bild 118 bzw. Bild 119 mit einer blauen Strichlinie gekennzeichneten Zeitpunkt künstlich eine Abnahme (Verlangsamung, Bild 118) bzw. Zunahme (Beschleunigung, Bild 119) der bisher identifizierten Langzeiteffekte eingeführt. Solche Änderungen lassen sich nicht unmittelbar feststellen, sondern werden erst nach einiger Zeit deutlich. Die in Bild 118 und Bild 119 eingetragenen Trendlinien zeigen für den hier betrachteten Gesamtzeitraum gegenüber den Ursprungsdaten (Bild 116) eine deutliche Neigung. In der praktischen Umsetzung wird kann diese Änderung ebenfalls detektiert werden.

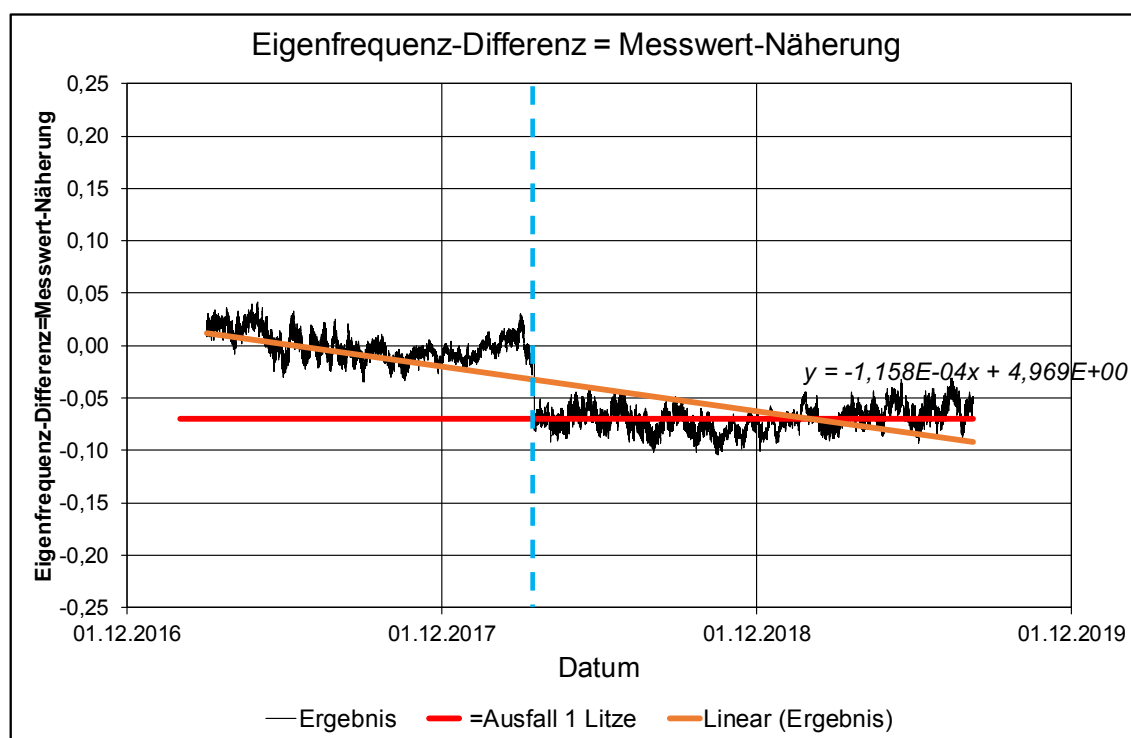


Bild 117: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Ausfall einer Litze

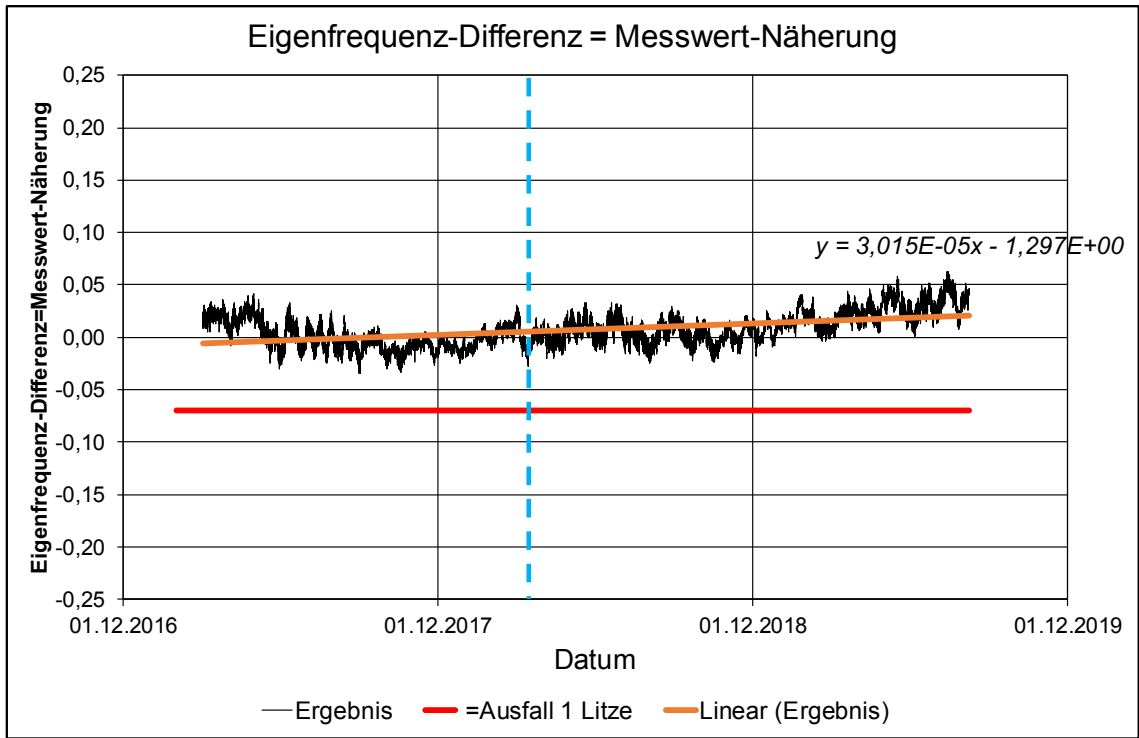


Bild 118: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Abnahme des Langzeiteffektes

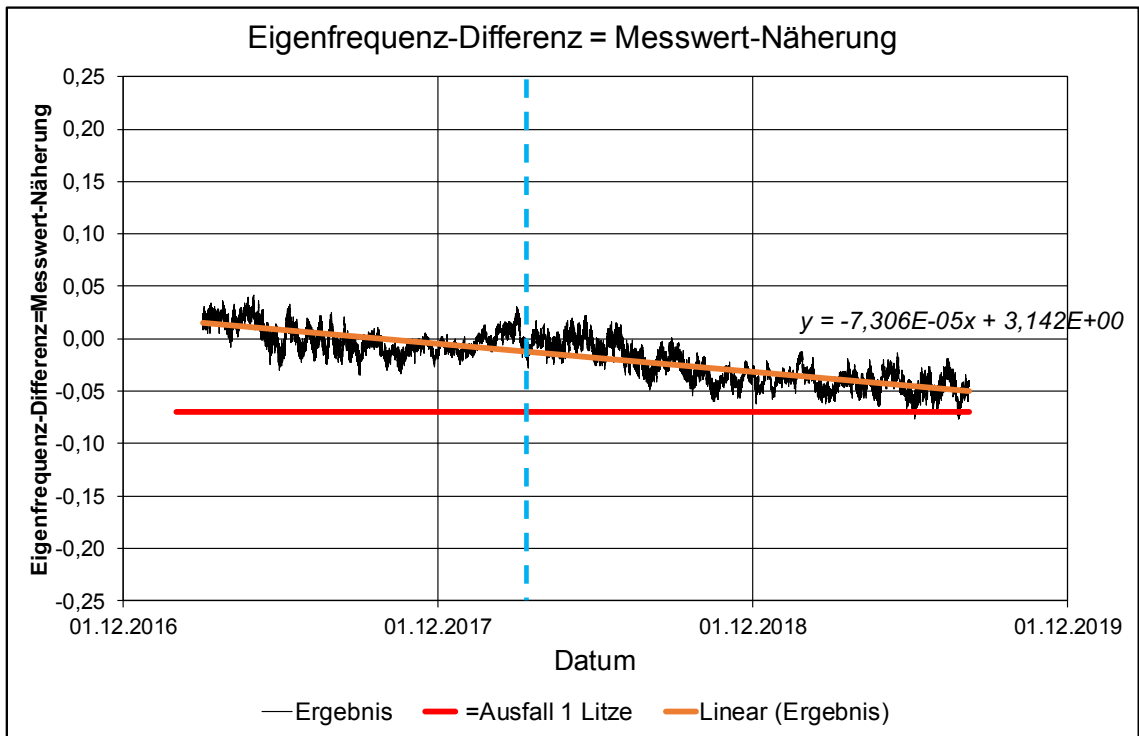


Bild 119: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Zunahme des Langzeiteffektes

Die beschriebene Methodik wird für die Aufbereitung der ermittelten Eigenfrequenzen an allen betrachteten Messstellen eingesetzt. Für die Messstelle MS25 repräsentieren die ermittelten Eigenfrequenzen nicht die Eigenfrequenzen des externen Spanngliedes und damit die Vorspannung, sondern sie repräsentieren die Eigenfrequenzen des Bauwerkes selbst und stehen damit in Bezug zur Steifigkeit des Bauwerkes. Im Gegensatz zur externen Vorspannung liegt hier kein einfacher Zusammenhang zwischen Steifigkeits- und Eigenfrequenzänderung vor. Wenngleich hier über entsprechende Modellbildungen Zusammenhänge ableitbar sind, wird sich im vorliegenden Fall lediglich auf die qualitative Überwachung der Eigenfrequenzen des Bauwerkes beschränkt. Die Methodik der Kompensation der Lang-, Mittel- und Kurzzeitef-

fekte wird aber ebenso eingesetzt. In den nachfolgenden Diagrammen (Bild 120 bis Bild 123) werden die Ergebnisse der einzelnen Schritte der Kompensation für die 3. Eigenfrequenz an Messstelle MS25 und damit am Umlenksattel bzw. Bauwerk dargestellt. In Bild 120 wird dabei deutlich, dass der für das externe Spannglied deutlich vorhandene Langzeiteffekt hier kaum ausgeprägt ist. Im Ergebnis zeigt sich in Bild 123 der kompensierte Verlauf, der zur qualitativen Überwachung der Eigenfrequenzen des Bauwerkes und damit der Bauwerkssteifigkeit herangezogen wird.

Erläuterung zur Weiterverarbeitung der berechneten kompensierten Verläufe hin zu Statuskennwerten der externen Vorspannung bzw. der Bauwerkssteifigkeit sind im Absatz 6.4 aufgeführt.

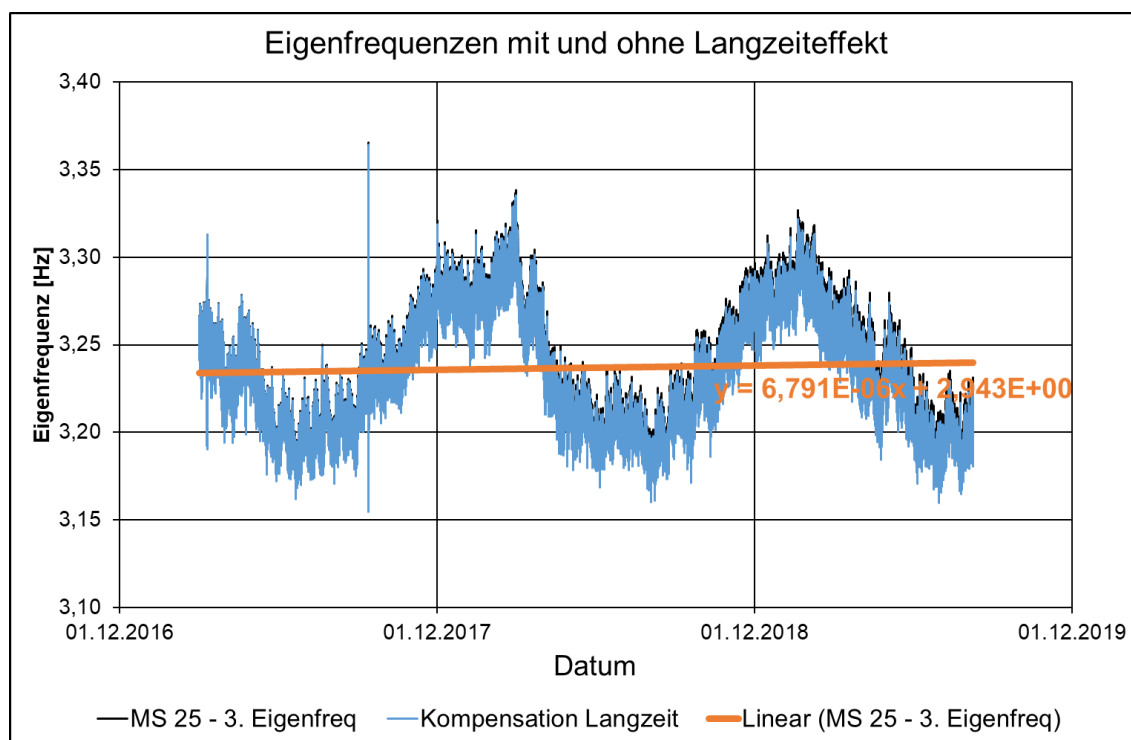


Bild 120: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz– Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend)

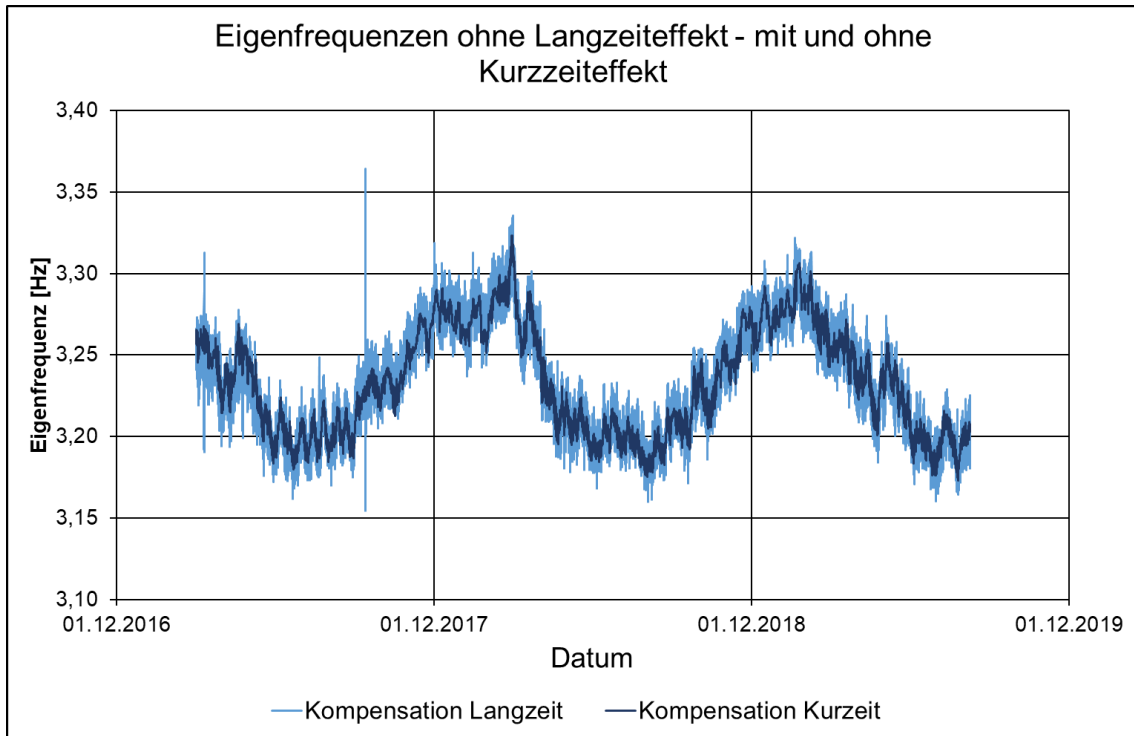


Bild 121: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz– Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell)

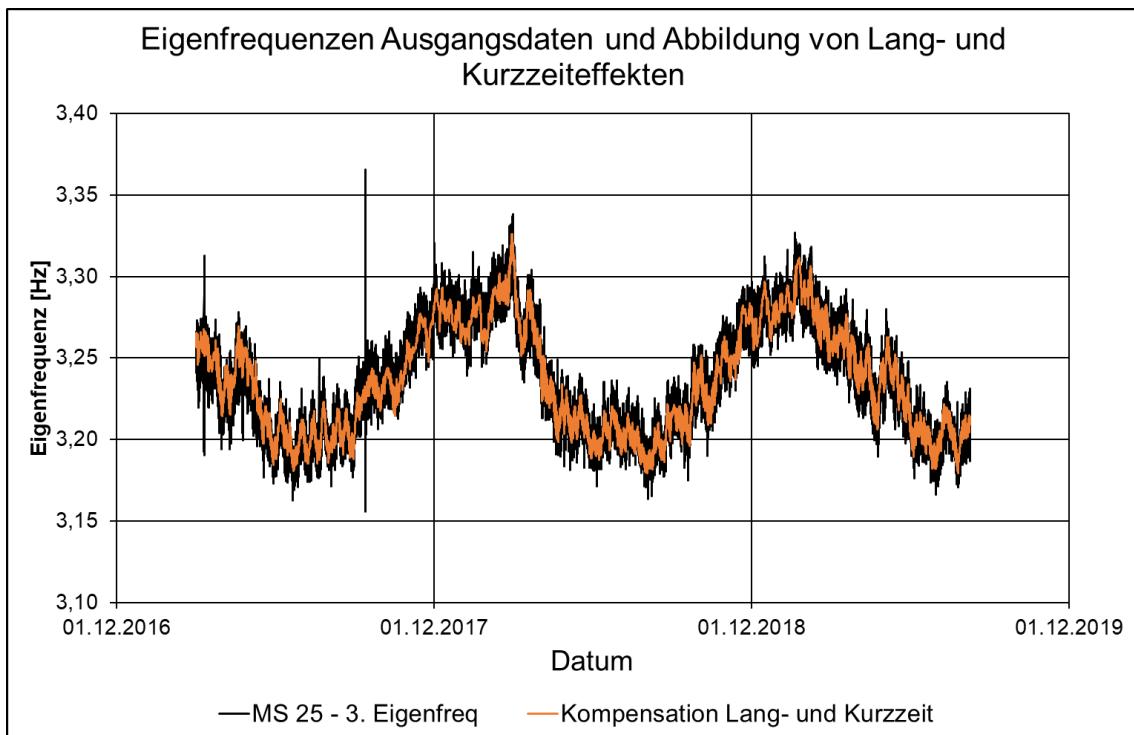


Bild 122: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz– Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzzeiteffekte

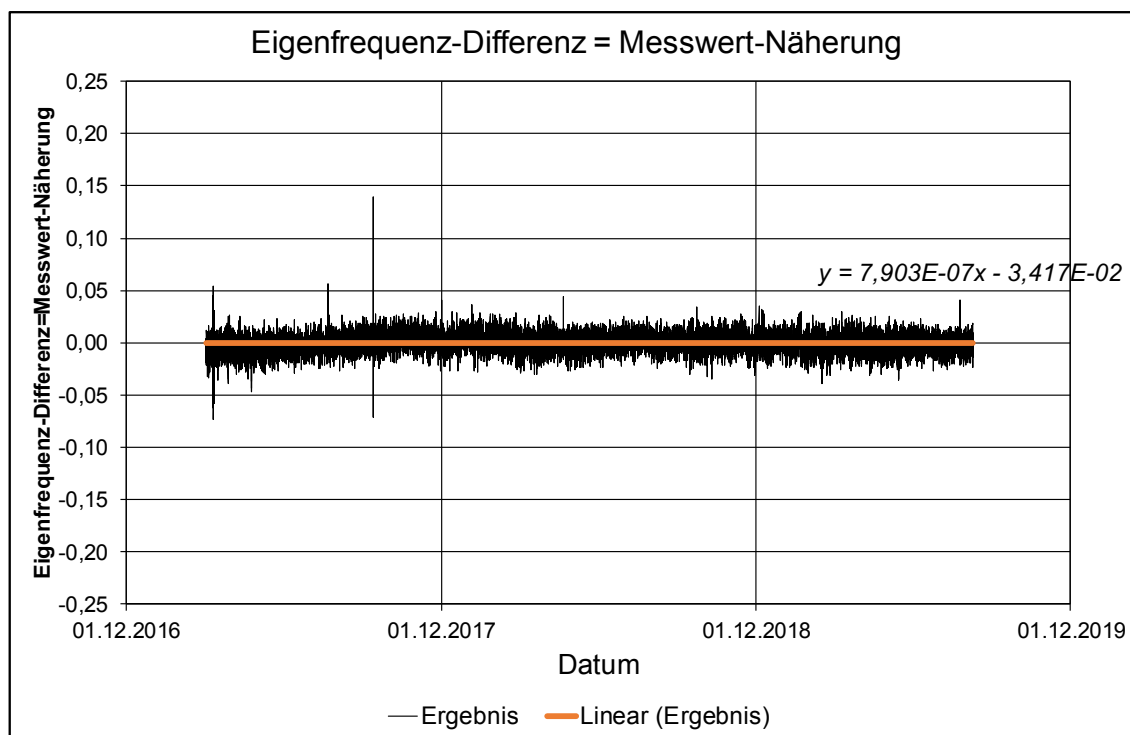


Bild 123: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße

6.3.3.3 Änderungen von Langzeiteffekten

Im vorhergehenden Absatz wurde die Entwicklung einer Methodik zur Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzeffekte vorgestellt. Die Kompensationsparameter wurden dabei anhand der erfassten Daten für den Zeitraum Februar 2017 bis Oktober 2019 abgeleitet. Die Methodik der Kompensation sowie die Parameter wurden im Oktober 2019 in die Vor-Ort-Auswertung der Messdaten integriert.

In nachfolgendem Bild 124 sind für die erste Eigenfrequenz an Messstelle MS 24 die ermittelten Kontrollwerte in Analogie zu Bild 116 dargestellt. Sowohl der Verlauf selbst als auch die eingetragene lineare Trendlinie zeigen auf, dass die langfristige Änderung der Werte nicht mehr einem linearen Trend folgt. Die Abnahme der Vorspannkraft hat sich verlangsamt (vgl. auch Beispielrechnung in Bild 118). Dies entspricht qualitativ der Erwartung des Verhaltens des Tragwerkes infolge Kriechen und Schwinden. Die Umsetzung einer erweiterten Abbildung des Langzeitverhaltens durch zum Beispiel einen Multi-Linearen-Verlauf oder auch durch eine entsprechende Funktionsgleichung

mit solch einer Charakteristik ist zwar rechnerisch möglich, für die Parameteridentifikation wären jedoch weiterführende Annahmen erforderlich. Nachfolgend wird daher zunächst nachfolgend zunächst überprüft, welche Ergebnisse die Kompensation des Langzeitverhaltens unter Beibehaltung der beschriebenen Methodik, jedoch unter Verwendung der vergrößerten Messdatenmenge, liefert.

In Bild 125 ist dazu in Analogie zu Bild 113 der lineare Trend und die damit realisierte Kompensation des Langzeiteffektes dargestellt. Die Neigung der Trendlinie ist im Vergleich zu Bild 113 rund 20 % geringer. Bild 126 zeigt in Analogie zu Bild 114 die Kompensation von Temperatureffekten (mittlere Temperatur der letzten 30 Tage und aktuelle mittlere Temperatur – bezogen auf die vorhandenen Temperaturmessstellen im Querschnitt). Weiterführend wird in Bild 127 in Analogie zu Bild 115 der Verlauf der ermittelten Eigenfrequenzen sowie der Verlauf der berechneten Lang- und Kurzeffekte dargestellt. Die Differenz zwischen beiden Verläufen führt zu den Kontrollwerten in Bild 128 (in Analogie zu Bild 116).

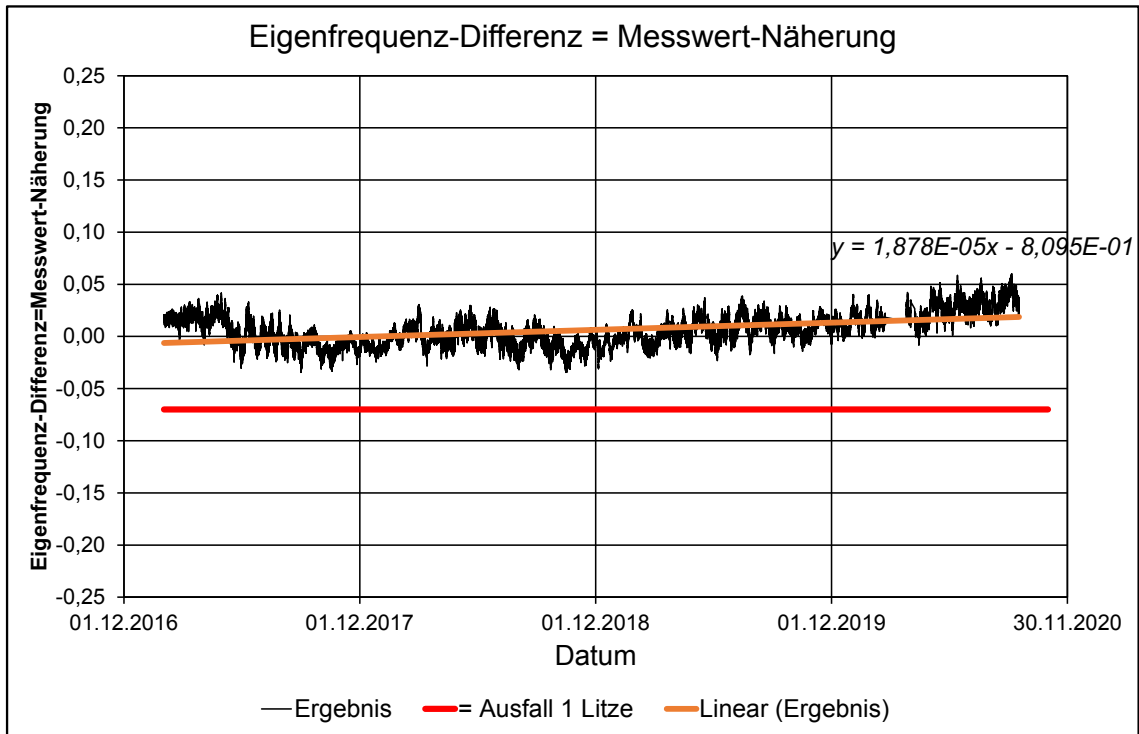


Bild 124: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung

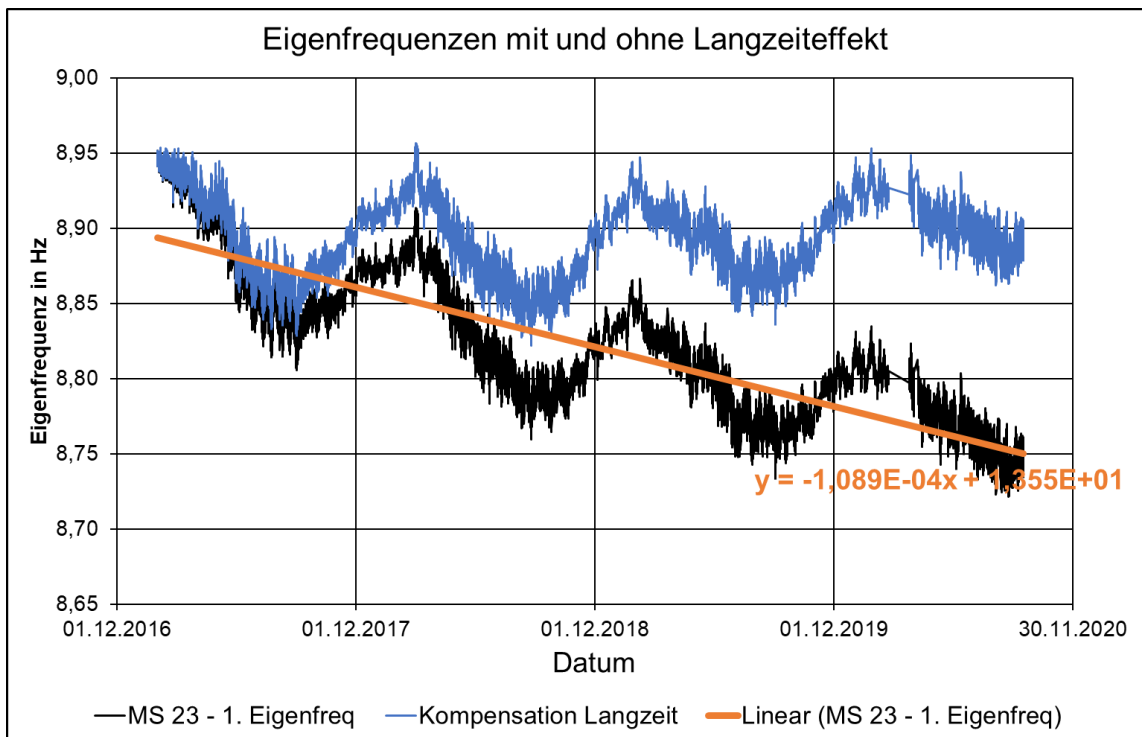


Bild 125: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend) – aus Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020

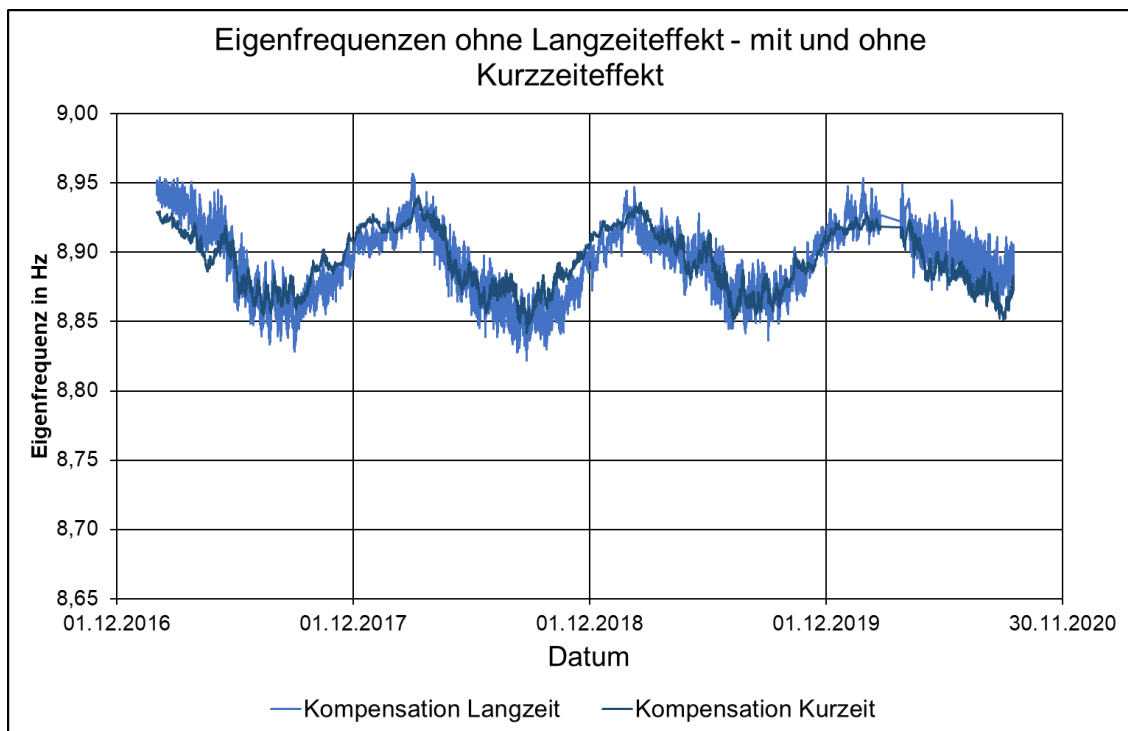


Bild 126: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell) – aus Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020

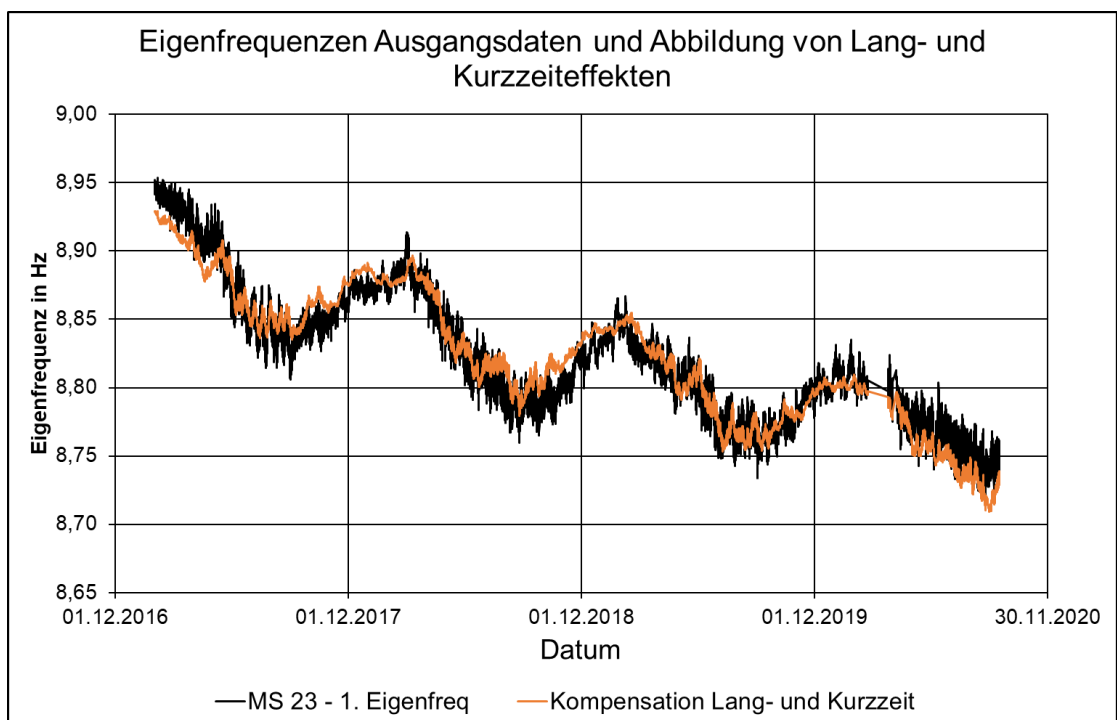


Bild 127: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzzeiteffekte – für Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020

Der qualitative Vergleich zwischen Bild 128 und Bild 116 zeigt auf, dass unter Verwendung aller bisher aufgelaufenen Messdaten die eingetragene Trendlinie etwas stärker geneigt ist (Bild 128) als bei der initialen Datenauswertung (Bild 116) und die „Streuung“ der Werte um die Trendlinie etwas größer ist. Die ist auch nachvollziehbar, da die offenbar abnehmende Geschwindigkeit des Langzeiteffektes (Kriechen und Schwinden) durch einen linearen Verlauf nicht voll abgebildet werden kann. Der

Zweck der Kompensation der Langs- und Kurzeffekte besteht jedoch darin, eine Änderung der Vorspannkraft infolge anderer Effekte (z.B. Ausfalls einzelner Litzen) zu identifizieren. Die eingetragene Niveaulinie in Bild 128 für die rechnerische Änderung der Eigenfrequenz infolge des Ausfalls einer Litze des Spanngliedes zeigt jedoch auf, dass die ermittelten Kontrollwerte nach wie vor deutlich entfernt von diesem Wert liegen.

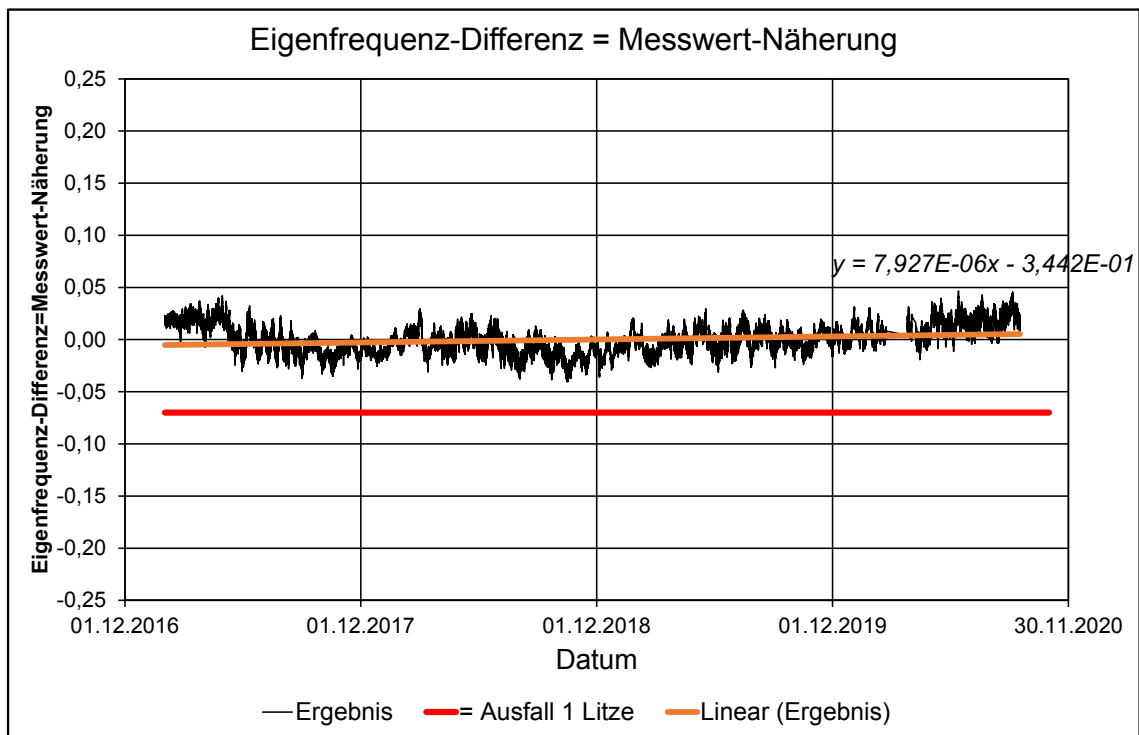


Bild 128: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – für Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020

6.4 Ableitung von Statuskennwerten für den Widerstand

6.4.1 Vorspannung

Die in Absatz 6.3.3 vorgestellte Kompensation von Lang-, Mittel- und Kurzeffekten führt zu einem berechneten Kontrollverlauf der Eigenfrequenzen, der im Regelfall, also ohne plötzlichen Spannkraftänderungen oder einer Änderung der bisherigen Charakteristik infolge der kompensierten Effekte, um den Werte 0,00 schwankt (vgl. Bild 116, Bild 128). Eine deutliche Veränderung des Verlaufes hin zu einem Wert von z.B. -0,07 in Bild 116 (MS23, erste Eigenfrequenz) deutet auf eine Änderung der Vorspannkraft in der Größenordnung eines Ausfalls von 60 Litzen im Spannglied hin (vgl. Tabelle 9). Für die Berechnung von Statuswerten der Vorspannkraft wird folgender Ansatz gewählt.

Ein Statuswert von 1,00 entspricht dem aktuellen Stand der externen Vorspannung, bereinigt um die Lang-, Mittel- und Kurzeffekte. Es wird definiert, dass ein Statuswert von 0,00 den theoretischen Ausfall von 20 der 60 Litzen repräsentieren soll. Der exemplarische Verlauf in Bild 116 würde damit in der Größenordnung von -1,629 verlaufen. Für die übrigen Messstellen an der externen Vorspannung und anderen Eigenfrequenzen ergeben sich hier entsprechend andere Werte (vgl. Tabelle 9, Angaben der Eigenfrequenzen beim Ausfall von 20 Litzen). Konkret bedeutet dies für die Messstelle MS23 und dort für die erste Eigenfrequenz, dass ein Wert in Bild 116 von 0,00 = 1,00 und ein Wert von -1,629 = 0,00 ist.

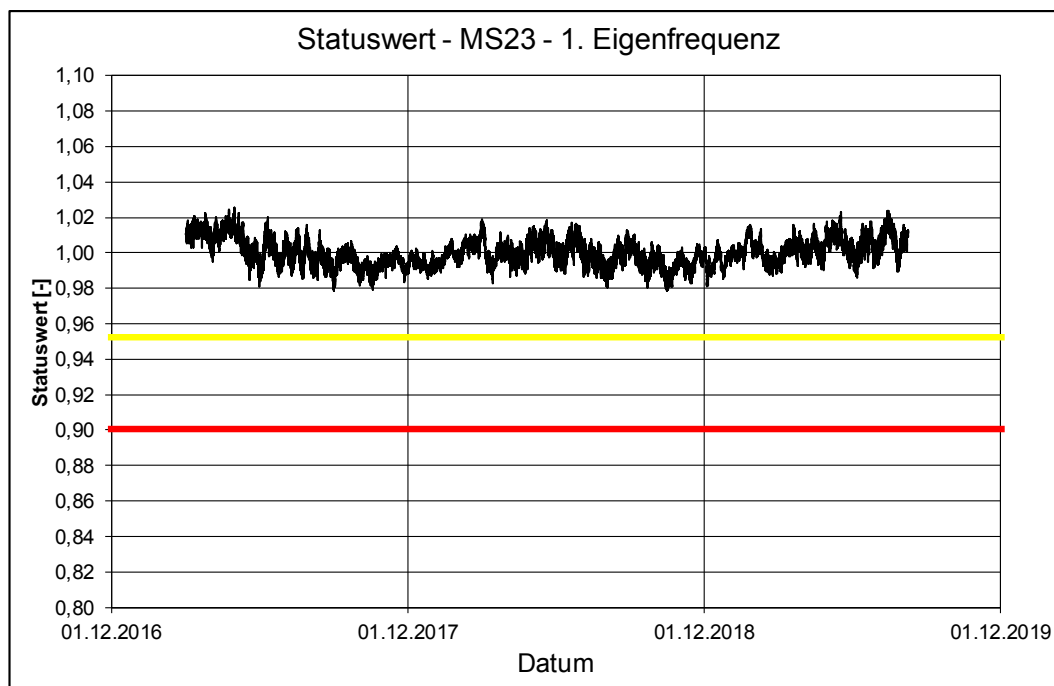


Bild 129: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis Oktober 2019 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung

In Bild 129 ist für den Verlauf aus Bild 116 die Umrechnung in Statuswerte entsprechend dem beschriebenen Ansatz dargestellt. Zusätzlich sind zwei Niveaulinien bei 0,95 (Gelb) und bei 0,90 (Rot) eingetragen. Diese Niveaus bilden die Grundlage für Statusangaben auf der Web-Publikation (vgl. Absatz 12.2.3.1). Damit wird der Ausfall von 1 bis 2 Litzen angezeigt.

Die im vorhergehenden Absatz beschriebenen Effekte aus der Änderung des Langzeitverhaltens wirken sich entsprechend auf die ermittelten Statuswerte aus. In Bild 130 ist der Verlauf der Statuswerte für den Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 unter Verwendung der initial ermittelten Kompensationsparameter dargestellt. Aufgrund der real reduzierten Geschwindigkeit des

Langzeiteffektes nehmen die Statuswerte rechnerisch langfristig zu. Der Abstand zu den Warnschwellen vergrößert sich somit und die Warnschwellen würden bei einer Reduzierung der Vorspannkraft infolge anderer Effekte später erreicht. Bild 131 zeigt den Verlauf der Statuswerte unter

Verwendung der neu berechneten Kompensationsparameter. Die Änderungen sind sichtbar, bleiben aber in geringen Größenordnungen.

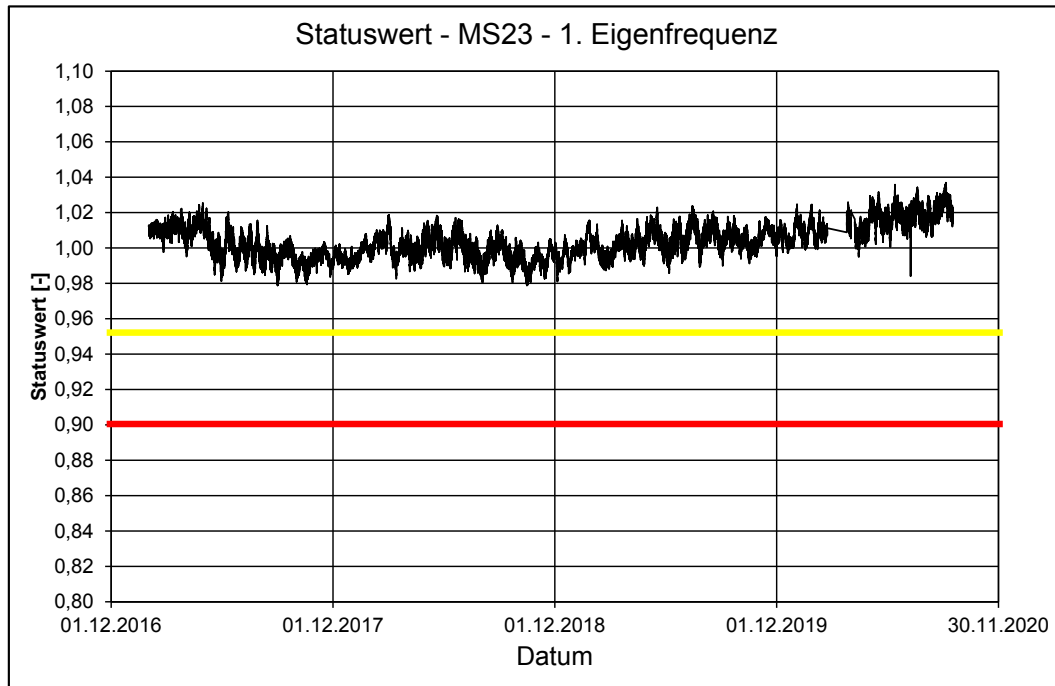


Bild 130: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung

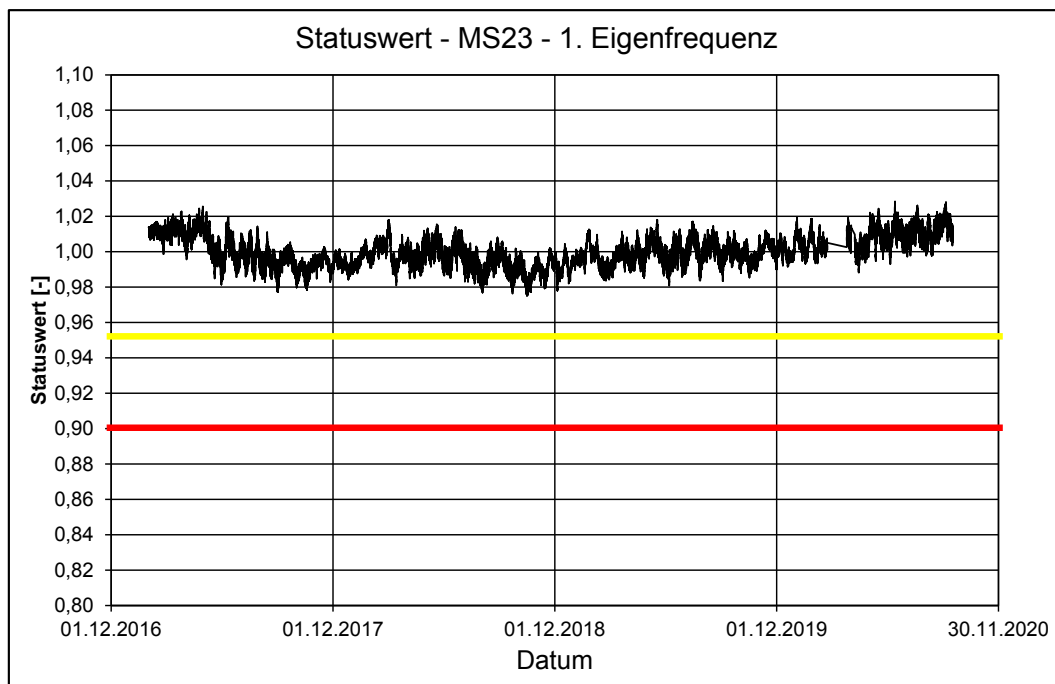


Bild 131: MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus aktualisierter Auswertung

6.4.2 Bauwerkssteifigkeit

Für die Kenngröße der Bauwerkssteifigkeit erfolgt die Ermittlung von Statuswerten prinzipiell analog zur Vorspannung. Der wesentliche Unterschied besteht dabei darin, dass im Gegensatz zur Vorspannung keine direkten Zahlenwerte für den Zusammenhang zwischen einer Änderung der Eigenfrequenz und in diesem Fall einer Änderung der Bauwerkssteifigkeit vorliegen.

Ersatzweise wird daher für die Ableitung der Statuswerte für die Bauteilsteifigkeit exemplarisch für die Messstelle MS25 und darin die dritte Eigenfrequenz ein Werte in Bild 123 von 0,00 zu Statuswert = 1,00 gesetzt und ein theoretischer Wert in Bild 123 von -3,234 zu Statuswert = 0,00 gesetzt. 3,234 entspricht dabei dem Mittelwert der bisher errechneten dritten Eigenfrequenzen an Messstelle MS25.

In nachfolgendem Bild 132 ist für den Verlauf aus Bild 123 die Umrechnung in Statuswerte entsprechend dem beschriebenen Ansatz dargestellt. Zusätzlich sind zwei Niveaulinien bei 0,95 (Gelb) und bei 0,90 (Rot) eingetragen. Diese Niveaus bilden die Grundlage für Statusangaben auf der Web-Publikation (vgl. Absatz 12.2.3.1). Die gewählten Schwell- und Warnwerte garantieren die Detektion eines Steifigkeitsabfalles, der nicht aus dem Toleranzbereich der Eigenfrequenzen herrührt.

Die oben beschriebenen Effekte der Änderung des Langzeitverhaltens bei den ermittelten Eigenfrequenzen der externen Spannglieder sind für die Eigenfrequenz des Bauwerkes in den bisher ermittelten Werten praktisch nicht vorhanden.

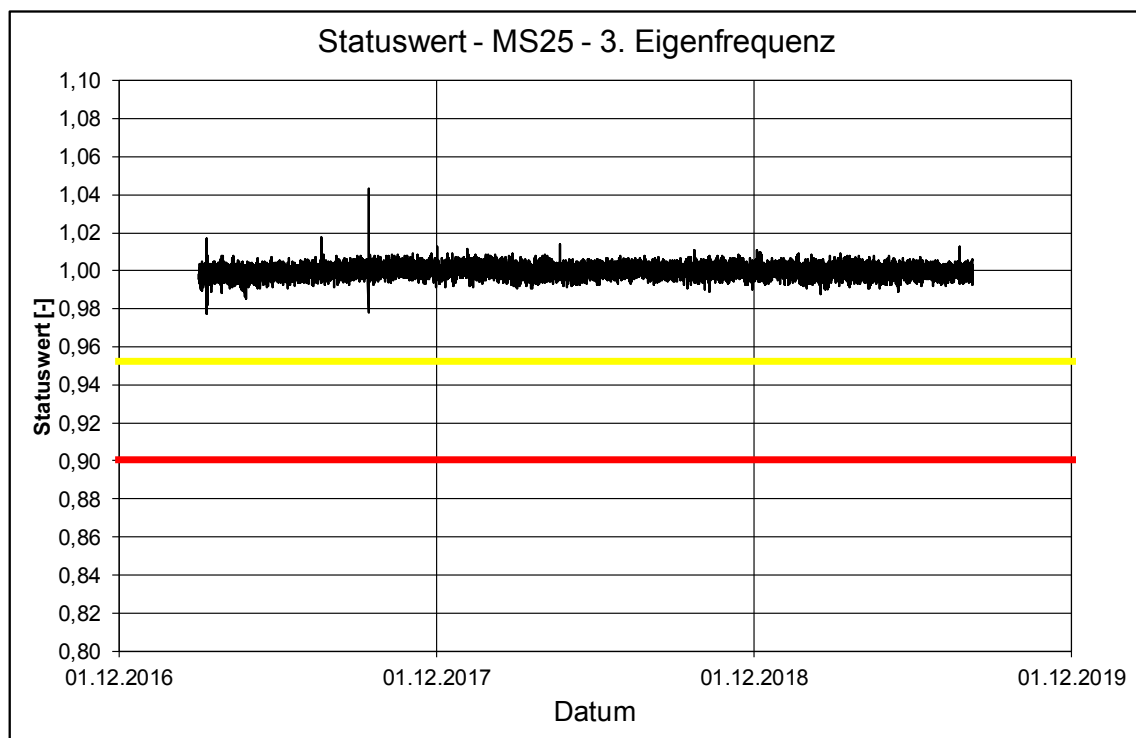


Bild 132: MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte

7 Ermittlung von Bauwerkskennwerten (Einwirkungen) aus Messdaten RTMS

7.1 Vorbemerkungen

Im vorhergehenden Absatz 6 wurde die Ermittlung von Bauwerkskenngrößen des Widerstandes dargestellt. Den Widerständen gegenüber stehen im Bauwesen die Einwirkungen. Auch hierzu lassen sich aus einer geeigneten Auswertung der ausgezeichneten Messdaten Kenngrößen ableiten. Hierbei handelt es sich in den umgesetzten Auswertungen um Kenngrößen der statischen Beanspruchungen aus Verkehr und um Kenngrößen der Ermüdungsbeanspruchungen. In den folgenden Absätzen werden die eingesetzten Methoden zur Ermittlung dieser Kenngrößen beschrieben.

7.2 Statische Beanspruchungen aus Verkehr

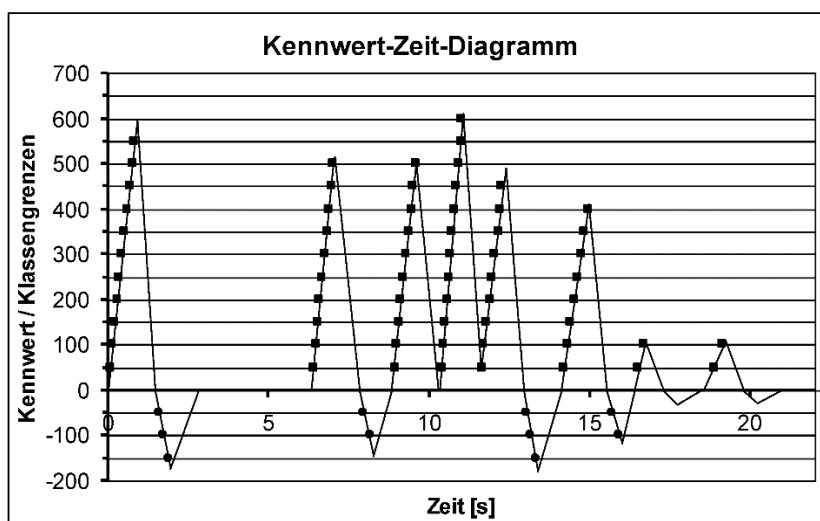
7.2.1 Methodik der Ermittlung

Die Ermittlung von Kennwerten der statischen Beanspruchungen aus Verkehr erfolgt durch eine statistische Auswertung der Zeitverläufe an ausgewählten Messstellen. Die dafür eingesetzte

Methode wurden in zahlreichen vorhergehenden Untersuchungen mit verschiedenen Zielstellungen eingesetzt (vgl. [8], [9], [2], [16], [12], [13], [15], [10], [11]). Abgesehen von den Untersuchungen in [16] wurden dabei statistische Auswertungen von Kennwert-Zeit-Verläufen aus simulierten Fahrzeugfolgen durchgeführt.

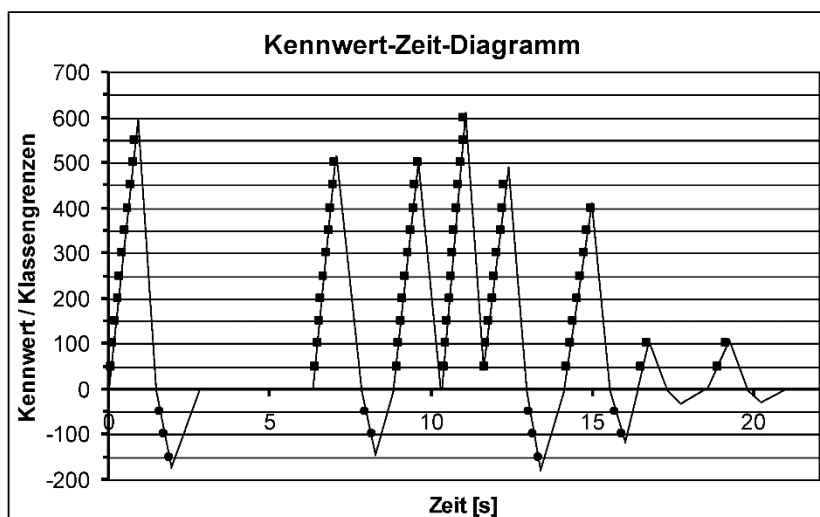
Im Zuge der statischen Auswertung wird ein Kennwert-Zeit-Verlauf einer Klassengrenzendurchgangszählung zugeführt. Es wird also gezählt, wie oft der Verlauf festgelegte Klassengrenzen über- bzw. unterschreitet. In Bild 133 ist hierfür ein Beispiel dargestellt. Das Ergebnis dieser Auszählung ist ein Histogramm, in dem für jede Klassengrenze die absolute Anzahl der Über- bzw. Unterschreitungen aufgetragen ist. Für die weitere Auswertung ist es dann erforderlich, an dieses Histogramm eine geeignete Funktion anzunähern. Hierzu wird in diesem Verfahren die Rice-Verteilung verwendet und die Parameter dieser Funktion über die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Sind diese Parameter bekannt, können Werte mit einer beliebigen Wiederkehrperiode, also auch Werte mit einer charakteristische Werte definiert werden, berechnet werden.

Die theoretische und auch programmtechnische Umsetzung dieser Auswertung der Messdaten liegt durch die o.g. Untersuchungen vor und wird nachfolgend eingesetzt.



Unterschreitung: ● Markierung Überschreitung: ■ Markierung

Klassengrenze	Anzahl
600	1
550	2
500	4
450	5
400	6
350	6
300	6
250	6
200	6
150	6
100	8
50	8
0	---
-50	4
-100	4
-150	2



Unterschreitung: ● Markierung Überschreitung: ■ Markierung

Klassengrenze	Anzahl
600	1
550	2
500	4
450	5
400	6
350	6
300	6
250	6
200	6
150	6
100	8
50	8
0	---
-50	4
-100	4
-150	2

Bild 133: Kennwert Zeitdiagramm mit eingetragenen Klassendurchgängen

7.2.2 Aufbereitung

Die Erläuterungen für die Aufbereitung der Messdaten hin zu Kennwerten der statischen Beanspruchungen aus Verkehr erfolgten nachfolgend exemplarisch für die Messstelle MS6L. Entsprechende Auswertungen werden ebenfalls für die Messstellen MS1L, MS2L und MS5L sowie zu Testzwecken für die Messstellen MS7Q, MS8Q, MS13Q und MS14Q durchgeführt.

In den beiden nachfolgenden Diagrammen sind für die Messstelle MS6L die Stundenmaximalwerte (Bild 134) und die Stundenminimalwerte (Bild 135) mit einer jeweils zusätzlich eingetragenen Hüllkurve dargestellt. Die Stundenmaximal- bzw. Minimal-

werte ergeben sich dabei aus einer zunächst durchgeführten Temperaturkompensation der Messdaten über die Bildung eines gleitenden Mittelwertes über 400 Sekunden. Diese Kompensation wird ebenso für die Verkehrserkennung und Gesamtgewichtsbestimmung eingesetzt. Damit liefert der berechnete Messdatenverlauf vordergründig Tragwerksreaktionen aus Verkehr. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt unter dieser Grundannahme.

Neben der Bestimmung der Stundenmaximal- bzw. Minimalwerte erfolgt die Auswertung der bereinigten Messdaten mit der im vorhergehenden Absatz genannten Methodik. Hierzu werden zwei Varianten betrachtet. In der ersten Variante werden zum Auswertungszeitpunkt alle bisher aufgelaufenen Daten

für die statische Auswertung und Extrapolation herangezogen. In einer zweiten Variante werden lediglich die aufgelaufenen Daten der zum Auswertungszeitpunkt letzten 12 Wochen herangezogen.

In Bild 136 und Bild 137 sind die in den beiden genannten Varianten ermittelten charakteristischen Werte eingetragen. Es wird ersichtlich, dass insbesondere die ermittelten charakteristischen Werte auf der Datenbasis der letzten 12 Wochen deutliche Streuungen aufweisen. Anzumerken ist dabei, dass durch die direkte Auswertung der Messdaten bestimmte ungünstige Situationen, wie zum Beispiel die Überfahrt eines sehr schweren Sondertransportes, direkten Einfluss auf die Auswertung und vor allem die Extrapolation der Werte hin zu den gesuchten Werten mit einer rechnerischen mittleren Wiederkehrperiode von 1000 Jahren haben.

Für Ableitung von relevanten Aussagen zu den ermittelten statischen Beanspruchungswerten aus Verkehr ist der Vergleich mit den Werten aus dem Ansatz des für die Bemessung des Tragwerkes verwendeten Lastmodells erforderlich. In nachfolgender Tabelle 10 sind die entsprechenden Werte zusammengestellt. Die Werte wurden dabei anhand von Einflussflächen für die betrachteten Kennwerte ermittelte, die aus den in Absatz 5.1.4.2 aufgeführten Einflusslinien erzeugt wurden.

Messstelle	LM 1 (EC + NA) positiver Bereich	LM 1 (EC + NA) negativer Bereich
MS1L	53,869	-16,23
MS2L	51,476	-16,58
MS5L	66,474	-31,82
MS6L	63,409	-35,02

Tabelle 10: Vergleichswerte aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 nach Eurocode und NA

In den Diagrammen in Bild 138 und Bild 139 sind die Ergebnisse aus Bild 136 und Bild 137 als Verhältniswerte zu den Vergleichswerten aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 für Messstelle MS6L eingetragen. Es wird ersichtlich, dass für den Bereich der Minimalwerte die ermittelten charakterlichen Werte auf Grundlage der Daten der jeweils letzten 12 Wochen zum Teil über dem Wert aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 liegen. Vor dem Hintergrund der Methodik der Ermittlung der charakteristischen Werte aus Messdaten wird dieser Sachverhalt hier jedoch als weniger relevant eingeschätzt.

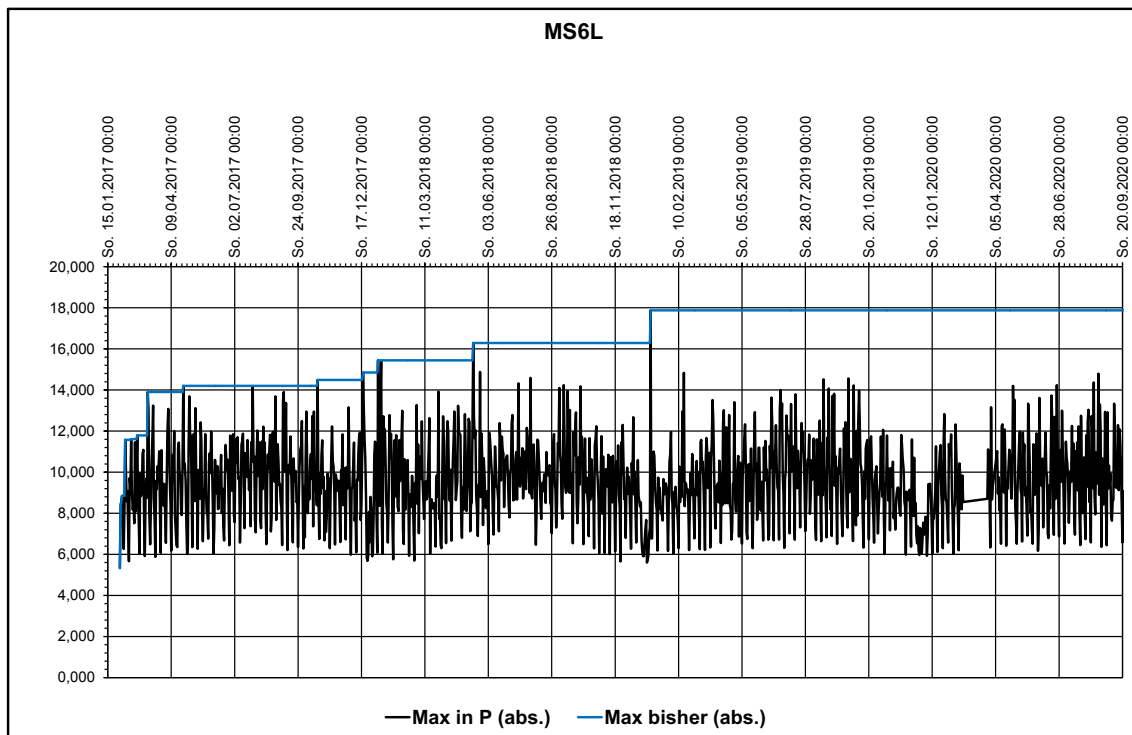


Bild 134: MS6L – Stunden-Maximalwerte in µm/ m und Hüllkurve

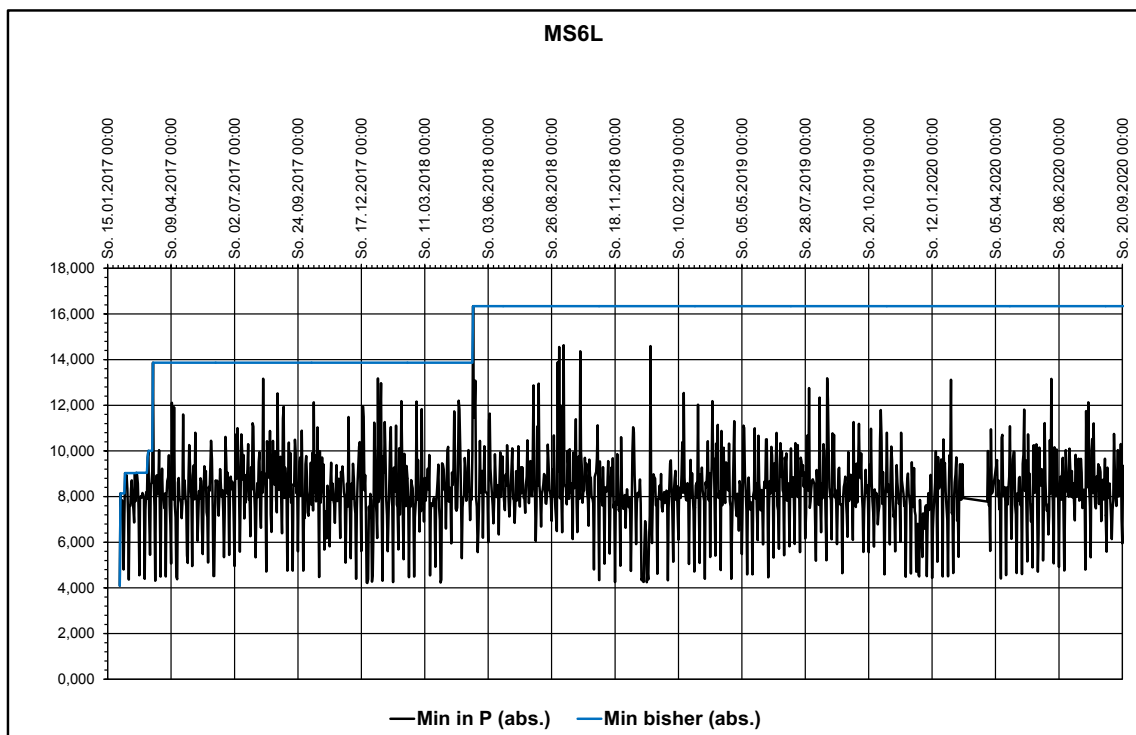


Bild 135: MS6L – Stunden-Minimalwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (als Absolutwerte) und Hüllkurve

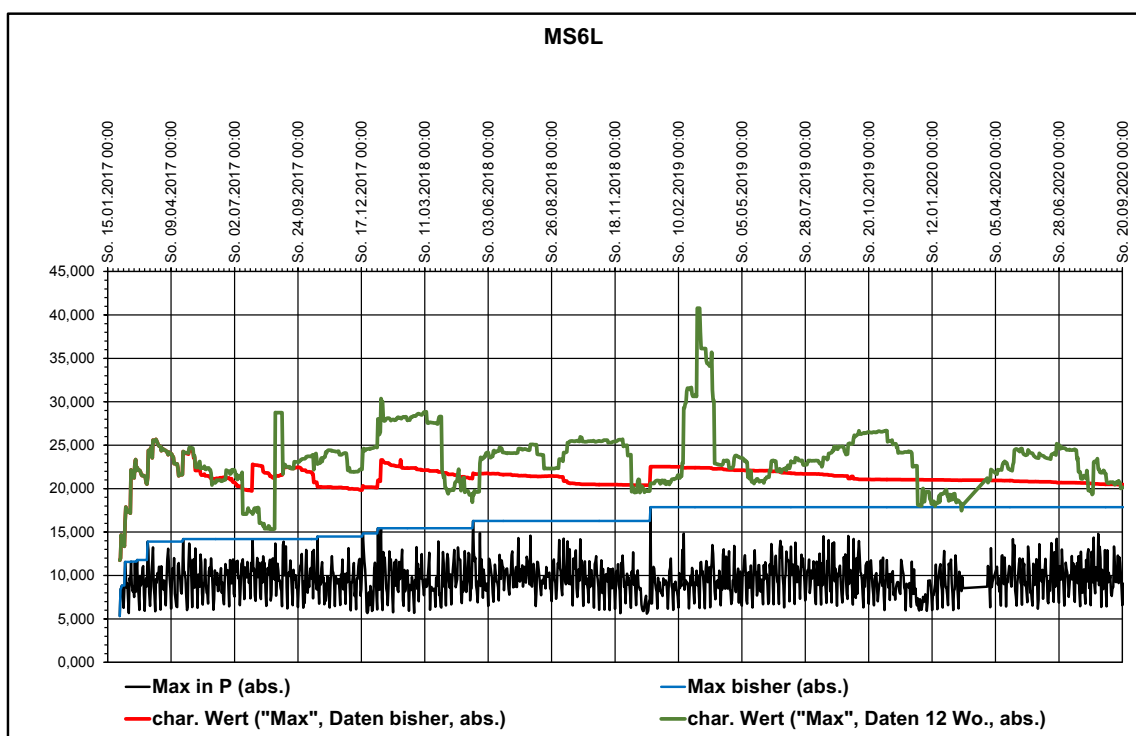


Bild 136: MS6L – Stunden-Maximalwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Hüllkurve und charakteristische Werte

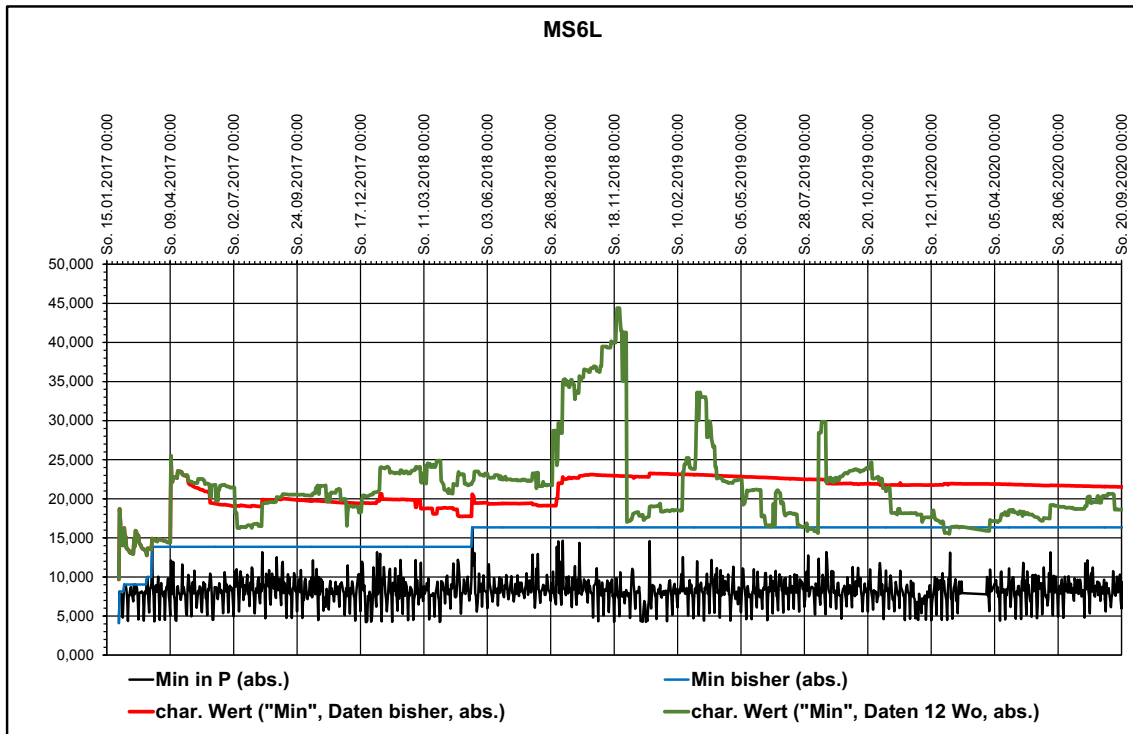


Bild 137: MS6L – Stunden-Minimalwerte in $\mu\text{m}/\text{m}$ (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte

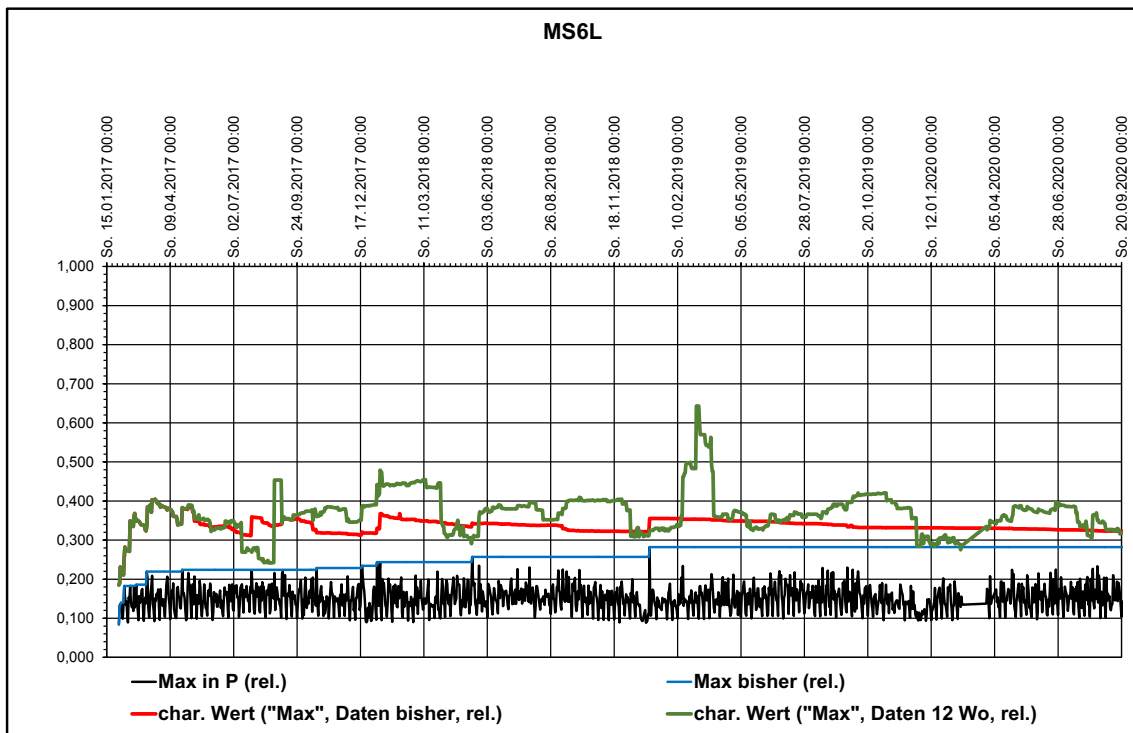


Bild 138: MS6L – Stunden-Maximalwerte , Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1

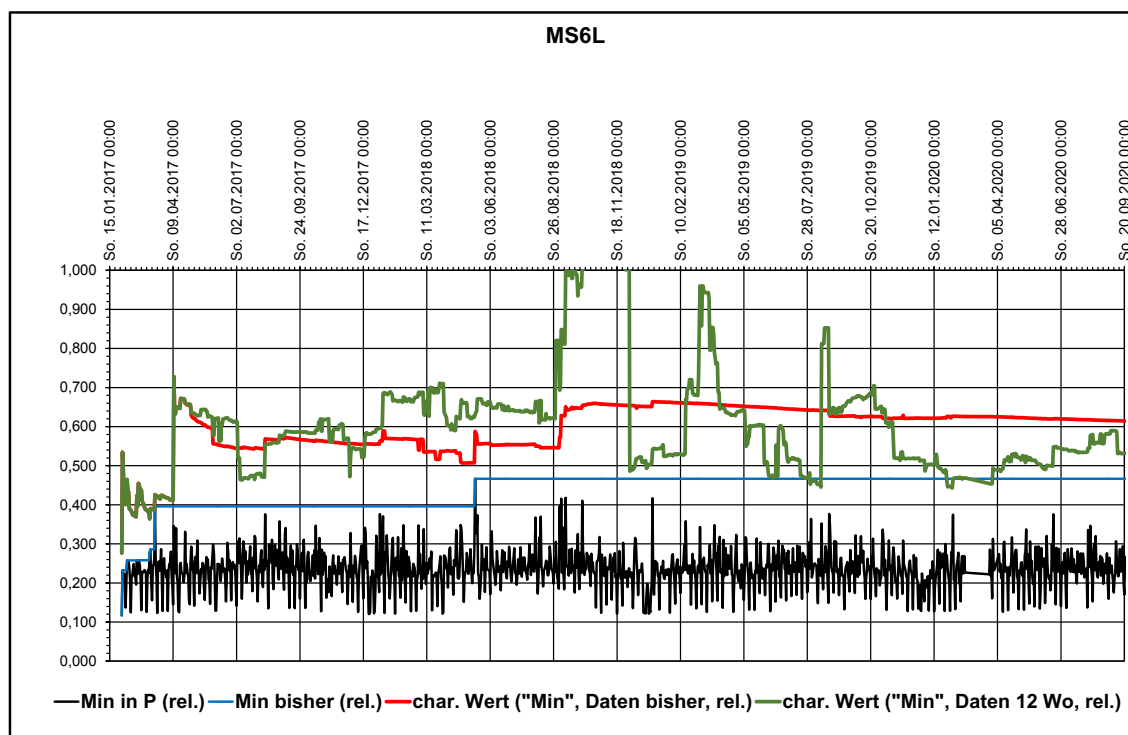


Bild 139: MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1

7.2.3 Ableitung von Statuskennwerten für statische Beanspruchungen aus Verkehr

Hinsichtlich der Definition von Statuskennwerten für die statischen Beanspruchungen aus Verkehr werden die ermittelten Verhältniswerte zwischen den aus den Messdaten berechneten charakteristischen Werten und dem jeweiligen Vergleichswert aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 verwendet. Für die Aufbereitung der Werte in der Web-Publikation (vgl. Absatz 12.2.3.1) werden zusätzlich zwei Niveauschwellen bei einem Wert von 0,80 (Gelb bei 0,8 LM 1) und 0,90 (Rot bei 0,9 LM 1) festgelegt.

7.3 Ermüdungsbeanspruchungen aus Verkehr

7.3.1 Methodik der Ermittlung

Zur Identifikation von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln werden die Messdaten von ausgewählten Messstellen ausgewertet. Bei den betrachteten Punkten handelt es sich dabei um die Messstellen mit Dehnungsmessungen an der eingebauten schlaffen Bewehrung (MS1L, MS2L, MS5L, MS6L).

Für die Ermittlung von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln werden die Messdaten einer Rainflow-Auszählung unterzogen. Der hierfür verwendete Algorithmus wurde aus [5] entnommen und bestimmt geschlossene Hystereseschleifen in einem beliebigen Zeitverlauf. Vor der Durchführung der Rainflow-Auszählung werden die Messverläufe analog zum vorhergehenden Absatz um Anteile aus Temperatur bereinigt, indem die Bildung eines gleitenden Mittelwertes der Messdaten über 400 Sekunden realisiert wird. Entsprechend werden die erhaltenen Schwingspiele als rein verkehrsinduziert angesehen.

Die Anwendung der Rainflow-Auszählung liefert eine Rainflow-Matrix. Durch Spiegelung dieser Matrix an der Hauptdiagonale erhält man die Anzahl von geschlossenen Schleifen mit unterschiedlichen Schwingbreiten. Die Delta-Werte der Dehnungen in $\mu\text{m}/\text{m}$ werden mit dem E-Modul von Stahl ($210.000 \text{ N}/\text{mm}^2$) linear in Delta-Werte der Spannungen (N/mm^2) umgerechnet.

Sind Größe und Anzahl der Schwingspiele bekannt, muss der ertragbare Wert von Schwingungsspiel und Anzahl für den verwendeten Stahl ermittelt werden. Die Berechnung von Schädigungen aus den ermittelten Schwingspielen erfolgt anhand der Wöhler-Linie für Schlaffstahl entsprechend dem deutschen NA zum EC 2 Teil 2

(DIN EN 1992-2/NA, [27]). Die Berechnung von Schädigungssummen erfolgt mit den ermittelten Spannungsschwingbreiten und definierten Wöhler-Linien nach den technisch üblichen Verfahren. Vergleichbare Analysen wurden in [12], [13] und [15] durchgeführt. Für die hier realisierten Auswertungen wurden die damit vorliegende theoretische und auch programmtechnische Umsetzungen verwendet.

Die genannten Auswertungen führen zunächst zu Schädigungssummen im betrachteten Auswertungszeitraum. Für die Ableitung von praktikablen Vergleichswerten werden diese Schädigungssummen im weiteren Verlauf zu schädigungsäquivalenten Schwingbreiten umgerechnet. Dies erfolgt entsprechend dem Nachweiskonzept des Eurocodes in der Art, dass eine Spannungsschwingbreite ermittelt wird, die bei $1 \cdot 10^6$ Wiederholungen die gleiche Schädigung hervorruft wie die ermittelte Schädigungssumme in Auswertungszeitraum. Die Grundlage hierfür ist wiederum die definierte Wöhler-Linie. Die so ermittelten schädigungsäquivalenten Schwingbreiten werden mit den entsprechenden Werten verglichen, die sich aus dem Ermüdungsnachweis für die betrachteten Stellen am Tragwerk ergeben. Entsprechende Untersuchungen wurden ebenso in [12], [13] und [15] durchgeführt, sodass auch hier die erforderlichen theoretischen und auch programmtechnischen Umsetzungen vorliegen.

Im nachfolgenden Absatz wird das Vorgehen exemplarisch beschrieben.

7.3.2 Aufbereitung

Die Erläuterungen für die Aufbereitung der Messdaten hin zu Kennwerten der Ermüdungsbeanspruchung erfolgen nachfolgend exemplarisch für die Messstelle MS1L. Entsprechende Auswertungen werden ebenfalls für die Messstellen MS2L, MS5L und MS6L durchgeführt.

Im nachfolgenden Diagramm in Bild 140 sind ermittelte Schädigungssummen für den gesamten bisherigen Auswertungszeitraum dargestellt. Dabei werden verschiedene Zeiträume betrachtet. In der ersten Variante werden zum Auswertungszeitpunkt alle bisher aufgelaufenen Daten für die Ermittlung der

Schädigungssumme herangezogen. In den weiteren Varianten werden lediglich die aufgelaufenen Daten der zum Auswertungszeitpunkt letzten 52 Wochen, 12 Wochen und der letzten Woche herangezogen. Hieraus geben sich die unterschiedlichen Verläufe der Schädigungssummen.

Im nächsten Schritt werden die ermittelten Schädigungssummen in schädigungsäquivalente Schwingbreiten umgerechnet. Das Ergebnis dieser Umrechnung ist für das hier betrachtete Beispiel in Bild 141 dargestellt. Diese Ergebnisse bilden in der weiteren Aufbereitung die Datengrundlage. Sie repräsentieren einen Wert $\Delta\sigma_{\text{Mess, equ}}$ für den jeweiligen Betrachtungszeitraum. Als Vergleichsbasis dient der zu berechnende Wert $\Delta\sigma_{\text{s, equ}}$ nach Norm. Dieser Wert ergibt sich nach Gleichung (7.1) aus den Einzelwerten nach Gleichung (7.2) bis (7.4).

$$\Delta\sigma_{\text{s, equ}} = \Delta\sigma_{\text{s}} \cdot \lambda_{\text{s}} \quad (7.1)$$

$$\Delta\sigma_{\text{s}} = \Delta\sigma_{\text{ELM3}} \cdot f \quad (7.2)$$

$$f = 1,4 \quad (7.3)$$

$$\lambda_{\text{s}} = \varphi_{\text{fat}} \cdot \lambda_{\text{s},1} \cdot \lambda_{\text{s},2} \cdot \lambda_{\text{s},3} \cdot \lambda_{\text{s},4} \quad (7.4)$$

Der Wert $\Delta\sigma_{\text{ELM3}}$ wird dabei in Analogie zu den ermittelten Vergleichswerten bei den betrachteten statischen Beanspruchungen aus erzeugten Einflussflächen für die betrachteten Kennwerte jedoch unter Ansatz des Ermüdungslastmodell ELM 3 ermittelt. Der Wert f wird mit 1,4 angesetzt (Tragwerksbereich außerhalb der Zwischenstützen).

Der Wert λ_{s} ist ein Produkt aus mehreren Teilfaktoren. Der Wert $\lambda_{\text{s},1}$ zur Berücksichtigung des Bauteiltyps wird aus dem Nomogramm der DIN EN 1992-2 (Bild NN.2, [26]) entnommen und liegt bei einem Wert von 1,2. Der Wert $\lambda_{\text{s},1}$ zur Berücksichtigung des Verkehrsvolumens wird in den vorliegenden Auswertungen vereinfacht mit 1,0 angenommen, ebenso der Wert $\lambda_{\text{s},4}$ zur Berücksichtigung von Verkehr auf mehreren Fahrstreifen. Der Wert φ_{fat} wird mit 1,2 angesetzt.

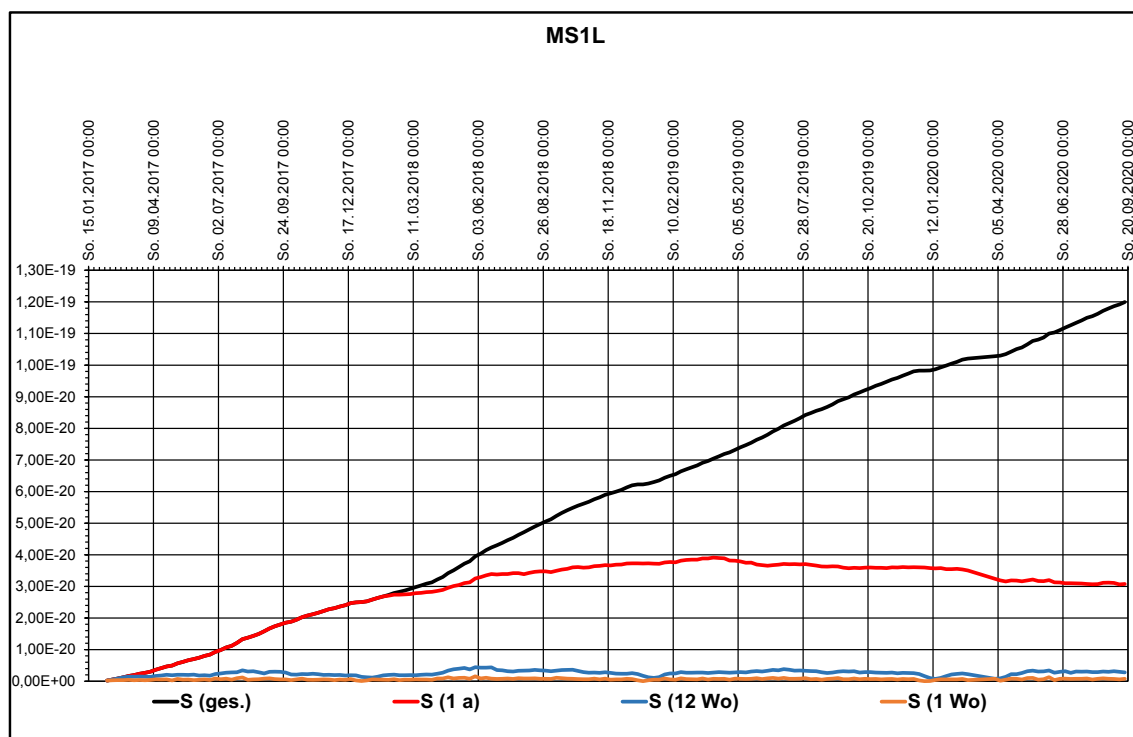


Bild 140: MS1L – Ermittelte Schädigungssummen für verschiedene Betrachtungszeiträume

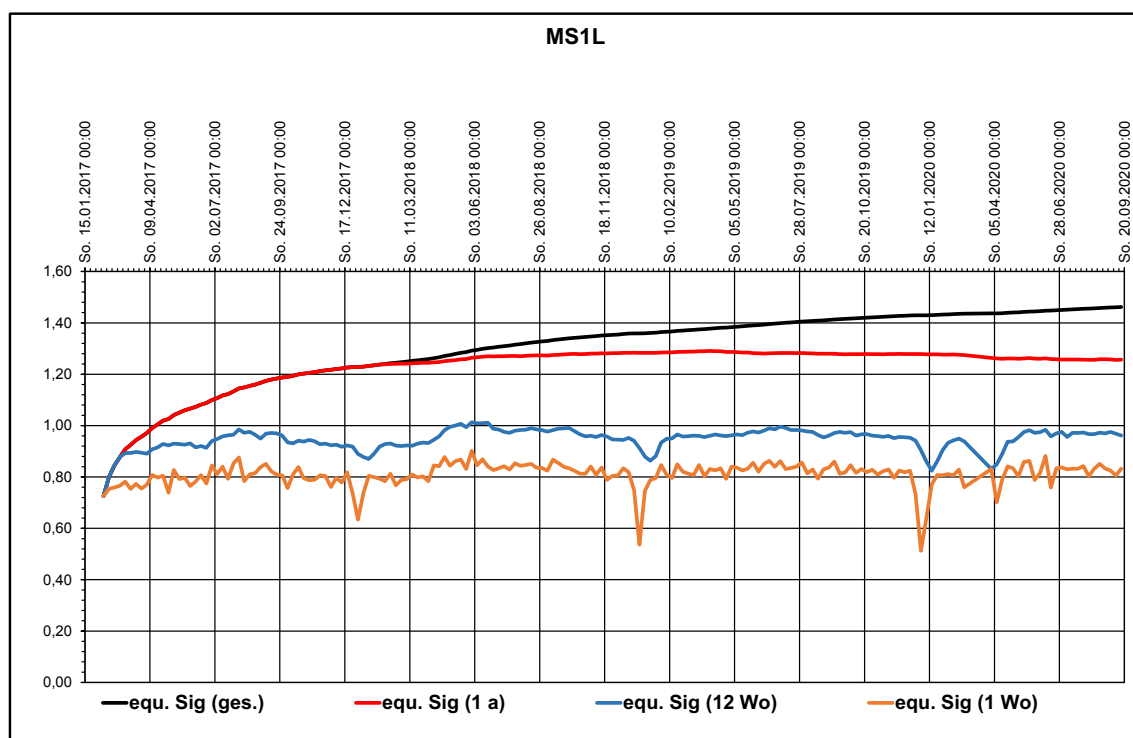


Bild 141: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten für verschiedene Betrachtungszeiträume

Damit verbleibt in der Zusammenstellung der Wert $\lambda_{s,3}$ als Beiwert zur Berücksichtigung von verschiedenen Nutzungsdauern. Nach Norm ergibt sich dieser Wert entsprechend nachfolgender Gleichung

(7.5). Diese Gleichung wird zu Gleichung (7.6) erweitert.

$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{years}}{100}} \tag{7.5}$$

$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{Hours}}{100 \cdot 365 \cdot 24}} \tag{7.6}$$

Die Ermittlung der Vergleichswerte erfolgt nunmehr mit den genannten Parametern. Der Wert $\Delta\sigma_{ELM3}$ unterscheidet sich für die verschiedenen betrachteten Messstellen, die übrigen Werte sind unabhängig von den betrachteten Messstellen. Für den Wert $\lambda_{s,3}$ werden verschiedene Zahlenwerte für die unterschiedlichen betrachteten Zeiträume verwendet. Im Zuge der automatisierten Auswertung vor Ort werden die Werte für $\lambda_{s,3}$ mit Gleichung (7.6) fortlaufend neu berechnet. Für die erste Variante der betrachteten Zeiträume, dem zum Auswertepunkt gesamten zurückliegenden Auswertungszeitraum, ergibt sich damit ein fortlaufend ansteigender Wert für $\lambda_{s,3}$. Für die übrigen Varianten (52 Wochen, 12 Wochen, 1 Woche) ändert sich der Wert für $\lambda_{s,3}$ dann, wenn in den jeweils betrachteten zurückliegenden Zeiträumen keine Messdaten vorhanden sind (durch Ausfall der Messungen).

In nachfolgendem Bild 142 sind die ausgewerteten Stunden aus den bisher verarbeiteten Daten für die genannten Betrachtungszeiträume dargestellt. Mit diesen Werten ergeben sich die veränderlichen Faktoren $\lambda_{s,3}$ in Bild 143. Ersichtlich wird in den Verläufen der Ausfall der Messanlage im März/April 2020. Hier wurden über rund 4 Wochen keine Messdaten erfasst. Da die Definition der Betrachtungszeiträume datumsbasiert ist, ergibt sich für die Verläufe der Betrachtungszeiträume 12 Wochen und 1 Woche eine vorübergehende Reduzierung der ausgewerteten Stunden. Für den Betrachtungszeitraum 52 Wochen (1 Jahr) ergibt sich auch um weiteren Verlauf der Datenauswertung bis Mai 2021 eine Reduzierung der ausgewerteten Stunden, da in den betrachteten vergangenen 52 Wochen bis zu diesem Zeitpunkt stets die genannte Unterbrechung der Messungen enthalten ist.

Da die Faktoren $\lambda_{s,3}$ in Bild 143 unter Verwendung der Gleichung (7.6) ermittelt werden, ergibt sich auch hier ein Effekt aus dem Ausfall der Messdatenaufzeichnung.

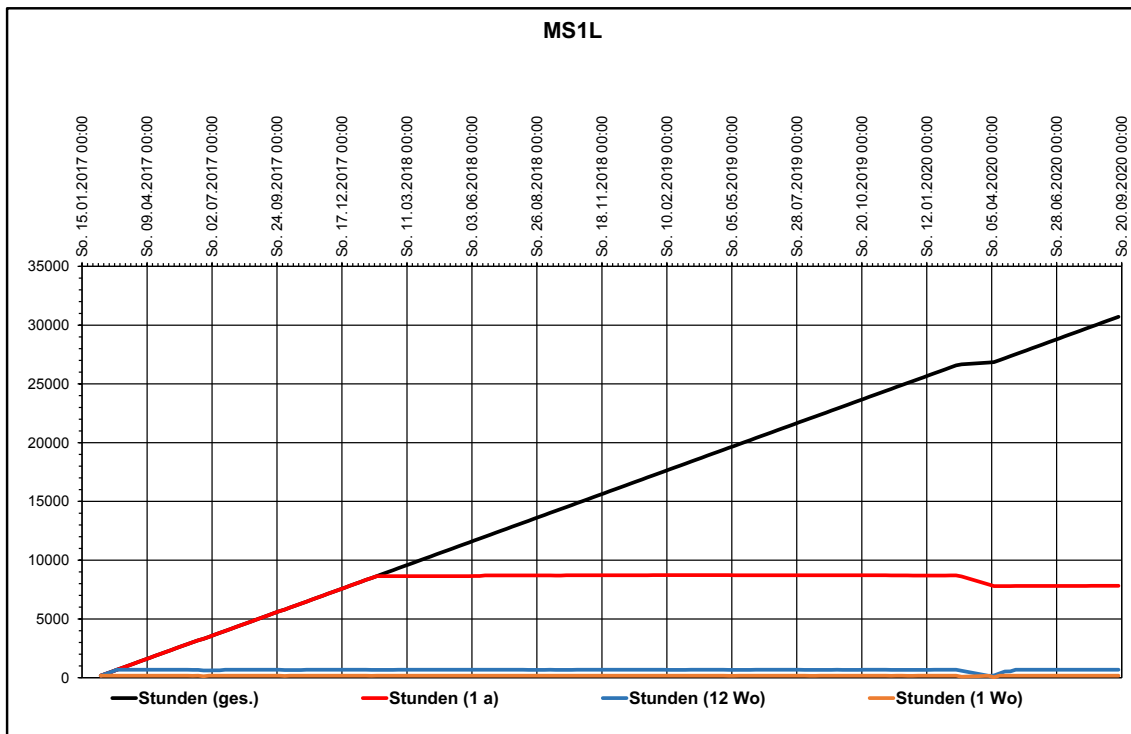


Bild 142: MS1L – Ausgewertete Stunden für verschiedene Betrachtungszeiträume

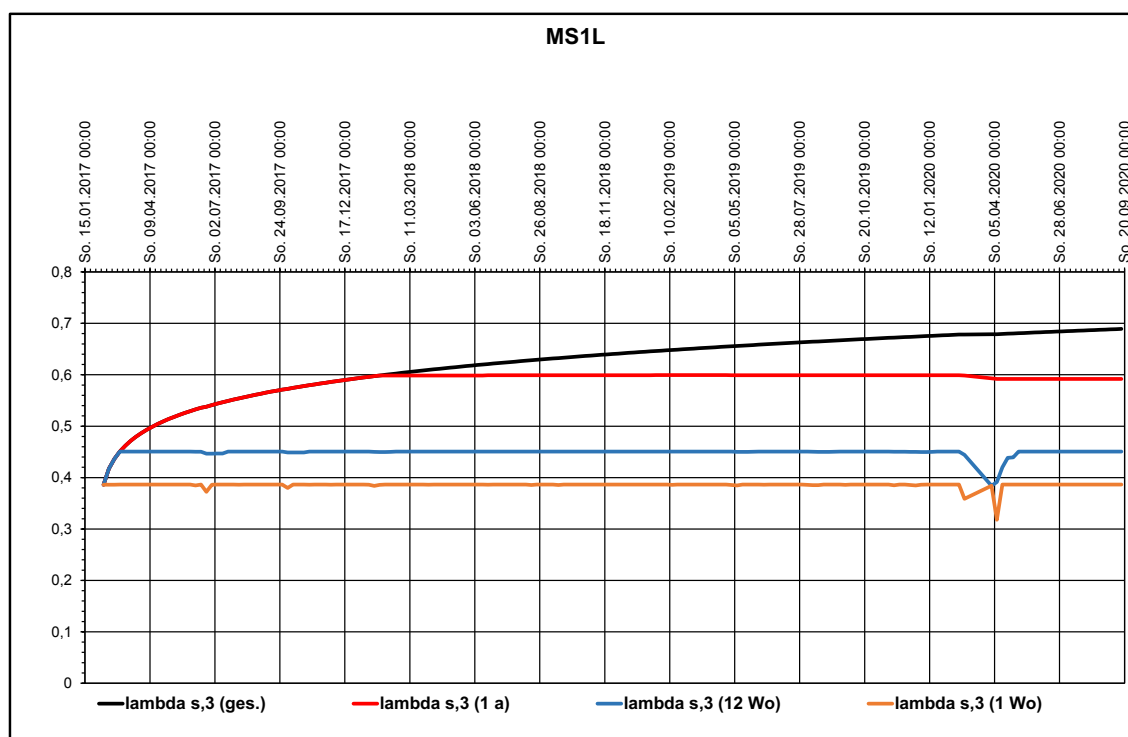


Bild 143: MS1L – Berechnete Werte für $\lambda_{s,3}$ für verschiedene Betrachtungszeiträume

Aus der Bildung der Verhältniswerte zwischen den ermittelten schädigungsäquivalenten Schwingbreiten (Bild 141) und den berechneten Vergleichswerten entsprechend den aufgeführten Erläuterungen, ergeben sich die in Bild 144 dargestellten Ergebnisverläufe. Es wird ersichtlich, dass sich für die beiden berücksichtigten Betrachtungszeiträume 52 Wochen und Gesamtzeit keine wesentlichen Änderungen der ermittelten Werte zeigen. Für die kürzeren Betrachtungszeiträume (12 Wochen, 1 Woche) zeigen sich erwartungsgemäß gewisse Änderungen der Werte, da sich hier saisonale Effekte stärker in den Ergebnissen widerspiegeln.

Entsprechend der beschriebenen Art der Datenaufbereitung bedeutet der im Beispiel vorliegende Ergebniswert von rund 0,45 nicht, dass nach der bisherigen Nutzungszeit des Bauwerkes von nahezu vier Jahren bei einer angestrebten Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren bereits 45 % einer gedachten Ermüdungskapazität erschöpft sind. Für die Betrachtungsvariante des

gesamten bisherigen Zeitraumes wird im Laufe der weiteren Auswertungen der Messdaten die rechnerische Schädigungssumme weiter ansteigen. Die schädigungsäquivalente Schwingbreite steigt ebenfalls weiter an, aufgrund der für die Umrechnung zugrundeliegenden Wöhler-Linie jedoch nicht in linearem Verhältnis zum Anstieg der Schädigungssumme. Der Vergleichswert aus dem Ermüdungslastmodell steigt jedoch aufgrund des eingeführten Anpassungsfaktors $\lambda_{s,3}$ nach Gleichung (7.6) ebenso weiter an. Unter der Annahme, dass die Charakteristik der bisher ermittelten schädigungsrelevanten Schwingspiele aus Verkehr in Zukunft unverändert bleibt, so kann davon ausgegangen werden, dass sich der ermittelte Vergleichswert von rund 0,45 nicht wesentlich ändert. Entsprechend würden jedoch eben solche Änderungen der Charakteristik der schädigungsrelevanten Schwingspiele zu einer Änderung des Verlaufes des ermittelten Vergleichswertes führen und können entsprechend identifiziert werden.

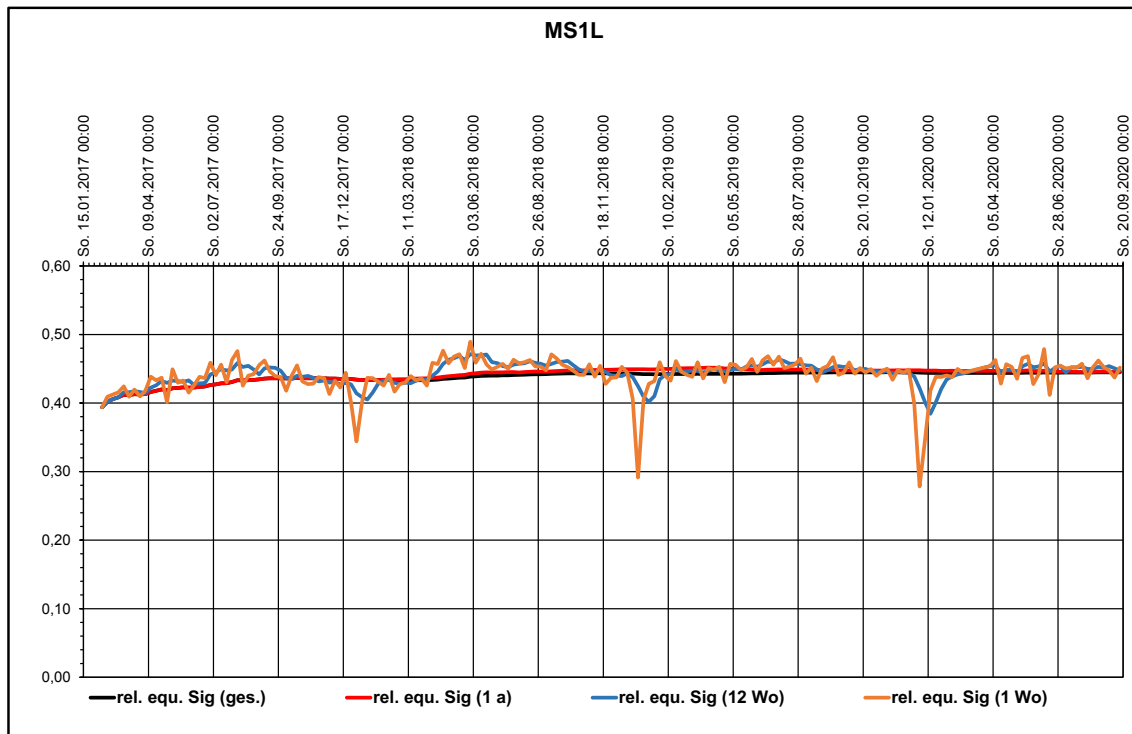


Bild 144: MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten im Verhältnis zu Vergleichswerten für verschiedene Betrachtungszeiträume

7.3.3 Ableitung von Statuskennwerten für die Ermüdungsbeanspruchungen aus Verkehr

Hinsichtlich der Definition von Statuskennwerten für die Ermüdungsbeanspruchungen aus Verkehr werden die ermittelten Verhältnismerte zwischen den aus den Messdaten berechneten schädigungsäquivalenten Schwingbreiten und dem ermittelten Vergleichswert aus dem Ansatz des Ermüdungslastmodells einschließlich den Beiwerten nach Norm verwendet. Für die Aufbereitung der Werte in der Web-Publikation (vgl. Absatz 7.3.2) werden zusätzlich zwei Niveauschwellen bei einem Wert von 0,80 (Gelb für 0,8 ELM3) und 0,90 (Rot für 0,9 ELM3 festgelegt).

8 Bauwerkskenndaten aus dem Sensornetz

8.1 Risse

Bild 146 zeigt den Messverlauf der Rissbreitenverläufe der Sensoren CCA3 (rot) und CC9F (Grün) beide am Querträger der Achse 40, CC8C (orange) am Endquerträger Achse 50 und CC29 (Gelb) an der Umlenkstelle. Es ist eine Korrelation mit der Außentemperatur festzustellen, deutlich am Sensor des Endquerträgers. Bei steigenden Temperaturen sind größere Rissbewegungen und bei abfallenden Temperaturen zu erkennen. Aufgetragen ist der Ausschlag des Sensors, da die Rissbreiten sehr gering sind und somit außerhalb des Messbereiches des Sensors liegen. Der Ausschlag entspricht nicht der tatsächlichen Rissbreite. Ein Jahresgang ist dennoch erkennbar und auch eine relativ konstante Rissbreite über die Zeit. Bild 145 zeigt die installierten Sensoren.

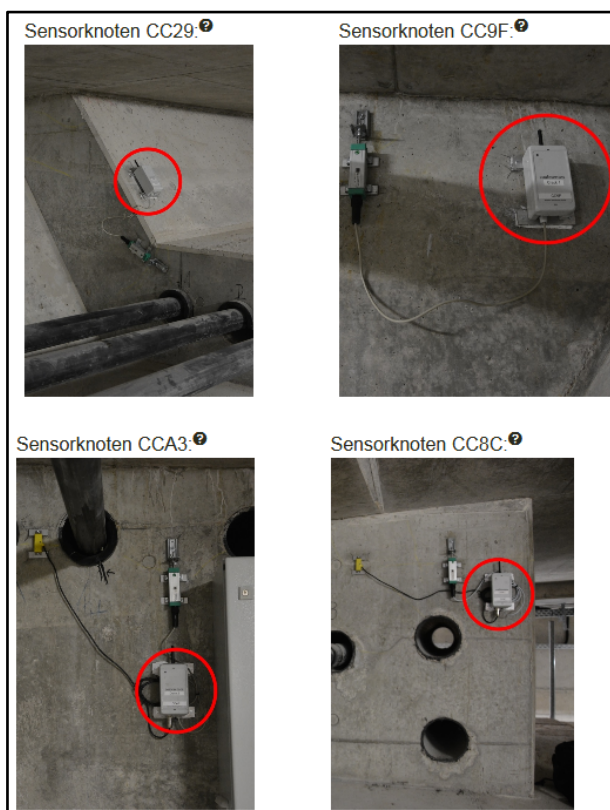


Bild 145: Darstellung der Sensoren CC29, CC9F, CCA3 und CC8C.

8.2 Neigung

Bild 147 zeigt die Neigung der Brücke etwa im Drittelspunkt des Randfeldes zwischen Achse 40 und Achse 50 in Längsrichtung über den Messzeitraum 2018 - 2020. Es ist zu erkennen, dass die Neigung

der Brücke mit fallenden Temperaturen sinkt. Es sind Schwankungen von circa 0,25 Grad zu erkennen.

8.3 Rissbreiten mittels Kraftsensoren

Bild 148 gibt die Federkraft der Sensoren, die ebenfalls wie die Wegsensoren entsprechend Bild 146 die Rissbreitenverläufe angeben, wieder. Aufgezeigt sind die Sensorknoten CCA3 (Rot) und CC8C (Orange). Oben ist der Messverlauf 2019 - 2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018 - 2019 dargestellt. Die Sensoren haben laut Beschreibung eine höhere Auflösung als die Wegsensoren (8.1). Der praktische Einsatz lässt jedoch keine Abhängigkeit von Temperatur oder anderen Parametern erkennen. Obwohl der Sensor kalibriert ist, gibt es keine Korrelation zwischen Kraftwert und Rissbreite. Der Einsatz dieser Sensoren bedarf weitergehender Untersuchungen im Labor.

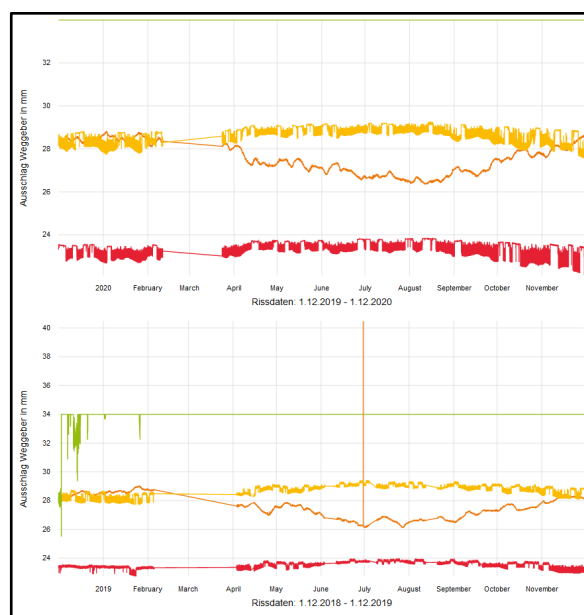


Bild 146: Rissbreitenverlauf über den Messzeitraum vom 01.12.2018 bis 01.12.2020. Aufgezeigt sind die Sensorknoten CCA3 (rot), CC8C (orange), CC29 (Gelb) und CC9F (Grün). Oben ist der Messverlauf 2019-2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018-2019 dargestellt.

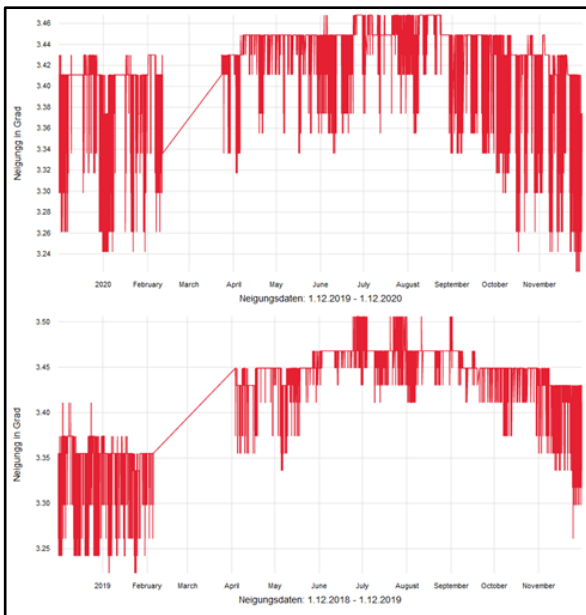


Bild 147: Neigung über den Messzeitraum 1.12.2018 bis 1.12.2020. Oben ist der Messverlauf 2019 - 2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018 - 2019 dargestellt.

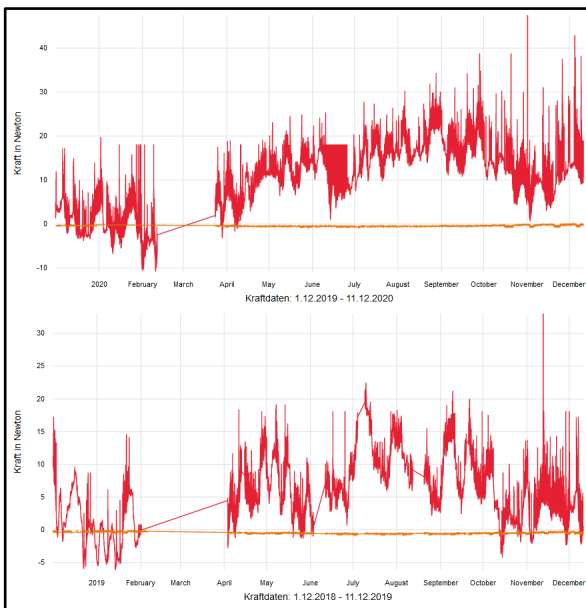


Bild 148: Rissbreitenverlauf der Sensoren CCA3 (Rot) und CC8C (Orange) aus Kraftsensoren über den Messzeitraum 1.12.2018 bis 1.12.2020

8.4 Temperaturen

Das Sensornetzwerk erfasst verschiedene Wetterdaten. Für die Prüfung der Ergebnisse wurden Wetterdaten von der nächstgelegenen Wetterstation am Flughafen Nürnberg zurate gezogen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die gemessenen Ergebnisse der

Wetterstation der Universität zu Lübeck mit den gemessenen Werten der Wetterstation am Nürnberger Flughafen korrelieren. Bild 149 zeigt einen Vergleich der Lufttemperatur und der Oberflächentemperaturen des Hohlkastens. Es ist zu erkennen, dass die Lufttemperatur deutlich höheren Schwankungen ausgesetzt ist und sich das Bauwerk verzögert an die durchschnittliche Außentemperatur anpasst.

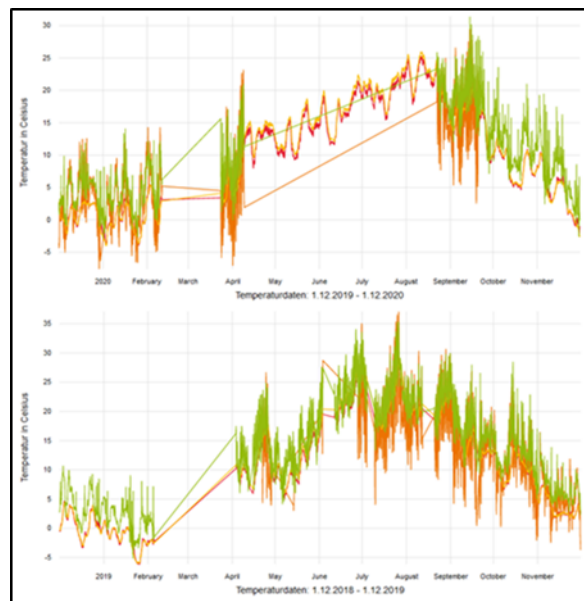


Bild 149: Lufttemperatur im Schatten CBF3 (Grün), Oberflächentemperatur Hohlkasten oben CBEB (Gelb), Oberflächentemperatur Hohlkasten unten CC14 (Rot) und Lufttemperatur der Wetterstation CBF4 (Orange). Oben ist der Messverlauf 2019 - 2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018 - 2019 da.

9 Referenzmöglichkeiten für einen Ergebnisvergleich der Kennwerte

Hinsichtlich der Analyse von Referenzmöglichkeiten zwischen dem Messsystem RTMS und den anderen Messsystemen wurden Neigungsmessungen am Lagerungspunkt Achse 40 sowie ermittelte Eigenfrequenzen des Bauwerkes untersucht. Die in Absatz 4 erläuterte Zeitsynchronisation zwischen den Messsystemen ist dabei von großer Bedeutung.

Im nachfolgenden Bild 150 sind für den 10.04.2018 berechnete Neigungen in Längsrichtung am Lagerungspunkt Achse 40 aus dem System RTMS und aus den Messsystemen der Firma Maurer aufgetragen. Es wird ersichtlich, dass die berechneten Werte aus dem System RTMS stets größer sind als die aus dem System Maurer. Die Ursache hierfür liegt im Ort der Erfassung der Neigung. Im System RTMS wird durch induktive Wegaufnehmer an drei Stellen zwischen Lagersockel und Überbau der Abstand zwischen Lagersockel und Überbau gemessen und daraus die Neigungsebene bestimmt. Im System Maurer erfolgt die Messung direkt am Lager.

In Bild 151 und Bild 152 sind Auszüge aus dem Gesamtverlauf, der in Bild 150 dargestellt ist. Es wird

dabei ersichtlich, dass die Zeitsynchronisation zwischen den Messsystemen zu einer synchronen Datenerfassung führt. Die lokalen Extrempunkte der Verläufe und auch die Nulldurchgänge liegen auf der x-Achse (Zeit) nahezu an gleicher Stelle.

Die Verwendung von in dieser Art erfassten Messdaten zur Schaffung von Redundanzen zum Beispiel für die Verkehrserkennung stellt sich damit hinsichtlich der Erfordernisse von zeitsynchronen Messdaten als unproblematisch dar.

In Bild 153 sind aus den Verdrehungen ermittelte Eigenfrequenzen dargestellt. Aus den Messdaten beider Systeme wurde hier durch eine FFT ein nahezu identisches Spektrum ermittelt. In Bild 154 ist zusätzlich das Frequenzspektrum für die Messstelle MS25 (Umlenksattel der externen Spannglieder) eingetragen. Während sich die Amplituden im Spektrum deutlich unterscheiden wird deutlich, dass im Frequenzbereich zwischen 3 und 4,5 Hz die Peaks nahezu die gleiche Lage aufweisen.

Es ist damit realisierbar, die Ermittlung der Eigenfrequenz des Bauwerkes und die daraus abgeleitete Einschätzung der Tragwerkssteifigkeit (vgl. Absatz 6.4.2) neben der Auswertung der Beschleunigungsmessung an MS25 redundant auch aus den Messungen der Lagerverdrehungen, sowohl innerhalb des System RTMS als auch aus dem System Maurer zu realisieren. In Bild 155 ist dies nochmals grafisch dargestellt.

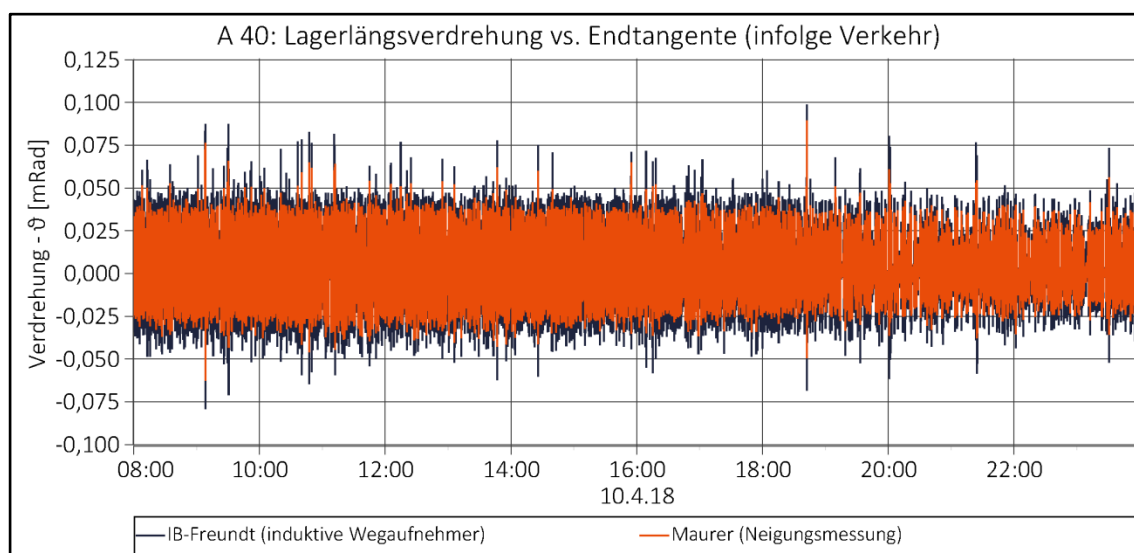


Bild 150: Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 16 Stunden

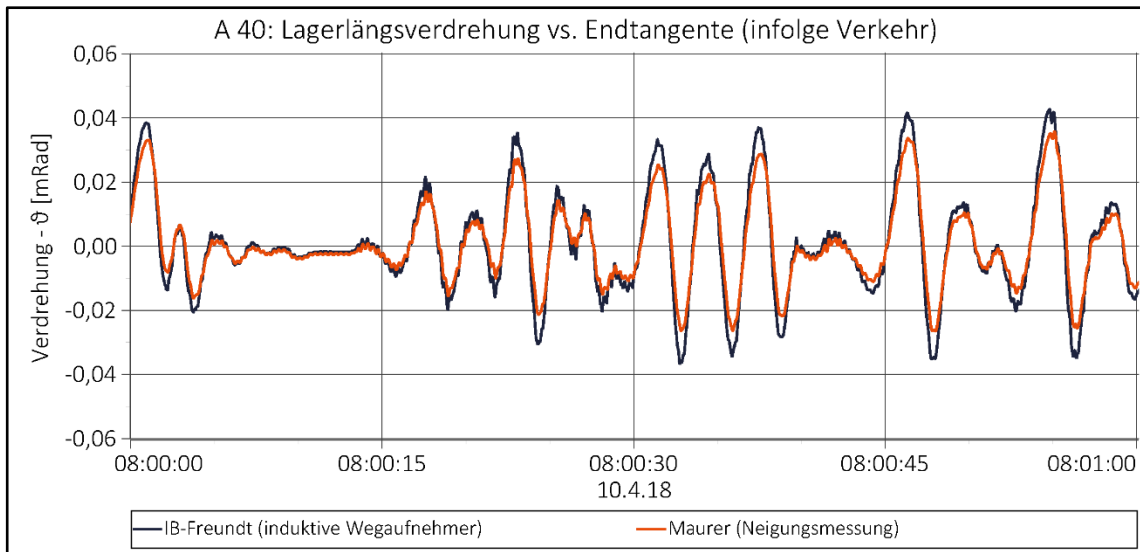


Bild 151: Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 1 Minute

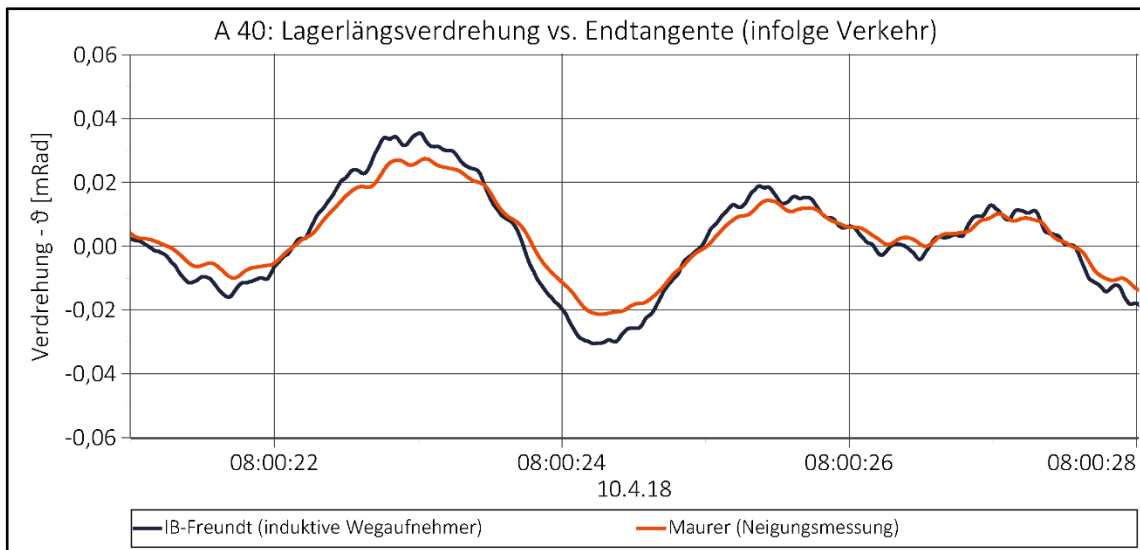
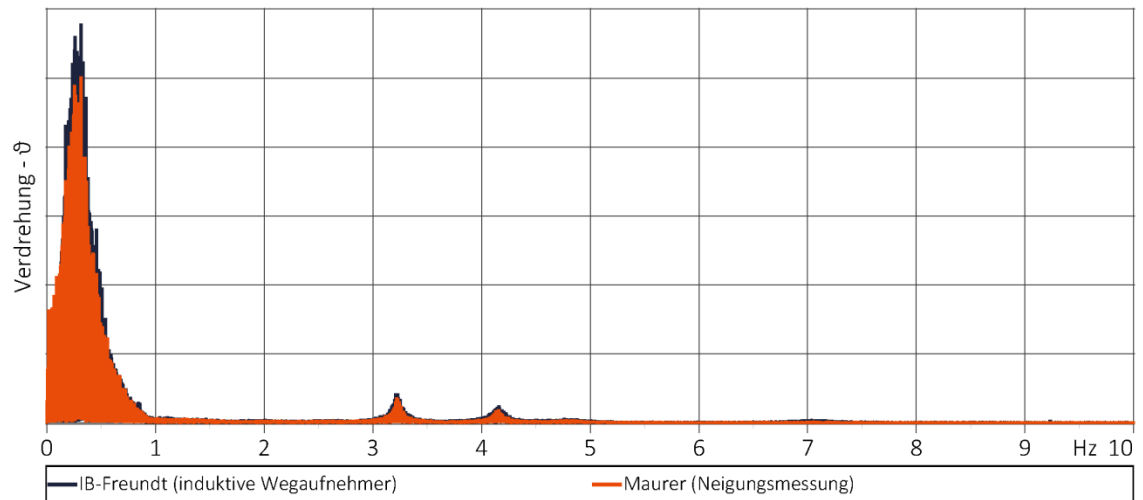
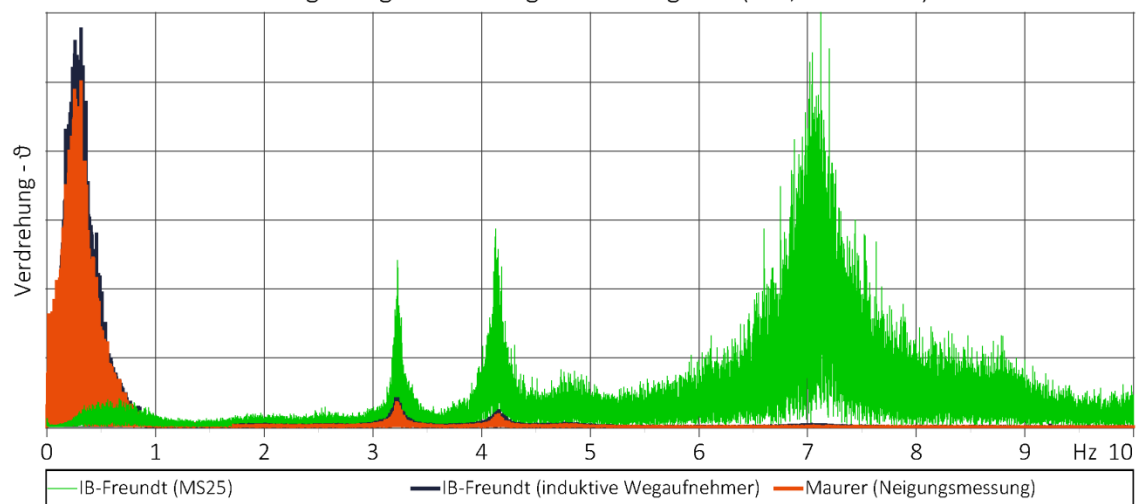


Bild 152: Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 7 Sekunden

A 40: Lagerlängsverdrehung vs. Endtangente (FFT, 10.4.2018)

**Bild 153:** Eigenfrequenzen aus Überbauverformung

A 40: Lagerlängsverdrehung vs. Endtangente (FFT, 10.4.2018)

**Bild 154:** Eigenfrequenzen aus Überbauverformung und Beschleunigungsmessung am Umlenksattel

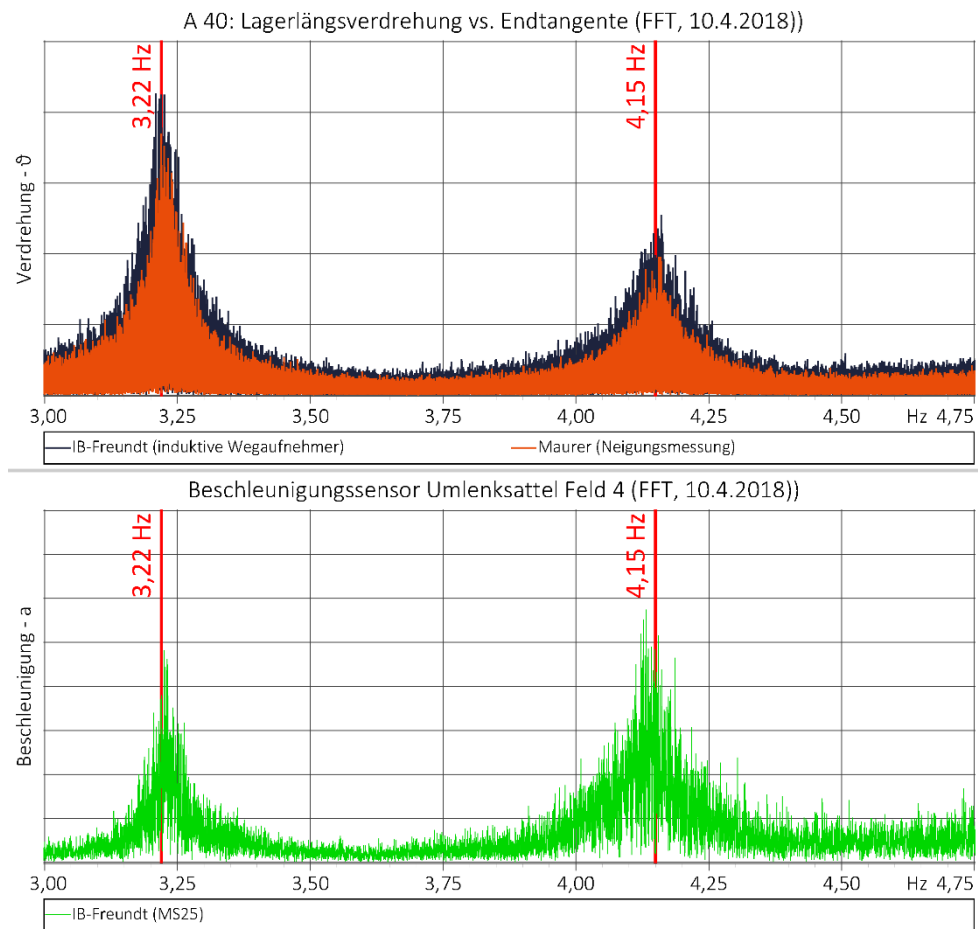


Bild 155: Redundanzen für ermittelte Eigenfrequenzen

10 Sensorentwicklung

10.1 Erstellung eines Konzeptes für einen Neigungssensor

10.1.1 Prototyp Neigungssensor Segeberg

Das drahtlose Sensornetzwerk der Universität zu Lübeck wurde erstmals 2012 mit einem Sensorknoten zur Überwachung der Brückenneigung ausgestattet. Dabei wurde die in Bild 156 gezeigte Hardware verwendet.

Der verwendete Sensor konnte mit der auf den Sensorknoten zur Verfügung stehenden Hardware betrieben werden.

Das IN10 stellt eine Erweiterungsplatine zum Anschluss eines geräteinternen Inklinometers dar. Es bietet eine dreiachsige Neigungsmessung auf Basis der MEMS-Technologie mit einer Auflösung von $0,0055^\circ$. Damit markiert dieser Neigungssensor das obere Genauigkeitslimit von digitalen Neigungssensoren, die mit einer Systemspannung von 3,3 V arbeiten können, und wurde daher für den Einsatz im Projekt ausgewählt.

Im Laufe der Erprobung hat sich jedoch herausgestellt, dass das Inklinometer eine Genauigkeit von nur $\pm 0,1^\circ$ erreicht, da offenbar die interne Temperatur- und Spannungskompensation keine genaueren Ergebnisse ermöglicht.

Dieses Ergebnis lässt das Inklinometer retrospektiv als nur bedingt zur Neigungsüberwachung im Bauwesen geeignet erscheinen.

Aufgrund dieser in Segeberg gesammelten Erfahrungen war es erforderlich das Konzept des Neigungssensors grundlegend zu überdenken.

Bild 157 zeigt die Anbringung des Sensors an der Brücke in Bad Segeberg. Da der Sensor alle drei Achsen erfasst, konnte er an einem einfachen Brückenpfeiler angebracht werden.

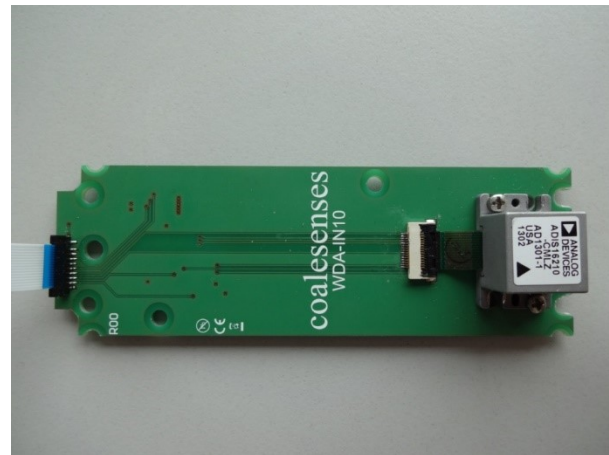


Bild 156: Ursprüngliche Version des Neigungssensor der UZL (IN10)



Bild 157: Anbringung des Neigungssensors an der Fahrbahnüberquerung in Segeberg

10.1.2 Konzeption Neigungssensor Nürnberg

Der für die Intelligente Brücke im digitalen Testfeld Autobahn konzipierte Neigungssensor ist in Bild 158 zu sehen.

Ebenso wie die anderen Sensoren des in Nürnberg installierten Sensornetzes besteht der Neigungssensor aus vier Hauptkomponenten. Dazu zählt eine Energieversorgung (Power Supply), eine Hauptplatine (Main Board), eine Erweiterungs-platine (Expansion Board) und die tatsächliche Sensorhardware (External Sensor).

Damit die Sensorknoten weiterhin miteinander kompatibel bleiben, wurde derselbe Typ Sensorknoten verwendet, auf dem auch die übrigen Sensorknoten basieren. Der Unterschied besteht folglich in Teilen der verwendeten Hardware und einer angepassten Software.

10.1.2.1 Anforderungen

Die in Bad Segeberg verwendete Technologie führte nicht zu einem befriedigenden Ergebnis. Die Messgenauigkeit des verwendeten Inklinometers war nicht ausreichend.

Ebenso war die Qualität der verwendeten Hardware nicht ausreichend, da das Gerät durch diverse Faktoren in den Messvorgängen gestört wurde und nur sehr ungenaue Ergebnisse lieferte. Folglich ist es nötig, Neigungsmessungen von einer ursprünglichen Genauigkeit von ca. $0,1^\circ$ auf eine deutlich höhere Genauigkeit zu verbessern.

Darüber hinaus ist es nicht erforderlich mehr als eine Achse zu messen. Lediglich die Neigung der Brücke in Stützrichtung ist von Interesse. Dies ermöglicht die Verwendung einer deutlich hochwertigeren Hardware.

Der Sensor muss sowohl bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt als auch bei hohen Temperaturen zuverlässig arbeiten.

Zuletzt muss der Neigungssensor über eine ausreichend hohe Messkapazität verfügen. Dabei ist nicht zu erwarten, dass sich die Brücke um mehr als 5° neigen wird.

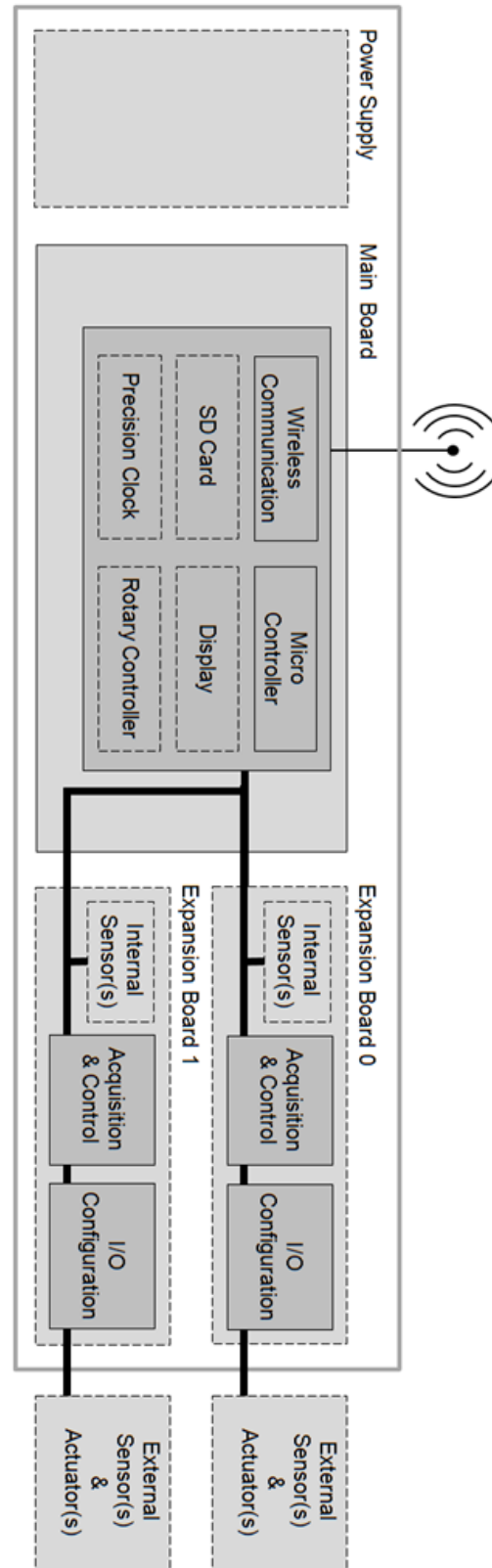


Bild 158: Schematische Darstellung des Neigungssensors an der Intelligenten Brücke

10.1.3 Prototyp Neigungssensor Nürnberg

Für den Betrieb an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn hat die UzL folglich einen Neigungssensor vom Typ KB-5DB der Firma Preusser Messtechnik ausgewählt.

Bild 159 zeigt die verwendete Hardware. Die Gerätespezifikation lautet wie in Tabelle 11 dargestellt. Die Spezifikation erfüllt die Anforderungen am Standort der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Es ist nicht davon auszugehen, dass die Temperatur im Hohlkasten der Brücke unter -20°C fällt oder $+60^{\circ}\text{C}$ übersteigt. Sollten dennoch Temperaturen außerhalb des zulässigen Bereichs auftreten, wird die Hardware in der Regel nicht geschädigt, sondern sie schaltet sich ab.

Da die vorgesehenen Batterien eine Spannung von 3,6V zur Verfügung stellen, fällt diese genau in das angegebene Intervall von 2–5 Volt, welches der physikalische Sensor für den Betrieb benötigt. Der Sensorknoten kann den Sensor folglich betreiben.

Bild 160 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise und des Aufbaus des verwendeten, hochwertigen Inklinometers. Abgesehen vom Anschlusskabel, ist es 24 cm hoch, hat einen Durchmesser von 3,4 cm und wiegt 1,3 kg.

Der Sensor kann nur in x-Richtung messen. Die y-Richtung gilt lediglich für eine komplexere Sensorvariante namens KB-EB.

Bild 160 (unten rechts) zeigt den Aufbau der Unterseite des Sensors. Dieser wird über zwei Schrauben an eine eigens angefertigte Montageplatte aus Aluminium geschraubt. Gemäß Konzeption, wird diese Platte an eine weitere Platte aus Aluminium geschraubt, so dass der Sensor wieder rückmontiert werden kann. Die untere Platte wird dabei mit einem flexiblen Kleber an den darunterliegenden, geputzten Stahlbeton geklebt.

Parameter	Wertebereich
Messrichtungen	1
Kapazität	$\pm 5^{\circ}$
Nennleistung	1 mV/V ($2000 \cdot 10^{-6}$)
Nonlinearität	0,5 % RO
Temperaturbereich	-20 bis $+60^{\circ}\text{C}$
Widerstand	350 Ohm
Betriebsspannung	2,0 V – 5,0 V
Gewicht	1,3 kg

Tabelle 11 Spezifikationen des KB-5DB Neigungssensors



Bild 159: Darstellung des KB-5DB Neigungssensors

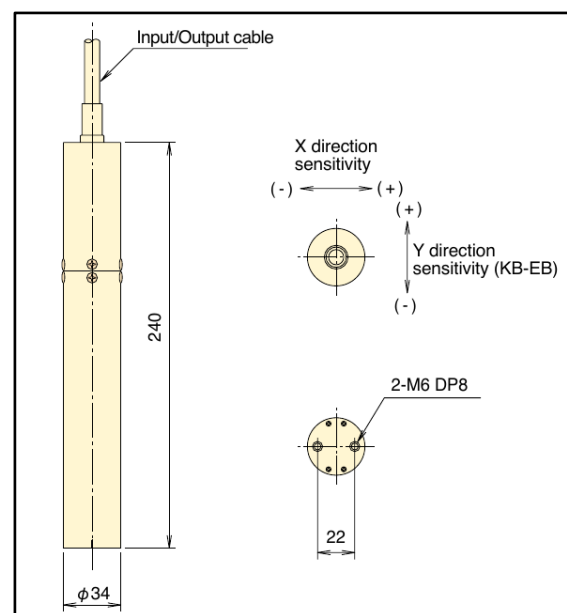


Bild 160: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Neigungssensors KB-5DB

10.1.3.1 Gehäuse

.Das Gehäuse an einer Brücke in Bad Segenberg ist deutlich höher, sodass ein auf der Platine angebrachter Neigungssensor problemlos eingebaut werden kann. Da der KB-5DB aufgrund seiner Größe unmöglich intern verbaut werden konnte, war es möglich die Gehäusegröße deutlich zu reduzieren. Bild 161 zeigt einen Vergleich der Gehäusegrößen.

Der neue Sensor ist dabei modular über einen Lumberg 0305-08 Stecker am Gehäuse montiert worden. Zu Wartungszwecken kann dieser jederzeit abgebaut werden.



Bild 161: Vergleich der verschiedenen Gehäusegrößen, Gehäuse an der Intelligenten Brücke im digitalen Testfeld Autobahn (links), Gehäuse an einer Brücke in Bad Segenberg (rechts)

10.2 Entwicklung eines Neigungssensorknotens für den Ergebnisvergleich

Um Daten für einen sinnvollen Ergebnisvergleich von Neigungsdaten infolge Verkehr gewinnen zu können, ist es erforderlich, den entwickelten Sensorknoten mit einer deutlich höheren Frequenz (mehr als 600 Hz) zu betreiben als ursprünglich geplant. Herkömmliche Sensorknoten messen dabei mit einer maximalen Frequenz von 1/60 Hz– für höhere Frequenzen stehen noch keine Batterien zur Verfügung.

Um Vergleichsdaten zu erhalten, gilt es nach alternativen Möglichkeiten zu suchen. Zur Messung von Neigungsänderungen infolge Verkehr ist eine Frequenz von 600 Hz erforderlich.

10.2.1 Maximale Leistungsfähigkeit der Sensorknoten Hardware

Um herauszufinden wie hoch die Messfrequenz gesetzt werden kann, gilt es herauszufinden, mit welcher maximalen Frequenz ein Sensorknoten messen kann.

Die Hardware lässt dabei eine theoretische Abtastrate von 2000 Hertz zu. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Sensorknoten eine Mittelung von erfassten Werten durchführt, was die effektive Messrate herabsetzt. Um bessere Messergebnisse erzielen zu können, wird so beispielsweise pro Messpunkt drei Mal gemessen und eine Filterfunktion verwendet, um Ausreißer zu entfernen.

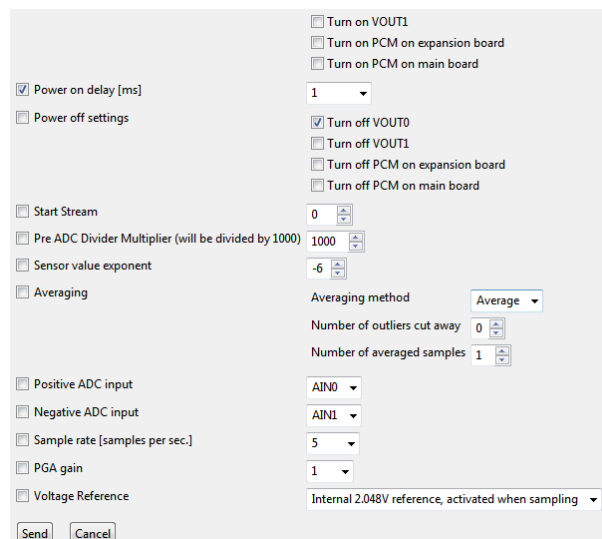


Bild 162: Konfigurationsmöglichkeiten für den Neigungssensorknoten

Bild 162 zeigt dabei die verschiedenen möglichen Konfigurationsmöglichkeiten auf. Diese lassen diverse Verarbeitungsschritte auf dem Sensorknoten zu, sodass möglichst wenige Daten transportiert werden müssen. Der Abtransport von Daten aus einem drahtlosen Sensornetzwerk ist für ca. 99 % des Energieverbrauchs verantwortlich.

10.2.2 Kalibrierung des Neigungssensors

Bild 162 zeigt die Genauigkeit des Gerätes (Sensor value exponent), die Anzahl der gemessenen Samples pro Sekunde (sample rate), die verwendete Messpins (positive/negative ADC input) und Möglichkeiten zur Vorverarbeitung (Averaging).

Zur Erkennung von gemessenen Ausreißern und deren Entfernung, sind mindestens drei Messungen pro Messpunkt erforderlich. Dies führt zu einer Drittelung der ursprünglichen maximalen Messrate von ca. 2000 Hertz.

Folglich ist der Sensorknoten theoretisch in der Lage mit einer Rate von 666 Hertz zu messen.

10.2.3 Übertragungsbandbreite im Sensornetzwerk

Theoretisch sind die WLAN-Module der Sensorknoten dazu in der Lage mit einer Rate von 250 kbit/s zu senden. Geht man davon aus, dass ein Messpunkt ca. zwei Byte Daten verbraucht, so würden bei einer Messfrequenz von 666 Hertz pro Sekunde 1332 Byte/Sekunde anfallen. Diese Datenmenge ist deutlich kleiner als das gesetzte Limit von 250 kbit/s.

Allerdings sind so hohe Datenmengen dennoch problematisch für das Sensornetzwerk. Da es sich um ein Multi-Hop-Netzwerk handelt, müssen die anfallenden Daten über mehrere Sensorknoten bis zum Gateway geleitet werden. Da die übrigen Knoten nur einmal alle fünf Minuten aktiv sind, kann der Abtransport der anfallenden Daten sehr viel Zeit in Anspruch nehmen, was zu vollständigen Messausfällen und Datenverlust führen würde, da die internen Gerätespeicher volllaufen.

10.2.4 Flaschenhals durch Baudraten

Damit die Daten aus dem Sensornetzwerk ins Internet gelangen können, ist das Gateway an das NAS mittels serieller Schnittstelle angeschlossen.

Eine serielle Schnittstelle hat die Maximalgeschwindigkeit der Datenübertragung. Im Fall des Sensornetzwerks beträgt dies 9600 Byte pro Sekunde. Somit ist das serielle Kabel theoretisch in der Lage die anfallenden Daten einer Hochfrequenzmessung abzutransportieren.

10.2.5 Flaschenhals durch freien Gerätespeicher

Jeder Sensorknoten verfügt über einen beschreibbaren Speicher fester Größe. Dies sind 64 Kilobyte. Davon wird jedoch ca. die Hälfte für den Betrieb des Sensorknotens und die Koordinierung von Messungen benötigt. Damit bleiben noch ca. 32 Kilobyte zur Speicherung von Daten auf dem Sensorknoten. Diese können genutzt werden, um aufgenommene Daten zu puffern, sollte es nicht möglich sein, diese schnell abzutransportieren. Da die Knoten nur einmal alle fünf Minuten Daten an das Gateway senden, ist davon auszugehen, dass nur Daten erfasst

werden können, bis der interne Speicher des Gerätes voll ist. Dies ist nach 12 – 24 Sekunden der Fall und entspricht einer oberen Grenze für die Messdauer einer Hochfrequenzmessung.

10.2.6 Flaschenhals durch Batterieleistung

Damit die Batterien der Sensorknoten nicht binnen kürzester Zeit entleert werden, darf ein Sensorknoten, welcher mit hoher Frequenz misst, nur einen Bruchteil der Zeit aktiv sein und muss die übrige Zeit in einem Standby-Zustand verbringen.

Eine Messfrequenz von 666 Hertz ist dabei um einen Faktor von 39960 größer als ursprünglich maximal geplant. Würde man einen Sensorknoten dauerhaft so betreiben, so würde sich die Batterie-laufzeit von 4 Jahren auf 0,0365 Jahre reduzieren. Das entspricht lediglich noch 13,3 Tagen. Es gilt folglich Strategien zu entwickeln, um damit diesen Herausforderungen zu begegnen. Eine Hochfrequenzmessung der Dauer von 12 Sekunden verbraucht so viel Energie wie 22 Tage dauerhaft mit niedriger Frequenz messen.

10.2.7 Messkonzept

Damit die Batterieleistung des Sensornetzes nicht zu sehr in Mitleidenschaft gezogen wird, ist es nötig, Hochfrequenzmessungen nur sehr selten durchzuführen. Eine Frequenz von höchstens einem Mal alle 60 Tage erscheint hierbei sinnvoll, damit die Laufzeit der Batterien nicht unter drei Jahre fällt.

Zusätzlich sollten diese sehr seltenen Messintervalle so gewählt sein, dass sinnvolle Daten erfasst werden. Optimal wäre es, wenn ein Schwertransport erkannt und dann gemessen werden kann.

Da auf dem Sensorknoten ein Beschleunigungssensor verbaut ist (vgl. Bild 163) kann dieser genutzt werden, um zu erkennen, wann die Brücke beispielsweise durch die Überfahrt eines Schwertransporters in Schwingung versetzt wird. Von dem Zeitpunkt des Erkennens an, kann für bis zu 24 Sekunden gemessen werden, um Referenzdaten für die Neigung der Brücke zu erfassen. Diese werden im Anschluss über einen längeren Zeitraum abtransportiert.

Der geräteinterne Speicher ist hierbei der kleinste Flaschenhals. Dieser kann durch das Konzept des Sensornetzwerkes nicht umgangen werden, ohne die grundlegende Architektur (kabelloser Betrieb) zu verändern. Hierfür ist es jedoch nötig, geeignete Schwellwerte zu erfahren, welche eingesetzt werden können, um das Inklinometer in einen hochfrequenten Messzustand zu versetzen.

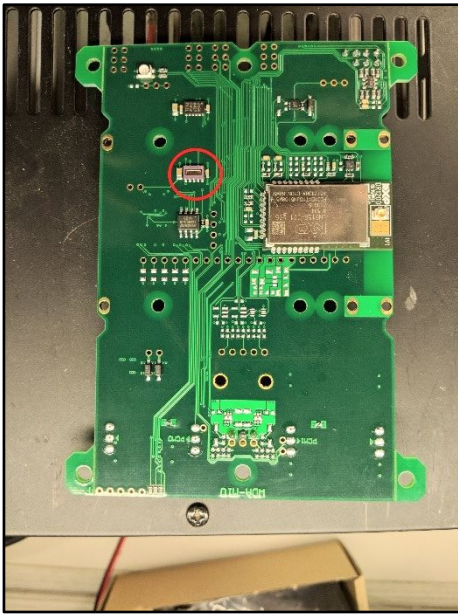


Bild 163: Beschleunigungssensor auf dem M10-Board

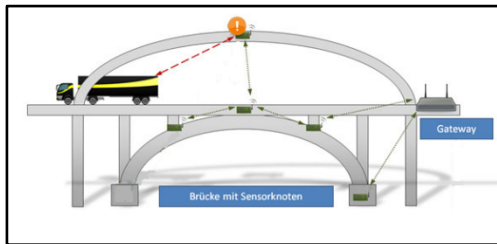


Bild 164: Schematische Darstellung eines hochfrequenten Messvorgangs

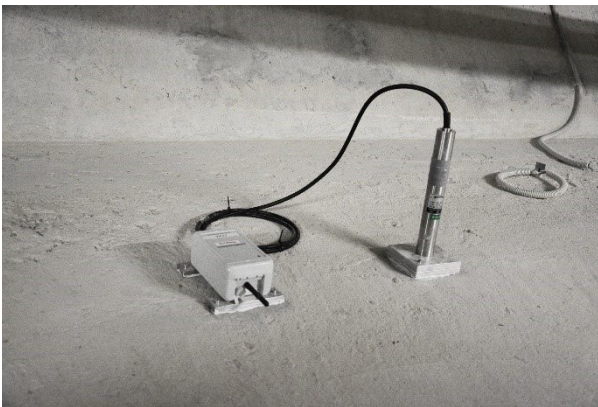


Bild 165: Standort und Anbringungsart des weiter entwickelten Inclinometers an der Intelligenten Brücke in Nürnberg

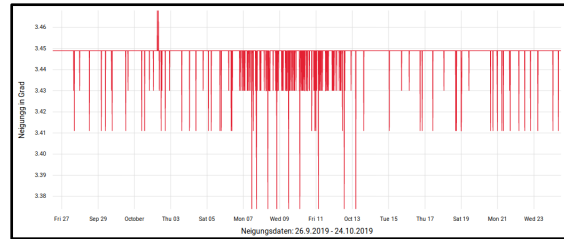


Bild 166: Gesamelte Sensordaten des neu entwickelten Inclinometers im Testbetrieb

Bild 164 zeigt schematisch, wie ein hochfrequenter Messvorgang abläuft. Sobald ein Schwertransport die Brücke überfährt, wird diese in Schwingung versetzt. Durch die Intensität der Schwingung wird ein im Sensorknoten hinterlegter Schwellwert für die Beschleunigung überschritten und das Gerät wechselt in einen aktiven, hochfrequenten Messzustand. Ab diesem Zeitpunkt können für ca. 12 – 24 Sekunden Neigungsdaten unter Last erfasst werden. Diese werden via Multi-Hop Technologie an das Gateway und schließlich an die Datenbank geleitet.

10.3 Testbetrieb des entwickelten Neigungssensorknotens vor Ort

Um sicherzustellen, dass das für die Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn angefertigte Konzept für den Neigungssensor und die verwendete Hardware funktionieren, wurde der Neigungssensor bereits zum Installationszeitpunkt mit verbaut. Allerdings misst der Sensorknoten lediglich mit einer Rate von einmal pro Minute.

Diese Rate wurde am 11. 11. 2018 auf einmal alle fünf Minuten herabgesetzt, um einen nahtlosen Betrieb des Sensornetzwerkes über die übrige Projektlaufzeit zu gewährleisten.

Bild 165 zeigt den Installationsort des neu entwickelten Neigungssensors in der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn.

10.4 Evaluation von Performanz sowie Energieverbrauch des entwickelten Sensorknotens

Das Sensornetzwerk inklusive Inclinometer wird nun seit ca. 3,5 Jahren betrieben und kann Neigungsdaten sammeln.

Bild 166 zeigt die über den gesamten Messzeitraum erfassten Sensordaten des Inclinometers. Es ist ein Jahresverlauf der Brückenneigung zu erkennen. Es

ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Daten mit einer sehr geringen Frequenz aufgenommen wurden. Folglich sind diese nur bedingt als Redundanz einsetzbar.

Dennoch kann es sinnvoll sein, die Daten zu verwenden, um Rückschlüsse auf die temperaturbedingten Verformungen der Brücke zu ziehen. Es ist möglich, die temperaturbedingten Verformungen aus hochfrequenten Messungen herauszurechnen, um so eine höhere Genauigkeit erzielen zu können.

Hochfrequente Messungen mit einem drahtlosen Sensornetzwerk haben sich im Verlauf des Projektes als nicht sinnvoll umsetzbar herausgestellt. Eines der Hauptprobleme sind dabei die Kalibrierung der Sensorknoten und der nötige Testbetrieb bei einer hohen Frequenz. Um sinnvolle Daten mit einer hohen Verlässlichkeit produzieren zu können, sollte der Neigungssensor mehrere Tage und unter verschiedenen Umweltbedingungen betrieben werden. Diese Anpassung an die veränderlichen Umweltparameter muss für jeden Standort erneut durchgeführt werden und sollte beispielsweise die Temperaturdaten eines ganzen Jahres widerspiegeln. Mit der zur Verfügung stehenden Batterieleistung ist dies nicht sinnvoll umsetzbar.

Eine Alternative wäre der Betrieb mittels Netzstrom, welche dem zugrundeliegenden Messkonzept widerspricht. Es ist bereits bekannt, dass eine hochfrequente Messung der Neigung mit kontinuierlicher Stromversorgung möglich ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Neigungssensor grundsätzlich geeignet ist, um langfristige Veränderungen an der Neigung eines Bauwerks zuverlässig zu erkennen. Als Redundanz für Hochfrequenzmessungen sind drahtlose Technologien jedoch ungeeignet. Hierfür ist eine deutlich stärkere Spannungsversorgung nötig. Diese könnte beispielsweise durch Solarenergie gewährleistet werden. Dies muss jedoch bei der initialen Planung berücksichtigt werden.

11 Automatisierung Vor-Ort

11.1 Vorbemerkungen

In den vorhergehenden Absätzen wurden die grundsätzlichen Methoden der Auswertung der aufgezeichneten Messdaten für verschiedene Zielstellungen beschrieben. Die dargestellten Auswertungen werden im aktuellen Projektbearbeitungsstand vollständig vor Ort realisiert. In den nachfolgenden Absätzen werden hierzu Erläuterungen geben.

Im Absatz 11.2 werden zunächst die umgesetzten Automatisierungen für das System RTMS beschrieben. In Absatz 11.3 wird auf das Sensornetz eingegangen und Absatz 11.4 beinhaltet Erläuterungen zu den auflaufenden Datenmengen.

11.2 Messsystem RTMS

11.2.1 Ablauf der Auswertungen vor Ort

Der Gesamtablauf der automatisierten Datenverarbeitung Vor-Ort durch das System RTMS ist zusammen mit Angaben zur Häufigkeit der durchgeführten Auswertungen in nachfolgendem Bild 167 dargestellt.

Unabhängig vom Ablauf des Hauptprogramms erfolgt eine separate Verarbeitung der aufgezeichneten Videodaten. Hierzu wird durch das Videosystem automatisiert die gesamte Aufzeichnung eines Tages in einem proprietären Datenformat über eine FTP-Schnittstelle an den Messrechner RTMS übertragen. Diese Videodaten werden anschließend komprimiert und stehen dann für die Weiterarbeitung im eigentlichen Hauptprogramm zur Verfügung.

Im Programmablauf erfolgt nach dem Start zunächst eine Kontrolle der Messdaten selbst. Diese Kontrolle besteht darin, dass für einzelne Messdaten, die Messdaten aus einer Stunde enthält, zunächst pro Messkanal die Maximal-, Minimal und Mittelwerte ermittelt werden. Für die einzelnen Kanäle sind Kontrollwerte definiert. Einerseits wird geprüft, ob die Messwerte betragsmäßig oberhalb eines definierten Wertenniveaus liegen. Hierdurch wird vordergründig eine mögliche Störung eines Sensors geprüft. Des Weiteren wird pro Messkanal überprüft, ob der Abstand zwischen dem Mittelwert und dem Maximal- bzw. Minimalwert unterhalb einer definierten Grenze liegt. Durch diese Prüfung wird die im bisherigen Projektverlauf bereits zweimal eingetretene (und behobene) Störung der induktiven Wegaufnehmer in Form eines Festhängens überprüft. Zusätzlich zu diesen Prüfungen der aufgezeichneten Messwerte erfolgt eine Kontrolle der

Struktur der Messdateien hinsichtlich enthaltener Messkanäle und Bezeichnungen und der Messdauer. Durch diese Prüfung wird ein Fehler in den Dateien abgefangen, der nach dem Neustart des Messrechners nach einem Stromausfall auftritt. Werden entsprechende Fehler in den Messdaten erkannt, so wird eine entsprechende Statusinformation programmintern erzeugt und nach Durchlauf des Programms sowohl an die Web-Publikation übertragen als auch unabhängig davon eine Information per E-Mail versendet. Für den Regelfall, dass durch die Überprüfung der Messdaten keine Fehler festgestellt werden, wird ebenfalls eine entsprechende Statusinformation programmintern erzeugt und nach Durchlauf des Programms an die Web-Publikation übertragen.

Im nächsten Schritt des Programmablaufes erfolgt die Verkehrserkennung anhand der Messdaten mit den in Absatz 5 beschriebenen Methoden. Die Daten der erkannten Fahrzeuge werden in verschiedenen Datenstrukturen zunächst programmintern ablegt. Anschließend erfolgen zunächst verschiedene Aufbereitungen der ermittelten Fahrzeugdaten für die Bereitstellung von Informationen auf der Statusseite der Web-Publikation.

In den nächsten Schritten des Programmablaufes erfolgen die Auswertungen der Messdaten hinsichtlich ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln (vgl. Absatz 7.3), Eigenfrequenzen (vgl. Absatz 6) und statischen Beanspruchungen aus Verkehr (vgl. Absatz 7.2). Die ermittelten Ergebnisse werden in verschiedenen Datenstrukturen zunächst programmintern ablegt. Anschließend erfolgen verschiedene Aufbereitungen der Daten für die Bereitstellung von Informationen auf der Statusseite der Web-Publikation sowie für die Übertragung von detaillierten Daten an die Web-Publikation.

Anschließend erfolgt eine Synchronisation der ermittelten Verkehrsdaten, genauer der Datensätze der erkannten Fahrzeuge, mit den Videodaten. Dieser Schritt wird lediglich einmal pro Tag durchgeführt, da die Videodaten nicht permanent, sondern täglich vom Videosystem übertragen und anschließend aufbereitet werden. Die Synchronisation erfolgt anhand der Zeitinformation in den Fahrzeugdaten. Ab einem definierbaren Wert des ermittelten Gesamtgewichtes und/oder ab einem definierbaren Typencode des Fahrzeuges werden aus den Videos Bilddateien erzeugt und in verschiedenen Datenstrukturen zunächst programmintern ablegt. Anschließend erfolgt eine Aufbereitung der verschnittenen Daten (Daten der erkannten Fahrzeuge mit Videoinformationen in Form von Bildern) und die Übertragung der Daten an die Web-Publikation. Am Ende des Programmablaufes werden verschiedene

Statusinformationen zusammengestellt und diese sowohl an die WebPublikation übertragen als auch im Fall von erkannten Fehlern im Programmablauf eine entsprechende Fehlermeldung per E-Mail versendet.

Die in Bild 167 eingetragenen Punkte mit unterschiedlichen Farben verdeutlichen die Häufigkeit der Produktion von Daten.

Die Aufbereitung der Videodaten erfolgt einmal pro Tag. Das Hauptprogramm wird alle 72 Minuten gestartet. Der Hintergrund für die gewählte Zeit ist, dass die Messdaten durch die Messsoftware rund alle 60 Minuten auf dem Messrechner abgespeichert werden. Um im Gesamtablauf keine häufigen oder dauerhaften Kollisionen zwischen der Speicherung der neu auflaufenden Messdaten durch die Messsoftware und der Auswertung der Messdaten durch das Hauptprogramm zu erzeugen, wurde diese Zeit gewählt. Damit wird das Hauptprogramm 20-mal pro Tag gestartet. Die beschriebenen Schritte der Datenauswertung werden in jedem Programmablauf realisiert.

Die Übertragung von Ergebnisdaten an die Web-Publikation erfolgt jedoch in unterschiedlichen zeitlichen Abständen. Die Ergebnisse der Datenkon-

trolle, kumulierte Zahlenwerte aus der Verkehrserkennung sowie die Ergebnisse der Ermittlung der Eigenfrequenzen und der daraus abgeleiteten Statuswerte des Bauwerkswiderstandes werden ebenso wie grundsätzliche Statusinformationen in jedem Programmdurchlauf an die Web-Publikation übertragen. Hinsichtlich der ermittelten Werte der statischen Beanspruchungen (charakteristische Werte) erfolgt einmal pro Tag eine vollständige Analyse der Daten und eine anschließende Übertragung der Ergebnisse an die Web-Publikation. Der Hintergrund ist dabei, dass für diese Analysen eine gewisse Menge an neuen Messdaten vorhanden sein muss. Hinsichtlich der Auswertung von ermüdungsrelevanten Beanspruchungswechseln erfolgt einmal pro Woche eine vollständige Analyse der Daten und eine anschließende Übertragung der Ergebnisse an die Web-Publikation. Auch hier ist eine gewisse Menge an neuen Messdaten erforderlich, um sinnvolle neue Ergebniswerte zu ermitteln. Die Übertragung der vollständigen Verkehrsdaten einschließlich der verschnittenen Videoinformationen erfolgt einmal pro Tag. Aufgrund der erforderlichen Übertragung der Videodaten vom Videosystem und der Aufbereitung dieser Daten kommt es hierbei zu einer „Verzögerung“ von einem Tag.

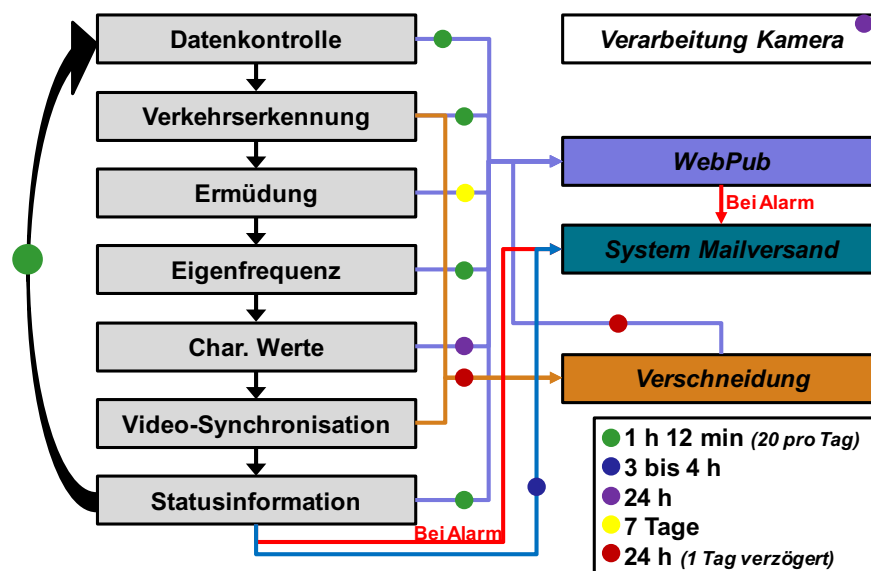


Bild 167: Ablaufdiagramm der automatisierten Datenverarbeitung des Systems RTMS

11.2.2 Datenmanagement systemintern

Sowohl im Zuge der im vorhergehenden Absatz beschriebenen automatisierten Vor-Ort Auswertung der Messdaten als auch vorab im Zuge der Abspeicherung der Messdaten durch die Messsoftware laufen eine Vielzahl von Daten auf, die innerhalb des Messsystems RTMS in geeigneter Weise gehalten werden müssen.

Durch die Messsoftware wird alle rund 60 Minuten ein neuer Datensatz mit aufgezeichneten Messdaten erzeugt. Diese Daten in Form von drei Dateien werden in einem definierten Ordner auf dem Messrechner abgespeichert.

Die Auswertungen der Messdaten führen zu einer Vielzahl verschiedener Ergebnisdaten. Diese werden in verschiedenen Datenformaten (Textdateien und Binärdateien) auf dem Messrechner gespeichert.

Im Zuge der Übertragung von Ergebnissen an die Web-Publikation erfolgen unterschiedliche Aufbereitungen der Ergebnisdaten, um diese in den definierten Datenbanken abzulegen. Hierbei erfolgt eine vollständige Spiegelung der an die Web-Publikation übertragenen Daten auf dem Messrechner. Dies gewährleistet, dass einerseits auftretende Fehler in der Datenübertragung zum Beispiel aufgrund von Störungen in der Internetanbindung abgefangen werden können und andererseits ein vollständiger Reset der Datenbanken der Web-Publikation realisiert werden kann.

11.2.3 Datensicherung

Die Sicherung der im Messsystem RTMS auflaufenden Daten erfolgt durch eine Spiegelung sowohl der Messdaten als auch der ermittelten Ergebnisdaten auf dem NAS. Praktisch die gesamte Ordnerstruktur des Messrechners wird dazu alle 60 Minuten mit der entsprechenden Ordnerstruktur auf dem NAS synchronisiert.

11.2.4 Kontroll- und Zugriffsmöglichkeiten

Die im Programmablauf im ersten Schritt durchgeführten Kontrollen der Messdaten führen bei der Identifikation von Fehlern in den Messdaten zum Versand einer E-Mail an definierte Empfänger. Ebenso werden bei auftretenden Fehlern in der Verarbeitung der Daten und bei Fehlern im Zuge der Übertragung der Ergebnisdaten an die Web-Publikation entsprechende Warn- oder Hinweismeldungen versendet.

Im dem Messrechner läuft eine VNC Software, über die ein Fernzugriff auf dem Messrechner realisiert

werden kann. Hierzu muss vorab eine gesicherte Verbindung zum Gesamtsystem, entweder über den Router oder das NAS aufgebaut werden.

Sämtliche Kontroll- und Zugriffsmöglichkeiten setzen dabei natürlich eine bestehende Internetverbindung des Gesamtsystems voraus. Im Zuge der automatisierten Auswertung der Messdaten werden zusätzlich zu den eventuell erzeugten Warn- oder Hinweismeldungen regelmäßig (alle 3 bis 4 Stunden) Statusmeldungen per E-Mail an definierte Empfänger versendet. Bleiben diese Statusmeldungen aus, so liegt entweder eine Störung der Internetverbindung, eine Störung des Messrechners oder ein Gesamtausfall der Anlage aufgrund eines Stromausfalls vor. Im bisherigen Projektaufbau beruhten die deutliche überwiegende Anzahl solcher Störungen auf einer Unterbrechung der Internetanbindung. Auch ohne diese Internetanbindung werden die beschriebenen Auswertungen der Daten realisiert. Die an die Web-Publikation zu übertragenen Daten liegen dann ebenso in der lokalen Spiegelung vor und werden sobald wieder eine Internetanbindung besteht, übertragen.

11.3 Sensornetzwerk

11.3.1 Erprobung und Optimierung der entwickelten Methoden, Ansätze und Algorithmen für das Sensornetz

11.3.1.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt die durchgeführten Automatisierungsmaßnahmen der UzL vor Ort an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn.

Zusammenfassung:

- Die Konzeption sieht vor, dass Umrechnungen und Automatisierung bereits in den Sensorknoten selbst erfolgen. Dies führt zu einer Reduktion der Datengröße und gestattet eine bessere Batterieausnutzung. Die Datengröße bestimmt die Übertragungsbandbreite und diese dominiert den Energieverbrauch der batteriebetriebenen Geräte.
- Gemessene Spannungen und Widerstände werden automatisch auf den Sensorknoten, anhand eines linearen Zusammenhangs, in physikalische Einheiten, wie z.B. Kelvin oder Zentimeter, umgerechnet.
- Die gemessenen, in einem ersten Schritt aufgearbeiteten Daten, werden automatisch an eine Datenbank geschickt.

In den folgenden Abschnitten werden die auf den Sensorknoten umgesetzten Funktionalitäten erläutert, welche eine vollständig automatisierte Auswertung der Messdaten ermöglichen.

11.3.1.2 Sensorwertexponenten

Die Sensorknoten arbeiten intern mit Ganzzahlarithmetik, d.h. sie nutzen keine Gleitkommadarstellung von Messwerten. Um dennoch Nachkommastellen darstellen zu können, verwenden sie das Konzept des Sensorwertexponenten.

Dabei drücken die Geräte die Messwerte als eine Kombination eines vorzeichenbehafteten 32-Bit Koeffizienten sowie einer Zehnerpotenz aus. So kann beispielsweise der Wert:

-0.03

als

$-3 \cdot 10^{(-2)}$ (Sensorwertexponent -2), $-30 \cdot 10^{(-3)}$ (Sensorwertexponent -3) usw.

dargestellt werden.

Alle Controller verwenden intern einen bestimmten, nicht konfigurierbaren Exponenten, der an die Messauflösung angepasst ist. Wenn ein Controller jedoch die Möglichkeit bietet, eine Kalibriergerade zur Anwendung zu bringen, ist es ggf. sinnvoll, im Rahmen der Umrechnung anhand der Kalibriergeraden auch den Exponenten zu wechseln. Daher bieten einige Controller die Möglichkeit, den Exponenten einzustellen, der für das Ergebnis der Umrechnung passend ist. Der eingestellte Exponent bezieht sich somit auf das Ergebnis der Anwendung der Kalibriergeraden.

Kommt die Kalibriergerade nicht zum Einsatz, muss derjenige Exponent eingestellt werden, den der Controller intern vor Anwendung der Kalibriergeraden verwendet. Den intern verwendeten Exponenten kann der Beschreibung des jeweiligen Controllers entnommen werden.

11.3.1.3 Mittelungen

Um Außeneinflüsse auf die Messwerte wie Rauschen und Störungen zu minimieren, bieten einige Controller die Möglichkeit zur Mittelung der Messwerte. Einfluss auf die Mittelung haben die Parameter Mittelungsmethode (*Averaging Method*), Anzahl der abgeschnittenen Ausreißer (*Number of Outliers Cut Away*, O), sowie Anzahl der gemittelten Werte (*Number of Averaged Samples*, A).

Im Rahmen der Mittelung werden: $2 \cdot O + A$ Werte des Sensors gemessen. Diese werden dann der Größe nach sortiert, und die kleinsten O Werte sowie die größten O Werte verworfen. Aus den verbleibenden A Werten werden in Abhängigkeit von der Mittelungsmethode der Mittelwert bzw. der Median bestimmt.

11.3.1.4 Kalibriergeraden

Einige Controller bieten die Möglichkeit, die primäre Messgröße (meist eine Spannung) direkt auf dem Gerät in eine andere Größe (z.B. Strom, Temperatur, Kraft...) anhand eines linearen Zusammenhangs umzurechnen, bzw. eine Kalibrierung vorzunehmen.

Dazu kommt eine Kalibriergerade zum Einsatz. Diese wird durch zwei Punkte (x_0, y_0) und (x_1, y_1) definiert. Die Kalibriergerade dient ausschließlich der Umrechnung der Koeffizienten. Für Umrechnung des Exponenten ist der Konfigurationsparameter Sensorwertexponent zuständig.

11.3.1.5 Automatisierte Uploads

Im September 2018 wurde von der Universität zu Lübeck ein Programm entwickelt, welches zum Hochladen diverser standardisierter Daten der Projektpartner verwendet werden kann.

Hierfür wurde von der Universität zu Lübeck die Software Docker auf dem NAS installiert. Diese kann dafür genutzt werden, spezielle, oft ressourcenbeschränkte virtuelle Maschinen zu generieren, die nur für die Ausführung eines Programmes genutzt werden.

Dies hat den Vorteil, dass die Software vollständig unabhängig vom Betriebssystem verwendet werden kann und keine ungewünschten Nebeneffekte aufgrund des Betriebs mehrerer Softwareinstanzen auftreten.

Der folgende Programmcode startet die Importfunktion von CSV-Daten mittels eines Docker-Containers.

```
echo "Starting ibast-csv-import docker container."

docker run
--rm
-d
-it
--log-opt mode=non-blocking --log-opt max-buffer-size=512m
--name ibast-csv-import
-v /volume1/ITM/csv:/app
-v /volume1/weimar/visualisationData:/app/csv
ibast.jar
/usr/lib/jvm/java-8-oracle/bin/java
-jar /app/BridgeConnector-1.0.jar
-f /app/bridge-connector.config
-r /dev/null

echo "Exiting ibast-csv-import docker container."
```

Das Kodesegment startet einen Docker-Container, der das gewünschte Upload-Skript beinhaltet. Hierfür werden mehrere Verzeichnisse des NAS in die Docker Virtual Machine geladen. Diese werden als geteiltes Verzeichnis behandelt und sowohl vom NAS selbst als auch von der virtuellen Maschine verwendet. Unter /volume1/ITM/csv befindet sich das eigentliche Skript und unter /volume1/weimar/visualisationData befinden sich die aufbereiteten Dateien.

Im nächsten Schritt werden die nun aus der virtuellen Maschine verfügbaren Skripte mit geeigneten Parametern aufgerufen. Ein wichtiger Abschnitt aus dem Programm ist in Bild 168 dargestellt.

Zuerst wird die MAC-Adresse des Gateways angegeben. Dies stellt eine Zuordnung zur Intelligenten Brücke in Nürnberg in der Web-Publikation und Datenbank her. Im Anschluss daran wird eine Datei geladen, die alle Namen bereits hochgeladener Dateien beinhaltet, damit es nicht zu Duplikaten kommt. Jetzt werden alle neuen im Ordner befindlichen Dateien in den Hauptspeicher des Programmes geladen. Dort werden sie der Reihe nach eingelesen, sodass die in jeder Datei enthaltene Redundanz übersprungen wird.

Die einzelnen Zeilen werden in ein datenbankgerechtes Format umgebaut und im Anschluss daran über eine REST-Schnittstelle an den Datenbankserver der Universität zu Lübeck gesendet. Dort ist kein weiteres Vorgehen notwendig. Die Datenbank zeigt schlicht alle vorhandenen Einträge an – zu diesen zählen auch die neu Hochgeladenen.

Das Skript kann auch außerhalb einer Docker-Umgebung gestartet werden. Momentan wird es verwendet, um außerordentlich anfallende Messdaten in die Datenbank zu übertragen. Der Großteil aller Messdaten wird mittels REST an die Datenbank übertragen.

Das Skript ist weiterhin nur in der Lage ein spezielles Datenformat (CSV mit gegebener Spaltenzahl) zu verarbeiten. Für jedes weitere Format sind Anpassungen und weitere Skripte notwendig. Dies ist aufgrund der noch un spezifizierten csv-Dateien nicht anders möglich.

```

public void run() {
    long gatewayAddress = Long.decode("0x158d000046cc70");
    System.out.println("gatewayAddress: " + gatewayAddress);

    long deviceAddress = 0;
    System.out.println("adr: " + deviceAddress);

    LinkedList<ChannelData> data = Lists.newLinkedList();

    try {
        File folder = new File(WORKING_DIRECTORY);

        LinkedList<String> lastScannedFiles = readLogFile(LOGFILE_PATH + File.separatorChar + LOGFILE_NAME);

        // to keep the IDs in the database nice, we have to read the files sorted by
        // date
        ArrayList<File> fileListSorted = new ArrayList<>();
        for (File path : folder.listFiles()) {
            fileListSorted.add(path);
        }

        fileListSorted.sort(new FilePathComparator());

        for (int i = 0; i < fileListSorted.size(); i++) {
            File fileEntry = fileListSorted.get(i);

            // TODO: use a regex for this.
            if (!lastScannedFiles.contains(fileEntry.getName()) && !fileEntry.isDirectory()
                && !fileEntry.getName().equals("DatenCheck_BW402e_CurrentDataSet_Visual.csv")
                && !fileEntry.getName().equals(LOGFILE_NAME)
                && !(fileEntry.getName().toCharArray()[0] == '.')) {
                addLinesToDataList(fileEntry.getAbsolutePath(), data, deviceAddress, gatewayAddress);
                lastScannedFiles.add(fileEntry.getName());
            }
        }

        printLogFile(lastScannedFiles, LOGFILE_PATH + File.separatorChar + LOGFILE_NAME);

        conn.connect();
        for (ChannelData channelData : data) {
            System.out.println(channelData);
            conn.insertChannelData(channelData);
        }

        LOG.info("Successfully read csv files.");
        LOG.debug("Exiting after reading csv files.");
        System.exit(0);
    } catch (Exception e) {
        e.printStackTrace();
        LOG.error("The logfile \""+LOGFILE_NAME+"\" located at \""+ LOGFILE_PATH +"\" meight be inconsistent now.");
        System.exit(-1);
    }
}

```

Bild 168: Kodesegment zum Hochladen standardisierter .Csv-Dateien

11.3.2 Automatisierte Uploads mit REST

Seit August 2019 besteht die Möglichkeit diverse Daten direkt über eine REST-Schnittstelle in die Datenbank der Uni Lübeck zu schreiben. Diese Möglichkeit ersetzt die bisherige Strategie. Die einzelnen Projektpartner spezifizieren Tabellen, welche

von der Uni Lübeck implementiert werden. Danach können diese nach Belieben verwaltet und gefüllt werden.

Alte Datenübertragungsmechanismen werden Schritt für Schritt aktualisiert. Weiterführende Erläuterungen sind Gegenstand von Absatz 12.2

11.4 Verarbeitung der auflaufenden Daten

11.4.1 Vorbemerkungen

Im Kontext der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn fallen enorme Mengen an Messdaten an. Durch die hohen Frequenzen der festverkabelten Sensorik des Ingenieurbüros Prof. Dr. Freundt und der Maurer SE werden pro Monat viele Gigabyte an Daten (mind. 100 GB) auf dem Netzwerkspeicher hinterlegt.

Drahtlose und versverkabelte Technologien unterscheiden sich stark in der Definition des Wortes *viel*. Wenn bei festverkabelter Sensorik erst ab vielen Gigabyte oder Terabyte von *viel* gesprochen werden kann, so sind bei Drahtlostechnologien nur einige Megabyte erforderlich, um der Definition gerecht zu werden.

Die verwendete Datenbanklösung und Software aller Projektpartner müssen diesen Anforderungen gerecht werden. Im Folgenden wird auf die besonderen Herausforderungen im Kontext des Datenbankmanagements und im Kontext der drahtlosen Sensornetzwerktechnologien eingegangen.

11.4.2 Netzwerkspeicher und Datenbanken

Die Grundvoraussetzung für die Speicherung der anfallenden Daten ist ein ausreichend großer Systemspeicher der zugrundeliegenden Hardware. Dies bezieht sich sowohl auf den physikalischen Speicher des Initialsystems (NAS) als auch auf die Speicherkapazitäten der Datenbank, die als Grundlage für die Web-basierte Ergebnispublikation dient.

Insbesondere die Speicherkapazität des NAS wurde entsprechend der erwarteten Datenmengen für den Untersuchungszeitraum von 5 Jahren gewählt. Sie beläuft sich auf ca. 40 Terabyte.

Da die Datenbank nur aggregierte und verarbeitete Daten enthalten soll, kann die Kapazität deutlich geringer gewählt werden. Dies stellt eine unbedingt notwendige Strategie dar, um die erfassten Daten überhaupt lesbar darzustellen. Folgende Probleme können bei zu großen Datensätzen in Datenbanken auftreten:

Um ein sinnvolles Zeitintervall an Daten abdecken zu können, müssten teilweise Gigabyte große Datenmengen aus der Datenbank geprüft, verarbeitet und reduziert verschickt werden.

Die Übermittlung von Datenbankabfrageergebnissen kann sehr viel Zeit in Anspruch nehmen,

wenn ein wenig durchdachtes Vorgehen gewählt wird. Darum wird lediglich eine reduzierte Anzahl an Datenpunkten übertragen. Für Fahrzeugdaten gilt, dass jeweils nur acht Datensätze auf einmal übertragen werden.

Die Clientsysteme sind aufgrund variierender Internetanbindungen selten in der Lage große Datenmengen schnell zu empfangen.

Mobile Clients haben mit abbrechenden Internetverbindungen oft Probleme. Zu große Datensätze werden bei der Übertragung mit hoher Wahrscheinlichkeit unterbrochen.

Ein geplanter Betrieb einer Datenbank auf einem NAS in einer intelligenten Brücke ist zusätzlichen Platz- und Bandbreiteneinschränkungen unterworfen. Der Testbetrieb wurde in Form von einem Dockernetzwerk auf dem NAS umgesetzt. Bei den Tests hat sich gezeigt, dass der Prozessor des NAS bei komplizierteren Anfragen eine Auslastung von 100 % erreichen kann, was den übrigen Betrieb behindert. Außerdem dauert es bis zu 30 Sekunden die Daten des Deutschen Wetterdienstes abzurufen und anzuzeigen.

Dies stellt nur einen Ausschnitt an möglichen Problemszenarien dar. Die wichtigste Strategie ist folglich die Verarbeitung, Kompression und Projektion der Rohdaten, sodass die oben geschilderten Probleme nicht auftreten.

Es kann zudem sinnvoll sein, alternative Datenbanktechnologien zu untersuchen, sollten die anfallenden Daten wider Erwarten zu groß sein, um sie sinnvoll zu verwalten. Hierfür wird standardmäßig eine SQL Datenbank (z. B. MariaDB) verwendet. Eine Alternative stellen sogenannte Time Series Databases (TSDB) dar.

Dieser Datenbanktyp ist darauf optimiert Daten zu verwalten, die mit aufsteigenden Zeitstempeln versehen sind. Diese Eigenschaft ist jedoch nicht bei allen geplanten Anzeigedaten erfüllt.

Im Testbetrieb hat sich jedoch gezeigt, dass eine SQL-Datenbank den Anforderungen genügt. Anfragen dauern selten länger als eine Sekunde.

11.4.3 Drahtloses Sensornetzwerk

In drahtlosen Sensornetzwerken werden 95–99 % des Energieverbrauchs durch das Versenden von Daten verursacht.

Daraus folgt direkt, dass möglichst geringe Datenmengen innerhalb des Sensornetzwerkes versendet werden sollten. Eine Möglichkeit dies zu gewährleisten ist, Daten auf den Sensorknoten selbst

vor zu verarbeiten. Dies bewirkt, dass nur die nötigsten Daten in einer Datenbank hinterlegt werden müssen.

Die Strategie besteht darin, die notwendigen Verarbeitungsschritte (oder zumindest so viele wie möglich) auf den Sensorknoten selbst berechnen zu lassen. Dadurch kann das teure Senden von Daten in vielen Fällen vermieden werden.

12 Ergebnisse in Form einer Web-Publikation

12.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Konzeption, die Entwicklung und die Anwendung der Web-Publikation erläutert.

Die Idee der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn ist die Entwicklung und Erprobung neuer Konzepte und Technologien zur aktuellen und abrufbaren Bereitstellung von Daten zur Selbstauskunft der Brücke.

Für diese Aufgabe existiert gegenwärtig noch kein Prototyp und deshalb sind zwei prinzipiell verschiedene Aufgaben zu lösen.

Die fachspezifische Aufgabe

Es gilt die unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Fachspezifik zu bedienen. Der Blick auf die gesamte Infrastruktur und auf das brückenspezifische Detail führt zu unterschiedlichen Tiefen gleicher Ausgangsdaten. Im vorliegenden Projekt wird dies durch unterschiedliche Navigationsebenen gelöst. Von globalen Informationen zu lokalen Informationen.

In einem Projekt können nur begrenzte Daten erfasst und verarbeitet werden. Die Konzeption der Web-Publikation muss deshalb erweiterungsfähig sein ohne das Grundkonzept zu verlassen.

Die unterschiedlichen Betrachtungsebenen müssen unkompliziert zu den jeweils erforderlichen Informationen gelangen, der Weg muss selbsterklärend sein.

Die Auswahl der konkreten fachlichen Inhalte des vorliegenden Projektes war auf Einwirkungen und Widerständen der Brücke gelegt. Zur konsistenten Erweiterung sind weitere Projekte mit flankierenden fachlichen Inhalten erforderlich.

Die technische Aufgabe

Die technische Aufgabe wird durch einen gesicherten Umgang mit großen Datenmengen dominiert. Das setzt einen leistungsfähigen Server voraus, der die Datenbank aufnimmt.

Entsprechend der Größe der Datensätze und der erwarteten Frequenz von Aufrufen der Seite, sollte mindestens eine 100 mbit/sec Synchronanbindung vorhanden sein.

Die Datenbank dient jedoch nicht der Lagerung der Rohdaten.

Gespeichert und dargestellt werden ausschließlich aufbereitete, interpretierte Daten von geringer Größe und überschaubarer Frequenz.

Daten enthalten einen Zeitpunkt und einen Wert. Sie sind folglich zweidimensional.

Die Web-Publikation wird in Grundzügen mit Daten versorgt, welche in einfachen Graphen angezeigt werden.

Die Web-Publikation ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur Digitalisierung der Infrastruktur. Dieses Projekt ist ein Baustein.

12.2 Konzeption der Web-Publikation

12.2.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt erläutert die Anforderungen an eine webbasierte Ergebnispublikation. Die Anforderungen können in formale, technische und inhaltliche Sachverhalte gegliedert werden. In dieser Reihenfolge werden die wesentlichen Anforderungen vorgestellt.

Anforderung 1: Die Webanwendung muss über ein Rechtemanagement verfügen.

Anforderung 2: Die Webanwendung muss auf beliebigen Endgeräten aufrufbar sein. Dazu zählen sowohl Standrechner, Tablets, Smartphones als auch Laptops und beliebige andere Geräte, welche einen Webbrowser anbieten

Anforderung 3: Die Webanwendung muss gegen den Zugriff durch Unbefugte geschützt sein.

Anforderung 4: Die Webanwendung muss durch Administratoren konfigurierbar sein.

Anforderung 5: Die Webanwendung muss in der Lage sein, beliebige zweidimensionale Daten anzuzeigen. Es ist wünschenswert, dass jederzeit Vergleichsdaten neben einen beliebigen Graphen gelegt werden können.

Anforderung 6: Es soll möglich sein, geeignete Default-Werte für die Anzeige der Sensordaten zu wählen.

Anforderung 7: Die Webanwendung soll prinzipiell in der Lage sein, beliebige Zeiträume in den Messdaten darzustellen und auf verschiedene Weisen darzustellen.

Anforderung 8: Die Webanwendung soll ausschließlich der Anzeige aggregierter Daten dienen. Rohdaten sollen nicht angezeigt werden.

Anforderung 10: Es muss möglich, sein programmatisch über eine REST-Schnittstelle auf die Daten der Datenbank/Webanwendung zuzugreifen.

12.2.2 Die WEB-Publikation der intelligenten Brücke

Die Web-Publikation ist für verschiedene Nutzer mit unterschiedlichen Berechtigungen ausgelegt. Dies sind die Betreiber (BASt, BMVI, ABDNB), die Beteiligten (IBF, Maurer, UzL) und Bürger. Für Letztere ist lediglich eine statische, aufbereitete HTML-Seite vorbereitet. Es genügen zwei unterschiedliche Berechtigungen (Gast und Administrator, sowie ein Super-Administrator).

Für das konkrete Projekt der Intelligenten Brücke sind Einwirkungen und Widerstände die Zielstellung. Folgende fachlichen Inhalte sind Gegenstand der Web-Publikation:

Ergebnisauswertungen der Kennwerte der intelligenten Brücke aus den Messungen an der Brücke.

Ergebnisauswertungen der Kennwerte des intelligenten Lagers der Brücke aus den Messungen am Lager.

Ergebnisauswertungen der Kennwerte des intelligenten FÜK der Brücke aus den Messungen am FÜK.

Ergebnisauswertungen für Informationen aus den Messungen an der Brücke, am Lager und am Fahrbahnübergang für die Managementsysteme.

Darstellung von Status- und Schwell- wie Warnstufen aller Kennwerte und entsprechenden Ableitungen.

Status der Funktionsfähigkeit der Messsysteme.

12.2.3 Der Aufbau

Für den Nutzer der Web-Publikation stehen folgende Bedienelemente zur Verfügung:

eine Navigation am oberen Bildschirmrand

einer Seitennavigation (auch für mobile Geräte geeignet)

Es sind sechs Navigationsebenen verfügbar, siehe Bild 169.

Die erste (höchste) Navigationsebene beinhaltet die Statusangaben der Kennwerte und der Messsysteme und die Ergebnisse aus den Messsystemen in globaler Darstellung als Übersicht.

Darunter sind auf bis zu fünf weiteren Ebenen die Ergebnisse der Messsysteme im zunehmenden Detaillierungsgrad abgebildet. Die sehr tiefe Navigationsstruktur gestattet eine präzise und schnelle Zuordnung.

Im Folgenden werden die Inhalte der Navigationsebenen vorgestellt:

12.2.3.1 Die Statusseite

Auf der Statusseite werden für autorisierte Nutzer der Status der Kennwerte und der Messsysteme und die Ergebnisse aus den Messsystemen in globaler Darstellung als Übersicht präsentiert. Es sind fünf verschiedene Kategorien vorgesehen.

Dazu gehören Wetter- und Klimadaten, der Status der Messsysteme, der Bauwerksstatus, Verkehrsdaten und Daten bezüglich des FÜK beziehungsweise des Lagers. Diese Kategorien beherbergen jeweils weitere Unterkategorien.

Es wird eine Auswahl von Daten präsentiert, um die kognitive Last bei den Benutzern handhabbar zu gestalten.

Für eine erste Beurteilung sorgen Ampelmetaphern. Diese kennzeichnen den aktuellen Stand der einzelnen Kennwerte. Der Gesamtstatus ergibt sich aus einer logischen UND-Verknüpfung der Einzelergebnisse. Die Schwell- und Warnwerte der einzelnen Ampeln sind im Abschnitt 7 vorgestellt.

12.2.3.2 Die Messsysteme

Die Navigationsfunktion führt zur Übersicht der installierten Messsysteme.

Hier stehen generelle Informationen für alle Messsysteme zur Verfügung.

Von da aus kann zu den Sensordaten und deren Ergebnisableitungen der einzelnen Messsysteme navigiert werden.

Die Darstellung der Sensordaten ist weitestgehend gleich gestaltet, um einen guten Überblick zu ermöglichen. Es wird jeweils anhand eines Brückenquerschnitts im Längsschnitt verdeutlicht, wo sich eine Messstelle befindet. Dies wird weiter anhand eines Messquerschnitts präzisiert.

Es gibt eine Möglichkeit zur Schnellauswahl aller an einer Messstelle aufgenommenen Daten.

Der Messbereich kann durch einen Mausklick auf ein Datenbereichsfeld ausgewählt werden. In einem Popup wird ein Kalender aufgezeigt, welcher verschiedene definierte Intervalle als Auswahlmöglichkeit präsentiert. Selbst definierte Intervalle können

durch Mausklicks in der Kalenderdarstellung selbst realisiert werden. Ein Mausklick auf den Knopf „Neu Laden“ aktualisiert die Ansicht.

1. Ebene	2. Ebene	3. Ebene	4. Ebene	5. Ebene	6. Ebene
Statusseite					
Wetter	Wetterdaten Bauwerk				
	Wetterdaten DWD				
Einwirkungen	Verkehr	aus Brücke	Verkehrsdaten	V-Stärke	
				V-ZuSa	
		FZ-Parameter			
		Gesamtgewichte			
		Einzel-FZ-Daten			
		Einwirkungen	stat. Beanspruchungen	Gesamt	
			MS XY		
			MS XY		
		Ermüdung	Gesamt		
			MS XY		
			MS XY		
		aus FÜK	Verkehrsdaten	XXX	
				XXX	
				XXX	
			XXX		
			XXX		
	aus Lager	Auflagerkraft			
			XXX		
	Vergleiche				
	Bauwerktemperaturen	aus Sensornetz	Sensorknoten XX		
			Sensorknoten XX		
			Sensorknoten XX		
		aus Brücke	MS6T1u		
			MS6T2o		
	Eigengewicht (Platzhalter)				
Widerstände	Externe Vorspannung				
	Bauwerkssteifigkeit				
Brücke	MQ A	MS1L (* - wenn für MS XY vorhanden)	Stundenwerte		
			aktuelle Werte		
			char. Werte *		
			Ermüdung *		
			Eigenfrequenz *		
		MS2L	...		
			
	MQ B	...			
			
			
			
Bauteile	Lager	XXX	XXX	XXX	XXX
		XXX			
	FÜK	XXX	XXX	XXX	XXX
		XXX			
Sensornetz	Wetterdaten				
	Risse				
	Neigung				
	Bauwerktemperaturen				
	Krafteinwirkung				
	Batteriestand				
Zustand (Platzhalter)					
Störungen					

Bild 169: Navigationsstruktur der Web-Publikation

12.2.3.3 Verkehrsdaten

Die Seitenansicht „Verkehrsdaten“ stellt eine Übersicht über das Verkehrsaufkommen in ausgewählten Zeiträumen dar. Es gibt die Möglichkeit einige

Zeiträume als Beispiele anzuzeigen (z.B. letzter Tag, Woche oder Monat).

Dabei kann auf detaillierte Informationen pro Fahrzeug zugegriffen werden. Der Zugriff erfolgt tabellarisch in einer Pagination mit acht Einträgen. Jede

Tabellenzeile beinhaltet charakteristische Fahrzeuginformationen wie zum Beispiel die Achsanzahl und den Ladungszustand des Fahrzeugs.

Die letzte Spalte der Tabelle beinhaltet ein Icon, welches signalisiert, ob Bilddaten für ein Fahrzeug verfügbar sind. Ein Mausklick auf das Icon blendet die Details zu einem speziellen Fahrzeug ein. Sind Bilddaten vorhanden, so werden diese angezeigt. Darunter wird eine Tabelle mit allen verfügbaren Informationen zu einem speziellen Fahrzeug eingeblendet.

12.2.4 Architektur

Im Folgenden werden die verwendeten Technologien von Backend und Frontend erläutert.

Backend

Bild 170 zeigt die Architektur der für die Webanwendung benötigten Komponenten und deren logische Schnittstellen. Die Webanwendung ist über einen Apache Proxy auf Port 80 und 443 erreichbar. Alle Anfragen an untergeordnete Komponenten werden durch den Apache Proxy verwaltet.

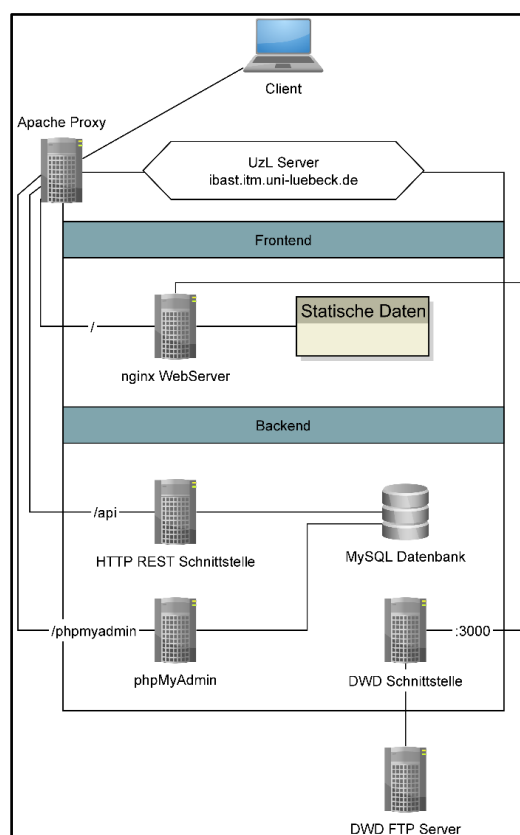


Bild 170: Architektur der Komponenten von Backend und Frontend der webbasierten Ergebnispublikation.

Alle Komponenten sind in Docker-Containern untergebracht. Dabei handelt es sich um minimal

ausgestattete virtuelle Maschinen die durch virtuelle Netzwerke voneinander abgekapselt sind. Dies hat den Vorteil, dass im Falle einer Korruption nur einzelne Komponenten betroffen sind. Weiterhin ist das Deployen einer neuen Systeminstanz durch wenige Konsolenbefehle auf einem Rechner mit beliebigem Betriebssystem umsetzbar.

Die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes werden durch einen extra Server verwaltet, da für das Anbieten der Daten ein FTP-Server eingebunden werden muss, welcher die Daten wiederum via REST zur Verfügung stellt.

Zusätzlich stehen Administrationswerkzeuge wie PhpMyAdmin zur direkten Verwaltung der Datenbank zur Verfügung.

Frontend

Die Webanwendung selbst ist durch einen nginx-Server erreichbar und wird an anfragende Clients ausgeliefert.

Die ausgelieferte Webanwendung stellt entsprechende Anfragen an den Apache Proxy und fordert so dynamische Inhalte und aufbereitete Messdaten an. Die Anfrage wird an die HTTP-REST-Schnittstelle gesendet und von dort wird mit der SQL-Datenbank kommuniziert.

Für die Entwicklung des Frontends wurde das Framework Angular 7 verwendet. Durch dieses ist es möglich, sinnvoll modularisierte Webanwendungen zu erschaffen. Des Weiteren gibt es zahlreiche standardisierte Werkzeuge wie zum Beispiel Bootstrap 4.3, welche genutzt werden können, um eine Webanwendung für mehrere Endgeräte zu konzipieren.

Angular 7 basiert auf dem Prinzip der Modularisierung unter Berücksichtigung der Trennung von Zuständigkeitsbereichen. Jeder Sinnkomponente, welche im Browser dargestellt wird, wird eine Reihe von Komponenten zugeordnet, welche diese verwalten.

Pro Sinnkomponente sind beinhaltet dies eine CSS-Datei, eine HTML-Datei, ein Controller in Form einer Typescript-Datei und einer Datei für Testfälle.

Jegliche Darstellungslogik erfolgt in der zugeordneten Typescript-Datei. Es wird Typescript anstelle von Javascript verwendet, um die Vorteile von Typsystemen nutzen zu können und eine große Menge Fehler leichter vermeiden zu können. Außerdem gestaltet sich Quellcode für außenstehende als deutlich leichter les- und interpretierbar.

Die Anordnung und die Art der Informationsdarstellung erfolgen durch die HTML-Datei. Das Aussehen wird durch die CSS-Datei verwaltet.

Die Navigationslogik und die Zugriffsberechtigung erfolgen durch geeignete Spezifikationen in einem Router.

12.2.5 Datenmodell

Der nachfolgende Abschnitt stellt das in der Datenbank verwendete Datenmodell vor.

Allgemeines

Bezüglich der Daten werden zwischen Rohdaten vor der Interpretation, Rohdaten nach der Interpretation und aggregierte Daten unterscheiden. Rohdaten vor der Interpretation werden zwar erfasst, sollen jedoch zu keinem Zeitpunkt visualisiert werden.

Rohdaten vor der Interpretation: Die Rohdaten werden direkt von den Messrechnern und deren Peripherie generiert und stellen die von den Sensoren erzeugten Werte dar (z.B. Spannungswerte oder Widerstände).

Rohdaten nach der Interpretation: Jeder von den Messsystemen erfasste Wert wird in einen kalibrierten Wert als physikalische Einheit umgerechnet werden, d. h., ein Drucksensor sollte Werte in der Einheit Pascal liefern, ein Abstandssensor einen Wert mit der Einheit m oder ein Temperatursensor in der Einheit Grad Celsius.

Aggregierte Daten: Aus den Rohdaten nach der Interpretation und aus aggregierten Daten können wiederum höher aggregierte Daten gewonnen werden. Während, wie oben beschrieben, Rohdaten nach der Interpretation immer noch Werte eines einzelnen Sensors zu einem bestimmten Messzeitpunkt umfassen, können aggregierte Daten aus mehreren Messdaten eines einzelnen Sensors, die zu verschiedenen Zeiten gewonnen wurden, aber auch aus Daten mehrerer Sensoren zu einem Zeitpunkt und sogar wieder aus schon aggregierten Daten gewonnen werden.

Die aggregierten Daten bzw. auch die Rohdaten nach der Interpretation müssen in einer gemeinsamen Datenbank gespeichert werden, da vereinbarungsgemäß alle drei Partner auf diese Messwerte zugreifen sollen, um diese

weiterverarbeiten zu können,

für einen Quervergleich austauschen zu können,

weiter zu interpretieren und aggregieren zu können und

auf einer Webseite bzw. App geeignet grafisch darzustellen.

Zu diesem Zweck ist es sinnvoll, sich auf ein gemeinsames Datenformat zu einigen, in dem alle gemessenen Werte repräsentiert werden, um eine einfache Auswertung zu gestatten.

Das Datenformat ist so ausgelegt, dass es mehrere Brücken verwalten kann.

Brücken

Es gibt zunächst eine Tabelle „Bridge“, siehe Tabelle 12. Damit wird das System ausbaufähig ausgelegt und könnte an weiteren Brücken eingesetzt werden. Diese Tabelle beinhaltet generelle Informationen zur Brücke (vgl. Tabelle 12).

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
ID	Integer	Eindeutiger Identifikator einer Brücke
Name	String	Eindeutiger Name einer Brücke im GUI
Erstellungsdatum	Date	Erstellungszeitpunkt der Tabelle
Adresse	String	Die zentrale IP/MAC-Adresse der Brücke
Lat	Float	Geo-Koordinate der Brücke 1
Lng	Float	Geo-Koordinate der Brücke 2

Tabelle 12: Datenmodell einer Brücke in der Webapplikation und Datenbank

Sensorknoten

Die verschiedenen Knoten (Sensorknoten/Messsysteme) gehören immer exakt zu einer Brücke. Diese werden in der Tabelle Nodes gespeichert (vgl. Tabelle 13). Jedes Messsystem hat eine eindeutige Adresse.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
ID	Integer	Zuweisungs-ID für angeschlossene Sensoren
Bridge_ID	Integer	Zuweisung von Sensorknoten zu Brücken
Adresse	String	Die Adresse (IP oder MAC) des Knotens
Erstellungsdatum	Date	Die Zeit, wann dieser Datensatz erstellt wurde

Tabelle 13: Datenmodell eines Sensorknotens in der Webapplikation und Datenbank

Sensoren oder Kanäle

Die eigentlichen Sensoren werden immer einer übergeordneten Entität zugewiesen, welche für eine Menge an Sensoren verantwortlich ist. In diesem Datenmodell werden diese Entitäten Sensorknoten genannt. Sensoren oder Kanäle werden an diese angeschlossen und übermitteln die gemessenen Daten von dort aus weiter. Sensoren verfügen über eine eindeutige ID und werden mittels dieser an Sensorknoten vermittelt (vgl. Tabelle 14).

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
ID	Integer	Eindeutiger Identifikator eines Sensors
Node_ID	Integer	Zuweisung von Sensoren zu Knoten
Unit_fundamental_ID	Integer	Die grundlegende Messeinheit der Sensoren (z. B. m/s)
Erstellungsdatum	Date	Die Zeit, wann dieser Datensatz erstellt wurde
Unit_target_ID	Integer	Die Zieleinheit der Sensorwerte (z. B. m/h)
Unit_prefix_ID	Integer	Das Präfix der Zieleinheit (z. B. k (Kilo))
Beschreibung	String	Metasprachliche Beschreibung der Messung

Tabelle 14: Datenmodell eines Sensors (Kanals). Diese sind immer einem Sensorknoten zugeordnet.

Einheiten

Zur Berechnung der Einheiten werden noch drei weitere Tabellen benötigt. Diese verwalten die Einheiten, welche für die Umrechnung und Darstellung der Messdaten notwendig sind. Die zeigt fundamentale Einheiten, welche an der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn gemessen werden. Tabelle 15 zeigt diverse mögliche Präfixwerte. Tabelle 16 zeigt verschiedene, komplexere Einheiten.

Units_fundamental	
ID (Integer)	Unit (String)
1	unknown
2	V
3	K
...	...
n-1	m/s
n	m

Tabelle 15: Beispiel einer ID zu Einheiten Zuordnung

Unit_prefixes			
ID (Integer)	Factor (Decimal)	Name (String)	Symbol (String)
...
8	1000	Kilo	k
9	100	Hekto	h
10	10	Deka	da
11	1	–	–
12	0,1	Dezi	d
13	0,01	Zenti	c
14	0,001	Milli	m
...

Tabelle 16: Beispielhafte Auflistung verschiedener Einheiten-Präfix-Werte

Units_derived			
ID (Integer)	Unit_fundamen- tal (Integer)	Unit_target (String)	Formular (String)
...
3	7	m/ho	X*360 s/h
...

Tabelle 17 : Beispiele für inferierte Einheiten

Tabellen IBF

Im Folgenden werden die Tabellenspezifikationen der aggregierten Daten des IBF aufgezeigt (vgl. Tabelle 18 - Tabelle 26). Sich wiederholende Muster werden dabei durch die Buchstaben *k* und *n* gekennzeichnet.

Bezeichner	Daten- typ	Bedeutung
fromTime	Long	Intervallanfang
toTime	Long	Intervallende
lkwCount	Int	Gesamte Lkw-Anzahl
lkwoACount	Int	Lkw ohne Anhänger
lkwMACount	Int	Lkw mit Anhänger
lkwSattelCount	Int	Sattelschlepper

Tabelle 18 : Spezifikation der Tabellen Lkw0 - Lkw3 sowie LkwHistory

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
RTMS_ID_String	Long	ID String RTMS Intern
time	Long	Datum/Zeit Achse 1 ÜKO
lane	Int	Spur 1 oder 0
type	Int	Fz-Typ Code
velocity	Int	Fz-Geschwindigkeit
veh_dist	Int	Abstand zum vorh. FZ [cm]
gvw	Int	Gesamtgewicht [kg]
flag_overload	Int	Flag Überladung
naxles	Int	Anzahl Achsen
<i>n_axles_type</i>	Int	Typ Achse <i>n</i>
<i>n_axles_load</i>	Int	Achslast Achse <i>n</i> [kg]
<i>n_axles_dist</i>	Int	Abstand Achse <i>n</i> [cm]
cam_ <i>n_pic_k</i>	B64String	Kamera FR <i>n</i> für Bild <i>k</i>
diag_ <i>n</i>	B64String	Diagramm <i>n</i>

Tabelle 19: Spezifikation der Fahrzeugdetaildaten. *n* und *k* stehen für eine sich wiederholende Anzahl Tabellenspalten desselben Typs

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Name_MSPoint	String	Name der Messstelle
Name_MQ	String	Name des Messquerschnittes
UNIT	String	Einheit
Has_ValueDB_Data	Boolean	Zeiger auf ValueDB-Data vorhanden
ValueDB_Data_Full_Name	String	URI zu ValueDB-Data
ValueDB_Data_Full_NoLines	Int	Tabellengröße
ValueDB_Data_LastVal_Name	String	Letzte Werte und Bilder eines Sensors
...

Tabelle 20: Metainformationen aller Systeme und Sensoren des IBF. Die Datenbankstruktur wurde exemplarisch für eine Messstelle gezeigt. Diese gilt für StatusDbData, ResultDbFFTDData, ResultDbFatigueData, ResultDbStressData und ValueDbData

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
Hour-Min	Long	Stundenmaximum
Hour-Max	Float	Stundenminimum
Hour-Mean	Float	Stundenmittel
Vis-Time-From	Long	Intervallbeginn
Vis-Time-To	Long	Intervallende
Vis-Min-Val	Float	Mindestwert im Bild
Vis-Max-Val	Float	Maximalwert im Bild
Vis-OffSet-Val	Float	Offset im Bild
Vis-Pic	B64String	Bild als b64String

Tabelle 21: Spezifikation der Tabelle ValueDB_Data.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
InternPNumber	Long	Stundenmaximum
MeasurementFileName	String	Stundenminimum
Eval_and_Status_Time	Long	Stundenmittel
HeaderOK	Boolean	Intervallbeginn
ImportOK	Boolean	Intervallende
FileAlertMessage	String	Mindestwert im Bild
SystemStatusAlert	Boolean	Maximalwert im Bild
SystemStatusMessage	String	Offset im Bild

Tabelle 22: Tabellenspezifikation der Tabelle StatusDB_Data.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
StatStress_to-Now_Max_Abs	Float	Maximalwert bisher absolut
StatStress_to-Now_Max_Rel	Float	Maximalwert bisher relativ
StatStress_to-Now_Min_Abs	Float	Minimalwert bisher absolut
StatStress_to-Now_Min_Rel	Float	Minimalwert bisher relativ
StatStress_Predicted_A_Max_Abs	Float	char. Maximalwert aus allen Daten bisher absolut
StatStress_Predicted_A_Max_Rel	Float	char. Maximalwert aus allen Daten bisher relativ
StatStress_Predicted_A_Min_Abs	Float	char. Minimalwert aus allen Daten bisher absolut
StatStress_Predicted_A_Min_Rel	Float	char. Minimalwert aus allen Daten bisher relativ
StatStress_Predicted_B_Max_Abs	Float	char. Maximalwert aus Daten 12 Wochen absolut
StatStress_Predicted_B_Max_Rel	Float	char. Maximalwert aus Daten 12 Wochen relativ
StatStress_Predicted_B_Min_Abs	Float	char. Minimalwert aus Daten 12 Wochen absolut
StatStress_Predicted_B_Min_Rel	Float	char. Minimalwert aus Daten 12 Wochen relativ

Tabelle 23: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Stress_Data

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Time	Long	Zeitstempel
Calc_SVal_toNow	Float	
Calc_SVal_last-Week	Float	
Calc_SVal_last-Month	Float	
Calc_SVal_lastYear	Float	
Calc_eqDelta_toNow_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite bisher absolut
Calc_eqDelta_last-Week_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Wo absolut
Calc_eqDelta_last-Month_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Mo absolut
Calc_eqDelta_lastYear_Abs	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Jahr absolut
Calc_eqDelta_toNow_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite bisher
Calc_eqDelta_last-Week_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Wo
Calc_eqDelta_last-Month_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Mo
Calc_eqDelta_lastYear_Rel	Float	rel. äq. Schwingbreite Daten 1 Jahr
DeltaS_DB_Name	String	URI zu Detailtabelle

Tabelle 24: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDb_Fatigue_Data.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
DeltaSClass	Long	
DeltaepsClass	Float	
N	Float	

Tabelle 25: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Fatigue_DeltaS_Data.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
HourWise-Time	Long	Zeitstempel
NatFreq_Num- ber_A	Int	
NatFreq_Val_A	Float	
NatFreq_Num- ber_B	Int	
NatFreq_Val_B	Float	
NatFreq_Num- ber_C	Int	
NatFreq_Val_C	Float	
NatFreq_Num- ber_D	Int	
NatFreq_Val_D	Float	
ResultVal_A	Float	rel. Eigenfrequenz A
ResultVal_B	Float	rel. Eigenfrequenz B
ResultVal_C	Float	rel. Eigenfrequenz C

Tabelle 26: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_FFT_Data.

Tabellen Maurer

Im Folgenden wird die entwickelte Tabellenspezifikation für die Daten auf den Ansichten der Firma Maurer vorgestellt (vgl. Tabelle 27 - Tabelle 32). Sich wiederholende Muster werden dabei durch den Buchstaben *n* gekennzeichnet.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
t_NTP	Int	Zeitstempel
erfassungsquote	Float	
ds_40_1_3_mean	Float	Drucksensor (Achse, Nummer, Art)
ds_40_1_3_max	Float	
ds_40_1_3_min	Float	
ds_40_1_3_75q	Float	
ds_40_1_3_25q	Float	
ds_40_3_3_mean	Float	
ds_40_3_3_max	Float	
ds_40_3_3_min	Float	
ds_40_3_3_75q	Float	
ds_40_3_3_25q	Float	ds_40_3_3_25q
wa_mean_mean	Float	
wa_mean_max	Float	
wa_mean_min	Float	
rot_40_3_mean	Float	Rotation (Achse, Nummer, Art)
rot_40_3_max	Float	
rot_40_3_min	Float	
rot_40_3_75q	Float	
rot_40_3_25q	Float	

Tabelle 27: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone – Teil 1

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
akk_gw_eben_tem p	Float	
akk_gw_eben_tem p_verkehr	Float	
akk_gw_eben_tem p_ges	Float	
akk_gw_eben_tem p_verkehr_ges	Float	
akk_gw_eben_tem p_verkehr_prog- nose	Float	
akk_gw_sphae- risch_temp	Float	
akk_gw_sphae- risch_temp_verkehr	Float	
akk_gw_sphae- risch_temp_ges	Float	
akk_gw_sphae- risch_temp_ver- kehr_ges	Float	
akk_gw_sphae- risch_temp_ver- kehr_prognose	Float	
gleitspalt	Float	
eigenfrequenz1	Float	
eigenfrequenz2	Float	
f_40_1_mean	Float	
f_40_1_max	Float	
f_40_1_min	Float	
f_40_3_mean	Float	
f_40_3_max	Float	
f_40_3_min	Float	

Tabelle 28: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone – Teil 2

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Ansicht_ID	Int	Eindeutige Zuordnung der Webansicht
InfoString_ <i>n</i>	String	<i>n</i> von 1 bis 19
Datenpfad <i>n</i>	String	<i>n</i> von 1 bis 30

Tabelle 29: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Status_Statistik_Schablone

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
t_NTP	Int	Zeitstempel
max	Float	
min	Float	
mean	Float	
total	Float	

Tabelle 30: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
t_NTP	Int	Zeitstempel
class	Int	Fahrzeugklasse
N_ax	Int	Achszahl
wt	Float	Gewicht
v	Float	Geschwindigkeit
lane	Int	Fahrspur

Tabelle 31: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Verkehr_kontinuierlich_Schablone

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
t_NTP	Int	Zeitstempel
Anz	Int	Fahrzeugklasse
F_max	Float	
F_min	Float	
F_med	Float	
V_max	Float	
V_Min	Float	
V_med	Float	

Tabelle 32: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Verkehr_statistik_Schablone

Tabelle Statusseite

Im Folgenden wird die entwickelte Tabellenspezifikation für die Daten auf der Statusseite dargestellt

(vgl. Tabelle 33 - Tabelle 35). Aus den verschiedenen Teilsystemen werden die aufbereiteten Daten in diese definierte Datenbank übertragen.

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
Weather_UpDateTime	Long	Zeitstempel
Weather_T_Out_Current	Float	Momentane Temperatur
Weather_T_Out_DayMin	Float	Tagesminimaltemperatur
Weather_T_Out_DayMax	Float	Tageshöchsttemperatur
Weather_RelHumidity_Current	Float	Momentane Luftfeuchtigkeit
Weather_RelHumidity_DayMin	Float	Tagesminimum Luftfeuchtigkeit
Weather_RelHumidity_DayMax	Float	Tagesmaximum Luftfeuchtigkeit
Weather_WindSpeed_Current	Float	Momentane Windgeschwindigkeit
Weather_WindSpeed_DayMin	Float	Tagesminimum Windgeschwindigkeit
Weather_WindSpeed_DayMax	Float	Tagesmaximum Windgeschwindigkeit
Weather_WindDirection_Current	Float	Momentane Windrichtung
Weather_WindDirection_DayMin	Float	Tagesminimum Windrichtung
Weather_WindDirection_DayMax	Float	Tagesmaximum Windrichtung
Weather_Precipitation_Current	Float	Momentaner Niederschlag
Weather_Precipitation_DayMin	Float	Tagesminimum Niederschlag
Weather_Precipitation_DayMax	Float	Tagesmaximum Niederschlag
SystemStatus_UpDateTime	Long	Zeitpunkt des letzten Updates
SystemStatus_Inet_Speed	Float	Internetgeschwindigkeit
SystemStatus_Inet_Availability	Float	Internet Verfügbarkeit
SystemStatus_Computer_A_Status_STR	String	Statuscode Rechner A
SystemStatus_Computer_A_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Computer_B_Status_STR	String	Statuscode Rechner B
SystemStatus_Computer_B_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Server_Status_STR	String	Statuscode NAS
SystemStatus_Server_Status_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
SystemStatus_Storage_Val	Float	Szstemauslastung
SystemStatus_Storage_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode

Tabelle 33: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 1

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
BridgeStatus_UpDateTime	Long	Letzter Updatezeitpunkt
BridgeStatus_StaticCapacity_Val	Float	
BridgeStatus_StaticCapacity_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_FatigueCapacity_Val	Float	
BridgeStatus_FatigueCapacity_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExternalPreStress_Val	Float	
BridgeStatus_ExternalPreStress_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BridgeStiffness_Val	Float	
BridgeStatus_BridgeStiffness_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BearingStatus_A_Val	Float	
BridgeStatus_BearingStatus_A_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_BearingStatus_B_Val	Float	
BridgeStatus_BearingStatus_B_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExpensionJointStatus_A_Val	Float	
BridgeStatus_ExpensionJointStatus_A_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_ExpensionJointStatus_B_Val	Float	
BridgeStatus_ExpensionJointStatus_B_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
BridgeStatus_OverAllStatus_Val	Float	
BridgeStatus_OverAllStatus_TrafficLight_Tag	Int	Ampelcode
TrafficData_UpDateTime	Long	
TrafficData_All_LKW_Count_CurrentDay	Int	Anzahl Lkw Tag
TrafficData_All_LKW_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 28 Tage
TrafficData_LKW_oA_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw ohne Anhänger 28 Tage
TrafficData_LKW_mA_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw mit Anhänger 28 Tage
TrafficData_LKW_Sat_Count_Last28Days	Int	Anzahl Sattelschlepper 28 Tage
TrafficData_LKW_Other_Count_Last28Days	Int	Anzahl Sonstige 28 Tage

Tabelle 34: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 2

Bezeichner	Datentyp	Bedeutung
TrafficData_LKW_oA_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw ohne Anhänger 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_mA_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw mit Anhänger 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_Sat_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Sattelschlepper 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_Other_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Sonstige 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_2_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 2-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_3_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 3-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_4_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 4-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_5_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 5-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_6_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 6-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_over6_Axles_Count_Last28Days	Int	Anzahl 6+-Achser 28 Tage
TrafficData_LKW_2_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 2-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_3_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 3-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_4_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 4-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_5_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 5-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_6_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 6-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_over6_Axles_Percent_Last28Days	Float	Anzahl 6+-Achser 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_low_20ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw -20 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_20_30_ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 20-30 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_30_40_ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 30-40 Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_up_20ton_Count_Last28Days	Int	Anzahl Lkw 4+ Tonnen 28 Tage
TrafficData_LKW_low_20ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw -20 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_20_30_ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 20-30 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_30_40_ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 30-40 Tonnen 28 Tage Prozent
TrafficData_LKW_up_20ton_Percent_Last28Days	Float	Anzahl Lkw 40+ Tonnen 28 Tage Prozent

Tabelle 35: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 3

12.2.6 REST-Schnittstelle

Die Rohdaten nach der Interpretation sowie die aggregierten Daten werden in einer Datenbank gespeichert. Um den Zugriff darauf so einfach wie möglich zu gestalten, wird eine WebserviceSchnittstelle entsprechend der REST-Technologie über HTTP zur Verfügung gestellt. Für diese Schnittstelle können sind Programmierbibliotheken einfach generierbar, da deren Methoden sich leicht in eigene Programme einbinden lassen. Über diese

Schnittstellen können Daten von allen Partnern in die Datenbank geschrieben und auch wieder ausgelesen werden. Da REST-Schnittstellen HTTP-basiert sind kann eine einfache Authentifizierung gewährleistet werden.

Alle Tabellen der Projektpartner unterstützen dieselben http-Methoden. Folgendes Beispiel illustriert das Vorgehen anhand der Tabelle StatusDB_DataResource, (vgl. Tabelle 36):

GET	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/last"
GET	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/{from}/{to}"
PUT	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}"
POST	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}"
POST	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}/batch"
DELETE	"https://ibast.itm.uni-luebeck.de/api/IBF/StatusDB_DataResource/{id}"

{id} entspricht dabei einem beliebigen String. Von jeder Tabelle können beliebige Varianten angelegt werden, welche durch die Id gekennzeichnet werden. Die einzelnen Tabellennamen für die URLs sind den Tabellenspezifikationen entnommen werden.

Tabelle 36: Tabelle StatusDB_DataResource

12.3 Entwicklung einer Webbasierten Ergebnispublikationsplattform für verschiedene Endgeräte

12.3.1 Allgemeines

Die webbasierte Ergebnispublikationsplattform ist auf Basis einer SQL-Datenbank und Browsertechnologien entwickelt worden. Auf allen modernen Anzeigegeräten wie Smartphones, Laptops, Desktop-PCs oder Tablets ist immer ein Web-Browser installiert. Dieser stellt eine geeignete Basis dar, um mit limitiertem Budget und verhältnismäßig geringem Aufwand eine zufriedenstellende Lösung zu implementieren.

12.3.2 Smartphones

Die Webanwendung kann dank Technologien wie *Bootstrap 4.3* für alle Bildschirmgrößen angepasst werden. Bild 171 zeigt den Startbildschirm der Webanwendung auf dem Bildschirm eines Smartphones. Es ist zu erkennen, dass alle Elemente umgebrochen werden und damit besser für ein kleines Display geeignet sind.

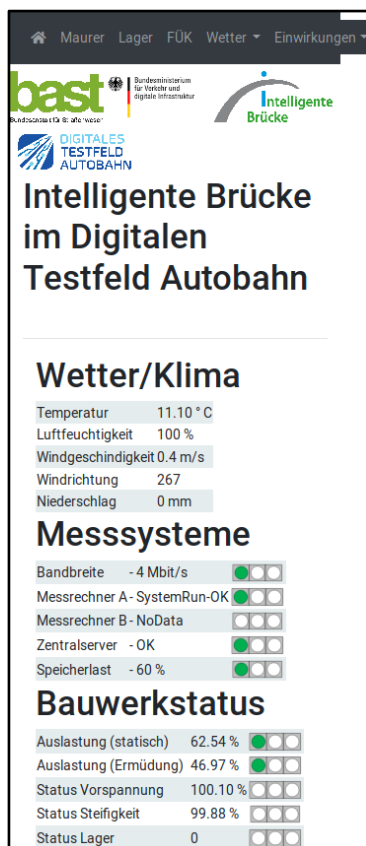


Bild 171: Übersicht der Webanwendung der intelligenten Brücke auf dem Bildschirm eines Smartphones.

12.3.3 Desktop-PC

Der Desktop-PC ist die am einfachsten zu implementierende Variante. Er verfügt meist über einen oder mehrere große Anzeigegeräte von durchschnittlich 23 Zoll.

Graphen und Listen können hier besonders übersichtlich aufgezeigt werden.

Bild 172 zeigt die Startseite der Web-Publikation mit einer Übersicht der Kategorien auf dem Display eines Desktop-PCs

Bild 173 zeigt die Detailansicht eines Sensors auf einem horizontal ausgerichteten Monitor. Im Vergleich zur Smartphone-Ansicht ist hier die vollständige Breite des Displays ausgenutzt. Die Messdaten können auf diese Weise komfortabel und gut lesbar in einem Graphen dargestellt werden. Diese sind auf einem Smartphone versteckt, um mehr Platz für Inhalte zu schaffen.

Auf einem Desktop-PC mit großem Bildschirm ist es ebenfalls komfortabel möglich verschiedene Graphen untereinander darzustellen. Über einen Klick auf entsprechende Legendeneinträge können weitere Graphen in die momentane Ansicht integriert werden.

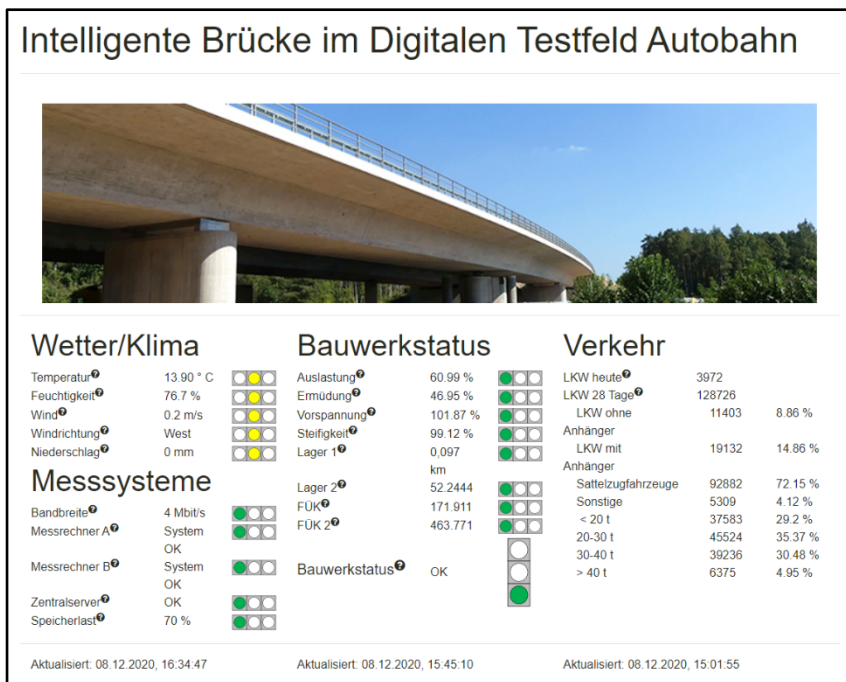


Bild 172: Übersicht der Kategorien, Screenshot der Startseite der Web-Publikation



Bild 173: Darstellung der Messergebnisse in der Web-Publikation beispielhaft für die Temperaturdaten der Sensoren CC14; CBEB, CBF4 und CBF3.

12.3.4 Tablets

Tablets stellen der Displaygröße entsprechend eine Zwischenlösung zwischen Desktop-PC und Smartphone dar. Es ist oft eine vielfach so große Bedienoberfläche wie bei einem Smartphone vorhanden, weswegen beispielsweise Graphen sinnvoll dargestellt werden können.

12.4 Einarbeitung von neuen Auswertungs- und Ergebnisdaten in die entwickelte Webbasierte Ergebnispublikationsplattform

Die Sensordaten der UzL werden direkt via REST in die Datenbank geschrieben, welche als Basis für die Webanwendung dient. Für die automatische Einarbeitung von Daten des IBF wurde eine entsprechende REST-Schnittstelle geschaffen.

12.5 Evaluation und Testbetrieb der Ergebnisplattform

Die Webanwendung befindet sich im Probetrieb. Die Sensordaten des Sensornetzes Projektpartner werden automatisch über eine REST-Schnittstelle in die Datenbank eingepflegt. Tabelle 37 listet die Sensorknoten der Universität zu Lübeck auf. Alle Daten können mit geeigneten Berechtigungen eingesehen werden.

Das manuelle Parsen einiger Messdaten des IBF wurde durch einen Csv-Importer auf die REST-Schnittstelle umkonzipiert.

Der Testbetrieb läuft seit 3 Jahren mit zunehmenden Ergebnisauswertungen stabil. Ausfälle gab es nur durch Probleme der Internetverbindung, die jedoch alle zeitnah behoben wurden.

ID	MAC	Typ
59	0x158D000046CC70r	Gateway UzL
60	0x158D000046CBEB	Typ-K
61	0x158D000046CBF4	Wetterstation
62	0x158D000046CC14	Typ-K
63	0x158D000046CBF3	SHT
64	0x158D000046CC29	Riss 1
65	0x158D000046CC66	Repeater
67	0x158D000046CC73	Repeater
68	0x158D000046CC8C	Riss 2
69	0x158D000046CCA3	Riss 2
70	0x158D000046CC9F	Riss 1
71	0x158D000046CC88	Ausdehnung
72	0x158D000046CC8A	Neigung

Tabelle 37: Liste der in der Webanwendung aufgeführten Sensoren der Universität zu Lübeck.

13 Zusammenfassung

Der vorliegende Schlussbericht dokumentiert die Bearbeitung des Forschungsprojektes „Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten“.

Im Rahmen der Bearbeitung wurden vorhandene Algorithmen und Methoden angewendet und weiterentwickelt, um aus den Messdaten des Messsystems RTMS am Bauwerk 402e im Bereich des AK Nürnberg, Richtungsfahrbahn Regensburg (Verbindungsrampe A3 zur A9) sowohl die Erkennung von überfahrenden Fahrzeugen zu realisieren als auch Kennwerte des Zustandes des Bauwerkes zu ermitteln. Wesentlicher Projektschwerpunkt war dabei die Realisierung der vollständig automatisierten Datenauswertung, Datenaufbereitung und Datenpublikation vor Ort.

Im Ergebnis zeigt sich, dass diese Zielstellung umfassend erreicht werden konnte. Sämtliche Auswertungen hin zu den betrachteten Kennwerten und Daten laufen in automatisierter Form. Des Weiteren zeigt sich, dass das Messsystem RTMS über einen sehr langen Zeitraum (zum Stand des Schlussberichtes über 4 Jahre) nahezu ohne Ausfälle zuverlässig Daten und Ergebnisse geliefert hat und auch weiterhin liefert.

Die zu Projektbeginn als zusätzlichen Schwerpunkt eingeschätzte Synchronisation von Messdaten und Ergebnissen aus verschiedenen, heterogenen Messsystemen konnte durch die Implementierung von vorhandenen Technologien zu Synchronisation von Rechneruhren (NTP) gelöst werden. Denkbare Optimierungen für zukünftige Anwendungen liegen hier lediglich in der Ausgestaltung von Redundanzen bei Ausfällen einzelner zentraler Komponenten des Gesamtsystems.

Hinsichtlich des drahtlosen Sensornetzes konnten Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen aufgezeigt werden.

Die Entwicklung der webbasierten Ergebnispublikation konnte erfolgreich realisiert werden. Es zeigten sich hierbei Herausforderungen, vor allem hinsichtlich der interdisziplinären Arbeit, die erfolgreich bewältigt wurden.

Im Rahmen des parallellaufenden Projektes „Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm“ wird das Gesamtsystem noch ein weiteres Jahr betrieben. Die inhaltlichen Schwerpunkte sind hinsichtlich des Messsystems RTMS jedoch mit dem hier vorliegenden Schlussbericht abgeschlossen.

Die Ausstattung einer Brücke mit Sensoren von Beginn an ist keine Ergänzung zu den bekannten Aufgaben und Ausführungen von Überwachungssystemen, auch wenn Überwachungsaufgaben mit konzipiert werden können und auch im vorliegenden Projekt wurden.

Eine „Intelligente Brücke“ ist die Basis wissenschaftlicher und praktischer Erkenntnisse. Die Aufgaben der „Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ Aufgaben sind u.a.:

Sammeln und Ordnen von Daten

Daten, die es auf der Grundlage von Ingenieurmodellen unterschiedlicher Kategorien (z. B. Mechanik, Klima, Einwirkungen) gestatten:

Phänomene zu beobachten

Hypothesen aufzustellen

Die Modelle und die Hypothesen zu prüfen, zu erweitern, anzupassen

Die Ergebnisse aktuell und zeitbezogen zu veröffentlichen, um sie von anderen überprüfen zu lassen

Veränderung, Erweiterung oder Verwerfen des Modells,

und auch

Aktuelle Kennwerte zum Zustand der Brücke und ihrer Bauteile sowie allgemeine Informationen zur direkten praktischen Verwendung bereitzustellen.

Zur Schaffung und Erhaltung eines Netzes von Ingenieurbauwerken im Verkehrssystem Straße, das dem Nutzer gute Verkehrsverbindung, hohe Sicherheit bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten sowie größtmöglicher Umweltverträglichkeit sichert, sind eine Vielzahl von Intelligenten Brücken wünschenswert.

Da eine neue Intelligente Brücke in den Anfangsjahren überwiegend Datensammler ist, der Betreiber zeitnah daraus keinen praktischen monetären Nutzen erkennen kann, ist politischer Wille erforderlich.

Literatur

- Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 77. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2011.
- [1] AMUNDSON, I.; KUSY, B.; VOLGYESI, P.; KOUTSOUKOS, X.; LEDECZI, A.: Time Synchronization in Heterogeneous Sensor Networks. Tagungsband zu: Distributed Computing in Sensor Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] BÖNING, S.: Entwicklung einer geschlossenen Vorgehensweise zur Ermittlung von Beanspruchungen von Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2013.
- [3] BUTZ, C.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottengleittlager (Schlussbericht FE 15.0632) (Forschungsbericht (noch nicht veröffentlicht)). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2019.
- [4] CHANDY, K. M.; LAMPORT, L.: Distributed Snapshots: Determining Global States of a Distributed System. In: ACM Transactions on Computer Systems 3 (1985), Heft 1, S. 63-75.
- [5] CLORMANN, U. H.; SEEGER, T.: RAINFLOW-HCM. Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage. In: Stahlbau 55 (1986), Heft 3, S. 65-71.
- [6] CRISTIAN, F.: Probabilistic clock synchronization. In: Distributed computing (1989), Heft 3, S. 146-158.
- [7] FISCHER, S.; RÖMER, K. U.: Verteilte System (Vorlesungsskript). Lübeck: Universität zu Lübeck, 2015.
- [8] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes - Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten. In: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen -
- [9] 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.
- [10] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Analyse von Beanspruchungen von lastbeschränkten Brückenbauwerken infolge Straßenverkehr mit besonderer Berücksichtigung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr mit Dauergenehmigung (Forschungsbericht - unveröffentlicht). Gelsenkirchen: Landesbetrieb Straßenbau NRW, 2013.
- [11] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Verkehrslastmodelle für typische WSV-Brücken. Tagungsband zu: BAWKolloquium - Entwicklungen und Fortschritte im Brücken- und massiven Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2018.
- [12] FREUNDT, U.; BÖNING, S.; HÖLZER, D.: Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Dreierwalder Brücke (Forschungsbericht - unveröffentlicht). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2015.
- [13] FREUNDT, U.; BÖNING, S.; HÖLZER, D.: Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Brücke im Zuge der Göxer Landstraße in Hannover Seelze (Forschungsbericht - unveröffentlicht). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2016.
- [14] FREUNDT, U.; BÖNING, S.; MICHAEL, D.: RTMS für die Bestimmung von Verkehrseinwirkungen und der Tragfähigkeit der Stauseebrücke bei Saaldorf (Untersuchungsbericht - unveröffentlicht). Erfurt: Thüringer Landesamt für Bau und Verkehr, 2013.

- [15] FREUNDT, U.; BÖNING, S.; STADE, I.: Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Lingener Damm Brücke über den DEK (Forschungsbericht - unveröffentlicht). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2017.
- [16] FREUNDT, U.; VOGT, R.; BÖNING, S.; PIERSON, C.; EHRLE, P.: Roadtraffic Management System (RTMS) - Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen - Brücken- und Ingenieurbau - Heft B 100. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, 2014.
- [17] GUSELLA, R.; ZATTI, S.: The Accuracy of the Clock Synchronization Achieved by TEMPO in Berkeley UNIX 4.3BSD. In: IEEE Transactions on Software Engineering 15 (1989), Heft 7, S. 847-853.
- [18] MARZULLO, K. A.: Maintaining the time in a distributed system: An example of a loosely-coupled distributed service. Stanford: Stanford University, Dissertation, 1984.
- [19] MILLS, D.; MARTIN, J.; BURBANK, J.; KASCH, W.: Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification - RFC 5905. 2010.
- [20] PIERSON, C.: Erstellen und Erproben von Optimierungsstrategien zur Ermittlung aktueller Verkehrsdaten aus Brückenmessungen. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Masterarbeit, 2011.
- [21] PLATA-CHAVES, J.; BERTRAND, A.; MOONEN, M.; THEODORIDIS, S.; ZOUBIR, A. M.: Heterogeneous and Multitask Wireless Sensor Network - Algorithms, Applications, and Challenges. In: IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing 11 (2017), Heft 3, S. 450-465.
- [22] QUILLIGAN, M.: Bridges Weigh-in Motion, Development of a 2-D Multi – Vehicle Algorithm. Stockholm: Royal Institute of Technology, Dissertation, 2003.
- [23] RILL, D.: Digitales Testfeld Autobahn - Intelligente Brücke - - Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen (Schlussbericht FE 15.0644) (Forschungsbericht (noch nicht veröffentlicht)). Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2020.
- [24] SICHITIU, M. L.; VEERARITTIPHAN, C.: Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks. In: Wireless Communications and Networking (2003).
- [25] SZABÓ, I. (ZIMMERMANN P.; FELLMANN E. A.): Geschichte der mechanischen Prinzipien und ihrer wichtigsten Anwendungen - Wissenschaft und Kultur ; 32. Basel [u.a.]: Birkhäuser, 1987.
- [26] NORM DIN EN 1992-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken. Beuth Verlag, Fassung 12/2010.
- [27] NORM DIN EN 1992-2/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Beuth Verlag, Fassung 04/2013.
- [28] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2012). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2012.

Bilder

Bild 1:	Übersicht Bauwerk, (a) Regelquerschnitt und (b) Ansicht aus Richtung Süden	20
Bild 2:	Herstellung der Dehnungssensoren zur Installation im Betonquerschnitt. (a, b) DMS verklebt auf vorbereitetem Bewehrungsstab und entkoppelt zur Kompensation der Temperatureinflüsse. (c) Dauerelastische Dichtungsmasse zum Schutz der Elektrik und (d) Stutzhülle zur Sicherung gegen mechanische Beschädigung während des Einbaus auf der Baustelle und der Betonarbeiten.....	21
Bild 3:	Einbau der im Brückenquerschnitt befindlichen Dehnungs- und Temperatursensoren in den Fertigungstakt/Vorschubelement 2. (a) Untere Messstellen der Messachsen A und B. (b, d) Dehnmesssensor MS 5L, (d) Temperatur MS 6T2o und (e) Messstellen MS 6T2o, MS 6T1u und MS 6L.....	22
Bild 4:	Lage der RTMS Sensoren im Bauwerk.....	23
Bild 5:	Lage und Bezeichnung der Messstellen in den Messquerschnitten des Überbaus	24
Bild 6:	Lage der Messstellen an der Übergangskonstruktion.....	25
Bild 7:	(a) Blick in Richtung Achse 50 auf die Messachsen C und D mit Dehnmessstreifen (DMS; z.B. MS 13Q) und induktiven Wegaufnehmern (IWT; unter roter Abdeckung), (b) Messschrank an Achse 50 und (c) Messschrank an Achse 40.....	26
Bild 8:	Messstellen (a, b) am nördlichen Lager der Achse 40 in Form von induktiven Wegaufnehmern (IWT), (c) Beschleunigungssensor (PBC) zentrisch auf ein externes Spanglied montiert, (d) Beschleunigungssensor (PBC) zentrisch auf den zum instrumentierten Spannglied gehörenden Umlenksattel im östlichsten Feld 4 und (e) Dehnmessstreifen (DMS) an der Unterseite des Fahrbahnübergangs.....	27
Bild 9:	Installation des Videosystems. (a, d) Schaltschrank mit Switch und Datenrekorder, (b) Befestigung des Kippmastes an der Brücke und (c) Blick auf die installierten Kameras in Fahrtrichtung.....	31
Bild 10:	Schematische Darstellung des installierten Sensornetzwerkes und die stärksten Verbindungen zwischen den Sensorknoten	32
Bild 11:	Darstellung Verortung des Riss-/Kraftsensors CC8C in der Brückenskizze	33
Bild 12:	Darstellung der Verortung des Repeaters CC66 eines Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensors CBF3 und der Wetterstation CBF4 sowie ihre angenommene Konnektivität	34
Bild 13:	Darstellung der Verortung des Potentiometrischen potentiometrischen Weggebers CC9F, des Riss-/Kraftsensors CCA3, des Ausdehnungssensors CC88, der Materialtemperatursensoren CBEB & CC14, des Neigungssensors CC8A und die angenommene Konnektivität. Die Weggeber und Ausdehnungssensoren befinden sich an der Wand zur Achse 40.....	35
Bild 14:	Darstellung der Verortung des Neigungssensors CC8A, des potentiometrischen Weggebers CC29, des Repeaters CC73, des Gateways CC70, des Riss-/Kraftsensors CC8C und die angenommene Konnektivität.....	36

Bild 15:	Übersicht der auf dem NAS laufenden Komponenten. Dargestellt sind Bridge-Connector, Sensornetz und Datenbank, sowie die Richtung des Informationsaustausches.....	37
Bild 16:	Die verwendete Netty-Pipeline.....	38
Bild 17:	Systemarchitektur der Intelligenten Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn. Dargestellt sind die verwendeten Geräte und ihre Verbindungen. An das NAS und an den Messrechnern ist jeweils die Sensorik der Projektpartner angeschlossen.....	40
Bild 18:	Dargestellt sind Atomuhren und die ersten drei Stratum-Schichten. Gelbe Pfeile beschreiben eine direkte Verbindung zu einer Uhr, rote stellen Netzwerkverbindungen dar	42
Bild 19:	Beispiel für den Austausch logischer Zeiten mittels Lamport Uhren.....	43
Bild 20:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll <i>LoopStats</i> der NTP-Implementierung	47
Bild 21:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und aller in der NTP-Implementierung hinterlegten Zeitquellen, unabhängig von deren tatsächlicher Verwendung – aus Protokoll <i>PeerStats</i> der NTP-Implementierung	47
Bild 22:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und verschiedenen Zeitquellen – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung	48
Bild 23:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem NAS – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung	48
Bild 24:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem Messrechner Maurer – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung	49
Bild 25:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Video-System und verschiedenen Zeitquellen – aus Protokoll des Video-Systems.....	49
Bild 26:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und verschiedener Zeitquellen – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung – Phase des Ausfalls des NAS Sep./Okt. 2017	50
Bild 27:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und allen in der NTP-Implementierung hinterlegten Zeitquellen, unabhängig von deren tatsächlichen Verwendung – aus Protokoll <i>PeerStats</i> der NTP-Implementierung – Phase des Ausfalls des NAS zwischen Februar 2019 und April 2019.....	50
Bild 28:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle aus Protokoll <i>LoopStats</i> der NTP-Implementierung – Phase des längeren Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018	51
Bild 29:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll <i>PeerStats</i> der NTP-Implementierung – Phase des längere Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018 .	52
Bild 30:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und dem Messrechner Maurer – aus Datenerfassung der Eigenentwicklung – Phase des längeren Ausfalls der Internetverbindung im Juni 2018	52

Bild 31:	Darstellung der Zeit-Offsets in Sekunden zwischen dem Messrechner RTMS und der für die Synchronisierung verwendeten Zeitquelle – aus Protokoll <i>PeerStats</i> der NTP-Implementierung – Phase des längere Ausfalls der Internetverbindung im August 201953	
Bild 32:	FE-Modell der Brücke. (a) Geometrie des kompletten Modells, (b) Trog des Hohlkastens incl. der auf die Messstellen hin angepassten Messquerschnitte A-D und (c) FE-Netz des Hohlkastens im Querschnitt.....	55
Bild 33:	Basislinienkorrigierte Dehnungsmessungen der an der Längsbewehrung im inneren des Betonquerschnittes angebrachten DMS. Dargestellt sind die Fahrten des Kalibrierfahrzeuges 1 (3-Achser) in der linken Fahrspur rechts orientiert mit der Überfahrgeschwindigkeit von (a) 5 km/h, (b) 30 km/h, (c) 50 km/h und (d) 90 km/h. ...	57
Bild 34:	Basislinienkorrigierte Messungen der induktiven Wegausnehmer am Lager der Achse 40/Nord in vert. Richtung. Dargestellt sind die Fahrten des Kalibrierfahrzeuges 1 (3-Achser) in der linken Fahrspur rechts orientiert mit der Überfahrgeschwindigkeit von (a) 5 km/h, (b) 30 km/h, (c) 50 km/h und (d) 90 km/h.....	58
Bild 35:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug	59
Bild 36:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug	60
Bild 37:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug	60
Bild 38:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug	61
Bild 39:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug	61
Bild 40:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug	62
Bild 41:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug	62
Bild 42:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug	63
Bild 43:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	64
Bild 44:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	64
Bild 45:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	65
Bild 46:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	65
Bild 47:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	66
Bild 48:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	66
Bild 49:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	67
Bild 50:	Ermittelte Einflusslinien – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	67
Bild 51:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	68

Bild 52:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	69
Bild 53:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	69
Bild 54:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	70
Bild 55:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	70
Bild 56:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	71
Bild 57:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	71
Bild 58:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 5-achs Sattelzug – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	72
Bild 59:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	73
Bild 60:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS1L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	73
Bild 61:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	74
Bild 62:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS2L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	74
Bild 63:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	75
Bild 64:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS5L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	75
Bild 65:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 1 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	76
Bild 66:	Ermittelte Einflusslinien – Kalibrierfahrten April 2018 – Messstelle MS6L – Fahrzeug auf Spur 2 – 3-achs LKW – Vergleich Mittelwertverlauf mit Referenzverlauf.....	76
Bild 67:	Prinzipdarstellung der Fahrzeugerkennung aus Bauwerksmessungen.....	77
Bild 68:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (<i>links</i>) und MS 2L (<i>rechts</i>) – Kalibrierfahrt ID 9.....	78
Bild 69:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (<i>links</i>) und MS 6L (<i>rechts</i>) – Kalibrierfahrt ID 9.....	78
Bild 70:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 2L und Messquerschnitt B (2) – MS 6L – Kalibrierfahrt ID 9.....	79
Bild 71:	Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 9.....	79

Bild 72:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 11	79
Bild 73:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 11	80
Bild 74:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 11.....	80
Bild 75:	Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 18 – Kalibrierfahrt ID 11	80
Bild 76:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 34	80
Bild 77:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 34	80
Bild 78:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 34.....	81
Bild 79:	Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 34	81
Bild 80:	Obere Hüllkurve der Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 21 – Kalibrierfahrt ID 34.....	81
Bild 81:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A – MS 1L (links) und MS 2L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 36	81
Bild 82:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt B – MS 5L (links) und MS 6L (rechts) – Kalibrierfahrt ID 36	82
Bild 83:	Dehnungsmessungen Messquerschnitt A (1) – MS 1L und Messquerschnitt B (2) – MS 5L – Kalibrierfahrt ID 36.....	82
Bild 84:	Dehnungsmessungen an der Fahrbahnübergangskonstruktion – MS 18 – Kalibrierfahrt ID 36	82
Bild 85:	Achslastenverteilung anhand der Peakkoordinaten der erkannten Einzelachsen an der FÜK MS 21 (rechts) – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug).....	82
Bild 86:	Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 2L (rechts) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug)	83
Bild 87:	Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 6L (rechts) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 1 (Sattelzug)	83
Bild 88:	Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 1L (links) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser).....	83
Bild 89:	Berechnete und gemessene Dehnungsverläufe an den Messstellen MS 5L (links) nach der Ausgleichsrechnung zur Ermittlung des Gesamtgewichtes – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser).....	83

Bild 90:	Achslastenverteilung anhand der Peakkoordinaten der erkannten Einzelachsen der FÜK MS 18 (<i>links</i>) – Kalibrierfahrt ID 2 (3-Achser).....	83
Bild 91:	Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen DTV-SV unter Berücksichtigung aller Wochentage – Monatsweise getrennt.....	90
Bild 92:	Mittleres tägliches Schwerverkehrsaufkommen DTV-SV ohne Berücksichtigung von Wochenende und Feiertagen – Monatsweise getrennt.....	91
Bild 93:	Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (01.02.2017 bis 31.01.2018)	92
Bild 94:	Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (31.01.2018 bis 30.01.2019)	92
Bild 95:	Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (30.01.2019 bis 29.01.2020)	93
Bild 96:	Anzahl von erkannten LKW-Fahrzeugen pro Tag (29.01.2020 bis 31.08.2020)	93
Bild 97:	Zusammensetzung des Schwerverkehrs – Monatsweise getrennt	94
Bild 98:	Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2017 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen.....	95
Bild 99:	Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2018 – Algorithmen Stufe 1 – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen.....	95
Bild 100:	Ermittelte Gesamtgewichtsverteilungen für verschiedene Fahrzeugtypen – Daten aus Oktober 2019 – Algorithmen aktuelle Entwicklungsstufe – Vergleich zu vorliegenden Daten von Gesamtgewichtsverteilungen.....	96
Bild 101:	Absolute Häufigkeit von Zeitdifferenzen bei der Zuordnung von Datensätzen.....	98
Bild 102:	Absolute Häufigkeit der Differenzen der Achsanzahl bei zugeordneten Datensätzen..	98
Bild 103:	Absolute Häufigkeit der Verhältnisse von ermittelten Gesamtgewichten bei zugeordneten Datensätzen.....	98
Bild 104:	Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtgewichte RTMS vs. Maurer – Nur verschnittene Datensätze rechter FS.....	99
Bild 105:	Gegenüberstellung der ermittelten Gesamtgewichte RTMS vs. Maurer – Nur verschnittene Datensätze rechter FS – Fahrzeuge mit 5 Achsen (gleiche Achsanzahl an beiden Systemen erkannt).....	100
Bild 106:	Vergleich Gesamtgewichtsverteilung – Fahrzeuge mit 5 erkannten Achsen	100
Bild 107:	(a) Messverlauf der Beschleunigungssensoren (MS 23-26) bei Kalibrierfahrt ID 35 (Fz. 1, linke Spur – rechts orientiert, 90 km/h). (b) Die ersten sieben Eigenformen der ext. Spannglieder entsprechend einer harmonischen Schwingung. (c) Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für den Zeitbereich t_1	101
Bild 108:	Amplitudenspektren der Sensoren an den Spanngliedern für die Zeitbereiche (a) nachts mit relativ geringem Verkehrsaufkommen und (b) tagsüber mit relativ hohem Verkehrsaufkommen. Gekennzeichnet sind die durch Peaks sichtbaren Eigenfrequenzen der den Sensoren zugehörigen Spanngliedabschnitten.	102
Bild 109:	Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS23 – Februar 2017 bis September 2020.....	104
Bild 110:	Ermittelte 1. Eigenfrequenzen – MS24 – Februar 2017 bis September 2020.....	105

Bild 111:	Ermittelte 1. Eigenfrequenzen - MS26 – Februar 2017 bis September 2020.....	105
Bild 112:	Ermittelte 3. Eigenfrequenzen – MS25 – Februar 2017 bis September 2020.....	106
Bild 113:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend)	109
Bild 114:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell)	109
Bild 115:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzzeiteffekte	110
Bild 116:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße	110
Bild 117:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Ausfall einer Litze	111
Bild 118:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Abnahme des Langzeiteffektes.....	112
Bild 119:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – rechnerischer Zunahme des Langzeiteffektes.....	112
Bild 120:	MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz in Hz – Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend).....	113
Bild 121:	MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz in Hz– Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell)	114
Bild 122:	MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz in Hz – Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzzeiteffekte.....	114
Bild 123:	MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße	115
Bild 124:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung	116
Bild 125:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Langzeiteffekt (linearer Trend) – aus Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020	116
Bild 126:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Kompensation Kurzzeiteffekte (Polynome, Temperatur 30 Tage, Temperatur aktuell) – aus Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020	117
Bild 127:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Ausgangsdaten und Abbildung vom Lang- und Kurzzeiteffekte – für Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020.....	117
Bild 128:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Kontrollgröße – für Gesamtzeitraum von Februar 2017 bis September 2020.....	118
Bild 129:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis Oktober 2019 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung	119

Bild 130:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus initialer Auswertung	120
Bild 131:	MS 23 – externes Spannglied – 1. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte – Zeitraum von Februar 2017 bis September 2020 – Parameter zur Kompensation des Langzeiteffektes aus aktualisierter Auswertung.....	120
Bild 132:	MS 25 – Umlenksattel/Bauwerk – 3. Eigenfrequenz – Verlauf Statuswerte.....	121
Bild 133:	Kennwert Zeitdiagramm mit eingetragenen Klassendurchgängen	123
Bild 134:	MS6L – Stunden-Maximalwerte in $\mu\text{m}/\text{m}$ und Hüllkurve	124
Bild 135:	MS6L – Stunden-Minimalwerte in $\mu\text{m}/\text{m}$ (als Absolutwerte) und Hüllkurve.....	125
Bild 136:	MS6L – Stunden-Maximalwerte in $\mu\text{m}/\text{m}$, Hüllkurve und charakteristische Werte	125
Bild 137:	MS6L – Stunden-Minimalwerte in $\mu\text{m}/\text{m}$ (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte	126
Bild 138:	MS6L – Stunden-Maximalwerte , Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1	126
Bild 139:	MS6L – Stunden-Minimalwerte (als Absolutwerte), Hüllkurve und charakteristische Werte – relativ zum Wert aus dem Ansatz von LM 1	127
Bild 140:	MS1L – Ermittelte Schädigungssummen für verschiedene Betrachtungszeiträume ..	129
Bild 141:	MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten für verschiedene Betrachtungszeiträume.....	129
Bild 142:	MS1L – Ausgewertete Stunden für verschiedene Betrachtungszeiträume	130
Bild 143:	MS1L – Berechnete Werte für $\lambda_{s,3}$ für verschiedene Betrachtungszeiträume.....	131
Bild 144:	MS1L – Ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreiten im Verhältnis zu Vergleichswerten für verschiedene Betrachtungszeiträume	132
Bild 145:	Darstellung der Sensoren CC29, CC9F, CCA3 und CC8C.....	133
Bild 146:	Rissbreitenverlauf über den Messzeitraum vom 01.12.2018 bis 01.12.2020. Aufgezeigt sind die Sensorknoten CCA3 (rot), CC8C (orange), CC29 (Gelb) und CC9F (Grün). Oben ist der Messverlauf 2019-2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018-2019 dargestellt.	133
Bild 147:	Neigung über den Messzeitraum 1.12.2018 bis 1.12.2020. Oben ist der Messverlauf 2019 - 2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018 - 2019 dargestellt.	134
Bild 148:	Rissbreitenverlauf der Sensoren CCA3 (Rot) und CC8C (Orange) aus Kraftsensoren über den Messzeitraum 1.12.2018 bis 1.12.2020.....	134
Bild 149:	Lufttemperatur im Schatten CBF3 (Grün), Oberflächentemperatur Hohlkasten oben CBEB (Gelb), Oberflächentemperatur Hohlkasten unten CC14 (Rot) und Lufttemperatur der Wetterstation CBF4 (Orange). Oben ist der Messverlauf 2019 - 2020 dargestellt. Unten ist der Messverlauf 2018 - 2019 da.	134
Bild 150:	Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 16 Stunden	135

Bild 151: Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 1 Minute.....	136
Bild 152: Neigungsverlauf in y-Richtung am Lagerungspunkt Achse 40 infolge Verkehr am 10.04.2018 – 7 Sekunden.....	136
Bild 153: Eigenfrequenzen aus Überbauverformung.....	137
Bild 154: Eigenfrequenzen aus Überbauverformung und Beschleunigungsmessung am Umlenksattel	137
Bild 155: Redundanzen für ermittelte Eigenfrequenzen	138
Bild 156: Ursprüngliche Version des Neigungssensor der UzL (IN10).....	139
Bild 157: Anbringung des Neigungssensors an der Fahrbahn-überquerung in Segeberg	139
Bild 158: Schematische Darstellung des Neigungssensors an der Intelligenten Brücke.....	140
Bild 159: Darstellung des KB-5DB Neigungssensors	141
Bild 160: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Neigungssensors KB-5DB	141
Bild 161: Vergleich der verschiedenen Gehäusegrößen, Gehäuse an der Intelligenten Brücke im digitalen Testfeld Autobahn (links), Gehäuse an einer Brücke in Bad Segenbergt (rechts).....	142
Bild 162: Konfigurationsmöglichkeiten für den Neigungs-sensorknoten.....	142
Bild 163: Beschleunigungssensor auf dem M10-Board	144
Bild 164: Schematische Darstellung eines hochfrequenten Messvorgangs	144
Bild 165: Standort und Anbringungsart des weiter entwickelten Inklinometers an der Intelligenten Brücke in Nürnberg.....	144
Bild 166: Gesammelte Sensordaten des neu entwickelten Inklinometers im Testbetrieb	144
Bild 167: Ablaufdiagramm der automatisierten Datenverarbeitung des Systems RTMS	147
Bild 168: Kodeselement zum Hochladen standardisierter .Csv-Dateien	151
Bild 169: Navigationsstruktur der Web-Publikation	156
Bild 170: Architektur der Komponenten von Backend und Frontend der webbasierten Ergebnispublikation.	157
Bild 171: Übersicht der Webanwendung der intelligenten Brücke auf dem Bildschirm eines Smartphones.....	170
Bild 172: Übersicht der Kategorien, Screenshot der Startseite der Web-Publikation.....	171
Bild 173: Darstellung der Messergebnisse in der Web-Publikation beispielhaft für die Temperaturdaten der Sensoren CC14; CBEB, CBF4 und CBF3.	171

Tabellen

Tabelle 1: Datenerhebung der RTMS-Anlage – Teil 1.....	29
Tabelle 2 : Datenerhebung der RTMS-Anlage – Teil 2.....	30
Tabelle 3: Tabelle mit den MAC-Adressen der einzelnen Knoten, deren Datenbank-IDs und der dazugehörigen Bezeichnung.	32
Tabelle 4: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 30.09.2016	85
Tabelle 5: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 22.04.2018	87
Tabelle 6: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 22.04.2018	88
Tabelle 7: Ergebnisse der Fahrzeugerkennung anhand der Kalibrierfahrten am 22.04.2018	89
Tabelle 8: Messtechnisch ermittelte Eigenfrequenzen der erfassten Spanngliedabschnitte auf Basis der in Bild 108 dargestellten Amplitudenspektren.	103
Tabelle 9: Berechnete 1. und 3. Eigenfrequenz der instrumentierten Spanngliedabschnitte und die zugehörigen Systemparameter für den Ausfall von keiner, einer und 20 Litzen des Spanngliedes.	107
Tabelle 10: Vergleichswerte aus dem Ansatz des Lastmodells LM 1 nach Eurocode und NA.....	124
Tabelle 11 Spezifikationen des KB-5DB Neigungssensors	141
Tabelle 12: Datenmodell einer Brücke in der Webapplikation und Datenbank	158
Tabelle 13: Datenmodell eines Sensorknotens in der Webapplikation und Datenbank	159
Tabelle 14: Datenmodell eines Sensors (Kanals). Diese sind immer einem Sensorknoten zugeordnet.	159
Tabelle 15: Beispiel einer ID zu Einheiten Zuordnung.....	159
Tabelle 16: Beispielhafte Auflistung verschiedener Einheiten-Präfix-Werte	159
Tabelle 17 : Beispiele für inferierte Einheiten.....	160
Tabelle 18 : Spezifikation der Tabellen Lkw0 - Lkw3 sowie LkwHistory	160
Tabelle 19: Spezifikation der Fahrzeugdetaildaten. n und k stehen für eine sich wiederholende Anzahl Tabellenspalten desselben Typs.....	160
Tabelle 20: Metainformationen aller Systeme und Sensoren des IBF. Die Datenbankstruktur wurde exemplarisch für eine Mess-stelle gezeigt. Diese gilt für StatusDbData, ResultDbFFTDData, REsultDbFatigueData, ResultDbStressData u nd ValueDbData	161
Tabelle 21: Spezifikation der Tabelle ValueDB_Data.....	161
Tabelle 22: Tabellenspezifikation der Tabelle StatusDB_Data.	161
Tabelle 23: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Stress_Data.....	162
Tabelle 24: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDb_Fatigue_Data.	162
Tabelle 25: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_Fatigue_DeltaS_Data.	162
Tabelle 26: Tabellenspezifikation der Tabelle ResultDB_FFT_Data.....	163
Tabelle 27: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone – Teil 1.....	164
Tabelle 28: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone – Teil 2.....	164
Tabelle 29: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Status_Statistik_Schablone	165

Tabelle 30: Tabellenspezifikation der Tabelle Lager_Statistik_Schablone	165
Tabelle 31: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Verkehr_kontinuierlich_Schablone.....	165
Tabelle 32: Tabellenspezifikation der Tabelle Ueko_Verkehr_statistik_Schablone	165
Tabelle 33: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 1.....	166
Tabelle 34: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 2.....	167
Tabelle 35: Tabellenspezifikation der Tabelle DB_StatusPage_Full – Teil 3.....	168
Tabelle 36: Tabelle StatusDB_DataResource.....	169
Tabelle 37: Liste der in der Webanwendung aufgeführten Sensoren der Universität zu Lübeck...	173

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdes € 15,50

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.