

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

Messtechnische Erfassung von Verkehrs- daten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 168

bast

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke

Messtechnische Erfassung von Verkehrs- daten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

von

Daniel Rill

Maurer Engineering GmbH
München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 168

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 15.0644
Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke -
Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis
von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Fachbetreuung
Sarah Windmann

Referat
Betonbau

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 978-3-95606-595-8

Bergisch Gladbach, Juli 2021

Kurzfassung – Abstract

Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Messtechnisch instrumentierte Fahrbahnübergänge als möglicher Baustein des Konzeptes einer „intelligenten Brücke“ liefern im Rahmen der Pilotstudie „Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn“ unter anderem umfassende Daten über den überfahrenden Verkehr. Aus den erfassten Messgrößen werden vollautomatisch nicht nur Geschwindigkeit, Gesamtgewicht und Fahrzeugtyp bestimmt, zusätzlich wird anhand der Daten kontinuierlich der Zustand der mechanischen und elektronischen Systemkomponenten bewertet.

Durch kontrollierte Messfahrten mit genau bestimmten Fahrzeugparametern wurde eine solide Datenbasis geschaffen, auf welcher die Parameter für die Geschwindigkeits- und Achslastermittlung in der eigens entwickelten Auswertesoftware bestimmt werden konnten.

Unterstützt durch Mehrkörpersimulationen wurde die dynamische Interaktion des Fahrbahnüberganges mit den überfahrenden Fahrzeugen analysiert. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen konnte ein Kompensationsalgorithmus erarbeitet werden, um den durch dynamische Effekte bestimmten Messfehler in der Achslastbestimmung zu reduzieren.

Aus der Analyse von Langzeitdaten und dem Vergleich mit Daten der Projektpartner (insbesondere Wetterdaten) wurden Einflüsse von Umweltbedingungen auf die Messergebnisse bestimmt und Plausibilitätskontrollen für die Messergebnisse definiert.

Die gewonnenen Ergebnisdaten werden zur Langzeitarchivierung und übersichtlichen Darstellung in der gemeinsamen Ergebnisdatenbank der Projektpartner abgelegt.

Digitales Testfeld Autobahn – smart bridge – traffic data acquisition based on sensor-equipped roadway expansion joints

Sensor-equipped roadway expansion joints, as a component of the concept of a “smart bridge”, provide comprehensive data on the crossing traffic and other valuable information within the pilot study “Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn”. From the recorded sensor data, not only the velocity, total weight and type of the crossing vehicles are determined, but also the status of the mechanical and electronic components of the system can be assessed.

Data collected during controlled test runs with defined vehicle parameters could be used as a solid basis for determining the parameters to evaluate vehicle velocities and axle loads within the specially developed software.

With the use of simulations run with a multibody model, the dynamic interactions between the expansion joint and the crossing vehicles were analyzed. The insights gained were used in the development of a compensation algorithm to reduce the measurement error in the axle load due to dynamic effects.

The data recorded over the duration of the project, together with data (especially weather data) from the project partners, allowed for an analysis of the influence of environmental conditions on the results. Also, plausibility checks to determine the validity of the recorded data were implemented.

For long-term storage and comprehensive display, the result data is sent to the database which is shared between the project partners.

Summary

Digitales Testfeld Autobahn – smart bridge – traffic data acquisition based on sensor-equipped roadway expansion joints

1 Sensor-equipped roadway expansion joint

Part of the “Digitales Testfeld Autobahn” is BW402e, a two-lane transfer bridge at the highway cross Nuremberg, which is equipped with sensors and sensor-equipped components. The intent is to serve as pilot study for a partial realization of a “Smart Bridge” and to deliver information about the state and loading condition of the bridge. Therefore, one of the swivel-joint expansion joints of the bridge is equipped with a variety of sensors.

The main goal of this project is to determine, whether the sensor-equipped expansion joint is suited to evaluate traffic data. For this purpose, sensors for measuring the vertical load and the gap width are integrated as well as the necessary electronics and software for data acquisition and evaluation. To eliminate the interference between lanes when vehicles are crossing simultaneously, the lanes are separated mechanically.

2 Data acquisition, calibration by test runs

To determine the relation between the dynamically measured traffic loads and speeds, calibration runs with pre-measured trucks were conducted in April 2018. These were repeated in April 2020 with similar parameters.

Comparison of the force-time diagrams show velocity dependent dynamic effects that influence the peak values of the force curve. Especially at higher velocity levels (80 – 90 km/h), vibration effects are clearly visible.

A frequency analysis shows, that there are two distinct frequency ranges of vibration in the signal: First, the directly excited mode with an eigenfrequency of ca. 100 Hz and second the transferred vibration from the adjacent lane with about 140 – 150 Hz, cf. figure 1.

The coincidence of the excitation maximum with the first minimum of backswing at a velocity of 90 km/h causes a reduction of 10 – 15% in the measured force value compared to the static vehicle weight.

However, the time of the vehicle entering and leaving the expansion joint can be determined very precisely by filtering out these known vibrations. Thus, the vehicle velocity can be calculated reliably.

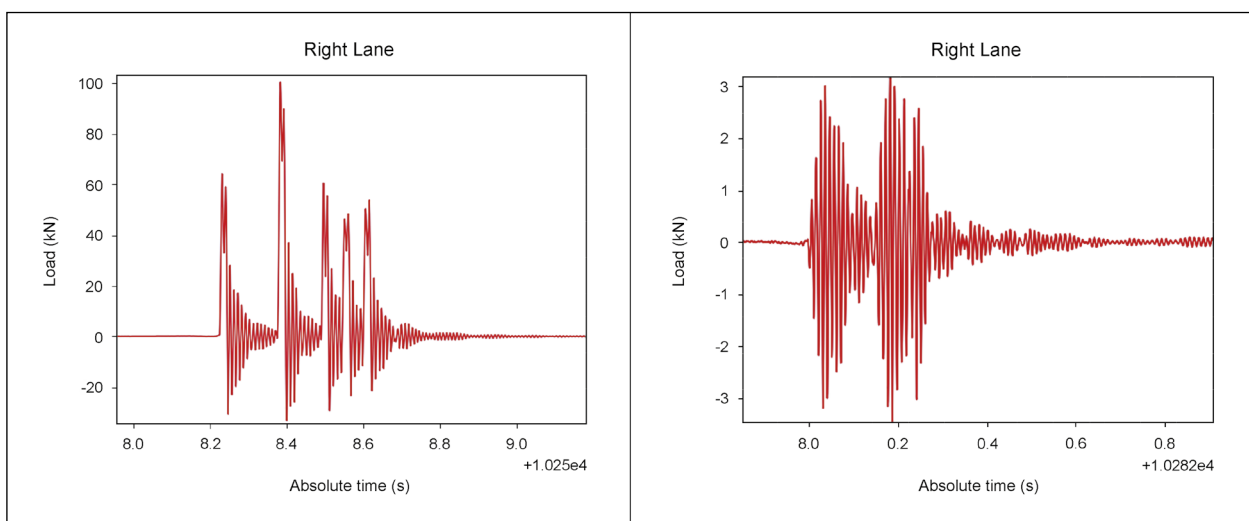


Fig. 1: Direct excitation (left), excitation transferred from adjacent lane (right)

3 Assessment and analysis of dynamic effects

For the determination of the cause of dynamic effects referred to in section 2 and especially the contribution of the vehicle dynamics (which are unknowable by principle), a multibody simulation model (see figure 2) of the joint and representative vehicles is available.

Using this model, a multitude of parameter can be varied (e.g. the height difference between the road and joint surfaces or the spring stiffness of the vehicle suspension system) and the influence on the forces measured on the edge bearings can be determined.

The initial parametrization of the model is based on the design parameters of the expansion joint as well as the vehicle parameters measured during the calibration runs.

Variation of the vehicle and joint parameters shows that within a wide range of values the dynamics of the expansion joint are the predominant influence on the deviations between the measured value and the static vehicle weight. The vehicle dynamics only show a significant influence at parameter values far beyond the practically relevant range.

4 Measurement of axle loads and vehicle weights

The insights from the simulation and the calibration runs from the basis for the fully automated evaluation of the measurement data.

Within the software specially developed for this project the raw data is read in 10-minute intervals and then processed. First, the channels are ordered by sensor type and the total force for every lane as well as the front and rear edge of the expansion joint is calculated. From the total force signal, the eigenfrequencies are filtered out and the crossing events are found by a peak search. Together with the gap width signal, the duration of the crossing events allows for the determination of the axles' velocity and thus the grouping of axles to vehicles.

As the expected distance between two subsequent vehicles becomes smaller than the maximum wheelbase of trucks below ca. 30 km/h, the grouping of axles to vehicles is no longer possible in these cases. The software then switches to a "traffic jam mode", in which the individual axle loads are recorded without grouping.

Based on the findings concerning the joint dynamics described in sections 3 and 4, the unfiltered total weight signal can be corrected for the dynamic effect to better approximate the (static) wheel load.

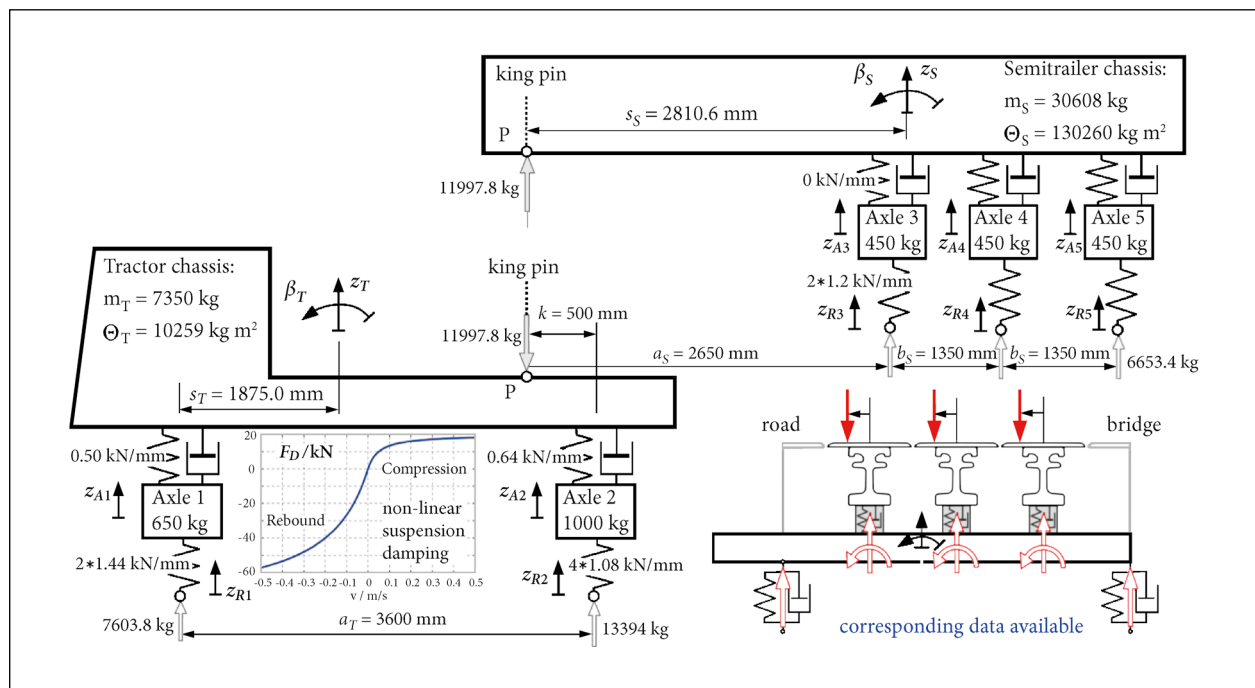


Fig. 2: Multibody models of a truck and the expansion joint with parameters

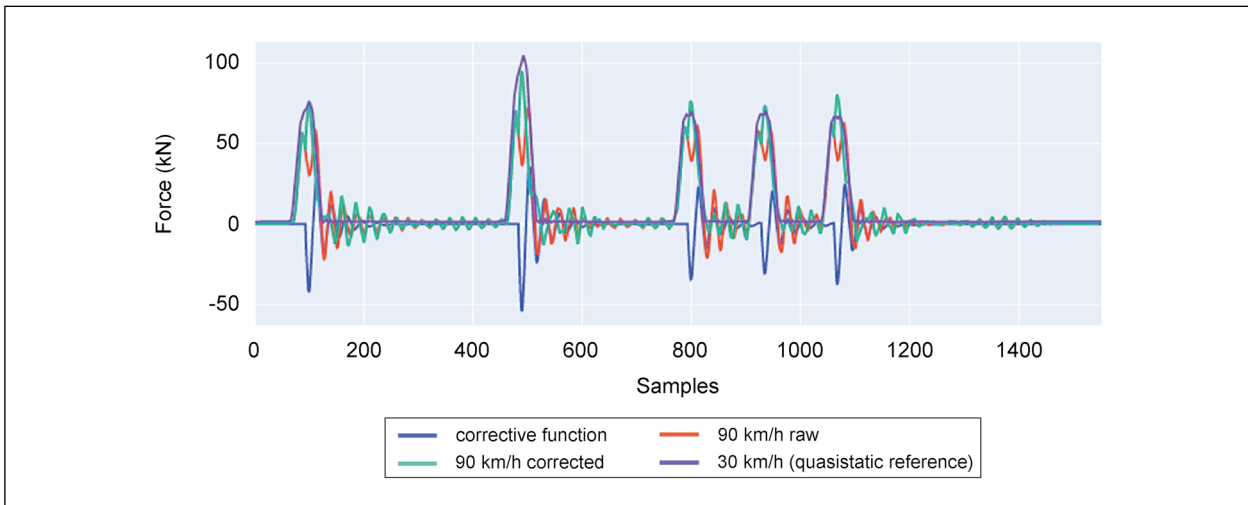


Fig. 3: Effect of compensation function on load signal

The effect of this correction is exemplarily depicted in figure 3.

The recorded vehicle data is pre-structured for storage in the database (cf. section 10).

5 Effect of environmental conditions on the result accuracy

From the results of the long-term operation of the system as well as comparisons with the results from the project partners, the impact of external influences on the accuracy of the measurement values can be estimated.

The time history of the averaged first-axle loads of trucks shows the temperature (taken from the air temperature values recorded by the weather station at the bridge) to be the main influence factor, figure 4. Other phenomena like wind etc. show no discernible effect.

The limited overlap of the available data sets however prohibits an accurate quantization of the temperature dependency of the result values.

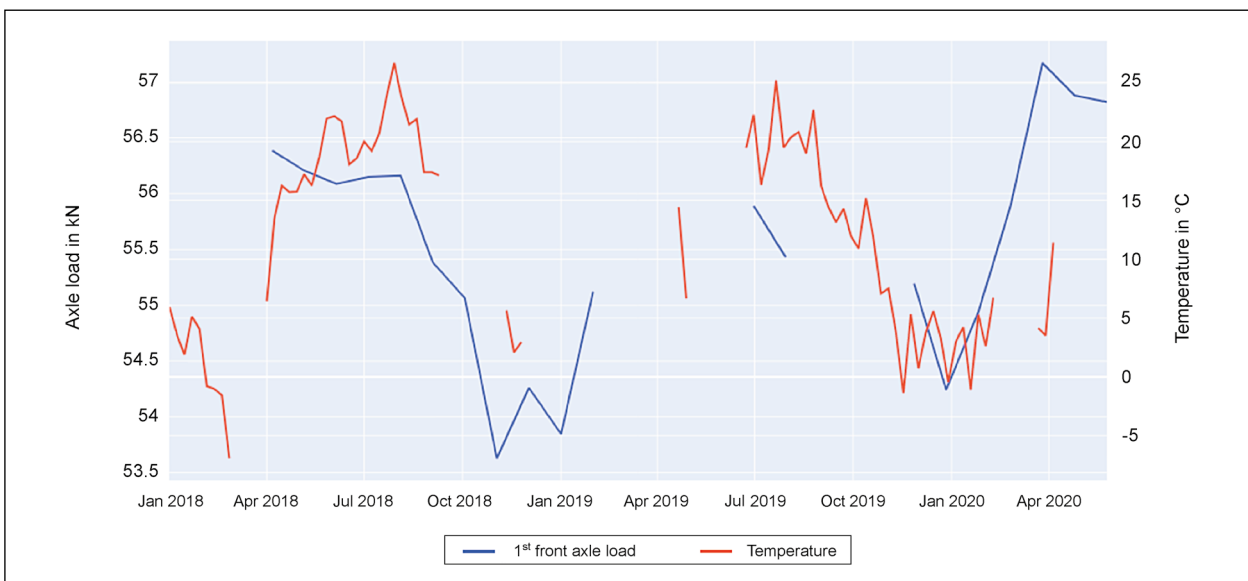


Fig. 4: Time history of monthly averages of front axle loads compared to temperature

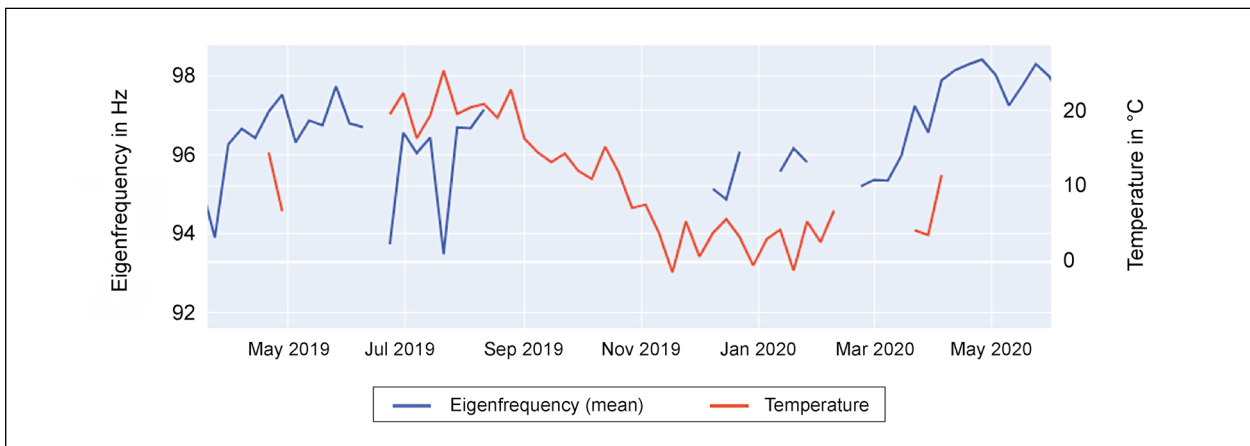


Fig. 5: Eigenfrequency compared to temperature

6 Self-assessment of the system

The measurement values do not only allow for a monitoring of the immediate functionality of the expansion joint, but also for an assessment if the assumption of unlimited service life from the design stage is valid.

Besides the mechanical-technical values, for which the boundaries are given by the static design calculation of the system (refer to section 7 for details), the dominant eigenfrequency of the expansion joint can be evaluated as integrity indicator.

Although no clear boundary values exist for the eigenfrequency, significant changes that cannot be related to temperature effects (as shown in figure 5), may indicate beginning damage like the loss of pretension in the sliding springs.

7 Comparison with design parameters

The self-assessment procedures, as described in section 6, are based on the design parameters as limit- or target values.

Direct assessment of mechanical integrity can be done by evaluating the singular bearing loads, the total load represented by single-axle loads and the gap width. As long as these values remain within the safe limits set by design, integrity of the expansion joint can be assumed.

The loads on the individual sliding bearings may not exceed 140 kN. Below this threshold, even repeated occurrences will cause no damage to the joint. The time history of the daily load peaks on all bearings is shown in figure 6. The ultimate permissible load has not been exceeded in the observed time frame.

By design, the joint has an unlimited service life based on the assumption of an axle load of 210 kN as maximum repeating load. Loads in excess of this value can lead to fatigue above 104 repetitions, but have not been observed so far, as can be seen in figure 7.

The permissible limits of the gap widths are defined by the largest allowed distance between the lamellae and the condition that the lamellae may not touch each other. Combined with the width of the individual lamellae, the measured gap widths (distance between first and third lamellae, cf. figure 8) must remain between 190 and 320 mm.

From the long-term evaluation it can be seen that the axle loads, bearing forces and gap so far remain within the permissible limits.

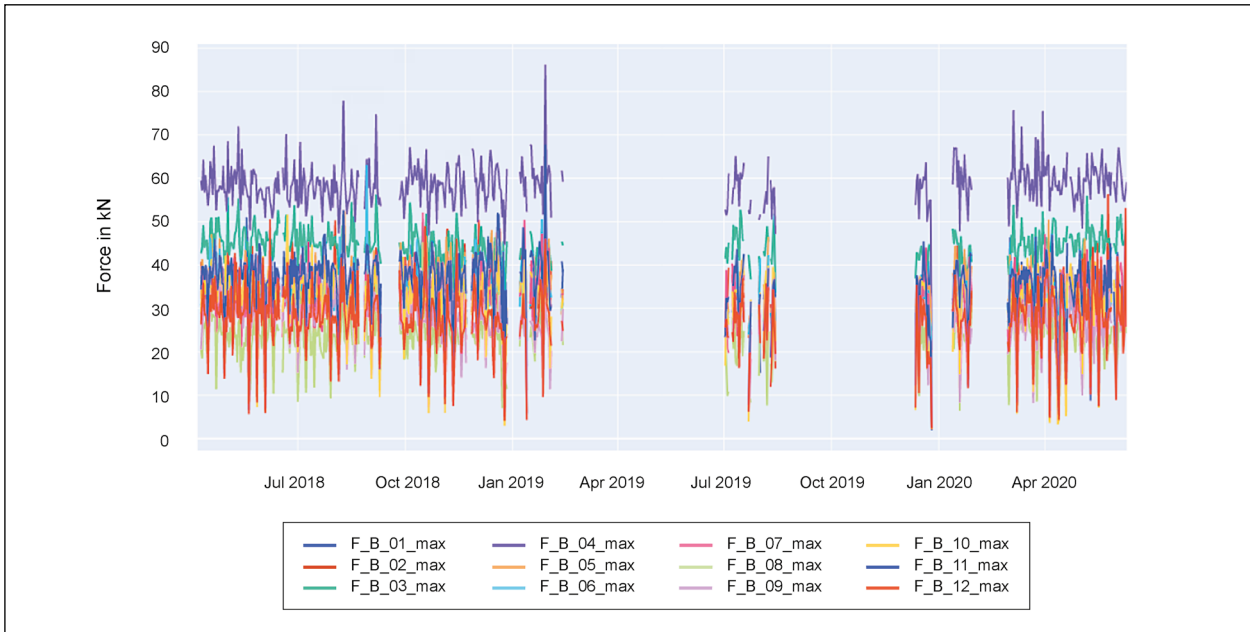


Fig. 6: Daily maxima of bearing forces (ultimate permissible load: 140 kN)

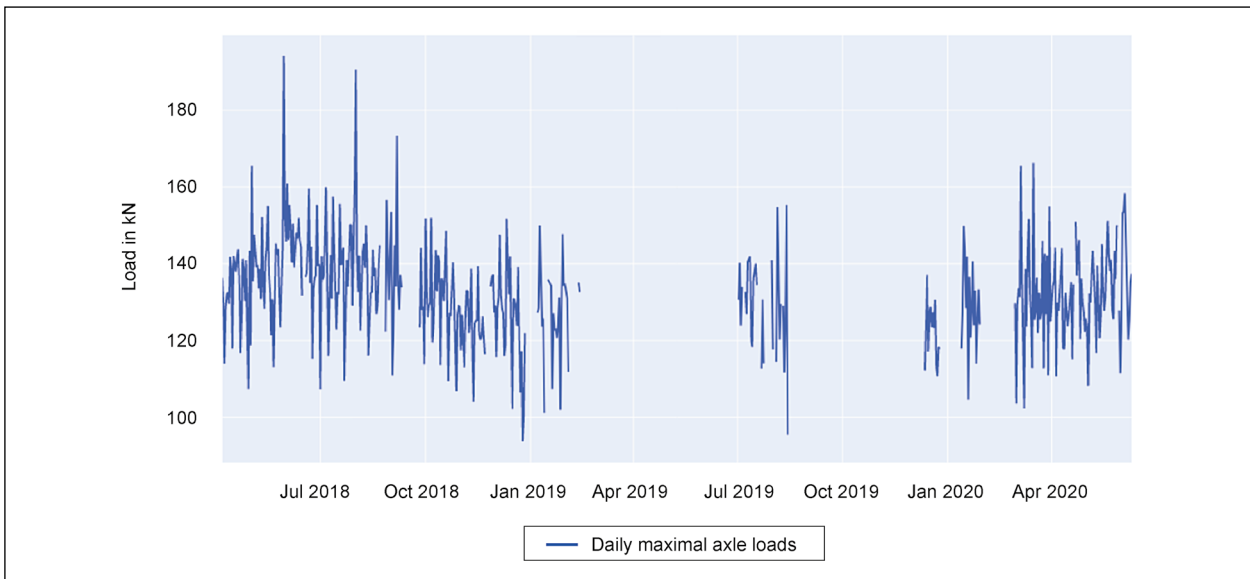


Fig. 7: Daily maxima of axle loads (ultimate permissible value: 210 kN)

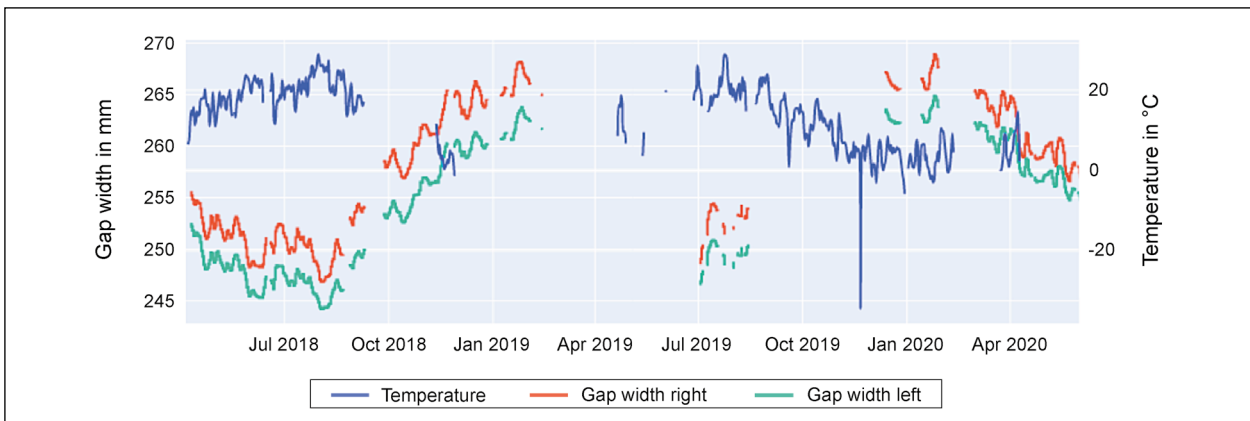


Fig. 8: Gap widths compared with temperature (permissible values between 190 and 320 mm)

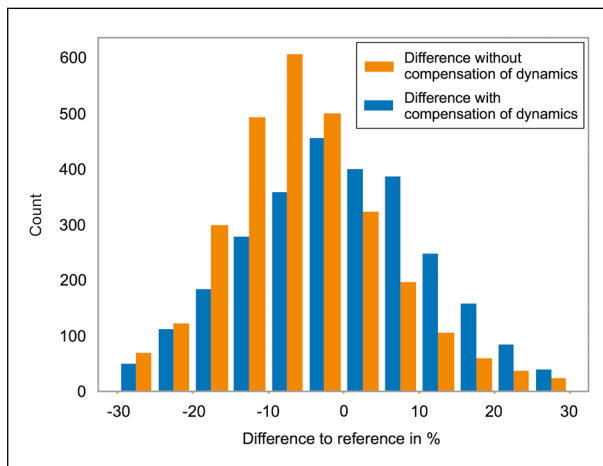


Fig. 9: Comparison of recorded heavy vehicle loads for one day with data from project partners

8 Quality control of the measurement results

For an assessment of the reliability of the data evaluation, long-term data, comparative data of the project partners (cf. figure 9) and the comparison of the calibration runs can be used.

Except for seasonal effects (see section 5), history data does not show any change in the measurement accuracy.

Implausible sensor values (differences of orders of magnitude from expected values) are automatically filtered by the evaluation software.

9 Test of the evaluation procedures

The evaluation software is running mostly stable and error tolerant. Short-term outages of the evaluation system can be compensated by the evaluation speed, which minimizes gaps and inconsistencies in the result data.

Comparison with results from the project partners shows a good consistency in the detection rate for heavy vehicles. Random checks using video data also confirms a reliable detection of light vehicles like passenger cars and even motorcycles (figure 10).

Overall reliability however is also dependent on the performance of the integrated third-party components (e.g. data recorder).

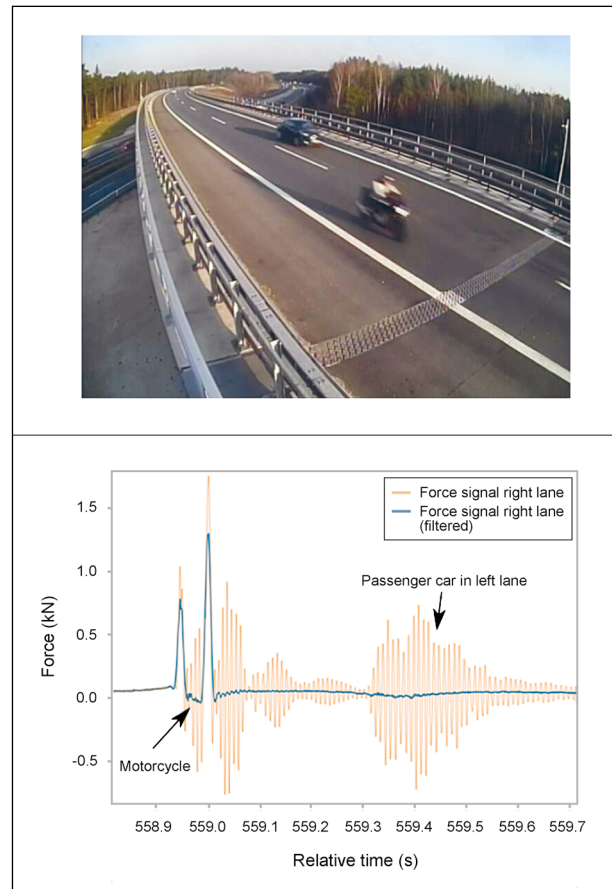


Fig. 10: Motorcycle and passenger car on expansion joint with corresponding force values for right lane

10 Database connection

The result data is sent to the shared database after evaluation of each measurement interval. History data like daily maxima, minima and averages is pre-aggregated in the evaluation software before transfer.

11 Conclusion

Through the wide spectrum of recorded data as well as the timely processing of the data on site, a sensor-equipped expansion joint is a crucial building block of a “Smart Bridge”. Not only can it deliver valuable insights into the traffic loads, but also into the health and functionality of the expansion joint itself.

The results can serve to better understand the impact of traffic onto the structure and can be implemented into prognostic and structural models, making them a basis for reliability-oriented predictive maintenance management.

Inhalt

1	Überblick	13	4	Simulationsmodell	30
2	Allgemeines	13	4.1	Allgemeines	30
2.1	Beschreibung des instrumentierten Fahrbahnüberganges	13	4.2	Erweiterung um Sattelzug-Modell	31
2.2	Vorarbeiten	14	4.3	Ergebnisse	31
2.3	Motivation	15	4.4	Interpretation	32
3	Kontrollierte Messüberfahrten	15	4.4.1	Allgemein	32
3.1	Messfahrten im April 2018	15	4.4.2	Anwendung zur Korrektur der Messergebnisse	32
3.1.1	Organisation	15	5	Automatisierte Auswertung der Messdaten	35
3.1.2	Fahrzeuge und Beladung	15	5.1	Verwendete Systeme	35
3.1.3	Sensorik und zusätzlich aufgezeich- nete Messgrößen	16	5.1.1	NI Diadem®	35
3.1.4	Ablaufplan der Überfahrten	17	5.1.2	Python und zusätzliche Bibliotheken ...	35
3.2	Messfahrten im April 2020	17	5.2	Auswerteprozeduren	35
3.2.1	Organisation	17	5.2.1	Aufbereitung der Messdaten	35
3.2.2	Fahrzeuge und Beladung	18	5.2.2	Ermittlung der Achslasten und -geschwindigkeiten	36
3.2.3	Sensorik und aufgezeichnete Größen	18	5.2.3	Erkennung von Fahrzeugen	36
3.2.4	Ablaufplan der Überfahrten	18	5.2.4	Klassifizierung von Fahrzeugen	36
3.3	Auswertung der kontrollierten Messfahrten	19	5.2.5	Verfeinerte Klassifizierung der Fahrzeuge	39
3.3.1	Messungen am Lkw	19	5.3	Vollautomatisierte, kontinuierliche Auswertung	39
3.3.2	Messungen an der Übergangs- konstruktion	20	5.3.1	Hardware	39
3.3.3	Krafteinwirkung	22	5.3.2	Software	39
3.3.4	Bestimmung der Fahrzeug- geschwindigkeiten	26	5.3.3	Zusätzliche Module	44
3.4	Zusammenwirken der Dynamik von Fahrzeug und Fuge	27	5.4	Dauerhafte Ergebnisdatenablage, Datenbankanbindung	44
3.4.1	Dynamische Effekte der Fuge	27	5.4.1	Ablagekonzept	44
3.4.2	Dynamische Effekte der Fahrzeuge ...	28	5.4.2	Tabellenschablonen	44
3.4.3	Vergleich mit Messwerten der zweiten Kalibrierfahrten	29	5.4.3	Implementierung des Ablage- vorganges	46
3.4.4	Interpretation	30	6	Beobachtungen aus dem Betrieb des Messsystems	47
			6.1	Verkehrsanalyse	47

6.1.1	Verkehrszusammensetzung	47
6.1.2	Geschwindigkeitsprofil	48
6.2	Zustandsrelevante Größen, Vergleich mit Bemessung	49
6.2.1	Eigenfrequenzen der Fuge	49
6.2.2	Spaltweiten der Dehnfuge	50
6.2.3	Maximal- und Minimalwerte der Lagerkraft	50
6.2.4	Maximale Achslasten	51
6.3	Zuverlässigkeit der Auswertung	52
6.3.1	Verfügbarkeit des Mess- und Auswertesystems	52
6.3.2	Qualität der Messdaten in Abhängig- keit von Umwelteinflüssen	53
7	Zusammenfassung und Ausblick	55
	Literatur	55
	Bilder	56
	Tabellen	57

1 Überblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen“ wurden bisher die nachfolgend überblicksmäßig dargestellten wissenschaftlich-technischen Erkenntnisse erarbeitet.

Insbesondere werden folgende Themen behandelt:

- Durchführung und Auswertung kontrollierter Messüberfahrten,
- simulative Nachbildung der kontrollierten Messfahrten,
- Erfassung der Verkehrsbelastung und Auswertung der dynamischen Achslasten,
- automatische und kontinuierliche Auswertung der Daten,
- Verbesserung der Genauigkeit der ausgewerteten Daten,
- Interpretation der Messergebnisse als Verkehrskennwerte,
- Einführung eines Sondererfassungsmodus für Stausituationen,
- laufende Überwachung des Messsystems und der Dehnfuge.

2 Allgemeines

2.1 Beschreibung des instrumentierten Fahrbahnüberganges

Bei der mit Sensortechnik ausgerüsteten Fahrbahnübergangskonstruktion handelt es sich um eine geräuschgeminderte Modulardehnfuge mit Schwenktraversensteuerung. Als Besonderheit weist diese Konstruktion eine Trennung der Fahrspuren auf, um die Zuordnung der Messsignale zu vereinfachen.

Die Rautenplatten zur Geräuschminderung sowie die Trennung der Lamellen zwischen den Fahrspuren sind in Bild 1 dargestellt.

Bild 2 zeigt in der Draufsicht den Aufbau der Übergangskonstruktion mit den Lamellen quer zur Fahrtrichtung und den namensgebenden Schwenktraversen winklig zur Fahrtrichtung. Ebenfalls sind die Positionen der einzelnen Sensoren in Bild 2 dargestellt. Es sind folgende Sensoren verbaut, Tabelle 1.

Bild 3 zeigt die Positionen der Auflastsensoren und Seilzugsensoren zur Spaltweitenmessung schematisch im Fugenquerschnitt. Hier ist zu berücksichtigen, dass die Wegsensoren W1, W2, W4 und W5



Bild 1: Rauten zur Geräuschminderung und Trennung der Fahrspuren

Kurzbezeichnung	Typ	Hersteller, Modell
K01 ... K24	Piezoelektrische Kraftmessringe	HBM, CFW 140 KN
KMD	DMS-basierte Kraftmessdose	Sensy, 2960
W1 ... W5	Seilzugsensor zur Spaltmessung	ASM, WS12-500-U2-A-L05-SB0-M12A5
B1 ... B4	Beschleunigungssensoren	ASC 4421-005

Tab. 1: Sensoren im Fahrbahnübergang

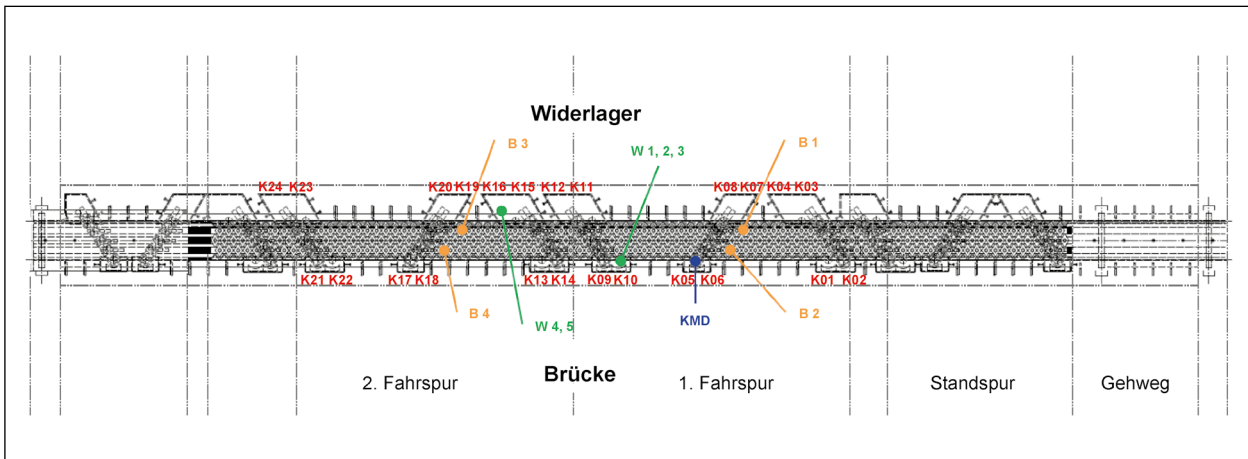


Bild 2: Aufriss der Fuge mit Sensorpositionen

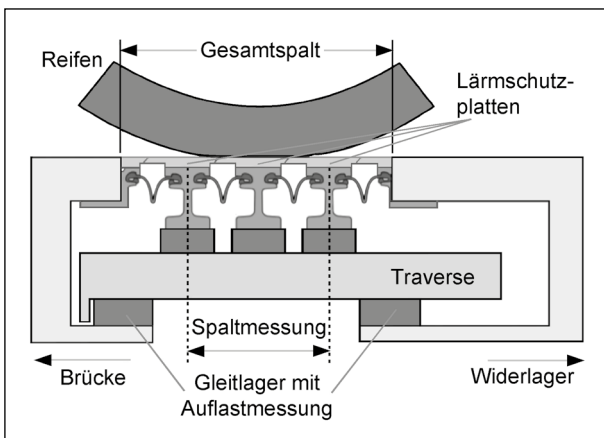


Bild 3: Aufriss der Fuge mit Sensorpositionen

jeweils den für die Verkehrsauswertung relevanten Abstand zwischen der ersten und dritten beweglichen Lamelle messen, während W3 den Gesamtpalt, also den Abstand der Randprofile zueinander misst.

2.2 Vorarbeiten

Nach erfolgreichem Einbau der Fuge und Inbetriebnahme der Sensoren wurden am 28.9.2016 Kalibrierfahrten mit zwei verschiedenen Lkw (3- und 5-achsig) durchgeführt. Diese dienen vor allem der Funktionskontrolle, jedoch auch der Bestimmung dynamischer Einflussfaktoren auf das Verhältnis der gemessenen zu den realen Achslasten.

Eine wesentliche Beobachtung bei diesen Fahrten war der starke Abfall der gemessenen Kräfte bei höheren Geschwindigkeiten, siehe Bild 4.

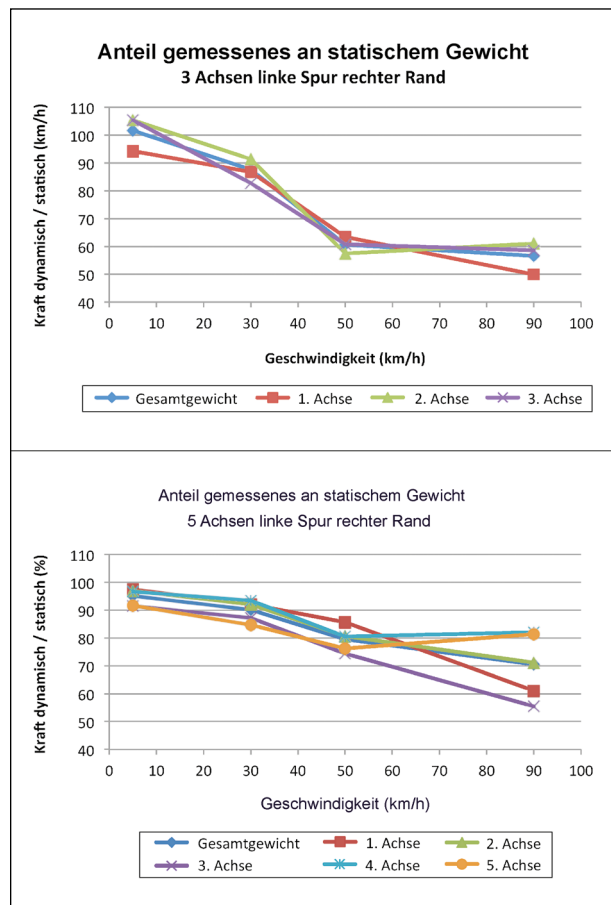


Bild 4: Statische und dynamische Achslasten aus initialen Überfahrten

Das Phänomen der abfallenden Kraftwerte wurde auf die Höhendifferenz zwischen der Asphaltdecke und der Fugenoberfläche zurückgeführt. Diese Vermutung konnte durch erste Simulationen bekräftigt werden, vgl. Bild 5.

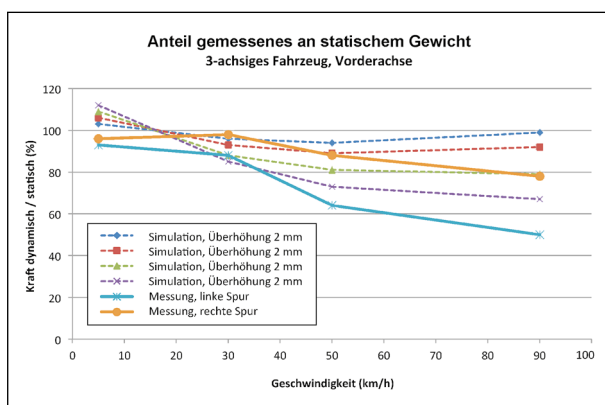


Bild 5: Vergleich der dynamischen Effekte in der Simulation mit verschiedenen Asphaltüberhöhungen

2.3 Motivation

Diese Erkenntnisse zeigen, dass das Zusammenwirken aus Fugen- und Fahrzeugdynamik einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Bestimmung von Verkehrslasten mithilfe instrumentierter Fahrbahnübergänge hat. Um die Stärke des Effektes in Abhängigkeit verschiedener Faktoren wie Fahrzeuggewicht und -geschwindigkeit quantifizieren zu können, sowie Abhilfemaßnahmen zu finden, wurden weitere Versuchsfahrten und detailliertere Simulationen durchgeführt.

3 Kontrollierte Messüberfahrten

3.1 Messfahrten im April 2018

3.1.1 Organisation

In Abstimmung mit der Autobahndirektion Nordbayern wurde für die Nacht von 21.04. bis 22.04.2018 ein Zeitfenster für kontrollierte Überfahrten unter Vollsperrung des Brückenbauwerkes geplant.

Für repräsentative Aussagen und um den Vergleich mit den früheren Messfahrten am 28.09.2016 zu erleichtern wurde festgelegt, dass ein drei- und ein fünfachsiges Lkw (jeweils voll beladen) als Versuchsfahrzeuge verwendet werden sollten.

Zusätzlich sollte die Gelegenheit der Vollsperrung genutzt werden, um eine Oberflächenprofilmessung der Übergangskonstruktion durchzuführen, um abgesicherte Werte für die Nachbildung dieser Größe (vgl. Kapitel 2.2) in der Simulation zu bekommen.



Bild 6: Lkw für Referenzfahrten (oben: Mercedes Arocs; unten: MAN TGX)

Die Messdaten sowie Versuchsparameter wurden den Projektpartnern aus den Teilprojekten FE 15.0631 und FE 15.0632 zur Verfügung gestellt (Heft B 160 der BAST-Schriftenreihe).

3.1.2 Fahrzeuge und Beladung

Für die Versuchsfahrten wurden zwei Lkw mit Kippmulde von der Firma Breitenbach-Tech. GmbH bereitgestellt. Als dreiaxsiges Lkw stand ein Mercedes Arocs (im folgenden Lkw 1), als fünfachsiges ein MAN TGX-Sattelzug mit Auflieger (Lkw 2) zur Verfügung, siehe Bild 6.

In beiden Fällen waren die Vorderachsen blattgefedert, Lkw 1 war auch mit einer blattgefederten Doppelachskombination hinten (Walking Beam), Lkw 2 mit Luftfedern an den Hinterachsen ausgestattet.

Beide Lkw wurden bis zu ihrer nominellen Ladekapazität mit Kies beladen. Während die Ladung bei Lkw 1 gleichmäßig in der Kippmulde verteilt war,

ließ sich wie in Bild 7 gezeigt bei Lkw 2 eine Anhäufung im vorderen Bereich direkt oberhalb der Hinterachse des Zugfahrzeuges feststellen.

Da nach Aussage der Kraftfahrer eine derart ungleichmäßige Verteilung der Ladung in der Praxis nicht ungewöhnlich ist, wurde die Ladungsverteilung so belassen.



Bild 7: Ladungsverteilung, Lkw 1 im Hintergrund, Lkw 2 im Vordergrund

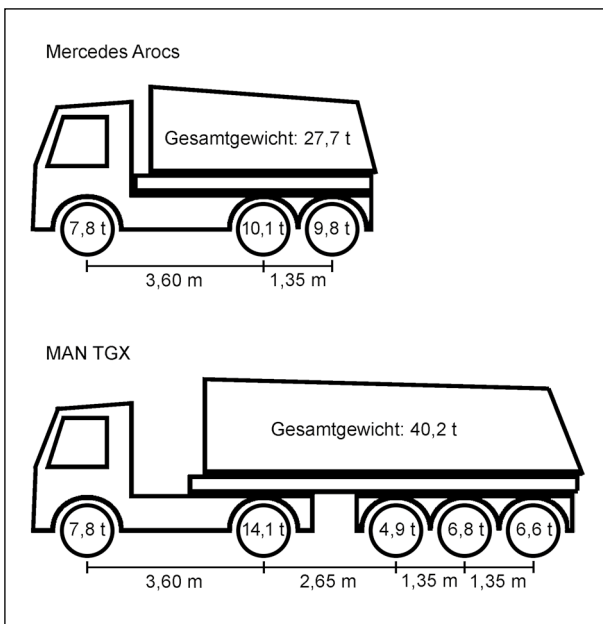


Bild 8: Achsabstände und -lasten der Messfahrzeuge

Bei der Vermessung und Verwiegung der Fahrzeuge wurde entsprechend festgestellt, dass die Last von Lkw 2 deutlich auf der zweiten Achse konzentriert ist (Bild 8). Ebenso wurden bei Lkw 2 deutlich unterschiedliche Werte für die drei Achsen des Aufliegers gemessen. Üblicherweise sind die Luftfedern miteinander verbunden, sodass im Rahmen der Messgenauigkeit derselbe Wert für alle Einzelachsen zu erwarten wäre. Da zum Rangieren für die Verwiegung die erste Achse des Aufliegers angehoben wurde, ist es wahrscheinlich, dass das Absenken der Achse zum Zeitpunkt des Verwiegens nicht ganz abgeschlossen war. Für weitere Betrachtungen wird daher angenommen, dass die Achsen jeweils die gleiche Last in Höhe des Mittelwertes von 6,1 Tonnen tragen.

3.1.3 Sensorik und zusätzlich aufgezeichnete Messgrößen

3.1.3.1 Geschwindigkeit, Zeit und Position

Zur exakten Bestimmung der Geschwindigkeit während der Überfahrten wurde an Bord jedes Lkw ein GPS-Tracker mitgeführt, um kontinuierlich die Position und Geschwindigkeit der Fahrzeuge aufzuzeichnen. Insbesondere im Hinblick auf die gemeinsame Nutzung von Daten und Erkenntnissen mit anderen Teilprojekten wurde dabei nicht nur der Moment der Überfahrt über die Übergangskonstruktion, sondern die gesamten Verläufe während der Überquerung des Brückenbauwerkes gemessen.

Zusätzlich wurde am linken Fahrspurrand in der Mitte der Übergangskonstruktion eine Kamera positioniert, mit welcher die Überfahrten mit 100 Bildern pro Sekunde gefilmt werden konnten. Aus den Videoaufzeichnungen und den bekannten Abmessungen von Dehnfuge und den Lkw konnten ebenfalls die Momentangeschwindigkeit sowie die ungefähre Position der Überfahrt bestimmt werden, siehe Bild 9.



Bild 9: Bestimmung der Überfahrposition und Geschwindigkeit mittels Videoaufzeichnung



Bild 10: Beschleunigungssensoren auf der rechten Vorderachse

3.1.3.2 Beschleunigung

Als zusätzliche Quelle von Daten für die Validierung des Simulationsmodells (vgl. Kapitel 4) wurden an der Vorderachse von Lkw 1 Beschleunigungssensoren angebracht. Basierend auf ersten vorläufigen Simulationsergebnissen wurden Sensoren des Typs „SEISMIC ICP® ACCELEROMETER“ der Firma PCB Piezotronics mit einem Messbereich von +/- 5 g ausgewählt.

Auf jeder Seite des Lkw wurde dabei ein Aufbau mit zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Sensoren angebracht, zur Messung von Längs- und Vertikalbeschleunigungen. Bild 10 zeigt die Position und Ausrichtung des Sensors auf der rechten Fahrzeugseite (von vorne gesehen), die Positionierung auf der linken Seite ist symmetrisch.

Die Messsignale wurden an Bord des Lkw mit einem Messverstärker „Quantum“ der Firma HBM sowie einem Laptop direkt verarbeitet und gespeichert. Für bestmögliche Korrelation mit den Messdaten der Übergangskonstruktion wurde eine Samplingrate von 2.400 Hz ausgewählt. Durch die Aufzeichnung eines per „network time protocol“ (NTP) synchronisierten Absolutzeitkanals können die Messwerte den anderen Messungen zeitlich exakt zugeordnet werden.

3.1.4 Ablaufplan der Überfahrten

Für eine möglichst aussagekräftige Bestimmung der dynamischen Einflüsse auf die Messgrößen wurden mehrere Geschwindigkeitsniveaus als Sollvorgabe definiert:

- 5 km/h zur Bestimmung der quasistatischen Messwerte,
- 30 km/h,

- 60 km/h,
- 90 km/h als Maximalgeschwindigkeit der Lkw.

Die einzelnen Geschwindigkeitsniveaus sollten dabei zur Berücksichtigung einer erwarteten Streuung der Messwerte von jedem Lkw auf jeder Fahrspur mindestens dreimal gefahren werden. Die quasistatischen Überfahrten wurden jeweils nur einmal, die bei Höchstgeschwindigkeit jeweils sechsmal durchgeführt, um der erwarteten dynamikabhängigen Streubandbreite Rechnung zu tragen.

Somit ergibt sich folgender Fahrtenplan:

- 4 x 5 km/h,
- 12 x 30 km/h,
- 12 x 60 km/h,
- 24 x 90 km/h.

Ergänzend wurden noch Fahrten durchgeführt, bei denen beide Lkw gleichauf die gesamte Länge der Brücke überfahren haben, um die Wirkung der Fahrspurentrennung beurteilen zu können. Die Fahrten wurden mit 30 und 60 km/h, jeweils einmal mit wechselnden Fahrspuren durchgeführt. Somit ergeben sich planmäßig 56 Fahrten (bzw. 60 Fahrten bei individueller Zählung der Parallelfahrten).

3.2 Messfahrten im April 2020

Um zeitabhängige Veränderungen der Messgenauigkeit erfassen zu können sowie eine allgemein breitere Datenbasis für die Auswertung zu schaffen, wurden zwei Jahre später erneut Messfahrten mit statisch vermessenen Lkw durchgeführt.

3.2.1 Organisation

Die Planung der Fahrten erfolgte analog zu den Messfahrten 2018. In der Nacht vom 01. auf den 02. April wurde die Brücke ab 0:00 Uhr voll gesperrt, um die Fahrten durchführen zu können.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit mit den früher gemessenen Werten wurden wieder zwei Lkw verwendet, ein fünfachsiger Sattelzug sowie ein dreiachsiger Muldenkipper. Für beide Lkw wurden auf dem Gelände der Autobahndirektion Nordbayern am Vormittag des 01.04. mittels statischer Wägelplatten die Einzelachslasten bestimmt und somit das Gesamtgewicht errechnet.



Bild 11: Lkw für die zweiten Referenzfahrten (links: Volvo FH 540 (Lkw 1); rechts: DAF XF 530 (Lkw 2))



Bild 12: Beladungsverteilung der Lkw (links: Lkw 1; rechts: Lkw 2)

Ebenfalls wurde eine Höhenvermessung des Fahrbahnüberganges durchgeführt, um die Entwicklung der Asphaltüberhöhung ermitteln zu können.

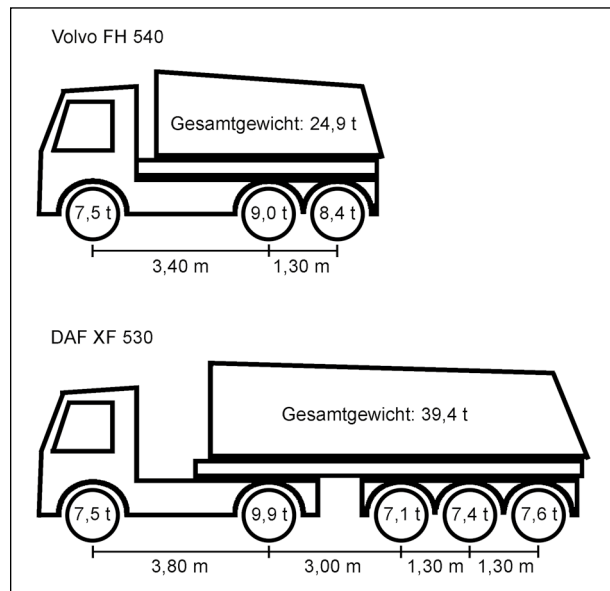


Bild 13: Abmessungen und Achslasten der Versuchs-Lkw 2020

3.2.2 Fahrzeuge und Beladung

Zwar wurden vergleichbare Lkw-Typen gewählt, es wurde jedoch beim Sattelzug auf eine gleichmäßigere Beladung geachtet, um den Einfluss des Ladungsschwerpunktes auf die Messergebnisse abschätzen zu können.

Die Lkw und Fahrer wurden wieder von der Firma Breitenbach-Tech zur Verfügung gestellt. Wie in Bild 11 gezeigt, sind die Lkw, obwohl andere Modelle, durchaus mit den 2018 verwendeten Fahrzeugen vergleichbar.

Aus Bild 12 und Bild 13 ist erkennbar, dass die gleichmäßigere Beladung der Lkw nun zu einer ausgewogeneren Achslastverteilung, insbesondere bei Lkw 2 geführt hat.

3.2.3 Sensorik und aufgezeichnete Größen

Im Gegensatz zu den 2018 durchgeführten Fahrten wurde auf zusätzliche Instrumentierung weitgehend verzichtet. Die Momentangeschwindigkeiten der Fahrzeuge beim Überqueren des Fahrbahnüberganges wurden mit der in Bild 9 gezeigten Methode per Videoauswertung bestimmt.

3.2.4 Ablaufplan der Überfahrten

Analog zu den Fahrten im Jahr 2018 (siehe Kapitel 3.1.4) wurden die Geschwindigkeitsniveaus 5 km/h, 30 km/h, 60 km/h und 90 km/h gefahren.

Da bei dieser Untersuchung der Fokus der Messfahrten primär auf der Datengenerierung für den

Fahrbahnübergang lag, konnte bei den geringeren Geschwindigkeitsniveaus auf eine Überfahrt des gesamten Brückenbauwerks verzichtet werden. Dies erlaubte in der zur Verfügung stehenden Zeit mehrere Fahrten mit niedrigerer. Die Anzahl der Fahrten mit 30 km/h wurde gegenüber dem Ablauf im Jahr 2018 reduziert.

Insgesamt wurden folgende Fahrten in chronologischer Reihenfolge durchgeführt:

- 12 x 5 km/h,
- 12 x 60 km/h,
- 24 x 90 km/h,
- 4 x 30 km/h.

Zusätzlich wurden insgesamt vier Parallelfahrten, jeweils zwei mit 60 und 90 km/h durchgeführt, so dass insgesamt 56 Einzelfahrten (bzw. 60, bei individueller Zählung der Einzelfahrten) stattfanden.

3.3 Auswertung der kontrollierten Messfahrten

3.3.1 Messungen am Lkw

3.3.1.1 Geschwindigkeitsbestimmung

Die 2018 verwendeten GPS-Tracker erlauben eine sekundenweise aufgelöste Zuordnung von Position und Momentangeschwindigkeit der Lkw. Um sicher keine Aufzeichnungsdaten zu verlieren, wurden die Fahrten jeweils in ihrer gesamten Länge aufgezeichnet. Durch Eingrenzung des geografischen Wertebereiches (Bild 14) konnten die relevanten Zeitbereiche für die Überfahrten automatisiert ausgeschnitten werden. Dadurch wurden für die Auswertung unplanmäßige Überfahrten wie etwa bei Rückfahrten oder Rangiermanövern nicht berücksichtigt.

Mit der räumlichen Zuordnung der GPS-Signale gelingt eine scharfe Auswahl der relevanten Zeitbereiche und die Analyse der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten. Als Ursprung der Zeitachse wurde der 22.04.2018, 0:00 Uhr festgelegt. Alle folgenden Zeitangaben bezeichnen (soweit nicht anders angegeben) Sekunden seit diesem Zeitpunkt.

Die Geschwindigkeitsprofile aller Einzelfahrten sind in Bild 15 dargestellt. Die einzelnen Fahrtgruppen (vgl. Kapitel 3.1.4) sind markiert. Aufgrund der im Vergleich zur gesamten Versuchsdauer kurzen

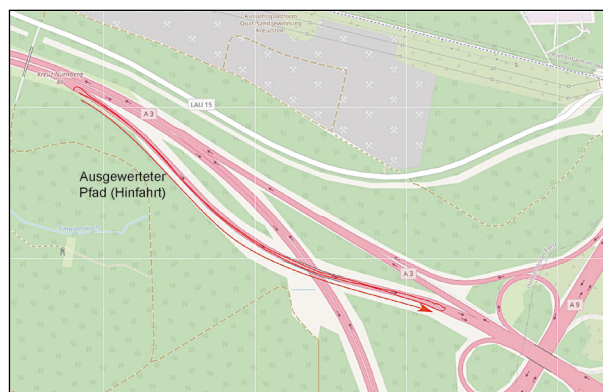


Bild 14: Beispielpfad einer Überfahrt (Quelle: OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)

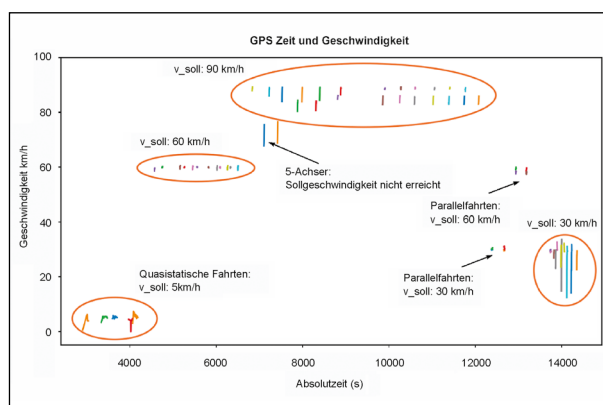


Bild 15: Geschwindigkeiten und Zeiten der Überfahrten nach GPS-Daten

Überfahrzeit erscheinen die einzelnen Fahrten dabei im Diagramm als fast vertikale Linien. Als Besonderheit fällt bei dieser Betrachtung auf, dass Lkw 2 aufgrund der trotz des höheren Gesamtgewichtes geringeren Motorleistung die Höchstgeschwindigkeit von 90 km/h nicht zuverlässig erreichen konnte. Die längeren Linien im Diagramm zeigen, dass die Beschleunigung auf Höchstgeschwindigkeit allgemein länger dauerte als bei Lkw 1. Im Vergleich dazu sind die Linien, die die Fahrten von Lkw 1 repräsentieren deutlich kürzer und auf höherem Niveau, was auf früheres Erreichen der vollen Höchstgeschwindigkeit schließen lässt.

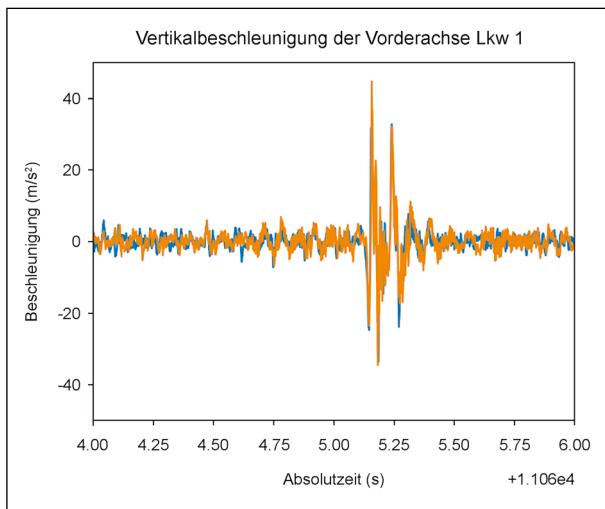


Bild 16: Exemplarische Messwerte der Beschleunigungsmessung an der Vorderachse von Lkw 1

3.3.1.2 Beschleunigungsmessung an der Vorderachse

Mithilfe der in Kapitel 3.3.1.1 ermittelten Zeitfenster konnten auch bei den Beschleunigungswerten die Zeitpunkte der Überfahrt ausgeschnitten werden.

Eine erste Analyse der Messwerte zeigt ein starkes Rauschen, welches teilweise durch die Schwingungen des Motors, teilweise vermutlich durch Spiele in der Achsaufhängung verursacht sein dürfte, vgl. Bild 16. Da die Beschleunigungsdaten in erster Linie für die Plausibilitätsprüfung der Simulationsergebnisse herangezogen werden sollen, wurden sie nicht separat ausgewertet.

3.3.2 Messungen an der Übergangskonstruktion

3.3.2.1 Fugenoberfläche

Aus den ersten Referenzfahrten (vgl. Kapitel 2.2) war eine deutliche Abhängigkeit des Verhältnisses aus statischen und dynamischen Achslasten von der Überfahrungs geschwindigkeit bekannt. Als eine mögliche Erklärung für diese Tatsache wurde angenommen, dass die Asphaltüberhöhung bei höheren Geschwindigkeiten dazu führt, dass die Räder erst nach einer Flugphase mit Verzögerung oder abgeschwächter Kraft auf der Fuge aufsetzen. Anhand von Fotos (wie beispielhaft in Bild 17 gezeigt), welche vor der Inbetriebnahme aufgenommen wurden, wurde eine Asphaltüberhöhung von ca. 12 mm abgeschätzt.



Bild 17: Deutlich erkennbare Asphaltüberhöhung an der Fuge vor der Inbetriebnahme

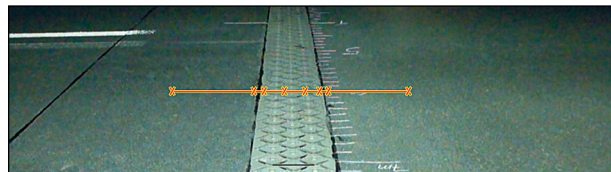


Bild 18: Beispielhafter Verlauf einer Messlinie

Um dieser Vermutung nachzugehen bzw. belastbare Daten für eine simulative Nachbildung des Überfahrvorganges zu erhalten, wurde die Oberfläche der Fuge taktill vermessen.

Dazu wurden im Abstand von jeweils 20 cm in Fugenlängsrichtung entlang einer Linie jeweils 8 Messpunkte aufgenommen. Es wurden Punkte nahe der Fugenmitte, auf dem Randprofil und auf dem Asphalt einmal direkt neben der Fuge und im Abstand von einem Meter gemessen (vgl. Bild 18). Als Bezugsniveau wurden jeweils die Punkte auf dem Randprofil verwendet.

Aus der Vermessung des Höhenprofils ergab sich, dass die Asphaltüberhöhung weniger stark ausgeprägt war wie ursprünglich angenommen. Dies bedeutet nicht, dass die ursprünglich angenommene Asphaltüberhöhung überschätzt wurde, sondern entspricht vielmehr der erwarteten Setzung der Belagsdecke über die verstrichene Zeit. Die erneute Vermessung der Fahrbahnoberfläche bei den Überfahrten 2020 bestätigte diese Entwicklung.

Wie in Bild 19 dargestellt, betrug die Asphaltüberhöhung bei den Messungen 2018 durchschnittlich etwa 5,6 mm auf Brücken- und 1,3 mm auf Widerlagerseite. Eine ausgeprägte Spurrinnenbildung war noch nicht zu erkennen, der Beginn einer solchen lässt sich jedoch erahnen.

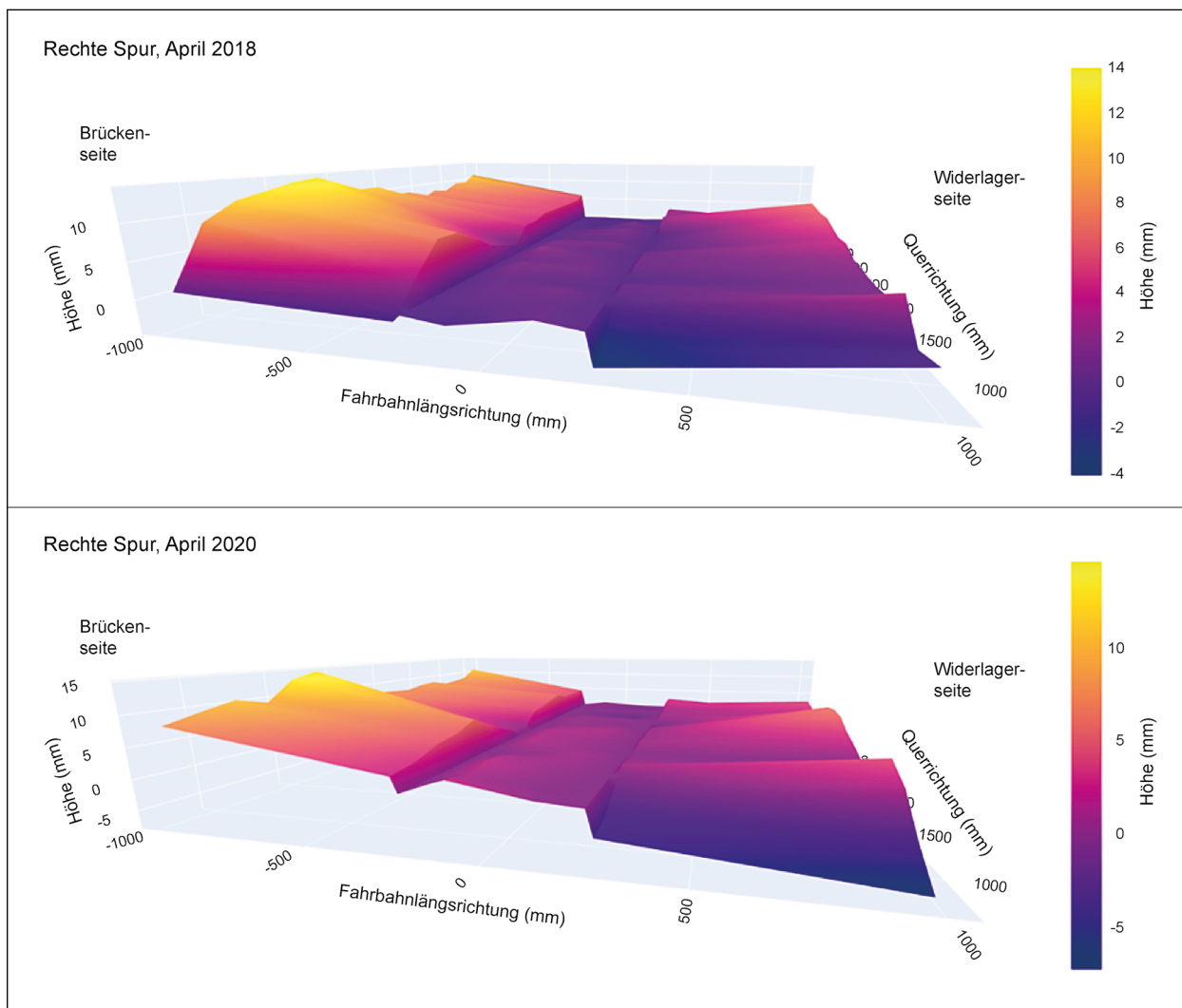


Bild 19: Vergleich der Oberflächenprofile der Fuge und des angrenzenden Asphalts

Bis zum April 2020 reduzierte sich die Asphaltüberhöhung brückenseitig auf durchschnittlich 3,9 mm und widerlagerseitig auf nur noch 0,3 mm, wobei durch die Spurrinnenbildung das Niveau der Fugenoberfläche um bis zu 3,4 mm unterschritten wurde.

Zusammen mit den Überfahrtpositionen aus Kapitel 3.1.3.1 lassen sich die gewonnenen Werte als Eingangsdaten für die Simulation nutzen.

3.3.2.2 Spaltweite

Die Spaltweite der Dehnfuge wird mittels Seilzugsensoren gemessen, welche für beide Fahrspuren getrennt den Abstand zwischen dem ersten und dritten Mittelträger bestimmen. Die zeitlichen Verläufe für die Messungen in den Jahren 2018 und 2020 sind in den Bild 20 und Bild 21 zu sehen.

Die Spaltweite blieb während der gesamten Messzeit fast konstant und der Unterschied zwischen beiden Spuren betrug weniger als 5 mm. Die kurzfristigen Schwankungen sind durch die Überfahrt der Lkw bedingt. An der größeren Spaltweite während der Messungen im Jahr 2020 ist erkennbar, dass die Temperatur mit unter $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in jener Nacht deutlich geringer war als bei den Messungen im Jahr 2018 (ca. $9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

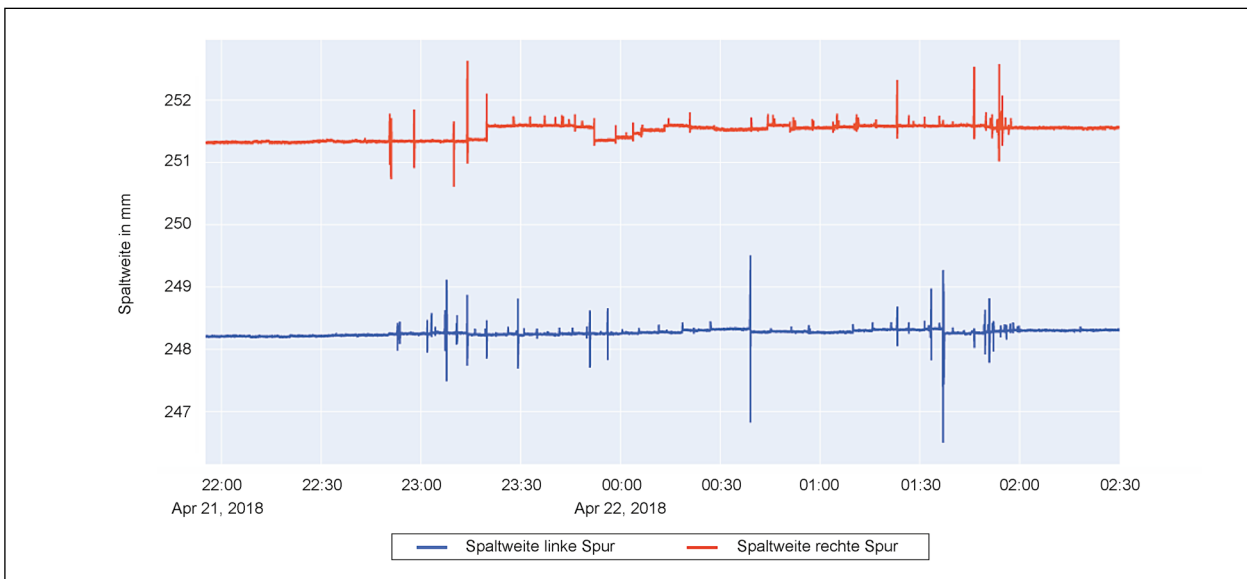


Bild 20: Spaltweite während der Messzeit 2018

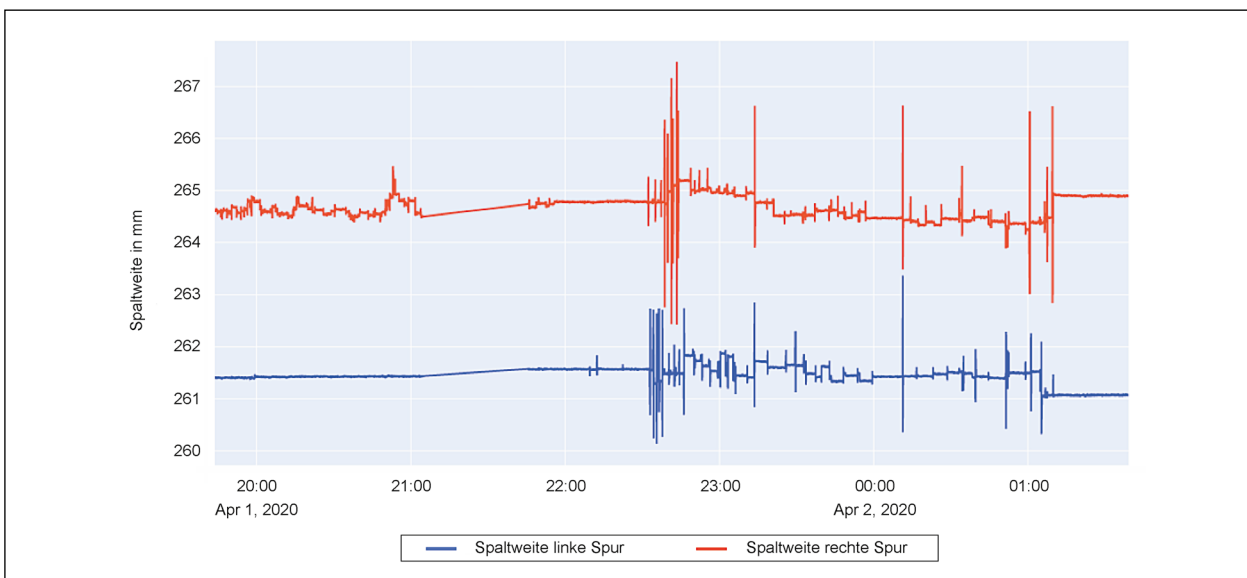


Bild 21: Spaltweite während der Messzeit 2020

3.3.3 Krafteinwirkung

Um die aus den Überfahrten resultierenden Einwirkungen auf den Fahrbahnübergang den einzelnen Fahrten eindeutig zuordnen zu können, wurde auch auf den Quantum-Messsystemen im Bauwerk die Aufzeichnung eines NTP-Zeitkanals aktiviert.

Im Folgenden werden die Messwerte der Versuchsfahrten 2018 nach Geschwindigkeitsniveau, Fahrzeug und Fahrspur sortiert dargestellt, siehe Bild 22 bis Bild 30.

Aus den Darstellungen der Geschwindigkeitsverläufe lassen sich direkt einige Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Übereinstimmung zwischen linker und rechter Spur ist sehr gut,
- abhängig von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge ist die Schwingungsanregung der Übergangskonstruktion unterschiedlich stark ausgeprägt,
- stärkere Anregungen werden von einer Fahrspur auf die andere übertragen,
- die Vermutung, dass die Hinterachsen der Lkw gekoppelt sind und daher annähernd die gleiche Last tragen, trifft zu.

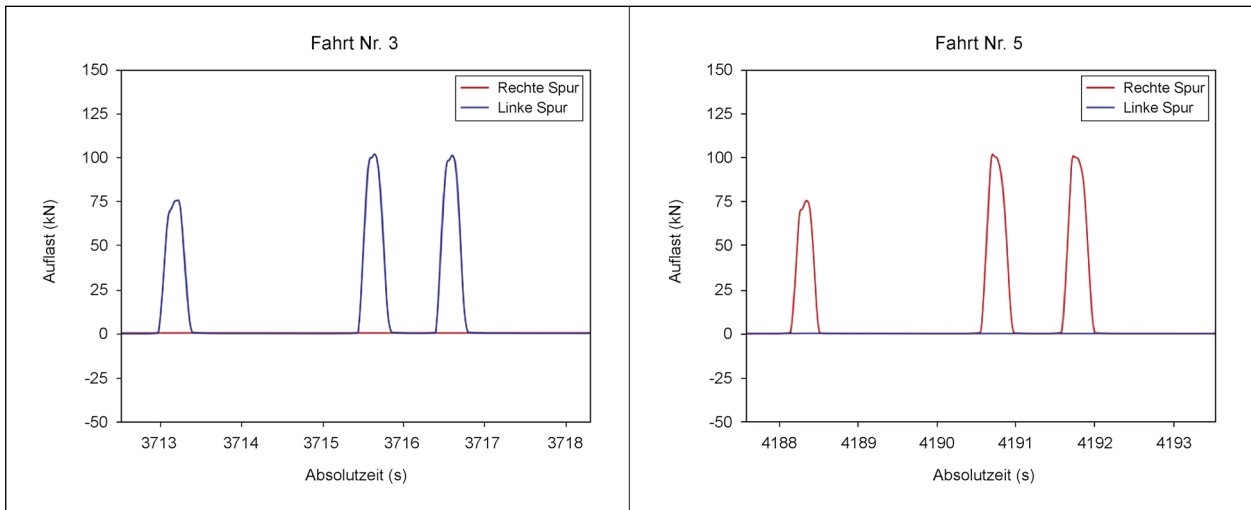


Bild 22: Quasistatische Überfahrt (5 km/h), Lkw 1

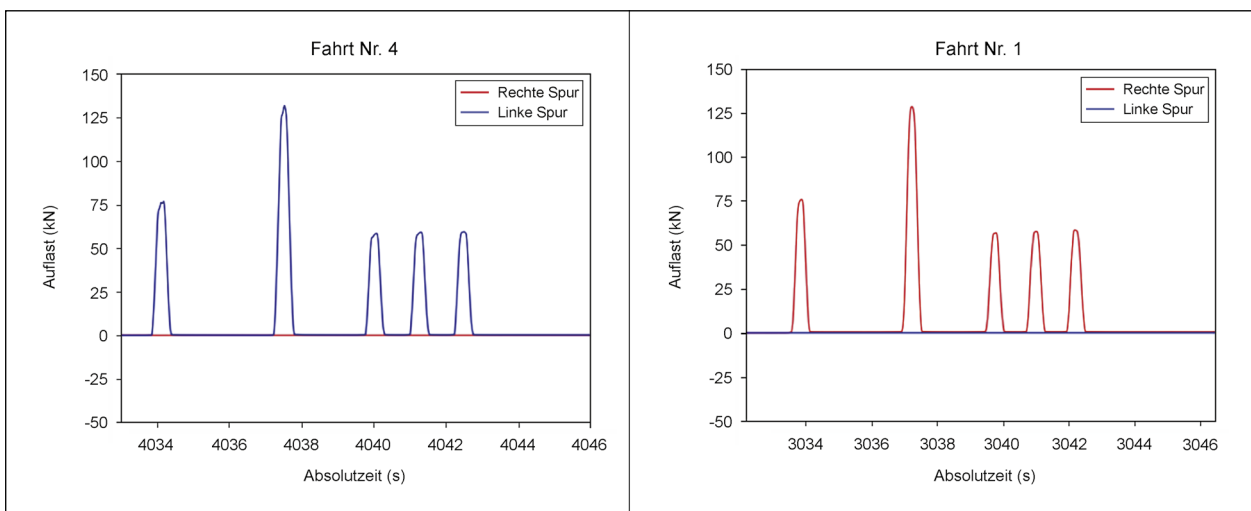


Bild 23: Quasistatische Überfahrt (5 km/h), Lkw 2

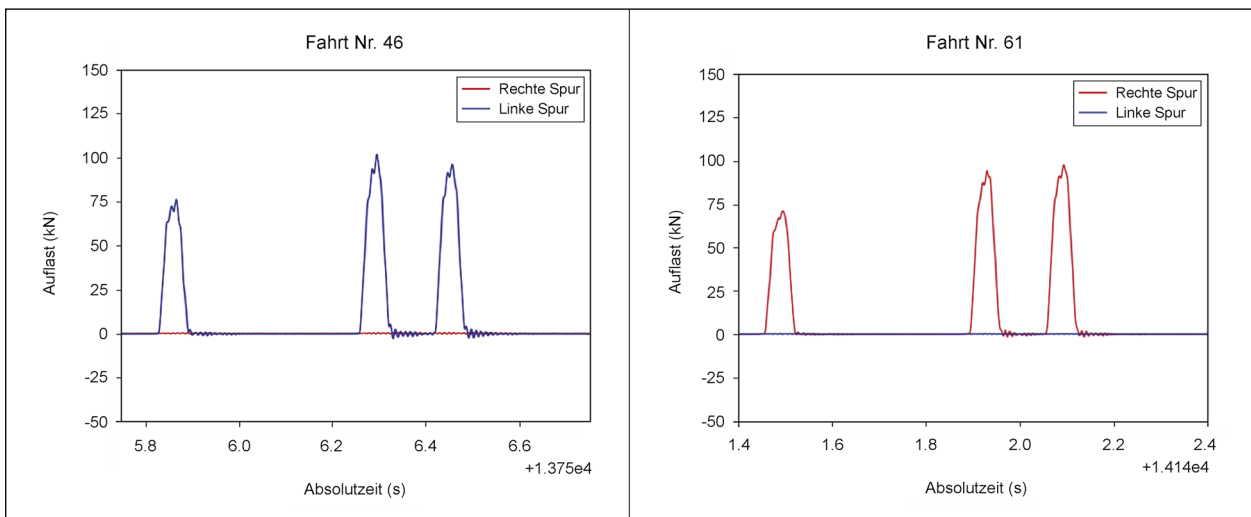


Bild 24: Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit (30 km/h), Lkw 1

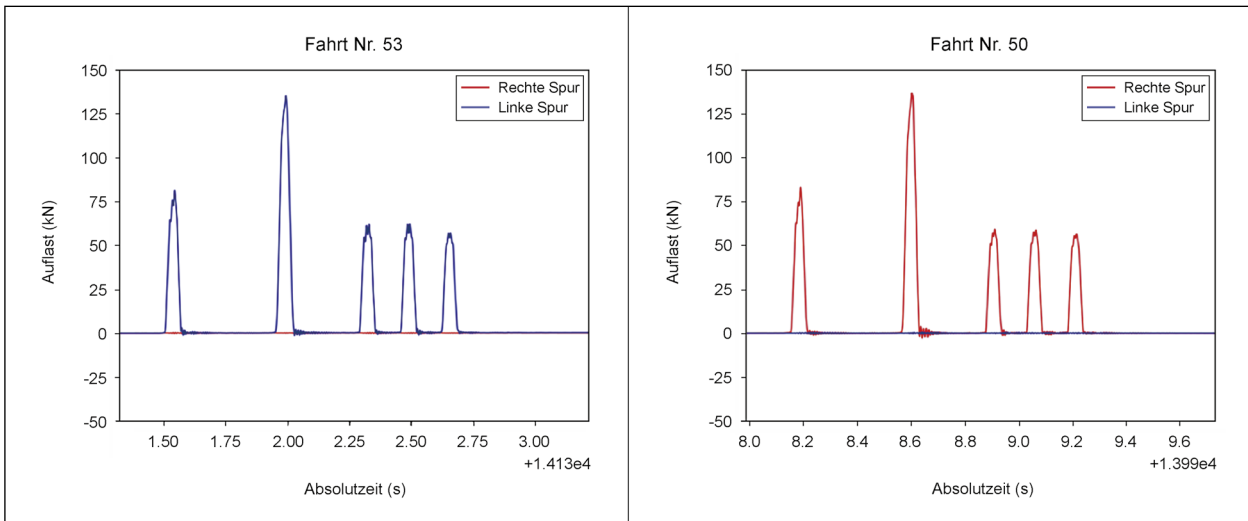


Bild 25: Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit (30 km/h), Lkw 2

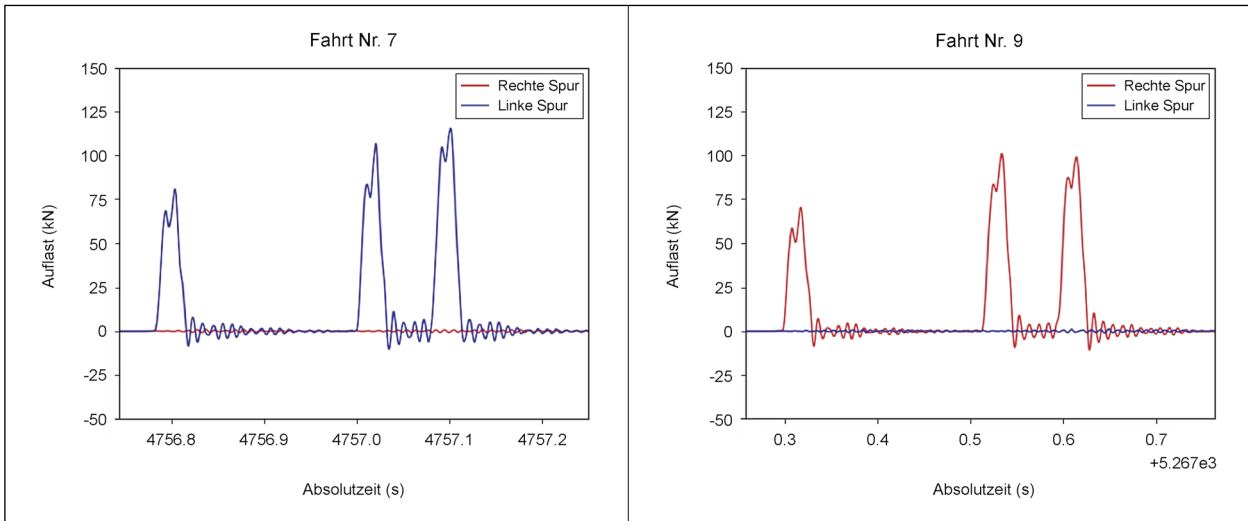


Bild 26: Fahrt mit mittlerer Geschwindigkeit (60 km/h), Lkw 1

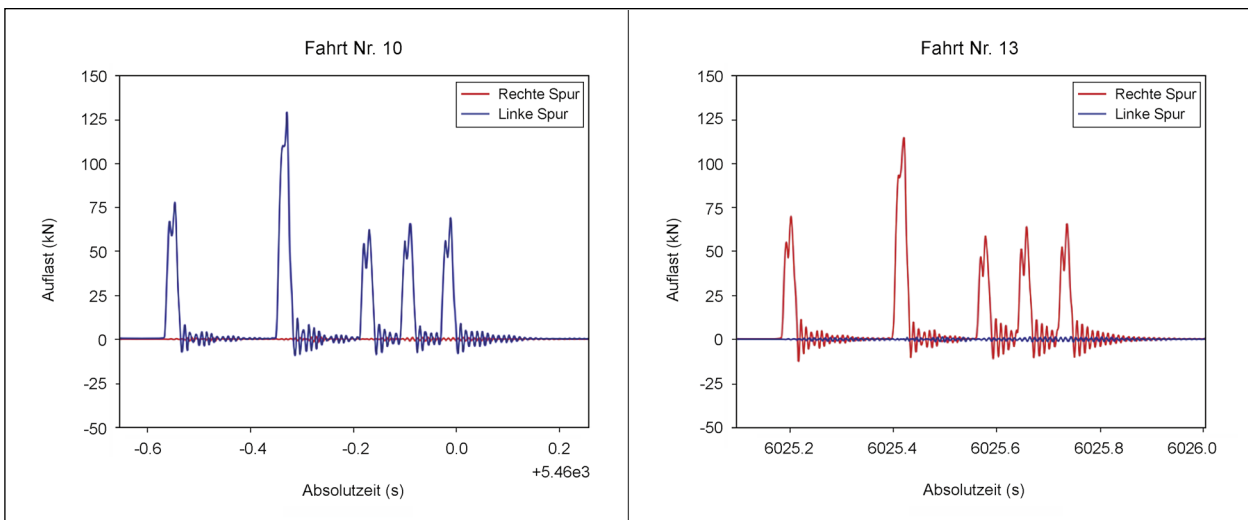


Bild 27: Fahrt mit mittlerer Geschwindigkeit (60 km/h), Lkw 2

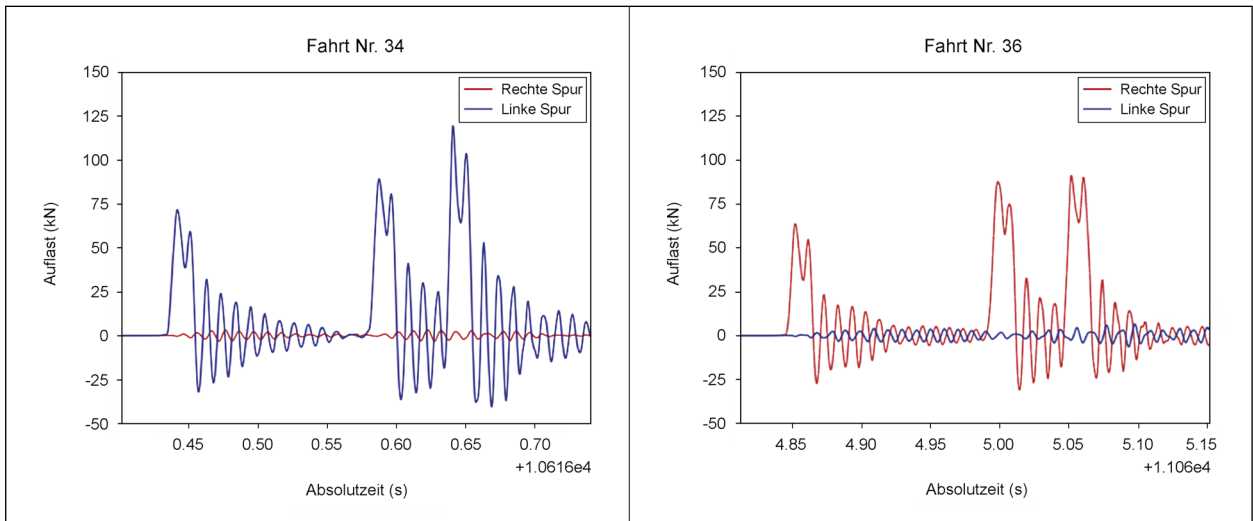


Bild 28: Fahrt mit hoher Geschwindigkeit (90 km/h), Lkw 1

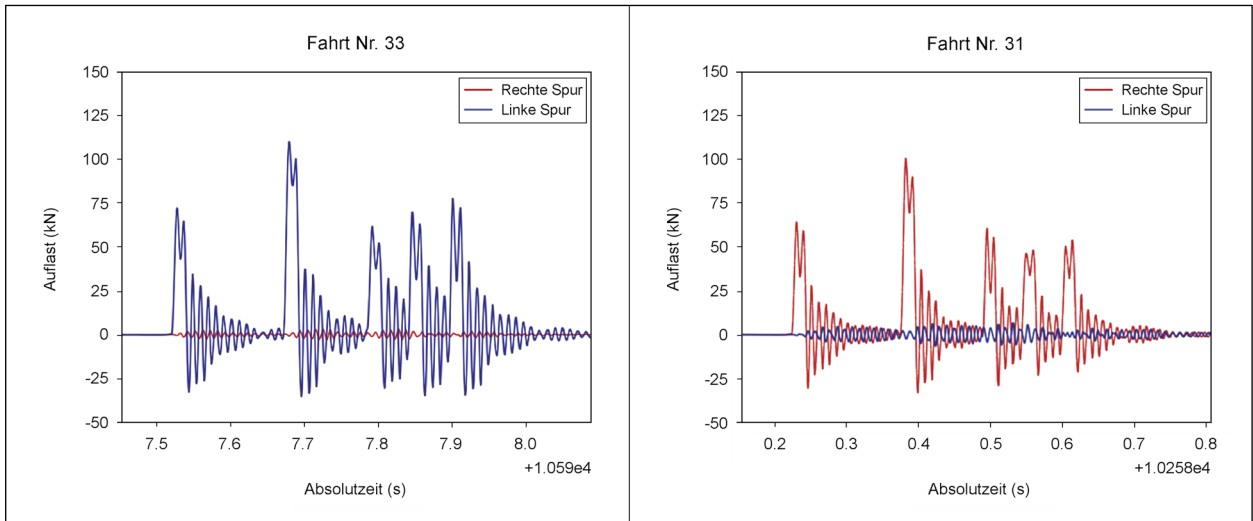


Bild 29: Fahrt mit hoher Geschwindigkeit (90 km/h), Lkw 2

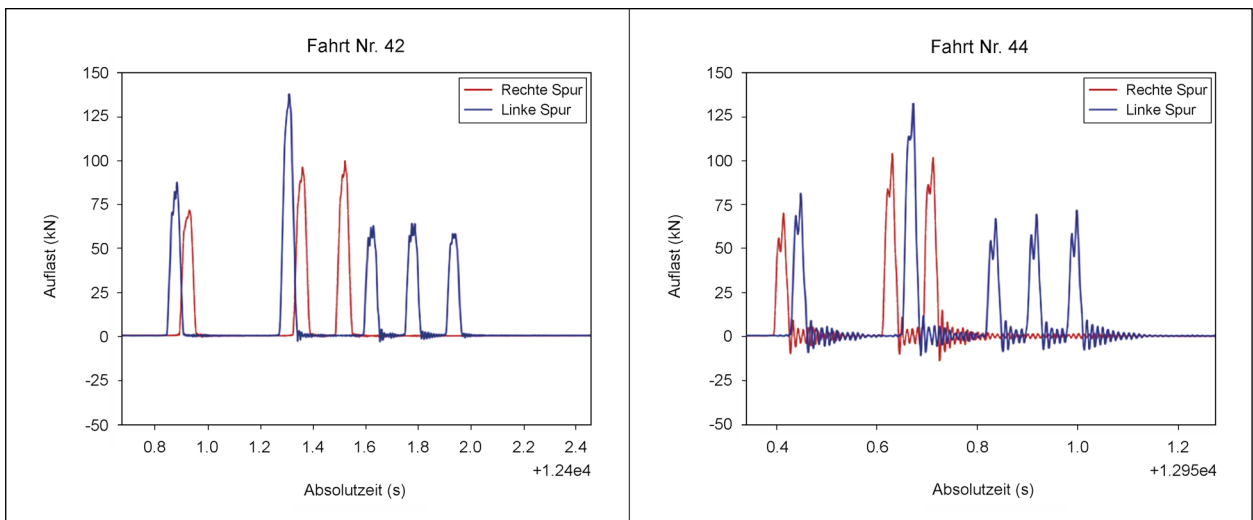


Bild 30: Parallelfahrten (links: niedrige Geschwindigkeit (30 km/h); rechts: mittlere Geschwindigkeit (60 km/h))

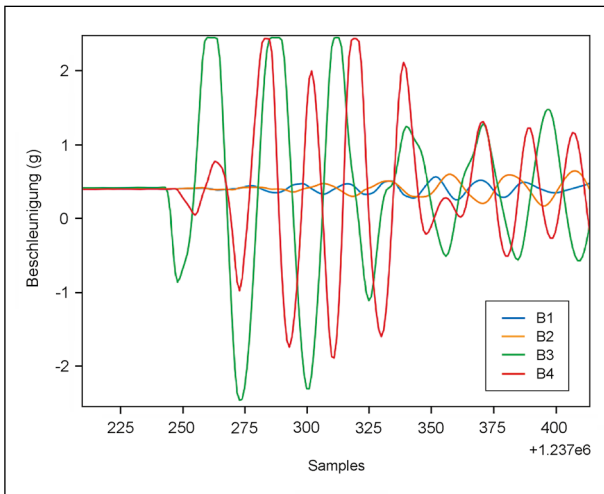


Bild 31: Exemplarischer Verlauf der Beschleunigungssignale

3.3.4 Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeiten

Die Grundlage für die Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeiten ist die Verweildauer einer Fahrzeugachse auf der Fugenoberfläche. Da durch die Wegsensoren die Lamellenabstände bekannt sind, lässt sich so die Geschwindigkeit berechnen, indem dieser Abstand durch die Verweildauer dividiert wird. Eine Möglichkeit, das Auf- und Abfahren der Fahrzeuge auf die Fuge zu erfassen, ist die Auswertung des Signals der Beschleunigungssensoren B1 bis B4 (vgl. Kapitel 2.1).

Das Beschleunigungssignal, wie Bild 31 etwa um Datenpunkt 260 und 285 zu sehen, überschreitet jedoch regelmäßig den Messbereich von +/- 2,5 g. Dieser Umstand erschwert eine automatische Peaksuche stark. Aus diesem Grund wurden die Beschleunigungssignale nicht mehr verwendet und stattdessen die im Rahmen der Achslastbestimmung ohnehin ausgewerteten Kraftsignale zur Erkennung des Auf- und Abfahrens von Fahrzeugen auf die Übergangskonstruktion herangezogen.

3.3.4.1 Methode

Für die Auswertung der Überfahrgeschwindigkeiten anhand der Kraftsignale der einzelnen Fahrzeugachsen stehen (sofern die Gesamtlänge des Fahrzeuges unbekannt ist) grundsätzlich zwei Methoden zur Verfügung (siehe Bild 32 und Bild 33).

a. Auswertung der Peakbreite: Es wird die gesamte Verweildauer des Reifens auf der Fuge bestimmt und ausgewertet. Die Bezugslänge entspricht dabei der gesamten auf den Traversen aufgelagerten Fugenfläche.

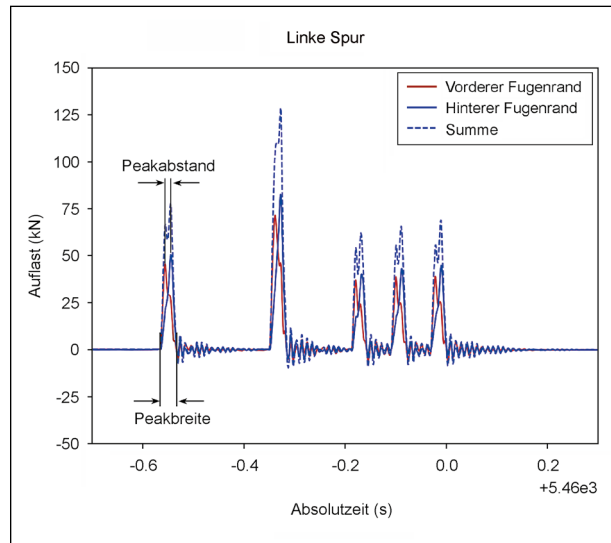


Bild 32: Methoden der Geschwindigkeitsbestimmung aus den Kraftsignalen

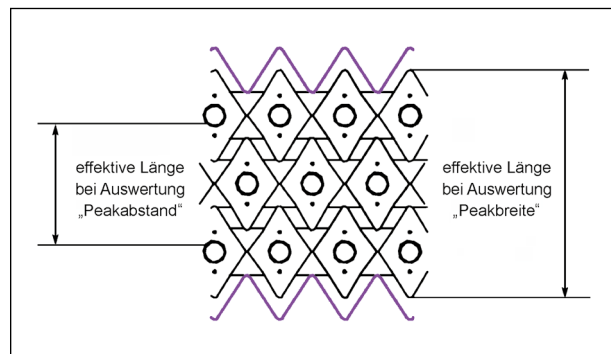


Bild 33: Bezugsängen unterschiedlicher Geschwindigkeitsauswertungen

b. Auswertung der Peakabstände: Es wird der zeitliche Abstand zwischen den Kraftmaxima der vorderen und hinteren Sensoren in der Fuge ausgewertet. Als Bezugslänge ist hier die Wegstrecke anzunehmen, bei der der Schwerpunkt des Reifenlatsch jeweils über dem entsprechenden Mittelträger steht. In erster Näherung wird angenommen, dass dies der Abstand der Traversenmittelpunkte ist.

Zwar ist die Auswertung der Peakbreite genauer, da zum Einen mehr Messwerte und zum Anderen eine genauere Definition der Bezugslänge vorliegen, allerdings ist die Bestimmung der Peakabstände deutlich robuster, weil die Bestimmung dieses Wertes selbst bei starkem Nachschwingen der Lamellen noch zuverlässig möglich ist. Aus diesem Grund wird in den folgenden Auswertungen (sofern nicht anders angegeben) immer die Methode „Peakabstand“ verwendet.

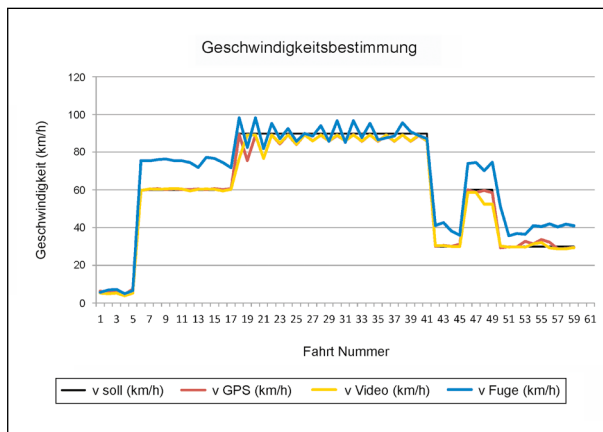


Bild 34: Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung

3.3.4.2 Ergebnis

Vergleicht man anhand der Darstellung in Bild 34 die verschiedenen ermittelten Geschwindigkeitswerte, so zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der mittels Videoauswertung und GPS gemessenen Geschwindigkeiten mit der Sollvorgabe. Die mit der Methode der Peakabstände errechneten Werte stimmen bei hohen und niedrigen Geschwindigkeiten gut mit der Sollvorgabe überein, bei mittleren Geschwindigkeiten liegen die Werte jedoch um ca. 25 % zu hoch.

Gegenstand zukünftiger Untersuchungen wird daher sein, die effektive Länge der Fuge in Abhängigkeit der Fugenstellung, Geschwindigkeit und ggf. sogar des Fahrzeugtyps möglichst korrekt zu ermitteln.

3.3.4.3 Verfeinerung der Geschwindigkeitserkennung

Wird die Geschwindigkeitsbestimmung nicht mehr am ungefilterten Rohsignal, sondern wie in Bild 35 gezeigt an einem tiefpassgefilterten (Bessel-Filter, Grenzfrequenz 100 Hz) Signal durchgeführt, kann die Genauigkeit der Geschwindigkeitserfassung insbesondere im Bereich der mittleren Geschwindigkeiten deutlich verbessert werden.

Ein erneuter Vergleich der mit dieser Methode bestimmten Geschwindigkeiten mit den per GPS gemessenen Geschwindigkeiten zeigt die deutliche Verbesserung der Genauigkeit. Die Abweichung gegenüber dem Referenzwert reduziert sich auf ca. 4 %, siehe Bild 36.

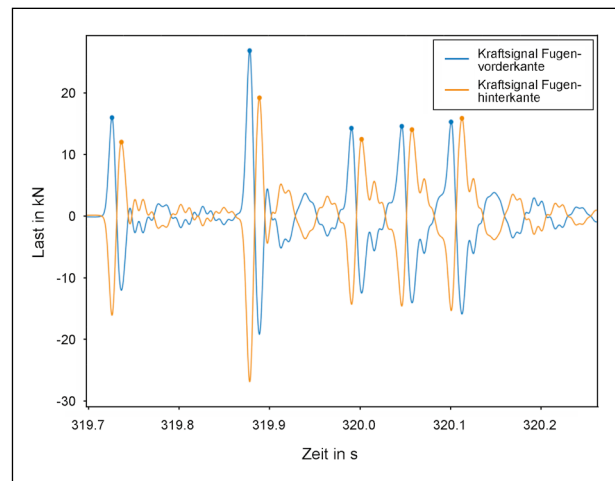


Bild 35: Gefilterte Kraftsignale an der Fuge

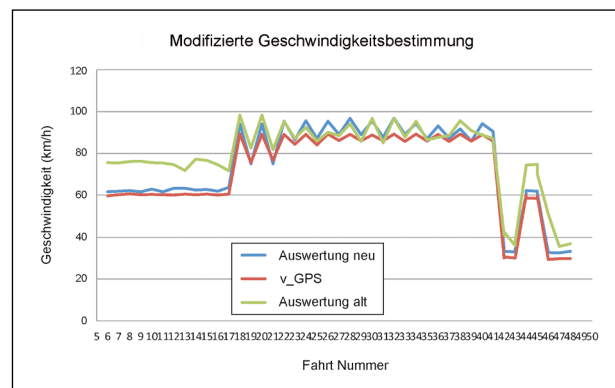


Bild 36: Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung mit modifizierten Parametern

3.4 Zusammenwirken der Dynamik von Fahrzeug und Fuge

3.4.1 Dynamische Effekte der Fuge

Aus Simulationen und früheren Messungen ist bekannt, dass durch die stoßartigen Belastungen bei den Überfahrten die Fuge zu Schwingungen angeregt wird. Die erste Eigenfrequenz für Vertikal-schwingungen der Lamellen wurde in der Simulation zu 125 Hz bestimmt.

Betrachtet man die Messschriebe der Versuchsüberfahrten, so fallen hingegen Schwingungseffekte mit den Frequenzen von 100 und 150 Hz auf:

- Ausschlagen nach Stoßanregung mit ca. 100 Hz (Bild 37).

Nach der Anregung durch überfahrende Fahrzeuge ist ein Über- und Ausschlagen der Lamellen zu beobachten. Dieses ist so stark, dass bei Mehr-

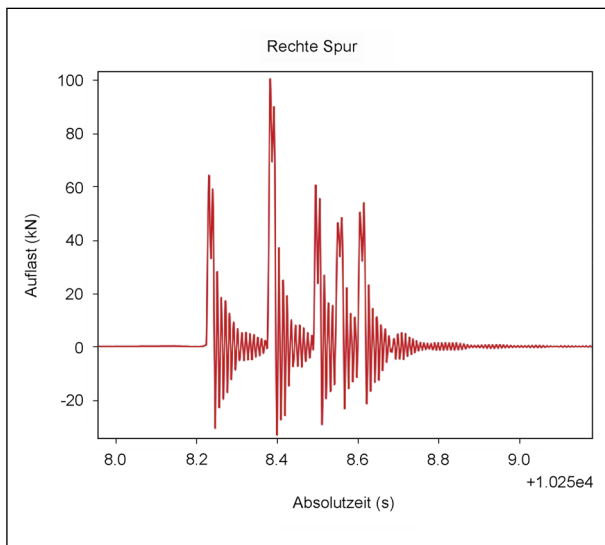


Bild 37: Ausschwingvorgang (Lkw 2, 90 km/h)

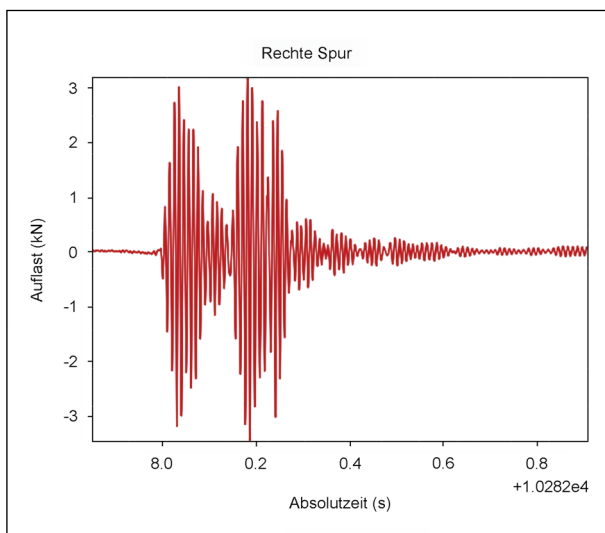


Bild 38: Anregung durch benachbarte Überfahrt (Lkw 1, 90 km/h)

fachachsen die jeweils nächste Achse auf die Fuge trifft, noch bevor die Schwingung abgeklungen ist:

- Anregung durch benachbarte Überfahrt mit 150 Hz (Bild 38).

Es zeigt sich, dass es trotz der Trennung der Fahrspuren zu einer gegenseitigen Beeinflussung kommen kann. Die Anregung erfolgt mit einer charakteristischen Frequenz von 150 Hz und kann eine Größenordnung erreichen, die der Anregung durch leichte Kraftfahrzeuge entspricht.

3.4.2 Dynamische Effekte der Fahrzeuge

Für die Betrachtung der Überfahrten an der Dehnfuge sind Schwingungseffekte der Lkw wenig relevant. Die Eigenfrequenzen von Aufbau und Achsen liegen in einem relativ niederfrequenten Bereich (< 5 Hz), sodass insbesondere bei höheren Überfahrtsgeschwindigkeiten das Fahrzeug die Fuge in kürzerer Zeit überquert als eine Eigenperiode dauert.

Interessanter dagegen ist die durch die Trägheit der Räder und Achsen bedingte Verzögerung des Kraftaufbaus beim Übergang von der Asphaltdecke auf die Übergangskonstruktion. Ebenfalls spielt die (mechanische oder pneumatische) Kopplung von Mehrfachachsenanordnungen eine Rolle.

Die Effekte zeigen sich in der Auswertung wie in Bild 39 dargestellt.

Allgemein ist zu erkennen, dass die Achslasten weniger stark schwanken als bei den in Kapitel 2.2 beschriebenen ursprünglichen Messfahrten. Während dort noch ein Kraftabfall von bis zu 50 % zu beobachten war und dieser besonders stark an den Vorderachsen ausgeprägt war, zeigt sich nun eine deutlich geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messwerte. Interessant ist auch die Kopplung der Hinterachsen zu sehen: Tendenziell steigt die Belastung der hintersten Achse mit der Geschwindigkeit an, während die vordere Achse der gekoppelten Anordnung zunehmend entlastet wird. Im Mittel wirken sich die Unterschiede nicht mehr sehr stark aus.

Aus Bild 40 ist ersichtlich, dass die Abweichung zwischen den statischen und dynamischen Messwerten in dieser Auswertung bei maximal ca. 15 % liegt. Dies ist deutlich geringer als die bei den ersten Messfahrten gemessenen Abweichungen (vgl. Bild 4), bei denen Werte zwischen 30 und 45 % ermittelt wurden. Ebenso lässt sich nun kein eindeutiger Trend mehr identifizieren, die statistischen Schwankungen nehmen aber erkennbar mit steigender Geschwindigkeit zu.

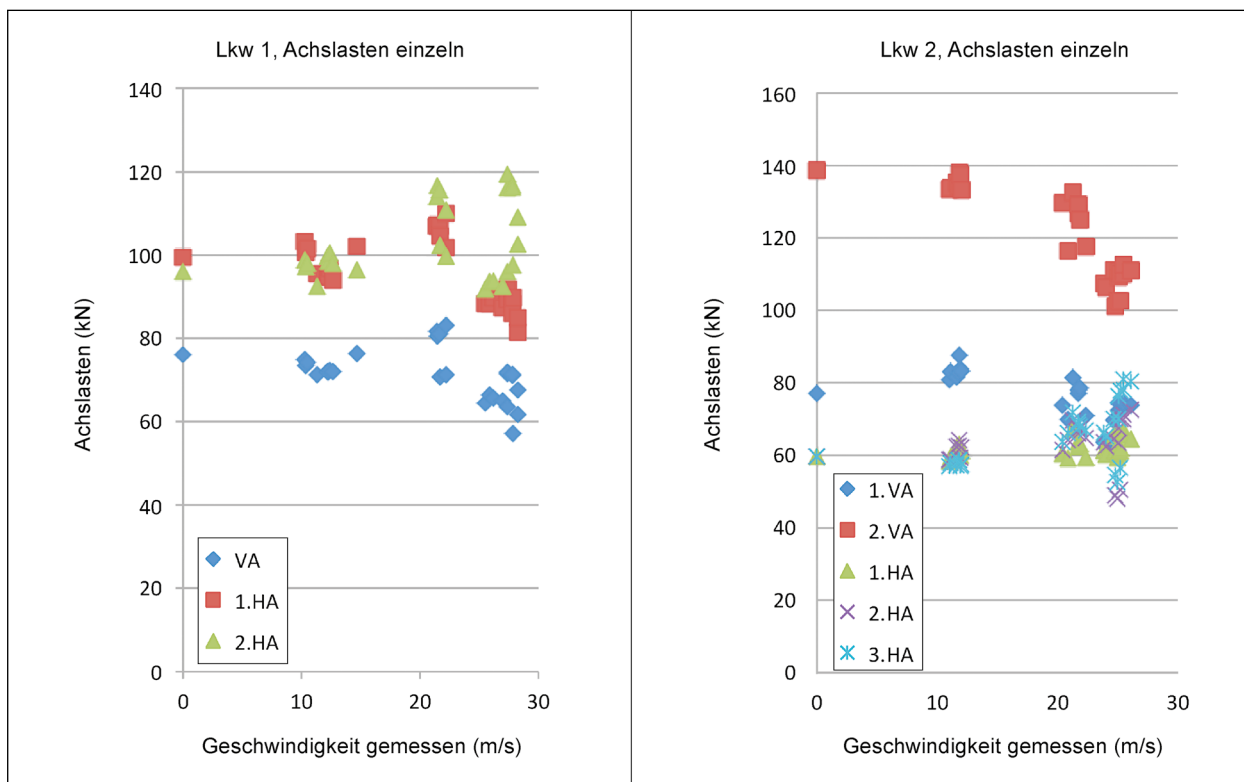


Bild 39: Achslasten in Abhängigkeit der Überfahrungs geschwindigkeit

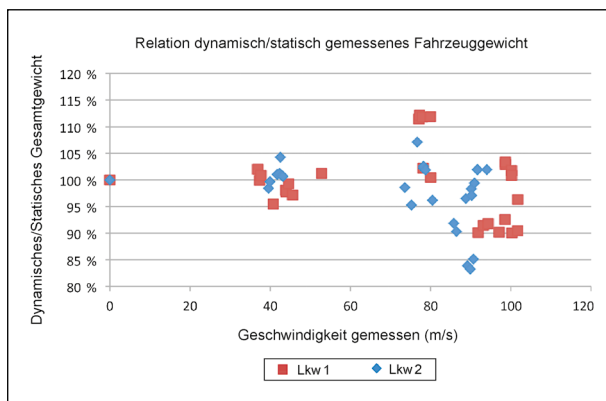


Bild 40: Auflastwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit 2018

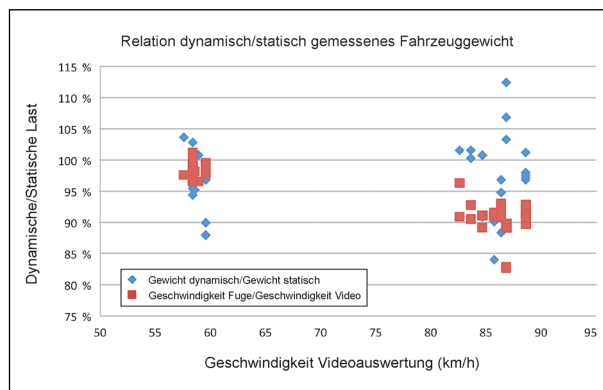


Bild 41: Vergleich der gemessenen Größen bei den Messfahrten 2020

3.4.3 Vergleich mit Messwerten der zweiten Kalibrierfahrten

Auch bei den Messungen 2020 ist noch eine Streuung der Messwerte erkennbar (Bild 41), die gemessenen Achslasten streuen jetzt jedoch weitgehend symmetrisch um den Mittelwert. Dies ist der Wirkung des Kompensationsalgorithmus (siehe Kapitel 4.4.2) zuzuschreiben, welcher hier bereits zum Einsatz kam. Wegen der geringen Dynamikeffekte bei niedrigen Geschwindigkeiten wurden in der Darstellung nur die Geschwindigkeitsniveaus 60 und 90 km/h betrachtet.

Die Geschwindigkeitsauswertung zeigt sehr gute Ergebnisse bei ca. 60 km/h, bei höheren Geschwindigkeiten weicht die Messung an der Dehnfuge von der Videoauswertung ab. Da die Verweildauer der Fahrzeuge auf der Fuge bei 90 km/h sehr kurz ist, sind Ungenauigkeiten sowohl in der Video- als auch der Fugenauswertung zu erwarten. Für die Zwecke der Verkehrserfassung und Fahrzeugidentifikation ist die Genauigkeit jedoch mehr als ausreichend.

3.4.4 Interpretation

Die Reduzierung der dynamischen Effekte passt zu der in Kapitel 3.3.2.1 aufgestellten Vermutung, dass die (schwindende) Asphaltüberhöhung die dominante Ursache für die Radkraftschwankungen ist. Der Effekt ist, sofern die Asphaltüberhöhung nicht zu groß ($> \text{ca. } 8 \text{ mm}$) ist, jedoch weitgehend unabhängig von der Stufenhöhe.

Die Kopplung der verbundenen Achsen wirkt sich in der Einwirkungssumme pro Fahrzeug ausgleichend aus. Ein Einfluss des Ladungsschwerpunktes auf die Genauigkeit der Messung konnte nicht festgestellt werden.

Die Wechselwirkungen mit dem Eigenschwingverhalten können durch geeignete Filterfunktionen reduziert werden, siehe Kapitel 4.4.2.

4 Simulationsmodell

4.1 Allgemeines

Zum besseren Verständnis der in Kapitel 3.4 beschriebenen Wechselwirkungen wurde von dem Unterauftragnehmer Prof. Dr.-Ing. Georg Rill ein Mehrkörpersimulationsmodell entwickelt, welches sowohl die Dynamik der Fahrzeuge als auch des Fahrbahnüberganges nachbildet.

Der Einfachheit halber wird ein ebenes Modell verwendet, Querdynamik oder Effekte aus schrägen Überfahrten werden nicht berücksichtigt.

Im Fahrzeugmodell (Bild 42) werden die massebehafteten Körper als starr angenommen und untereinander mit Kraffelementen gekoppelt. Neben den konstruktionsbedingten kinematischen Kopplungen sind auch (soweit bekannt) Nichtlinearitäten, zum Beispiel im Dämpferverhalten nachgebildet. Die Parameter des Modells stützen sich, sofern nicht durch Messungen bestimmt, auf typische Werte für die jeweiligen Fahrzeugtypen.

Zuerst stand ein dreiachsiges Fahrzeug mit den Parametern von Lkw 1 als Modell zur Verfügung, Lkw 2 wurde darauf aufbauend ergänzt.

Der Fahrbahnübergang (Bild 43) enthält neben den als starr angenommenen Traversen die flexibel modellierten Lamellen als Lumped-Mass-Modelle. Dies ermöglicht, die Nachgiebigkeit des Fahrbahnüberganges unter Last und auch das Nachschwingverhalten abzubilden.

Die Parameter wurden aus den geometrischen Werten abgeleitet oder im Versuch bei MAURER bestimmt.

Als Stützpunkte für die Auswertung stehen ebenso wie im realen System die Randpunkte der Traversen zur Verfügung, die dort wirkenden Auflagerreaktionen können bestimmt und mit den gemessenen Größen verglichen werden.

Das Modell wurde vollständig in GNU Octave (voll MATLAB[®]-kompatibel) programmiert.

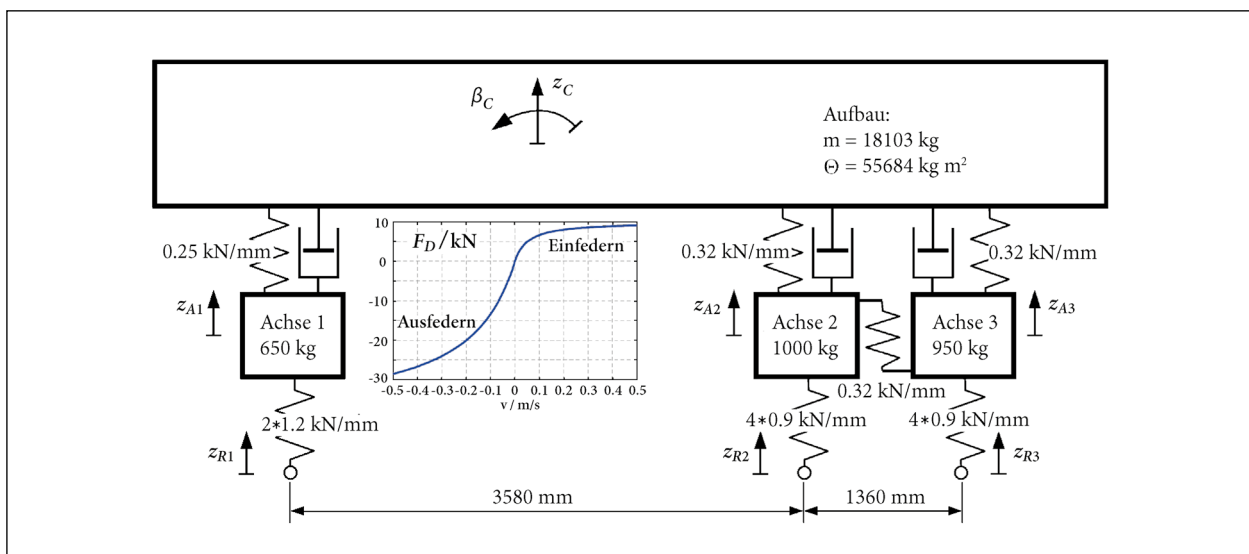


Bild 42: Ebenes Fahrzeugmodell (beispielhafter Parametersatz)

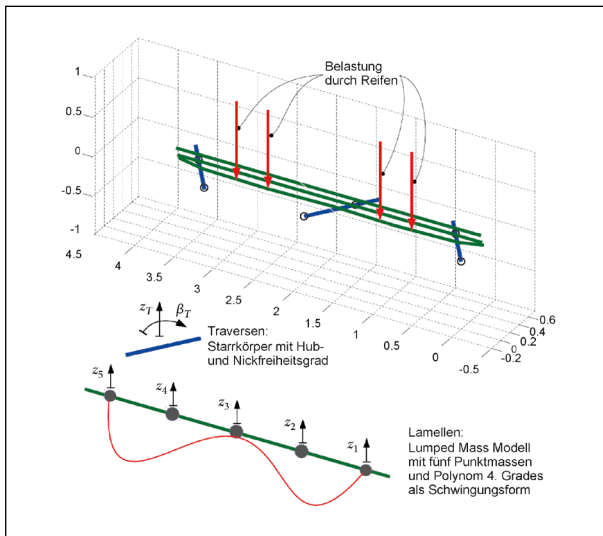


Bild 43: Mehrkörpermodell einer Fahrspur der Übergangs-konstruktion

4.2 Erweiterung um Sattelzug-Modell

Die Kopplung zwischen Zugmaschine und Auflieger stellt eine zusätzliche Herausforderung dar, weshalb Lkw 2 erst im zweiten Schritt simulativ nachgebildet werden konnte. Die Modellierung erfolgt analog zu Lkw 1 anhand eines ebenen Mehrkörpermodells, wie in Bild 44 gezeigt. Wie auch bereits dort wurden die wesentlichen Parameter anhand der statischen Messungen bestimmt bzw. geeignet abgeschätzt.

4.3 Ergebnisse

Für den Vergleich zwischen Simulation und Messung wurden für jedes Geschwindigkeitsniveau exemplarische Messdaten herangezogen. Es stellt in

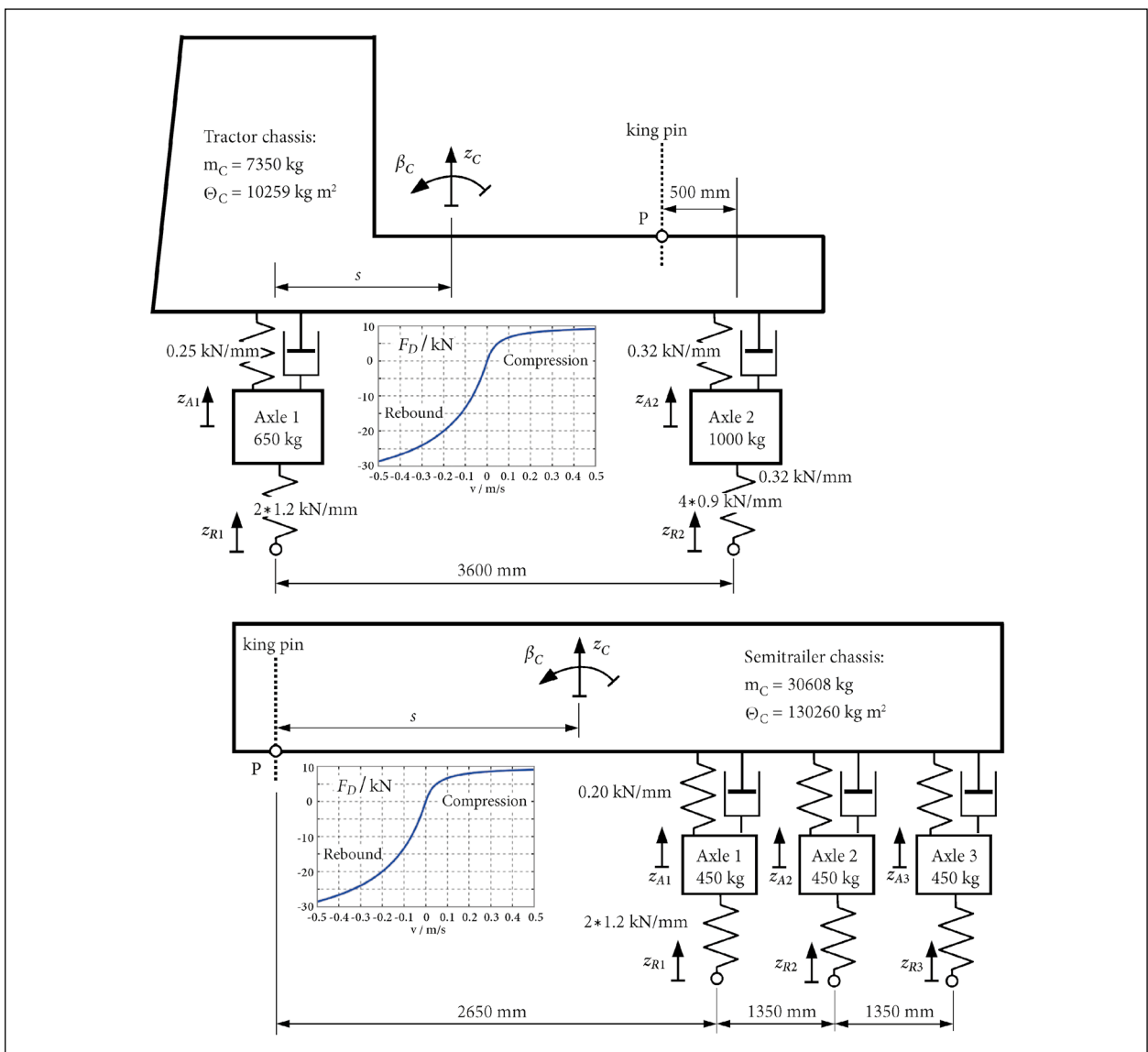


Bild 44: Mehrkörpermodell des Sattelzuges

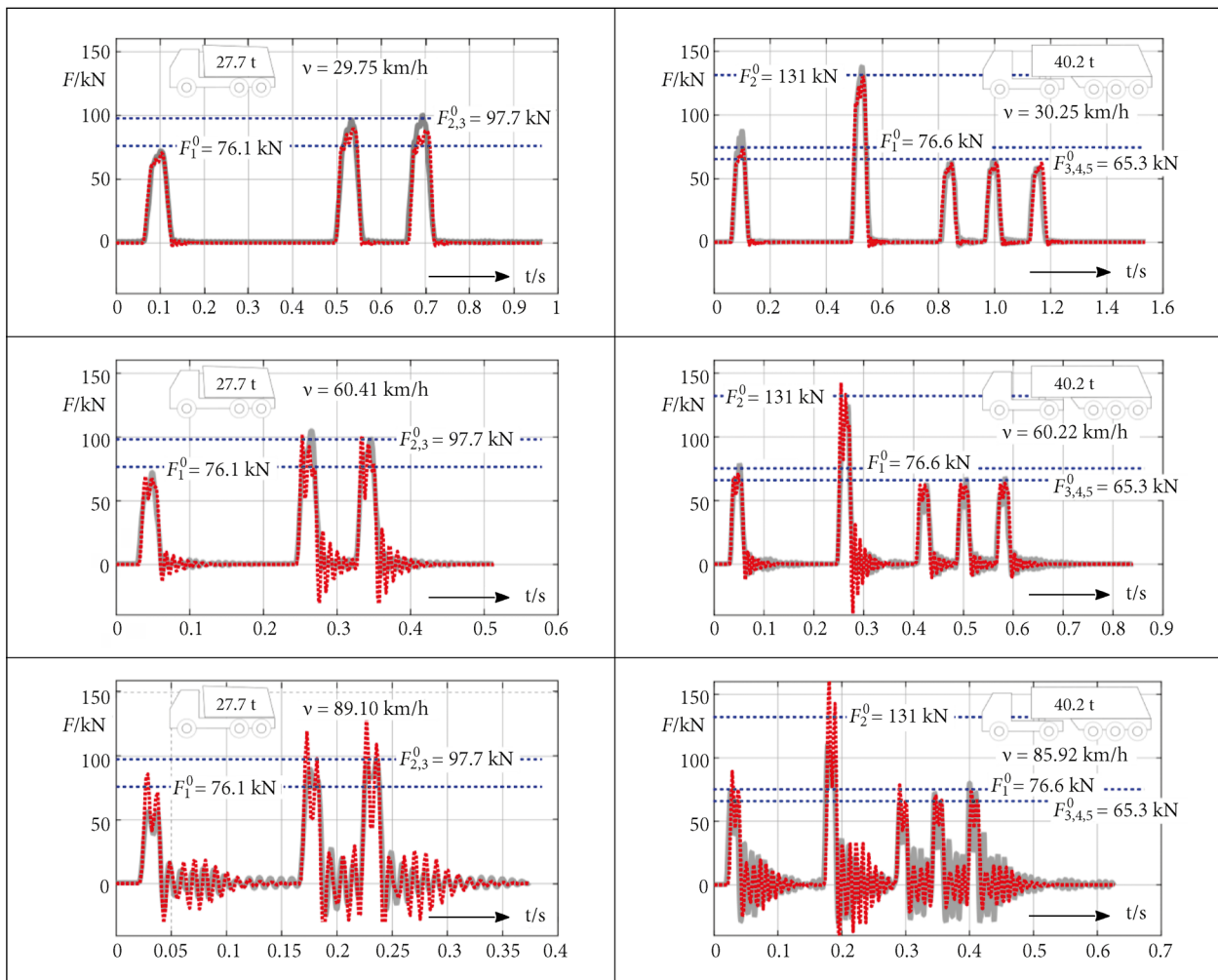


Bild 45: Vergleichsergebnisse der Simulation mit den Kalibrierfahrten

den folgenden Ansichten jeweils die gestrichelte Linie die Simulation, die durchgezogene Linie die Messung dar (Bild 45).

Der Vergleich bei der quasistatischen Überfahrt mit 5 km/h fehlt, da die Lkw-Fahrer bei diesen Überfahrten den Bremsvorgang zu früh begonnen hatten, wodurch die Geschwindigkeit bereits reduziert wurde noch bevor die Lkw die Fuge vollständig überquert hatten.

4.4 Interpretation

4.4.1 Allgemein

Das Modell zeigt bereits sehr gut die in Kapitel 3.4 beschriebenen dynamischen Effekte, insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten. Ebenfalls lässt sich die charakteristische Zweiteilung der Kraftspitzen beobachten sowie die Überlagerung des Ausschwingvorganges.

Gerade bei hohen Geschwindigkeiten lässt sich erkennen, dass in der Simulation die dynamischen Kräfte teilweise die statischen Kräfte übersteigen. Dies kann evtl. damit erklärt werden, dass das Überschwingen der Lamellen in der Simulation überbewertet wird. Plausibel wird diese Vermutung dadurch, dass in der Realität die Lamellen auch Torsionsfreiheitsgrade besitzen, die es erlauben, der Krafteinwirkung durch den Reifen auszuweichen, ohne zur Biegeschwingung beizutragen.

Die Ergebnisse stimmen dennoch qualitativ sehr gut mit den Messungen überein und erlauben auch eine Bewertung der Einflussfaktoren auf die dynamischen Effekte.

4.4.2 Anwendung zur Korrektur der Messergebnisse

Mithilfe der Simulation kann gezielt der Einfluss verschiedener Parameter variiert werden. Insbeson-

dere ist es möglich, die Fahrzeug- von der Fugendynamik getrennt zu analysieren.

Die oben gezeigten Ergebnisse lassen vermuten, dass die Eigenschwingungen der Fuge in Verbindung mit der dynamischen Anregung durch die Fahrzeugaufhänger erheblichen Einfluss auf den Unterschied zwischen statischem und dynamischem Kraftsignal haben.

Die Größe des Einflusses kann durch eine Variation in den Massen der Lamellen abgeschätzt werden (vgl. Bild 46 und Bild 47), das Schwingungsverhalten kann so z. B. unterdrückt werden.

Da somit gezeigt werden konnte, dass der primäre Einflussfaktor für die dynamische Abweichung der Messwerte in den Schwingungen der Fuge, und nicht in der Fahrzeugdynamik zu finden ist, wurde

untersucht, ob sich der dynamische Einfluss quantifizieren und nachbilden lässt. Hierzu wurden statische Kurven der Referenzfahrten zeitlich skaliert mit dynamisch gemessenen überlagert und subtrahiert.

Ein Vergleich von Bild 48 und Bild 49 zeigt, dass sich der Unterschied zwischen dynamischen und statischen Kurven gut als gedämpfte Sinusschwingung modellieren lässt. Die Frequenz dieser Sinusschwingung entspricht hier der bekannten Biege-eigenfrequenz der Lamellen (100 Hz). Mithilfe einer Parameterstudie konnten die entsprechenden Werte für den zeitlichen Offset, die Amplitude und Dämpfungskonstante der Kompensationsfunktion bestimmt werden.

Bild 50 zeigt, wie sich die Peaks der dynamisch gemessenen Signale rekonstruieren lassen. Beson-

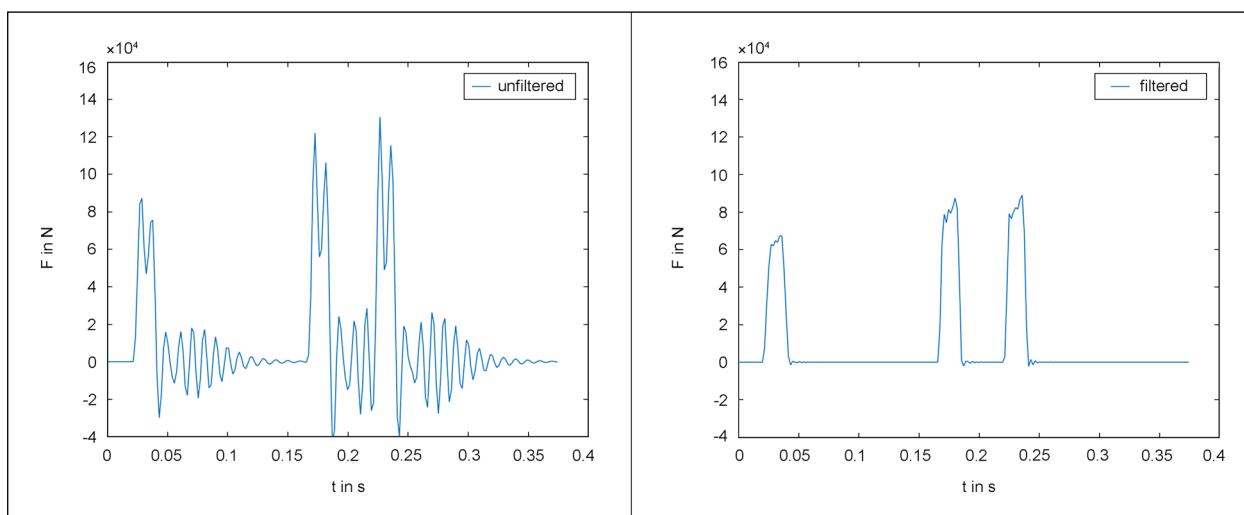


Bild 46: Elimination der Fugendynamik am Beispiel des dreiachsigen Lkw bei 90 km/h

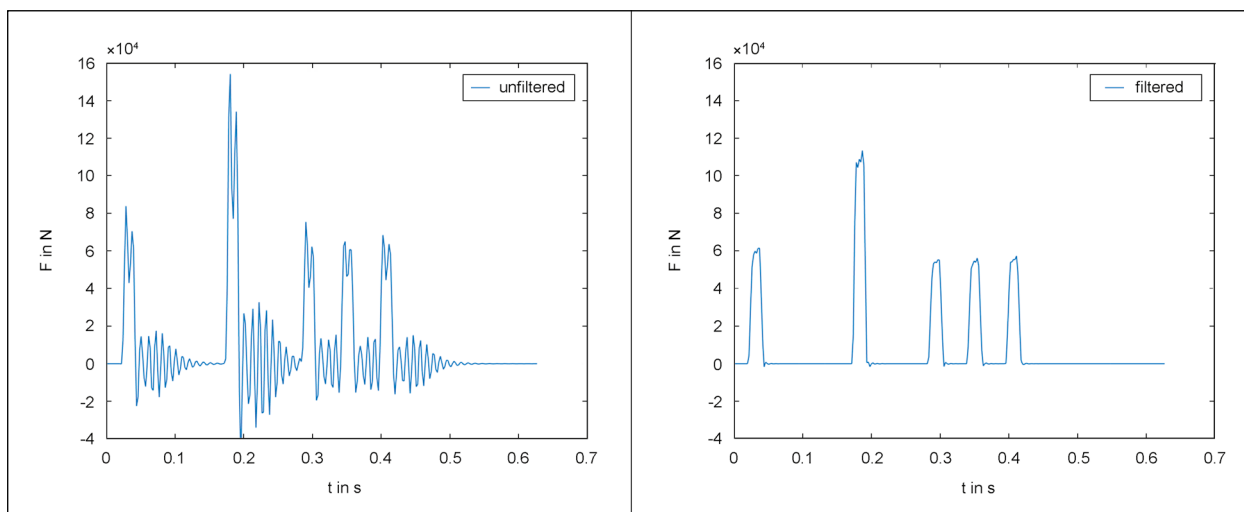


Bild 47: Elimination der Fugendynamik am Beispiel des Sattelzuges bei 90 km/h

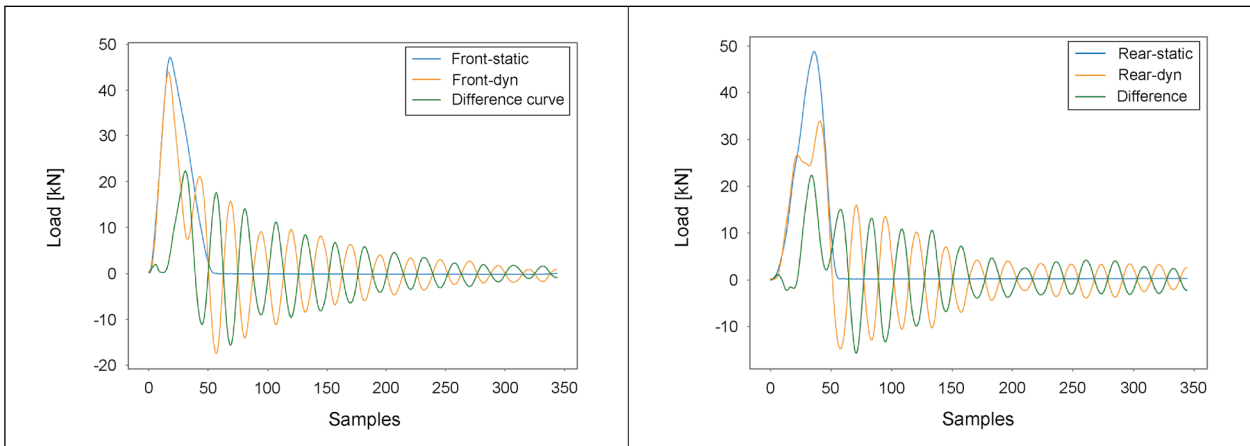


Bild 48: Differenzkurven zwischen statisch (5 km/h) und dynamisch (90 km/h) gemessenen Achslasten

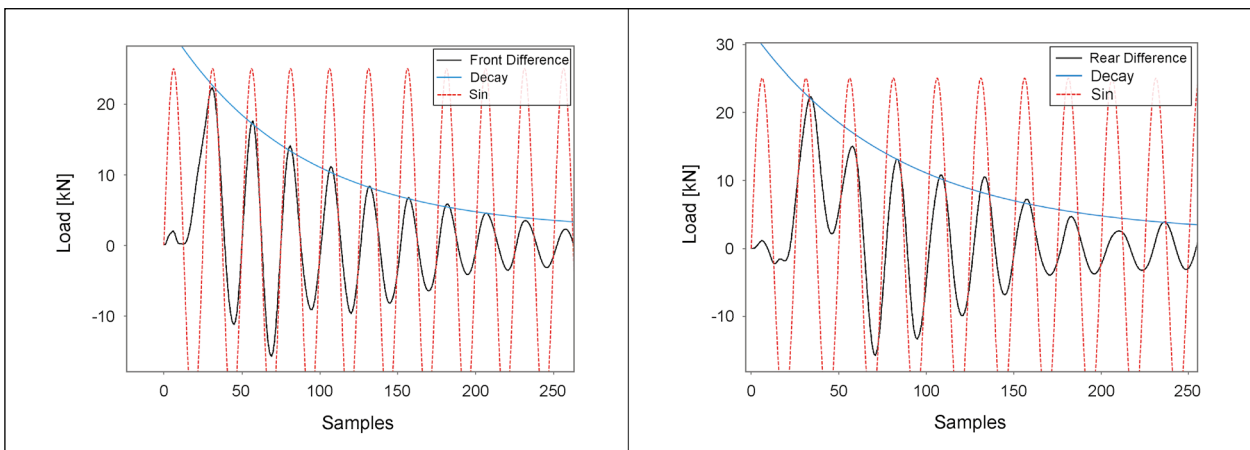


Bild 49: Approximation der Differenzkurven durch exponentiell abfallende Sinuskurven

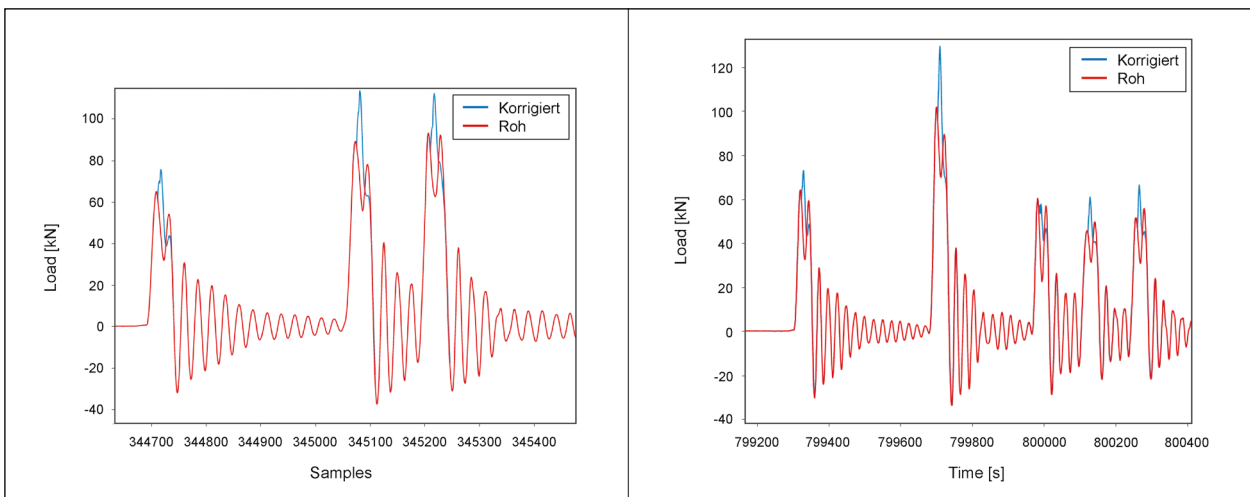


Bild 50: Anwendung der Korrekturfunktion

ders bei den Hinterachsen eines Sattelschleppers (rechtes Bild) zeigt sich, dass die Rekonstruktion die Dynamik weitgehend ohne unrealistische Überschwinger kompensieren kann.

Durch Anwendung der Filterfunktion auf die Messwerte der Kalibrierdaten lässt sich das Verhältnis zwischen statischer und dynamisch gemessenem Fahrzeuggewicht insbesondere bei hohen Ge-

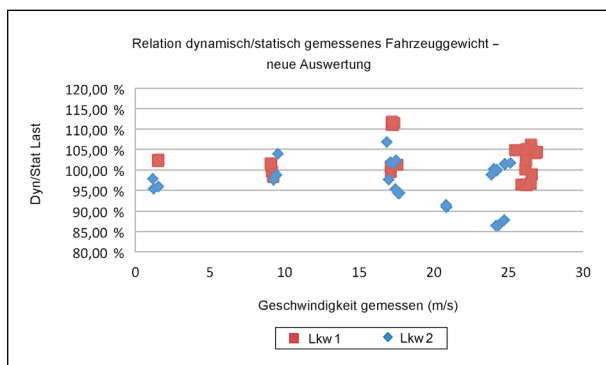


Bild 51: Verbesserte Auswertung der Fahrzeugparameter durch Elimination der Fugenschwingung

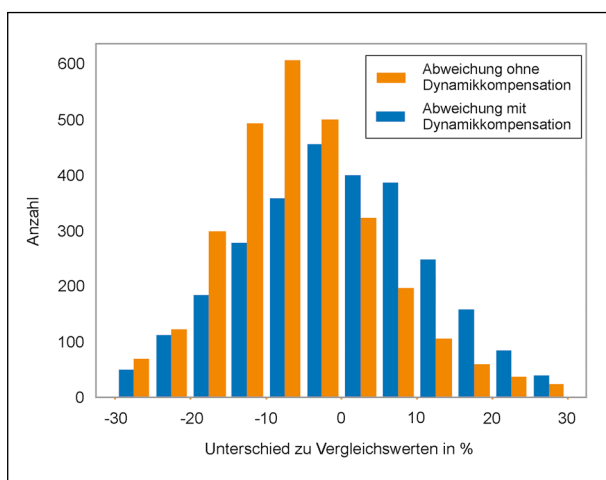


Bild 52: Prozentuale Abweichungen in den Fahrzeuggewichten zwischen MAURER und IBF mit und ohne Dynamikkompensation

schwindigkeiten nochmals verbessern. Dies zeigt Bild 51 im Vergleich zu Bild 40.

Insbesondere für Lkw 1 zeigen sich deutliche Verbesserungen in der Genauigkeit und Streuung. Weitere Anpassung der Werte (z. B. spezifisch für die jeweilige Fugenseite) birgt Potenzial für weitere Verbesserung.

Um eine größere Datenbasis für die Bewertung des Effekts der Kompensationsfunktion zu nutzen, wurde ein Vergleichsdatensatz des Projektpartners Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt (IBF) verwendet, welcher am 28. Januar 2019 aufgezeichnet wurde.

Bild 52 zeigt, dass sich der systematische Fehler (Unterschätzen der Fahrzeuggewichte) durch Anwendung der Kompensationsfunktion weitestgehend beheben lässt.

5 Automatisierte Auswertung der Messdaten

5.1 Verwendete Systeme

5.1.1 NI Diadem®

Die Software Diadem von National Instruments stellt eine Vielzahl an Werkzeugen zur Verwaltung, Aufbereitung und Darstellung von Messdaten zur Verfügung. Mit einer Programmierschnittstelle zu Visual Basic for Applications (VBA) ist es möglich, die Auswertungsvorgänge zu automatisieren. Für Vorversuche und orientierende Auswertungen wurde Diadem verwendet. Für die automatisierte Auswertung wurden die in Diadem vorhandenen Algorithmen teilweise nach Python portiert.

5.1.2 Python und zusätzliche Bibliotheken

Für eine weitestgehende Unabhängigkeit von Software- und Hardwareherstellern wurde als Entwicklungsplattform für die Auswertungssoftware die quelloffene Programmiersprache Python (derzeit in der Version 3.6.5) verwendet. Für die Analyse und Bearbeitung der großen Datenmenge werden Funktionen der NumPy-Bibliothek verwendet. Sowohl Python als auch die verwendeten Bibliotheken (insbesondere Scipy und NumPy) stehen unter Lizenzen, welche die unentgeltliche Nutzung und Verbreitung auch für kommerzielle Zwecke gestatten. Keine der Lizenzen fordert ein Copyleft, somit ist eine Offenlegung des im Rahmen des Forschungsprojektes geschaffenen Programmcodes nicht zwingend erforderlich.

5.2 Auswerteprozeduren

Die beschriebenen Auswertungen wurden zunächst offline entwickelt und anschließend für eine Auswertung in Echtzeit adaptiert.

5.2.1 Aufbereitung der Messdaten

Die vom Messrechner generierten Dateien (jeweils eine Datei pro 10 Minuten Messzeit) werden von der Festplatte eingelesen und nach Kanälen gruppiert. Anschließend werden die Werte der Sensoren an den Traversenlagern pro Fahrspur und Seite (Brücke oder Widerlager) gruppiert und zu einem Summensignal aufaddiert. Um den durch den regelmäßigen Reset der piezoelektrischen Kraftsenso-

ren bedingten möglichen Offset zu korrigieren, werden die Kraftsignale mit einem aus dem Modalwert bestimmten Korrekturwert verrechnet.

5.2.2 Ermittlung der Achslasten und -geschwindigkeiten

Um die einzelnen Überfahrereignisse möglichst klar identifizieren zu können, werden die bekannten Eigenfrequenzen (vgl. Kapitel 3.4.1 und Bild 53) aus dem Signal ausgefiltert. Im gefilterten Signal werden die einzelnen Überfahrten mit einer Grob-suche nach den lokalen Maxima identifiziert. In der Nachbarschaft zu den so gefundenen Maxima wird anschließend nach den jeweils nächstgelegenen Maxima im ungefilterten Signal gesucht. Diese werden nach dem in Kapitel 3.3.4 beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Achslast herangezogen. Für die Geschwindigkeitsbestimmung wird ebenfalls in der Nachbarschaft der Grob-Peaks nach den Spitzen in den Signalen für die Fugenvorder- und -hinterkante gesucht, woraus nach der Methode aus Kapitel 3.3.4 die Geschwindigkeit pro Achse bestimmt wird.

5.2.3 Erkennung von Fahrzeugen

In Abhängigkeit von der ermittelten Geschwindigkeit wird innerhalb eines Zeitfensters nach nachfolgenden Achsen gesucht. Das Zeitfenster ist so definiert, dass es in normal fließendem Verkehr sicher kleiner als der übliche Sicherheitsabstand ist (z. B. 15 m). Alle solcherart zusammengefassten Achsen werden dann zu einem Fahrzeug gruppiert. Aus den Einzelachslasten und Einzelgeschwindigkeiten werden für das jeweilige Fahrzeug Gesamtgewicht und Durchschnittsgeschwindigkeit bestimmt. Aus dem Zeitversatz der Einzelüberfahrten und der Fahrzeuggeschwindigkeit werden noch die Radstände errechnet. Mit Kenntnis der Radstände können die Achsen gegebenenfalls zu Doppel- und Dreifachachsen gruppiert werden.

Beispielhaft ist das Ergebnis dieses Vorganges in Bild 54 gezeigt.

Unterhalb einer Geschwindigkeit von 30 km/h ist die Unterscheidung, ob zwei aufeinanderfolgende Achsen zum selben Fahrzeug oder zu zwei verschiedenen Fahrzeugen gehören, nicht mehr zuverlässig möglich. In diesem Fall wird in einen alternativen Ausgabemodus umgeschaltet, bei dem nur noch

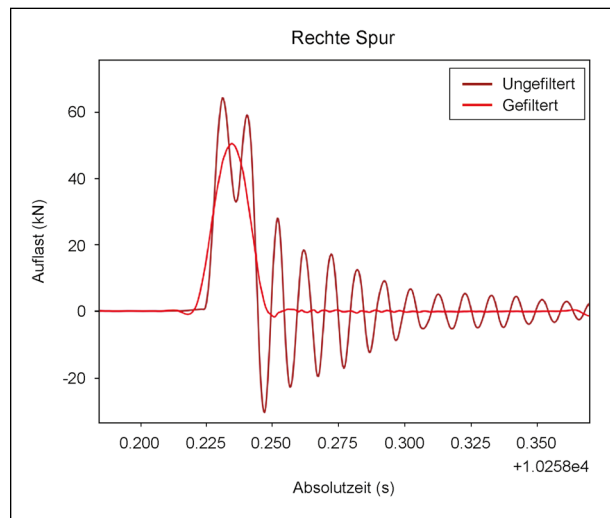


Bild 53: Effekt der Filterung

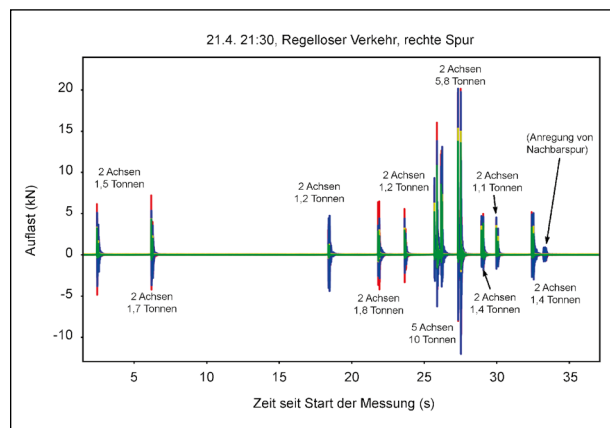


Bild 54: Beispielhafte Fahrzeugermittlung aus dem regellosen Verkehr

Datensätze für einzelne Achsen (vgl. Tabelle 6) ausgegeben werden.

5.2.4 Klassifizierung von Fahrzeugen

Es wird eine Klassifizierung der Einzelfahrzeuge nach dem 5+1 System durchgeführt, vgl. Tabelle 2. Hierzu wurde ein Ablaufschema entwickelt, welches zunächst noch vollständig DIADEM implementiert wurde (Bild 55).

Bei der Überführung in Python wurde die Prozedur verfeinert und verschlankt, um für die vollautomatisierte Auswertung verwendet werden zu können (Kapitel 5.3).

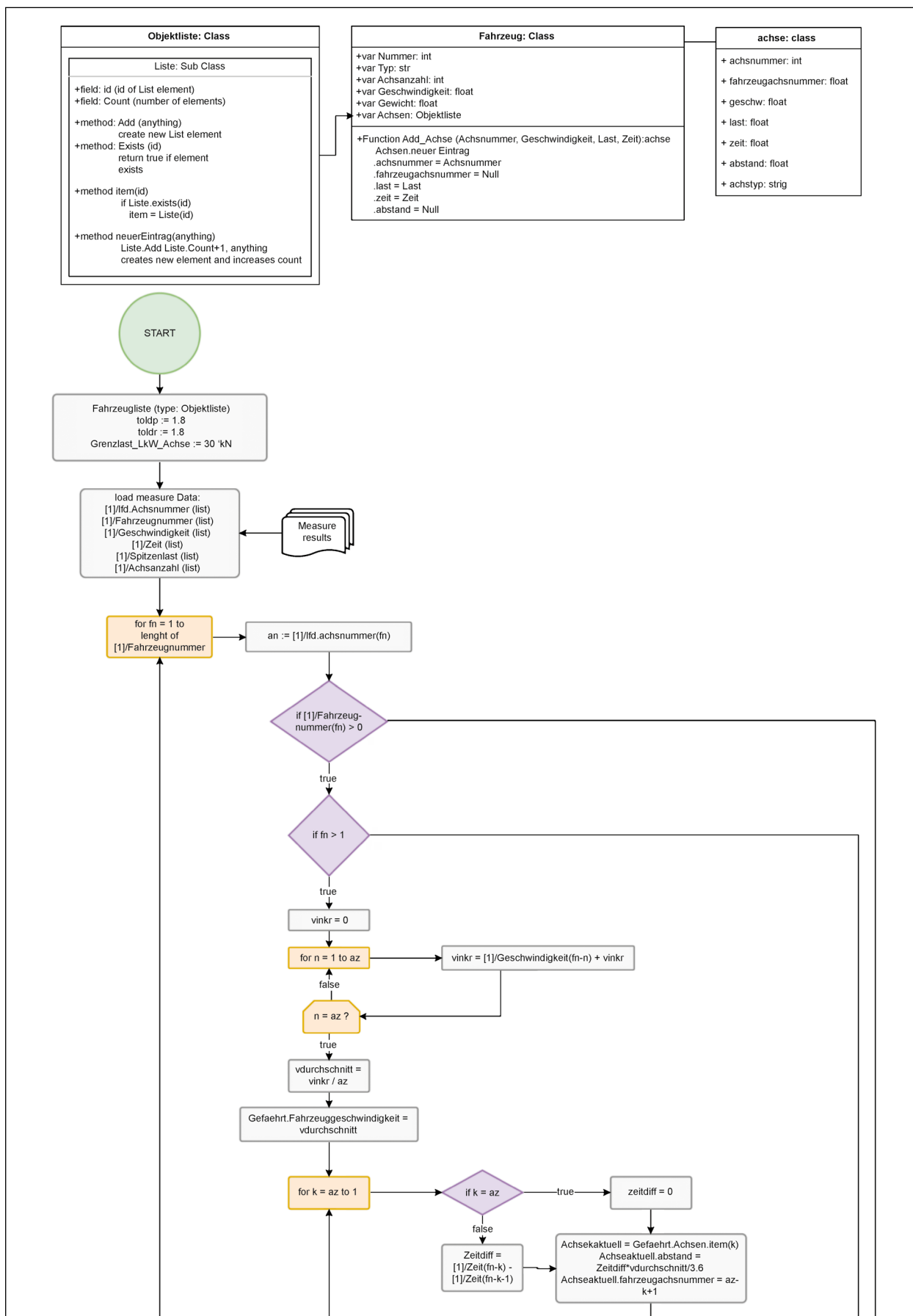


Bild 55: Schema der teilautomatisierten Auswertung und Klassifizierung

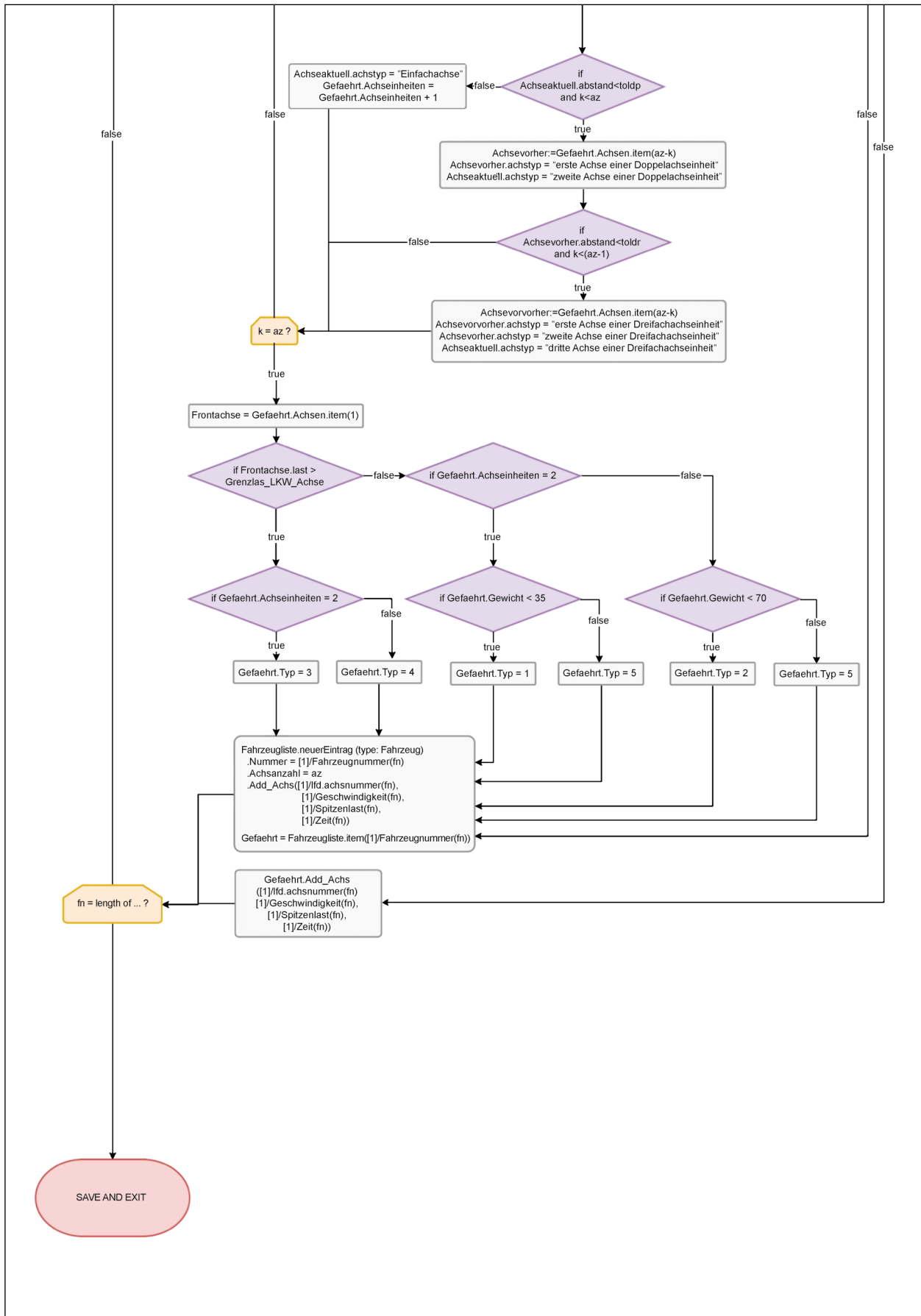


Bild 55: Fortsetzung

Klasse	Kurzbezeichnung	Anzahl Achsgruppen	Gesamtgewicht*	Geschwindigkeit*
1 (Pkw und Lieferwagen)	Pkw	1** – 2	< 3,5 t	beliebig
2 (Pkw und Lfw + Anhänger)	Pkw + A	> 2	< 7 t	beliebig***
3 (Lkw)	Lkw	2	3,5 – 40 t	< 80 km/h
4 (Lkw + Anhänger od. Sattel-Kfz)	Lkw + A	> 2	7 – 44 t	< 80 km/h
5 (Busse)	Bus	2 – 3	3,5 – 40 t	80 – 100 km/h
6 (Sonstige)	Sonder	Sonst	Sonst	Sonst

* Es wird ein Toleranzfaktor von 10 % aufgeschlagen, um Ungenauigkeiten in der Messung sowie kleinere Überladungen abzufangen
** Motorräder werden nach dieser Klassifizierung auch zu Pkw gezählt, oft wird bei diesen aber durch das geringe Gesamtgewicht nur eine Achse erfasst
*** Es wird angenommen, dass viele Fahrer von Pkw oder Lieferwagen mit Anhängern Geschwindigkeitsbegrenzungen nicht befolgen

Tab. 2: Fahrzeugklassifizierung

5.2.5 Verfeinerte Klassifizierung der Fahrzeuge

Aus den technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen [2] ergibt sich, dass sich Fahrzeugklassen im Wesentlichen durch die Anzahl der Achsgruppierungen (Doppel- und Dreifachachsen mit Achsabständen von kleiner als 1,8 m werden jeweils zu einer Gruppe zusammengefasst) und das maximal zulässige Gesamtgewicht charakterisieren lassen. Damit alleine lassen sich bereits gut Einzelfahrzeuge und Gespanne, sowie Personen- und Lastkraftwagen unterscheiden. Die Unterscheidung zwischen Bus und Lkw ist jedoch nicht alleine anhand dieser Kriterien möglich, auch die im vorangegangenen Kapitel skizzierte Unterscheidung anhand der individuellen Achslast scheint nicht zielführend. Stattdessen kann die höhere zulässige Geschwindigkeit von Bussen (trotz der bestehenden Geschwindigkeitsbegrenzung auf der Strecke) als Indiz für eine solche Unterscheidung dienen.

Somit wird anhand der Kriterien in Tabelle 2 gruppiert.

5.3 Vollautomatisierte, kontinuierliche Auswertung

Um die Messergebnisse vor Ort und zeitlich parallel zu deren Erfassung auswerten zu können, wurden die einzelnen Auswerteprozeduren in eine modulare Struktur überführt, welche von einem zentralen Modul aus gesteuert wird. Durch die modulare Struktur ergibt sich nicht nur eine Schonung der zur Verfügung stehenden Hardwareressourcen, sondern auch eine einfache Möglichkeit, die Funktionalität zu erweitern. Trotz Optimierung des Ressourcenbedarfes zeigte sich jedoch, dass der Messrechner alleine für die Datenerfassung, Archivie-

rung und Echtzeitauswertung nicht leistungsfähig genug war. Ergänzend wurde für die kontinuierliche Auswertung vor Ort ein eigener PC beschafft, der im lokalen Netzwerk betrieben wird.

Die einzelnen Bestandteile des Auswertesystems sind in Kapitel 5.3.1 aufgelistet.

5.3.1 Hardware

Für den Auswerte-PC wird ein „PicoSys 2644“ Industrie-PC eingesetzt, welcher sich durch folgende Merkmale auszeichnet:

- Intel Core I7-CPU @ 2,4GHz (max. 3,2 GHz),
- 16 GB Ram,
- 256 GB SSD,
- Passivkühlung,
- Windows 10 IoT LTS.

Zur weiteren Erhöhung der Betriebssicherheit ist das Gerät in einem Schaltschrank mit temperaturgeregeltem Lüfter und eigenen Sicherungen untergebracht (Bild 56).

5.3.2 Software

Zur kontinuierlichen Auswertung der Messwerte wurde eine Software auf der Basis von Python und verschiedener Bibliotheken entwickelt. Besonders hervorzuheben sind die mit Python häufig mitgelieferten Pakete NumPy, Scipy sowie Pandas, die den Umgang mit großen Datenmengen erleichtern sowie häufig benötigte Funktionen (Suche nach Minima, Maxima und Peaks, Mittelwertbildung etc.) in effizienter Implementierung anbieten. Zusätzlich wird das Modul PyLZMA benutzt, um direkt kompri-

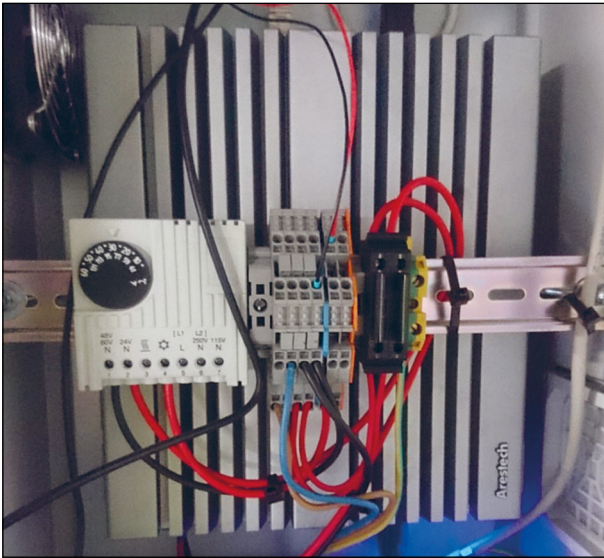


Bild 56: Industrie-PC im Schaltschrank

mierte Ergebnisdateien lesen zu können ohne diese zeitraubend separat entpacken zu müssen.

Bei der Implementierung wurde auf folgende Grundsätze geachtet:

- a. Modularität: Somit wird sichergestellt, dass Ergänzungen und Erweiterungen einfach möglich sind. Außerdem sinkt durch Wiederverwendbarkeit von Programmteilen der Entwicklungsaufwand.
- b. Fehlertoleranz: Die Software soll durch fehlerhafte Datensätze nicht zum Absturz gebracht werden können.
- c. Selbstdiagnose: Fehlermeldungen sollen möglichst aussagekräftig protokolliert werden.
- d. Übertragbarkeit: Für die manuelle Offline-Auswertung sollen möglichst die gleichen Routinen wie für die automatische Online-Auswertung verwendet werden können.

Im Folgenden wird kurz auf die Funktionsweise der einzelnen Module eingegangen.

a) Zentrales Steuermodul „Main“

Dieses Modul stellt den Einsprungpunkt in die Programmausführung dar und wird bei jedem Neustart des Auswerte-PCs automatisch aufgerufen.

Während der Laufzeit überwacht es ein spezifiziertes Verzeichnis auf dem Auswertecomputer periodisch auf den Eingang neuer Messdaten. Wenn ein

```

Startzeit: 2020-06-30 12:07:44
Intelligente Brücke
- Auswertung der instrumentierten Lager und Dehnfuge
MAURER Engineering GmbH - 2020
2020-06-30 12:07:44 Check auf neue Daten...
C:/INT_BRUECKE/INDIR/200630_1158_BW402e_MMS_ZIP.7z
200630_1158_BW402e_MMS_ZIP.7z In 150 Sekunden verarbeitet
H:/200630_1158_BW402e_MMS_ZIP.7z
2020-06-30 12:10:25 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:10:35 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:10:45 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:10:55 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:11:05 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:11:15 Check auf neue Daten...
2020-06-30 12:11:25 Check auf neue Daten...

```

Bild 57: Bildschirmausgabe der Auswertesoftware

geeigneter Datensatz zur Verfügung steht, wird dieser eingelesen, verarbeitet und die Ergebnisse der Auswertung in die Ausgabedatei geschrieben.

Hier befindet sich auch die Schnittstelle zur Auswertung der Lagerkenngößen, somit muss jeder Rohdatensatz nur einmal eingelesen werden und kann dann den jeweiligen Auswertungen zugänglich gemacht werden.

Neben der Ein- Ausgabeverwaltung und dem Aufruf der Auswertung wird in diesem Modul auch die Fehler- und Ausnahmebehandlung verarbeitet, sodass unvollständige oder beschädigte Datensätze nicht zu Abstürzen oder Ausfällen führen. Im Fehlerfalle wird die verursachende Eingangsdatei übersprungen und für spätere Analyse markiert sowie eine Diagnosemeldung in der Statusdatei abgelegt. Für eine schnelle Statuskontrolle wird eine fortlaufende Bildschirmausgabe generiert (Bild 57).

In aller Regel ist die Bearbeitungszeit der Datensätze mit maximal 3 Minuten deutlich kürzer als das 10-Minuten-Intervall, in dem aktualisierte Daten zur Verfügung gestellt werden.

Sollte es in Ausnahmefällen zu Verzögerungen oder Unterbrechungen kommen, kann das Programm diesen Rückstand durch das sequenzielle Abarbeiten aller im Verzeichnis befindlicher Dateien wieder aufholen. Da die Auswertung in derselben Reihenfolge wie der Anfall der Daten stattfindet, ist hierbei sichergestellt, dass die Aggregation der Historien-daten korrekt vorgenommen wird.

Die Bearbeitung der Daten folgt dem in Bild 58 dargestellten Schema.

b) Eingabemodul „Read7Zip“

Um die automatisierte Auswertung zu beschleunigen, wird der Datensatz direkt in komprimierter (*.7z-Format) Form eingelesen.

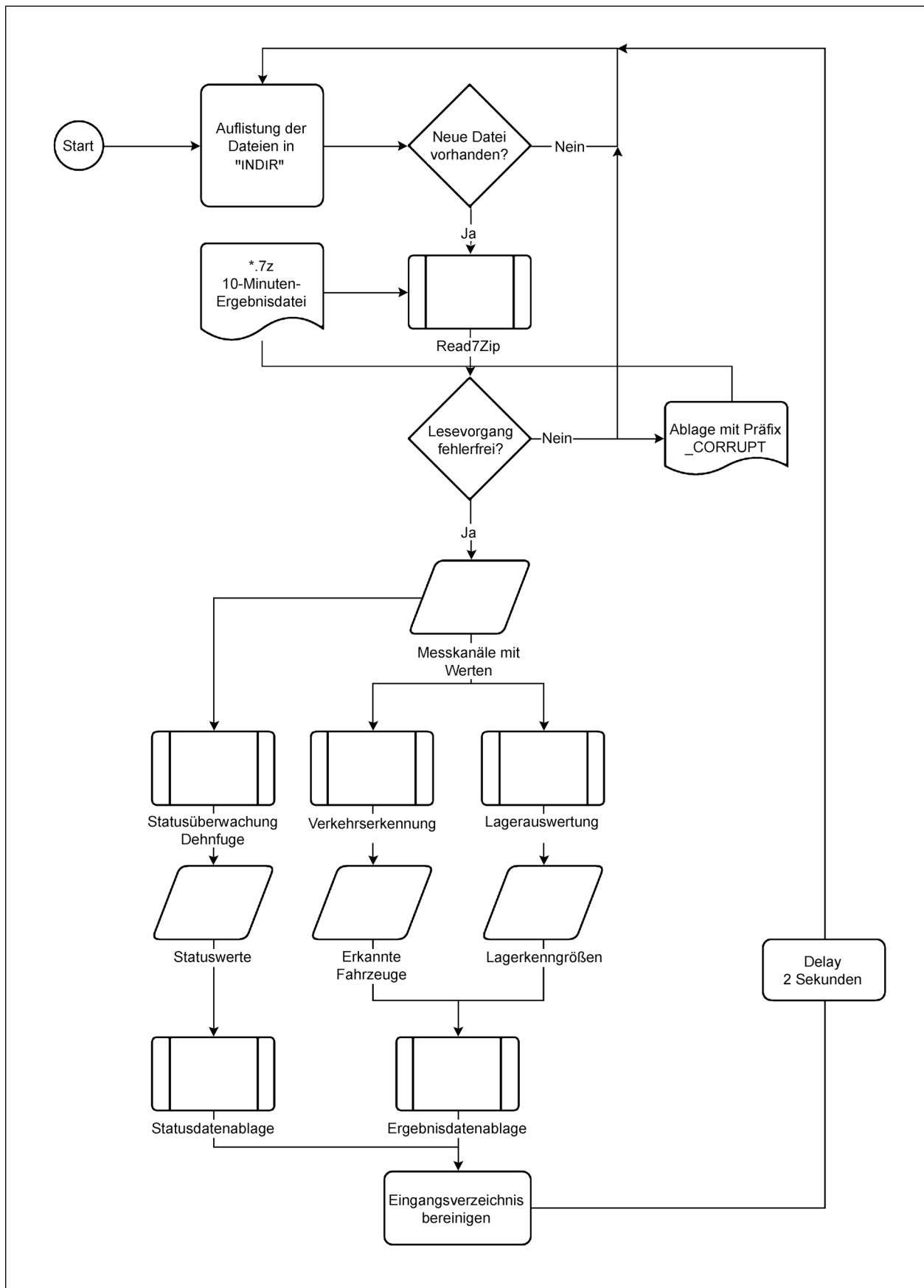


Bild 58: Ablaufdiagramm „Main“-Modul

Die Daten werden in die entsprechenden Kanäle aufgeteilt und übergeben. Kommt es zu einem Lesefehler, wird eine entsprechende Meldung generiert und an das „Main“-Modul übergeben, wonach die Datei mit dem entsprechenden Datensatz mit dem Präfix „CORRUPT“ markiert und für spätere Diagnose auf der lokalen Festplatte in einem separaten Verzeichnis abgelegt wird.

c) Verkehrserfassung an der Dehnfuge „eval_joint_data“

Dieses Modul wird für jede Fahrspur separat aufgerufen, durch Parallelisierung der Aufrufe konnte sich die Ausführungsgeschwindigkeit deutlich steigern lassen.

Nach der Korrektur der statischen Kanaloffsets wird noch die Dynamikkompensation nach Kapitel 4.4.2 auf die Kraft-Zeit-Verläufe der Messwerte angewendet.

Die anschließende Auswertung der fugenspezifischen Größen (Achsen- und Fahrzeugerkennung und Klassifizierung), erfolgt nach demselben Schema wie in Kapitel 5.2 beschrieben.

Unterhalb von 10 m/s Fahrgeschwindigkeit ist jedoch die Fahrzeugerkennung nicht mehr zuverlässig durchführbar, da die Fahrzeugabstände in der gleichen Größenordnung wie die erwarteten Achsabstände liegen würden. In diesem Fall wird in den sogenannten „Staumodus“ umgeschaltet, in welchem nur noch einzelne Achsdaten ohne die Gruppierung zu Fahrzeugen zurückgegeben werden.

d) Zustandsüberwachung der Dehnfuge „eval_joint_health“

Für die Analyse des Zustandes von Messsystem und Dehnfuge wird für jeden Sensor der Maximal-, Minimal- und Mittelwert eines zehnminütigen Messintervalls zurückgegeben. Darüber hinaus wird für jeden Sensor die dominante Eigenfrequenz im Leistungsdichtespektrum bestimmt, da eine deutliche Verschiebung dieser auf mögliche Veränderungen im Zustand der Dehnfuge hindeuten könnten.

Bild 59 zeigt ein solches Beispiel-Spektrum, in dem für die Mehrzahl der Sensoren die Lamellen-Eigenfrequenz von ca. 100 Hz als dominante Eigenfrequenz erkennbar ist.

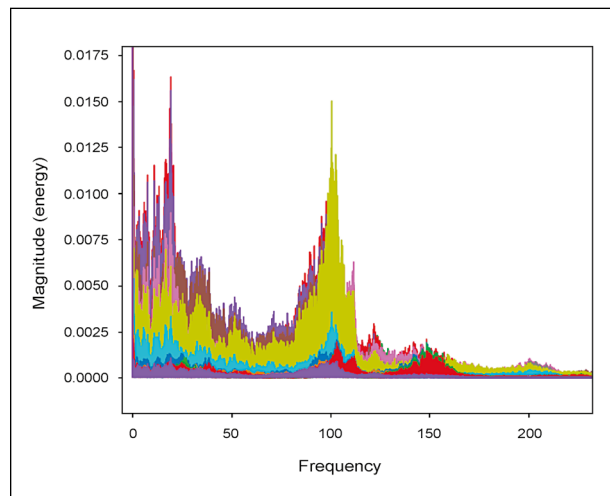


Bild 59: Beispielhaftes Leistungsdichtespektrum aller Kraftsensoren

Darüber hinaus wird für jedes 10-Minuten-Intervall die Gesamtpaltweite der beiden Fugenabschnitte dargestellt. Diese Ausgabe kann auch zur Langzeitauswertung der akkumulierten Fugenbewegung herangezogen werden.

Der Vergleich mit üblichen bzw. sinnvollen Werten erlaubt eine Aussage, ob das Messsystem zuverlässige Werte liefert, bzw. ob die Fuge technisch in fehlerfreiem Zustand ist. Falls Grenzwerte über- oder unterschritten werden, wird über das Ausgabemodul eine Emailbenachrichtigung an MAURER versendet.

e) Ausgabemodule „write_result“

Nach der Auswertung jedes einzelnen Intervalls werden die Ergebnisse in tabellarischer Form (*.csv-Format) in einem definierten Ausgabeverzeichnis abgelegt. Zusätzlich werden die kumulierten Verkehrsdaten pro Tag in einer eigenen Datei abgelegt. Die Struktur der Daten wurde so gewählt, dass sowohl eine Aufnahme in die zentrale Ergebnisdatenbank als auch eine manuelle Auswertung möglichst einfach stattfinden kann.

Ebenso werden im Bedarfsfalle die im Programmablauf auftretenden Fehlermeldungen in eine fortlaufende Protokolldatei abgespeichert. Warnmeldungen aus dem Betrieb werden per Email verschickt.

Beispielhaft zeigen Tabelle 3 bis Tabelle 6, wie die Ergebnisse und Protokolldateien abgelegt werden.

# Sensorbez.	Max. Wert	Mitt. Wert	Min. Wert	dom. Eigenfreq.	Status
K01	8,136494637	-0,015108067	-3,90364337	97,65625	OK
K02	10,37387848	0,013078701	-4,459126949	19,53125	OK
...
K22	15,51106739	0,074823194	-8,395957947	97,65625	OK
K23	16,49697685	0,268250774	-4,646047115	97,65625	OK
Spur rechts	0,255446304	0,255274004	0,255072052	0	OK
Spur links	0,252475697	0,252276273	0,252211827	0	OK
# Zeitstempel: 2018-04-10 00:00:54					

Tab. 3: Beispielausgabe Statusmeldung

# Lfd. Nr.	Zeit relativ	Zeit NTP	Fahrzeug-klasse	Anzahl Achsen	Gesamtgewicht	Geschwindigkeit	Spur
1	5.580	1527842755.840	0	5	18.8	88.8	1
2	7.470	1527842757.730	4	4	11.0	81.4	1
3	8.994	1527842759.254	1	2	1.8	86.2	1
...
216	592.035	1527843342.295	1	1	1.0	122.9	2
# Zeitstempel: 2018-06-01 10:45:50							

Tab. 4: Beispielausgabe 10-Minuten-Auswertung

# Spur	Fahrzeug-klasse	Anzahl	min. Gewicht	max. Gewicht	mittl. Gewicht	min. Geschwindigkeit	max. Geschwindigkeit	mittl. Geschwindigkeit
1	0	1.605	39.595	731.558	240.529	19.783	31.323	25.835
1	1	10.272	1.425	38.454	15.747	14.292	41.578	28.134
1	2	480	9.416	76.818	39.185	14.117	34.481	24.873
1	3	349	38.542	303.795	88.419	18.527	24.390	22.865
1	4	2.489	77.242	483.751	254.275	15.117	24.420	22.826
1	5	1.018	38.591	431.911	161.151	24.421	39.605	26.208
2	0	202	43.344	539.697	245.868	21.420	34.548	26.059
2	1	9.340	0.717	38.240	14.907	10.774	44.128	32.281
2	2	177	10.988	75.516	39.181	13.715	40.172	25.104
2	3	11	39.246	310.582	90.796	20.285	24.267	22.969
2	4	129	77.683	480.826	206.364	17.265	24.417	22.276
2	5	162	38.892	398.233	145.379	24.437	43.505	27.340
# letzter erfasster Datensatz: 2018-06-01 10:45:40								

Tab. 5: Beispielausgabe Tagesauswertung

# Zeit relativ	Zeit NTP	Achslast	Geschwindigkeit
351,943	1546893510	0,4	33,6
419,201	1546893577	0,3	34,1
421,237	1546893579	0,6	33,6
437,474	1546893596	0,4	31
458,443	1546893617	0,9	30,2
458,557	1546893617	0,9	33,1
540,046	1546893698	0,5	34,1
571,576	1546893730	0,7	31,8
# Zeitstempel: 2019-01-07 21:32:38			

Tab. 6: Beispielausgabe Stauachsen

5.3.3 Zusätzliche Module

Die Auswertung der im Rahmen des Teilprojektes FE 15.0632 (Heft B 160 der BAST-Schriftenreihe) erfassten Lagergrößen wurde in die Software integriert. Hierbei wurde darauf geachtet, dass möglichst viele Funktionen, insbesondere im Bereich der Signalaufbereitung, von allen Teilauswertungen gemeinsam genutzt werden können.

5.4 Dauerhafte Ergebnisdatenablage, Datenbankbindung

Zur dauerhaften Ergebnisdatenablage wurde eine Anbindung an die vom Institut für Telematik der Universität zu Lübeck (UzL) betriebene Server-Datenbank geschaffen. Die dort abgelegten Daten können zusammen mit den Ergebnissen der Projektpartner zentral auf einer Web-Plattform dargestellt werden.

Bis auf Weiteres wird die tabellarische Datenablage weiter betrieben, um gegebenenfalls einen direkten Vergleich mit den Projektbeginn gemessenen Werten herstellen zu können.

5.4.1 Ablagekonzept

In Rücksprache mit der UzL werden die Ergebnisdaten vor der Ablage möglichst weit vorsortiert und die statistischen Auswertungen bereits in der Auswertesoftware vorgenommen. Tages- und monatsweise Aggregationen (z. B. Mittelwertbildungen) werden also noch in der Auswertesoftware vorgenommen und nicht bei der Anfrage durch die Webdarstellung. Hiervon wird erwartet, dass die Antwortzeiten möglichst kurz bleiben können, da im Moment der Abfrage keine zusätzlichen Berech-

nungen oder Sortiervorgänge mehr erforderlich sind.

Um die Aggregation vorzunehmen, wurde ein lokaler Zwischenspeicher auf der Festplatte des Auswerterechners eingerichtet, aus dem die Ergebnisse in den entsprechenden Zeitabständen auf die Datenbank übertragen werden.

Neben der Aggregation erfolgt auch eine Sortierung, wodurch ähnlich strukturierte Daten dieselben (und damit einfach aufgebauten) Tabellenvorlagen nutzen können. Beispielsweise wird die Liste der erkannten Fahrzeuge nach Fahrzeugklassen sortiert. Auch diese Vorsortierung dient der Vereinfachung der Ergebnisdarstellung. In Bild 60 ist die gesamte Verzeichnishierarchie dargestellt.

Als Index aller Datensätze wird für die gesamte Datenbank der jeweilige Zeitstempel im UNIX-Timestamp-Format (vergangene Millisekunden seit 1.1.1970) verwendet.

5.4.2 Tabellenschablonen

Durch die Wiederverwendung ähnlich strukturierter Datenbanktabellenschablonen können alle Ergebnisdaten in drei einzelnen Tabellentypen abgelegt werden. Bild 60 zeigt, wie die Tabellentypen den jeweiligen Ablagepfaden zugeordnet sind.

Im Einzelnen sind folgende Tabellentypen definiert:

a. Üko_Verkehr_kontinuierlich

Diese Tabelle wird für die kontinuierliche Auflistung der erkannten Fahrzeuge benutzt. Ebenso werden die erkannten Einzelachsen, in dieser Struktur abgebildet.

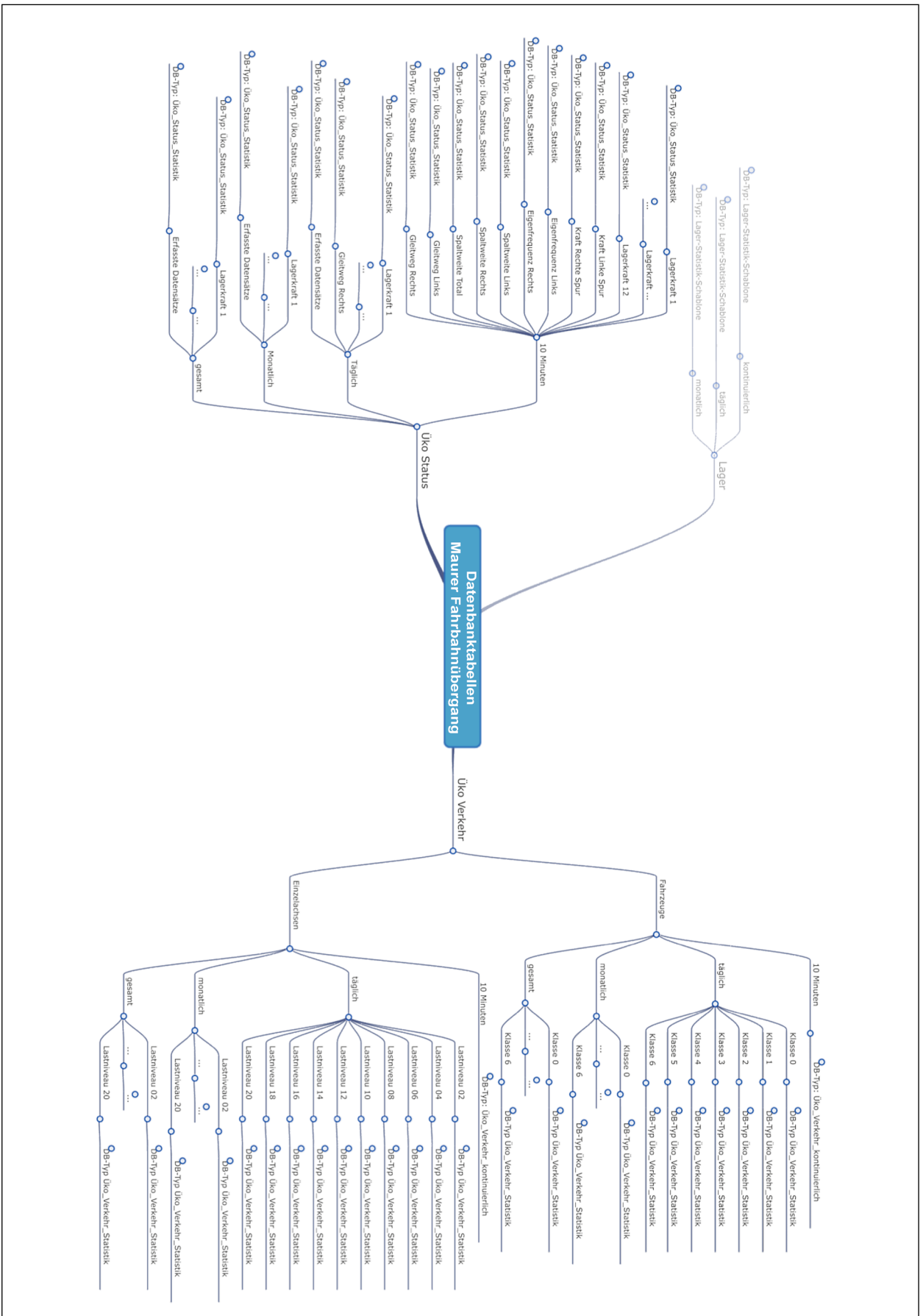


Bild 60: Hierarchische Struktur der Datenablage in der Ergebnisdatenbank

Tabellenspalte	t_NTP	klasse	n_ax	wt	v	lane
Datentyp	INT64	INT64	INT64	FLOAT64	FLOAT64	INT64
Bedeutung im Kontext „Fahrzeuge“	Zeitstempel (ms)	Fahrzeugklasse (0 bis 6)	Anzahl der Achsen im Fahrzeug	Gesamtgewicht in t	Geschwindigkeit in km/h	Fahrspur (1: rechts, 2: links)
Bedeutung im Kontext „Achsen“	Zeitstempel (ms)	Keine Bedeutung (immer 0)	Keine Bedeutung (immer 0)	Achslast in kN	Geschwindigkeit in km/h	Fahrspur (1: rechts, 2: links)

Üko_Verkehr_kontinuierlich

Tabellenspalte	t_NTP	anz	f_max	f_min	f_med	v_max	v_min	v_med
Datentyp	INT64	INT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64
Bedeutung im Kontext „Fahrzeuge“	Zeitstempel (ms)	Anzahl der Fahrzeuge	Maximalgewicht in t	Minimalgewicht in t	Mittleres Gewicht in t	Maximalgeschwindigkeit in km/h	Minimalgeschwindigkeit in km/h	Mittlere Geschwindigkeit in km/h
Bedeutung im Kontext „Achsen“	Zeitstempel (ms)	Anzahl der Einzelachsen	Maximallast in kN	Minimallast in kN	Mittlere Last in kN	Maximalgeschwindigkeit in km/h	Minimalgeschwindigkeit in km/h	Mittlere Geschwindigkeit in km/h

Üko_Verkehr_Statistik

Tabellenspalte	t_NTP	max	min	mean	total
Datentyp	INT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64	FLOAT64
Bedeutung	Zeitstempel (ms)	Maximalwert des Kanals im Zeitintervall	Minimalwert des Kanals im Zeitintervall	Minimalwert des Kanals im Zeitintervall	Sonstige Zahlenwerte (z. B. kumulierte Summe)

Üko_Status

b. Üko_Verkehr_Statistik

Diese Tabellenstruktur dient der Ablage der aggregierten Daten aus der Verkehrserfassung, sortiert nach Lastniveau (bei Einzelachsen) bzw. Fahrzeugklassen sowie Erfassungsintervall (für tages- bzw. monatsweise Erfassung wird der Zeitstempel jeweils auf den Anfang des jeweiligen Intervalls gerundet).

c. Üko_Status

In dieser Tabelle werden die aggregierten Werte der einzelnen Komponenten bzw. sonstiger Statusmerkmale der Übergangskonstruktion abgelegt. Neben den Lasteinwirkungen auf die Gleitlager sind dies z. B. die mittleren Eigenfrequenzen, Spaltweiten sowie der akkumulierte Gleitweg.

Grenzwerte für die Statuswerte zur Zustandsüberwachung sind direkt in der Datenbank hinterlegt, sodass Über- oder Unterschreitungen sichtbar gemacht werden können.

5.4.3 Implementierung des Ablagevorganges

Zur Ablage der Daten in der Datenbank wurde ein erweitertes Ausgabemodul in die in Kapitel 5.3.2 beschriebene Software eingefügt. In diesem Modul wird nicht nur die eigentliche Datenablage gesteuert, sondern auch die Aggregation der Monats- und Tagesdaten. Der Programmablauf ist in Bild 61 schematisch dargestellt.

Zusätzlich ist ein lokaler Pufferspeicher eingerichtet, der im Falle eines vorübergehenden Verbindungsproblems mit der Datenbank einen Datenverlust verhindert.

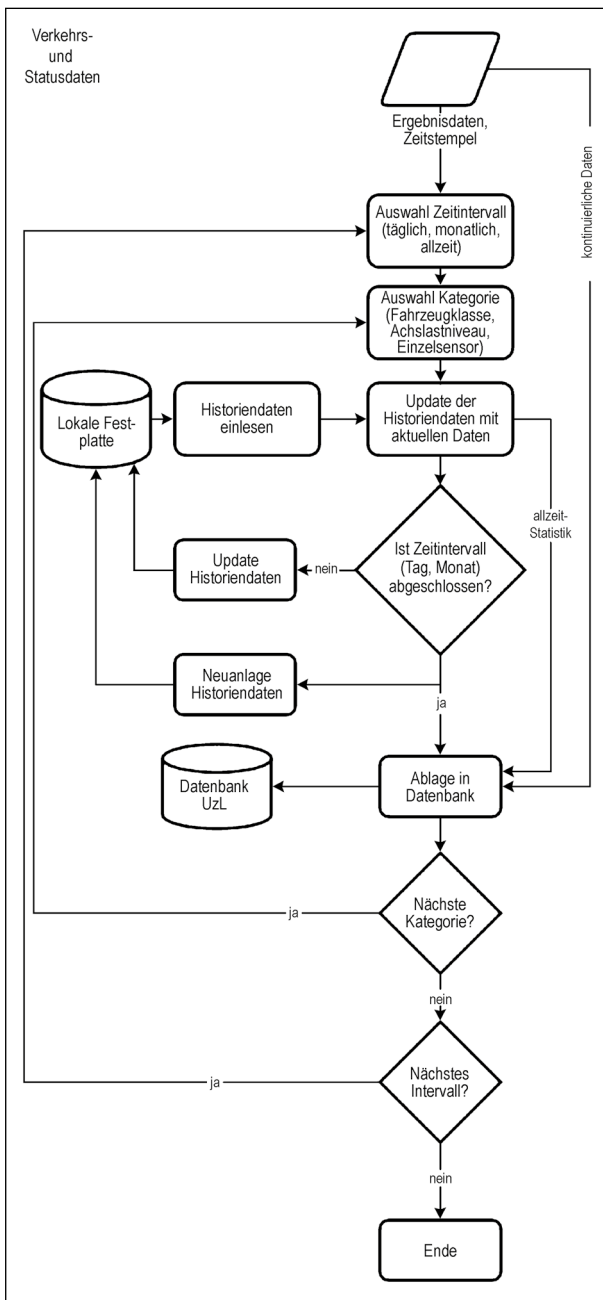


Bild 61: Ablaufdiagramm der Historiendatenverwaltung und Datenbankausgabe

6 Beobachtungen aus dem Betrieb des Messsystems

Im Zeitraum seit Inbetriebnahme der vollautomatisierten Messung konnten verschiedene Ergebnisse gewonnen werden. Zur Analyse, ob bestimmte Phänomene durch Umwelteinflüsse bedingt sind, werden Daten der von UzL betriebenen Wetterstation an der Brücke herangezogen. Durch wiederkehrende Ausfälle beider Systeme ist ein Vergleich nur in eingeschränkten Zeiträumen möglich (Bild 62).

6.1 Verkehrsanalyse

6.1.1 Verkehrszusammensetzung

Im betrachteten Erfassungszeitraum April 2018 bis Juni 2020 wurden 6.187.885 Fahrzeuge bestimmt. Diese teilen sich auf die einzelnen Fahrzeugklassen (vgl. Tabelle 2) auf.

Da in der linken Teilabbildung von Bild 63 der Pkw-Bereich stark dominiert, wurde im rechten Diagramm der Schwerverkehrsbereich isoliert.

In einer Stichprobenauswertung von 1,8 Mio. Fahrzeugen unter Anwendung der Dynamikkompensation zeigt sich im Schwerverkehr (Klassen 3 und 4) die in Bild 64 gezeigten Verteilungen der Fahrzeuggewichte. Bei Klasse 3 fällt auf, dass die meisten Fahrzeuge dieser Kategorie entweder Klein-Lkw (oder überladene Kleintransporter) mit ca. 4 bis 5 Tonnen Gesamtgewicht sind.

In Klasse 4 zeigen sich zwei ausgeprägte Gipfel der Lastverteilung bei jeweils ca. 20 und 36 Tonnen, welche leere und beladene Fahrzeuge repräsentieren dürften.

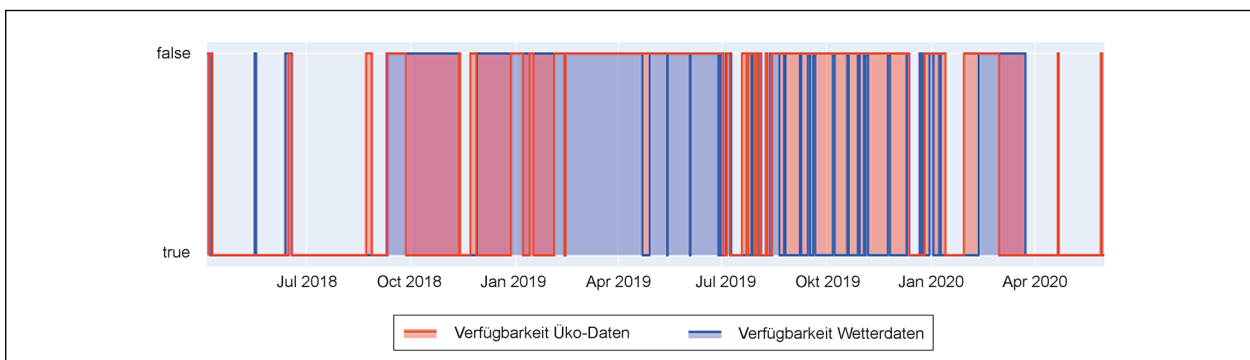


Bild 62: Verfügbarkeit von Vergleichsdaten (ausgefüllte Fläche kennzeichnet Nichtverfügbarkeit)

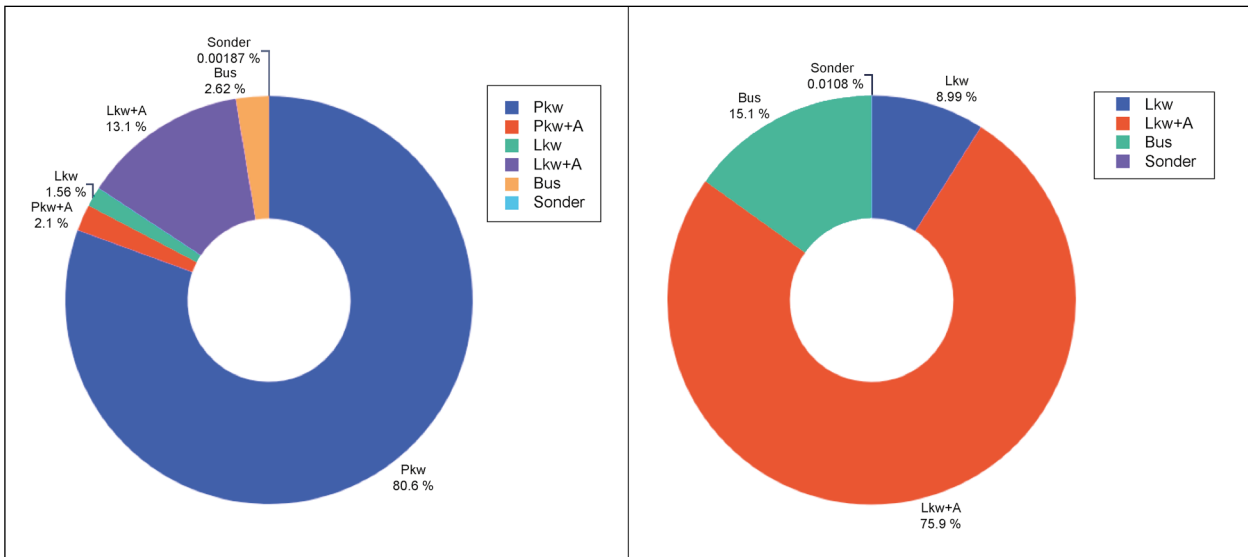


Bild 63: Aufteilung der Fahrzeuge nach Klassen

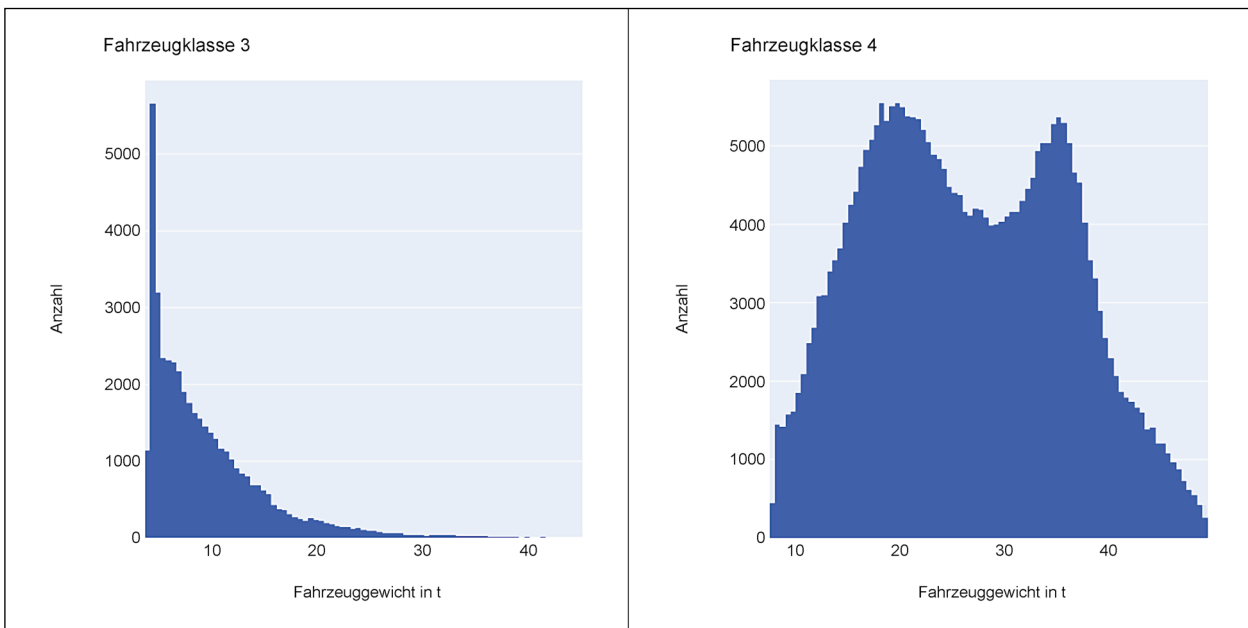


Bild 64: Gewichtsverteilung der Lkw

6.1.2 Geschwindigkeitsprofil

Zur Beurteilung des Verkehrsflusses und der Erkennung von Stausituationen kann die Geschwindigkeit der einzelnen erfassten Achsen ausgewertet werden. Unterhalb von 30 km/h kann die Zuordnung der Einzelachsen zu Fahrzeugen nicht mehr zuverlässig durchgeführt werden, stattdessen können jedoch die Geschwindigkeitswerte der Achsen auch ohne Zuordnung herangezogen werden.

Es zeigt sich in Bild 65, dass der Verkehr überwiegend flüssig ist und nur selten Stausituationen auftreten.

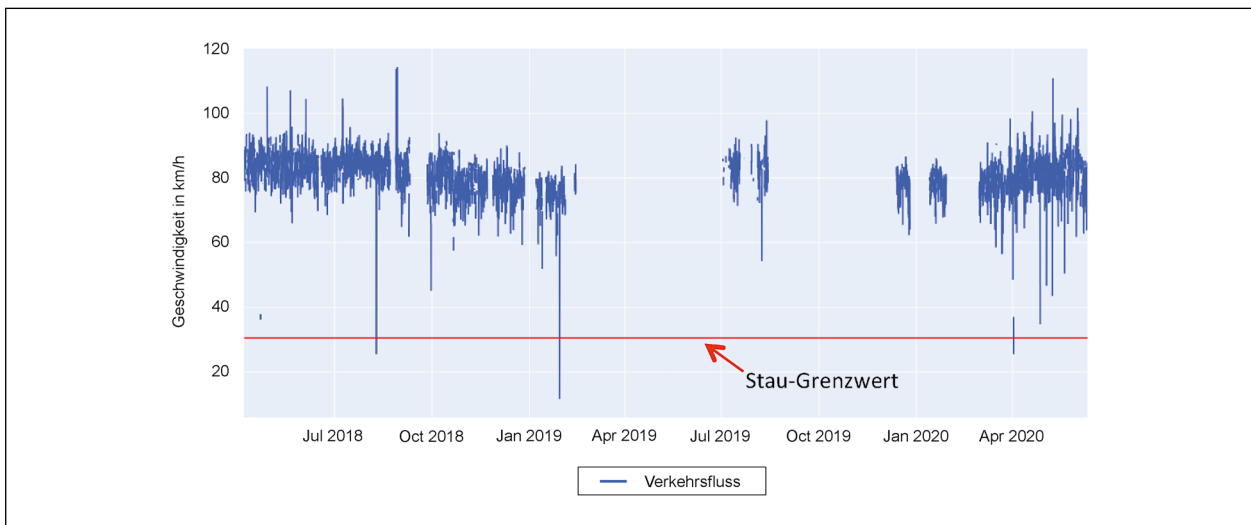


Bild 65: Verkehrsflussanalyse anhand der stündlichen Mittelwerte der Geschwindigkeit

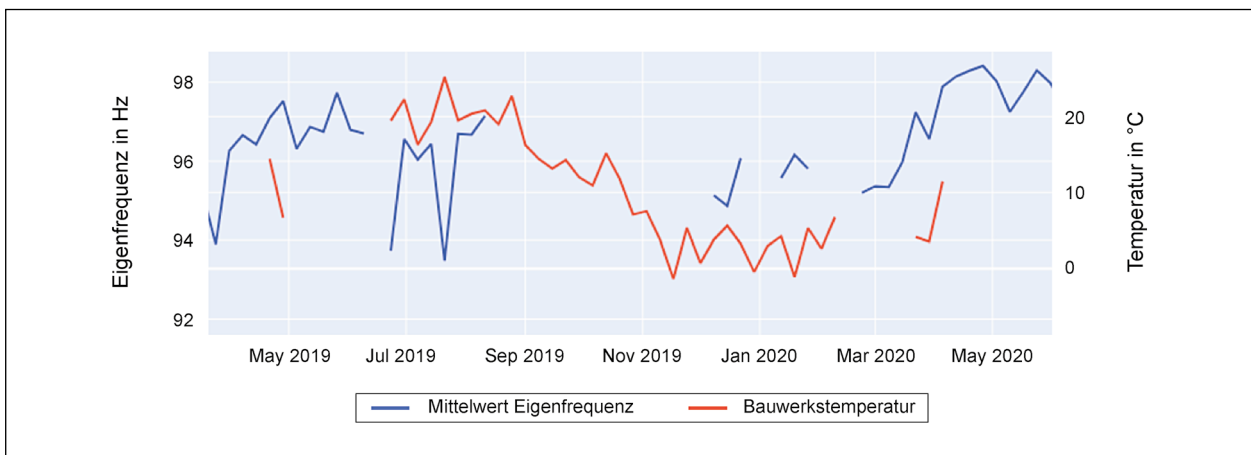


Bild 66: Entwicklung der mittleren Eigenfrequenz

6.2 Zustandsrelevante Größen, Vergleich mit Bemessung

Um zu beurteilen, ob der Fahrbahnübergang im Rahmen der Auslegungsrahmenbedingungen funktioniert, lassen sich verschiedene Kriterien heranziehen.

An der Fuge sind von Interesse:

- d. Eigenfrequenz,
- e. Spaltweite,
- f. Maximal- bzw. Minimalkraft an den Lagerstellen,
- g. Einzelachslasten.

6.2.1 Eigenfrequenzen der Fuge

Ein Indikator für die „Gesundheit“ der Fuge ist die Konstanz der aus den Kraftsignalen bestimmten vorherrschenden Eigenfrequenz. Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, liegt die dominante Eigenfrequenz des Fahrbahnüberganges nahe bei 100 Hz. Starke Abweichungen hiervon können z. B. auf Vorspannkraftverluste in den Lagerungselementen hindeuten. Zur Beurteilung der zeitlichen Entwicklung können nur die Daten ab März 2019 herangezogen werden, da die Mittelwertberechnung ab diesem Zeitpunkt zur besseren Elimination der Anregungsfrequenzen (ca. 20 Hz) umgestellt wurde.

Bild 66 zeigt den Verlauf der Eigenfrequenz, gemittelt über einen Zeitraum von sieben Tagen, um Anregungseffekte (wochentagsabhängige Verkehrsbelastung) zu eliminieren. Zusätzlich ist der Verlauf der Bauwerkstemperatur dargestellt. Trotz der ge-

ringen zeitlichen Überschneidung der Datensätze lässt sich eine leichte Temperaturabhängigkeit der Eigenfrequenz vermuten. Dies dürfte zum großen Teil auf die temperaturbedingt unterschiedliche Spaltweite zurückzuführen sein.

6.2.2 Spaltweiten der Dehnfuge

Als weiteres Merkmal des Fugenzustandes wird stets die Spaltweite gemessen. Die Gesamtspaltweite muss konstruktionsbedingt zwischen 290 und 550 mm liegen, die der beiden Spuren zwischen 190 und 320 mm.

Wie in Bild 67 und Bild 68 deutlich wird, folgt die Fugenstellung erwartungsgemäß der Entwicklung der Bauwerkstemperatur (und qualitativ fast exakt der Bewegung der Kalottenmesslager, siehe Ergebnisse des Teilprojektes FE 15.0632/2016/LRB, Heft B 160 der BAST-Schriftenreihe). An allen Messstellen zeigt sich, dass die Bewegungskapazität nicht ausgeschöpft wird, ggf. wären also noch ausreichende Sicherheitsreserven verfügbar.

Längerfristige Effekte, wie z. B. Schwindeffekte des Bauwerks, sind aufgrund der eingeschränkten Datenbasis bislang nicht zu erkennen.

6.2.3 Maximal- und Minimalwerte der Lagerkraft

Die Lager und Federn, welche die Traversen am Fugenrand abstützen und führen, sind gemäß statischer Auslegung auf eine (dynamische) Vorspannung von 35 kN bei einer maximal ertragbaren Belastung von 140 kN festgelegt. Überschreiten der Maximallast kann zu Schäden, Unterschreiten der Vorspannkraft kann zu Klaffen der Gleitpaarung führen.

Wie in Bild 69 und Bild 70 deutlich erkennbar ist, wurden im gesamten Messzeitraum die zulässigen Grenzen nicht erreicht. Bei den Tagesmaxima ist kein saisonaler Trend erkennbar, bei den Minima dagegen zeichnet sich eine geringere Amplitude in den kälteren Monaten gegenüber den wärmeren Monaten ab. Dies kann durch das temperatur-

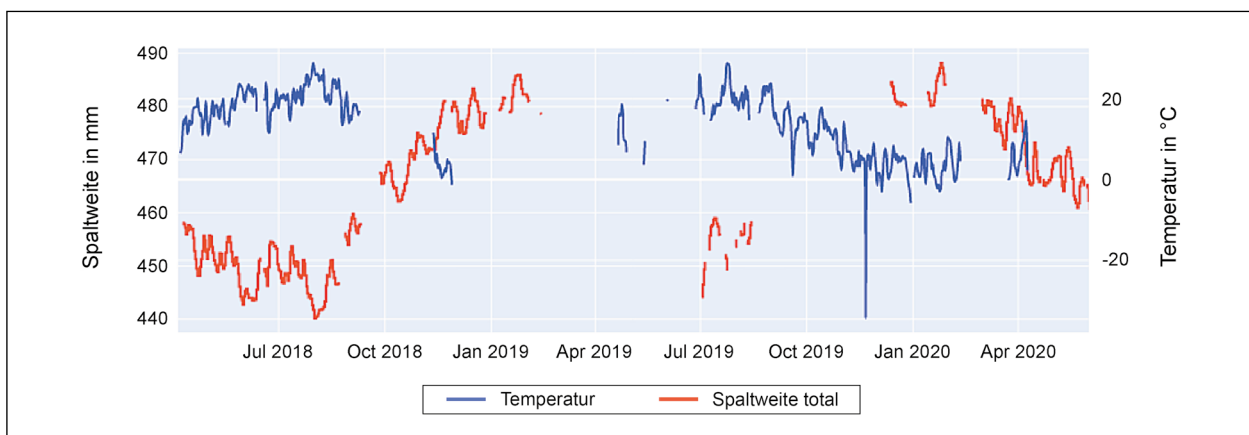


Bild 67: Entwicklung der Gesamtspaltweite verglichen mit der Bauwerkstemperatur

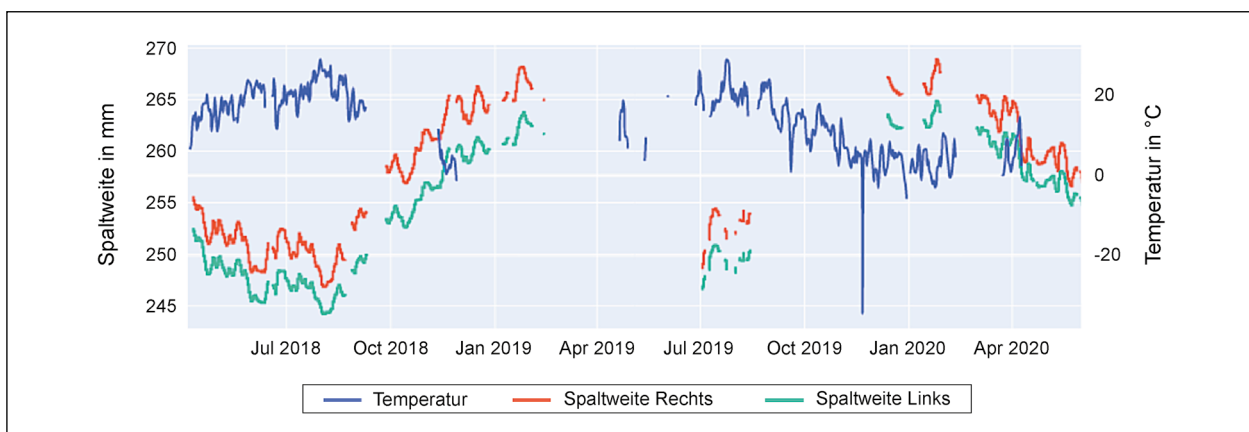


Bild 68: Entwicklung der Einzelspaltweiten verglichen mit der Bauwerkstemperatur

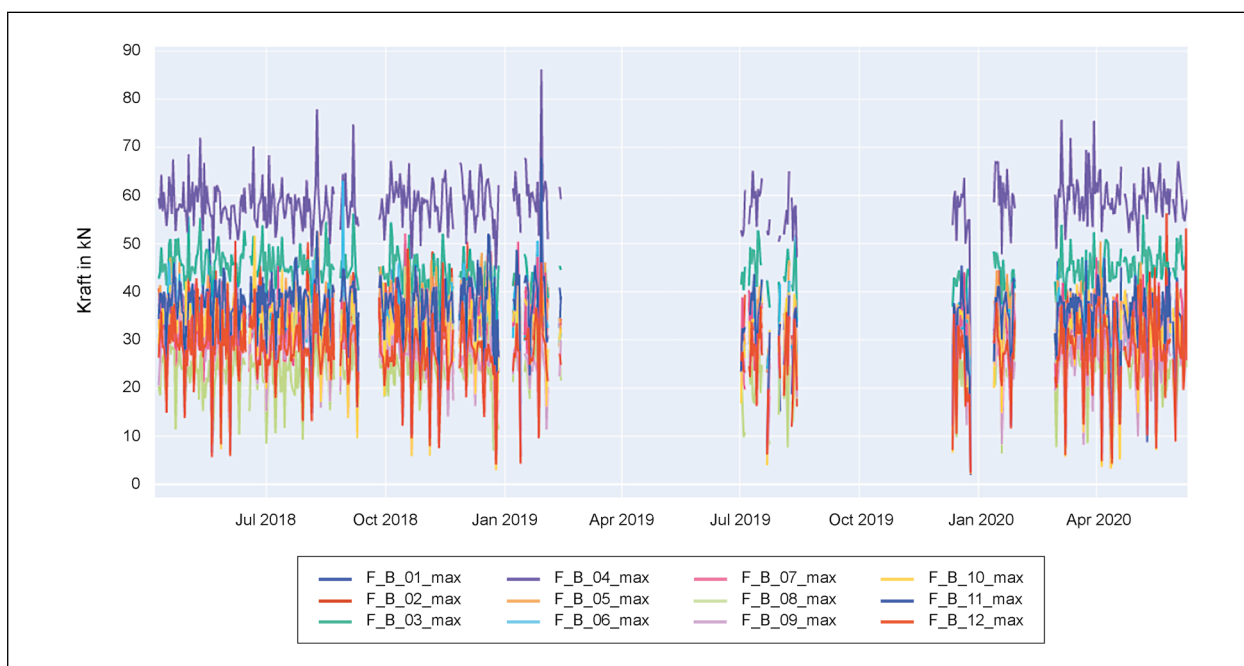


Bild 69: Tagesmaxima der einzelnen Lagerkräfte

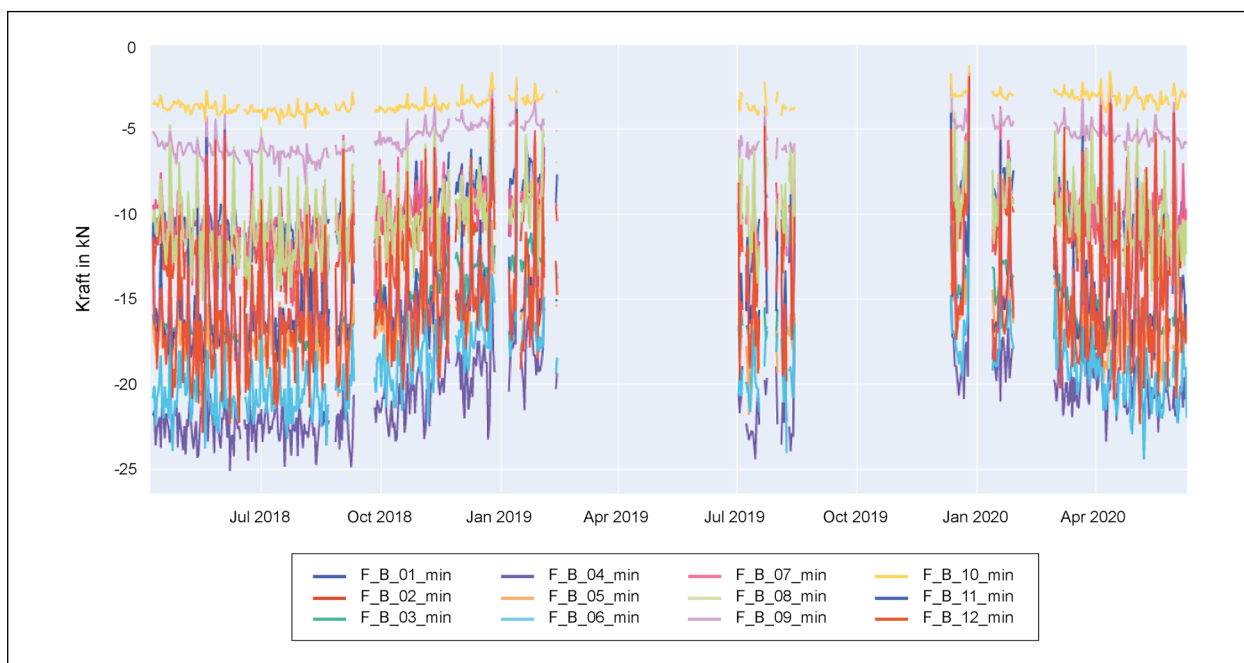


Bild 70: Tagesminima der einzelnen Lagerkräfte

bedingt unterschiedliche Steifigkeitsverhalten der Elastomerfedern erklärt werden und stellt keine Beeinträchtigung dar.

Außerdem ist erwartungsgemäß erkennbar, dass Lager in der Fahrbahnmittle größere Kraftamplituden zeigen als die am Fahrbahnrand gelegenen.

Eine Betrachtung der Mittelwerte der Lagerkräfte ist nicht erkenntnisreich, da durch das piezoelektri-

sche Messverfahren bei jeder Messung der Bezugswert genullt wird.

6.2.4 Maximale Achslasten

Der Fahrbahnübergang ist dauerhaft ausgelegt bei Annahme einer maximalen Einzelachslast von 210 kN (FLMEJ1 nach ETAG 032). Höhere Achslasten würden zu Schädigungen führen, nach [4] wä-

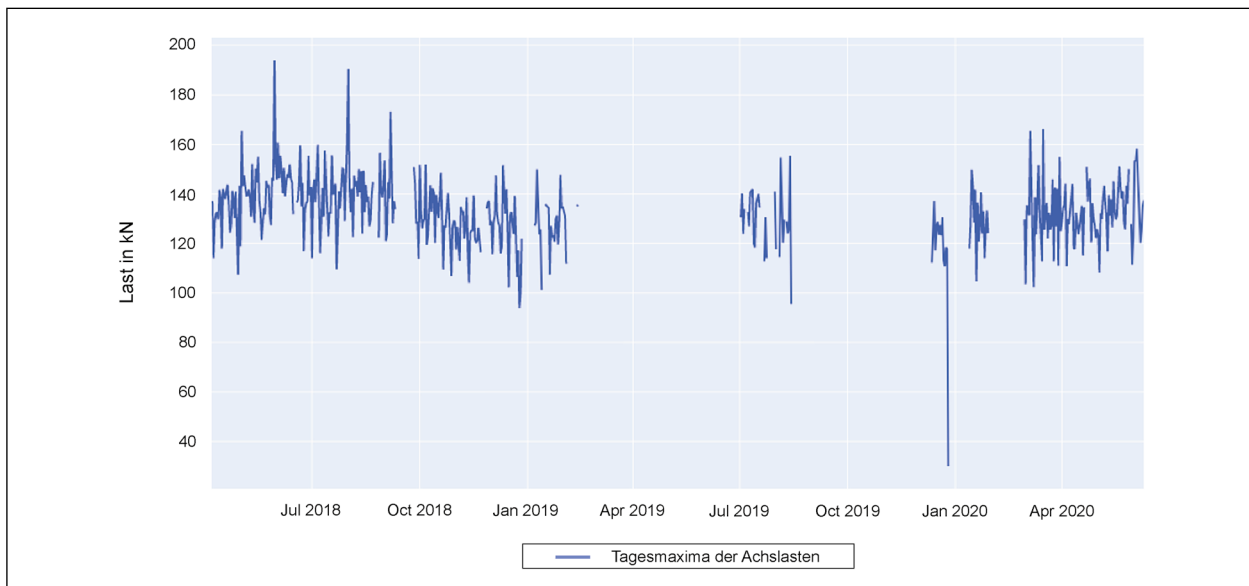


Bild 71: Verlauf der erfassten Einzelachslasten

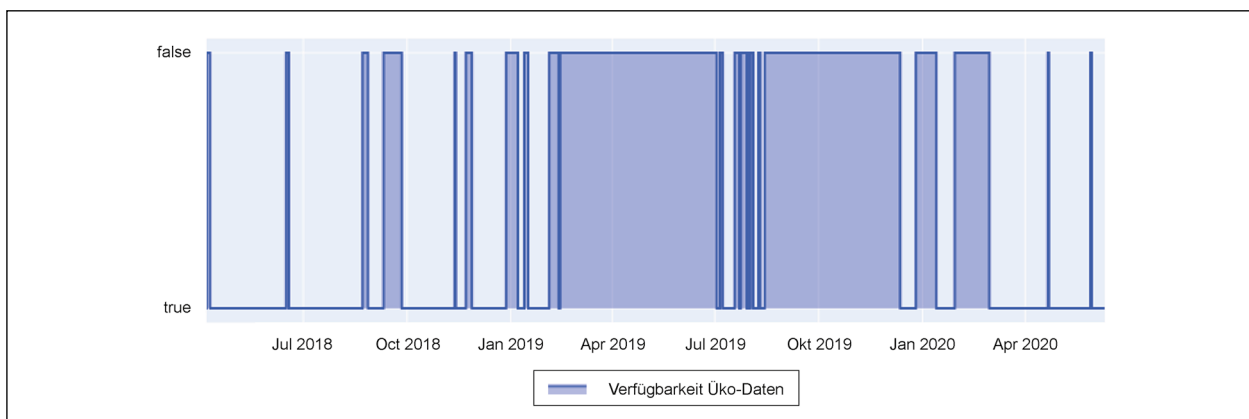


Bild 72: Verfügbarkeit Maurer-Messsystem (ausgefüllter Bereich zeigt Nichtverfügbarkeit)

ren jedoch selbst im Falle einer Überschreitung ca. 104 Lastwechsel im Sinne der Kurzzeitfestigkeit ertragbar.

Mit gemessenen Spitzenachslasten von stets unterhalb von 200 kN (Bild 71) ist erkennbar, dass die Belastung auslegungskonform ist und somit die Annahme der Dauerfestigkeit aufrechterhalten werden kann.

6.3 Zuverlässigkeit der Auswertung

6.3.1 Verfügbarkeit des Mess- und Auswertesystems

Wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, liegt ein zentraler Fokus der Auswertesoftware auf Fehlertoleranz und Resilienz. Eine Analyse der Ergebnisdateien im Betriebszeitraum von April 2018 bis Juni 2020 ergab

die in Bild 72 gezeigte Ausfallstatistik (nur Ausfälle > 24 Stunden dargestellt):

Insbesondere im Jahr 2019 sind langfristige Ausfälle erkennbar. Diese sind in der ersten Jahreshälfte auf Verbindungsabbrüche durch Netzwerküberlastung zurückzuführen. Nach der Änderung der Datenübertragung von Ethernet auf Firewire wurde ein werkseitiger Defekt am Messrechner (nach Aussage des Herstellers war eine kalte Lötstelle Ursache des Defektes) offenbar, dessen Diagnose und Behebung fast den gesamten Rest des Jahres in Anspruch nahm.

Nach der Wiederinbetriebnahme im Januar 2020 kam es noch einmal zu einem Ausfall des Auswerterechners, durch ein aufgrund von Wartungsarbeiten am Netzwerk der intelligenten Brücke unvollständiges Windows-Systemupdate.

Die weiteren Ausfälle sind überwiegend auf ein ebenfalls vom Hersteller des Messrechners bestätigtes Softwareproblem des Messrechners zurückzuführen. Wird der Rechner längere Zeit ohne Display betrieben, kommt es zu einem Speicherüberlauf im Displaymanager der verwendeten Windows 8 Embedded – Version. Da bislang keine zufriedenstellende Lösung für das Problem existiert wird durch automatisierte Neustarts regelmäßig der Arbeitsspeicher geleert.

Die kürzeren Ausfälle ab Ende Februar 2020 sind dadurch bedingt, dass die Initialisierung der Messung nach einem automatisierten Neustart nicht immer gelingt, daher ist ggf. eine manuelle Reinitialisierung nötig. Seit Juni 2020 wird daher regelmäßig ein Shellskript ausgeführt, welches im Falle ausbleibender Mess- oder Ergebnisdaten eine Emailbenachrichtigung versendet.

Insgesamt lässt sich im betrachteten Zeitraum ein Erfassungsgrad von insgesamt ca. 50 % bestimmen. Durch die im Lauf von 2019 durchgeführten Änderungen und Reparaturen wird jedoch für die Zukunft eine deutlich bessere Zuverlässigkeit erwartet.

Die Sensoren selbst sowie die Messverstärker arbeiten seit Beginn des Projektes im Jahr 2018 unterbrechungs- und fehlerfrei.

Gelegentlich kommt es nach einem automatisierten Neustart des Messrechners zu unplausiblen Werten in den Sensordaten. Dies ist jedoch ausschließlich

durch die Datenerfassung bedingt und wird in der automatisierten Verarbeitung automatisch aussortiert.

6.3.2 Qualität der Messdaten in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen

Nach [3] ist die durchschnittliche Achslast der Lkw-Vorderachsen sehr konstant und eignet sich daher als Indikator für die Einwirkung von Umwelteinflüssen oder Alterungserscheinungen im Messsystem.

Betrachtet man die Monatsmittelwerte der Vorderachslasten von Fahrzeugen der Kategorie 4 (Lkw mit Anhänger), so zeigt sich eine Schwankung von ca. 5 % über den Jahresverlauf (Bild 73).

Die Maximalwerte liegen in den Frühlings- und Sommermonaten, die Minimalwerte in den Herbst- und Wintermonaten. Die Daten zwischen Februar und Mai 2020 sind möglicherweise nicht repräsentativ, da aufgrund der COVID-19 Maßnahmen auch die Verkehrszusammensetzung untypisch sein kann.

Bei Betrachtung des Zeitraumes im Jahr 2018, in dem sowohl Temperaturdaten als auch Verkehrsdaten vorliegen, lässt sich jedoch kein eindeutiger Zusammenhang formulieren (Bild 74). Hier wurde die Darstellung der Wochenmittelwerte gewählt, um wochentagsabhängige Schwankungen zu eliminieren.

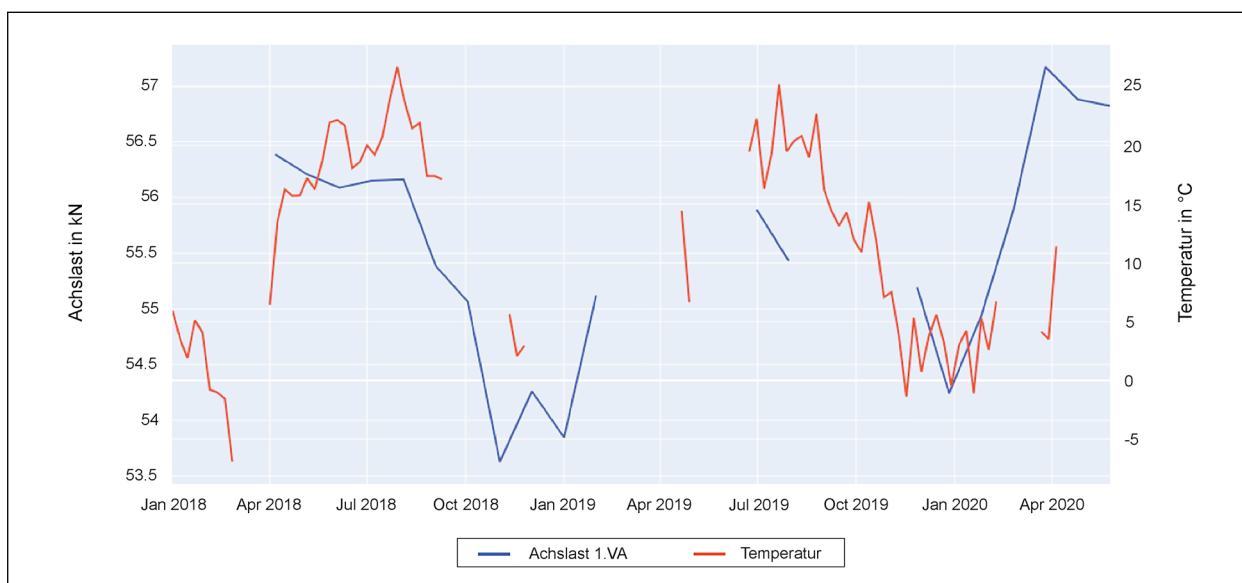


Bild 73: Monatsmittelwerte der Vorderachslasten in Fahrzeugkategorie 4 und Umgebungstemperatur

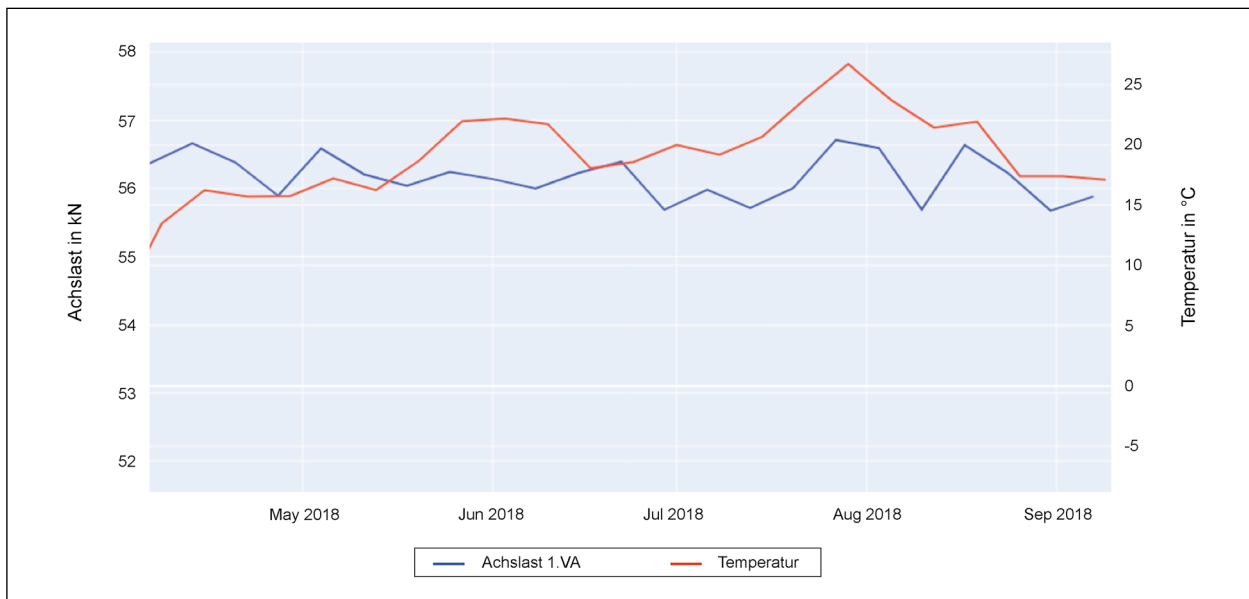


Bild 74: Wochenmittelwerte der Vorderachslasten in Kategorie 4 und Temperaturverlauf

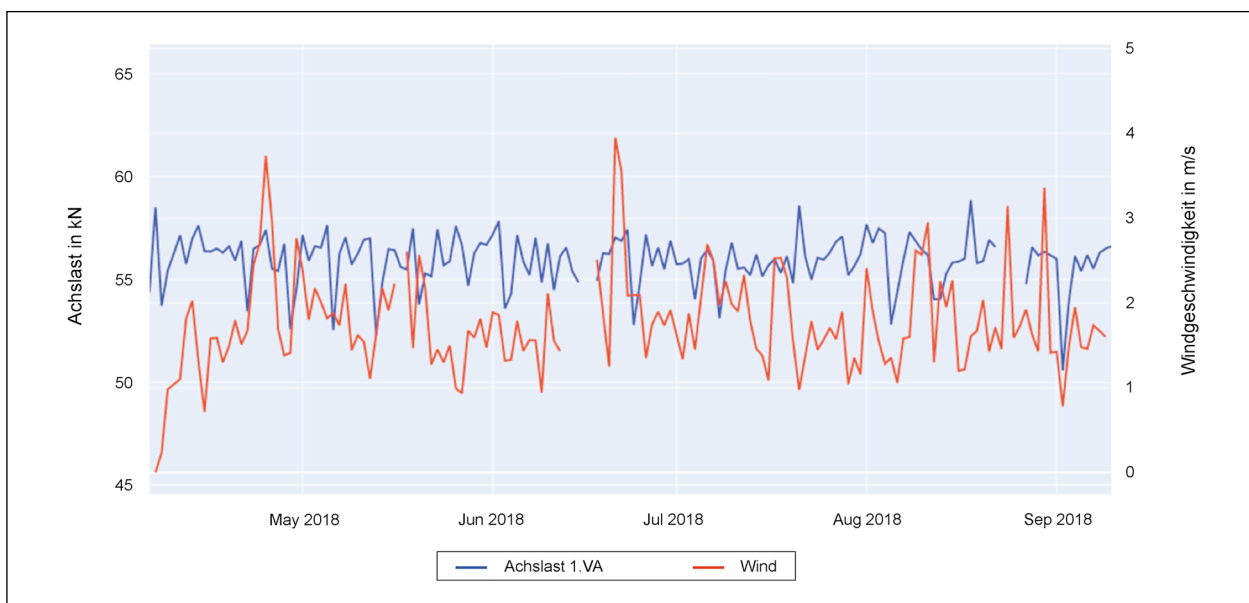


Bild 75: Tagesmittelwerte der Achslasten in Kategorie 4 und Windgeschwindigkeit

Eine weitere Einflussgröße, die die Messergebnisse der Achslastmessung potenziell verfälschen könnte, ist die Windeinwirkung. Um der kurzzeitigen Natur der Windereignisse Rechnung zu tragen, wurden in Bild 75 die Tagesmittelwerte der Achslasten und Windgeschwindigkeiten gegenübergestellt.

Auch hier lässt sich kein kausaler Zusammenhang zwischen den gemessenen Achslasten und der Windeinwirkung feststellen.

Denkbar ist auch, dass die Neigung der ankommenden Fahrbahn, gemessen als Rotation der Brückenlager in Achse 40, einen Einfluss auf die ge-

messenen Achslasten haben kann. Bild 76 legt für einen Zeitraum, in dem für beide Größen längerfristig durchgehende Messdaten vorliegen, einen Zusammenhang nahe. Allerdings ist es hier schwierig, Ursache und Wirkung zu trennen, da höhere Verkehrslasten auch zu einer stärkeren Durchbiegung der Brücke und damit zu einer stärkeren Rotation der Lager führen.

Zusammengefasst liegt in jedem Fall die Vermutung nahe, dass zumindest die Temperatur (welche direkten Einfluss auf die Spaltweite und Elastizität der Elastomerbauteile in der Übergangskonstruktivi-

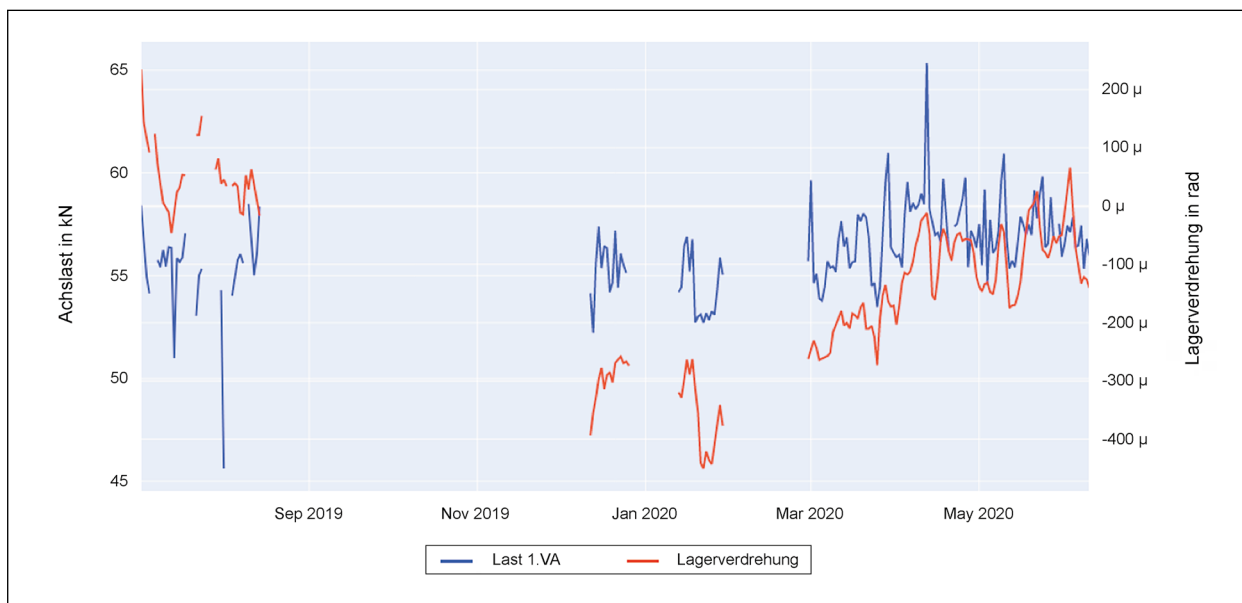


Bild 76: Tagesmittelwerte der Vorderachslasten und Lagerrotation an Achse 40

on hat) in signifikantem Maße Schwankungen im Messergebnis verursacht. Mit einer breiteren Basis an korrelierbaren Daten könnten sich diese Schwankungen in Zukunft quantifizieren und ggf. korrigieren lassen.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des vorliegenden Projektes konnte erfolgreich das Projektziel erreicht werden, anhand eines instrumentierten Fahrbahnüberganges Verkehrslasten vollautomatisiert zu erfassen, auszuwerten und dauerhaft zu speichern. Zusätzlich verfügt das Mess- und Auswertesystem über umfassende Fähigkeiten zur Selbstdiagnose und Erkennung/Behebung von auftretenden Fehlern.

Die Sensorausstattung der instrumentierten Fuge hat sich als sehr robust, zuverlässig und bislang frei von erkennbaren Verschleiß- und Alterungserscheinungen erwiesen.

Auch die Sonderkonstruktion des Fahrbahnüberganges vom Typ MAURER Schwenktraverse zeigt sich zuverlässig und robust.

Für zukünftige Anwendungen besteht Entwicklungspotenzial nicht nur in der Verfeinerung der Erkennungs- und Auswerteprozeduren, sondern auch in der Vereinfachung des Messaufbaus. So dürfte es in vielen Fällen z. B. ausreichen, nur die Lkw-

Fahrspur zu instrumentieren. Auch könnte das Messprinzip auf andere Fugentypen (z. B. MAURER Trägerrostfuge) übertragen werden bzw. der Aufbau einer instrumentierten Fuge näher an Standardkonstruktionen herangeführt werden (z. B. durch Verzicht auf die mechanische Trennung der Fahrsuren).

Literatur

- [1] TREIB, C.: Schwingungsverhalten einer Schwenktraversendehnfuge, Masterarbeit, TU München, 2017
- [2] Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS), Ausgabe 2012, Bundesanstalt für Straßenwesen
- [3] THOMPSON, G. et al.: WIM Sensor Performance and Stability Across Time Periods And Variations in Temperature, ICWIM 2019
- [4] <http://www.peil-ing.com/ingenieure/ermuedg/schaedigsprognose/ermuedgs-festigk-kurven>
- [5] JACOB, B. (editor): COST 323 "Weigh-in-Motion of Road Vehicles" Final Report, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris 2002

Bilder

- Bild 1: Rauten zur Geräuschminderung und Trennung der Fahrspuren
- Bild 2: Aufriss der Fuge mit Sensorpositionen
- Bild 3: Position der Messlager nach [1]
- Bild 4: Statische und dynamische Achslasten aus initialen Überfahrten
- Bild 5: Vergleich der dynamischen Effekte in der Simulation mit verschiedenen Asphaltüberhöhungen
- Bild 6: Lkw für Referenzfahrten (oben: Mercedes Arocs; unten: MAN TGX)
- Bild 7: Ladungsverteilung (Lkw 1 im Hintergrund, Lkw 2 im Vordergrund)
- Bild 8: Achsabstände und -lasten der Messfahrzeuge
- Bild 9: Bestimmung der Überfahrposition und Geschwindigkeit mittels Videoaufzeichnung
- Bild 10: Beschleunigungssensoren auf der rechten Vorderachse
- Bild 11: Lkw für die zweiten Referenzfahrten (links: Volvo FH 540 (Lkw 1); rechts: DAF XF 530 (Lkw 2))
- Bild 12: Beladungsverteilung der Lkw (links: Lkw 1; rechts: Lkw 2)
- Bild 13: Abmessungen und Achslasten der Versuchs-Lkw 2020
- Bild 14: Beispielpfad einer Überfahrt (Quelle: OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA)
- Bild 15: Geschwindigkeiten und Zeiten der Überfahrten nach GPS-Daten
- Bild 16: Exemplarische Messwerte der Beschleunigungsmessung an der Vorderachse von Lkw 1
- Bild 17: Deutlich erkennbare Asphaltüberhöhung an der Fuge vor der Inbetriebnahme
- Bild 18: Beispielhafter Verlauf einer Messlinie
- Bild 19: Vergleich der Oberflächenprofile der Fuge und des angrenzenden Asphalts
- Bild 20: Spaltweite während der Messzeit 2018
- Bild 21: Spaltweite während der Messzeit 2020
- Bild 22: Quasistatische Überfahrt (5 km/h), Lkw1
- Bild 23: Quasistatische Überfahrt (5 km/h), Lkw 2
- Bild 24: Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit (30 km/h), Lkw 1
- Bild 25: Fahrt mit niedriger Geschwindigkeit (30 km/h), Lkw 2
- Bild 26: Fahrt mit mittlerer Geschwindigkeit (60 km/h), Lkw 1
- Bild 27: Fahrt mit mittlerer Geschwindigkeit (60 km/h), Lkw 2
- Bild 28: Fahrt mit hoher Geschwindigkeit (90 km/h), Lkw 1
- Bild 29: Fahrt mit hoher Geschwindigkeit (90 km/h), Lkw 2
- Bild 30: Parallelfahrten (links: niedrige Geschwindigkeit (30 km/h); rechts: mittlere Geschwindigkeit (60 km/h))
- Bild 31: Exemplarischer Verlauf der Beschleunigungssignale
- Bild 32: Methoden der Geschwindigkeitsbestimmung aus den Kraftsignalen
- Bild 33: Bezugslängen unterschiedlicher Geschwindigkeitsauswertungen
- Bild 34: Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung
- Bild 35: Gefilterte Kraftsignale an der Fuge
- Bild 36: Ergebnisse der Geschwindigkeitsauswertung mit modifizierten Parametern
- Bild 37: Ausschwingvorgang (Lkw 2, 90 km/h)
- Bild 38: Anregung durch benachbarte Überfahrt (Lkw 1, 90 km/h)
- Bild 39: Achslasten in Abhängigkeit der Überfahrtgeschwindigkeit
- Bild 40: Auflastwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit 2018
- Bild 41: Vergleich der gemessenen Größen bei den Messfahrten 2020

- Bild 42: Ebenes Fahrzeugmodell (beispielhafter Parametersatz)
- Bild 43: Mehrkörpermodell einer Fahrspur der Übergangskonstruktion
- Bild 44: Mehrkörpermodell des Sattelzuges
- Bild 45: Vergleichsergebnisse der Simulation mit den Kalibrierfahrten
- Bild 46: Elimination der Fugendynamik am Beispiel des dreiachsigen Lkw bei 90 km/h
- Bild 47: Elimination der Fugendynamik am Beispiel des Sattelzuges bei 90 km/h
- Bild 48: Differenzkurven statisch (5 km/h) und dynamisch (90 km/h) gemessene Achslasten
- Bild 49: Approximation der Differenzkurven durch exponentiell abfallende Sinuskurven
- Bild 50: Anwendung der Korrekturfunktion
- Bild 51: Verbesserte Auswertung der Fahrzeugparameter durch Elimination der Fugenschwingung
- Bild 52: Prozentuale Abweichungen in den Fahrzeuggewichten zwischen MAURER und IBF mit und ohne Dynamikkompensation
- Bild 53: Effekt der Filterung
- Bild 54: Beispielhafte Fahrzeugermittlung aus dem regellosen Verkehr
- Bild 55: Schema der teilautomatisierten Auswertung und Klassifizierung
- Bild 56: Industrie-PC im Schaltschrank
- Bild 57: Bildschirmausgabe der Auswertesoftware
- Bild 58: Ablaufdiagramm „Main“-Modul
- Bild 59: Beispielhaftes Leistungsdichtespektrum aller Kraftsensoren
- Bild 60: Hierarchische Struktur der Datenablage in der Ergebnisdatenbank
- Bild 61: Ablaufdiagramm der Historiendatenverwaltung und Datenbankausgabe
- Bild 62: Verfügbarkeit von Vergleichsdaten (ausgefüllte Fläche kennzeichnet Nichtverfügbarkeit)
- Bild 63: Aufteilung der Fahrzeuge nach Klassen
- Bild 64: Gewichtsverteilung der Lkw
- Bild 65: Verkehrsflussanalyse anhand der stündlichen Mittelwerte der Geschwindigkeit
- Bild 66: Entwicklung der mittleren Eigenfrequenz
- Bild 67: Entwicklung der Gesamtpaltweite verglichen mit der Bauwerkstemperatur
- Bild 68: Entwicklung der Einzelpaltweiten verglichen mit der Bauwerkstemperatur
- Bild 69: Tagesmaxima der einzelnen Lagerkräfte
- Bild 70: Tagesminima der einzelnen Lagerkräfte
- Bild 71: Verlauf der erfassten Einzelachslasten
- Bild 72: Verfügbarkeit Maurer-Messsystem (ausgefüllter Bereich zeigt Nichtverfügbarkeit)
- Bild 73: Monatsmittelwerte der Vorderachslasten in Fahrzeugkategorie 4 und Umgebungstemperatur
- Bild 74: Wochenmittelwerte der Vorderachslasten in Kategorie 4 und Temperaturverlauf
- Bild 75: Tagesmittelwerte der Achslasten in Kategorie 4 und Windgeschwindigkeit
- Bild 76: Tagesmittelwerte der Vorderachslasten und Lagerrotation an Achse 40

Tabellen

- Tab. 1: Sensoren im Fahrbahnübergang
- Tab. 2: Fahrzeugklassifizierung
- Tab. 3: Beispielausgabe Statusmeldung
- Tab. 4: Beispielausgabe 10-Minuten-Auswertung
- Tab. 5: Beispielausgabe Tagesauswertung
- Tab. 6: Beispielausgabe Stauachsen

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2016

B 123: **Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: **Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: **Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**
Mielecke, Kistner, Graubner, Knäuf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: **Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: **Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: **Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 131: **Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**
Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: **Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: **Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: **Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken**
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

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, Brenberger, 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, Dürrer, 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, Staeck
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

Lehardt, 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.

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.