

Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken

**Messtechnische Grundlage
zur Ermittlung realer
Beanspruchungen in situ**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 153

bast

Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken

Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

von

Christoph Recknagel
Stefan Spitzer
Johannes Hoppe
Norman Wenzel
Stephan Pirskawetz

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 153

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 08.0244
Optimierung von Fugenkonstruktionen –
Ermittlung realer Beanspruchungen des Fugensystems

Fachbetreuung
Alexandra Spilker

Referat
Betonbauweisen

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 0943-9323
ISBN 978-3-95606-590-3

Bergisch Gladbach, Juli 2021

Kurzfassung – Abstract

Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

In den letzten Jahren zeigte sich die Verfügbarkeit und reale Lebensdauer von Betonfahrbahndecken, insbesondere im BAB-Netz, im Vergleich zur designten Lebensdauer in zunehmendem Maße als unbefriedigend. Dies ist sicherlich auf die stetige Zunahme des Schwerverkehrs zurückzuführen, die eine höhere Belastung der Konstruktion nach sich zieht, nicht zuletzt aber auch auf die mangelnde Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Fugen- und Fugenfüllungssysteme zwischen benachbarten Betonfahrbahnplatten.

Fugenkonstruktionen und darin angeordnete Fugenfüllsysteme müssen dauerhaft flexibel, lagestabil und robust gegenüber den maßgebenden äußeren Einwirkungen und Beanspruchungen sein und den Fugenspalt vor dem Eindringen von Wasser, Verschmutzungen, Tausalzbeanspruchungen, Öl und sonstigen Substanzen schützen. Es ist nunmehr Stand der Erkenntnisse, dass mangelhafte Fugen-Performance und unzureichendes Gebrauchsverhalten sowie Dauerhaftigkeit von Fugenfüllsystemen direkt mit beeinträchtigter Fahrbahn-Performance und Lebensdauer des Beton-Fahrbahnbelages einhergehen. Geschädigte Betonautobahnen zeigen oftmals Anzeichen einer zuvor eingeschränkten bzw. mangelhaften Funktionalität und Dauerhaftigkeit der Fugenkonstruktion und Fugenfüllung. Eine wesentliche Ursache für diese Erscheinungsbilder sind in den veralteten Dimensionierungs- und Bemessungsregelungen sowie den zu erbringenden Eignungsnachweisen für Fugenkonstruktionen zu suchen. So beruhen die derzeitigen Konstruktions- und Validierungsgrundsätze auf Erkenntnissen, die auf den Wissenstand vergangener Jahrzehnte zurückzuführen sind. Sind spiegeln nicht in ausreichendem Maße den aktuellen Stand der Beton- und Straßenbautechnologie wider.

Um diese Wissenslücke zu überbrücken, müssen auf dem Weg zu dauerhaft leistungsfähigen Fugen und Fugenfüllsystemen zunächst die realen Einwirkungen im Bereich der Fugen von hoch beanspruchten Betonfahrbahndecken unter den aktuellen Straßenbaubedingungen und Nutzungsbedin-

gungen aufgeklärt werden. Neben klimatischen und straßentypischen Einwirkungen stellen insbesondere quasistatische saisonale und verkehrsinduzierte dynamische Fugenbewegungen wesentliche Beanspruchungen dar. Voraussetzung zur Aufklärung dieser Fugenbewegungen ist ein neues, innovatives und sensitives Sensorsystem, welches unter den Bedingungen der Autobahnpraxis schnell und sicher in entsprechend beanspruchte Bereiche installiert werden kann und in der Lage ist, stabile und hochaufgelöste Bewegungen in mehrere Raumrichtungen zu erfassen.

Das durch die BAM neu entwickelte Sensorsystem ist geeignet, um direkt in die Betonfahrbahndecke integriert zu werden und sowohl über saisonale Messbereiche als auch in hoher Auflösung entsprechende Messwerte online zu erfassen und bereit zu stellen. Das für diesen Zweck entwickelte innovative Sensorsystem kann direkt in die Rollspur auf beiden Seiten der Fuge eingebaut werden und ist dafür ausgelegt, Lkw-Überfahrungen zu widerstehen. Es ist schnell und präzise genug, um die realen Bewegungen in allen drei Raumachsen in Echtzeit erfassen zu können.

Die wesentlichen technischen Eigenschaften sind eine Messfrequenz von bis zu 2000 Hz, eine Auflösung von bis zu einem Mikrometer und eine widerstandsfähige Sensorumhausung, die der direkten Überrollung durch Lkw sowie allen chemischen und klimatischen Beanspruchungen in der Praxis standhalten kann. Dieser Forschungsbericht beschreibt das Funktions- und Wirkschema des Sensorsystems und seine Validierung im Labor- und Feldmaßstab. Die mit dem Sensorsystem gewonnenen Daten können eine Grundlage für die Konzeption einer performance-basierten Bewertung von Fugenfüllsystemen in Betondecken von Bundesautobahnen bieten. Sie sind geeignet, die Funktionsmechanismen der verschiedenen Betonfahrbahnkonstruktionen besser zu verstehen und zielgerichtet konstruktive und materialtechnische Optimierungen und Fortentwicklungen von Fugenkonstruktionen und Fugenfüllsystemen in gebrauchsbbezogener Weise zu entwickeln. Durch weitere Datenerhebung, -fusion und -analyse können Instandsetzungsintervalle und Lebensdauerzyklen besser abgeschätzt und geplant werden.

Improvement of joint systems in concrete pavements – metrological basis for the determination of real stresses in situ

In the last years, the performance and availability of concrete pavements, especially those in heavy-duty loaded freeways, is unsatisfying in relation to the designed lifetime cycles. Reason for that may be the permanent increase of traffic load, higher stresses in the concrete structure but also the deficient durability of the joint sealing systems linking adjacent slabs.

The joint sealing systems need to be durable flexible, water and dirttight and long-lasting position stable to enable safe and comfortable pavement performance and to prevent the concrete road construction from water, gravel, oil and other substances, that emerge on motorways. It is nowadays state of the art that reduced joint performance or earlier joint damage lead to reduced lifetime of concrete freeways respectively limiting its performance and serviceability. The joint designing rules and approval methods with regards to the evaluation of performance and durability were designed based on a databasis of the seventies, which does not reflect neither actual road paving technology nor concrete technology anymore.

To overcome the gap of knowledge the real loads in the joint region of concrete pavements have to be explored. Decisive load components are quasi-static seasonal and fast occurring traffic-induced movements of the joints. Pre-condition to explore these movements is a new innovative and sensitive sensor system able to be installed and to endure under the conditions of heavy-loaded concrete freeways.

Our new measurement system is able to be integrated in concrete freeways, rolled-over by heavy goods vehicles and is fast and precise enough to measure the displacements of two adjacent slabs in three movement dimensions in real-time. The main features are a test frequency of up to 2000 Hz, a resolution down to 1 μm , an accuracy of 20 μm and better and an enclosure that resists HGV, acid, base, salt, water and dirt. This report describes the new developed sensor system and its approval under laboratory and field conditions.

The upcoming data help to explore the real performance of the modern concrete pavements

under heavy loading and may be a basis for the development of new and longer-lasting joint systems and joint sealing materials for heavy-duty concrete freeways. Further data analysis may open up an improved forecasting of maintenance actions, scientific based lifetime cycle forecasts and will lead to longer lasting concrete freeways with improved performance features and availability.

Summary

Improvement of joint systems in concrete pavements – metrological basis for the determination of real stresses in situ

1 Introduction

In the past years, the durability of concrete pavements, especially in heavy-duty loaded freeways, is unsatisfying in relation to the designed lifetime cycles. Reason for that may be the permanent increase of traffic load, higher stresses in the concrete structure but also the deficient durability of the joint sealing systems linking adjacent slabs.

The joints between the concrete slabs need to be flexible, durable and prevent the construction from water, gravel, oil and other substances, that emerge on motorways. Most of the deteriorated concrete freeways showed signs of earlier joint damage limiting their serviceability. The joints were designed based on field measurements in the seventies, which did not provide precise enough data at an appropriate measuring frequency to capture the movements of the concrete slabs while being rolled-over by heavy goods vehicles (HGV). In addition, there was no such traffic like today and the traffic loads were not as high as today. Because of these facts, it is necessary to put more effort in research on this topic. An approach to capture the movements

of joints filled with sealing systems in concrete freeways is shown in Figure 1.

2 Development of an innovative sensor system

Our new measurement system can be integrated in concrete streets, rolled-over by HGVs and is fast and precise enough to measure the displacements of two adjacent slabs in all three dimensions in real-time. The main features are a test frequency of up to 2000 Hz, a resolution down to 1 μm and an enclosure that resists HGV, acid, base, salt, water and dirt for a service time of more than a year. Only an innovative combination of different high-class sensors, measurement techniques, heavy duty materials and newly developed data evaluation was able to meet all the requirements.

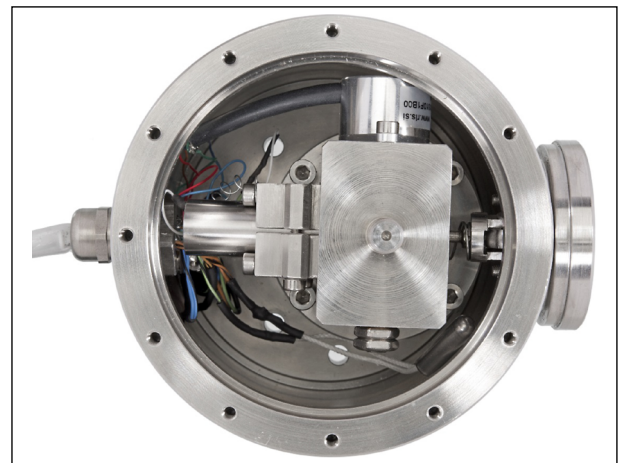


Fig. 2: The fragile inside of the sensor system, packed in an imperishable body made from V4a stainless steel

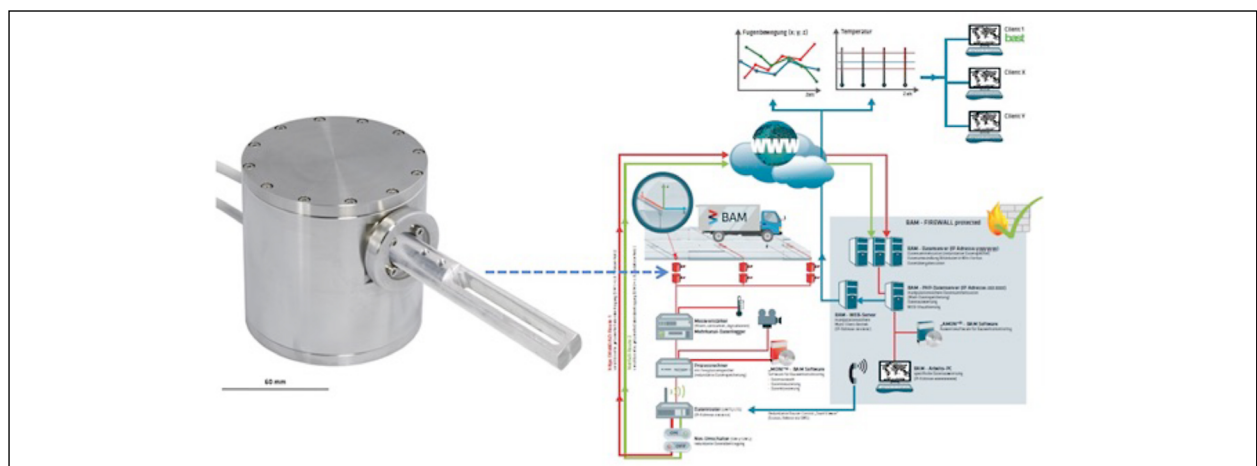


Fig. 1: Approach for a solution for the detection of three-dimensional movements in bitumen filled concrete freeway joints

3 Installation and load scenarios

In March 2018 four sensor systems were installed on a testing area near Cologne, the so-called duraBASt test field. The testing field itself was an exposed aggregate concrete freeway with slab dimensions of 5 m x 4.25 m x 0.23 m and an asphalt base layer.

Two sensor systems were installed half a year later in August 2018 on the same testing area but on another testing field with precast concrete members (2.5 m x 4.25 m x 0.24 m) and a macadam base layer.

The load scenarios are shown in table 1.

4 Results and discussion

The sensor systems are precise enough to measure fast and small motions from different kinds of load

scenarios and have a specified measuring range that can detect slow seasonal movements.

X = Measuring axis in the direction of travel

Y = Measuring axis in the direction of the joint construction

Z = Vertical measuring axis

4.1 Temperature-induced seasonal movements

Figure 3 shows the seasonal movements in the direction of travel and the temperature in the middle of one concrete slab in a depth of 135 mm. If the temperature rises the concrete slabs are pushed together and the joint construction is under pressure. If the temperature falls the concrete slabs pull the joint construction apart.

Exposed aggregate freeway			
Scenario	Weight [metric tons]	Quantity	Date
Pick-up truck, normal roll-over	1.5 and 2	5	23rd of March 2018
Truck, normal roll-over	7.3 and 12.1	12	12th of April 2018
Truck, emergency breaking	7.3 and 12.1	2	12th of April 2018
Falling Weight Deflectometry	5, 7.5 and 10	180	12th of April 2018
Truck, normal roll-over	6.8 and 12.7	18	10th of June 2018
Truck, emergency breaking	6.8 and 12.7	3	10th of June 2018
Long-term climatic exposure	None	-	23rd of March 2018 until 6th of May 2019
Precast concrete freeway			
Mobile load simulation	5	100.000	15th/16th of August 2018
Mobile load simulator, roll-over	20	1	16th of August 2018
Mobile load simulation	5	75.000	6th/7th of November 2018
Long-term climatic exposure and load cycles	5	100.000	14th of August 2018 until 7th of November 2018, still cast in-situ

Tab. 1: Load scenarios for the two instrumented testing fields on the duraBASt testing area east of Cologne inside the motorway junction between freeway A4 and A3

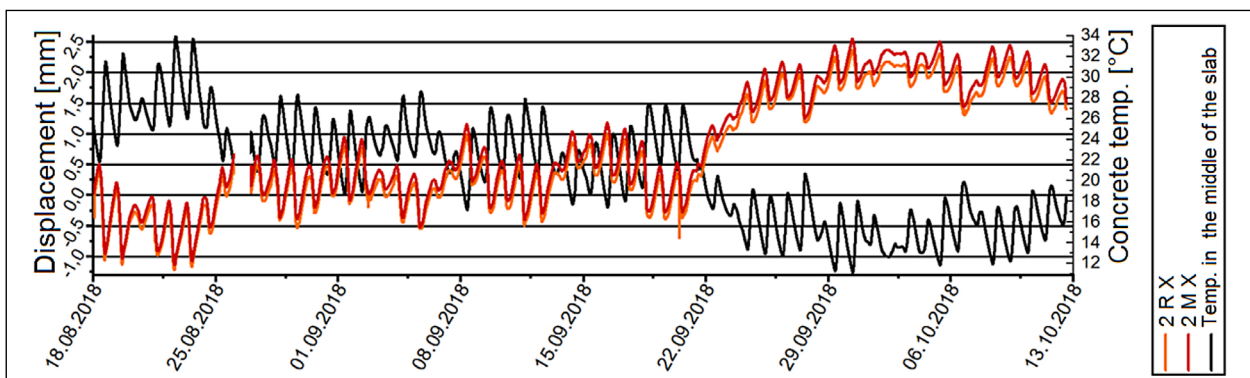


Fig. 3: Seasonal movements in the direction of travel from thermal induced elongation of the concrete slabs

This leads to the conclusion, that long-term movements in the dimension of millimeters are mostly caused by temperature changes.

4.2 Motions induced by trucks (vertical load: 20 metric tons)

Figure 4 shows the in all three measuring dimensions of two sensor systems on the same joint construction while being over-rolled by a truck.

The left graphic shows the motions of a sensor system being directly over-rolled by a truck. The sensor detects displacements in Z-direction up to 33 μm being over-rolled by the Front Axle of the truck with 7.3 t and 54 μm by the Rear Axle with 12.1 t (each peak-to-peak). The right graphic shows the same scenario, but the sensor system is placed in the middle of the joint construction, outside the tracks of the wheels. It shows lower deformations (Front Axle: 8 μm , Rear Axle: 36 μm). This leads to

the expected conclusion, that the highest stress of the joint construction is directly under the wheels.

4.3 Motions induced by a falling weight (vertical load: 10 metric tons)

The left side of Figure 5 describes the Falling Weight Deflectometer (FWD). It is an impact measuring process for different kinds of analysis of streets. Here it was used to measure the vertical motions (ZAxis) of adjacent concrete slabs to validate the developed sensor systems. On the right of Figure 5 one can see the congruency of both measuring methods, deviations are under 3 μm .

This leads to the conclusion, that the sensor system is fast, precise and accurate enough to detect even the smallest and fastest motions between adjacent concrete slabs.

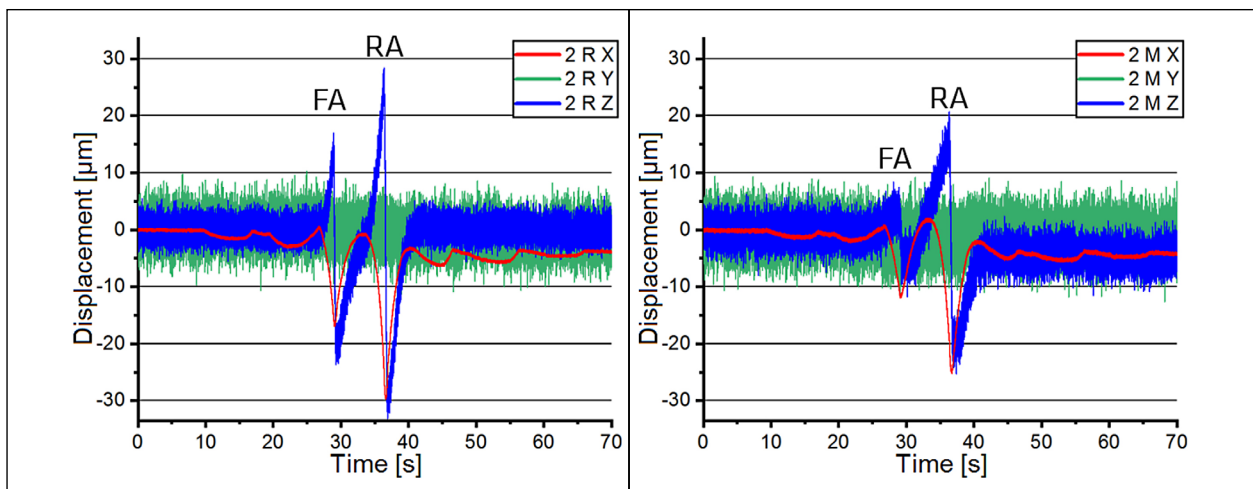


Fig. 4: Motions of adjacent concrete slabs while being over-rolled by a truck with the speed of 2 km/h; gross vehicle weight: 20 t; FA=Front Axle (7.3 t) RA=Rear Axle (12.1 t)

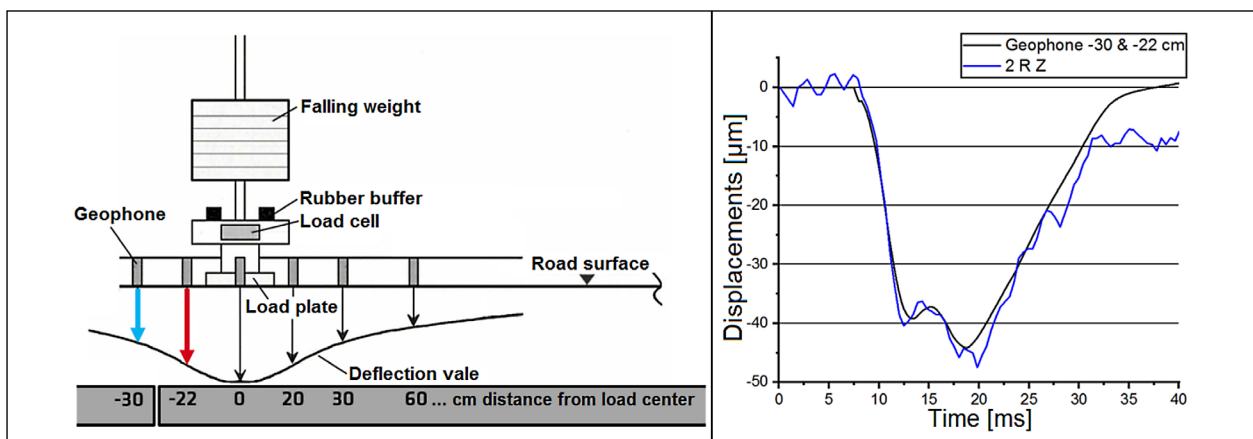


Fig. 5: Description of the falling weight deflectometry (FWD) and the response of the developed sensor system and the FWD system

5 Conclusion

With the innovative sensor system, it is for the first time possible to measure three-dimensional movements of adjacent slabs in real-time in a resolution down to one micrometer. The data was automatically saved on a computer in place and cryptographically secured sent to the BAM via internet. Further, the sensor system has resisted all the upcoming stress on different construction types of freeways such as rain, standing water, snow, temperatures up to 35 °C (95 °F), temperatures down to -5 °C (23 °F), and different load scenarios, being rolled-over by cars (1.700 kg / 3,750 lb), pick-ups (3,500 kg / 7,700 lb), trucks (20,000 kg / 44,000 lb) and a mobile load simulator with an axle weight of 20 metric tons (total: 40,000 kg / 88,000 lb).

Figure 6 shows the seasonal movements of two different joint constructions in the direction of travel (X-Axis). If the adjacent concrete slabs have a small notch, like the case for 1R, there is little movement. The sensor system 1 R detects movements of ± 0.4 mm. Concrete slabs with a big notch show seasonal movements of more than 7 mm. Joint constructions are designed to withstand deformations ≤ 30 % of their installation length. In the instrumented field, the joint constructions had an installation length of 10 mm, so the seasonal movements are a multiple of the limitations.

6 Outlook

The upcoming data provide a basis for the development of new and longer-lasting joint sealing materials and systems for concrete streets. Further data analysis can lead to a precise forecasting of maintenance actions that lead to longer lasting concrete freeways.

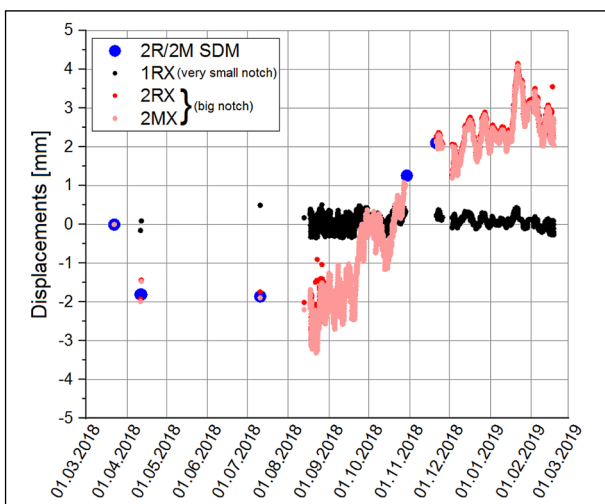


Fig. 6: Seasonal movements in the direction of travel over the period of one year with validating external measuring system (SDM)

Inhalt

1	Einleitung und Zielstellung	13	3.1.1	Extraktion geeigneter robuster Messprinzipien	29
1.1	Vorbemerkungen.....	13	3.1.2	Entwicklung eines elektro-mechanischen Lösungsansatzes	29
1.2	Arbeitsgegenstand	13	3.1.3	Entwicklung eines elektro-magnetischen Lösungsansatzes	30
1.3	Problemstellung	14	3.1.4	Entwicklung eines optischen Sensors.....	30
1.4	Stand der technischen Regelungen.....	14	3.1.5	Bereitstellung einer robusten Sensor-Umhausung	31
1.5	Lösungsmethodik.....	15	3.2	Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung einer Lösung zur Datenerfassung, -übertragung, -speicherung und -auswertung	31
1.6	Gesamtziel.....	16	3.2.1	Bereitstellung zeitaufgelöster Messprozeduren	32
2	Erarbeitung der Grundlagen und Kennzeichnung des State-of-the-Art	17	3.2.2	Bereitstellung redundanter Speicherlösungen	32
2.1	Fazit zum nationalen Literatur- und Wissensstand.....	18	3.2.3	Bereitstellung von Auswerte- und Darstellungsroutinen	32
2.2	Fazit zum europäischen Literaturstand.....	19	3.3	Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung einer geschlossenen Mess-Station	32
2.3	Fazit zum internationalen Literaturstand.....	19	3.3.1	Beschreibung des Schaltschranks.....	32
2.4	Charakterisierung maßgebender Einwirkungen und Randbedingungen	20	3.3.2	Konfektionierung eines Mess-Verteilers.....	34
2.4.1	Mechanische Beanspruchungen.....	20	3.3.3	Überprüfung der Funktionsfähigkeit der unterbrechungsfreien Spannungsversorgung	34
2.5	Zusammenfassung des State-of-the-Art	21	3.3.4	Erprobung der Datenübermittlung im Feld, Multi-client Zugriff und automatisierte Auswertung	34
2.5.1	Klimatische Beanspruchungen	21	3.3.5	Beschreibung des Sensorsystems zur Messung des vertikalen Temperaturgradienten der Betondecke (Temperatur-Array).....	35
2.5.2	Bauliche und konstruktive Randbedingungen.....	22	3.3.6	Beschreibung der Sensorik zur Erfassung des Umgebungsklimas in situ	36
2.6	Ableitung relevanter Messparameter	22	3.3.7	Beschreibung der Sensorik zur Kennzeichnung der Verkehrsbeanspruchung	36
2.6.1	Mechanische Messparameter	22	3.3.8	Fazit zur Mess-Station	36
2.6.2	Klimatische Messparameter.....	23	3.4	Validierung der Sensorik und Datenverarbeitung	37
2.6.3	Messparameter zur begleitenden Bewertung und Rückführbarkeit.....	24			
2.7	Stand der verfügbaren messtechnischen Lösungen	24			
2.8	Stand praktikabler Lösungen für das Datenmanagement	27			
2.9	Erstellung eines Pflichtenhefts	27			
2.9.1	Mechanische Sensorik.....	28			
2.9.2	Klima- und Temperatursensorik	28			
3	Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung eines Messsystems	29			
3.1	Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung eines innovativen Deformationssensors	29			

3.4.1	Validierung mittels Messnormalen (3D-Messtisch) und bei Extremzuständen (statisch)	38	3.11.2	Windkraftanlage	64
3.5	Überprüfung der allgemeinen Funktionsfähigkeit aller Einzelsensoren im angestrebten Messbereich	39	3.11.3	Photovoltaik-Anlage	64
3.6	Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der Einzelsensoren	40	3.11.4	Diesel-, Benzin und Gasaggregate	65
3.6.1	Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der induktiven Wegaufnehmer	40	3.11.5	Brennstoffzelle	65
3.6.2	Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der Drehwinkelgeber	40	3.11.6	Kombinationslösung	65
3.7	Kalibrierung und Überprüfung der Sensorsysteme	41	3.11.7	Zusammenfassung der autarken Stromversorgung	66
3.7.1	Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 1R	42	3.12	Entwicklung einer Einbautechnologie	66
3.7.2	Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 1M	44	3.12.1	Haftzugversuch und Scherversuch mit Vergussmörtel	66
3.7.3	Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 2R	46	3.12.2	Schalung zum Schutz des Fugenbereichs beim Sensoreinbau	67
3.7.4	Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 2M	48	3.12.3	Probereinbau an der BAM	67
3.7.5	Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 3R	50	3.12.4	Fazit zur Entwicklung einer Einbautechnologie	68
3.7.6	Kalibrierwerte für das Sensorsystem 3M ..	51	4	Erprobung des Messsystems in situ	68
3.8	Validierung unter realitätsnah simulierten überlagerten Beanspruchungen im Labor	53	4.1	Auswahl eines repräsentativen Erprobungsfeldes	68
3.8.1	Quasistatische Erprobung der Sensorsysteme; Achsen einzeln	53	4.1.1	Beschreibung Teststrecke duraBAST	68
3.8.2	Quasistatische Erprobung der Sensorsysteme im Labor; Achsen überlagert	57	4.1.2	Beschreibung des Erprobungsfeldes; Waschbetonstrecke 40	69
3.8.3	Dynamische Erprobung der Sensorsysteme mit fünf Hz im Labor	59	4.1.3	Beschreibung des Erprobungsfeldes Fertigteile-Betonstrecke	71
3.8.4	Fazit der Validierung im Labor	62	4.2	Einbau der Sensorik	72
3.9	Weiterführende Validierung des Messsystems	62	4.2.1	Bestimmung der zu instrumentierenden Fugen mittels FWD	72
3.10	Strukturierung der Datenerfassung und Reduktion bei kontinuierlicher Messung	63	4.2.2	Einrichtung der Baustelle	72
3.11	Lösungsvorschläge für eine autarke Energieversorgung	63	4.2.3	Verlegung der Kabel und Aufstellung der Mess-Station	72
3.11.1	Akku- bzw. Batteriebetrieb	64	4.2.4	Vorbereitung der Fuge	72
			4.2.5	Ausführung der Schlitzarbeiten	74
			4.2.6	Positionierung der Bohrschablone	75
			4.2.7	Bohrarbeiten zur Sensorpositionierung	75
			4.2.8	Elektrischer Anschluss der Sensorsysteme	76
			4.2.9	Prüfen der Schlitz- und Bohrmaße	76
			4.2.10	Einbau des Sensorsystems	77
			4.2.11	Verschluss der Bohrlöcher und Leitungsschlitze	78

4.2.12	Heiß-Verguss der Querscheinfuge.....	79	4.6.2	Kontinuierliche Erfassung des Umgebungsclimas	112
4.2.13	Inbetriebnahme der Mess-Station.....	81	4.6.3	Kontinuierliche Erfassung der Sensordaten	112
4.2.14	Einbringung des Sensorsystems zur Messung des vertikalen Temperaturgradienten der Betondecke (Temperatur-Array).....	81	4.6.4	Fazit zur kontinuierlichen Messung.....	114
4.3	Allgemeine Erkenntnisse aus der Erprobung in situ.....	82	4.7	Ergebnisse des zweiten Messzeitraums: 21. September 2018 bis 05. April 2019...	115
4.3.1	Betreuung manueller Testmessreihen	82	4.8	Zusammenfassende Darstellung des Monitorings über den gesamten Erprobungszeitraum der Waschbetonstrecke 40.....	119
4.3.2	Messdatenerfassung.....	84	5	Konzeptionserstellung für eine zukünftige Datenerhebung im BAB-Netz	122
4.3.3	Validierung durch parallele Plausibilitätsmessung.....	84	5.1	Analyse und Kategorisierung des BAB-Netzes nach relevanten Beanspruchungen.....	122
4.3.4	Erprobung der Datenübermittlung, multi-client Zugriff und automatisierte Auswertung	85	5.1.1	Auswahlkriterium Verkehrsbeanspruchung	124
4.3.5	Ausbau und Rückgewinnung eines Sensorsystems	85	5.1.2	Auswahlkriterium Klimabeanspruchung..	128
4.4	Ableitung von Schlussfolgerungen zur Vorbereitung einer weiterführenden Messkampagne.....	90	5.1.3	Auswahlkriterium Variation der Bauweise bzw. des konstruktiven Aufbaus.....	135
4.4.1	Schlussfolgerungen aus der Einbau- und Verschlusstechnologie	90	5.2	Konzeptionsvorschläge für die Organisation einer repräsentativen Messkampagne.....	137
4.4.2	Überprüfung der Ortsvoraussetzungen.....	90	5.3	Auswahl potenzieller Messorte	138
4.4.3	Technische Optimierungen	90	6	Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse	140
4.4.4	Schlussfolgerungen aus der Messerprobung	92	6.1	Realisierung eines Sensorsystems zur Erfassung der Relativbewegung von Fugenflanken in Betonautobahnen	140
4.5	Ergebnisse des ersten Messzeitraums: 21. März bis 20. September 2018.....	92	6.2	Konzeption einer Mess-Station	141
4.5.1	FWD-Messung nach dem Einbau der Sensorsysteme	92	6.3	Fazit zur Datenübertragung	142
4.5.2	Erprobung der Sensorsysteme mit 20 t Lkw.....	94	6.4	Fazit zur Datenauswertung	142
4.5.3	Bremsvorgang mit einem 20 t Lkw.....	99	6.5	Begleitende und validierende Datenerfassung.....	143
4.5.4	Erneute Erprobung mit einem 20 t Lkw am 10. Juni	102	6.5.1	Setzdehnungsmessung	143
4.5.5	Beanspruchung der Fertigteilbetonstrecke mit MLS30 im August 2018	105	6.5.2	Erfassung des Umgebungsclimas	143
4.5.6	Allgemeines Fazit der dynamischen Beanspruchungskampagnen	111	6.5.3	Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten in der Betonfahrbahndecke.....	144
4.6	Ergebnisse des Langzeit-Monitorings.....	111			
4.6.1	Kontinuierliche Erfassung der Betondeckentemperaturen (Temperatur-Array)	111			

6.5.4	Zusätzliches Temporäres Kontrollsystem	144
6.5.5	Achslast-Messungen des überrollenden Lkw.....	145
6.5.6	Falling Weight Deflectometer (FWD)	145
6.6	Ergebnisse der Feldmessungen unter realen Beanspruchungen.....	146
7	Fazit zum Forschungsvorhaben „Optimierung von Fugenkonstruktionen“	147
7.1	Zusammenfassende Bewertung	147
7.2	Ausblick.....	147
	Literatur.....	148
	Bilder	157
	Tabellen.....	167

1 Einleitung und Zielstellung

1.1 Vorbemerkungen

Mit Beginn der europäischen Industrialisierung am Ende des 19. Jahrhunderts stieg der Bedarf an zentralisierten, sicheren und komfortablen Verkehrswegen zum Transport von immer mehr und immer schwereren Transportgütern dramatisch an. Die aktuell prognostizierten weiteren enormen Zuwachsraten, insbesondere des Güter- und Schwerverkehrs - z. B. Zunahme an Lkw-Güterverkehr um +39 % bis zum Jahre 2030 bezogen auf 2010 [1.1], zeigen auch heute noch kein Ende dieser Entwicklung an. Hoch beanspruchbare Verkehrsflächen aus Beton und die Betondeckenbauweise sind konstruktive und technologische Antworten auf die steigenden Anforderungen an die Infrastruktur zur Sicherstellung unserer ökonomischen Grundlagen und der Mobilität der Bürger.

Im Verlauf der über hundertjährigen Entwicklung des industrialisierten Verkehrswegebbaus erfuhr die Betondeckenbauweise verschiedenste materialtechnische, konstruktive und technologische Weiterentwicklungen. Der aktuelle Stand des Wissens und der Technik ist in den „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO 12“ [1.2] bzw. in den „Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO Beton 09“ [1.3] beschrieben und festgelegt. Damit ist nun, neben der weiterhin anwendbaren empirischen Ausführung auf der Grundlage der Quantifizierung von Einwirkungen und Widerstandsseite, auch eine rechnerische Dimensionierung der Betondecke möglich.

Ein derartiger Kenntnisstand steht für die Ausführung von Fugen in Betondecken und deren abdichtenden Verschluss derzeit noch nicht zur Verfügung. Die aktuellen Herausforderungen und Probleme bei Betondecken lassen sich jedoch auch zu einem großen Maße auf oftmals nicht anforderungsgerechtes Funktionsverhalten der Fugenausbildung in der Betondecke und der mangelnden Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit derzeit zum Einsatz kommenden Fugenfüllsysteme zurückführen bzw. in Verbindung bringen. Aus den aktuellen Erfordernissen für eine Weiterentwicklung der Betonbauweise im hochbeanspruchten Straßenbau lässt sich konsequenterweise die Forderung nach einer Optimierung der Fugenausbildung und Fugenfüllsysteme direkt ableiten. Damit einher geht die Forderung, die bisherigen empirischen Ansätze durch

eine bemessungsfundierte Herangehensweise zu ersetzen. Dazu kommt der Ermittlung der realen Beanspruchungen des Fugensystems für eine realitätsnahe Definition der Einwirkungsseite entscheidende Bedeutung zu.

1.2 Arbeitsgegenstand

Moderne Betondecken für den Einsatz unter hohen Beanspruchungen werden aus statischen, konstruktiven, stofflichen und technologischen Gründen zur Vermeidung wilder Risse durch planmäßig angeordneten Trennflächen - Fugen - in Einzelabschnitte unterteilt. Diese Unterteilung in durch Fugen abgetrennte „Funktionsabschnitte“ der Betondecke ist einerseits erforderlich gemäß der Funktionstheorie der Belagsbauart. Andererseits dient die darin angeordnete Fugenfüllung bzw. das Fugenfüllsystem aber auch dem erforderlichen Schutz des Oberbaus.

Je nach Art der Fuge und der Verkehrsfläche wird der Fugenspalt durch stofflich abgestimmte Fugenfüllsysteme zur Aufrechterhaltung seiner Funktion unter direkten und indirekten Einwirkungen aus Klima und Verkehr abdichtend verschlossen. Darüber hinaus dient diese abdichtungstechnische Lösung insbesondere dem Schutz des Straßenaufbaus vor Erosionserscheinungen in deren Folge sich vor allem die Auflagerbedingungen der Platten verändern können. Das verändert nicht nur die Statik des Verkehrsbauwerks Straße, sondern die Lebensdauer der Betondecke wird herabgesetzt und es besteht die Gefahr von Plattenbrüchen, wodurch die Verkehrssicherheit gefährdet ist. Zum Schutz des Bauwerks sowie zur Sicherstellung eines störungsfreien Verkehrsflusses muss ein Fugenfüllsystem folgende Funktionsanforderungen sicherstellen:

- kinematische Funktion zur Aufnahme beanspruchungsinduzierter Formänderungen
- statische Funktion; z. B. zur Abstützung der Belagsbestandteile und Lastabtragung
- abdichtende Funktion zum Schutz des Straßenaufbaus vor Wasser, darin gelöster Schadstoffe und Erosion
- verkehrliche Funktion zur Gewährleistung komfortabler und sicherer Nutzung
- technologische Funktion zur Abgrenzung unterschiedlicher Bauabschnitte/Baustoffe

Diese Funktionalität (Gebrauchsverhalten) wird durch eine geeignete stoffliche Kombination der Ausgangskomponenten des Fugenfüllsystems sowie dessen geometrischer und konstruktiver Ausbildung bestimmt. Der aufgeführte Anforderungskatalog an das Gebrauchsverhalten von Fugenfüllungen wird jedoch erst durch die Forderung nach einer dauerhaften Sicherstellung der erforderlichen Funktionalität vollständig.

1.3 Problemstellung

Analysiert man den Stand der Wissenschaft und Versuchstechnik und die damit verbundene aktuelle Entwicklungsstufe für Fugenfüllungen ist festzustellen, dass die Weiterentwicklung technischer Lösungen zur Ausbildung von Fugenfüllungen sowie die Bewertungsmethodik und Leistungskriterien mit den stofflich-konstruktiven und technologischen Weiterentwicklungen der Betondeckenbauweise in den letzten Jahrzehnten nicht Schritt gehalten hat. Ebenso wenig finden die überproportionale Verkehrsentwicklung im bundesdeutschen Straßennetz der letzten Jahrzehnte, u. a. als Folge der Wiedervereinigung und EU-Osterweiterung, sowie auch klimatische Veränderungen und die damit einhergehenden Bauteilbeanspruchungen keine Berücksichtigung.

Die Entkopplung der wissenschaftlich-technischen, konstruktiven und technologischen Weiterentwicklung der Betonbauweise und der Verkehrsentwicklung von einer entsprechenden gezielten Weiterentwicklung der Fugenfüllsysteme und ihrer Leistungs- und Dauerhaftigkeitsbewertung äußert sich nunmehr in vermehrten Schadensfällen und mangelhafter Dauerhaftigkeit. Die Anzahl an Schadensmeldungen und Schadensumfängen hat ab 2007/2008 - insbesondere bei Neubauabschnitten - signifikant zugenommen [1.4]. Die Tatsache, dass auch nachweislich regelkonforme und baurechtlich zugelassene Systeme und Ausführungen nach kürzester Zeit die Gebrauchseignung verlieren, zeigt die Versäumnisse in der wissenschaftlich fundierten Weiterentwicklung und macht die Dringlichkeit für einen Wechsel der Entwicklungs- und Bewertungsmethodik von der empirischen hin zu einer performance-bezogenen Methode deutlich. Die aus eigenen jahrelangen Felduntersuchungen sowie aus der Straßenbaupraxis berichteten Schadensbilder lassen sich im Wesentlichen folgenden Mängelkategorien zuordnen [1.5, 1.6]:

- mangelnde Stand- und Lagesicherheit: z. B. Absacken von Fugenfüllungen, Ausfahrungen oder Herausreißen
- mangelndes Haftverhalten der Fugenfüllungen: z. B. Versagen adhäsiver und/oder kohäsiver Haftverbund; mangelhafter Kompressionsantrieb
- mangelnde kinematische Funktionsfähigkeit: z. B. keine ausreichende Deformationsfähigkeit (Risse längs und quer zur Fahrtrichtung); mangelnde Rückstellfähigkeit
- mangelnde Abdichtung gegenüber Wasser, Schadstoffen und Schmutzpartikeln: z. B. Feuchtepenetration durch Risse und Auflösung des adhäsiven Haftverbundes; Feuchteleitung/-verteilung mit der Gefahr der Unterläufigkeit und Korrosion/Erosion
- mangelnde Alterungsbeständigkeit der Fugenfüllungen; z. B. oberflächige Versprödung infolge klimatischer Einwirkungen; mangelnde mechanische Ermüdungsfestigkeit
- Neben den Aufwendungen für Regressleistungen bzw. außerplanmäßige Instandsetzung entstehen zusätzlich Folgekosten aus Verkehrseinschränkungen bzw. Sicherungsmaßnahmen etc..

1.4 Stand der technischen Regelungen

Mit der Durchsetzung des industriellen Fernstraßenbaus erfolgte schnell die Einführung erster gütesichernder Regelwerke zur Fugenausbildung (STUFA-Merkblatt für Betonstraßen von 1928) sowie die ersten Technischen Lieferbedingungen für Fugenvergussmassen von 1936 der STUFA [1.7]). Heute sind Fugenfüllsysteme für hochbeanspruchte Verkehrsflächen des Bundesfernstraßenbereiches auf Basis der technischen Regelungen ZTV Fug-StB 15 [1.8] zu dimensionieren und auszuführen. Die darin aufgeführten Regelungen zur Ausführung sind größtenteils empirischer Natur und basieren auf Untersuchungen, die in die 70er Jahre des vorigen Jahrhunderts zurückreichen. Unter Berücksichtigung der derzeitigen praktischen Erfahrungen sind hier berechtigte Zweifel an der Gültigkeit insbesondere der „Richtwerte für die Änderungen der Fugenspaltbreite“ (Tabelle 1 in [1.8]) sowie der darauf beruhenden Dimensionierungsregelungen der Fugenfüllungen (z. B. Tabelle 2 in [1.8]) angebracht.

Ebenso basiert die aktuelle Bewertungsmethodik sowie die Ableitung der maßgebenden Gebrauchs- und Leistungsanforderungen an die Materialien und kompletten Systeme als Grundlage der Zulassung für eine Anwendung im Bundesfernstraßenbereich im Wesentlichen auf diesem materialtechnisch, konstruktiv und beanspruchungsbedingt längst überholten Stand. Die anzuwendende Untersuchungsmethodik zum Nachweis grundsätzlicher Funktionsfähigkeit und Dauerhaftigkeit sowie zur identifizierenden Kennzeichnung der Materialqualität basiert überwiegend auf Untersuchungsmethoden aus den Anfängen des industriellen Asphaltstraßenbaus und der Abdichtungstechnik mit bituminösen Baustoffen. Dementsprechend kann diese Methodik nur als überaltert und überwiegend empirisch geprägt eingeschätzt werden.

Auch die zwischen 2004 und 2006 eingeführten europäisch harmonisierten Produkthanforderungen an Fugeneinlagen und Fugenmassen [1.9], [1.10], [1.11] markieren keine methodische Trendwende. Im Wesentlichen wird in ihnen der bereits kritisch bewertete Stand der ZTV Fug-StB nunmehr europäisch festgeschrieben. Darüber hinaus befördert die darin mandatierte Abminderung des Güteschutzniveaus offenbar eine weitere Reduzierung der Gebrauchseigenschaften und Dauerhaftigkeit, wie die aktuelle Zuspitzung von Problemen in der Baupraxis vermuten lässt.

1.5 Lösungsmethodik

Nach den berichteten Erfahrungen und Diskussionen ist von einem komplexen Zusammenwirken mehrerer Ursachen für die dargestellten Funktions- und Dauerhaftigkeitsprobleme auszugehen. Aus der Analyse der Informationen gilt es mittlerweile jedoch als sichere Erkenntnis, dass Qualität und Quantität der Einwirkungen auf Fugenfüllsysteme im hochbeanspruchten Verkehrswegebau - wie sie Grundlage der derzeitigen Bemessung und Nachweisführung zur Eignung gemäß ZTV Fug-StB 15 [1.8] sind - offensichtlich nicht mehr die Realität wiedergeben bzw. diese noch nicht ausreichend bekannt sind. In der Konsequenz bedeutet dies, dass sowohl die technischen Verwendungs- und Ausführungsregelungen als auch Bewertungsmethoden den realen Beanspruchungen und Anforderungskriterien nicht entsprechen, weil eine entsprechende Datengrundlage unter den aktuellen bautechni-

schen Gegebenheiten und Nutzungsbedingungen fehlt.

Als Konsequenz aus dem dargestellten Sachstand sind die realen äußeren Einflüsse und Randbedingungen sowie die daraus resultierenden Einwirkungen auf Fugenfüllsysteme in hochbeanspruchten Verkehrsflächen unter den modernen Nutzungs- und Einsatzbedingungen zu analysieren, kategorisieren und zu quantifizieren. Dazu sind robuste innovative technische Voraussetzungen zu schaffen. Schlussendlich muss es Ziel sein, die maßgebenden Beanspruchungen aus einer standardisierten Messkampagne unter Variation verschiedenster konstruktiver Bauvarianten, verwendeter Materialmodifikationen und Bautechnologien, unterschiedlicher geographischer Lagen mit differierenden klimatischen Randbedingungen und verschiedenen Verkehrsbeanspruchungen vergleichend ableiten und quantifizieren zu können.

Mit Blick auf die beschränkte Aussagefähigkeit der bisher sporadisch und ohne ausreichende Berücksichtigung von interagierenden Wechselwirkungen aufgenommenen Messwerte zu mechanischen Beanspruchungen, aufgrund unzureichender Robustheit bisheriger messtechnischer Lösungen und deren Leistungsbegrenzung (z. B. Auflösung; Datenzuordnung, Datenerfassung; Datenbereitstellung) unter den überlagerten und komplexen Einflüssen sowie aufgrund beschränkter Aussagefähigkeit durch indirekte dezentrale Messungen außerhalb der Rollspuren bzw. notwendiger Verkehrsunterbrechungen für Messkampagnen, werden mit der Forschungsarbeit folgende Hauptziele verfolgt:

- Analyse des wissenschaftlich-technischen Sachstandes mit dem Ziel der Ableitung eines Pflichtenheftes für eine geschlossene messtechnische Problemlösung,
- Entwicklung, Bereitstellung, Kalibrierung und praxisnahe Erprobung einer neuartig innovativen, miniaturisierten, robusten und wiederverwendbaren messtechnischen Lösung für den Dauerpraxiseinsatz zur Erfassung interagierender komplexer Einwirkungen unter hohen äußeren Beanspruchungen, die störungsfrei in den Betonfahrbahnbelag integriert und ohne Beeinträchtigung des Verkehrsflusses in benutzerdefinierter zeitlicher Auflösung betrieben werden kann,
- Anpassung und praxisnahe Erprobung einer miniaturisierten, redundanten und standardisierten

Lösung zur Datenerfassung, -übertragung, -auswertung für einen online Multi-client Zugang,

- Bau einer Mess-Station,
- Erstellung einer verallgemeinerten Konzeption für eine systematische Datenerhebung im Gesamtnetz der BAB,
- Erprobung der entwickelten Messkonzeption und der Mess-Station im hochbeanspruchten Praxiseinsatz unter Extrem- und Regelbedingungen und
- wissenschaftliche Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse.

1.6 Gesamtziel

Grundlegende Voraussetzung für die wissenschaftlich fundierte gebrauchsbetonte Entwicklung, Optimierung und Bewertung von Fugenfüllsystemen mit dem Ziel der Erhöhung von Nutzungsdauer und Minimierung des Erhaltungsaufwandes muss die Kennzeichnung der Einwirkungsseite sein. Deshalb ist es Konsens, zunächst mit höchster Dringlichkeit die unter den aktuellen Nutzungsbedingungen resultierenden realen Einwirkungen und die daraus

folgenden Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen zu untersuchen und mithilfe einer qualitativen und quantitativen Analyse reproduzierbar zu kennzeichnen. Dies betrifft insbesondere die durch die Fugenfüllung real aufzunehmenden Formänderungen der Betondecke. Verlaufen diese in der Praxis wirklich überwiegend quasi-statisch und einaxial in Plattenlängsrichtung? Gibt es Einflüsse aus den unterschiedlichen Konstruktionsvarianten für Fahrbahndecken aus Beton? Wie stellt sich der Temperatureinfluss auf die Deformationen dar? Ist bei den maßgebenden Deformationsbeanspruchungen zwischen jahreszeitlich bedingten quasi-statischen Verformungen, dynamischen Deformationen mit unterschiedlichen Wiederholzahlen und Deformationsraten sowie schwelenden oder wechselnd schwelenden Verformungen zu unterscheiden? Diese Auswahl an Fragestellungen umreißt stellvertretend Wissenslücken bezüglich der Kennzeichnung realitätsnaher Deformationsbeanspruchungen von Fugenfüllsystemen in hochbeanspruchten Verkehrswegen.

Aber auch die Wechselwirkung überlagerter Einwirkungen klimatischer und mechanischer Natur auf das Funktionsverhalten und die Dauerhaftigkeit von Fugenfüllsystemen ist nicht ausreichend untersucht

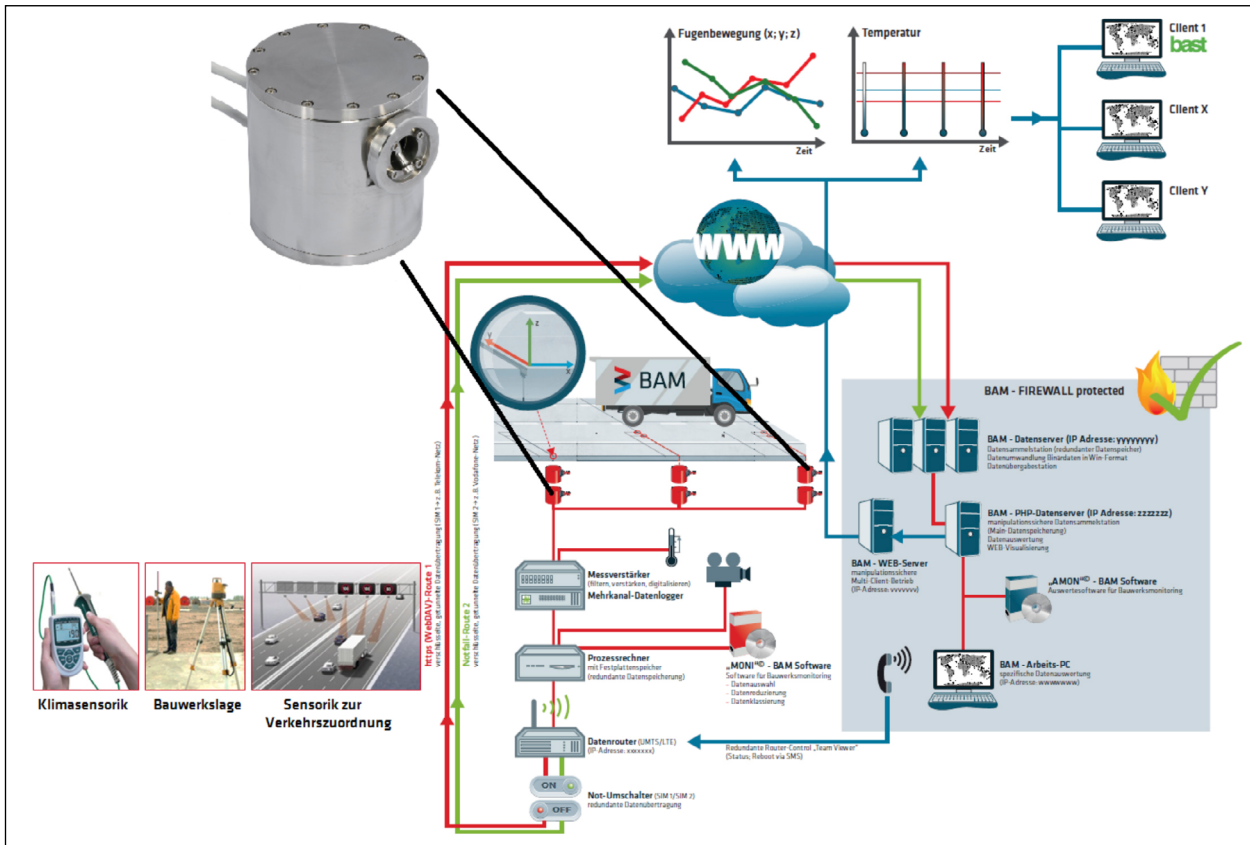


Bild 1: Schematische Darstellung der angestrebten Aufgabenlösung (Lösungsansatz)

und berücksichtigt, da die benötigten Informationen über maßgebende klimatische Einwirkungen und daraus folgender Beanspruchungen für das Fugenfüllsystem nicht ausreichend qualitativ und quantitativ bekannt sind. Wie wirken sich die klimatischen Veränderungen auf die Betonstraße und das Fugenfüllsystem aus? Über den in der ZTV Fug-StB 15 [1.8] beschriebenen Kenntnisstand hinaus sind insbesondere auch aus zwischenzeitlichen Änderungen in Konstruktion und Technologie des Betondeckenbaus (Stichwort: veränderte Materialqualitäten der Ausgangsstoffe, neuartige Zusatzstoffe, neuartige Betontechnologien und konstruktive Straßenaufbauten gemäß [1.2]), veränderte Einsatzbedingungen und daraus folgende Anforderungen an Fugenfüllsysteme zu quantifizieren. Und nicht zuletzt ist es klar, dass die Zunahme der Verkehrsbeanspruchung (Fahrzeugkonfiguration; Achslast; Überrollhäufigkeit etc.) in den vergangenen 20 bis 30 Jahren auch einen Niederschlag in der Beanspruchung der Fugenfüllung findet, die es für eine realitätsnahe Ausführung und Systembewertung zu quantifizieren gilt.

Zur Herstellung der erforderlichen Anwendungs- und Planungssicherheit mit dem Ziel einer gebrauchsbetonten stofflichen und konstruktiven Optimierung von Fugenfüllsystemen, deren erhöhter Nutzungsdauer und Minimierung des Erhaltungsaufwandes sowie einer erforderlichen gebrauchsbetonten Bewertung stellt eine Neudefinition der maßgebenden Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen deshalb die erste erforderliche Grundlage dar.

Die oben genannten Erkenntnisse mündeten in einer zielführenden Projektskizze (siehe Bild 1).

2 Erarbeitung der Grundlagen und Kennzeichnung des State-of-the-Art

Die mit diesem Forschungsvorhaben zur Ermittlung der maßgebenden Beanspruchungen begonnene schrittweise Vorgehensweise mit dem Ziel einer nachhaltigen Optimierung von Fugenkonstruktionen in hoch beanspruchten Verkehrsflächen aus Beton berücksichtigt konsequenterweise auch den in der Literatur dargestellten Stand des Wissens. Dabei stellen die in [2.1] zusammengefassten Erkenntnisse bereits ein umfangreiches Wissensfundament dar. Ergänzend dazu wurden weitere Biblio-

theks- und Datenbankrecherchen sowie Anfragen an besonders spezialisierte Forschungseinrichtungen bzw. nationale und internationale Fachexperten durchgeführt. Diese umfangreichen Recherchen dienten der Abfrage aktueller Aktivitäten mit dem Ziel der Erweiterung des Erkenntnisstandes insbesondere hinsichtlich maßgebender Einwirkungen auf Fugensysteme und deren Quantifizierung im Feld sowie daraus folgender Beanspruchungen.

Zur Detektion möglicher Literaturquellen wurden insbesondere nationale Recherchemöglichkeiten, aber auch europaweite bzw. internationale Datenbanken genutzt:

- BAM-„State-of-the-Art“-Report [2.1]
- BAM-Datenbankrecherche zur Cluster-Analyse: TEMA; IRRD; RSWB; NTIS; FORKAT; COMPENDEX
- FGSV-Datenbankrecherche zur Clusteranalyse: Dokumentation Straße; FOST; ITRD; Transportation Research Record (TRB)
- Forschungsreihe Straßenbau und Straßenverkehrstechnik des BMVi
- BAST-Bibliotheksdienst einschließlich elektronischem Archiv <https://bast.opus.hbz-nrw.de>
- Publikationen maßgebender Forschungsinstitute:
 - EMPA (Schweiz)
 - SP Technical Research Institute (Sweden)
 - Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Österreich)

Themenorientierter Informationsaustausch mit nationalen und internationalen Fachkollegen (GB; USA) im Bereich der Normung u. a. zur aktuellen Weiterentwicklung des entsprechenden Regelwerkes und der Normung und Industrie vervollständigen den Versuch, einen möglichst umfassenden Sachstand zu erfassen.

Zuzüglich zu den in [2.1] analysierten Quellen wurden im Ergebnis der o. a. Recherche insgesamt mehr als 80 weitere Literaturquellen als themenrelevant identifiziert. Da eine umfassende Besprechung und Analyse den Rahmen dieses Auftrages weit übersteigen würde, werden vereinfachende Schlussfolgerungen wesentlicher Erkenntnisse aus [2.2] bis [2.92] unter folgenden aufgabenbezogenen Fragestellungen abgeleitet:

- Welche Einflüsse und Randbedingungen wirken signifikant auf das Fugensystem?
- Welche Messgrößen müssen zur Quantifizierung der Einwirkungen erfasst werden?
- Welche messtechnischen Lösungen stehen zur Verfügung?
- Welche Lösungen für ein problemadaptiertes Datenmanagement stehen zur Verfügung?

Auf diese Art und Weise sollen die für die technische Problemlösung erforderlichen qualitativen Rückschlüsse und quantifizierten Eingangsgrößen zur Beanspruchungsdefinition gewonnen bzw. mit den bereits vorhandenen Erkenntnissen und Vorstellungen [1.12], [1.13] abgeglichen werden. Außerdem können auf diese Weise die aus den Achtzigerjahren des vorigen Jahrhunderts verwendeten Richtwerte für die Dimensionierung und Ausführung von Fugenfüllsystemen der ZTV Fug-StB [1.8] überprüft und heutigen Bedingungen angepasst werden.

2.1 Fazit zum nationalen Literatur- und Wissensstand

Nach Ablösung der Bauart Betondecke im Verbund zur HGT als Standardbauweise wurden unter der gegebenen Aufgabenstellung für die verschiedensten aktuellen Ausführungsvarianten der Betondeckenbauarten gemäß RSTO 01 bzw. RSTO 12 [1.2] aus den zur Verfügung stehenden Quellen nur sehr eingeschränkt verwertbare Messergebnisse aus der Straßenbaupraxis gefunden (z. B. [2.28], [2.88]). Interessierende Daten wie z. B. zu Formänderungsbeanspruchungen im Fugenbereich aus jüngeren bzw. aktuellen Messkampagnen im Feld stehen noch nicht zur Verfügung.

Orientierende Erkenntnisse können nach derzeit veröffentlichtem Wissensstand im Wesentlichen lediglich aus experimentellen Untersuchungen an Plattenmodellen, Modellstraßen sowie im Ergebnis numerischer Berechnungen extrahiert werden (z. B. [2.3], [2.7], [2.12], [2.26], [2.49], [2.82], [2.91]). Ein Großteil der Literaturdarstellungen bezieht sich auf Untersuchungsansätze im Labor oder bei Versuchsaufbauten im Feld, die sich jedoch im Wesentlichen mit der Interaktion verschiedener Tragschichtlösungen mit der Betondecke unter Variation der Auflagerbedingungen fokussieren (z. B. [2.3], [2.5], [2.7], [2.29], [2.31], [2.46], [2.58]). Unter den hier gegebe-

nen Fragestellungen beschränkt sich der daraus verwertbare Informationsgehalt oftmals lediglich auf Ergebnisse von Messungen der Einsenkungen bzw. Deflexionsmessungen mit dem FWD-Verfahren (z. B. [2.13], [2.28], [2.31], [2.34], [2.44], [2.45], [2.92]). Das bedeutet in der Konsequenz:

- Es sind derzeit keine ausreichenden Informationen über reale Beanspruchungen des Fugensystems in hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken verfügbar.
- Es gibt signifikante Indikatoren für langsam und schnell ablaufende Bewegungen in mehreren Bewegungsachsen.
- Es gilt, derartige mehraxiale Bewegungen im Fugenbereich unter den aktuellen Bauverhältnissen aufzuklären.

Um sich zumindest einen Überblick über mögliche Beanspruchungsszenarien im Fugenbereich zu verschaffen, muss man derzeit immer noch auf entsprechende frühere Erkenntnisse aus Untersuchungen an Betondecken im Verbund (z. B. in [2.1] sowie in [2.30]) zurückgreifen, wohlwissend, dass die veränderten Konstruktions- und Auflagerbedingungen der aktuellen Ausführungsvarianten aber möglicherweise auch andere betontechnologische Einflüsse ein sicherlich abweichendes Erscheinungsbild im Detail aufweisen können.

Die im Wesentlichen durch die früheren Arbeiten am Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau der TU München erarbeiteten Erkenntnisse zu Verformungen und Deformationen auch im Fugenbereich bei Betondecken im Verbund unter verschiedenartigsten Beanspruchungen stehen in der für diese Bauart durchgeführten Untersuchungsbandbreite für die aktuellen Bauarten derzeit nicht zur Verfügung.

Aber auch für diese vorhandenen Erkenntnisse, zusammengefasst diskutiert in [2.1], ist generell kritisch festzustellen, dass die Aussagefähigkeit unter Bezug auf die hier gestellte Aufgabe stark limitiert ist. Wenn überhaupt beschränken sich diese im Wesentlichen auf Messungen temperaturbedingter jahreszeitlicher Formänderungen sowie indirekter Messungen der vertikalen Deformationen durch Ermittlung der Einsenkungen mit dem FWD-Verfahren. Vereinzelt werden Messungen aus Überrollungen diskutiert, welche deutliche Hinweise auf dynamisch induzierte Formänderungen/Fugenbewegungen geben (z. B. [2.13], [2.18], [2.28]), ohne dass

der ablaufende Vorgang und die Deformationsamplituden repräsentativ erfasst werden.

Wechselwirkungen aus veränderten betontechnologischen Ansätzen [2.38], [2.51] oder aus Auswirkungen aus vorbeugenden bzw. schützenden Maßnahmen im Zusammenhang mit der AKR-Problematik [2.50], [2.51] mit möglichen veränderten Einsatzbedingungen im Fugenbereich bedürfen noch einer vertiefenden Aufklärung.

2.2 Fazit zum europäischen Literaturstand

Bis zum Ende der Neunzigerjahre fanden immer wieder Erkenntnisse zu Problemen, zur Beanspruchungserfassung, zu Forschungsansätzen und zu Lösungsvorschlägen zum Thema Fugenfüllungen in hochbeanspruchten Betonstraßen Eingang in die Fachliteratur (z. B. [2.33], [2.72]). Aus den aktuellen Datenbankergebnissen gewinnt man den Eindruck, dass mit Einführung der europäisch harmonisierten Regelungen zu Fugenfüllungen in Betonstraßen [1.9] bis [1.11] offensichtlich für viele europäische Länder ausreichende Lösungsvorschläge für die offenen Fragen zur Verfügung gestellt wurden. So wurden auch die vielversprechenden Forschungsansätze hin zu einer performance-orientierten Untersuchung der Dauerhaftigkeit durch das schwedische SP Technical Research Institute nach dem Ablauf der Bearbeitungsdauer der europäischen Normung nicht weiter fortgeführt.

Diese Hypothese wird jedoch in der Tat bei Fachgesprächen mit europäischen Fachkollegen aus Forschung und Industrie - auch durch das SP Institute of Sweden - aktuell nicht bestätigt. Vielmehr werden aktuell auch Probleme (Funktionsfähigkeit; Dauerhaftigkeit) bei Fugenfüllungen vor allem durch die Vertreter der Forschung und Straßenbaubehörden insbesondere der angrenzenden europäischen Nachbarn im Süden (Österreich; Schweiz) beklagt. Der z. B. bei der EMPA derzeit untersuchte Lösungsansatz konzentriert sich jedoch im Wesentlichen auf das Alterungsverhalten der Fugenfüllprodukte (siehe [2.80]) und eine Erhöhung der Gütesicherheit der Produkte (z. B. [2.93]). Insgesamt ist zu erwarten, dass die mit dieser Forschungsaufgabe begonnene umfassende Problemanalyse lediglich zeitversetzt auch bei unseren europäischen Nachbarn auf der Forschungsagenda stehen wird.

2.3 Fazit zum internationalen Literaturstand

Im Ergebnis der Literaturanalyse in der Datenbank „Dokumentation Straße“ ergaben sich aktuell Verweise auf internationale wissenschaftliche Aktivitäten mit dem Fokus auf Fugen in Betonstraßen aus Nordamerika (USA; Kanada) und asiatisch-pazifischen Ländern (China; Südkorea; Thailand). Dabei bilden die gefundenen Quellen überwiegend eine auffällige Aktivität in den USA zur besseren Erforschung des Gebietes Fugen in Betonstraßen ab. Aus den Darstellungen von Schadensbildern (z. B. in [2.94], [2.95]) und Ergebnissen von Felduntersuchungen (z. B. in [2.74], [2.79], [2.81], [2.84]) kann auf vergleichbare Probleme bezüglich Funktionalität und vor allem Dauerhaftigkeit und den entsprechenden Schadensbildern geschlossen werden. Dabei wird von deutlich höheren Schadenshäufigkeiten in den nördlicheren Bundesstaaten berichtet. Es wird anhand der gefundenen Literaturhinweise ebenfalls deutlich, dass es teilweise immer noch eine grundsätzliche Unsicherheit über die Frage „Sollen Fugen in Betonstraßen abdichtend verfüllt werden, oder nicht?“ gibt. Aus der Mehrzahl der begutachteten Publikationen ist jedoch die Suche nach einem wissenschaftlich-technischen Ansatz zur besseren Lösung des „Fugenproblems“ erkennbar. Die Alternativlosigkeit zur möglichst wirksamen Fugenabdichtung ist zwingend aus der Quintessenz der Literaturlauswertung in (z. B. [2.1]) abzuleiten. Der Schutz vor eindringender Feuchtigkeit verringert die aus z. T. unterschiedlich großem Schwinden und Quellen folgenden Deformationsbeanspruchungen [2.98], [2.100]. Zusätzliche konstruktive Maßnahmen zur Entwässerung der Betondecke wie z. B. Drain-Betonschichten oder Gegengefälle der Tragschicht am hochgelegenen Fahrbahnrand u. ä. [2.101], [2.102]. können möglicherweise entfallen, wenn neben den originären Aufgaben der Fugenabdichtung kurzfristig eine Durchfeuchtung von Deckenbeton und Tragschicht zur Vermeidung von Rissen aus superpositionierten Wölb-Spannungen und langfristig einer möglichen Erosion der Unterlage vorgebeugt wird.

Obwohl eine Anzahl von Publikationen sich der Frage nach besser geeigneten, realitätsnäheren Bewertungsmethoden stellt und auch teilweise neue Ansätze vorgeschlagen werden (z. B. [2.70], [2.71], [2.77], [2.84]), deuten die daraus abgeleiteten Lösungsansätze auf einen Wechsel hin zu einer mehr performance-orientierten Bewertungsmethodik, ohne dass derzeit dieser eingeschlagene

ne Paradigmenwechsel in eine entsprechend konsequent überarbeitete Material- und Systembewertungsmethodik umgesetzt wurde (z. B. [2.86]). Klar scheint jedoch auch in den USA zu sein, dass neue Informationen zur Erfassung der Beanspruchungen im Fugenbereich vonnöten sind. Hierzu werden verschiedenartige Ansätze z. B. in [2.47], [2.54], [2.78] und [2.82] diskutiert.

Auch das Ausführungsproblem als Bestandteil der Gesamtproblematik ist erkannt und wird beispielsweise durch Vergleichsstudien zur Fugenvorbereitung oder durch Vorschläge zur besseren Reinigung (z. B. in [2.81], [2.87]) thematisiert.

2.4 Charakterisierung maßgebender Einwirkungen und Randbedingungen

Bestätigt durch die Darlegungen in der Literatur müssen für eine umfassende Charakterisierung der maßgebenden Einwirkungen und der daraus folgenden direkten oder indirekten Beanspruchungen des Fugenbereichs bzw. der Fugenfüllung sowohl die äußeren Einwirkungen wie Klimabeanspruchung (Temperatur; Feuchte; Strahlungsanteile) und Verkehrsbeanspruchungen als auch die baulichen Randbedingungen (lokale Situation der Strecke, konstruktiver Belagsaufbau; Einfluss der Unterlage) berücksichtigt werden.

Unter Berücksichtigung der Ausführungsprinzipien für Fugenfüllungen folgen aus den o. a. Einwirkungen für das Fugenfüllsystem im Wesentlichen:

- mechanische Beanspruchungen
- klimatische Beanspruchungen

Nachfolgend wird der derzeit bekannte Wissensstand zu den aus den Einwirkungen folgenden maßgebenden Beanspruchungen kurz zusammengefasst und in einem kurzen Fazit wesentliche

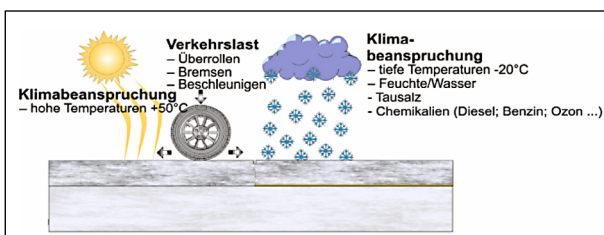


Bild 2: Schematische Darstellung der maßgebenden Einwirkungen auf Fugenfüllsysteme.

Rückschlüsse für die erforderliche Bearbeitungsmethodik der Aufgabenstellung abgeleitet.

2.4.1 Mechanische Beanspruchungen

Aus den verschiedenartigen maßgebenden Einwirkungen ergeben sich im Wesentlichen Formänderungen des Fugenspaltes, welche ein Fugenfüllsystem unter Berücksichtigung des jeweiligen Funktionsprinzips verschiedenartig mechanisch beanspruchen können. Bis heute konzentriert man sich dabei auf langsam ablaufende (quasi-statische) Horizontalbewegungen des Fugenspaltes, wie sie insbesondere durch jahreszeitliche Temperaturänderungen und Schwind- und Kriechvorgänge hervorgerufen werden. Nach früheren Untersuchungen (zusammengefasst in [2.1]) sind in aller Regel unter Ausschluss außerplanmäßiger Ereignisse (wie z. B. Paketreißen) horizontale Fugenbewegungen von ≤ 3 mm jedoch nicht größer als 5 mm zu erwarten. Nach EISENMANN/LECHNER (ebenfalls zusammengefasst in [2.1]) sind bei planmäßigen, störungsfreien Bedingungen von maximalen Änderungen der Fugenspaltweite von +2,3 mm Aufweitung (Sommer – Winter) und -0,90 mm Stauchung (Winter – Sommer) zu erwarten. Aus neueren - jedoch lediglich punktuellen und oftmals schadensmotivierten - Messungen wird von deutlich größeren systematischen Horizontalbewegungen berichtet, die Dehndeformationen (Sommer – Winter) bis zu 50 % erreichen [1.4]. Dies führte zu vereinzelt Initiativuntersuchungen, aus denen über einen Zeitraum von 2013 bis 2015 aus einer Mess-Station an einem Deckenaufbau im Zuge der BAB A 9 (zweilagige Betondecke 8 cm/22 cm mit Waschbetonoberfläche auf STS) jahreszeitlich bedingte Horizontalbewegungen zwischen +1,8 mm Dehnung (Sommer – Winter) bzw. -1,9 mm Stauchung (Winter - Sommer) hervorgingen.

Obwohl über Verdrehungen der Plattenenden aus temperatur- oder feuchteinduzierten Wölbungen berichtet wird und diese auch bereits aus früheren Untersuchungen für Einzelfälle quantifiziert sind (z. B. in [2.10], [2.13], [2.20], [2.27], [2.31], [2.82], [2.97], [2.98], [2.99], [2.100]), finden damit verbundene langsam ablaufende vertikale Deformationsbeanspruchungen als quantifizierte Beanspruchungsgröße für Fugenfüllungen derzeit noch keine Berücksichtigung. Hierzu fehlen entsprechend angekoppelte Messungen, für die die derzeitige Sensorik nicht ausgelegt ist.

Obwohl schnell ablaufende Deformationsbeanspruchungen, wie sie aus der Verkehrsbeanspruchung folgen, als vertikale Relativverformung im Fugenbereich selbst in verdübelten Betonplatten bekannt sind und von Deformationen i. d. R. in der Größenordnung unterhalb 0,1 bis 0,3 mm aber auch teilweise darüber hinaus berichtet wird (z. B. in [2.3], [2.13], [2.18], [2.19], [2.2.22], [2.34], [2.35]), findet diese Erkenntnis unverständlicherweise noch keine Berücksichtigung als Lastfall bei der Bewertung von Fugenfüllsystemen.

In konsequenter Berücksichtigung der aufgelisteten vorhandenen Erkenntnisse zum Verformungsverhalten von Betondeckenplatten sind auch mögliche schnell ablaufende Deformationen in horizontaler Richtung (x-Achse bzw. in Fahrtrichtung) bzw. möglicherweise auch in horizontaler Richtung in y-Achse (quer zur Fahrtrichtung bzw. in Fugenrichtung) aufzuklären. Die Wirkung dynamisch induzierter Deformationen auf das Funktionsverhalten und die Dauerhaftigkeit des Fugenfüllsystems erwächst dabei nicht aus der absoluten Deformationsgröße, sondern vielmehr aus der hohen Anzahl der oftmals und schnell wiederholten Beanspruchung. Unter den derzeit maßgebenden Dauerhaftigkeitsaspekten kommt der Quantifizierung dieser möglichen Deformationsbeiträge eine hohe Bedeutung zu, auch wenn diese bis dato wohl aufgrund der geringen absoluten Deformationsgrößen keine Berücksichtigung als maßgebende Beanspruchungsgröße von Fugenfüllungen gefunden haben.

2.5 Zusammenfassung des State-of-the-Art

Nach den bisher gültigen Bewertungskriterien werden Fugenfüllsysteme für hochbeanspruchte Verkehrswege - sofern ein Leistungsnachweis des Fugensystems vorgeschrieben ist - zum Nachweis einer Deformationsaufnahme von mindestens +5 mm bzw. +25 % Dehnung geprüft. Aus den bisherigen Untersuchungen bzw. Feldmessungen geht hervor, dass in aller Regel bei Ausschluss unplanmäßiger Bedingungen derartig große Fugenöffnungen in der Praxis nicht zu erwarten sind. Trotzdem kommt es vermehrt zu einem frühzeitigen Versagen von Fugenfüllsystemen unter den praktischen Beanspruchungen. Aus den vorgenannten Diskussionen zum Sachstand und unter Berücksichtigung eigener Erkenntnisse aus vorhergehenden Forschungsarbeiten ist festzustellen, dass derzeit offensichtlich kei-

ne geeignete Sensorik zur Erfassung der relevanten Verformungen sowohl bezüglich der erforderlichen Messachsen, des notwendigen Messbereiches, der erforderlichen Auflösung und Messgeschwindigkeit verfügbar ist. Darüber hinaus muss diese Sensorik für den Einsatz im Bereich höchster Beanspruchung der Betondecke verfügbar sein, wozu es ebenfalls derzeit keine technische Lösung gibt.

Eine auf die erwarteten Deformationsbeanspruchungen abgestimmte Sensorik eröffnet in Kombination mit begleitender Klima- und Temperatursensorik die Möglichkeit, alle mechanischen Deformationsbeanspruchungen im Fugenbereich für die aktuellen Bauarten der Betondeckenbauweise örtlich und zeitlich aufgelöst zu erfassen und somit diesen Beanspruchungsfall strukturiert und kategoriebezogen zu quantifizieren. Dazu ist auch eine Rückführbarkeit dynamischer Messungen auf die verursachenden Verkehrskollektive wünschenswert.

2.5.1 Klimatische Beanspruchungen

Wie bereits im vorherigen Kapitel ausführlich diskutiert, beeinflussen thermische und hygrische Randbedingungen wesentlich die mechanischen Beanspruchungen des Plattenrandes und damit auch des Fugenfüllsystems. Aus den Extremtemperaturen ergeben sich in aller Regel die maximalen Deformationsbeanspruchungen. Aus den maximalen Temperaturgradienten ergeben sich die maximalen Formänderungsgeschwindigkeiten. Daneben weisen klimatische Beanspruchungen aber auch eine direkte Auswirkung auf das Alterungsverhalten der auf organischen Materialien basierenden Fugenfüllsysteme auf. Die entsprechenden Mechanismen sind in [2.1] aufgeführt.

Aus der Auswertung verschiedener Literaturquellen in [2.1] kann man schlussfolgern, dass unter ungünstigen Randbedingungen die überwiegende Temperaturbeanspruchung sich in einem Bereich zwischen etwa -17 °C und +41 °C (Temperatur an der Fahrbahnoberfläche) bewegt.

Neuere statistische Klimadaten [2.113] aber auch punktuell erfasste Daten [1.13] berichten von höheren bzw. extremeren Lufttemperaturen und vor allem von Temperaturen auf Oberflächen von Fugenfüllungen bis zu +50 °C. In Anlehnung an die geforderten Leistungseigenschaften und die Bewertungsmethodik für Bauprodukte und Abdichtungssysteme der Ingenieurbauwerke im Bundesfern-

straßenbereich erscheint es angemessen, einen maßgebenden Temperatureinsatzbereich von -20 bis $+50$ °C zu berücksichtigen.

Für die Feuchteeinwirkungen aus Regen kann auf die Wetterstatistik [2.113] zurückgegriffen werden. Hierbei sind insbesondere die durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmengen (i. M. etwa 750 mm/Jahr) und eine mittlere Tagessumme der Sonnenscheindauer von etwa 4,5 h zu berücksichtigen.

Fazit:

Klimatische Beanspruchungen aus Lufttemperaturen, Luftfeuchtigkeit und Regenereignissen sowie Sonneneinstrahlung führen zu thermischen, hygri-schen und energetischen Randbedingungen, die nicht nur die zu berücksichtigenden mechanischen Beanspruchungen beeinflussen, sondern auch das Alterungsverhalten der organischen Fugenfüllmaterialien und - in Wechselwirkung mit der Betonfahrbahn - auch zu einem Teil die Dauerhaftigkeit des Fugenfüllsystems (Haftverbund) bestimmen. Zur Aufklärung und Kategorisierung der maßgebenden realen Beanspruchungen ist die Erfassung der klimatischen Beanspruchungen durch Temperatur Luftfeuchtigkeit erforderlich.

2.5.2 Bauliche und konstruktive Randbedingungen

Aus der Analyse des bisherigen Kenntnisstandes wird deutlich, dass die überwiegende Zahl an quantifizierten Einwirkungen auf Untersuchungen oder Messungen zurückgeht, die an Betondecken im festen Verbund zur Tragschicht durchgeführt wurden. Unter Berücksichtigung der zwischenzeitlichen Erkenntnisse zur Optimierung der Betonbauweise erfolgte mit Einführung der RStO 2001 ein Paradigmenwechsel, der zu veränderten konstruktiven und baulichen Randbedingungen führte, deren möglicher Einfluss bei der Kennzeichnung der maßgebenden Beanspruchungen von Fugensystemen derzeit noch unbekannt ist.

Bereits aus den Ausführungen in Kapitel 2.1 wird deutlich, dass z. B. die Auflagerbedingungen (mit oder ohne Geotextil) oder aber die Ausführung der Tragschicht Auswirkungen auf die Quantität - mutmaßlich auch auf die Qualität - der mechanischen Beanspruchungen haben werden.

Fazit:

Bei der Charakterisierung insbesondere der mechanischen Beanspruchungen von Fugen sind die

Auswirkungen der baulichen und konstruktiven Randbedingungen der derzeit maßgebenden Bauarten im Betondeckenbau (Deckenaufbau; Lagerungsbedingungen) auf das Verformungsverhalten zu berücksichtigen.

2.6 Ableitung relevanter Messparameter

Um ein umfassendes und praxisnahes Verständnis für die realen Beanspruchungen der Fuge bzw. des darin enthaltenen Fugenfüllsystems unter den Bedingungen des modernen Betondeckenbaus sowie der aktuellen Verkehrsbeanspruchungen zu entwickeln, sind unter Berücksichtigung der Erkenntnisse des Kapitels 2.1 zur Identifikation der maßgebenden Einwirkungen und eine Ursachenverknüpfung zu deren Bewertung

- mechanische Messparameter,
- klimatische Messparameter und
- Messparameter zur begleitenden Bewertung und Rückführbarkeit (Ursachenverknüpfung)

aufzunehmen.

2.6.1 Mechanische Messparameter

Für die Möglichkeit einer umfassenden Analyse der aus den verschiedensten Einwirkungen folgenden mechanischen Beanspruchungen ist es anzustreben, die im Fugenspalt kumulierenden Verformungen in den Messachsen

- in Fahrtrichtung (X-Achse),
- in Fugenrichtung bzw. quer zur Fahrtrichtung (Y-Achse) und
- vertikal (Z-Achse)

zu ermitteln (siehe Bild 3).

Unter Berücksichtigung bisher vorliegender Ergebnisse vor allem aus Messkampagnen der TU München (zusammengefasst z. B. in [2.1], [2.91], [2.92], [2.98] u.a.), Messungen der BAST [2.30] oder auch aktuellen Messkampagnen in [2.97] lässt sich schlussfolgern, dass horizontale Bewegungen in der Fahrtrichtung (hier: X-Achse) sich in aller Regel deutlich innerhalb eines Bereiches zwischen $+3$ mm (Aufweitung) und -1 mm (Stauchung) erwarten lassen. Beiträge zu Horizontalbewegungen im Fugenbereich liefern in jedem Fall Temperaturänderungen

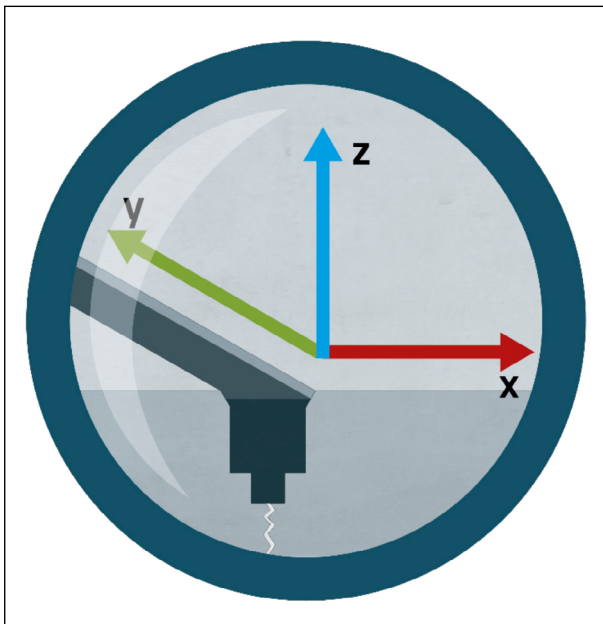


Bild 3: Festlegung der drei Messachsen mit farblicher Codierung für die spätere Auswertung

(saisonal; täglich bzw. aus spontanen Klimaerscheinungen wie Gewitterregen). Darüber hinaus besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit für verkehrsinduzierte derartige Bewegungen aus dem überrollenden Verkehr. Deshalb sind sowohl sehr hohe als auch niedrige Messfrequenzen zu gewährleisten.

Zur Festlegung eines erforderlichen Messbereiches für vertikale Verformungen erscheint aufgrund früherer Untersuchungen (zusammengefasst z. B. in [2.1]) der Bereich bis $\pm 0,30$ mm in aller Regel ausreichend. Neuere Untersuchungen [2.97] (siehe hierzu Tabelle 2) geben jedoch deutliche Hinweise auf größere mögliche Deformationen. Auch hier muss man davon ausgehen, dass sowohl Beiträge aus relativ langsam ablaufenden Relativverformungen aber auch aus schnell ablaufenden dynamisch wiederholenden Verformungen für eine praxisnahe Bewegungsmatrix zu berücksichtigen sind. Hierbei ist es neben der Feststellung von Verformungsamplituden von besonderem Interesse, Informationen zur Aufklärung des zeitlichen Verlaufs zu gewinnen. Deshalb sind auch für diese Messachse die Möglichkeiten verschiedener Messfrequenzen in hoher Auflösung zu berücksichtigen.

Bezüglich möglicher Verformungen in Fugenrichtung liegen derzeit noch keine Messergebnisse oder sonstige Berichte vor. Dies ist vor allem dem Umstand geschuldet, dass eine umfassende Betrachtung möglicher relativer Verformungen im Fugenbereich erstmals im Rahmen dieser Aufgabenstellung wissenschaftlich untersucht werden soll.

Unter Berücksichtigung des bisherigen Erfahrungs- und Erwartungshorizonts für Verformungen in Z-Achse kann man in Analogie auch entsprechende Verformungen in Y-Achse nicht grundsätzlich ausschließen.

Fazit:

Nimmt man die entsprechenden Diskussionsergebnisse mit dem betreuenden Fachgremium und den dort berichteten Erfahrungshintergrund zur Entscheidungsfindung hinzu, so lassen sich für die zu ermittelnden Deformationsparameter folgende Anforderungen zur Definition der erforderlichen Messbereiche sowie der anzustrebenden Auflösungen zusammenfassen:

- X-Achse: Messbereich ± 5 mm in einer anzustrebenden Auflösung von 0,01 mm
- Y-Achse: Messbereich ± 2 mm in einer anzustrebenden Auflösung von 0,01 mm
- Z-Achse: Messbereich ± 2 mm in einer anzustrebenden Auflösung möglichst bis 0,01 mm

Die zu realisierenden Messfrequenzen werden von der Forderung bestimmt, sowohl die Spitzenwerte infolge saisonaler bzw. langsam ablaufender Relativbewegungen im Fugenspalt als auch infolge hochdynamischer Vorgänge infolge Verkehrseinwirkung nachvollziehbar aufzuzeichnen. Da der Überrollvorgang eines Lkw bei einer Reifen-Auflage-Länge von 40 cm und einer Geschwindigkeit von 90 km/h nur 16 Millisekunden dauert ist eine Messfrequenz von über 62,5 Hz zu realisieren, um mindestens einen Messwert in diesem Intervall zu erhalten. Soll der dynamische Deformationsvorgang nicht nur quantifiziert, sondern auch die Art des Verlaufs erfasst werden, müssen für die höchsten Messfrequenzen Werte oberhalb 500 Hz realisiert werden.

2.6.2 Klimatische Messparameter

Für eine mögliche Zuordnung bzw. Rückführbarkeit klimatisch induzierter Verformungsanteile ist die Erfassung folgender meteorologischer Parameter zu berücksichtigen:

- Lufttemperatur
- relative Luftfeuchte

Dazu ist von folgenden praktikablen Messbereichen auszugehen:

- T: -25 °C bis $+60$ °C

- r. F.: 20 bis 95 %

Die Ermittlung der o. a. äußeren Klimaparameter soll in Messfrequenzen erfolgen, die auch den Verlauf spontan induzierter Klimaänderungen (z. B. sommerlicher Gewitterregen) messtechnisch erfassbar machen.

Von besonderem Interesse zur weiteren Aufklärung der Mechanismen thermisch induzierter Verformungen ist die ergänzende Ermittlung der Temperaturverteilung über den Querschnitt des Betondeckenaufbaus. Die Leistungsanforderungen an Messbereich und Messfrequenz für die entsprechenden Sensoren liegen aufgrund der aus der Wärmekapazität (Wärmespeicherfähigkeit) und Wärmeleitfähigkeit folgenden thermischen „Trägheit“ der Betondecke (gedämpfte und zeitlich verschobene Reaktion) deutlich unter denen für die atmosphärischen Sensoren.

Aufgrund der besonderen wissenschaftlichen Komplexität von Feuchtemessungen insbesondere in Massivbauteilen wird auf Feuchtemessungen im Straßenaufbau verzichtet. Die Differenzierung hygri- sch bedingter Verformungsanteile im Fugenbereich muss Gegenstand eigenständiger Forschungen sein.

Zur Überprüfung der Sensorfunktion und Einhaltung der Kalibrierkriterien als Grundlage für die Belastbarkeit der Messwertaussage wird zusätzlich die Temperatur im Sensorgehäuse überwacht.

Fazit:

Nimmt man die entsprechenden Diskussionsergebnisse mit dem betreuenden Fachgremium und den dort berichteten Erfahrungshintergrund zur Entscheidungsfindung hinzu, so lässt sich für die relevanten meteorologischen und klimabezogenen Messparameter folgende Vorgehensweise je Messstandort ableiten:

- Erfassung der meteorologischen Klimaparameter durch Lufttemperatur und relativer Feuchte im Temperaturmessbereich -25 bis $+60$ °C und Feuchtemessbereich 20 bis 95 % relativer Luftfeuchte
- die Messfrequenzen sollen sowohl die Erfassung langsamer als auch spontaner schneller Klimaänderungen ermöglichen
- Zusätzliche Informationen zu den meteorologischen Randbedingungen (z. B. Sonnenscheindauer; UV-Energieeintrag; Regendauer; Frost-

dauer etc.) können bei Bedarf aus statistischen Angaben z. B. DWD ergänzt werden

Alle weiteren Temperatursensoren im Betondeckenaufbau und im Sensor sollen den o. a. Leistungsbereichen genügen. Für die Spannweite abzudeckender Messfrequenzen lässt sich ein relevanter Bereich zwischen $2,7 \times 10^{-4}$ Hz (stündlich) bis zu $1,7 \times 10^{-1}$ Hz (minütlich) ableiten.

2.6.3 Messparameter zur begleitenden Bewertung und Rückführbarkeit

Für eine ursachenbezogene Rückführbarkeit der definiert aufzunehmenden verkehrsinduzierten dynamischen Verformungsdaten ist es notwendig, die auslösenden Verkehrslasten in Anlehnungen an aktuelle Kategorisierungsmodelle der Schwerverkehrsanalyse (z. B. [2.103]) zu erfassen. Dazu wird auf die Methode der Videoauswertung zurückgegriffen.

Fazit:

Unter Berücksichtigung der entsprechenden Diskussionsergebnisse mit dem betreuenden Fachgremium und den dort berichteten Erfahrungen, sollen folgende Messparameter aufgenommen werden:

- Ankopplung aufgenommener verkehrsdynamisch induzierter Verformungen des Fugenbereichs zur aktuellen SV-Verkehrsbeanspruchung im ersten Fahrstreifen durch Auswertung von Videoaufnahmen; hier ergeben sich Datenraten von 60 Hz (Bildwiederholrate)
- Zusätzliche Informationen zu den verkehrsdynamischen Randbedingungen (z. B. dynamische Lastkollektive) können bei Bedarf aus statistischen Angaben z. B. ortsnaher Zählstationen oder ggf. vorhandener Sensorik zur Verkehrszählung ergänzt werden

2.7 Stand der verfügbaren messtechnischen Lösungen

Aus der Analyse der nach wie vor in der Straßenbaupraxis dominierenden messtechnischen Lösungen zur Untersuchung von Lageänderungen benachbarter Betonplatten im Fugenbereich von Betondecken geht hervor, dass in einer möglichen Spannweite der Längenmessverfahren von der Einzelmessung mittels optischer Risslehre bis zur kontinuierlichen hochauflösenden dynamischen Sen-

sormessung im Wesentlichen in der Straßenbaupraxis nach wie vor Messungen zu Fugenöffnungsmaßen mit dem Gliedermaßstab oder - in der etwas vorteilhafteren Variante - mit dem kalibrierten Stahlmaßstab durchgeführt werden. Obwohl hiermit Untersuchungen selbst in der höchstbeanspruchten Rollspur möglich sind, ist bei der Bewertung von Praxisberichten und Informationen über Deformationsbeanspruchungen im Fugenbereich zu beachten, dass diese auf relativen Angaben basieren, die lediglich geringsten Anforderungen an Genauigkeit, Auflösungsvermögen und Reproduzierbarkeit erfüllen.

Im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Untersuchungen und objektbegleitenden Verformungsmessungen kommen bis in aktuelle Vorhaben hinein nach wie vor mechanische Messuhren oder bestenfalls Setzdehnungs-Messverfahren im Feld zum Einsatz [1.13], [2.11], [2.35], [2.37] oder [2.107]. Auch für diese Lösungen gelten im Prinzip die o. a. Informationsbeschränkungen, die sich aus dem Charakter von Einzelmessungen in Verbindung mit der limitierten Genauigkeit und Auflösungsvermögen ergeben. Hinzu kommt, dass zum Schutz der installierten Messmarken die Messebene oftmals aus dem Bereich der direkten und höchsten Beanspruchung (Rollspur) teilweise bis in den Bereich der Standspur oder an den Seitenstreifen verlegt wird.

Auf Basis dieser Verfahren kann den in Kapitel 2.4 aufgeführten Anforderungen weder hinsichtlich der erforderlichen Messbereiche, noch im Hinblick auf erforderliche Messwertauflösung und ebenfalls bezüglich der erforderlichen Messfrequenzen entsprochen werden. Des Weiteren ist eine Anordnung in der Rollspur nicht möglich. Von autonom funktionierenden und automatisierten Messlösungen, wie diese bereits für ausgewählte Oberflächenmerkmale Bestandteile der regelmäßigen Zustandserfassung und Zustandsbewertung von Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB-Verfahren) sind (z. B. [2.104]), ist man im Bereich der Fugen deshalb noch sehr weit entfernt.

Trotzdem hält auch der messmethodische Fortschritt insbesondere im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung der digitalen Technik und vor allem der digitalen Datenübertragung immer mehr Einzug im Bauwesen. Hierüber wird in den letzten Jahren zunehmend über Anwendungen beim Monitoring von Ingenieurbauwerken wie Energie- und Windkraftanlagen (z. B. in [2.52], [2.110]), Brückenbauwerken (z. B. in [2.69], [2.111], [2.112]) oder besonderen Hochbauten berichtet (z. B. in [2.108],

[2.109]). Als besonders vorteilhaft stellten sich dabei Sensoren auf der Grundlage elektrischer oder optischer Messprinzipien heraus.

Beim elektrischen Messen mechanischer Größen werden diese durch Nutzung physikalischer Effekte in elektrische Größen, häufig Spannungen, umgewandelt. Diese Spannungssignale werden digitalisiert und können weiterverarbeitet und gespeichert werden. Zur Umwandlung einer Längenänderung in eine Spannungsänderung steht eine Vielzahl von Sensoren basierend auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien zur Verfügung. Da es für den speziellen Anwendungsfall der Messung der Relativbewegung der Fugenkanten in allen drei Raumrichtungen bisher keine passende Lösung gibt, muss dieser Sensor aus zur Verfügung stehenden (kommerziell erhältlichen) Sensoren kombiniert oder aber neu entwickelt werden. Dabei sind die nachfolgend beschriebenen Anforderungen bzw. Kriterien zu beachten, von denen einige bei Nichterfüllung zum Ausschluss des Sensors bzw. Messprinzips führen.

Linearität:

Der Zusammenhang zwischen Längenänderung (Fugenbewegung) und Ausgangssignal (elektrische Spannung) des Sensors sollte möglichst linear sein. Dadurch wird die Kalibrierung vereinfacht und es ist eine gleichbleibende Empfindlichkeit über den Messbereich gegeben.

Messbereich:

Der Messbereich des Sensors muss etwas größer als die größte zu erwartende Fugenbewegung sein.

Auflösung:

Die kleinste zu erfassende Änderung des Eingangssignals muss eine Änderung des Ausgangssignals hervorrufen, die eindeutig, zuverlässig und reproduzierbar erfasst werden kann.

Frequenz:

Die Bauart des Sensors bzw. das Messprinzip müssen die zeitliche Auflösung der Erfassung dynamischer Fugenbewegungen infolge des Verkehrs erlauben.

Störgrößen:

Das Ausgangssignal des Sensors muss möglichst unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen wie Temperatur- und Feuchteänderungen sein.

Baugröße:

Das Messprinzip bzw. die Bauform kommerziell erhältlicher Sensoren muss eine Miniaturisierung des Fugensensors erlauben. Ziel ist es, diesen in die Fahrbahn (Rollspur) zu integrieren.

Widerstandsfähigkeit:

Die Sensoren und weitere Materialien müssen, sofern sie nicht durch ein Gehäuse geschützt werden können, resistent gegen Wasser, Tausalze und Kraftstoffe sein.

Absolute Messung:

Dem Ausgangssignal des Sensors muss jederzeit und ohne Kenntnis der vorangegangenen Messungen eindeutig eine Fugenweite zuordenbar sein. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten, Längen bzw. Längenänderungen elektrisch zu messen, würde eine vollständige Aufzählung den Rahmen dieses Berichtes sprengen. Die folgende Tabelle enthält deshalb nur eine Auswahl von Sensoren bzw. Messprinzipien, die aufgrund einer Recherche zur Realisierung eines Fugensensors in Betracht gezogen wurden.

Fazit:

Die in der Praxis überwiegend angewandten messtechnischen Lösungen zur Quantifizierung von Be-

wegungen im Fugenbereich zeichnen sich durch Einfachheit und Robustheit aus. Jedoch sind mit diesen Messmitteln die abgeleiteten Anforderungen bezüglich der erforderlichen mehrdimensionalen Messachsen, Sensoranordnung im hochbeanspruchten Rollbereich, der notwendigen abgestuften Messbereiche und Auflösungen sowie der erforderlichen breiten Spannweite an Messfrequenzen derzeit nicht realisierbar. Auch die erforderliche Miniaturisierung zur Minimierung des Eingriffs in den Straßenaufbau während der Messphase als auch bereits bei der Installation sowie der mechanische Schutz des Sensors unter den mechanischen und klimatischen oder sonstigen (chemischen) Beanspruchungen stellen derzeit noch ungelöste Problemstellungen dar. Entsprechend dieser Analyse und den Erfahrungen früherer und aktueller Messkampagnen ist zur Lösung dieser Fragestellung zur Quantifizierung der mechanischen Beanspruchungen ein neuartiger, eigenständiger und adaptierter Entwicklungsansatz für eine integrale Sensorlösung für andauernde Messkampagnen notwendige technische Voraussetzung.

Aus der Analyse der mittlerweile verfügbaren technischen Lösungen für eine leistungsfähige hochauflösende Wegmessung ergibt sich die grundsätzliche technische Machbarkeit für eine derartige Sensorentwicklung. Unter den spezifischen Leistungsanforderungen bieten sich insbesondere moderne

Messprinzip / Sensor	Vorteile	Nachteile
Akustisch Ultraschalllaufzeitmessung	<ul style="list-style-type: none"> • berührungslos • robust 	<ul style="list-style-type: none"> • unzureichende Empfindlichkeit/Auflösung • unzureichende Messfrequenz
Optisch Lasertriangulation	<ul style="list-style-type: none"> • berührungslos • robust • hohe Linearität • ausreichende Empfindlichkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • aktuell hoher Preis • aufgrund Bauform nur schwer in Fahrbahn integrierbar
Optisch digitale Bildkorrelation	<ul style="list-style-type: none"> • berührungslos • preiswerte Sensoren • kleine Bauform 	<ul style="list-style-type: none"> • empfindlicher Sensor • beschränkte Messfrequenz • aufwendige Signalverarbeitung
Wirbelstrom	<ul style="list-style-type: none"> • berührungslos • robust 	<ul style="list-style-type: none"> • eingeschränkte Linearität • eingeschränkte Empfindlichkeit im geforderten Messbereich
Induktiv	<ul style="list-style-type: none"> • (berührungslos) • robust • hohe Linearität • hohe Empfindlichkeit • kompakte Bauform 	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Ankopplung an beide Fugenflanken erforderlich
Resistiv	<ul style="list-style-type: none"> • robust • hohe Linearität • hohe Empfindlichkeit • kompakte Bauform 	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Ankopplung an beide Fugenflanken erforderlich • erfordert Schleifkontakte (begrenzte Bewegungsspielzahl)
Kapazitiv	<ul style="list-style-type: none"> • berührungslos • robust • einfache Bauform 	<ul style="list-style-type: none"> • reagiert empfindlich auf Feuchteänderungen

Tab. 1: Messprinzipien für eine innovative Sensorlösung mit Vor- und Nachteilen

induktive aber auch wirbelstrombasierte oder optische Methoden an. Darüber hinaus sind auch Kombinationen verschiedener Methoden denkbar.

2.8 Stand praktikabler Lösungen für das Datenmanagement

Mit der ausgewählten konstruktiven und messmethodischen Vorzugslösung für die Mess-Sensorik allein können Bewegungen im Fugenbereich nicht erfasst werden. Das der zu messenden Länge proportionale Ausgangssignal der axialen Sensoren muss in der Regel mithilfe von Messverstärkern und weiterführenden Prozessalgorithmen in ein digitales Wegsignal gewandelt werden. Anschließend sind die weitere Datenaufbereitung, Datenübertragung und Datenauswertung technisch zu realisieren.

Messmodule zur hochfrequenten digitalen Signalwandlung und -verstärkung für die Ausbildung von dezentralen Messlösungen im Feld (mögliche Betriebstemperaturen zwischen -20 bis $+60$ °C) mit der Möglichkeit einer weiterführenden Datenspeicherung und/oder -übertragung gehören mit den Möglichkeiten moderner digitaler Datenverarbeitung und IT-Technik heutzutage zum Stand der Technik. Dabei werden die Sensoren an Messverstärkermodule angeschlossen, die an das dem Sensor zugrundeliegende Messprinzip angepasst sind. Sie stellen die Versorgungsspannung für die Sensoren bereit und erfassen das Ausgangssignal. Für induktive, kapazitive oder Wirbelstromsensoren werden zur Versorgung Wechselspannungen benötigt. Hierbei hat sich eine Trägerfrequenz von 4800 Hz etabliert. Bei der Eigenentwicklung von Sensoren auf Basis eines dieser Prinzipien müssen diese auf eine derartige Trägerfrequenz abgestimmt werden.

Das proportionale Ausgangssignal der Sensoren wird in der Regel auch durch die Messverstärker digitalisiert. Typischerweise beträgt die Abtastrate bei der Digitalisierung mindestens 1000 Hz pro Kanal. Die Auflösung reicht je nach Typ von 12 bis 24 bit, was einer Einteilung des Messbereichs der Sensoren in $2^{12} = 4.096$ bzw. $2^{24} = 16.777.216$ Schritte entspricht. Für die geforderte Auflösung von 1/100 mm bei einem Messbereich von ± 5 mm bzw. 1/100 mm auf einen Messbereich von ± 2 mm genügt rechnerisch ein 12 bit-Analog-Digital-Wandler.

Es ist Stand der Technik, dass moderne Messverstärkersysteme über Speicher verfügen, in denen eine große Anzahl von Messwerten zwischengespeichert werden können, bevor sie über Schnittstellen wie USB, Ethernet oder auch drahtlos zur Weiterverarbeitung an einen Rechner übertragen werden.

Die Ankopplung der Module mittels Controller an einen PC mit spezieller Monitoring-Software eröffnet darüber hinaus nahezu unendliche Möglichkeiten der Modulsteuerung und des Daten-Pre-Processing.

Vor dem Hintergrund der besonderen Erfahrungen der BAM mit speziellen Sensor- und Datenmanagementlösungen für das Infrastruktur-Monitoring bzw. Bauwerks-Monitoring (z. B. [2.108], [2.109], [2.110], [2.111], [2.112]) kann auf bereits unter vergleichbaren Anwendungsbedingungen bewährte Lösungen für das Daten-Management zurückgegriffen werden.

2.9 Erstellung eines Pflichtenhefts

Im Ergebnis der Sachstands- und Problemanalyse, unter Berücksichtigung von Forschungsziel, spezifischen Anforderungen, technischen Möglichkeiten und besonderen Erfahrungen der BAM beim Bauwerks-Monitoring sowie in Abstimmung mit dem betreuenden Fachgremium und unter Beachtung der dort eingebrachten Erfahrungen wurde beschlossen, folgenden Vorgehensweise der BAM zur Problemlösung umzusetzen:

1. Kontinuierliche Erfassung der maßgebenden mechanischen und klimatischen Einwirkungen durch Signalerfassung mittels adaptierter Sensoren in der Deckschicht eines Betonfahrbahnbelags für hohe Beanspruchungen; Erfassung der mechanischen Messparameter sowohl in der (höchstbeanspruchten) Rollspur als auch in der Mitte der Rollspur; Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten der Betondecke; Erfassung von Lufttemperatur und Luftfeuchte
 - a. Kontinuierliche permanente Datenerfassung (24 h/7 d)
 - b. Kurzzeitige dynamische Datenerfassung (2 x täglich über 10 Minuten)
2. Signalumwandlung und Messwertverstärkung sowie Pre-Processing der Daten (Datenauswahl; -kategorisierung und -reduktion) vor Ort

3. Drahtlose Datenübertragung in automatisierten Modi zur BAM
4. Aufbereitung und Weiterverarbeitung der Daten mit spezifischer Datensoftware für Bauwerks-Monitoring und Datensicherung (Rohdaten; Datenauswertung)
5. Web-Visualisierung der Daten; Online-Bereitstellung nutzeraufbereiteter ausgewählter Messparameter
6. Diskontinuierlich intermittierende Erfassung begleitender Messparameter
 - a. Abschnittsweise punktuelle Kennzeichnung der Form einzelner Betonplatten des Messabschnittes
 - b. Abschnittsweise Kennzeichnung der Verkehrsbeanspruchung durch Schwerverkehr (zugeordnet zu Messphasen)

2.9.1 Mechanische Sensorik

Die mechanische Sensorik soll so ausgelegt sein, dass langsam ablaufende Bewegungen (z. B. aus Witterungseinflüssen) permanent erfasst und verfolgt werden. Dynamisch induzierte Bewegungen sollen regelmäßig zweimal pro Tag (Rush Hour) über einen Zeitraum von zehn Minuten aufgezeichnet werden.

Das Lösungskonzept soll folgenden Anforderungskriterien entsprechen:

- sicheres Funktionsverhalten unter Temperaturänderungen im Bereich -20 bis $+50$ °C unter Eigentemperaturüberwachung
- sicheres Funktionsverhalten unter Feuchtebedingungen bis 100 % r. F.
- sicheres Funktionsverhalten sowohl in alkalischem als auch in saurem Milieu; unempfindlich gegen kurzzeitige Kontakte zu Ölen und Kraftstoffen
- sicheres Funktionsverhalten unter Druckbeanspruchung ≥ 1 N/mm²
- breites Messfrequenzspektrum
 - mindestens 1 Messwert pro Stunde zur Erfassung langsam ablaufender Bewegungen ($2,7 \times 10^{-4}$ Hz)

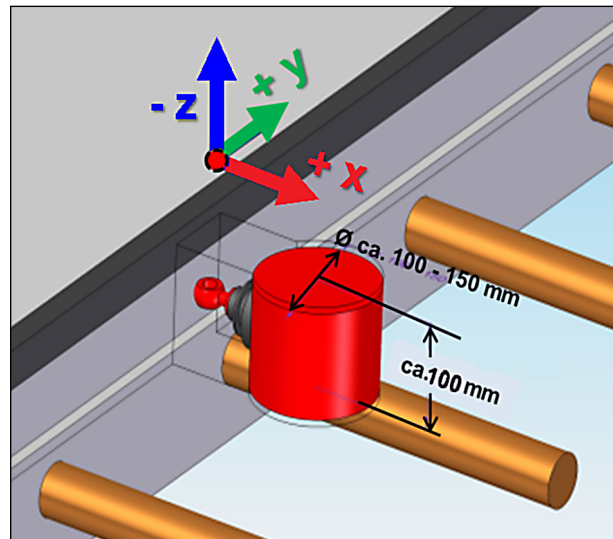


Bild 4: Lösungskonzept Sensor/Sensor-Umhausung

- mindestens 1 Messwert pro 0,01 s (100 Hz) zur Erfassung verkehrlich induzierter Bewegungen

- miniaturisierte geometrische Sensorausführung möglichst $< \varnothing 100$ mm; H: 100 mm
- in Betondecke integrierbar bei baustellengerecht vereinfachten Montagebedingungen

2.9.2 Klima- und Temperatursensorik

In Abstimmung mit dem Betreuungsgremium wurde festgelegt, jede Mess-Station mit Sensoren zur Kennzeichnung des lokalen Klimas (Temperatur; Luftfeuchtigkeit) auszustatten. Zur Diskussion und Rückführbarkeit von Bewegungsmessungen soll an jeder hierfür ausgewählten Messstrecke zusätzlich eine Temperatursensorik (vier Sensoren) in fachlich sinnvoller Verteilung über die Querschnittshöhe der Betondecke angeordnet werden. Die Temperaturmessung im Inneren des Sensorgehäuses dient der Überwachung und Plausibilitätsbewertung der Sensormesswerte.

Das Lösungskonzept zur Klima- und Temperatursensorik soll folgenden Anforderungskriterien entsprechen:

- sicheres Erfassen von Lufttemperaturänderungen im Bereich von -40 bis $+80$ °C mit einer Auflösung von $0,1$ °C in variablen Messfrequenzen (Regelanforderung: 1 Messwert pro Stunde; Maximalforderung: 1 Messwert pro Minute)
- sicheres Erfassen von Luftfeuchtebedingungen im Bereich 5 bis 95 % r. F. mit einer Auflösung von 1 % r. F. in variablen Messfrequenzen (Re-

gelanforderung: 1 Messwert pro Stunde; Maximalforderung: 1 Messwert pro Minute)

- sicheres Erfassen von Betontemperaturänderungen im Bereich von -20 bis +50 °C mit einer Auflösung von 0,1 °C in variablen Messfrequenzen (> 1 Messwert pro Stunde)
- sicheres Funktionsverhalten sowohl in alkalischem als auch in saurem Milieu; unempfindlich gegen kurzzeitige Kontakte zu Ölen und Kraftstoffen
- robuste, miniaturisierte geometrische Sensorausführung
- in Betondecke integrierbar bei baustellengerecht vereinfachten Montagebedingungen

3 Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung eines Messsystems

3.1 Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung eines innovativen Deformationssensors

3.1.1 Extraktion geeigneter robuster Messprinzipien

Zur Bereitstellung eines innovativen Deformationssensors für die Erfassung der Relativbewegung von Fugenflanken in Betonautobahnen wurde eine Studie zu möglichen Messprinzipien durchgeführt (siehe Tabelle 1).

Beurteilungskriterien für eine Sensorauswahl sind:

- Kombinationsfähigkeit zur Erstellung eines mehraxialen Sensorsystems
- Minimierte Baugröße
- Robustheit des Messprinzips
- Hohes Auflösungsvermögen über einen großen Messbereich hinweg
- Wiederverwendbarkeit

Nach diesen Kriterien wurden drei Entwicklungsansätze verfolgt und zu ersten Prototypen entwickelt.

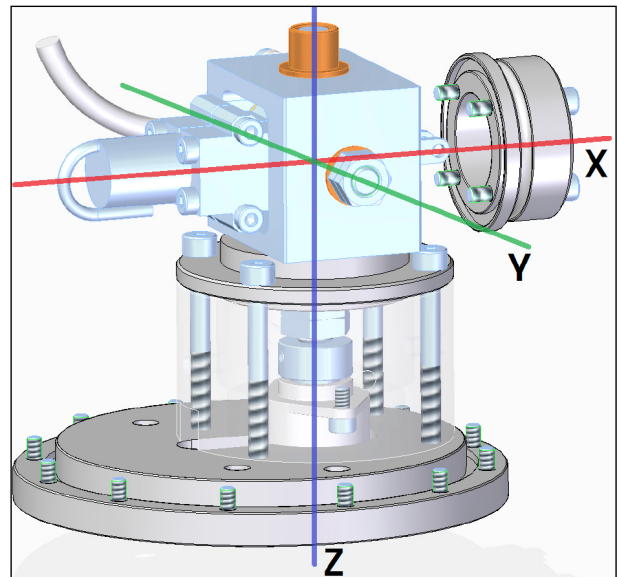


Bild 5: Das Innere des elektro-mechanischen Sensorsystems mit den drei Raumachsen

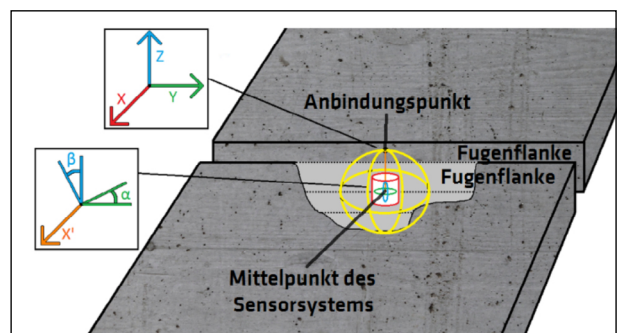


Bild 6: Koordinatensystem des Sensors und des Anbindungspunktes

3.1.2 Entwicklung eines elektro-mechanischen Lösungsansatzes

Der elektro-mechanische Entwicklungsansatz besteht aus einem induktiven Wegaufnehmer und zwei Drehwinkelgebern.

In der X-Achse befindet sich ein induktiver Wegaufnehmer. Zur Messung der beiden anderen Achsen kommen Drehwinkelgeber zum Einsatz.

Aufgrund der gewählten konstruktiven Lösung des Messensors, die in einer Zusammenführung der drei Messachsen in einem Punkt besteht (siehe Bild 5 und Bild 6), bedarf es einer weiteren Umrechnung, bei der die vom Sensorsystem erfassten Kugelkoordinaten in kartesische Koordinaten umgewandelt werden.

Die Umrechnung erfolgt mit folgenden allgemeinen Gleichungen:

$$X = x' \cdot \cos\alpha \cdot \sin\beta$$

[1]

$$Y = x' \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \quad [2]$$

$$Z = x' \cdot \cos \beta \quad [3]$$

Aufgrund der Robustheit sowie des am weitesten realisierten Fortschritts dieser Sensorlösung kam diese letztendlich in situ zum Einsatz.

3.1.3 Entwicklung eines elektro-magnetischen Lösungsansatzes

Der elektromagnetische Ansatz beruht auf drei Spulensystemen, zwischen denen ein Metallwürfel platziert ist. Der Vorteil dieses Lösungsansatzes besteht vor allem in der Möglichkeit der Miniaturisierung, da alle Messachsen durch geschickte Anordnung in einem Sensor umgesetzt werden können. Da sich die Komponenten der Sensorik nicht berühren

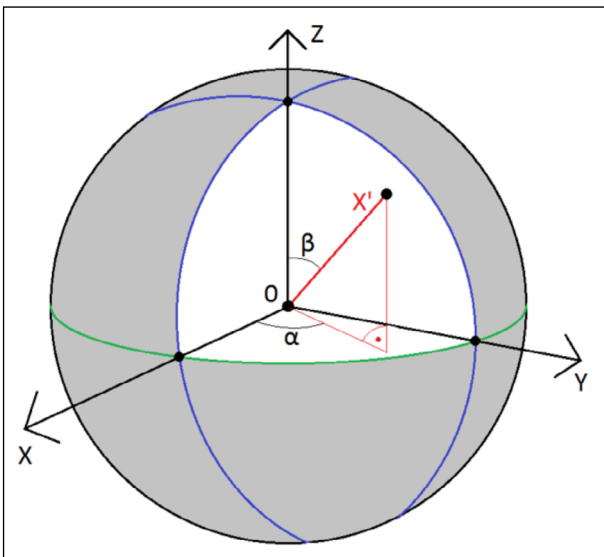


Bild 7: Berechnung von Kugelkoordinaten

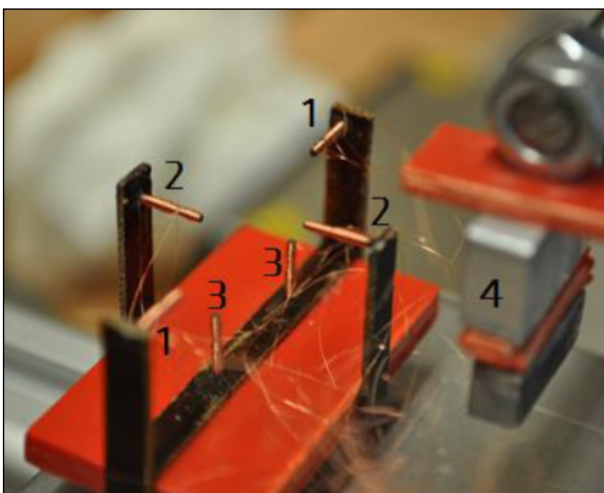


Bild 8: Erste Anordnungsstudie für Funktionstests eines elektromagnetischen Ansatzes mit drei Spulensystemen

ren ist dieser Vorgehensweise zudem mechanisch verschleißfrei.

In Bild 8 sind die drei Spulensysteme mit Zahlen für alle drei Raumrichtungen gekennzeichnet. Nummer 1 erfasst Bewegungen in x-Richtung, Nummer 2 die in y-Richtung und 3 die in z-Richtung.

Im endgültigen Aufbau sind die beiden z-Spulen einander gegenüberliegend angeordnet. Der Block 4 ist aus ferromagnetischem Metall, das im Spulensystem platziert wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der Block 4 in Bild 8 außerhalb der Spulen angeordnet.

3.1.4 Entwicklung eines optischen Sensors

Einen weiteren Ansatz zur Erfassung der relativen Bewegung der Fugenflanken stellt ein Ansatz mit optischer Messung dar. Die Vorteile sind der berührungslose Messansatz und die Möglichkeiten moderner digitaler Bildauswertung. Der kompakte Aufbau lässt sich mit einer technischen Lösung nach dem Prinzip der Lochkamera realisieren, da keine sensible Optik benötigt wird und somit kein Fokussieren nötig ist.

Eine Lochkamera besteht aus einer lichtundurchlässigen Trennlage zwischen Objekt und Bildsebene und einem geeigneten bildgebenden Bildsystem. Durch eine definierte Öffnung, in dem sich alle Lichtstrahlen bündeln, wird ein Objekt kopfüber und seitenverkehrt auf dem Bildsystem abgebildet. Erste Tests zeigten, dass dieser Ansatz möglich ist und im Labor vielversprechende Ergebnisse lieferte:

In Y- und Z-Richtung funktioniert der Prototyp. Die Verschiebungen können auch mit bloßem Auge erkannt werden (siehe Bild 10), eine automatisierte Auswertung mit LabVIEW wurde bereits realisiert.

In X-Richtung konnten bisher keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden (siehe Bild 11).

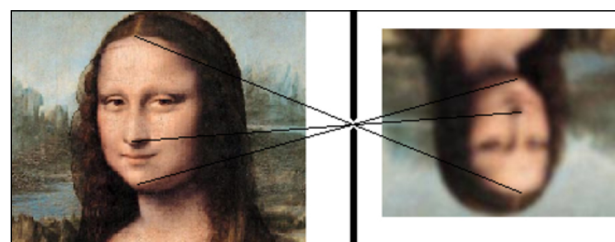


Bild 9: Prinzip einer Lochkamera

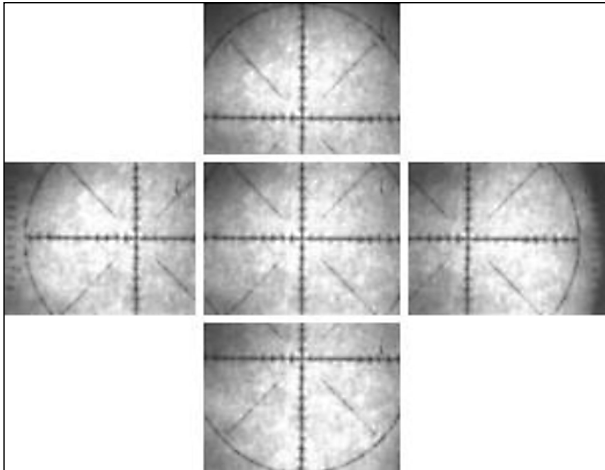


Bild 10: Verschiebung des Referenzbildes um jeweils 2 mm in y- und in z-Richtung

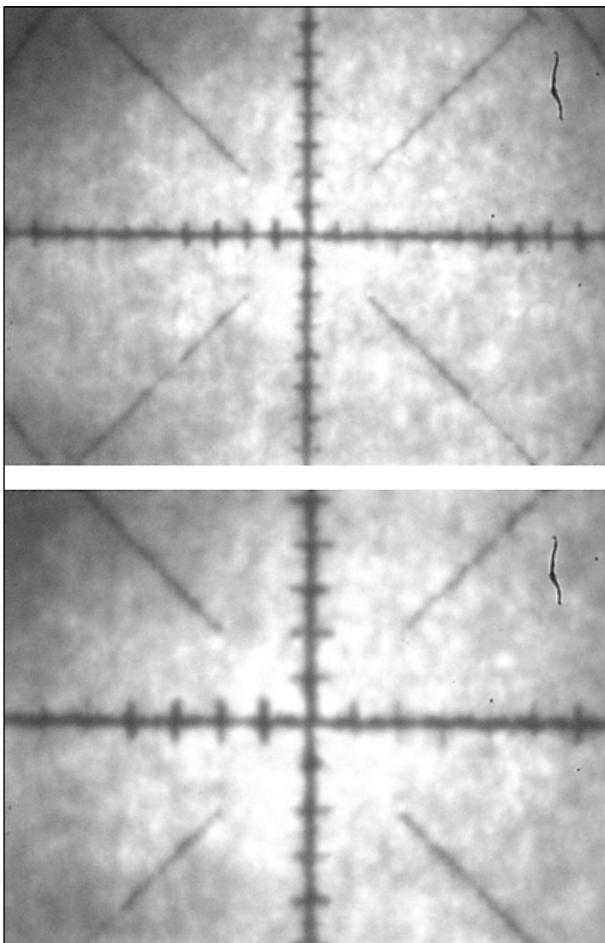


Bild 11: Annäherung 4 mm in x-Richtung

3.1.5 Bereitstellung einer robusten Sensor-Umhausung

Für den Einbau in eine Betonautobahn und der Vorgabe der direkten Überrollung ist eine robuste Sensorumhausung nötig, die einer Belastung von mindestens 1 N/mm^2 standhalten muss. Diese wurde durch eine Edelstahlumhausung realisiert. Die Verbindungsstellen sind mit Gummiringen versehen

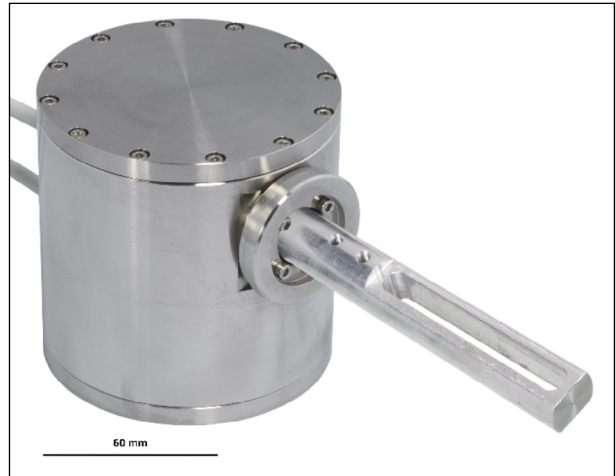


Bild 12: Sensorsystem mit Gehäuse aus V4a-Edelstahl

bzw. mit Kabeldurchführung und Faltenbalg, welche ein Eindringen von Schmutz, Wasser, Lauge, Säure und Öl/Benzin verhindern sollen. Folgende Vorgaben wurden dabei eingehalten (bzw. übertroffen):

- Mechanische Belastbarkeit
 - Vorgabe: 1 N/mm^2
 - Ist-Wert: $1,76 \text{ N/mm}^2$

Im Ergebnis eines Bemessungsprozesses durch die Konstruktionsabteilung der BAM wurde eine Dimensionierung der Sensor-Umhausung festgelegt, welche die Vorgabe von 1 N/mm^2 mit einer aufnehmbaren Druckbeanspruchung von $1,76 \text{ N/mm}^2$ weit übertrifft und damit sicher einer Einzelradlast von 12 t bzw. Achslast von 24 t standhält (bei einer derzeit maximal zulässigen Achslast von 12,5 t).

- Kompakte Bauweise
 - Ø: 100 mm
 - Höhe: 100 mm
- Spritzwasserfest
- Korrosionsfest
- Säurebeständig
- Laugebeständig

3.2 Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung einer Lösung zur Datenerfassung, -übertragung, -speicherung und -auswertung

Die Datenübertragung an die BAM wurde mit einem Industrie-PC via Internet realisiert. In der fertigen

Mess-Station ist ein PC, ein Router mit zwei SIM-Karten und eine Antenne für die redundante Übertragung der Daten an die BAM enthalten. Die Messdaten werden zusätzlich vor Ort auf einer Festplatte gespeichert. Dieser hat eine Speicherkapazität zur Absicherung einer bis zu 1-jährigen Messkampagne.

3.2.1 Bereitstellung zeitaufgelöster Messprozeduren

Zur Reduktion der Datenmenge wurde das automatische Mess-Regime in zwei Modi eingeteilt:

- Zu zwei definierten Zeiten werden für einen gewissen Zeitraum alle Mess-Daten mit 2 kHz gespeichert. Derzeit ist die Mess-Station so eingestellt, dass um 09:00 Uhr und um 15:30 Uhr (Rush Hour) dieser Modus für zehn Minuten aktiviert ist
- In der restlichen Zeit werden die Daten alle vier Sekunden klassiert und der Mittel-, Maximal- und Minimalwert gespeichert. Zusätzlich werden pro Stunde einmal alle Messdaten der größten Verformungsänderung gespeichert (siehe Bild 13)

3.2.2 Bereitstellung redundanter Speicherlösungen

Die Messdaten werden auf dem PC vor Ort gespeichert, an die BAM übertragen und können zusätz-

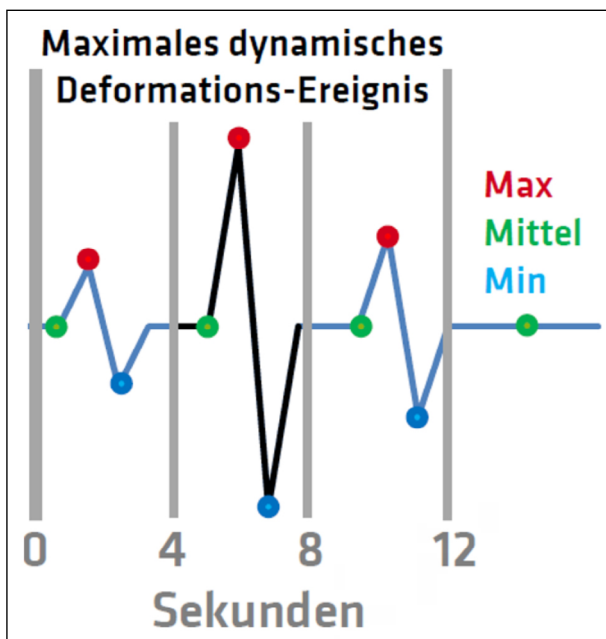


Bild 13: Mess-Regime von 09:10 Uhr bis 15:00 Uhr und von 15:30 Uhr bis 09:00 Uhr

lich vor Ort auf einer zweiten Festplatte, auf einem USB-Stick sowie auf der Festplatte im Datenlogger gespeichert werden.

Wenn die Daten wegen Netzüberlastung nicht versendet werden können, werden die Daten automatisch zu einem späteren Zeitpunkt versendet.

3.2.3 Bereitstellung von Auswerte- und Darstellungsroutinen

Es wurden Auswerte- und Darstellungsroutinen von der BAM erstellt. Diese greifen auf die automatisiert vorgefilterten Daten zurück und können diese auf einer eingerichteten Website zur Verfügung stellen. Dabei sollte beachtet werden, dass dies lediglich der Funktionsüberprüfung dient und keine vollständige Interpretation der Messdaten ersetzt.

3.3 Entwicklungsarbeiten zur Bereitstellung einer geschlossenen Mess-Station

Im März 2018 konnte auf dem Testgelände dura-BASt im Autobahnkreuz Köln-Ost eine geschlossene Mess-Station aufgebaut werden. Diese sendet automatisiert Daten an die BAM. Die Möglichkeit der Vor-Ort-Auswertung ist ebenfalls gegeben.

3.3.1 Beschreibung des Schaltschranks

Um die Mess-Station möglichst kompakt und reproduzierbar zu gestalten wurde ein handelsüblicher DIN-genormter Schaltschrank als Umhausung für die benötigten Hauptbestandteile der Elektronik und Technik verwendet. Vor der Aufstellung in situ wurde aus Sicherheitsgründen eine elektrische Verträglichkeitsprüfung nach VDE 0105-100 durchgeführt.

In Bild 14 sieht man das Innere des fertig konfektionierten Schaltschranks:

Oben links ist die Heizung zu sehen (mit einem H gekennzeichnet), rechts daneben befinden sich vier Messverstärker, der erste für den Temperaturgradienten, die weiteren drei für zwei Sensorsysteme (in diesem Fall 1R und 1M in der Rollspur an der Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten sieben und acht bzw. neun und zehn). Rechts daneben ist die Spannungsversorgung für die Drehwinkelgeber (Netzteil mit einer Ausgangsspannung von 5 Volt; SN 5). In der Mitte befindet sich der Router (blauer

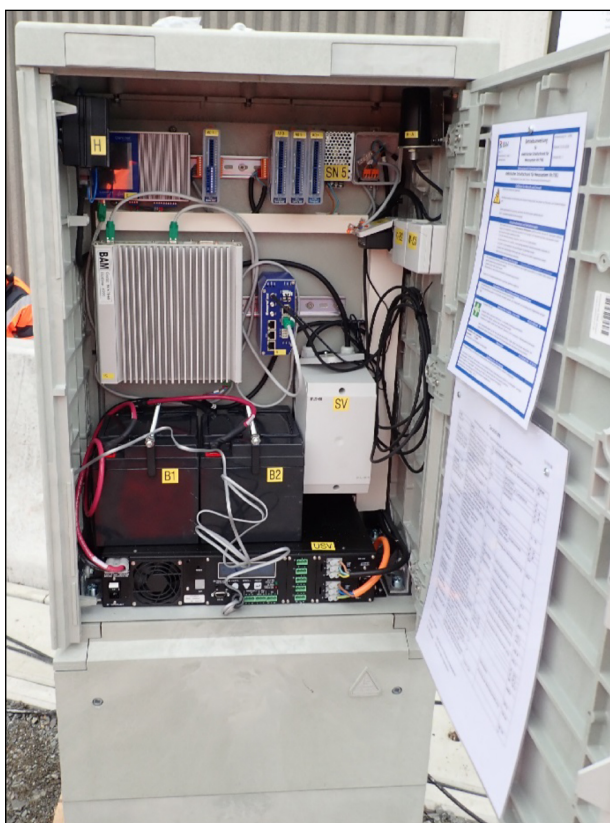


Bild 14: Fertig konfekionierter Schaltschrank von innen mit allen darin befindlichen Komponenten

länglicher Kasten), links daneben ist der Mess-PC, von dem hier hauptsächlich die Kühlrippen zu sehen sind. Die Haupt-Spannungsversorgung bzw.



Bild 15: Fertig konfekionierter Schaltschrank mit Sockel von vorne

-Verteilung (SV) ist in dem grauen Kasten rechts unterhalb des Routers untergebracht. Im unteren Bereich liegt die Unterbrechungsfreie Spannungsversorgung (USV), auf der die beiden Puffer-Batterien (B1 und B2) stehen. An der Tür ist oben das Sicherheitsdatenblatt angebracht und unten eine Liste mit allen Komponenten und Abkürzungen.

In Bild 15 ist der fertig konfekionierte Schaltschrank abgebildet. Um einen schonenden Transport zu ermöglichen befindet sich der Schaltschrank auf einer Holzpalette. An dem Beton-Sockel befinden sich drei halbkreisförmige Aussparungen zur Durchführung der Versorgungs- und Messkabel.

3.3.2 Konfektionierung eines Mess-Verteilers

Um das Signal-Rauschen möglichst klein und damit die Sensorsystemauflösung hoch zu halten sind alle analogen Sensoranschlussleitungen so kurz wie möglich ausgelegt. Um dennoch im Aufbau relativ flexibel zu sein wurde eine Länge von zehn Metern als Kompromiss gewählt. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, die A/D-Wandler so nah wie möglich an der mit Sensoren bestückten Fuge aufzustellen.

Aus diesen Gründen sind die drei A/D-Wandler, die für zwei Sensorsysteme an einer Fuge benötigt werden, jeweils in einem wasserdichten Gehäuse in Fugennähe mit einer 5 Volt Spannungsversorgung untergebracht. Das Gehäuse wurde bei der derzeitigen Mess-Station an einer Metallstange angebracht an der sich, zum zusätzlichen Schutz vor klimatischen Einflüssen, ein Dach befindet (siehe Bild 16).

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass nach der Kalibrierung, Überprüfung und Erprobung der Sensorsysteme die Kabel weder verlängert noch gekürzt werden dürfen.



Bild 16: In situ installierter Messverteiler hinter der Leitplanke

3.3.3 Überprüfung der Funktionsfähigkeit der unterbrechungsfreien Spannungsversorgung

Innerhalb der Mess-Station befindet sich eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung (USV) mit zwei Puffer-Batterien. Falls es zu einem kurzzeitigen Stromausfall kommt, kann die USV die Mess-Station weiterhin versorgen, bis der Ausfall behoben ist. Die Puffer-Batterien verfügen jeweils über eine Nennspannung von 12 Volt und eine Speicherkapazität von 40 Ah. Je nach Betriebskonfiguration (entweder Vor-Ort-Auswertung mit angeschlossenen Monitor, Tastatur und Maus oder im reinen Mess-Modus) kann die USV einen Stromausfall von zehn bis fünfzehn Stunden überbrücken. Im Normalfall dauern Stromausfälle weniger als 15 Minuten.

Am 23.03.2018 und am 12.04.2018 wurde der Anschluss zur Spannungsversorgung für jeweils eine Stunde unterbrochen.

Sowohl das Umschalten vom Normalbetrieb auf den Notstrombetrieb, der Notstrombetrieb über eine Stunde als auch das anschließende Zurückschalten auf Normalbetrieb fand ohne Einschränkung der Leistungsfähigkeit der Mess-Station statt.

Fazit:

Die USV funktioniert und kann die Mess-Station über die normale Dauer eines Stromausfalls versorgen.

3.3.4 Erprobung der Datenübermittlung im Feld, Multi-client Zugriff und automatisierte Auswertung

Am 23.03.2018 sowie am 11.04.2018 wurde die Funktionsfähigkeit der Mess-Station beim Anschluss an eine Spannungsversorgung geprüft. Dieses Szenario kommt einem längeren Stromausfall gleich, da die USV nur einen kurzen Zeitraum (10-15 Stunden) überbrücken kann.

Die Konfiguration der Mess-Station sieht vor, dass in solch einem Fall die Messung automatisch startet. Dafür sind folgende Schritte erforderlich:

- Automatisches Hochfahren des Mess-PCs bei Vorliegen einer Versorgungsspannung
- Automatischer Start der Messungen der Messverstärker bzw. A/D-Wandler
- Automatischer Start der Mess-Software (MONI®)

- Automatisches Verbinden mit dem BAM-Netz via Internet und verschlüsselte Übermittlung der Daten an BAM-Server

Die Tests an beiden Tagen zeigten, dass die Einrichtung des Mess-PCs erfolgreich im Sinne der Aufgabenstellung war.

Für die automatisierte Auswertung und Darstellung auf der eingerichteten Website sind komplette Tages- bzw. Monatsdatensätze erforderlich. Ein Test konnte aufgrund der fehlenden langfristigen Spannungsversorgung vor Ort bisher nicht stattfinden.

Fazit:

Der automatische Start der Messungen sowie die Übermittlung der Messdaten an die BAM bei Vorliegen einer Spannungsversorgung funktioniert. Die automatisierte Auswertung konnte bisher aufgrund fehlender Spannungsversorgung nicht stattfinden.

3.3.5 Beschreibung des Sensorsystems zur Messung des vertikalen Temperaturgradienten der Betondecke (Temperatur-Array)

Um temperaturbedingte Beanspruchungen der Betonfahrbahnplatten bewerten zu können wird der vertikale Temperaturgradient mit vier in verschiedener Höhe eingebrachten Temperatursensoren erfasst.

Zur exakten Positionierung der Temperaturmessfühler in der Betondecke wurde eine Vorrichtung angefertigt, mit der alle Temperaturmessfühler auf einmal eingebracht werden können. Um schnell auf verschiedene Bauhöhen reagieren zu können wurden mehr Sensoren als nötig in die Positioniervorrichtung eingebracht. Die maximale Anordnung sieht sechs Temperaturmessfühler in folgenden Tiefen vor:

- 1, 5 cm ab Oberkante Betondecke
- 3,5 cm ab Oberkante Betondecke
- 5,5 cm ab Oberkante Betondecke (nicht angeschlossen)
- 13,5 cm ab Oberkante Betondecke
- 20,5 cm ab Oberkante Betondecke
- 25,5 cm ab Oberkante Betondecke (nicht eingebracht, Betondecke 23 cm)

Bei den sechs Temperatursensoren handelt es sich um Platin-Widerstandstemperaturfühler (Pt100).

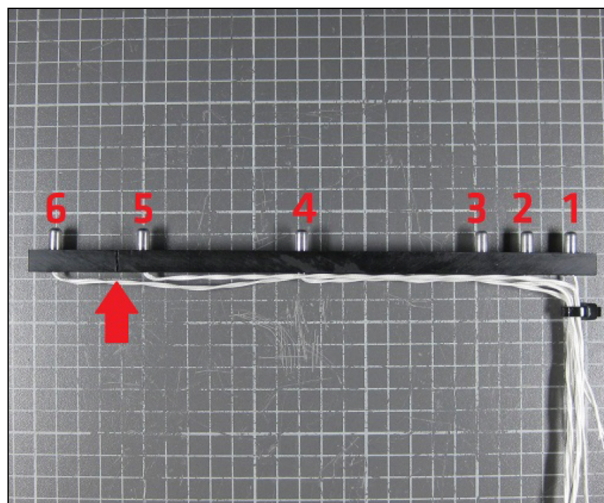


Bild 17: Vorrichtung zur Positionierung der Temperaturmessfühler, der Pfeil markiert eine Sollbruchstelle

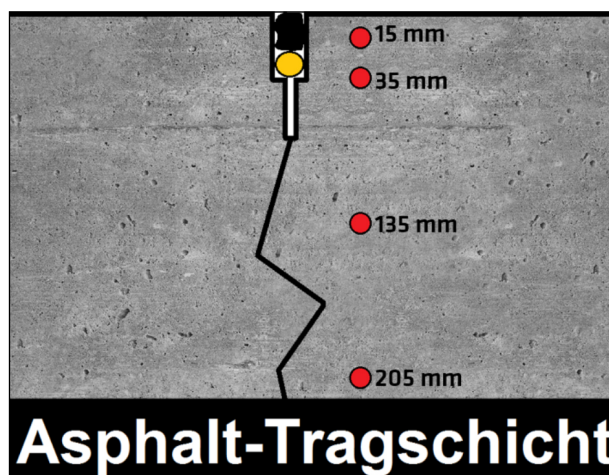


Bild 18: Messkonfiguration in situ, derzeit angeschlossene Temperaturmessfühler in der Betonfahrbahnplatte 8

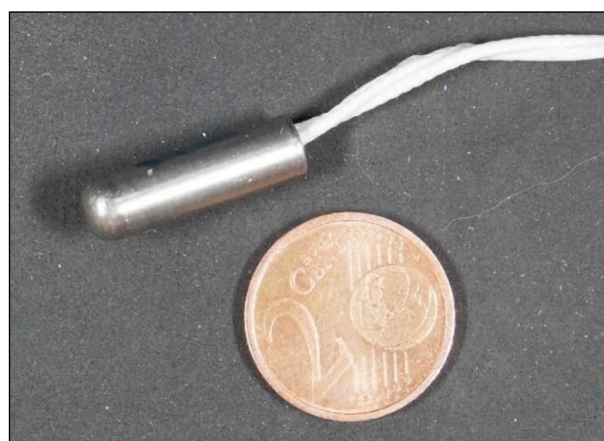


Bild 19: Größenvergleich eines Pt100 mit Metallgehäuse und Anschlussdrähten

Pt100 sind resistive Temperatursensoren und zeichnen sich durch ihre sehr einfache Handhabung und hohe Präzision aus. Des Weiteren sind Pt100 genormt und müssen nicht kalibriert werden. Derartige Messlösungen sind bewährt und praxistauglich. Die Auflösung beträgt im relevanten Temperaturbereich

zwischen 0,5 und 0,1 K. In der Regel können Pt100 Sensoren einfach und ohne Neukalibrierung ausgetauscht werden. In Vierleitertechnik angeschlossen hat die Kabellänge keinen Einfluss auf den Messwert, was die Handhabung erleichtert.

Pt100 sind außerdem mit ihren geringen Abmessungen sehr leicht in der Sensorumhausung unterzubringen.

3.3.6 Beschreibung der Sensorik zur Erfassung des Umgebungsklimas in situ

Um das Umgebungsklima zu erfassen und damit ggf. eine breitere Interpretationsgrundlage für die Fugenbewegungen zu schaffen wurde ein Sensorsystem in unmittelbare Nähe zu den gemessenen Fugen unter dem Messverteiler angebracht. Es wurde auf ein handelsübliches Sensorsystem zurückgegriffen, dass vorkalibriert ist und nur an die Messverstärker angeschlossen werden muss.

Dieses verfügt über folgende technische Daten:

- Rel. Luftfeuchtigkeit: 0-100 %
- Genauigkeit: $\pm 2\%$
- Temperatureinfluss $<10^{\circ}\text{C}$, $>40^{\circ}\text{C}$: $<0,1\%/K$ zusätzlich
- Temperatur: $-30 - +70^{\circ}\text{C}$
- Genauigkeit: $\pm 0,2\text{ K}$
- Temperatureinfluss $<10^{\circ}\text{C}$, $>40^{\circ}\text{C}$: $\pm 0,007\text{ K/K}$ zusätzlich

3.3.7 Beschreibung der Sensorik zur Kennzeichnung der Verkehrsbeanspruchung

Um die Relativbewegungen der Fugenflanken mit Verkehrereignissen abgleichen zu können, wurde an der Mess-Station eine Videokamera installiert.

Dabei handelt es sich um eine Outdoor-fähige IP-Kamera, die mittels PC angesteuert werden kann. Folgende technische Forderungen wurden dabei eingehalten bzw. übertroffen:

- Temperaturbeanspruchung: -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ (oder Gehäuse mit Temperaturschutz)
- Wasserfestigkeit: Die Kamera benötigt ein Gehäuse, sodass keinerlei Wasser von außen eindringen kann
- relative Luftfeuchtigkeit zwischen 20 und 95 %
- Auflösung > 1 Megapixel
- Messrate > 30 Bilder pro Sekunde

Es muss darauf geachtet werden, dass die Kamera so ausgerichtet wird, dass keine Kennzeichen und keine Gesichter der Fahrzeuginsassen erfasst werden und weitere Identitätsmerkmale der Fahrzeuge ggf. automatisch gelöscht werden, um der Datenschutzgrundsatzverordnung zu entsprechen.

3.3.8 Fazit zur Mess-Station

Schlussendlich wurde eine Mess-Station entwickelt und bereitgestellt (siehe Bild 20). Diese besteht aus:

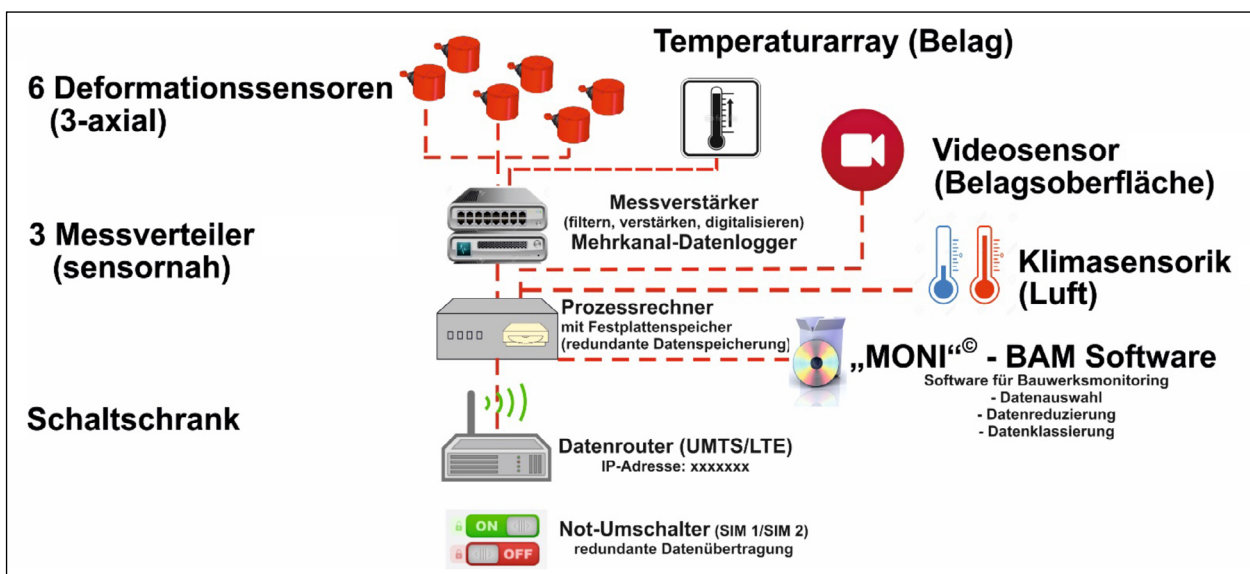


Bild 20: Schema einer Mess-Station

- bis zu sechs 3D-Sensorsysteme
- Messverteiler zur ortsnahen Signalerfassung
- Schaltschrank für den Betrieb vor Ort und Unterbringung eines Mess-PCs
- Temperatur-Array zur Ermittlung des Temperaturgradienten im Betonfahrbahnbelag
- Sensor zur Erfassung der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchtigkeit
- Videokamera zur Aufzeichnung der Verkehrsbelastung

Eine vorkonfektionierte Mess-Station konnte am 22. und 23.03.2018 auf dem Gelände der duraBAST installiert werden. Sowohl die Messwert-Erfassung und die Daten-Aufbereitung vor Ort als auch die Übertragung an den Daten-Server der BAM funktionierten wie vorgesehen. Auch die kurzzeitige Unterbrechung der Spannungsversorgung führte nicht zum Erliegen der Funktionsfähigkeit. Ein erneuter Anschluss nach 19 Tagen Trennung von der Versorgungsspannung am 11.04.2018 führte ebenfalls zum gewünschten automatischen Hochfahren, Messen und Versenden der Daten. Alle weiteren Anforderungen an die Mess-Station, wie die elektrische Sicherheit, die Möglichkeit der Vor-Ort-Auswertung und die Überbrückung von Stromausfällen wurden ebenfalls erfüllt.

3.4 Validierung der Sensorik und Datenverarbeitung

Die Validierung der Sensorik dient dem Zweck, der Ermittlung der Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit gemäß DIN ISO 5725 (siehe Bild 21).

Definitionen nach DIN ISO 5725

- Richtigkeit ist das Ausmaß der Annäherung zwischen dem Mittelwert aus einer großen Serie von Ermittlungsergebnissen und einem anerkannten Bezugswert.

Richtigkeit = systematische Abweichung

- Präzision ist ein Maß dafür, wie gut verschiedene Messungen miteinander übereinstimmen. Für Präzision gab es früher den Begriff „Wiederholgenauigkeit“.

Präzision = Streuung

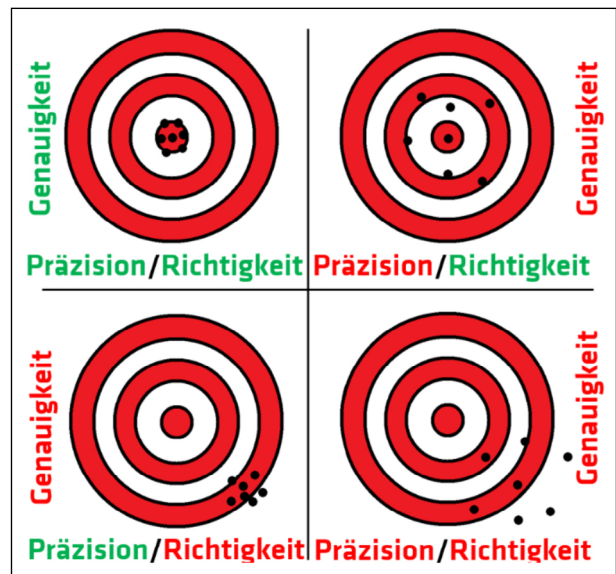


Bild 21: Darstellung der Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit

- Genauigkeit ist das Ausmaß der Annäherung zwischen einem Ermittlungsergebnis und dem anerkannten Bezugswert.

Genauigkeit = Richtigkeit + Präzision

Wie genau ein Sensorsystem ist, hängt von dem Bezugsrahmen ab, in obiger Analogie also von der Größe der Zielscheibe.

Die Validierung der Sensorik beruht zunächst auf einer Laborüberprüfung der Einzelsensoren und wird in einem zweiten Schritt vervollständigt durch eine Überprüfung unter Praxisbedingungen.

Im Folgenden wird die mehrstufige Validierung im Labormaßstab beschrieben. Die Mehrstufige Absicherung validierter Leistungsfähigkeit besteht aus den folgenden Einzelschritten:

- Unabhängige Überprüfung der werkskalibrierten Einzelsensoren im Anwendungstemperaturbereich von -20 bis +50 °C
- Kalibrierung der Einzelsensoren im fertig montierten Sensorsystem im Anwendungstemperaturbereich von -20 bis +50 °C, Achsen entkoppelt geprüft
- Quasistatische Überprüfung der Einzelsensoren im fertig montierten Sensorsystem im Anwendungstemperaturbereich von -20 bis +50 °C, Achsen räumlich überlagert geprüft
- Gleichzeitige Überprüfung aller Sensorsysteme quasistatisch und dynamisch unter Anwendungstemperaturbereich von -20 bis +50 °C in räumlicher Überlagerung

3.4.1 Validierung mittels Messnormalen (3D-Messtisch) und bei Extremzuständen (statisch)

Die Validierung der Sensorsystemanzeigen sowie der anschließenden Datenverarbeitung wurden in separaten Tests mit einem 3D-Messtisch (Einstellempfindlichkeit 2 µm in allen drei Achsen) bei 21 °C, bei +50 °C und bei -20 °C durchgeführt. Dabei wurden die Sensorsysteme mit dem Messtisch verschraubt, zwölf Stunden temperiert und anschließend in jeder Achse einzeln die dazugehörigen jeweiligen Achsen-Messbereichsgrenzen angefahren (siehe Bild 22). Die Abweichungen der Sensoran-

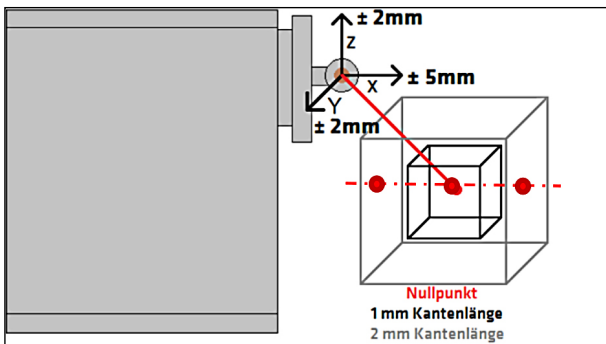


Bild 22: Erfassung der achsenbezogenen Abweichung von vorgegebenen Raumkoordinaten im 3D-Messbereich, exemplarisch dargestellt für X-Achse (rote Kalibrierpositionen)

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
1 R			
1 Hz	4	104	17
2000 Hz	5	114	27
1 M			
1 Hz	3,5	20	5
- 2000 Hz	4,5	30	15
2 R			
1 Hz	5,5	65	13
- 2000 Hz	6,5	75	23
2 M			
1 Hz	9	63	12
- 2000 Hz	10	73	22
3 R			
1 Hz	8	61	7
- 2000 Hz	9	71	17
3 M			
1 Hz	4	76	7
- 2000 Hz	5	86	17

Tab. 2: Maximale achsenbezogene Abweichungen der Sensorsysteme in Mikrometer bei langsam ablaufenden Messungen und bei 2000 Herz, R = in der Rollspur, M = in der Mitte der Betondecke

zeigen von den Messtisch-Anzeigen wurden dabei notiert.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die schlussendlichen Leistungsparameter der sechs Sensorsysteme zusammenfassend dargestellt. Die detaillierte Darstellung der Einzelkalibrierergebnisse und welche weiteren Überprüfungen stattgefunden haben, ist in den Folgekapiteln erläutert.

Die achsenbezogenen Abweichungen werden im Wesentlichen durch das Umkehrspiel (Abweichung bei der Positionierung, welche durch das erforderliche Spiel mechanischer Komponenten bei Umkehrung der Bewegungsrichtung verursacht wird) definiert. Darüber hinaus wirkt sich auch das Signalrauschen der einzelnen Sensortypen aus. Bei langsam ablaufenden Formänderungen müssen wir im ungünstigsten Fall mit einer minimalen Bewegungsauflösung von neun Mikrometern in X-Richtung, 104 Mikrometern in Y-Richtung und 17 Mikrometern in Z-Richtung rechnen. Bei schnell ablaufenden Verformungen (Messung mit 2000 Herz) kommt ein zusätzlicher Anteil durch erhöhtes Signalrauschen hinzu (bei dem Induktiven Wegaufnehmer von etwas kleiner als einem Mikrometer, bei den beiden Drehwinkelgebern von ca. zehn Mikrometern). Damit ergeben sich bei dynamischen Beanspruchungen im ungünstigsten Fall Auflösungsgrenzen zu zehn Mikrometern in X-Richtung, 114 Mikrometern in Y-Richtung und 27 Mikrometern in Z-Richtung. Um die konstruktiv bedingten systematischen und achsenbezogenen Abweichungen (Richtigkeit) im Vergleich darzustellen, wurden in Bild 23 verschiedene Größenordnungen dargestellt. Es zeigt sich, dass die erreichten achsenbezogenen Abweichungen

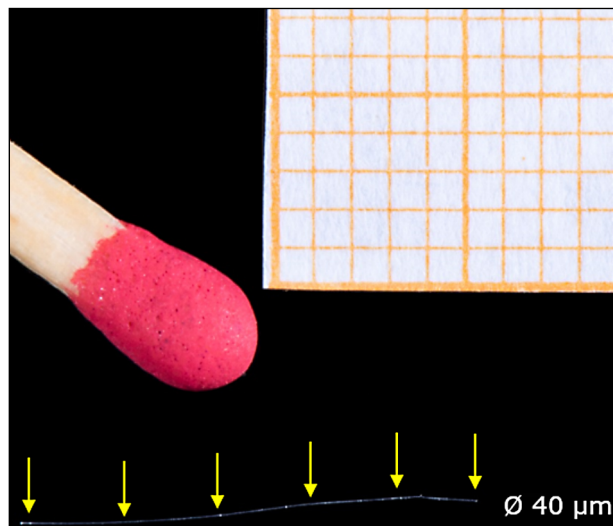


Bild 23: Veranschaulichung des Auflösungsvermögens der Sensorsysteme



Bild 24: Vorrichtung zum Kalibrieren der induktiven Wegaufnehmer

Einzelnummer	Einzeltyp
337	Induktiver Wegaufnehmer
339	Induktiver Wegaufnehmer
340	Induktiver Wegaufnehmer
341	Induktiver Wegaufnehmer
342	Induktiver Wegaufnehmer
343	Induktiver Wegaufnehmer
0cxw73	Drehwinkelgeber
0eyq16	Drehwinkelgeber
0eyq15	Drehwinkelgeber
0ahk17	Drehwinkelgeber
0cw134	Drehwinkelgeber
0cw135	Drehwinkelgeber
0cxw72	Drehwinkelgeber
0eyq13	Drehwinkelgeber
0n8k25	Drehwinkelgeber
0anr60	Drehwinkelgeber
0eyq14	Drehwinkelgeber
0anr59	Drehwinkelgeber

Tab. 3: Auflistung aller verwendeten Einzelsensoren

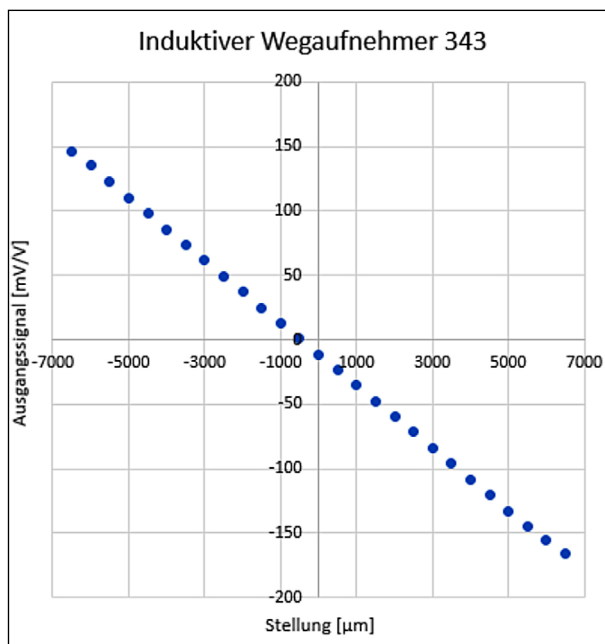


Bild 25: Repräsentativer linearer Zusammenhang zwischen Sensorstellung und Ausgangssignal; hier: induktiver Wegaufnehmer Nummer 343

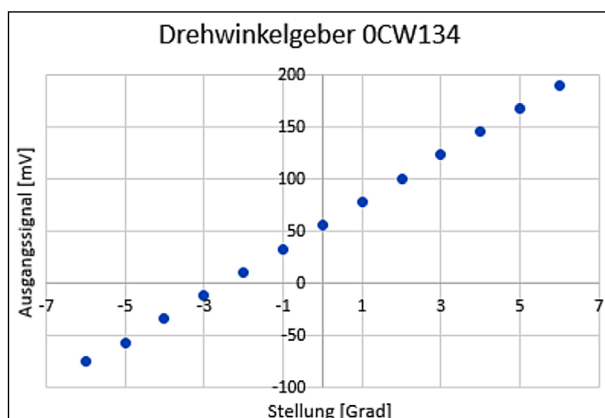


Bild 26: Repräsentativer (quasi-)linearer Zusammenhang zwischen Sensorstellung und Ausgangssignal; hier: Drehwinkelgeber Nummer 0CW134 im vorgesehenen Messbereich $\pm 7^\circ$

die Dicke eines menschlichen Haares mit einem Durchmesser von $40 \mu\text{m}$ (siehe gelbe Pfeile in Bild 23) deutlich übertrifft.

3.5 Überprüfung der allgemeinen Funktionsfähigkeit aller Einzelsensoren im angestrebten Messbereich

Vor der Kombination zu einem mehraxialen Sensorsystem wurde jeder Sensor in einem angefertigten mechanischen Kontrollsystem auf sein eindeutig zuordenbares Ausgangssignal zur mechanischen Stellung überprüft (siehe Bild 24).

3.6 Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der Einzelsensoren

3.6.1 Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der induktiven Wegaufnehmer

Um eine mögliche Temperaturabhängigkeit (Temperaturdrift) der induktiven Wegaufnehmer zu kennzeichnen, wurden diese verschiedenen Temperaturen ausgesetzt (siehe Bild 27). Dazu wurden diese in einer Klemmvorrichtung bei verschiedenen Positionen fixiert und anschließend bei verschiedenen Temperaturen temperiert. Als Positionen wurde die elektrische Nullstellung in der Mitte und die beiden Maximalstellungen mit ± 5 mm gewählt. Für die Temperaturbeanspruchung wurde der Temperaturbereich von - 20 bis + 60 °Celsius gewählt. Als weitere Stützstellen wurden dazwischenliegende Temperaturen mit 10 K bis 20 K Abstand angefahren.

Es konnte bei keinem der sechs induktiven Wegaufnehmer eine signifikante Temperaturabhängigkeit (festgestellte Abweichung im Bereich des Messrauschens < 2 µm) im relevanten Temperaturbereich festgestellt werden. Das Temperaturprofil wurde für jeden Einzelsensor in den oben aufgeführten Messpositionen wiederholt und ist exemplarisch in Bild 27 dargestellt.

Während den Temperatursprüngen verändert sich die Sensoranzeige wegen ungleichmäßigen Ausdehnungen der Prüfvorrichtung, bei Erreichen eines stationären Zustands geht die Sensoranzeige jedes Mal auf den Ausgangszustand zurück (die grünen Pfeile in Bild 27 markieren die stationären Zustände).

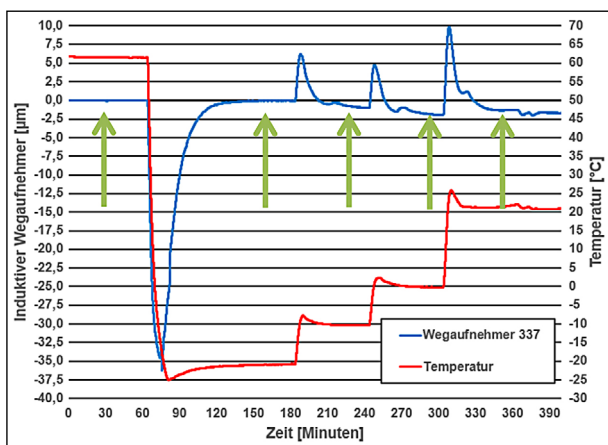


Bild 27: Exemplarisches Temperaturprofil für die induktiven Wegaufnehmer und Anzeige des Wegaufnehmers 337 (eingebaut in 3M) zur Erfassung möglicher Temperatureinflüsse

3.6.2 Überprüfung der Temperaturabhängigkeit der Drehwinkelgeber

Um eine mögliche Temperaturabhängigkeit der Drehwinkelgeber zu bestimmen, wurden diese verschiedenen Temperaturen ausgesetzt und die Messsignale aufgezeichnet. Die ermittelte temperaturbedingte Abweichung beträgt je nach Sensor zwischen 0,14 %/K und 0,23 %/K. Zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit werden die ermittelten Abhängigkeitsfunktionen in der Software (PC) hinterlegt, wobei T in °C in die Gleichung eingesetzt werden muss (siehe Tabelle 4).

Die Temperaturbeanspruchung der Drehwinkelgeber erfolgte etwas moderater, als bei den induktiven Wegaufnehmern (siehe Bild 28). Es gibt keine abrupten Sprünge und die Maximal- und Minimaltemperatur, -10 °C und 50 °C, fallen gemäßiger aus. Damit wurde dem empfindlicheren Aufbau der Drehwinkelgeber entsprochen, da diese im Kontrollprozess noch nicht geschützt im Gehäuse verbaut waren.

Einzel-sensornummer	Sensorsys-temnummer	In Auswertesoftware hinterlegte Temperaturabhängigkeit
0cxw73	1 Rollspur	0,9664+0,0016(T)
0eyq16	1 Rollspur	0,9685+0,0015(T)
0eyq15	1 Mitte	0,9685+0,0015(T)
0ahk17	1 Mitte	0,9559+0,0021(T)
0cw134	2 Rollspur	0,9601+0,0019(T)
0cw135	2 Rollspur	0,9517+0,0023(T)
0cxw72	2 Mitte	0,9685+0,0015(T)
0eyq13	2 Mitte	0,9517+0,0023(T)
0n8k25	3 Rollspur	0,9643+0,0017(T)
0anr60	3 Rollspur	0,9622+0,0018(T)
0eyq14	3 Mitte	0,9706+0,0014(T)
0anr59	3 Mitte	0,9622+0,0018(T)

Tab. 4: Ermittelte Kompensationsfunktionen der Drehwinkelgeber

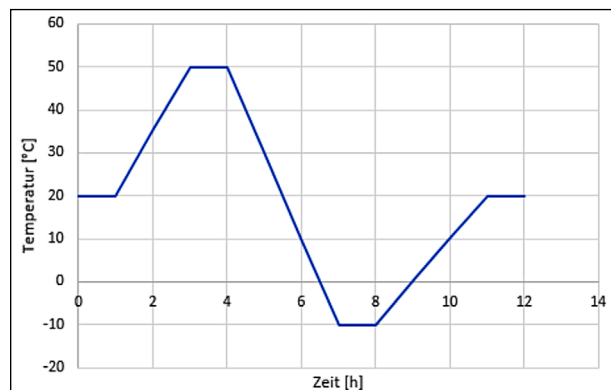


Bild 28: Temperaturprofil für die Drehwinkelgeber zur Erfassung möglicher Temperatureinflüsse

3.7 Kalibrierung und Überprüfung der Sensorsysteme

Jedes fertig montierte Sensorsystem besteht aus einem induktiven Wegaufnehmer, zwei Drehwinkelgebern und einem Temperaturfühler, um die temperaturbedingten Abweichungen der Messwertanzeige entsprechend der ermittelten Funktionen kompensieren zu können. Bei den Temperaturfühlern handelt es sich um genormte Pt100-Sensoren, die nicht zusätzlich kalibriert werden müssen.

Um die realen Leistungsdaten des fertig montierten mehraxialen Sensorsystems ermitteln zu können, müssen die induktiven Wegaufnehmer und die Drehwinkelgeber im finalen Montagezustand des Sensorsystems überprüft und kalibriert werden, da dies Einfluss auf die Messwertanzeige hat.

Kalibriert wurde mit einem 3D-Messtisch. Dieser verfügt über eine Auflösung von einem Mikrometer und eine Einstellempfindlichkeit von zwei Mikrometern.

Jede Mess-Achse der fertig montierten sechs Sensorsysteme wurde im Einbauzustand einzeln kalibriert. Die genaue Vorgehensweise des Sensorsystems ist in den folgenden Schritten beschrieben:



Bild 29: Mechanischer Nullpunkt im Einbauzustand (in der Mitte der Messbereiche der Y- und Z- Achse) hier dargestellt durch Schnittpunkt des Fadenkreuzes

- Nach dem Zusammenbau des Sensorsystems muss der mechanische Nullpunkt des jeweiligen Sensorsystems angefahren werden sodass das Kugelgelenk im mechanischen Nullpunkt liegt. Von dieser Position sind die angestrebten Messbereiche in allen drei Messachsen mechanisch sichergestellt. Die Position des mechanischen Nullpunktes des gesamten Sensorsystems ist für die Y- und Z-Achse aus Bild 29 zu entnehmen und für die X-Achse aus Bild 30. Hierzu wird noch einmal auf die Einhaltung des erforderlichen Hebelarmes von 25 mm (Umrechnung in Kugelkoordinaten) hingewiesen. Bei präziser Montage entspricht der mechanische Nullpunkt des Sensorsystems annähernd dem elektrischen Nullpunkt aller drei Einzel-Sensoren im Sensorsystem (siehe Bild 29)
- Im mechanischen Nullpunkt werden die Signalanzeigen aller Einzelsensoren aufgezeichnet. Dies bildet den Startpunkt für die Kalibrierung bis an die Messbereichsgrenzen aller Achsen. Um eventuellen nicht linearen Effekten vorzubeugen wurden bei den induktiven Wegaufnehmern 27 Punkte für die Kalibriergerade hinterlegt, bei den Drehwinkelgebern jeweils 13
- Die ermittelte Kalibrierkurve wird für den jeweiligen Einzelsensor in den Messverstärkern hinterlegt und nachfolgend automatisiert zur Definition jedes Messwerts angewandt

In Tabelle 5 sind die Sensorsysteme mit zugeordneten Einzelsensoren enthalten.

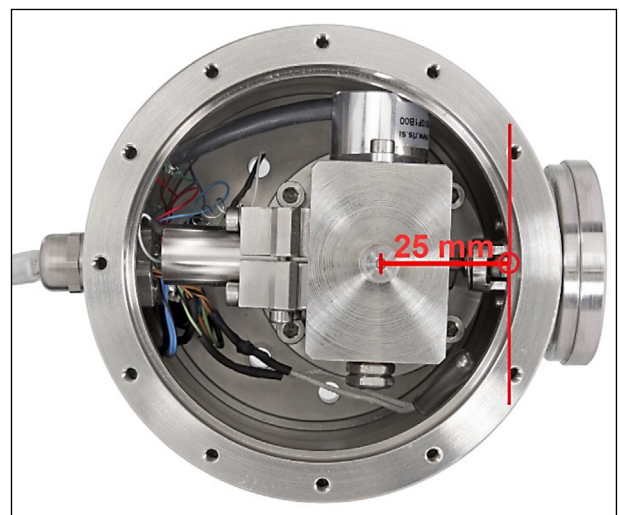


Bild 30: Mechanischer Nullpunkt im Einbauzustand; Hebelarm im Einbauzustand 25 mm von der Sensorachse entfernt in x-Achse

Die grau unterlegten Felder sind zur eindeutigen Zuordnung auf den jeweiligen Umhausungen der Sensorsysteme, sowohl auf der Außenwand als auch auf der Innenseite des Deckels, zu finden.

Die Bezeichnung der Sensorsysteme ist auf die geplante Praxiserprobungsstrecke abgestellt. Die Nummern stehen für die planmäßig zu instrumentierenden Fugen 1, 2 und 3, „R“ für „in der Rollspur“ und „M“ für „in der Mitte der Fahrbahn“.

In den nachfolgenden Kapiteln sind die in der Software der Messverstärker hinterlegten sensorspezifischen Kalibrierwerte der einzelnen Messachsen aufgeführt. Daneben sind jeweils die ermittelten

Sensor-system	Einzelsensor-nummer	Einzelsensor
1 R		
X -	341	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0cxw73	Drehwinkelgeber
Z -	0eyq16	Drehwinkelgeber
1 M		
X -	342	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0eyq15	Drehwinkelgeber
Z -	0ahk17	Drehwinkelgeber
2 R		
X -	343	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0cw134	Drehwinkelgeber
Z -	0cw135	Drehwinkelgeber
2 M		
X -	339	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0cxw72	Drehwinkelgeber
Z -	0eyq13	Drehwinkelgeber
3 R		
X -	340	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0n8k25	Drehwinkelgeber
Z -	0anr60	Drehwinkelgeber
3 M		
X -	337	Induktiver Wegaufnehmer
Y -	0eyq14	Drehwinkelgeber
Z -	0anr59	Drehwinkelgeber

Tab. 5: Zuordnung der Einzelsensornummern zu den Sensorsystembezeichnungen (R= Rollspur; M= Mitte)

sensorspezifischen Umkehrspiele bei Temperaturen von +50 °C, +21 °C und -20 °C sowie die jeweiligen achsenbezogenen maximalen Abweichungen bei diesen Temperaturen für jedes Sensorsystem aufgeführt.

3.7.1 Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 1R

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 341

In Tabelle 6 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 341 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[µm]
155,58	18500
143,69	19000
130,99	19500
118,18	20000
105,6	20500
93,29	21000
81,04	21500
68,87	22000
56,94	22500
45,04	23000
33,15	23500
21,50	24000
9,53	24500
-2,85	25000
-15,00	25500
-26,47	26000
-37,94	26500
-50,16	27000
-62,44	27500
-74,74	28000
-87,14	28500
-99,60	29000
-112,15	29500
-124,67	30000
-136,54	30500
-147,39	31000
-157,28	31500

Tab. 6: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 341

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0CXW73

In Tabelle 7 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0CXW73 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0EYQ16

In Tabelle 8 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0EYQ16 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
228,5	6
206,0	5
183,30	4
160,75	3
138,00	2
115,4	1
92,5	0
69,8	-1
47,0	-2
24,0	-3
1,2	-4
-24,8	-5
-55,0	-6

Tab. 7: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CXW73

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
-504,8	6
-488,6	5
-450,4	4
-412,2	3
-384,0	2
-343,6	1
-304,2	0
-265,6	-1
-226,9	-2
-188,4	-3
-149,8	-4
-111,2	-5
-72,4	-6

Tab. 8: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ16

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 1 R sind in Tabelle 9 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsystems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen, wurden die überlagerten Maximalstellungen, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertanzeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 10 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zu einem die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors zum anderen auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmesseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im

	X	Y	Z
	[μ m]	[μ m]	[μ m]
+50 °C	2	-18*	15
+21 °C	8	130*	31
-20 °C	1	200*	5

Tab. 9: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

	X	Y	Z
	[μ m]	[μ m]	[μ m]
+50 °C			
Mittel	10	30	15
Max.	110	130	70
+21 °C			
Mittel	30	70	15
Max.	45	120	81
-20 °C			
Mittel	25	60	25
Max.	51	140	55

Tab. 10: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer

Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 1R

Im Unterschied zur Validierung im Kapitel 3.4.1 werden im Folgenden überlagerte Positionsänderungen in allen drei Achsen angefahren. Um die mittlere Abweichung der Sensoranzeige innerhalb des Messbereichs, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, von der vorgegebenen Raumposition zu erfassen, wurden bei der Kalibriertemperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung von der Sollwertanzeige des 3D-Tisches zur Ist-Wert-Anzeige des Sensors sind in Tabelle 11 aufgeführt.

In den aufgeführten mittleren Abweichungen spiegeln sich die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors sowie die Messungenauigkeiten und die temperaturbedingten Nutzungseinschränkungen des 3D-Tisches wieder.

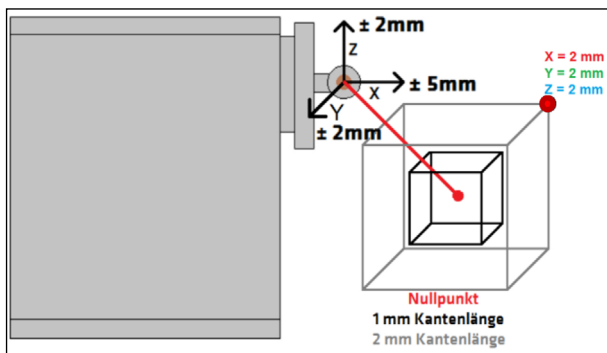


Bild 31: Erfassung der mittleren Abweichung im inneren des 3D-Messbereichs mit eingezeichnetem Messpunktbeispiel in einer Würfecke mit (X/Y/Z ||+2 mm/ + 2 mm/ + 2 mm)

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
1mm KL			
Mittel	30	30	25
Max	41	110	18
2mm KL			
Mittel	14	40	20
Max	35	120	50

Tab. 11: Mittlere und maximale Abweichung im Inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

Nach der Temperierung bei +21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 1R keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

3.7.2 Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 1M

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 342

In Tabelle 12 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 342 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[µm]
156,29	18500
144,38	19000
131,68	19500
118,86	20000
106,14	20500
93,60	21000
81,12	21500
68,69	22000
56,32	22500
43,90	23000
31,50	23500
19,07	24000
6,65	24500
-5,805	25000
-18,26	25500
-30,69	26000
-43,10	26500
-55,55	27000
-68,00	27500
-80,46	28000
-93,00	28500
-105,61	29000
-118,37	29500
-131,03	30000
-143,04	30500
-154,10	31000
-164,26	31500

Tab. 12: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 342

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0EYQ15

In Tabelle 13 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0EYQ15 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0AHK17

In Tabelle 14 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0AHK17 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
207,75	6
193,8	5
170,50	4
147,20	3
119,80	2
104,30	1
76,15	0
53,30	-1
30,00	-2
6,40	-3
-19,20	-4
-41,00	-5
-57,20	-6

Tab. 13: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ15

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
-74,40	6
-43,00	5
-12,00	4
19,10	3
50,30	2
81,90	1
113,10	0
143,8	-1
169,20	-2
195,70	-3
226,60	-4
257,60	-5
288,40	-6

Tab. 14: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr. 0AHK17

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 1 M sind in Tabelle 15 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsystems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen wurden die überlagerten Maximalstellungen, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertanzeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 16 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors aber auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

	X	Y	Z
	[μ m]	[μ m]	[μ m]
+50 °C	9*	120*	2
+21 °C	3	20	3,2
-20 °C	4	-30*	7,1

Tab. 15: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

	X	Y	Z
	[μ m]	[μ m]	[μ m]
+50 °C			
Mittel	30	17	17
Max.	37	152	50
+21 °C			
Mittel	10	12	14
Max.	35	150	42
-20 °C			
Mittel	11	40	16
Max.	40	150	45

Tab. 16: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen (X-Achse: ± 5 mm; Y-Achse: ± 2 mm; Z-Achse: ± 2 mm) in Mikrometer

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 1M

Um die mittlere Abweichung im Inneren des Messbereichs zu überprüfen wurden bei der Kalibrierungstemperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung sind in Tabelle 17 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen tragen zum Einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors bei. Andererseits spiegelt sich darin auch die Steifigkeit der Kontrollmeseinrichtung (3D-Tisch) wider.

Nach der Temperierung bei +21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 1M keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

3.7.3 Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 2R

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 343

In Tabelle 18 sind die ermittelten Kalibrierwerte für induktiven Wegaufnehmer 343 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0CW134

In Tabelle 19 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0CW134 auf-

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
1mm KL			
Mittel	3,1	80*	9
Max	7	101*	15
2mm KL			
Mittel	5	46	17
Max	9	63	29

Tab. 17: Mittlere und maximale Abweichung im Inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

geführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0CW135

In Tabelle 20 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0CW135 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 2 R sind in Tabelle 21 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsys-

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[µm]
145,91	18500
135,26	19000
122,69	19500
110,31	20000
97,96	20500
85,72	21000
73,59	21500
61,49	22000
49,37	22500
37,20	23000
25,07	23500
12,99	24000
0,83	24500
-11,30	25000
-23,41	25500
-35,51	26000
-47,68	26500
-59,67	27000
-71,75	27500
-83,88	28000
-96,09	28500
-108,41	29000
-120,85	29500
-133,26	30000
-145,04	30500
-155,90	31000
-165,96	31500

Tab. 18: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 343

tems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen wurden die überlagerten Maximalstellungen,

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
189,8	6
168,2	5
146,0	4
123,6	3
101,0	2
78,4	1
56,2	0
32,4	-1
10,2	-2
-11,6	-3
-34,2	-4
-56,6	-5
-74,8	-6

Tab. 19: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CW134

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
8,4	6
42,2	5
79,6	4
116,8	3
154,4	2
191,8	1
229,0	0
265,5	-1
301,7	-2
338,6	-3
375,6	-4
412,6	-5
447,5	-6

Tab. 20: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr. 0CW135

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C	8,5	110*	2,3
+21 °C	7	120*	20
-20 °C	1	-35*	16

Tab. 21: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertanzeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 22 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors aber auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmesseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 2R

Um die mittlere Abweichung im Inneren des Messbereichs zu überprüfen wurden bei der Kalibrier-temperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung sind in Tabelle 23 aufgeführt.

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C			
Mittel	29	20	24
Max.	34	130*	78
+21 °C			
Mittel	15	70	17
Max.	36	93	55
-20 °C			
Mittel	32	110*	32
Max.	55	132*	55

Tab. 22: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
1mm KL			
Mittel	3,1	65	23
Max	5,7	110	28
2mm KL			
Mittel	11	19	27
Max	18	38	32

Tab. 23: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zu einem die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors sowie die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß und wurde aus Zeit- und Kostengründen nicht beschafft.

Nach der Temperierung bei 21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 2R keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

3.7.4 Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 2M

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 339

In Tabelle 24 sind die ermittelten Kalibrierwerte für induktiven Wegaufnehmer 339 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0CXW72

In Tabelle 25 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0CXW72 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0EYQ13

In Tabelle 26 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0EYQ13 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 2 M sind in Tabelle 27 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsystems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[µm]
149,97	18500
139,78	19000
127,36	19500
114,61	20000
101,99	20500
89,59	21000
77,27	21500
65,01	22000
52,81	22500
40,55	23000
28,37	23500
16,24	24000
4,10	24500
-8,02	25000
-20,16	25500
-32,31	26000
-44,44	26500
-56,60	27000
-68,88	27500
-81,07	28000
-93,40	28500
-105,9	29000
-118,59	29500
-131,27	30000
-143,43	30500
-154,59	31000
-164,82	31500

Tab. 24: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 339

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
177,7	6
158,5	5
139,3	4
120,5	3
101,4	2
82,2	1
62,8	0
43,3	-1
24,0	-2
4,5	-3
-13,8	-4
-32,1	-5
-50,7	-6

Tab. 25: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CXW72

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen wurden die überlagerten Maximalstellungen, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertan-

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
62,9	6
94,2	5
125,5	4
156,8	3
187,9	2
219,1	1
249,9	0
277,8	-1
308,3	-2
338,5	-3
369,0	-4
399,2	-5
413,5	-6

Tab. 26: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ13

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C	9	41	0
+21 °C	9	16	4
-20 °C	8	130*	30

Tab. 27: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C			
Mittel	7	25	20
Max.	67	124	45
+21 °C			
Mittel	20	20	16
Max.	36	110	36
-20 °C			
Mittel	11	9	23
Max.	32	122	37

Tab. 28: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer

zeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 28 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors aber auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmesseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 2 M

Um die mittlere Abweichung im Inneren des Messbereichs zu überprüfen wurden bei der Kalibrier-temperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung sind in Tabelle 29 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors sowie die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmesseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß und wurde aus Zeit- und Kostengründen nicht beschafft.

Nach der Temperierung bei 21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 2M keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
1mm KL			
Mittel	3	23	11
Max	16	35	32
2mm KL			
Mittel	6	15	3
Max	21	25	31

Tab. 29: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

3.7.5 Kalibrierwerte für das fertig montierte Sensorsystem 3R

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 340

In Tabelle 30 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 340 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0N8K25

In Tabelle 31 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0N8K25 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0ANR60

In Tabelle 32 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0ANR60 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 3 R sind in Tabelle 33 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsystems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen wurden die überlagerten Maximalstellungen, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertanzeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 34 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors aber auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[μ m]
147,32	18500
135,88	19000
123,30	19500
110,62	20000
98,16	20500
85,86	21000
73,67	21500
61,53	22000
49,40	22500
37,35	23000
25,26	23500
13,22	24000
1,15	24500
-10,92	25000
-23,10	25500
-35,14	26000
-47,23	26500
-59,28	27000
-71,42	27500
-83,63	28000
-95,94	28500
-108,4	29000
-121,1	29500
-133,66	30000
-145,74	30500
-156,88	31000
-167,26	31500

Tab. 30: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 340

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
163,8	6
142,4	5
120,6	4
98,8	3
77,2	2
55,4	1
33,7	0
12,0	-1
-10,0	-2
-31,7	-3
-53,2	-4
-75,2	-5
-96,9	-6

Tab. 31: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0N8K25

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
-74,9	6
-41,9	5
-11,6	4
21,3	3
54,2	2
87,0	1
120,3	0
153,4	-1
186,2	-2
219,7	-3
252,8	-4
285,9	-5
319,2	-6

Tab. 32: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0ANR60

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
+50 °C	8	30	25
+21 °C	8	28	-8,3
-20 °C	8	124*	4

Tab. 33: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
+50 °C			
Mittel	30	40	35
Max.	70	110	55
+21 °C			
Mittel	10	16	11
Max.	35	27	26
-20 °C			
Mittel	13	39	35
Max.	41	190	65

Tab. 34: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 3R

Um die mittlere Abweichung im Inneren des Messbereichs zu überprüfen wurden bei der Kalibrier-temperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung sind in Tabelle 35 aufgeführt.

	X	Y	Z
	[µm]	[µm]	[µm]
1mm KL			
Mittel	1	9	5
Max	11	14	18
2mm KL			
Mittel	4	15	8
Max	26	35	12

Tab. 35: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors sowie die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß und wurde aus Zeit- und Kostengründen nicht beschafft.

Nach der Temperierung bei 21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 3R keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

3.7.6 Kalibrierwerte für das Sensorsystem 3M

Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 337

In Tabelle 36 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer 337 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0EYQ14

In Tabelle 37 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0EYQ14 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Kalibrierwerte für den Drehwinkelgeber 0ANR59

In Tabelle 38 sind die ermittelten Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber 0ANR59 aufgeführt. Diese Werte sind in der Software des Messverstärkers zur eindeutigen Erfassung der Messwertanzeige zugeordnet.

Messsignal	Anzeigewert
[mV/V]	[μm]
143,41	18500
131,58	19000
118,9	19500
106,08	20000
93,66	20500
81,39	21000
69,22	21500
57,07	22000
44,89	22500
32,78	23000
20,63	23500
8,48	24000
-3,66	24500
-15,95	25000
-28,08	25500
-40,28	26000
-52,47	26500
-64,69	27000
-76,95	27500
-89,27	28000
-101,68	28500
-114,25	29000
-126,91	29500
-139,26	30000
-150,89	30500
-161,47	31000
-171,26	31500

Tab. 36: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 337

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
169,0	6
141,8	5
114,2	4
86,6	3
59,0	2
31,4	1
5,2	0
-20,6	-1
-46,2	-2
-72,4	-3
-99,6	-4
-123,6	-5
-149,3	-6

Tab. 37: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ14

Messsignal	Anzeigewert
[mV]	[Grad]
-1,2	6
28,6	5
58,9	4
89,6	3
120,0	2
150,1	1
180,3	0
210,3	-1
240,4	-2
270,0	-3
299,6	-4
329,1	-5
347,0	-6

Tab. 38: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0ANR59

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C	5	23	5
+21 °C	5	122	7
-20 °C	1	83	8

Tab. 39: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer

Umkehrspiel und maximale Abweichung bei +50 °C, +21 °C und -20 °C

Die Umkehrspiele bei den verschiedenen Temperatureinstellungen für das Sensorsystem 3 M sind in Tabelle 39 aufgelistet. Mit * gekennzeichnete Werte sind potenzielle Ausreißer, deren Hauptanteile auf temperaturbedingte Fehlerbeiträge des Kontrollsystems (3D-Messtisch) zurückzuführen sind. In späteren Validierungsschritten wurden deutlich kleinere Umkehrspiele ermittelt (siehe hierzu Kapitel 3.8.1 bis 3.8.3).

Um die maximale Abweichung der Messwertanzeige über den kompletten Temperaturbereich zu überprüfen wurden die überlagerten Maximalstellungen, ± 5 mm in der X-Achse, ± 2 mm in der Y-Achse, ± 2 mm in der Z-Achse, angefahren und die Messwertanzeige des Sensorsystems mit der Messwertanzeige des 3D-Tisches verglichen. Die mittleren Abweichungen sowie die Maximalabweichung sind in Tabelle 40 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors aber auch die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische

Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß. Im Verlauf der Validierung zeigten sich kleinere Abweichungen.

Mittlere Abweichung im 3D-Messraum bei 21 °C für das Sensorsystem 3M

Um die mittlere Abweichung im Inneren des Messbereichs zu überprüfen wurden bei der Kalibrier-temperatur von 21 °C alle Eckpunkte eines Würfels mit einer Kantenlänge von einem Millimeter und alle Eckpunkte eines Würfels mit der Kantenlänge von zwei Millimetern angefahren. Die mittlere Abweichung sowie die maximale Abweichung sind in Tabelle 41 aufgeführt.

Zu den aufgeführten mittleren Abweichungen führen zum einen die kumulativen Messungenauigkeiten des 3D-Sensors sowie die Messungenauigkeit und Instabilität des 3D-Tisches. Der technische Aufwand für eine genauere Kontrollmeseinrichtung wäre unverhältnismäßig groß und wurde aus Zeit- und Kostengründen nicht beschafft.

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
+50 °C			
Mittel	26	16	25
Max.	48	36	65
+21 °C			
Mittel	12	35	8
Max.	42	60	45
-20 °C			
Mittel	40	27	37
Max.	84	183	69

Tab. 40: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometern

	X	Y	Z
	[μm]	[μm]	[μm]
1mm KL			
Mittel	2	50	12
Max	22	67	38
2mm KL			
Mittel	3	30	5
Max	55	78	50

Tab. 41: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

Nach der Temperierung bei 21, -20 und +50 °C wurde die allgemeine Funktionsfähigkeit des Sensorsystems erneut bei Raumtemperatur überprüft und das Rückholspiel in allen drei Achsen gemessen. Diese Messungen ergaben bei dem Sensorsystem 3M keine signifikanten Unterschiede zur ursprünglichen Leistungsfähigkeit.

3.8 Validierung unter realitätsnah simulierten überlagerten Beanspruchungen im Labor

Nach der quasi-statischen Einzel-Validierung der Sensorsysteme mittels 3D-Tisch wurden alle sechs Sensorsysteme in einen zwei-axialen Prüfstand eingebaut (siehe Bild 32).

In diesem konnten nochmals quasistatisch langsam ablaufende Verformungen, aber hauptsächlich die Performance der Sensorsysteme bei dynamischen schnell ablaufenden überlagerten Verformungen und die Abweichungen zwischen den Sensorsystemen untereinander untersucht werden. Auch diese Tests wurden bei +50 °C, +21 °C, 0 °C und -25 °C durchgeführt.

3.8.1 Quasistatische Erprobung der Sensorsysteme; Achsen einzeln

Ziel der quasistatischen Erprobung der Sensorsysteme ist die Ermittlung der Abweichungen des Ist-Werts vom Soll-Wert bei verschiedenen großen Einzelauslenkungen in X- bzw. Z-Richtung.

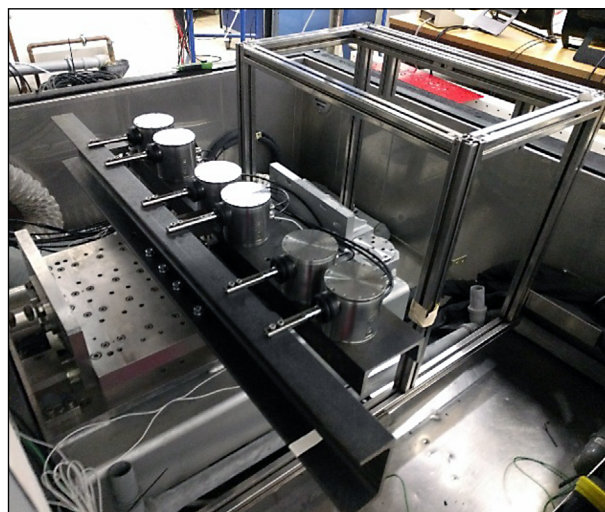


Bild 32: Sensorsysteme in einem zwei-axialen Prüfstand mit Heiz- und Kühlfunktion

Die erste Überprüfung der Sensoranzeigen fand bei 21 °C statt. Als Beanspruchungsfunktion wurde ein Verlauf gemäß Bild 33 gewählt. Aus einbautechnologischen Gründen wurde ein reduzierter Messbereich angefahren (in X-Richtung ± 3 mm anstatt ± 5 mm und in Z-Richtung ± 1 mm anstatt ± 2 mm). Die avisierte volle Leistungsfähigkeit (Messbereichsgrenzen in X-, Y- und Z- Achse) sind bereits im Kapitel 3.7 erfolgreich nachgewiesen.

Der Verlauf der ersten Erprobungsfunktion ist verbal in folgender Aufzählung aufgeführt:

- Null-Lage
- +100 μm in X-Richtung
- Null-Lage
- -100 μm in X-Richtung
- Null-Lage
- +3000 μm in X-Richtung
- Null-Lage
- -3000 μm in X-Richtung
- Null-Lage
- +200 μm in Z-Richtung
- Null-Lage
- -200 μm in Z-Richtung
- Null-Lage
- +1000 μm in Z-Richtung
- Null-Lage
- -1000 μm in Z-Richtung
- Null-Lage

In Bild 33 ist exemplarisch die Sensoranzeige eines der sechs Sensorsysteme (1M) als Reaktion auf die oben beschriebene Erprobungsfunktion dargestellt. Für eine Einschätzung der Sensoranzeigen wurden die absoluten und relativen Abweichungen vom Sollwert ermittelt (siehe Tabelle 42 und Tabelle 43).

In Bild 34 sind exemplarisch die Sensoranzeigen des Sensorsystems 1M über die ersten zwanzig Sekunden der vorgegebenen Beanspruchungsfunktion (siehe Bild 33) im Detail abgebildet. Die Sollwerte von ± 100 μm werden ebenso genau abgebildet wie die Null-Lage.

In Bild 35 sind exemplarisch die Sensoranzeigen des Sensorsystems 1M im nachfolgenden Bean-

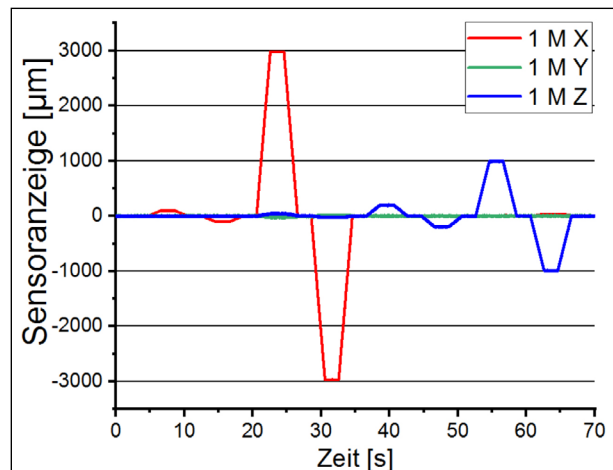


Bild 33: Repräsentative Sensoranzeige während der ersten quasistatischen Erprobungsphase (hier: Sensorsystem 1M)

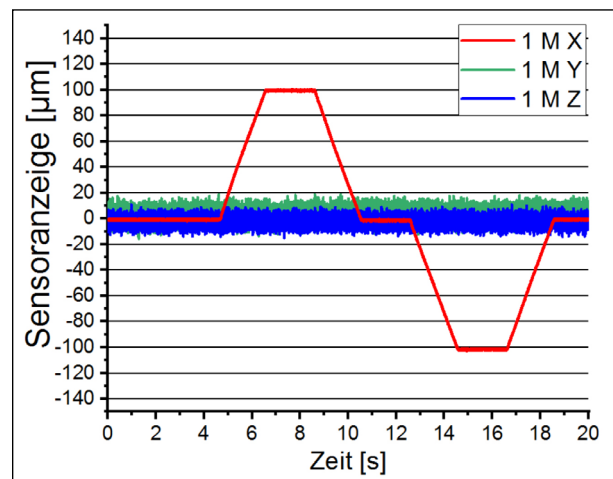


Bild 34: Sensoranzeige bei ± 100 μm Auslenkung in X-Richtung; Abweichung ~ 2 μm (hier: Sensorsystem 1M)

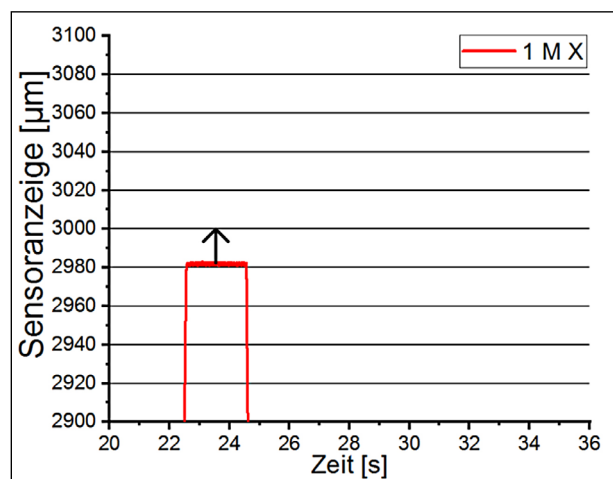


Bild 35: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei + 3000 μm Auslenkung in X-Richtung; Abweichung 19 μm

sprungsabschnitt der vorgegebenen Beanspruchungsfunktion (siehe Bild 33) an der oberen Messbereichsgrenze abgebildet. Aufgrund der hochauflösten Skalierung erkennt man die Abweichung des Ist-Werts vom Soll-Wert von $19 \mu\text{m}$, was bei $3000 \mu\text{m}$ Auslenkung $0,7$ Prozent entspricht.

In Bild 36 ist die Sensoranzeige des Sensorsystems 1M im unteren Bereich der Messbereichsgrenze in X-Richtung abgebildet. Es ergibt sich eine Abweichung des Ist-Werts vom Soll-Wert von $35 \mu\text{m}$, was bei $3000 \mu\text{m}$ Auslenkung $1,2$ Prozent entspricht.

Die Sensoranzeigen für die beiden Amplituden in X-Richtung für alle Sensorsysteme sind zusammenfassend in Tabelle 42 aufgeführt. Sie sind relativ und absolut angegeben.

In Bild 37 ist der Ausschnitt der Sensoranzeigen im Zeitfenster von 36 bis 52 Sekunden (Detail aus Bild 33) abgebildet. Die Sollwerte von $\pm 200 \mu\text{m}$ werden ebenso genau abgebildet, wie die Null-Lage.

In Bild 38 ist die Sensoranzeige an der oberen Messbereichsgrenze in Z-Richtung abgebildet. Die Abweichung des Ist-Werts vom Soll-Wert beträgt $5 \mu\text{m}$, was bei $1000 \mu\text{m}$ Auslenkung 5 Prozent entspricht.

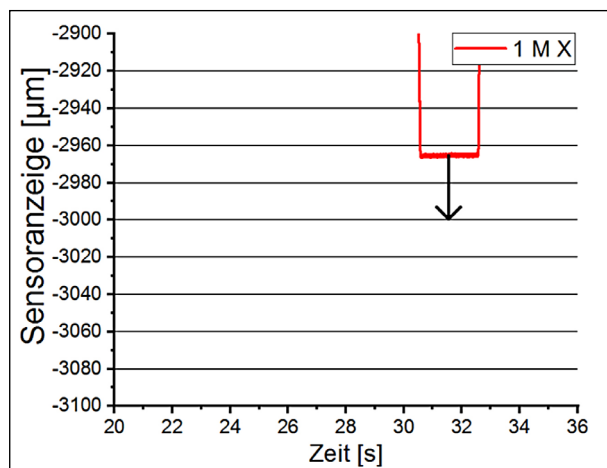


Bild 36: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $-3000 \mu\text{m}$ Auslenkung in X-Richtung; Abweichung $35 \mu\text{m}$

Sensor	100 μm		3 mm	
1 R	$5 \mu\text{m}$	5%	$39 \mu\text{m}$	1,3 %
1 M	$2 \mu\text{m}$	2%	$35 \mu\text{m}$	1,2 %
2 R	$1 \mu\text{m}$	1%	$62 \mu\text{m}$	2,1 %
2 M	$2 \mu\text{m}$	2%	$43 \mu\text{m}$	1,4 %
3 R	$5 \mu\text{m}$	5%	$46 \mu\text{m}$	1,5 %
3 M	$3 \mu\text{m}$	3%	$43 \mu\text{m}$	1,4 %

Tab. 42: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Auslenkungen in μm und prozentual zur Auslenkung bei $+21 \text{ }^\circ\text{C}$

In Bild 39 ist die Sensoranzeige an der unteren Messbereichsgrenze in Z-Richtung abgebildet. Die Abweichung des Ist-Werts vom Soll-Wert beträgt $15 \mu\text{m}$, was bei $1000 \mu\text{m}$ Auslenkung $1,5$ Prozent entspricht.

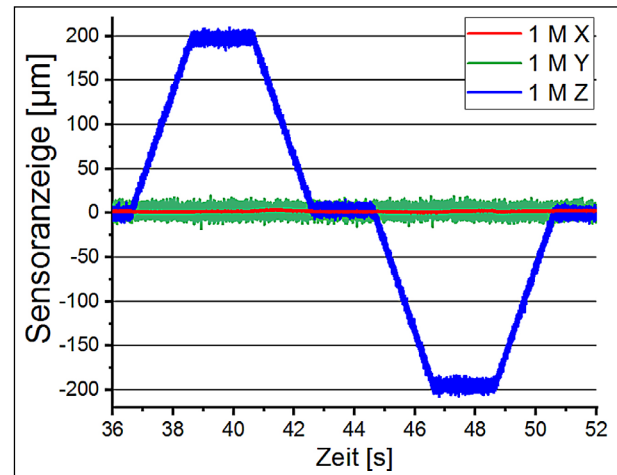


Bild 37: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $\pm 200 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 5 \mu\text{m}$

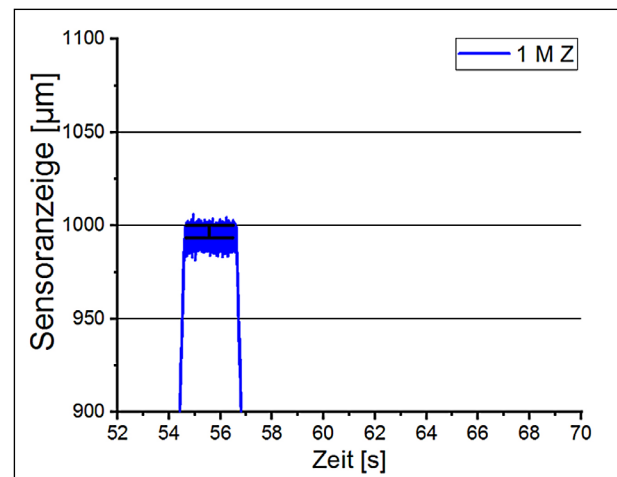


Bild 38: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $+1000 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 5 \mu\text{m}$

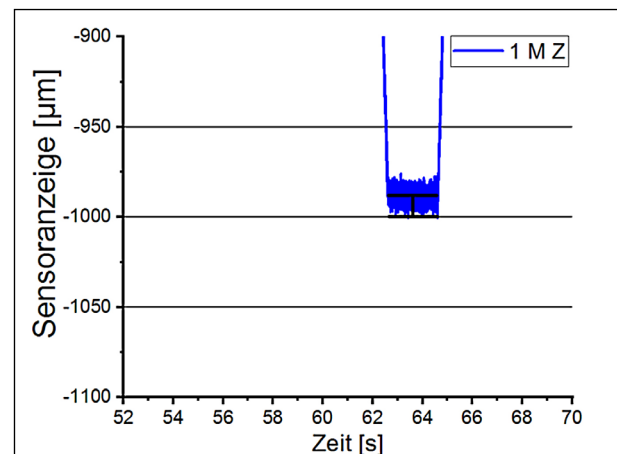


Bild 39: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $-1000 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 15 \mu\text{m}$

Die Sensoranzeigen für die beiden Amplituden in Z-Richtung für alle Sensorsysteme sind zusammenfassend in Tabelle 43 aufgeführt.

Diese detailliert beschriebene Überprüfung der Sensoranzeige unter oben genannter Beanspruchungsfunktion wurde zusätzlich zu +21 °C bei +50°C, 0°C und -25°C durchgeführt. Die dabei ermittelten Abweichungen in X- und Z-Richtung vom Soll-Wert sind in den Tabellen 44 – 49 aufgeführt.

Im Erprobungsmodus bei +50 °C wurden im Vergleich zu +21 °C leicht vergrößerte Abweichungen vom Soll-Wert ermittelt.

Die Abweichungen der Sensorsysteme vom Sollwert bei 0°C sind, bis auf einen nicht reproduzierbaren Ausreißer (3R in Z-Richtung bei kleinem Fahrweg) vergleichbar bzw. geringfügig kleiner, als bei +21 °C Sensortemperatur.

Sensor	200 µm		1 mm	
1 R	5 µm	2,5 %	15 µm	1,5 %
1 M	5 µm	2,5 %	15 µm	1,5 %
2 R	20 µm	10 %	40 µm	4 %
2 M	28 µm	14 %	24 µm	2,4 %
3 R	18 µm	9 %	10 µm	1 %
3 M	10 µm	5 %	20 µm	2 %

Tab. 43: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Auslenkungen in µm und prozentual zur Auslenkung bei 21 °C

Sensor	100 µm		3 mm	
1 R	15 µm	15 %	40 µm	1,3 %
1 M	4 µm	4 %	40 µm	1,3 %
2 R	2 µm	2 %	50 µm	1,7 %
2 M	15 µm	15 %	60 µm	2 %
3 R	12 µm	12 %	40 µm	1,3 %
3 M	15 µm	15 %	40 µm	1,3 %

Tab. 44: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei +50 °C

Sensor	200 µm		1 mm	
1 R	10 µm	5 %	80 µm	8 %
1 M	10 µm	5 %	70 µm	7 %
2 R	10 µm	5 %	60 µm	6 %
2 M	10 µm	5 %	80 µm	8 %
3 R	10 µm	5 %	60 µm	6 %
3 M	10 µm	5 %	70 µm	7 %

Tab. 45: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei +50 °C

Bei -25 °C Sensortemperatur sind die Abweichungen verglichen mit denen bei +21 °C am Größten. Dies liegt wahrscheinlich an temperaturbedingten Effekten, die auf die versuchstechnisch notwendige unvollständige Kapselung der Sensorsysteme zurückzuführen sind. Bei vollständiger Kapselung in Feldanwendung wird dem durch die vollständige Abdichtung und interne Trocknung durch Silica-Gel vorgebeugt.

Sensor	100 µm		3 mm	
1 R	5 µm	5 %	40 µm	1,3 %
1 M	5 µm	5 %	100 µm	3,3 %
2 R	10 µm	10 %	70 µm	2,3 %
2 M	4 µm	4 %	80 µm	2,7 %
3 R	8 µm	8 %	70 µm	2,3 %
3 M	5 µm	5 %	80 µm	2,7 %

Tab. 46: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei 0 °C

Sensor	200 µm		1 mm	
1 R	10 µm	5 %	50 µm	5 %
1 M	10 µm	5 %	10 µm	1 %
2 R	18 µm	9 %	55 µm	5,5 %
2 M	10 µm	5 %	30 µm	3 %
3 R	55 µm*	27 %*	33 µm	3,3 %
3 M	10 µm	5 %	10 µm	1 %

* Ausreißer

Tab. 47: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei 0 °C

Sensor	100 µm		3 mm	
1 R	8 µm	8 %	120 µm	4 %
1 M	5 µm	5 %	100 µm	3,5 %
2 R	8 µm	8 %	110 µm	3,7 %
2 M	12 µm	12 %	140 µm	4,7 %
3 R	7 µm	7 %	180 µm	6 %
3 M	6 µm	6 %	130 µm	4,3 %

Tab. 48: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei -25 °C

Sensor	200 µm		1 mm	
1 R	30 µm	15 %	90 µm	9 %
1 M	25 µm	12 %	40 µm	4 %
2 R	20 µm	10 %	70 µm	7 %
2 M	20 µm	10 %	140 µm	14 %
3 R	25 µm	12 %	120 µm	12 %
3 M	0 µm	0 %	20 µm	2 %

Tab. 49: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in µm und prozentual zum Fahrweg bei -25 °C

Fazit:

Die gleichzeitige Beanspruchung der sechs Sensorsysteme in einem zwei-axialen Versuchstisch ergab geringere Abweichungen (höhere Genauigkeit) im Vergleich zu den Einzel-Überprüfung der Sensorsysteme mit einem 3D-Messtisch, da der leistungsbeschränkende Einfluss des 3D-Messtisches im Tieftemperaturbereich nicht mehr vorhanden war.

Die ermittelten Soll-Ist-Wert-Abweichungen variieren mit der Sensortemperatur. Bei sehr tiefen Sensortemperaturen wurden die größten Abweichungen festgestellt.

Festzuhalten ist jedoch, dass aus versuchstechnischen Gründen eine vollständige thermische und hygri sche Kapselung der Sensorsysteme bei dieser Nachweisführung nicht möglich war.

Weiterhin ist auch festzustellen, dass Extremtemperaturen im Sensor unter -10 °C unwahrscheinlich sind (siehe hierzu auch Kapitel 4.8).

Vor diesem Hintergrund lassen die ermittelten Abweichungen unter dieser Laborsimulation auf sehr gute Praxiseignung schließen, sodass einer weiteren Validierung mit zusätzlichen Beanspruchungsgrößen unter straßenbaupraktischen Bedingungen im Feld keine Einschränkungen entgegenstehen.

3.8.2 Quasistatische Erprobung der Sensorsysteme im Labor; Achsen überlagert

Die quasistatische Erprobung der Sensorsysteme bei überlagerter Bewegung der Achsen hat zum Ziel, die Abweichungen des Ist-Werts vom Soll-Wert bei verschiedenen großen überlagerten Auslenkungen in X- und Z-Richtung zu ermitteln. Dieser Validierungsabschnitt ist die konsequente Fortführung entsprechend der positiven Ergebnisse von 3.8.1.

Um die Präzision und die Genauigkeit der Sensorsysteme nicht nur einzeln, sondern auch bei gleichzeitiger Bewegung mehrerer Achsen zu überprüfen wurde eine spezifische Beanspruchungsfunktion entwickelt. Diese komplexe Funktion besteht aus mehreren überlagerten Trapezfunktionen (siehe Bild 40).

Setzt man die zeitbezogene Beanspruchungsfunktion in eine ortsbezogene Beanspruchungsfunktion um, ergeben sich mit dem Nullpunkt neun relativ weit voneinander entfernte Sollkoordinaten im Raum, die angefahren werden (siehe Bild 41). Um

diese neun Sollkoordinaten herum werden jeweils vier weitere nah beieinander liegende Sollkoordinaten angesteuert (siehe Bild 42), unter anderem um die Präzision der Sensoren abschätzen zu können.

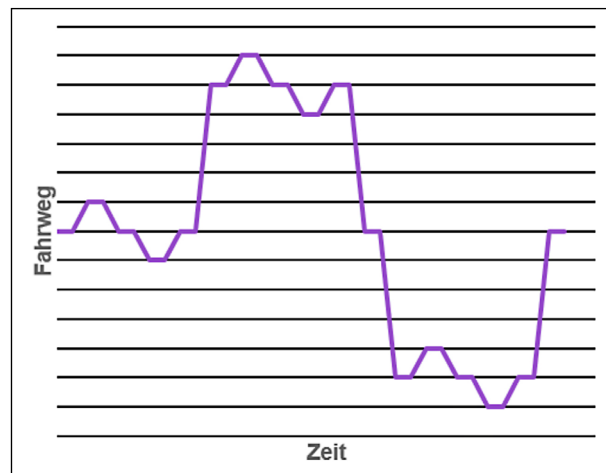


Bild 40: Zielfunktion zur Ermittlung der quasistatischen Abweichung der Ist-Werte der Sensoranzeigen von den Soll-Werten; Trapezfunktion mit großen Auslenkungen und überlagerte Trapezfunktion mit kleinen Auslenkungen

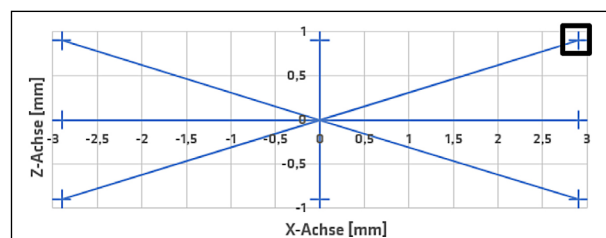


Bild 41: Alle angefahrenen Punkte der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum in X- und Z-Richtung; neun Punkte im Raum mit kleinen überlagerten Kreuzen

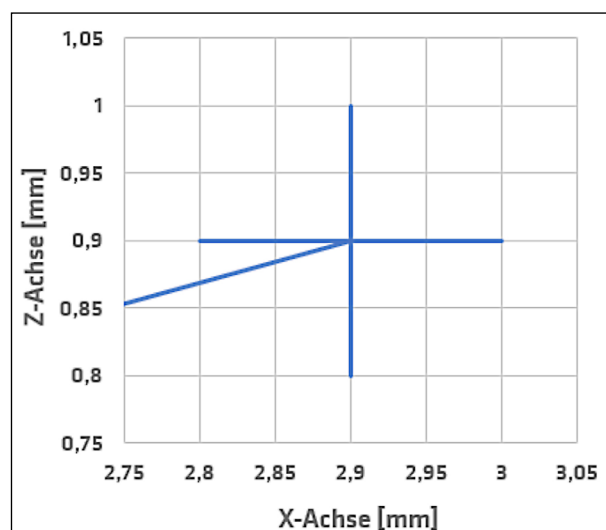


Bild 42: Detail aus Bild 41; Angefahrene Sollkoordinaten bei $+0,9\text{ mm}$ in Z-Richtung und $+2,9\text{ mm}$ in X-Richtung bei der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum mit vier weiteren Punkten mit jeweils $100\text{ }\mu\text{m}$ Abstand in X- und Z-Richtung; Ausschnitt aus Bild 41 rechts oben

Aus einbautechnologischen Gründen wurde ein reduzierter Messbereich angefahren (in X-Richtung ± 3 mm anstatt ± 5 mm und in Z-Richtung ± 1 mm anstatt ± 2 mm). Die avisierte volle Leistungsfähigkeit (Messbereichsgrenzen in X-, Y- und Z- Achse) wurde bereits im Kapitel 3.7 erfolgreich nachgewiesen.

In Bild 41 sind die 36 angefahrenen Sollkoordinaten in der X-Z-Ebene in örtlicher Auflösung dargestellt.

In Bild 43 sind die Sensoranzeigen der drei Raumrichtungen des Sensorsystems 1M in Abhängigkeit der Zeit abgebildet. Die Anzeigen bilden qualitativ die Sollwerte ab. Die Achsen sind ausreichend voneinander entkoppelt, so dass messtechnisches Übersprechen (d. h. gegenseitige Beeinflussung der Messachsen) weitestgehend ausgeschlossen ist und sich somit die gewählte konstruktive Lösung als geeignet und praktikabel darstellt.

Um die Präzision über den Messbereich zu ermitteln wurden die Sensoranzeigen an allen neun Sollkoordinaten aufgezeichnet. In Tabelle 50 sind die Werte exemplarisch für 1R an einem Raumkoordinatenpunkt (in Bild 44 mit einem roten Viereck markiert) dargestellt.

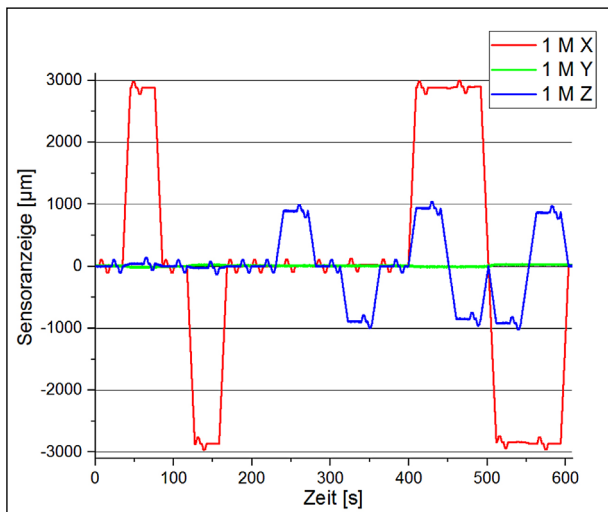


Bild 43: Zeitliche Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei überlagerten Auslenkungen in X- und Z-Richtung gemäß Bild 41

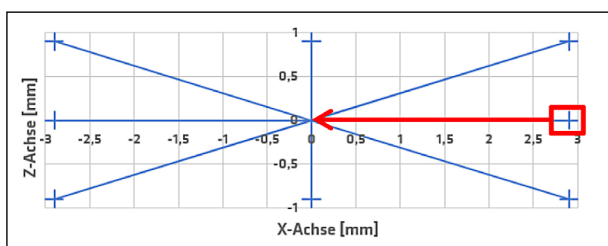


Bild 44: Alle angefahrenen Punkte der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum in X- und Z-Richtung; mit exemplarisch eingezeichnetem Vektor bzw. Verschiebung zum Nullpunkt

atenpunkt (in Bild 44 mit einem roten Viereck markiert) dargestellt.

Im Anschluss wurden, um die verschiedenen Koordinaten im Raum zu vergleichen, alle neun Mittelpunkte der Sollkoordinaten an den Messbereichsenden mit den folgenden Gleichungen genullt (Exemplarisch für das Sensorsystem 1R an einer Sollwertkoordinate in Bild 44 mit rotem Viereck markiert).

$$\begin{aligned} x_n - x_1 &= \Delta x_n \\ y_n - y_1 &= \Delta y_n \\ z_n - z_1 &= \Delta z_n \end{aligned}$$

Sensoranzeige 1 R (Ist-Wert)		
X [μm]	Z [μm]	Y [μm]
2870	10	0
2970	10	0
2770	10	0
2870	105	0
2870	-90	0

Tab. 50: Exemplarische Ist-Werte für das Sensorsystem 1R an einer Sollwertkoordinate in Bild 44 mit rotem Viereck markiert; angefahrener Punkt bei $\pm 0,0$ mm in Z-Richtung und $+2,9$ mm in X-Richtung im Raum mit vier weiteren Punkten mit jeweils 100 μm Abstand in X- und Z-Richtung

Differenz		
Xn zu X1 [μm]	Zn zu Z1 [μm]	Yn zu Y1 [μm]
100	0	0
-100	0	0
0	95	0
0	-100	0

Tab. 51: Exemplarische durch Vektorrechnung bereinigte Sensoranzeige (Nullung) des Sensorsystems 1R;

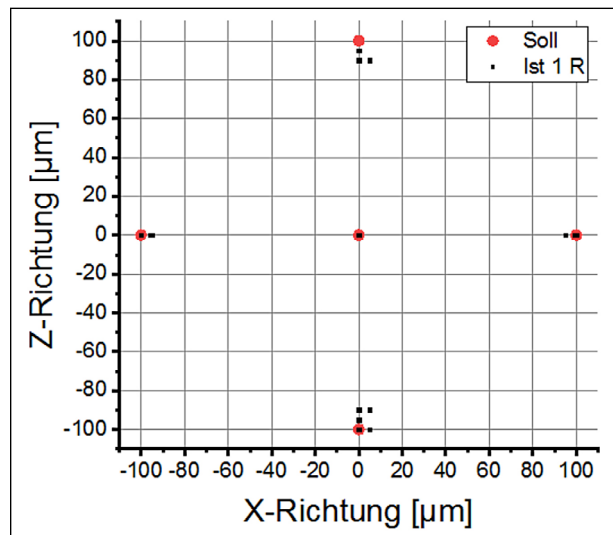


Bild 45: Präzision des Sensorsystems 1R an neun verschiedenen Punkten im Messraum

In Tabelle 51 ist exemplarisch im unteren Kapitel das Ergebnis der Nullung (Differenz der Vektorkoordinaten für eine Sollkoordinate bei Sensorsystem 1R) angegeben.

Die exemplarisch durchgeführte örtliche Bereinigung (Nullung) wurde auch an den anderen Sollkoordinaten durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 45 dargestellt und beschreibt die Präzision des Sensorsystems 1R über den Messbereich.

Die maximale Abweichung des Sensorsystems 1R beträgt 5 μm in X-Richtung und 10 μm in Z-Richtung bei überlagerten Fahrwegen von 100 μm .

Die maximalen und mittleren Abweichungen aller Sensorsysteme sind in Tabelle 52 aufgeführt.

Fazit:

Die Präzision der Sensorsysteme bei quasistatischer 2-axialer Verformungsüberlagerung an den jeweiligen Messbereichsgrenzen der X- und Z-Achsen weist eine maximale Abweichung von 10 μm in X- und 11 μm in Z-Richtung auf. Vor diesem Hintergrund lassen die ermittelten Abweichungen unter dieser Laborsimulation auf sehr gute Praxisleistung schließen, sodass einer weiteren Validierung mit zusätzlichen Beanspruchungsgrößen unter straßenbaupraktischen Bedingungen im Feld keine Einschränkungen entgegenstehen.

	X	Z
	[μm]	[μm]
1 R		
Max	5	10
Mittel	1,8	2,8
1 M		
Max	5	10
Mittel	0,75	1,1
2 R		
Max	10	20
Mittel	2,1	3,8
2 M		
Max	10	20
Mittel	1,8	4,2
3 R		
Max	7	11
Mittel	2,9	4,3
3 M		
Max	10	15
Mittel	1,8	2,5

Tab. 52: Maximale und mittlere Abweichungen der jeweils 36 Ist-Werte von den Soll-Werten in Mikrometer; Präzision im 2D-Raum

3.8.3 Dynamische Erprobung der Sensorsysteme mit fünf Hz im Labor

Ziel der dynamischen Erprobung der Sensorsysteme mit fünf Hz-Sinusschwingungen war die Ermittlung der Performance des Sensorsystems bei schnellen Bewegungen, wie sie unter überrollenden Verkehrsbeanspruchungen zu erwarten ist.

Das erste Messregime der dynamischen Erprobung bestand aus einer fünf Hz Sinusschwingung mit einer Amplitude von 100 μm zuerst in X-Richtung danach in Z-Richtung.

In Bild 46 sind die Sensoranzeigen aller drei Messachsen am Beispiel des Sensorsystems 2M abgebildet. Zuerst sind 20 Schwingungen in X-Richtung zu erkennen, Y und Z zeigen dabei keine signifikanten

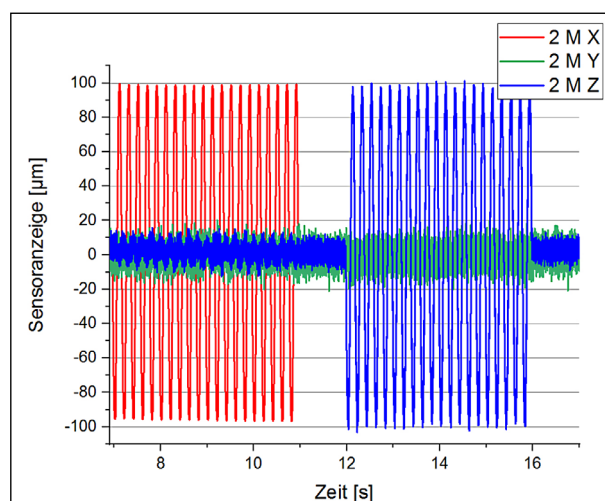


Bild 46: Sensoranzeige (hier exemplarisch für Sensorsystem 2M) bei einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von fünf Hz und einer Amplitude von 100 μm

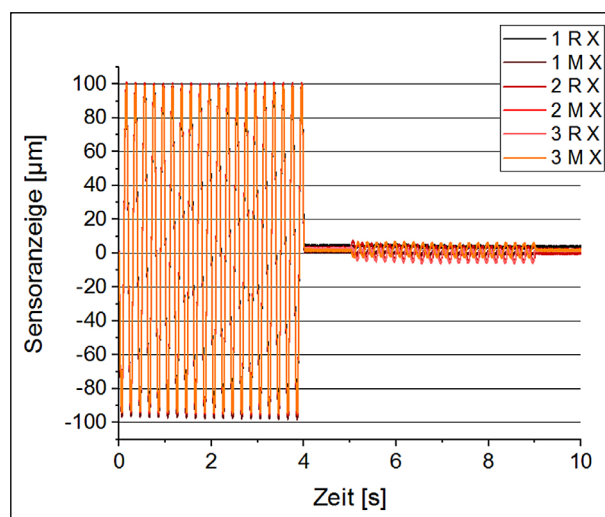


Bild 47: Die Sensoranzeigen aller Sensorsysteme in X-Richtung während des gesamten Messregimes

ten Bewegungen und bestätigen damit die Entkoppelung der Achsen. Anschließend sind, nach einer kurzen Pause, 20 Sinusschwingungen in Z-Richtung zu erkennen, wobei X und Y hier keine signifikanten Bewegungen anzeigen. Dies dient dem Plausibilitätsnachweis der o. a. Erkenntnis.

In Bild 47 und Bild 48 sieht man die hohe Übereinstimmung aller sechs Sensorsysteme bei der Erprobung mit fünf Hz und einer Amplitude von 100 μm in X-Richtung.

Um die mittlere Abweichung des Soll-Werts vom Ist-Wert der gemessenen Amplitude zu überprüfen, wurde der Mittelwert über die 20 oberen und unteren Deformationsmaximalwerte gebildet und mit den $\pm 100 \mu\text{m}$ Soll-Werten verglichen. Die maximalen Abweichungen sind im Mittel äußerst gering und

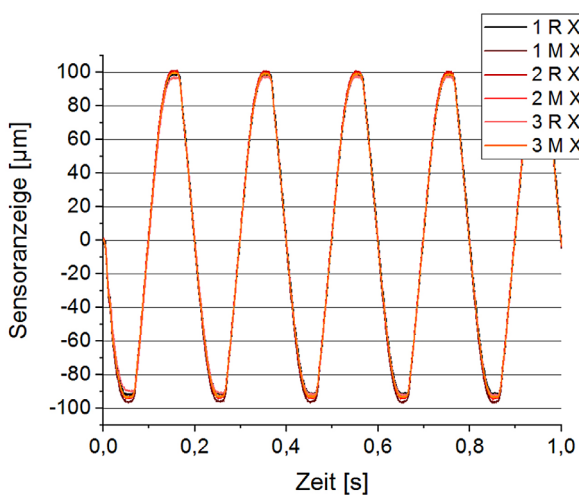


Bild 48: Sensoranzeigen aller sechs Sensorsysteme in X-Richtung bei 100 μm Amplitude

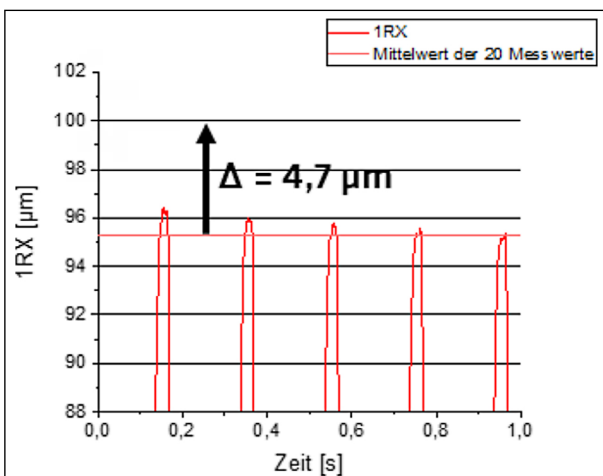


Bild 49: Sensoranzeige des Sensorsystems 1R in X-Richtung bei einer Schwingung mit 100 μm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz bei den ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 95,3 μm ; Maximalwerte

sind messtechnischer Ausdruck der sehr hohen Richtigkeit der Messsysteme (hier exemplarisch dargestellt für Sensorsystem 1R: 4,7 μm und 5,6 μm). Zudem wurde die größte Abweichung der 20 Einzel-Werte von diesem Mittelwert als Maß für die mit den Sensorsystemen erreichte Präzision aufgezeichnet. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich die Genauigkeit der Messsysteme in den maßgebenden Messrichtungen X-Achse und Z-Achse, siehe Tabelle 53.

In Bild 51 sieht man die Sensoranzeigen in X-Richtung bei der 100 μm Sinusschwingung in Z-Richtung. Die Achsen stellen sich als weitestgehend entkoppelt dar, die Restanzeigen ($< 7 \mu\text{m}$) sind auf Einbautoleranzen bei der Ausrichtung der Maschinenachsen zurückzuführen.

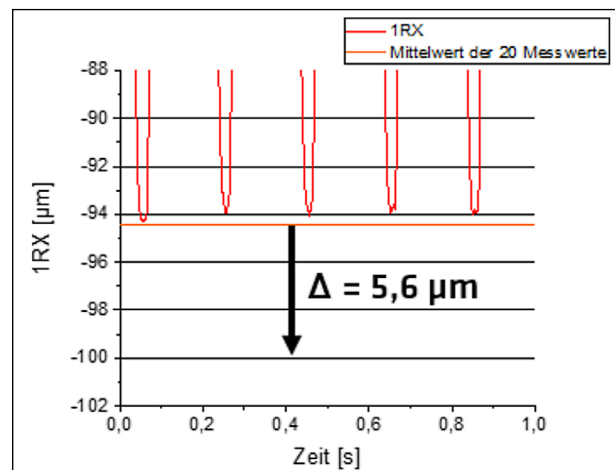


Bild 50: Sensoranzeige des Sensorsystems 1R in X-Richtung bei einer Schwingung mit 100 μm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz bei den ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 94,4 μm ; Minimalwerte

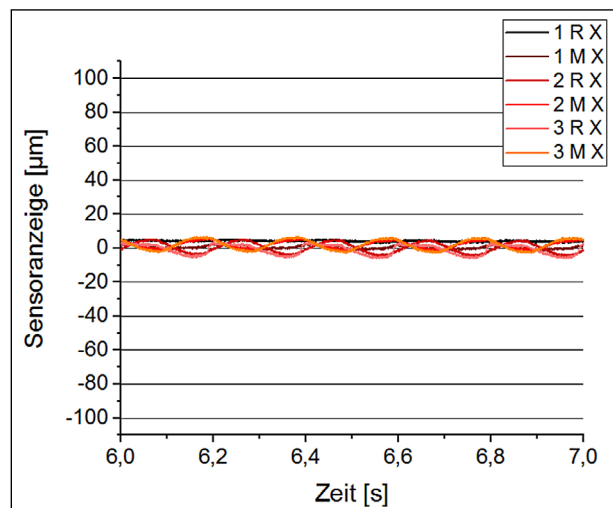


Bild 51: Sensoranzeigen aller sechs Sensorsysteme in X-Richtung bei 100 μm Amplitude in Z-Richtung; Achsen weitestgehend entkoppelt

In Bild 52 erkennt man zum Nachweis der Entkoppelung der Messachsen; das Y-Signal bei Bewegungen in X- und Z-Richtung. Es ist lediglich Messrauschen erkennbar.

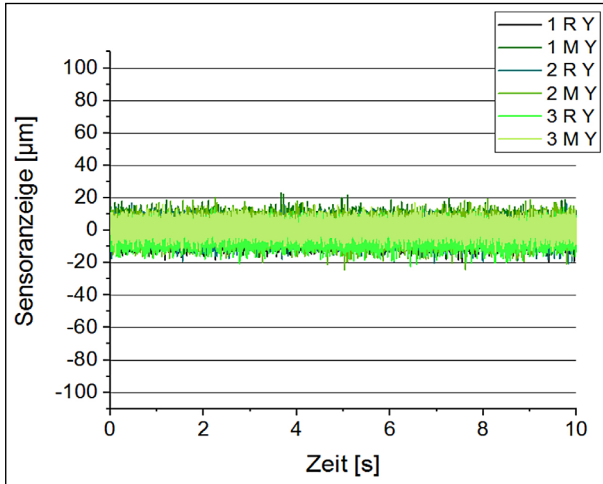


Bild 52: Sensoranzeige aller sechs Sensorsysteme in Y-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz in X- und Z-Richtung

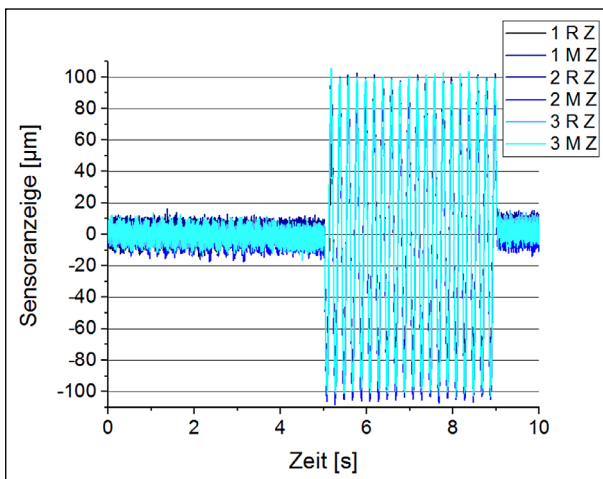


Bild 53: Die Sensoranzeigen aller Sensorsysteme in Z-Richtung während des gesamten Messregimes

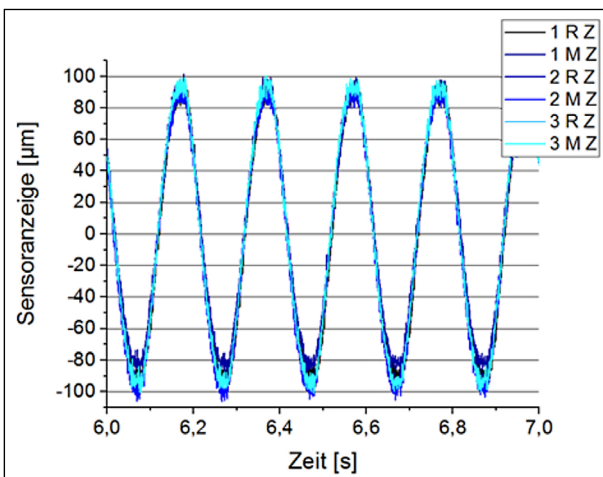


Bild 54: Sensoranzeigen aller sechs Sensorsysteme in Z-Richtung bei 100 µm Amplitude

In Bild 53 und Bild 54 sieht man die hohe Übereinstimmung aller sechs Sensorsysteme bei der Erprobung mit fünf Hz und einer Amplitude von 100 Mikrometer in Z-Richtung.

Analog zur X-Achse wurde der Mittelwert über die 20 oberen und unteren Messwerte gebildet und mit den ± 100 µm Soll-Werten in Z-Achse verglichen (hier exemplarisch dargestellt für Sensorsystem 1R: 9,8 µm und 10,3 µm). Zudem wurde die größte Abweichung der 20 Einzel-Werte von diesem Mittelwert notiert (Präzision). Daraus ergibt sich Genauigkeit in Z-Richtung, siehe Tabelle 53.

In Bild 57 sieht man die Sensoranzeigen in Z-Richtung bei der 100 µm Sinusschwingung in X-Richtung. Die X-Achsen aller Sensorsysteme sind wei-

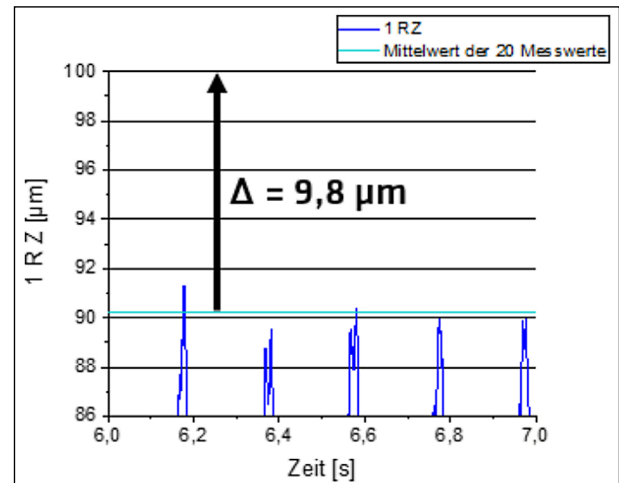


Bild 55: Sensoranzeige des Sensorsystems 1R in Z-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz; ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 90,2 µm; Maximalwerte

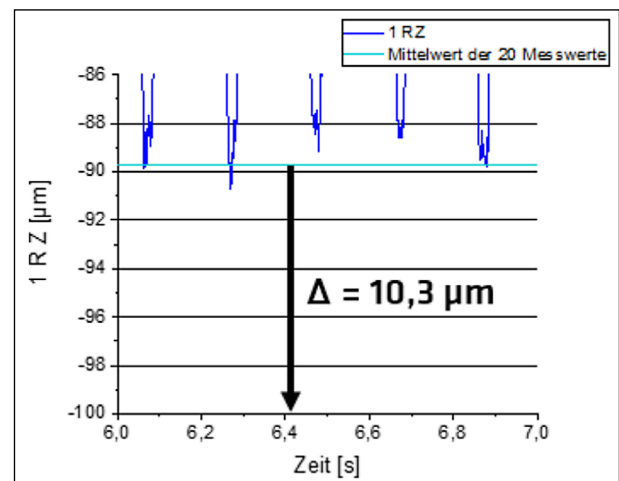


Bild 56: Sensoranzeige des Sensorsystems 1R in Z-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz; ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 89,7 µm; Minimalwerte

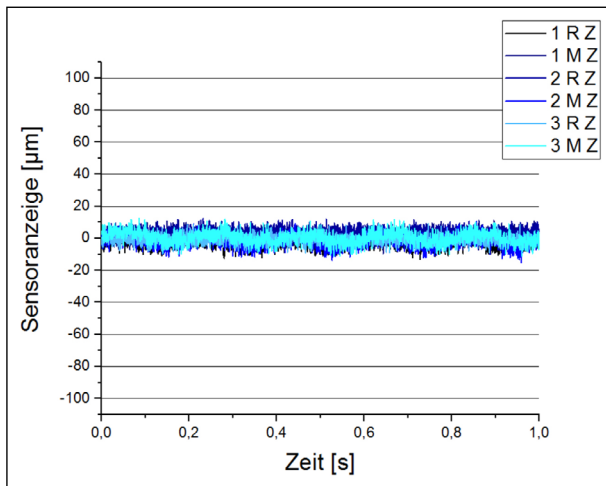


Bild 57: Sensoranzeigen aller sechs Sensorsysteme in Z-Richtung bei 100 µm Amplitude in X-Richtung; Achsen weitestgehend entkoppelt

	X		Z	
	Richtigkeit	Präzision	Richtigkeit	Präzision
	[µm]	[µm]	[µm]	[µm]
1R	5,6	1,3	10,3	1,2
1M	3,4	0,9	6,0	1,7
2R	6,4	0,6	13,5	1,9
2M	5,5	0,8	11,2	2,3
3R	6,9	1,1	9	1,6
3M	6,4	0,7	5,3	3,3

Tab. 53: Abweichungen des Ist-Werts vom Vorgabewert bei einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von 5 Hz und einer Amplitude von 100 µm

testgehend von den Z-Achsen entkoppelt. Die Resonanzen (< 9 µm) sind auch hier auf Einbaueffekte in die hydraulische Prüfmaschine zurückzuführen.

Fazit:

Die Genauigkeit der Sensorsysteme (deren Richtigkeit und Präzision) bei geringen, schnell ablaufenden, wiederholten Bewegungen, wie sie aus der überrollenden Verkehrsbeanspruchung zu erwarten sind, stellt sich als sehr hoch dar. Es weist eine Abweichung von maximal 8,0 µm in X- und 15,4 µm in Z-Richtung auf.

3.8.4 Fazit der Validierung im Labor

Die Sensorsysteme konnten in verschiedensten Szenarien, bei hohen Auslenkungen (jahreszeitliche Verformungen) und geringen, schnell wiederholten Auslenkungen (verkehrsinduzierte Verformungen), mehraxial und bei verschiedenen Temperaturen die Wegvorgaben in hoher Genauigkeit abbilden. Alle Sensorsysteme haben unter quasistatischer und dynamischer Beanspruchung selbst in

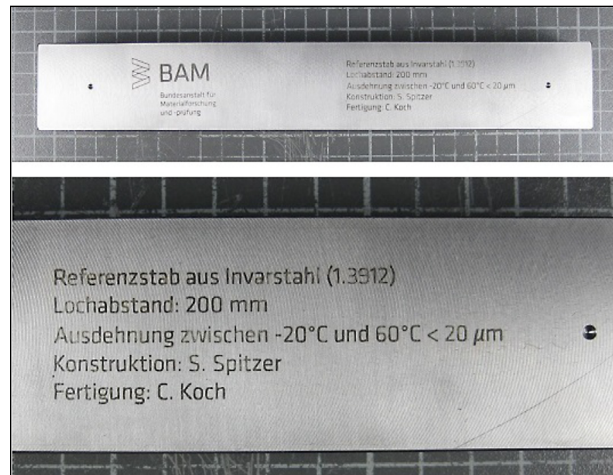


Bild 58: Referenznormal aus INVAR-Stahl mit einem Lochabstand von 200 mm

extremen Beanspruchungszuständen volle Funktionsfähigkeit gezeigt. Zudem wurde darauf geachtet, dass alle in situ erwarteten Bewegungen, Bewegungsarten und Temperaturen nach Möglichkeit in den Beanspruchungsszenarien dargestellt wurden.

Sämtliche Ergebnisse lassen auf eine zielführende Performance schließen.

3.9 Weiterführende Validierung des Messsystems

Als Vorbereitung zur praktischen Überprüfung der entwickelten innovativen Sensorsysteme wurden zusätzliche Messsysteme zur Kontrolle und Validierung der Sensorsysteme konstruiert bzw. bereitgestellt. Hierbei handelt es sich um einen handelsüblichen Setzdehnungsmesser und insbesondere um eine Eigenentwicklung, die im Folgenden als temporäres externes Kontrollsystem (TKS) bezeichnet wird.

Bei dem temporären externen Kontrollsystem handelt es sich um die Kombination von drei induktiven Wegaufnehmern. Diese sind hochauflösend und temperaturstabil. Vor jedem Kontrolleinsatz fand eine Überprüfung und Kalibrierung statt (siehe Bild 24).

Das Setzdehnungsmesssystem zur Validierung der Langzeit-Verformungen in X-Richtung wurden jedes Mal mit einem speziell angefertigten Referenznormal abgeglichen. Dieser besteht mit INVAR-Stahl aus einem Werkstoff, der sich durch einen sehr kleinen Wärmeausdehnungskoeffizienten auszeichnet. Damit ließen sich die Ausdehnungen und

Stauchungen der Fugenbreite auf 100 µm genau bestimmen (siehe Bild 58 und Bild 128).

3.10 Strukturierung der Datenerfassung und Reduktion bei kontinuierlicher Messung

Für die Erfassung aller relevanten Deformationsbeanspruchungen unter optimierten Erfassungsbedingungen werden zwei verschiedene Klassierungsmodi der Datenerfassung vorgeschlagen (siehe auch Kapitel 3.2.1):

- Klasse 1: Durchgängige Erfassung aller Verformungen zur Kennzeichnung kompletter Verformungsabläufe schnell ablaufender Verformungen in Folge der Verkehrsbeanspruchungen: von 9 bis 9:10 Uhr und 15:30 bis 15:40 Uhr (in der Rush-Hour) Speicherung aller Messwerte mit 2 kHz, ansonsten:
- Klasse 2: Reduzierte Erfassung aller Verformungen durch Klassierung und Reduzierung der Messwerte (siehe Bild 59)
 - Auswahl und Speicherung der Maximal-, Minimal und Mittelwerte alle 4 Sekunden
 - Auswahl und Speicherung des maximalen dynamischen Deformations-Ereignisses jede Stunde

Durch diese Vorauswahl in der Klasse 2 werden sowohl alle dynamischen maximalen Deformationser-

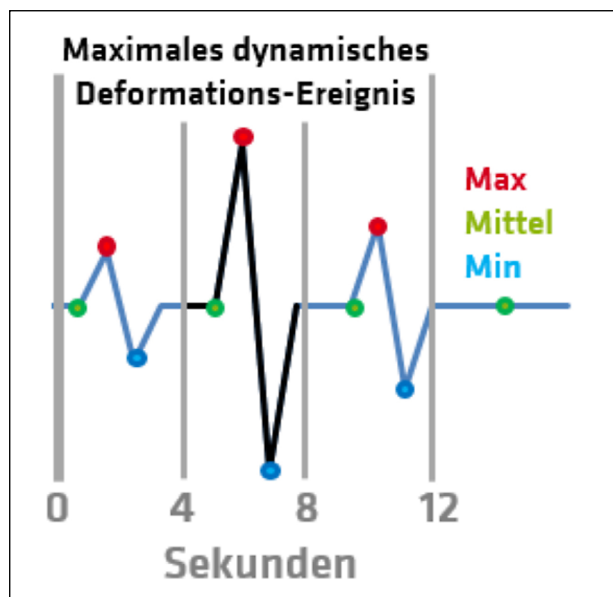


Bild 59: Klassierung der Daten bei verschiedenen Überroll-szenarien

eignisse, als auch deren Mittelwerte sowie die entsprechenden Abweichungen aufgezeichnet. Durch die Aneinanderreihung der 4-Sekunden-Werte (Klasse 2) lassen sich somit auch Langzeit-Verformungen erfassen und vor allem schnell auswerten. Durch die zwei Zeitschriebe von jeweils zehn Minuten (Klasse 1) während der Rush-Hour kann ein lückenloser Eindruck von der Belastung und dem Belastungsablauf der Fuge durch den überrollenden Verkehr gewonnen werden.

3.11 Lösungsvorschläge für eine autarke Energieversorgung

Aus der Anforderung, deutschlandweit unabhängig von der weiteren Infrastruktur Mess-Stationen zu errichten, ergibt sich der Bedarf nach einem Lösungsvorschlag für eine autarke Energieversorgung. Im Rahmen dieses Projektes wurden nachfolgend aufgeführte grundsätzliche Lösungsvorschläge erarbeitet. Zunächst wurde dazu der elektrische Leistungsbedarf für die entwickelte Mess-Station zur Absicherung der zwei Mess-Modi quantifiziert.

Der Strombedarf für eine Mess-Station inklusive Sensorsysteme und Datenübertragung setzt sich aus den Einzelverbrauchern zusammen:

• Industrie-PC	18 Watt
• Kamera	7 Watt
• Router	4 Watt
• Datenlogger	11 Watt
• Messverstärker	12 x 3 W = 36 Watt
• Spannungswandler	~1 Watt

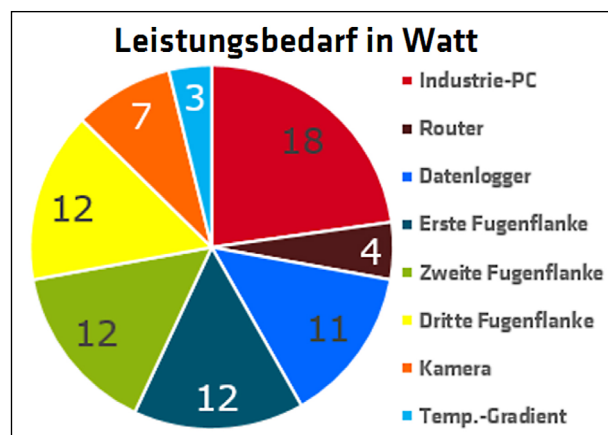


Bild 60: Elektrischer Leistungsbedarf einer Mess-Station in Watt mit anteiligen Verbrauchern

Die Anforderungen an eine autarke Stromversorgung sind, neben dem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 80 Watt und der Bereitstellung einer Versorgungsspannung von 24 Volt:

- unterbrechungsfreie ganzjährige Energieversorgung
- unter den Anwendungsbedingungen im deutschen BAB-Netz einsatzfähig
- Einhaltung aller sicherheitsrelevanten Aspekte
- einfach in der Installation und im Betrieb
- geringer Betriebsaufwand und wartungsarm

In einer Variantenanalyse wurden mehrere Einzel- und Kombinationslösungen grundsätzlich auf ihre Eignung hin diskutiert.

3.11.1 Akku- bzw. Batteriebetrieb

Eine preisgünstige Möglichkeit für die Anschaffung eines Akkumulators stellen Starterbatterien für Kraftfahrzeuge dar. Die größten verfügbaren Ausführungen sind Starterbatterien für Lkw. Diese verfügen über eine Kapazität von bis zu 225 Ah und eine Nennspannung von 24 Volt.

Gemäß der Gleichung

$$T = \frac{Q_{\text{ist}} * U_{\text{Nenn}}}{P_{\text{Nenn}}} = \frac{225 \text{ Ah} * 24 \text{ V}}{70 \text{ W}} \approx 77 \text{ h}$$

müsste der Akku jedoch alle drei Tage aufgeladen werden, was in der Praxis nicht umsetzbar ist. Zudem mindert der während des Betriebs stattfindende permanente Spannungsabfall die Ausfallsicherheit dieser Lösung.

Technische Details (Lkw-Batterie):

- Betrieb: 3,2 Tage
- Laufende Kosten: ~ 0,5 €/kWh

Selbst mit den derzeit leistungsstärksten Hochleistungs-Akkus käme man auf eine Laufzeit von maximal 42 Tagen. Eine derartige Lösung ist aus Kostengründen ausgeschlossen.

Fazit:

Die Einzellösung Batterie- bzw. Akku-Betrieb ist aufgrund des zu hohen Leistungsbedarfs nicht möglich.

3.11.2 Windkraftanlage

Es gibt sehr viele Anbieter von Kleinwindkraftanlagen, die sowohl für Privathaushalte als auch kleine Unternehmen, vor allem Landwirtschaftsbetriebe, angeboten werden. Sämtliche Windkraftanlagen teilen sich nochmals auf in vertikale und horizontale Bauformen. Hohe Windkraftanlagen in Höhen von 30-200 m sind in aller Regel horizontal gebaut, da dort gleichmäßige laminare Strömungsverhältnisse herrschen. Da in Bodennähe mehr Verwirbelungen auftreten, eignen sich daher für den Einsatz direkt auf Häusern oder in bebauten Umgebungen in niedriger Höhe eher vertikale Bauformen.

In Kombination mit Solarmodulen stellen Windkraftanlagen eine gute Ergänzung dar, weil in den sonnen schwachen Wintermonaten mehr Wind anfällt und in den sonnenstarken Sommermonaten weniger Wind anfällt.

Ein Nachteil von Windkraftanlagen ist der rechtliche Aufwand, der vor der Errichtung betrieben werden muss und von Bundesland zu Bundesland unterschiedlich ist. So benötigt man beispielsweise in Berlin, Bremen und Niedersachsen für alle Windkraftanlagen eine Baugenehmigung und es herrscht eine zusätzliche Anzeigepflicht. In anderen Bundesländern besteht teilweise nur eine Anzeigenpflicht, die jedoch wiederum von der Nabenhöhe und dem Rotordurchmesser abhängig ist.

Ein weiterer Nachteil von Windkraftanlagen ist die nicht durchgängige Verfügbarkeit der Windkraft. Sämtliche Lösungen benötigen deshalb eine zusätzliche Speicherlösung, die, je nach Leistungsbedarf und Wind-Exposition, sehr kostenintensiv ausfallen kann.

Bei Windkraftanlagen entscheidet letztendlich eine Begehung vor Ort darüber, ob sich ein Einsatz lohnen kann.

Fazit:

Ein Betrieb mit einer Windkraftanlage ist aufgrund des steten Leistungsbedarfs und des rechtlichen und technischen Aufwands als zu aufwändig einzuschätzen.

3.11.3 Photovoltaik-Anlage

Photovoltaik-Anlagen haben den großen Vorteil, dass sie aufgrund der hohen Produktionszahlen, wegen der großen Verbreitung und flächendecken-

den Verwendung, in den letzten drei Jahrzehnten leistungsfähiger und preiswerter geworden sind.

Der große Nachteil ist, dass sowohl nachts, als auch bei Bewölkung und an Regen- und Schneetagen, kein Strom zur Verfügung steht. Um diese Ausfallzeiten abzufangen, müsste eine Photovoltaik-Anlage überdimensioniert ausgelegt und entsprechende Akkus zur Energiespeicherung bereitgestellt werden. Beides erhöht, unter Berücksichtigung ausreichender Ausfall-Sicherheit, die Kosten für eine Photovoltaiklösung immens.

Fazit:

Ein alleiniger Photovoltaik-Betrieb ist aufgrund des steten Leistungsbedarfs aufwändig.

3.11.4 Diesel-, Benzin und Gasaggregate

Handelsübliche Diesel-Aggregate sind für sehr hohe Leistungen bei kurzer Betriebsdauer ausgelegt. Für die Anforderungen der entwickelten Mess-Station, moderate Leistung über 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr, kommen sie damit nicht in Frage.

Benzin-Aggregate sind meistens als Notstromaggregate für mehrere Stunden ausgelegt. Damit kommen sie den Anforderungen der entwickelten Mess-Station, moderate Leistung über 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr, zwar näher als Diesel-Aggregate, können diese aber auch nicht zur Zufriedenheit erfüllen. Gas-Aggregate sind in der Regel für den kurzfristigen Betrieb in Wohnmobilen ausgelegt. Die relativ geringe Größe des Tanks schließt sie für den Betrieb der Mess-Station aus.

Fazit:

Ein Betrieb mit verbrennungsmotorgestützten Notstromaggregaten ist aufgrund des steten Leistungsbedarfs aufwändig und daher als nicht zielführend einzuschätzen.

3.11.5 Brennstoffzelle

Brennstoffzellen stellen eine platzsparende und vergleichsweise günstige Lösung für eine autarke Spannungsversorgung dar. Erste Recherchen ergaben Lösungen für eine unterbrechungsfreie Laufzeit von zwei bis vier Monaten. Es besteht jedoch ein gewisses Umwelt-Risiko, da die betrachteten Brennstoffzellen mit Methanol betrieben werden und dieses giftig ist. Zur Absicherung des Bedarfs unserer Mess-Station müssten für 120 Tage Betrieb etwa 240 Liter Methanol vor Ort gelagert werden.

Die Sicherheitsanforderungen für die Lagerung solcher Mengen sind sehr hoch und müssen je nach Standort geklärt werden.

Da die betrachtete Brennstoffzelle mit Methanol betrieben wird und dieses einen Siedepunkt von 65 °C besitzt, muss im Sommer eine ausreichende Kühlung vorhanden sein.

Fazit:

Eine Spannungsversorgung ausschließlich über eine Brennstoffzelle ist möglich. In Kombination mit einer weiteren Stromquelle (Solarpanel, Windkraftanlage) ist dies derzeit die favorisierte Lösung.

3.11.6 Kombinationslösung

Aufgrund der in Kapitel 3.11 genannten Anforderungen an die Spannungsversorgung können eine Kombinationslösung aus Brennstoffzelle und Kleinwindkraftanlage oder Brennstoffzelle und Solarpanel eine geeignete stabile Lösung des Energieproblems darstellen. Der Investitionsaufwand ist geringfügig höher als der alleinige Betrieb mit einer Brennstoffzelle. Dafür sinkt der Versorgungsaufwand (Nachfüllen des Methanol-Tanks) erheblich. Gerade an abgelegenen Orten bzw. weit vom Auftragnehmer entfernt relativiert sich damit der anfänglich höhere Kostenaufwand.

Fazit:

In Kombination mit einem weiteren Energieerzeuger (Solarpanel, Windkraftanlage) ist eine Spannungsversorgung zusammen mit einer Brennstoffzelle derzeit die ökonomischste Lösung für den erforderlichen dauerhaften Betrieb.

	4*28 Liter Tank	2*60 Liter Tank	4*60 Liter Tank
80 Watt	64 Tage	68 Tage	136 Tage
120 Watt	43 Tage	45 Tage	90 Tage

Tab. 54: Autarke Laufzeit der Mess-Station in Tagen bei Betrieb mit einer Brennstoffzelle bei verschiedenen Tankgrößen und verschiedenen Leistungen

	4*28 Liter Tank	2*60 Liter Tank	4*60 Liter Tank
80 Watt	86 Tage	91 Tage	182 Tage
120 Watt	51 Tage	54 Tage	109 Tage

Tab. 55: Autarke Mindestlaufzeit der Mess-Station in Tagen bei Betrieb mit einer Brennstoffzelle in Kombination mit einem 200 Watt Solarpanel bei verschiedenen Tankgrößen und verschiedenen Leistungen

3.11.7 Zusammenfassung der autarken Stromversorgung

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurde gibt es eine Vielzahl von autarken Spannungsquellen. Durch die verschiedenen Anforderungen, vor allem durchgehende Versorgung, deutschlandweit einsatzfähig und geringer Personalbedarf bei Betrieb, scheiden die meisten Lösungsansätze derzeit wieder aus. Als geeignete Einzel-Lösung bleibt nur eine Brennstoffzelle. Durch Kombination mit einem Solarpanel oder einer Windkraftanlage erreicht man mit vertretbarem personellem und finanziellem Aufwand (maximal zwei Versorgungsfahrten pro Jahr) eine ganzjährige Spannungsversorgung einer Mess-Station an jedem Ort in Deutschland.

3.12 Entwicklung einer Einbautechnologie

Zur Umsetzung eines sicheren, schnellen und präzisen Einbaus der Sensorsysteme unter den Einsatzbedingungen im BAB-Netz wurde ein für Flugfeldertüchtigung erprobtes Material auf seine Tauglichkeit hin getestet.

3.12.1 Haftzugversuch und Scherversuch mit Vergussmörtel

Um den Haftverbund des gewählten Vergussmaterials sowohl mit der Sensor-Umhausung als auch mit der angrenzenden Betondecke zu gewährleisten, und damit ein Herausreißen des Sensorsystems durch überrollenden Verkehr in situ auszuschließen, wurden mehrere Beanspruchungsversuche zur sicheren Übertragung aller aus der Verkehrslast folgenden Beanspruchungen mit dem ausgewählten Vergussmaterial unternommen:

- Scherversuch nach DIN EN 13653 auf Stahl- und Betonoberfläche
- Haftzugversuch nach DIN EN 13596 sowohl auf polierter als auch auf sandgestrahlter Metalloberfläche

Fazit:

Aufgrund der in den Vorversuchen erreichten Festigkeitskennwerte und der im Datenblatt aufgeführten Leistungsmerkmale ist das ausgewählte Verfüllmaterial als geeignet unter den hohen Beanspruchungen des Bundesfernstraßenbereichs anzuse-



Bild 61: Ermittlung der Scherkraft-Festigkeit zwischen Vergussmörtel und glatter (unbehandelter) Stahlplatte

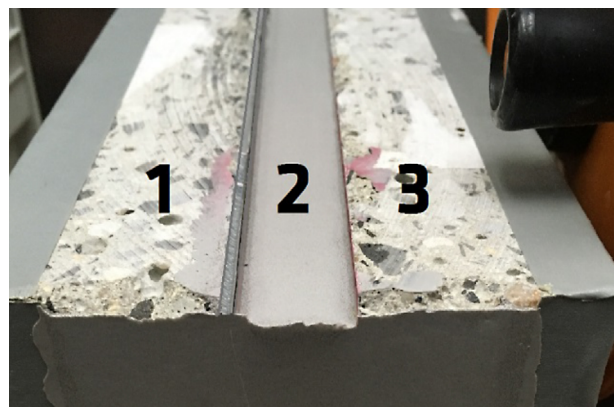


Bild 62: Probekörper für den Nachweis der Scherfestigkeit; Beton (1), Vergussmörtel (2), Beton (3); zwischen 1 und 2 befindet sich eine Stahlplatte

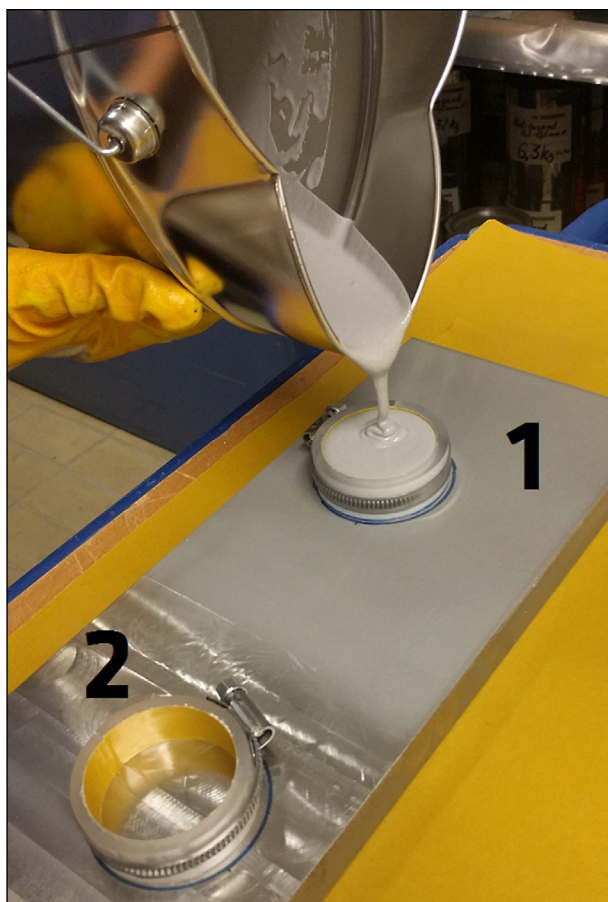


Bild 63: Herstellung der Probekörper für den Haftverbund bei Zugbeanspruchung; Oberfläche aufgeraut durch Sandstrahlen (1) und einmal glatt durch nachträgliches Fräsen (2)

	Scherkraftverhältnis	Haftzugverhalten gefräste Stahlplatte	Haftzugverhalten sandgestrahlte Stahlplatte
Versuchsfläche [mm ²]	21603,8	1963,5	1963,5
Kraft [kN]	220,5	14,1	18,5
Prüftemperatur [°C]	~23	~23	~23
Zulässige Spannung [N/mm ²]	10,2	7,18	9,4

Tab. 56: Ergebnismwerte für die erreichte Haftzug- und Scherfestigkeit

hen. Das Material liegt in praxisgerechten Spezifikationen für einen Einsatz in tiefen, mittleren und hohen Temperaturen vor.

3.12.2 Schalung zum Schutz des Fugenbereichs beim Sensoreinbau

Da das Sensorsystem an beiden Fugenflanken angebunden werden muss liegt die Fuge bei dem Einbau offen. Beim Wiederverschluss des Sensorsys-

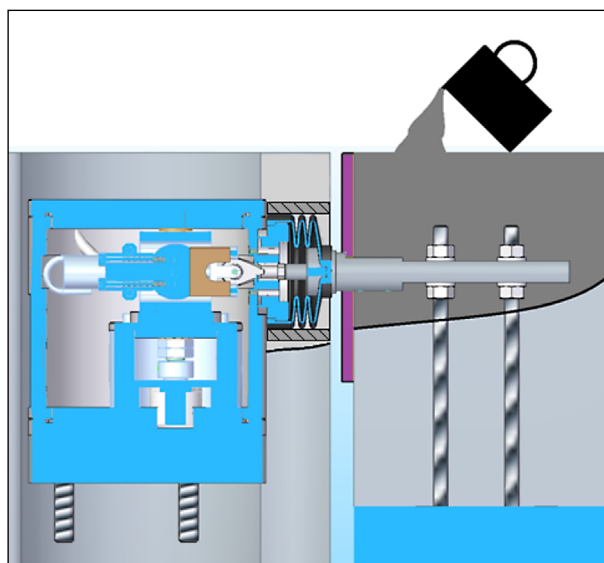


Bild 64: Schalung (in lila) zum Verschließen des Anbindungsbauteils

tems darf kein mineralisches Material (z. B. Vergießbeton) in die Fugenkammer gelangen. Ein kraftschlüssiger Verbund der Fugenflanken ist zu vermeiden. Zu diesem Zweck kommt eine Schalung zum Einsatz, die den kraftschlüssigen Verguss der Fugenflanken verhindert.

Um ein späteres Lösen der Schalung vom Vergussmörtel zu gewährleisten wurde der Einsatz von Trennmittel untersucht. Dieser wurde in zwei verschiedenen Modifikationen durchgeführt:

- Nur Schaumstoff an Vergussmörtel
- Schaumstoff mit pulverförmigem Trennmittel an Vergussmörtel

Die Schalung wird vor dem Wiederverschluss der Fuge zerstörend entfernt

3.12.3 Probereinbau an der BAM

In Vorversuchen sowie einem Probereinbau eines Dummies auf dem Gelände der BAM wurde eine Einbautechnologie entwickelt und erprobt. Neben dem Haftverhalten der Verschlussmaterialien unter Laborbedingungen wurde auch die Performance bei Überrollung mit einem 4,5 t schweren Gabelstapler nach dem Einbau und planem Verschluss überprüft (siehe Bild 65). Anschließend fand ein erster Praxistest für eine Ausbautechnologie, die die Wiederverwendbarkeit der Sensorik sicherstellt. Beide Verfahren zeigten bei der erstmaligen Erprobung in der BAM, dass sie grundsätzlich auch unter den Bedingungen der Straßen-



Bild 65: Überrollvorgang über verschlossenes Sensorsystem mit einem 4,5 t schweren Gabelstapler

baupraxis geeignet sein können. Ihre Anwendung im Versuchsfeld ist in den Kapiteln 4.2 und 4.3.5 beschrieben.

3.12.4 Fazit zur Entwicklung einer Einbautechnologie

Es wurde eine geeignete Ein- und Ausbautechnologie für die Bedingungen des BAB-Netzes entwickelt und erfolgreich erprobt. Die praktische Anwendung vor Ort unter verschiedensten Klimaverhältnissen, bei knapp über 0 °C im März bzw. bei über 25 °C im August, ist in Kapitel 4.2 beschrieben.

4 Erprobung des Messsystems in situ

Der zweite Validierungsabschnitt der Sensorik erfolgte durch eine Erprobung des Messsystems unter praxisgerechten Bedingungen im Feld.

Im Folgenden wird die mehrstufige Validierung im Versuchsfeld duraBAST beschrieben. Die mehrstufige Absicherung validierter Leistungsfähigkeit besteht aus den folgenden Einzelschritten:

- Funktionstests der Sensorik nach Einbau
- Funktionsüberprüfung durch bewährtes Impakt-Verfahren der Straßenzustandsbewertung (FWD-Messung)

- Funktionsüberprüfung durch externe Setzdehnungsmessung
- Funktionsüberprüfung durch externes temporäres Kontrollsystem
- Funktionsüberprüfung durch gezielte Lkw-Überfahrten
- Funktionsüberprüfung durch gezielte MLS-Bearbeitung
- Funktionsüberprüfung durch Abgleich mit Temperaturdaten

4.1 Auswahl eines repräsentativen Erprobungsfeldes

Nach Diskussion verschiedener Optionen zur Auswahl repräsentativer Erprobungsabschnitte in Kapitel 5 unter Einbeziehung von Verkehrs- und Klimadaten wurde der Vorschlag präferiert die Erprobung auf einem Testgelände im Kreuz Köln-Ost, dem sogenannten duraBAST durchzuführen. Diese Option bot den Vorteil, eine variantenreiche Überprüfung und Validierung der Mess-Station unter repräsentativen und exakt definierten Randbedingungen durchführen zu können. Daneben konnten die Ein- und Ausbautechnologien und die Erprobung unter verkehrssicheren Umgebungsbedingungen erfolgen. Gleichzeitig war es ein Synergie-Effekt, aktuelle straßenbautechnische Entwicklungsprojekte messtechnisch zu unterstützen.

4.1.1 Beschreibung Teststrecke duraBAST

Das duraBAST liegt innerhalb des Autobahnkreuzes Köln-Ost, welches die Bundesautobahn 4, Bundesautobahn 3 und die Bundesstraße 55a miteinander verbindet. Das Areal befindet sich rechts der Nord-Südverbindung innerhalb der nach Osten abgehenden Bundesautobahn 4 (siehe Bild 67).

Am südlichen Ende des duraBAST (links in Bild 67) befindet sich ein Gebäude mit Stromanschluss, Wasseranschluss und WCs. Der Zugang zu dem Areal ist von der Öffentlichkeit abgesichert und erfolgt direkt von dem Autobahnzubringer von Süden kommend und nach Osten abbiegend auf die A4 nach Olpe (siehe Bild 66).

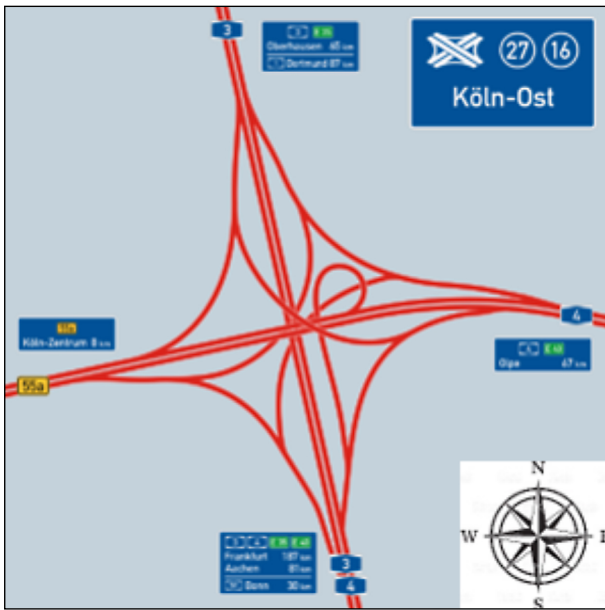


Bild 66: Kreuz Köln-Ost in normaler Landkartenausrichtung

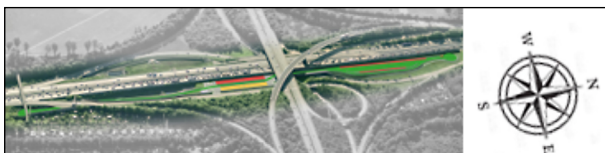


Bild 67: In grün eingezeichnetes Areal mit verschiedenen Testabschnitten in rot und gelb

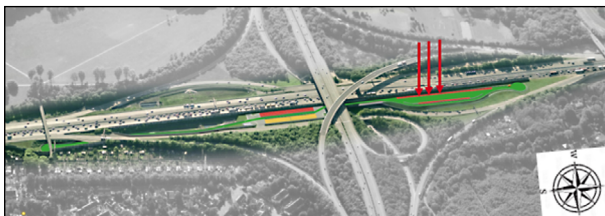


Bild 68: Areal der duraBAST mit eingezeichneter Lage der drei mit Sensorsystemen bestückten Fugen

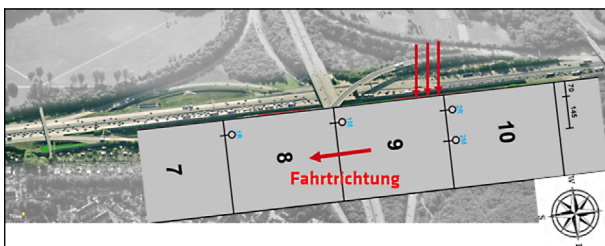


Bild 69: Sensorlage auf dem Waschbetonabschnitt 40

4.1.2 Beschreibung des Erprobungsfeldes; Waschbetonstrecke 40

Die Betondecke des Testabschnittes (duraBAST Kennzeichnung: Waschbetonstrecke 40) hat eine Gesamtlänge von hundert Metern. Sie ist einspurig und besteht aus zwanzig Betonplatten mit einer Breite von 4,25 Metern, einer Länge von fünf Metern und einer Dicke von 23 Zentimetern mit einer darunterliegenden Asphalt-Tragschicht. Die Ober-

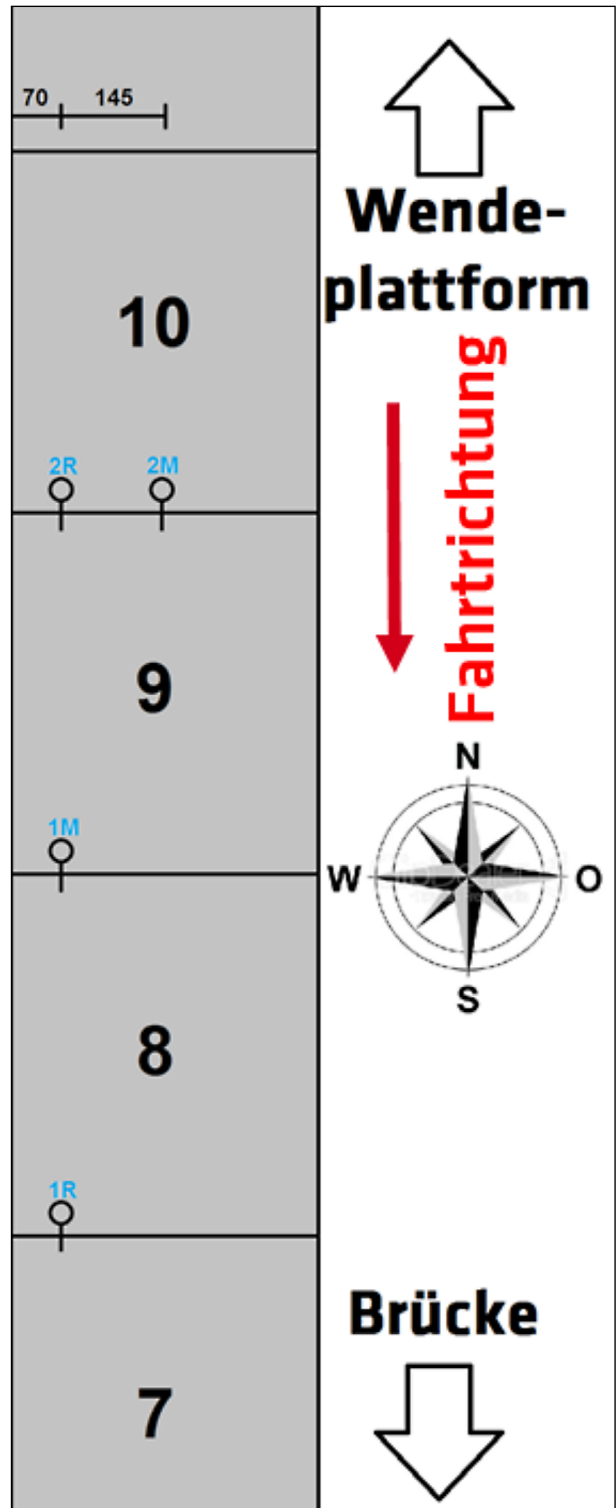


Bild 70: Endgültige Einbaulage in situ auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBAST; Sensorsystemnummern in blau

flächenstruktur wurde mittels Besenstrich quer zur Fahrtrichtung erstellt. Die Festlegung erfolgte aufgrund einer Falling Weight Deflectometer Messung (FWD-Messung) der Hochschule Anhalt. Aus deren Messungen geht hervor, dass die Relativbewegungen der Fugenflanken zwischen Betonplatte neun und zehn relativ groß ist, was auf eine große Aus-



Bild 71: Schaltschrank in situ mit Kamera neben der Mitte der Platte 8

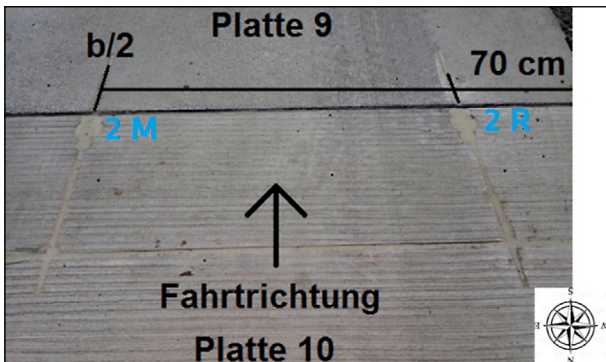


Bild 72: Lage der Sensorensysteme 2M und 2R an der Fuge zwischen Platte 9 und 10

bildung des Kerbrisses hindeutet. Die Fuge zwischen Betonplatte acht und neun weist hingegen kaum Bewegung auf. Die Fugenbewegungen zwischen Platte sieben und acht befinden sich laut Bericht der Hochschule Anhalt auf einem mittleren Wert.

In Bild 70 ist die endgültige Einbaulage auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBAST skizziert. Der Schaltschrank befindet sich hinter der Leitplanke in der Mitte der Betonplatte 8, zwischen den Sensorensystemen 1R und 1M (siehe Bild 71).

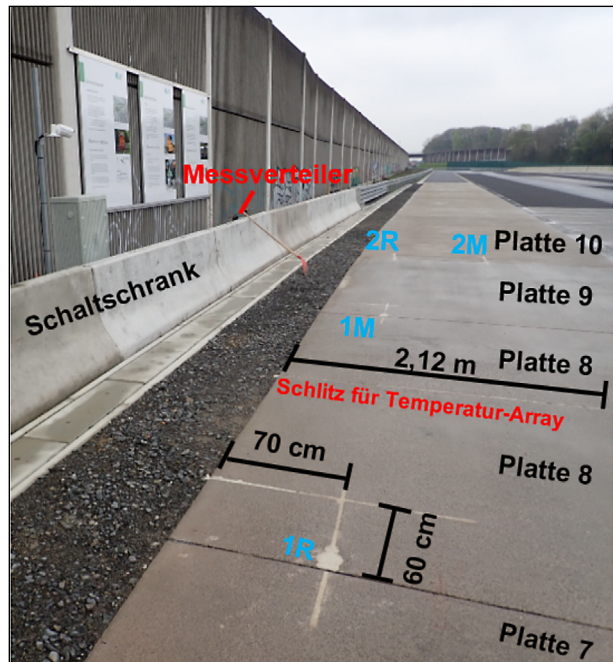


Bild 73: Sicht nach Norden auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBAST

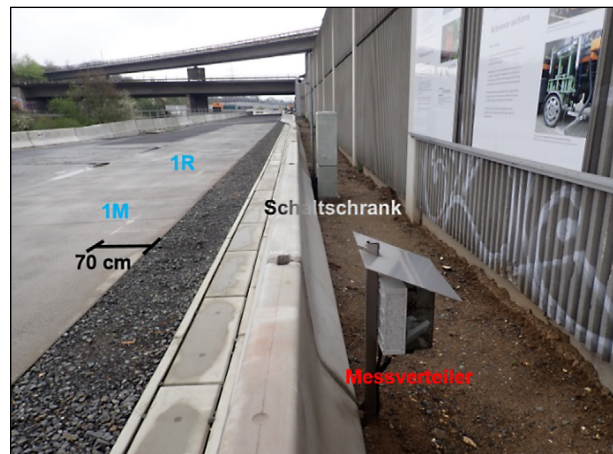


Bild 74: Sicht nach Süden auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBAST

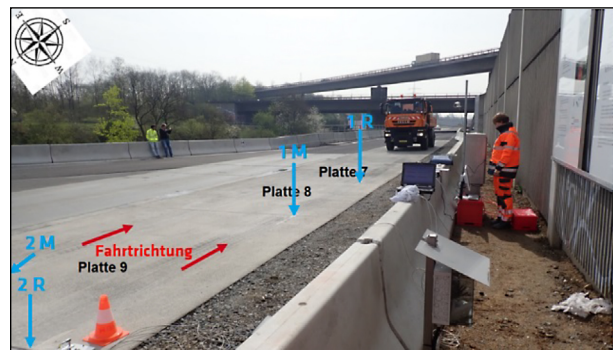


Bild 75: Einbaulage der Sensorensysteme auf der Waschbetonstrecke 40, Blick nach Süden

In Bild 74 sind alle bisherigen Ein- und Aufbauten auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBAST eingezeichnet. Die Sicht ist nach Norden und gegen die reguläre Fahrtrichtung ausgerichtet.

In Bild 74 und Bild 75 ist die Lage des Messverteilers und des Schaltschranks zu erkennen. Der Blick ist in Richtung Brücke nach Süden in Richtung der regulären Fahrtrichtung gerichtet.

Fazit:

Die Sensorsysteme wurden an den Fugen zwischen den Platten 7/8, 8/9 und 9/10 (Nummerierung von Süden nach Norden aufsteigend) installiert, wobei bei den ersten beiden Fugen jeweils nur ein Sensorsystem in die Rollspur des Fahrbahnbelags eingebracht wurde (siehe Bild 70).

4.1.3 Beschreibung des Erprobungsfeldes Fertigteil-Betonstrecke

Eine der Teststrecken auf dem duraBAST ist ein neuartiger Fertigteil-Betonfahrbahn-Abschnitt. Diese Technologie befindet sich bereits im städtischen Probeinsatz und soll auf dem duraBAST weiteren Tests unterzogen werden. Im Verlauf der Vorbereitungen des Einbaus erfolgte der Vorschlag seitens der BAST zwei der sechs Sensorsysteme auf diesem Abschnitt zu installieren. Aufgrund von weiteren Bau-Maßnahmen auf dem duraBAST konnte keine Installation der Sensorsysteme im März 2018 auf diesem Testabschnitt erfolgen.

Es wurden jedoch erste Vorbereitungen für eine spätere Installation getroffen:

- Die letztendliche Lage der beiden Sensorsysteme wurde auf die Fuge zwischen den Fertigteil-Beton-Platten 4 und 5 (von Norden nach Süden aufsteigend nummeriert, siehe Bild 77) festgelegt.
- Ein Sensorsystem wird in der Mitte der Fuge installiert, das andere möglichst am Rand mit ca. 25 cm Abstand zur Plattenkante.
- Die Schlitz- und Bohrarbeiten für eine spätere Installation der beiden Sensorsysteme an der Fuge wurden am 20. und 21. März durchgeführt.
- Der Einbau fand am 13. und 14. August statt.



Bild 76: Areal der duraBAST mit eingezeichneter Lage der beiden Sensorsysteme

In Bild 76 ist die Lage der Fertigteil-Betonfahrbahnstrecke eingezeichnet. Sie befindet sich auf der anderen Seite der Brücke (südlich, bzw. links in der Bild).

In Bild 77 ist die Sensorlage auf dem Fertigteil-Betonfahrbahnabschnitt eingezeichnet. Die Sensorsysteme befinden sich an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte 4 und 5, einmal in der Mitte der Platte und einmal 25 cm vom Plattenrand entfernt.

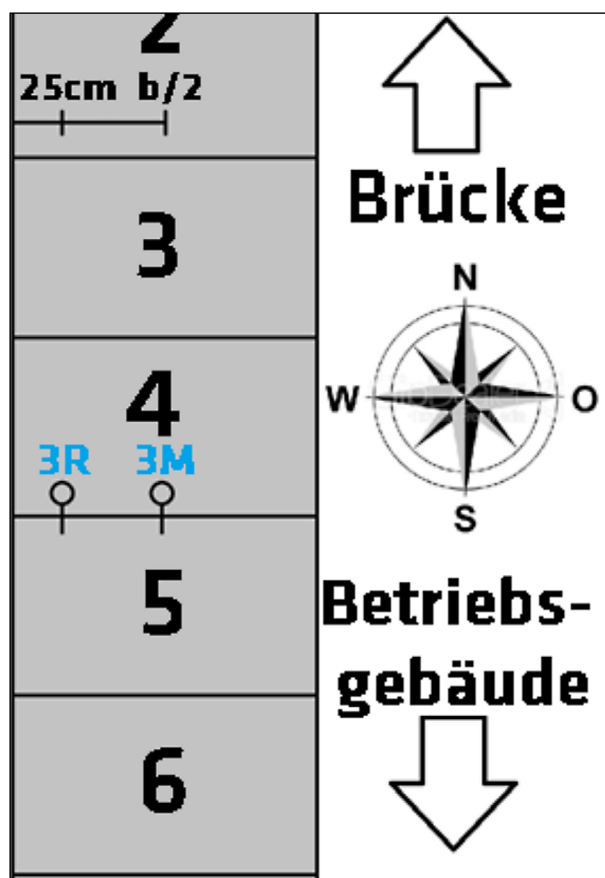


Bild 77: Endgültige Einbaulage in situ auf dem Fertigbetonteilabschnitt eines anderen Projektes des duraBAST; Sensorsystemnummern in blau

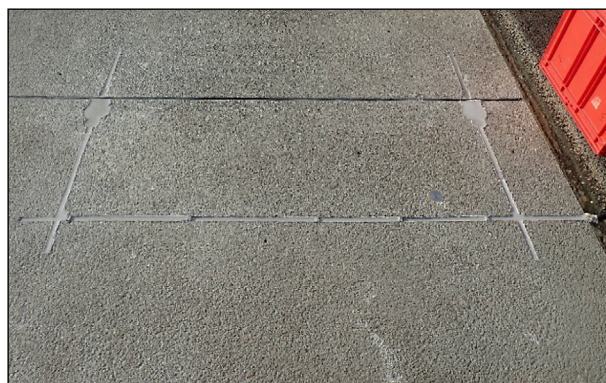


Bild 78: Eingebaute Sensoren 3 R und 3 M auf der Fertigteilbetonstrecke



Bild 79: in die Leitungsschlitzte eingebrachte Wehre aus Schaumstoff, um einen zur Plattenoberkante ebenen Abschluss zu erzeugen

Da die Fertigteilbetonstrecke eine starke Querneigung aufwies, konnten die Leitungsschlitzte nicht am Stück vergossen werden, sondern mussten in Abschnitte unterteilt werden (siehe Bild 79).

4.2 Einbau der Sensorik

Der Aufbau einer Mess-Station mit vier Sensorsystemen fand vom 20. bis 23. März 2018 statt. Die folgenden Schritte entsprechen der Abfolge einer zuvor erarbeiteten Einbauanleitung. Lediglich die Schlitzarbeiten wurden durch eine externe Straßenbaufirma vor den Bohrarbeiten durchgeführt. Vorab erfolgten FWD-Messungen zur Auswahl repräsentativer Querscheinfugen.

4.2.1 Bestimmung der zu instrumentierenden Fugen mittels FWD

Die FWD-Messungen zur Auswahl der mit Sensorsystemen zu bestückenden Querscheinfugen wurden von der Hochschule Anhalt durchgeführt. Dies geschah am 8.3.2018 in Abwesenheit der BAM. Auf Empfehlung der Hochschule Anhalt legte die BAST die Fugen zwischen den Betonplatten sieben und acht, acht und neun sowie neun und zehn als zu instrumentierende Fugen fest. Auf dieser Grundlage erfolgte der Einbau der Sensorik durch die BAM vom 20. bis 23. März 2018.

4.2.2 Einrichtung der Baustelle

Zur Einrichtung der Baustelle wurden sämtliche für den Bau benötigten Geräte und Materialien in zwei Kleintransportern auf die Feldversuchstrecke verbracht. Die Baustelle wurde unter den sicherheitstechnischen Anforderungen eines Einbaus im BAB-Netz eingerichtet. (Bild 80 – 81)



Bild 80: Baustelleneinrichtung, Bohr-Schablonen, Werkzeug, Einbau- und Verschlussmaterialien und Sicherheitsbedarf im Lager der BAM



Bild 81: Baustelleneinrichtung, Bohr-Schablonen, Werkzeug, Einbau- und Verschlussmaterialien auf dem dura-BAST

4.2.3 Verlegung der Kabel und Aufstellung der Mess-Station

Aus Sicherheitsgründen wurden die Kabel unterirdisch verlegt. Dafür mussten Tunnel unter dem Kabelkanal und der Leitplanke angelegt werden. Diese dienten als Verbindung zwischen Messfeld und Schaltschrank bzw. Messverteiler (Bild 82 – 85).

4.2.4 Vorbereitung der Fuge

Nach dem Auffinden der Dübel wurden die Maße für die zu erstellenden Schlitzte zur Kabelführung an allen Fugen angezeichnet.

Die Sensorsysteme werden jeweils zwischen zwei Dübeln platziert. (Bild 86 – 88)



Bild 82: Ausgehobene Grube vor dem Kabelkanal und vor der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel



Bild 85: Grube vor der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel



Bild 83: Durchbruch unter dem Kabelkanal zur Durchführung der Messkabel



Bild 86: Auffinden der Dübel mithilfe eines Radargeräts



Bild 84: Ausgehobene Grube hinter der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel

Hinweis:

Bei der Fertigteilbetonstrecke ist zu beachten, dass die Dübel nur von einer Seite mit einem Radargerät erkannt werden können, da sie an der anderen Seite in Einsparungen stecken und die vorhandene Luftschicht zwischen Dübel und Beton ein Auffinden erschwert bzw. unmöglich macht. Es muss daher von beiden Seiten der Fuge mit dem Radargerät nach den Dübeln gesucht werden.

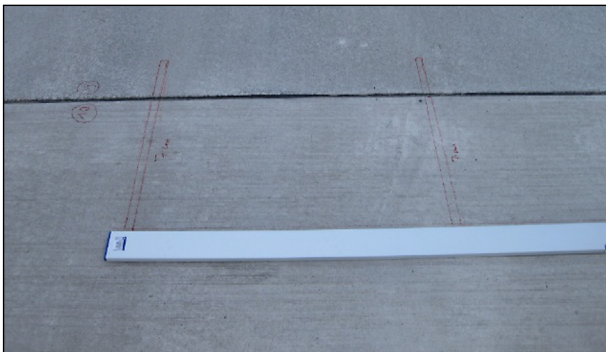


Bild 87: Anzeichnen der Schlitzmaße auf der Waschbetonstrecke 40



Bild 88: Anzeichnen der Schlitzmaße auf der Fertigteilbetonstrecke

4.2.5 Ausführung der Schlitzarbeiten

Die Schlitzarbeiten wurden am Morgen des 21. März 2018 durch eine externe Fachfirma durchgeführt. (Bild 89 – 91)



Bild 89: Schlitzarbeiten an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn



Bild 90: Fertige Schlitzarbeiten für Sensorsystem 2R an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn



Bild 91: Fertiges Schlitzbild an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn

4.2.6 Positionierung der Bohrschablone

Für eine schnelle und sichere Positionierung der Sensoren und der Sicherstellung der angestrebten Messbereiche wurde eine spezielle Bohrschablone erstellt. Die an der Unterseite der Bohrschablone angebrachten Metallstifte passen in die Querscheinfuge und richten die Lage des einzubauenden Sensors exakt zur Fuge aus. Bei korrekter Ausführung der Schlitzarbeiten passen die vier Aussparungen der Bohrschablone genau auf den Schlitz bzw. die Querscheinfuge. Damit kann die Einbaulage abschließend kontrolliert werden. (Bild 92 –93)

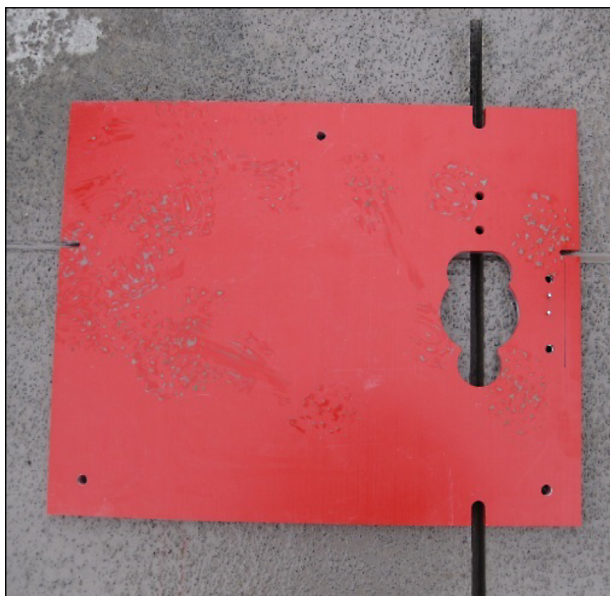


Bild 92: Positionierte Bohrschablone an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn



Bild 93: Positionierte Bohrschablone

4.2.7 Bohrarbeiten zur Sensorpositionierung

Die Bohrarbeiten fanden nach den Schlitzarbeiten statt. Die Arbeiten müssen mit einem langsamen Schneidvorschub durchgeführt werden, um die erforderliche Genauigkeit zu erzielen.

Zuerst wird das größte Bohrloch zur späteren Aufnahme des Sensors mit 112 mm Durchmesser gebohrt. Anschließend werden die drei Bohrlöcher für die Peripherie (Anbindung des Sensors) mit 62 mm Bohrdurchmesser gebohrt (siehe Bild 94). Nach korrekter Durchführung der Bohrarbeiten mit nur einer Bohrschablone entsteht das in Bild 95 dargestellte Bohrbild.

Nach dem Herausheben der Bohrkerns werden zwei 12 mm Bohrlocher auf der gegenüberliegenden Betonplatte zur Installation des Anschlussgalgens des Sensors gebohrt (siehe Bild 96).

Danach wird eine zweite vorbereitete Bohrschablone auf der unteren Bohrschablone fixiert. Durch diese werden drei 12 mm Löcher zur späteren Verankerung des Sensors an der Unterseite des 112 mm Bohrlochs gebohrt (siehe Bild 97).

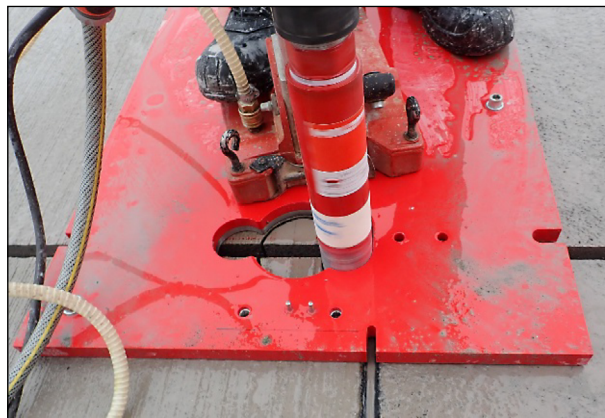


Bild 94: Bohrarbeiten der großen Bohrlocher für das Sensorsystem

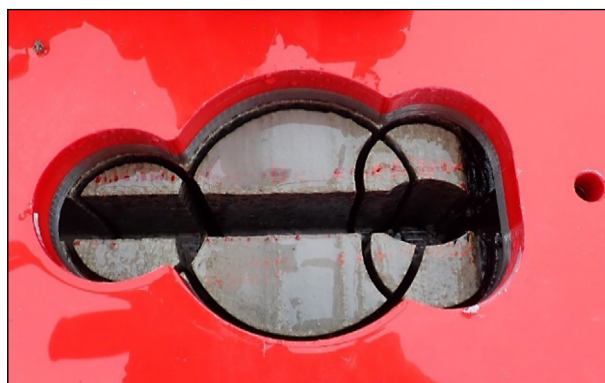


Bild 95: Fertiges Bohrbild der großen Bohrungen



Bild 96: Bohrarbeiten der zwei 12 mm Bohrungen für die Fixierung des Anschlussgalgens; vorne ist bereits die zweite Bohrschablone in das große Bohrloch eingebracht und auf der unteren Bohrschablone fixiert



Bild 97: Bohrarbeiten der tieferliegenden Bohrlöcher für die Verankerung des Sensorsystems mit einer zweiten eingesetzten Bohrschablone

4.2.8 Elektrischer Anschluss der Sensorsysteme

Vor dem Einbringen der Sensorsysteme werden diese elektrisch und messtechnisch angeschlossen und die angezeigten Messwerte auf Plausibilität überprüft. (Bild 98 – 99)

Hinweis:

Alle Messwerte des Sensors sind zu Dokumentationszwecken aufzuzeichnen und zu speichern!



Bild 98: Prüfung der Sensoranzeigen der Sensorsysteme



Bild 99: Einrichtung eines provisorischen PC-Arbeitsplatzes auf dem duraBAST

4.2.9 Prüfen der Schlitz- und Bohrmaße

Alle Schlitz- und Bohrmaße werden vor der Installation des Sensorsystems überprüft, damit bei der nachfolgenden Installation die erforderliche Lagegenauigkeit des Sensorsystems sichergestellt werden kann. Zu diesem Zweck werden zunächst die Schlitz- und Bohrlöcher gereinigt (siehe Bild 100).

Anschließend werden alle Bohr- und Schlitzmaße überprüft (siehe Bild 101).

Ein Probeinsatz mit einem Sensorsystem dient als letzte Überprüfung vor der Installation (siehe Bild 102).



Bild 100: Reinigung des fertigen Bohr- und Schlitzbildes



Bild 101: Prüfen aller Bohrtiefen mit Zollstock



Bild 102: Probeinsatz eines Sensorsystems



Bild 103: Eingebraachte Vergusschablone in der Fugenkammer mit Sensorsystem kurz vor der Installation



Bild 104: Einfüllen des Vergussmörtel bis 13 cm unter Oberkante

Hinweis:

Alle Messwerte des Sensors sind zur Detektion möglicher Verkantungen des Sensorarmes aufzuzeichnen und zu speichern!

4.2.10 Einbau des Sensorsystems

Für die endgültige Fixierung des Sensorsystems wird zunächst eine Schalung zum Schutz des Fugenspaltes in die Fugenkammer eingebracht (siehe Bild 103). Diese verhindert das spätere Abfließen von Vergussmörtel bzw. Gießbeton in den Fugenspalt.



Bild 105: Fertig vorbereitetes Bohrbild mit Vergusschablone, Vergussmörtel und Abdichtungsmörtel



Bild 106: Installation eines Sensorsystems mit aufmontiertem Hilfskreuz und Einbaulehre

Zur hohlraumfreien Verfüllung und Fixierung bis zur Sensorunterseite wird bis 13 cm unter der Betonfahrbahnoberkante ein schnell abbindender Vergussmörtel in das 112 mm Bohrloch gefüllt (siehe Bild 104).

Danach folgt das Einbringen des Sensorsystems in das vorgefüllte Bohrloch (Durchmesser 112 mm, siehe Bild 106). Zur exakten oberflächenbezogenen Ausrichtung kommen ein vormontiertes spezielles Hilfskreuz und eine Einbaulehre zum Einsatz.

4.2.11 Verschluss der Bohrlöcher und Leitungsschlitze

Nach dem Abbinden des Vergussmörtels ist der Sensor grundsätzlich fixiert. Anschließend werden



Bild 107: Verschluss des Anschlussgalgens



Bild 108: Entfernung des Einbaukreuzes

die Schlitze und Bohrlöcher oberflächenbündig, angefangen bei dem Anschlussgalgen, verschlossen (siehe Bild 107).

Bevor das Sensorsystem oberflächenbündig verschlossen werden kann muss sowohl das Hilfskreuz (siehe Bild 108), als auch die auf der Oberseite des Sensors aufmontierte Einbaulehre (siehe Bild 109) abgeschraubt werden.

Anschließend kann das komplette Sensorsystem mit dem ausgewählten speziellen Betonersatzsystem verschlossen werden (siehe Bild 110).

Die Leitungsschlitze müssen vor dem Verschluss trocken sein, um optimale Haftung zu gewährleisten.

Durch das Abkleben an beiden Seiten der Leitungsschlitze wird verhindert, dass die Betonoberfläche verschmutzt wird (siehe Bild 112).



Bild 109: Abnahme der Einbaulehre



Bild 110: Verschluss eines Sensorsystems mit einem speziellen Betonersatzsystem

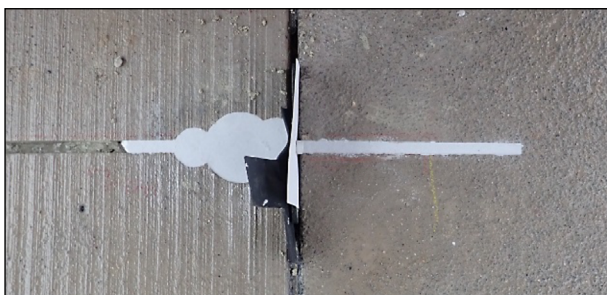


Bild 111: Verschlussenes Sensorsystem

Anschließend folgt der Verschluss aller Leitungsschlitzte (siehe Bild 113).

4.2.12 Heiß-Verguss der Querscheinfuge

Um die Querscheinfuge nach dem Sensoreinbau wieder sachgerecht zu verschließen und damit die Fahrbahn wieder in einen regulär befahrbaren Zu-

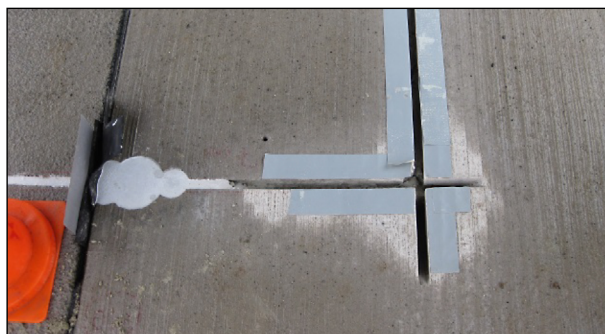


Bild 112: Anbringung von Klebeband für Verguss



Bild 113: Verguss der Leitungsschlitzte



Bild 114: Trocknung der Fugenkammer

stand überführen zu können, muss die Fuge zunächst getrocknet werden, da sonst ein ordnungsgemäßer Haftverbund zwischen Fugenfüllsystem und Beton nicht sichergestellt ist (siehe Bild 114).

Der erneute Fugenverschluss erfolgt gemäß der Regelung der ZTV Fug-Stb (siehe Bild 116 bis Bild 118).



Bild 115: Vorbereitete Fuge ohne Unterfüllschnur

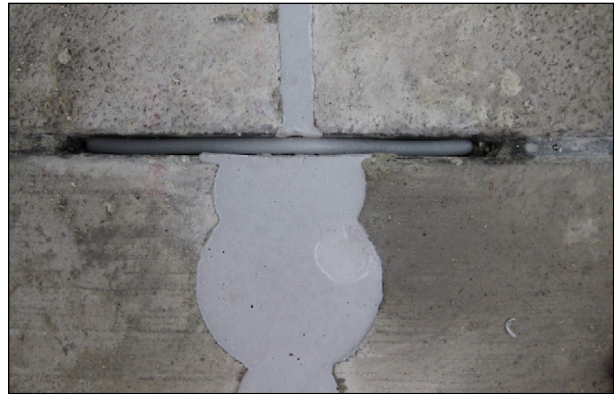


Bild 118: Für den Heiß-Verguss vorbereitete Fuge



Bild 116: Unterfüllschnur für Heiß-Verguss



Bild 119: Heiß-Verguss der Fuge



Bild 117: Einbringen der Unterfüllschnur in die Fugenkammer



Bild 120: Verschlussene Sensorsysteme 2R und 2M an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn

Nach dem Einbringen der Unterfüllschnur wird auf beiden Seiten der Fuge Klebeband angebracht, um die Betonfahrbahnfläche vor Verschmutzung zu schützen. Anschließend wird die Fuge verfüllt (siehe Bild 119).

Mit dem Entfernen des Klebebands sind die Einbaumaßnahmen abgeschlossen und die Betonfahrbahn kann wieder regulär befahren werden (siehe Bild 120).

4.2.13 Inbetriebnahme der Mess-Station

Für die Inbetriebnahme der Mess-Station wird zunächst geprüft, ob sich die Werte der Sensoranzeige zwischen dem elektrischen Anschluss und dem Einbau/Verschluss nicht signifikant verändert haben. Dies dient als Nachweis eines regelgerechten Einbaus. Im Anschluss wird die Setzdehnungsmessung an den beidseitig der Fuge angebrachten Messmarken durchgeführt. Die Messwerte aus den Sensoren und der Setzdehnungsmessung bilden für weitere Auswertungen den Nullzustand. Abschließend wird die automatische Übermittlung der Messwerte an die Daten-Server der BAM gestartet und überprüft.

4.2.14 Einbringung des Sensorsystems zur Messung des vertikalen Temperaturgradienten der Betondecke (Temperatur-Array)

Um temperaturbedingte Beanspruchungen der Betonfahrbahnplatten bewerten zu können wird der vertikale Temperaturgradient mit vier in verschiedener Höhe eingebrachten Temperatursensoren erfasst (siehe auch Kapitel 3.3.5).

Um etwaige Rand-Effekte ausschließen zu können werden die Temperatursensoren in der Mitte einer Betonfahrbahnplatte eingebracht, 2,5 m von den Querscheinfugen und 2,12 m von den Plattenrändern entfernt.

Zum Anschluss der Temperatursensoren wird ein Leitungsschlitz vom Betonfahrbahnrand bis zur Mitte der Betonfahrbahnplatte acht geschlitzt. Am Ende des Leitungsschlitzes wird ein 32 mm Bohrkern bis



Bild 121: Verlegung der Anschlusskabel für die Temperatursensoren; Fixierung in rot

zur Unterseite der Betonfahrbahndecke gezogen. In das entstandene Bohrloch werden die Temperatursensoren in exakter Höhenlage eingebracht.

Anschließend wird das Bohrloch mit den Temperatursensoren und der Leitungsschlitz mit Gießbeton verschlossen (siehe Bild 121 und Bild 122).

Nach dem Aushärten des Gießbetons wird die Halterung entfernt womit die Einbaumaßnahmen abgeschlossen sind (siehe Bild 123).



Bild 122: Verschluss des Leitungsschlitzes für die Temperatursensoren

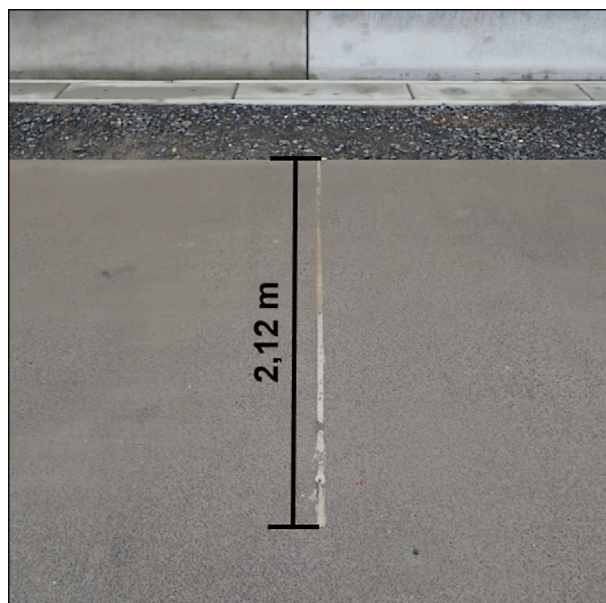


Bild 123: Eingebaute Temperatursensoren in der Mitte der Betonplatte 8

4.3 Allgemeine Erkenntnisse aus der Erprobung in situ

Zusammenfassend kann die an der BAM entwickelte Einbautechnologie als zielführend und praktikabel im Sinne der Aufgabenstellung beschrieben werden. Der Einbau auf der Waschbetonstrecke 40 auf dem duraBAST fand zwischen dem 21. und 23. März statt. Dabei wurden an drei hintereinanderliegenden Querscheinfugen vier Sensorsysteme installiert, davon drei jeweils in der rechten Rollspur und eines in der Mitte zwischen beiden Rollspuren. Zusätzlich fand der Einbau eines Sensorsystems zur Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten und die Einbringung von Metallstiften als Referenzpunkte für begleitende Setzdehnungsmessungen statt. Der Einbau verlief planmäßig analog zu dem Probeeinbau auf dem Gelände der BAM.

Folgende Erkenntnisse konnten aus dem Einbau auf dem duraBAST unter Sicherstellung der erforderlichen Sorgfalt gewonnen werden:

- Es ist möglich, mit einem Einbauteam bestehend aus 3-Personen zwei Sensorsysteme pro Tag zu installieren
- Die Einbaukolonne muss für die Durchführung von Bohr- und Schlitzarbeiten unter straßenbau-praktischen Randbedingungen erprobt sein. Erster Fahrstreifen und Seitenstreifen müssen dabei abgesperrt sein
- Das Bankett muss seitlich zugänglich sein. Die seitliche Installation von Messverteilern muss möglich sein
- Es ist eine Spannungsversorgung von 24 Volt und 100 Watt erforderlich
- Funknetzverfügbarkeit muss gegeben sein
- Es müssen materialspezifische, geometrische und konstruktive Beschreibungen der Strecke vorliegen
- Die zu instrumentierenden Fugen sind per FWD-Messung festzulegen
- Der elektrische und messtechnische Anschluss der Sensorsysteme muss vor der Installation stattfinden, um die Kette der Funktionskontrollen lückenlos zu gewährleisten

Am 13. und 14. August wurde zusätzlich der Einbau von zwei weiteren Sensorsystemen auf einer Fertigteilbetonstrecke auf dem duraBAST realisiert.

Dieser erfolgte analog zur Waschbetonstrecke.

4.3.1 Betreuung manueller Testmessreihen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts fanden mehrere Messkampagnen auf der Teststrecke statt. Bei diesen wurden folgende Beanspruchungsszenarien und Vergleichsmessungen durchgeführt:

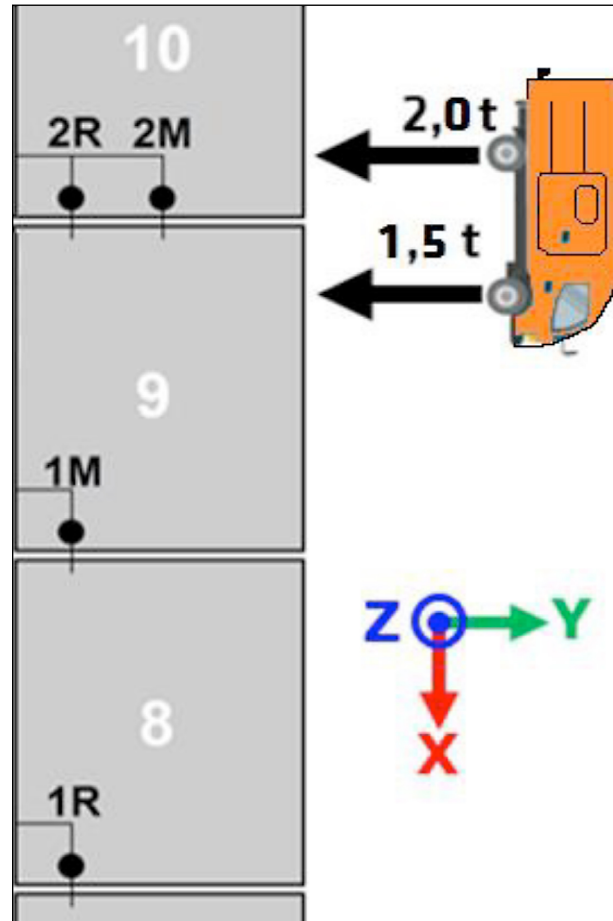


Bild 124: Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Kleintransporter und Achslasten

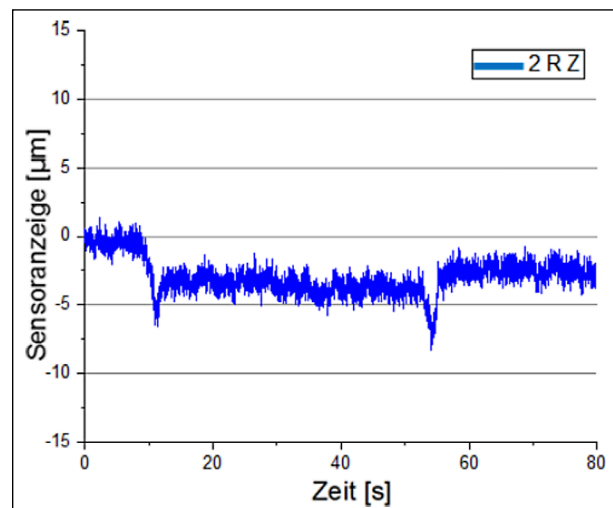


Bild 125: Sensoranzeige des Sensorsystems 2R in Z-Richtung bei quasistatischer Überrollung mit einem Kleintransporter

22. März 2018

Zur ersten Erprobung der Sensorsysteme wurde die Teststrecke direkt nach dem Einbau mit einem 3,5 t Kleintransporter überrollt. Die Erprobung bestätigte die Funktionsfähigkeit der Sensorsysteme.

Es sind Messsignale in Z-Achse erkennbar, diese fallen jedoch aufgrund der steifen Bettung (Temperatur der Asphalttragschicht: 6 °C) und des geringen Überrollgewichts relativ klein aus (siehe Bild 125).

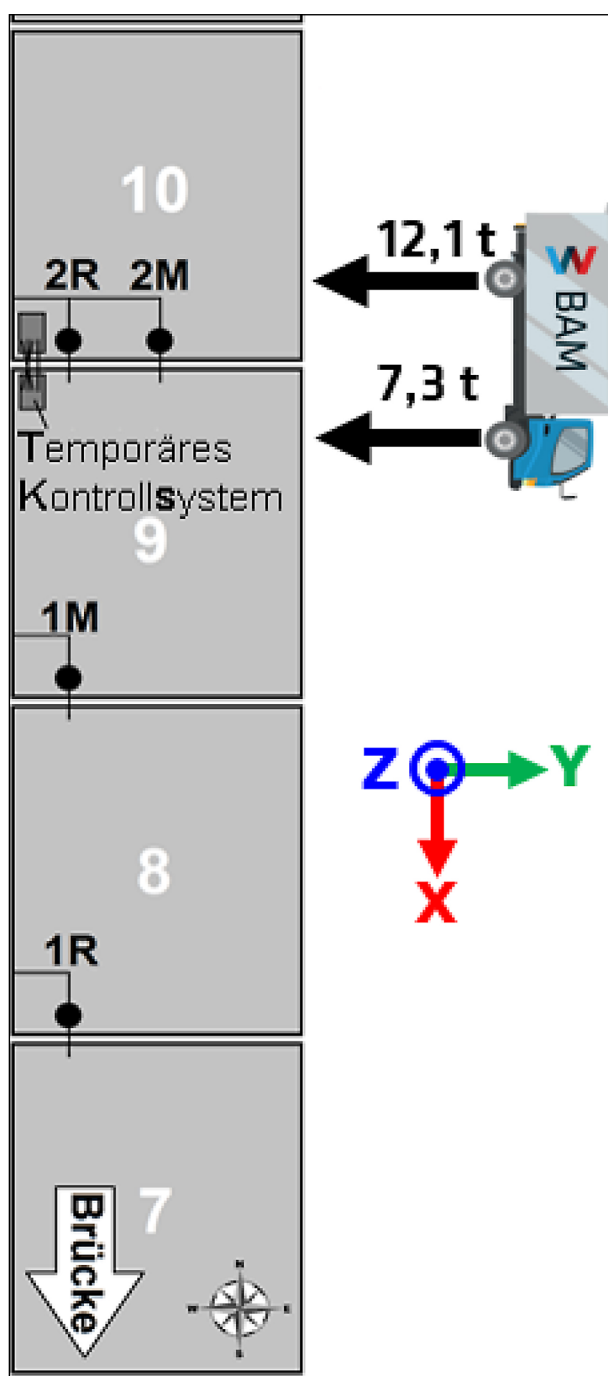


Bild 126: Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Lkw und Achslasten

12. April 2018

Zur Betreuung einer FWD-Messung und definierter Überrollungen mit einem Lkw fand eine weitere Messkampagne im April 2018 statt. Die Übereinstimmung mit den FWD-Sensoranzeigen bestätigte die Messwertanzeige der eingebauten Sensorsysteme (siehe auch Kapitel 6.5.6).

Die Überrollfahrten mit einem Lkw definierten Gewichts führten zu plausiblen Ergebnissen und ließen erste Schlüsse auf die Wirkweise des Fahrbahnoberbaus zu (siehe auch Kapitel 6.5).

Die Mess-Ergebnisse wurden ebenfalls durch das temporäre Kontrollsystem bestätigt (siehe auch Kapitel 3.9 und 6.5.4)

11. Juli 2018

Um das Verhalten der Fahrbahndecke auch bei sommerlichen Witterungsverhältnissen zu untersuchen wurden am 11. Juli 2018 erneute definierte Überfahrten mit einem Lkw vorgenommen. Die Messungen der Sensorsysteme wurden mit begleitenden Setzdehnungs-Messungen (siehe Bild 128) und mittels temporären Kontrollsystems validiert (siehe Bild 129). Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.5.4 enthalten.

15. August 2018

Am 13. und 14. August fanden die Einbaumaßnahmen von zwei weiteren Sensorsystemen auf einer Fertigteil-Betonstrecke auf dem duraBAST statt. Anschließend wurden am 15. und 16. August 100.000

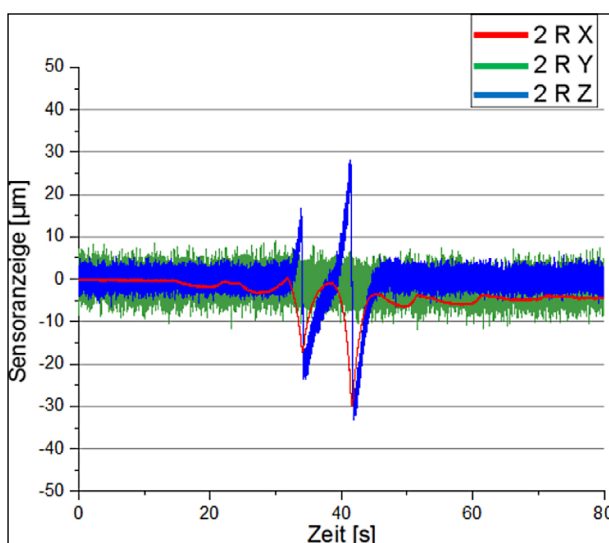


Bild 127: Überrollung der Sensorsysteme mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse: 7,3 t, Gewicht der Hinterachse: 12,1 t

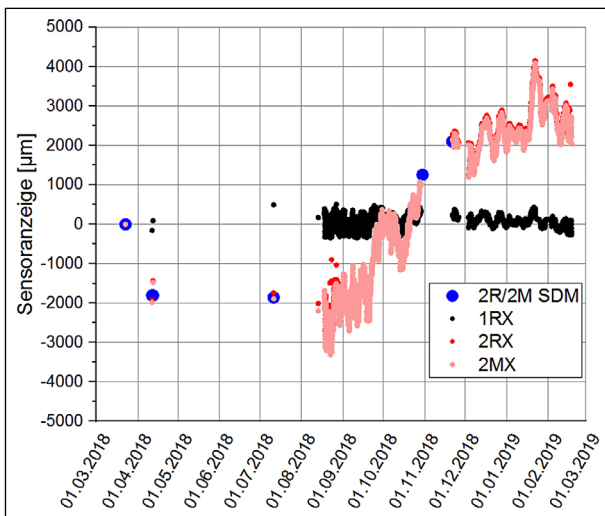


Bild 128: Langzeitverformungen vom Einbau im März 2018 bis Mitte Februar 2019 mit validierender Setzdehnungsmessung

Schwerlast-Überrollvorgänge mit einem mobilen Belastungssimulator an der mit Sensoren bestückten Fuge durchgeführt. Am 17. August wurde die Mess-Station zurückgebaut, erneut auf der Waschbetonstrecke installiert und dort der kontinuierliche Regel-Messbetrieb wieder aufgenommen.

4.3.2 Messdatenerfassung

Das Konzept der Messdatenerfassung erlaubt mehrere Nutzungsmodi:

- Automatisches Messregime mit Datenfernübertragung
- manuell betreute Messung vor Ort zur Erfassung spezifischer Belastungsszenarien
- Fernsteuerung der Mess-Station

Derzeit werden die Daten vor Ort zusätzlich redundant auf einer Festplatte gespeichert und regelmäßig automatisiert und verschlüsselt an die BAM übertragen.

Die Konfiguration der Mess-Station sieht vor, dass im Störfall der Datenfernübertragung ein Messdatenverlust ausgeschlossen ist und die Daten erneut gesendet werden, um eine lückenlose Datengrundlage zu erhalten. Bei einem Stromausfall übernimmt eine unterbrechungsfreie Stromversorgung vor Ort die Spannungsversorgung. Wenn es zu einer längeren Unterbrechung der Spannungsversorgung kommt und die Mess-Station ausfällt, fährt diese nach erneutem Anschluss automatisch hoch und nimmt den Messbetrieb sowie das Versenden der Mess-Daten automatisch wieder auf.

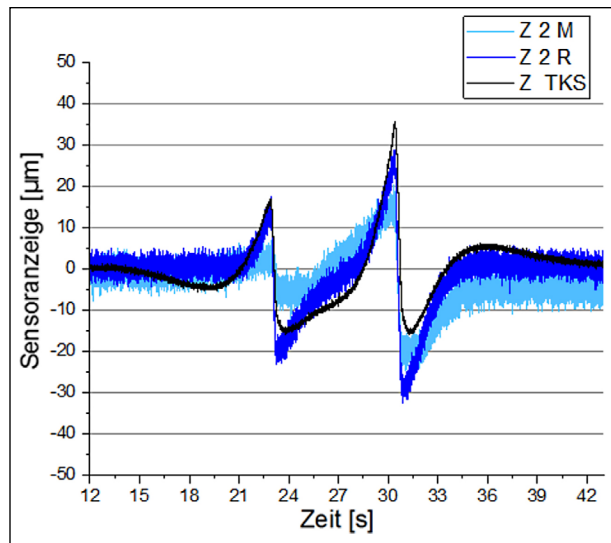


Bild 129: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Y-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h

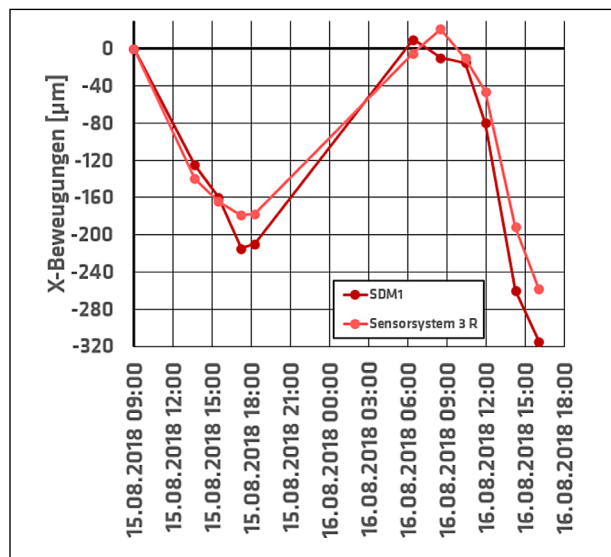


Bild 130: X-Bewegungen über zwei Tage an der Fertigteilbetonstrecke

4.3.3 Validierung durch parallele Plausibilitätsmessung

Die Sensorsysteme wurden durch folgende begleitende Mess-Systeme validiert:

- Das temporäre Kontrollsystem TKS (siehe 6.5.4) wurde während allen dynamischen Messkampagnen installiert und konnte in allen drei Raumrichtungen die Messwerte der Sensorsysteme bestätigen (siehe Bild 129)
- Der Abgleich zwischen den Ergebnissen der Setzdehnungsmessung und den Messwerten der Sensorsysteme konnte die langsam ablaufende Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung (Fahrtrichtung) validieren.

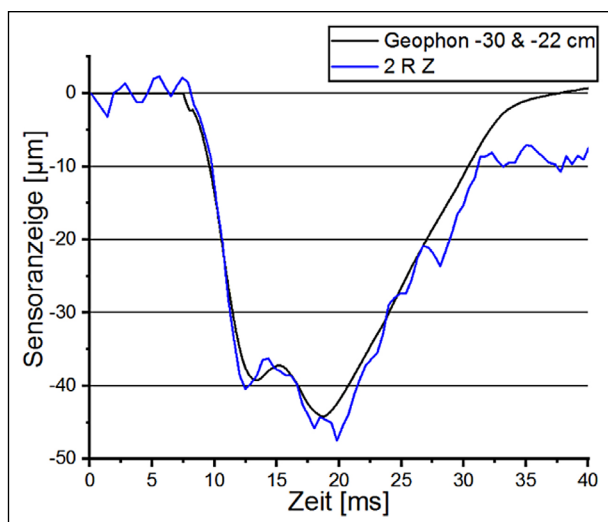


Bild 131: Vergleich der FWD-Messwerte und der Sensoranzeige des darunter liegenden Sensorsystems bei FWD-Beanspruchung

- Durch den Vergleich zwischen den Geofon-Anzeigen des FWDs (siehe Kapitel 6.5.6) und den jeweiligen Sensorsystemanzeigen konnten die Messdaten in Z-Richtung validiert werden.

4.3.4 Erprobung der Datenübermittlung, multi-client Zugriff und automatisierte Auswertung

Seit Vorliegen einer kontinuierlichen Spannungsversorgung (17.08.2018) werden automatisch Messdaten an die BAM versendet und gespeichert. Ein Multi-client-Zugriff wurde realisiert. Die automatisierte Auswertung und Klassierung der Messdaten sind mithilfe einer BAM-spezifischen Software-Routine zum Bauwerksmonitoring möglich.

4.3.5 Ausbau und Rückgewinnung eines Sensorsystems

Das Sensorsystem wurde wiederverwendbar konzipiert. Dazu wurde eine Ausbautechnologie entwickelt und erprobt: Die Ausbautechnologie wurde praktisch bei der Wiedergewinnung des Sensorsystems 1M erprobt. Nach dem Ausbau kann das Sensorsystem für eine Wiederverwendung ertüchtigt werden. Voraussetzung dafür ist eine erneute Kalibrierung.

Das Sensorsystem wurde mit einer Bohrkronen (Innendurchmesser: 190 mm) überbohrt und entnommen (siehe Bild 132 und Bild 133). Dieser Durchmesser ist notwendig, da die Peripherie mit ausgebaut werden muss um den sensiblen Sensor nicht zu beschädigen.



Bild 132: Ausbau des Sensorsystems 1M am 29.10.2018 auf dem duraBAST



Bild 133: Verwendete Bohrkronen; Innendurchmesser: 190 mm; Außendurchmesser: 200 mm; Länge: 400 mm



Bild 134: Ausgebohrtes Sensorsystem



Bild 135: Ausbau-Bohrloch vor Verschluss

Anschließend wurde der gesamte Bohrkern mithilfe einer eingebohrten Ringschraube aus dem Fahr-
bahnbelag gezogen (siehe Bild 134).

Das Bohrloch wird mit dem, bereits bei der Einbau-
technologie verwendeten, Spezial-Verguss oberflä-
chenbündig verschlossen. Dabei ist darauf zu ach-
ten, dass die Fuge nach Einbauabschluss ord-
nungsgemäß wieder verschlossen werden kann



Bild 136: Bohrloch unmittelbar nach Verfüllung



Bild 137: Verfülltes Bohrloch (Gießbeton ausreagiert)



Bild 138: Fuge mit eingebrachter Unterfüllschnur

und kein Verbund der beiden Fugenflanken entsteht
(siehe Bild 135 und Bild 136).

Nach dem Abbinden des Spezial-Vergusses wird
die abstellende Schalung entfernt und eine Unter-
füllschnur in die Fuge eingebracht (siehe Bild 137
und Bild 138).



Bild 139: Vergossene Fuge



Bild 140: Ausgebautes Sensorsystem kurz nach der Entfernung aus dem Fahrbahnbelag auf der Teststrecke

Der anschließende regelgerechte Verguss der Fuge stellt die Überfahrbarkeit und uneingeschränkte Nutzbarkeit der Betonfahrbahndecke wieder her (siehe Bild 139).

Die weitere Aufbereitung der ausgebauten Sensoren erfolgt im Messlabor der BAM.

Zuerst wird das Sensorsystem von oben freigelegt. Schicht für Schicht werden die seitlichen Betonan-



Bild 141: Ausgebautes Sensorsystem im Labor, Ansicht von oben



Bild 142: Ausgebautes Sensorsystem im Labor, Ansicht von der Seite



Bild 143: Ausgebautes Sensorsystem in Fräseinrichtung zum Freilegen des Deckels



Bild 145: Sensorsystem nach seitlichen Abtragarbeiten zum Freilegen einer Sensorseite



Bild 144: Sensorsystem in Einspannung mit freigelegtem Deckel

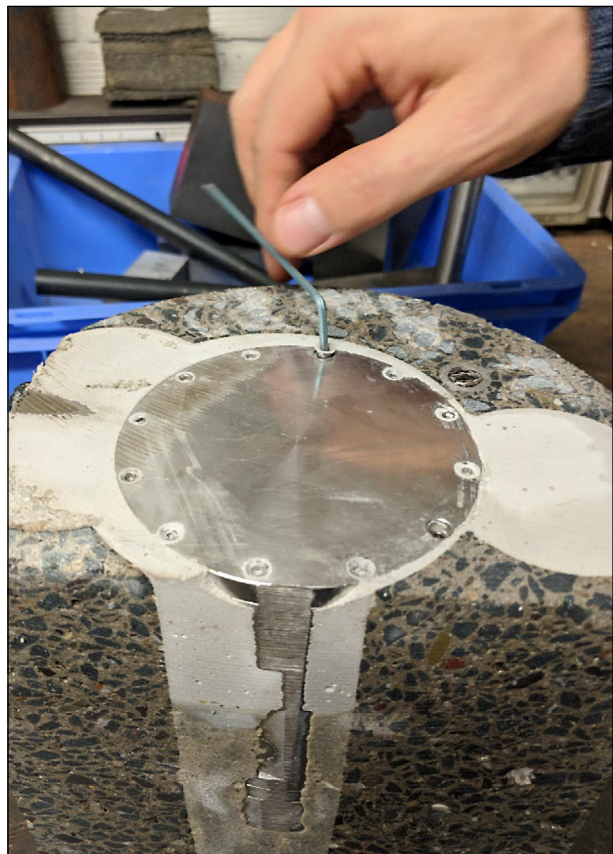


Bild 146: Entfernung der zwölf Schrauben zum Öffnen des Deckels

haftungen sowie der oberflächige Gießbeton abgetragen, um den Deckel freizulegen (siehe Bild 143 und Bild 144).

Anschließend wird der Betonkern um 90 Grad gedreht und die seitlichen Betonüberdeckungen wer-

den abgetragen, bis das Sensorsystem zum Vorschein kommt (siehe Bild 145).

Die Schrauben des Deckels werden entfernt und das Sensorgehäuse geöffnet (siehe Bild 146 und Bild 147).



Bild 147: Öffnen des Deckels



Bild 149: Freigelegtes Sensorsystem 1M mit Bruchstücken des Mörtels

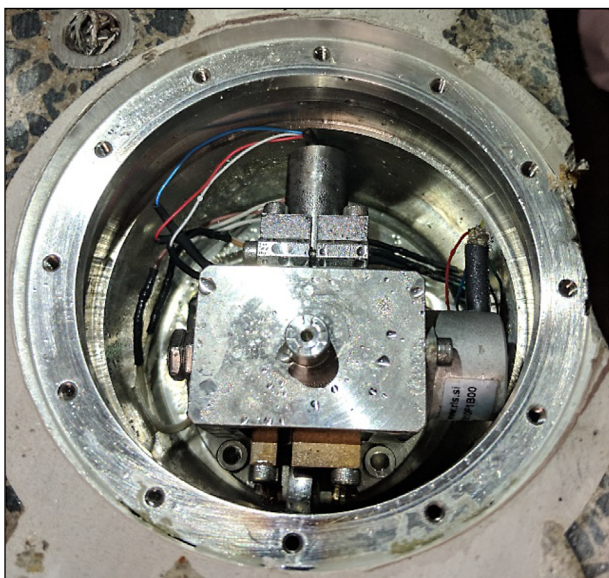


Bild 148: Geöffnetes Sensorsystem 1M nach sieben Monaten Einsatz im Feld



Bild 150: Freigelegtes Sensorsystem 1M

Danach wird das Sensorsystem von dem Rest des anhaftenden Betons befreit (siehe Bild 149).

Mit den freigelegten Komponenten des Sensorsystems kann nach Ersatz der Verschleißteile (zum Beispiel des Anschlussgalgens), erneutem Kabelanschluss, Kalibrierung und Überprüfung ein wieder einsatzfähiges Sensorsystem bereitgestellt werden.

Fazit:

Eine Rückgewinnung des Sensorsystems und dessen Wiederverwendbarkeit ist wie geplant möglich.



Bild 151: Alle freigelegten Komponenten des Sensorsystems 1M

4.4 Ableitung von Schlussfolgerungen zur Vorbereitung einer weiterführenden Messkampagne

Im Zuge der vielfältigen Erprobungen und weiteren Optimierungen des Messsystems und dessen Handhabung liegt eine praxisgerechte technische Lösung vor.

4.4.1 Schlussfolgerungen aus der Einbau- und Verschlusstechnologie

Die an der BAM entwickelte und erprobte und auf dem Gelände des duraBAST zweimal eingesetzte Einbau- und Verschlusstechnologie erwies sich als zielführend.

Die vorbereiteten Schablonen stellen eine beträchtliche Arbeitserleichterung dar. Dennoch machen die durchzuführenden Arbeiten und die daran geknüpften Präzisionsanforderungen den Einsatz erfahrenen Fachpersonals und spezieller Betonschneidtechnik bzw. entsprechender Fachunternehmungen erforderlich.

Es erwies sich als zielführend, verschiedene schnellabbindende Betonersatzsysteme für den Einsatz bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen mitzuführen. Die eingesetzten Mitarbeiter müssen im Umgang mit reaktiven Baustoffen geschult sein.

Für den elektrischen und messtechnischen Anschluss der Sensorsysteme muss ein Messtechniker vor Ort sein.

Nach Abschluss des Einbauvorgangs muss durch Fachpersonal ein regelgerechter Wiederverschluss der Fuge durchgeführt werden. Weiterhin ist ein Witterungsschutz beim Einbau vorzusehen (Einhausung).

Für den Einbauvorgang ist die Verfügbarkeit von Versorgungsmedien (Strom und Wasser) sicherzustellen.

Nach den bisherigen Erfahrungen lässt sich bei Vorliegen optimaler Voraussetzungen der Einbau von sechs Sensorsystemen und der Aufbau einer Mess-Station an drei Tagen realisieren.

4.4.2 Überprüfung der Ortsvoraussetzungen

Nach der Auswahl eines Einbauabschnitts ist die gezielte Überprüfung der Einbauvoraussetzungen maßgeblich durch folgende Punkte gekennzeichnet:

- Zugänglichkeit
- Verfügbarkeit seitlicher Aufstell- und Arbeitsflächen
- Absperrbarkeit des Fahrbahnbereichs
- Verfügbarkeit von Medienanschlüssen, ggf. Prüfung einer autarken Lösung (in diesem Fall: Prüfung der Ortsvoraussetzungen: Baurecht, Platz, Zugänglichkeit etc. siehe Kapitel 3.11)
- Überprüfung der Bestandsunterlagen zur Bauartbeschreibung (zum Beispiel Dübel-Lage, Plattendicke, Fugenbeschaffenheit)
- Funknetzabdeckung
- Schutz vor Vandalismus
- Sicherstellung des Arbeitsschutzes

4.4.3 Technische Optimierungen

Um die Stellung des „Nullpunkts“ beim Einbau der Sensorsysteme zu fixieren und ggf. bereits im Labor exakt einzustellen, wurde eine Einbaulehre konstruiert und gefertigt. Eine erste Version der Einbaulehre kam im März zum Einsatz, erwies sich als praktikabel, konnte aber nur mit erheblichem Mehraufwand vor Ort positionsgenau eingestellt werden.

Aus diesem Grund wurde ein Teil (siehe Bild 153) der Einbaulehre optimiert.

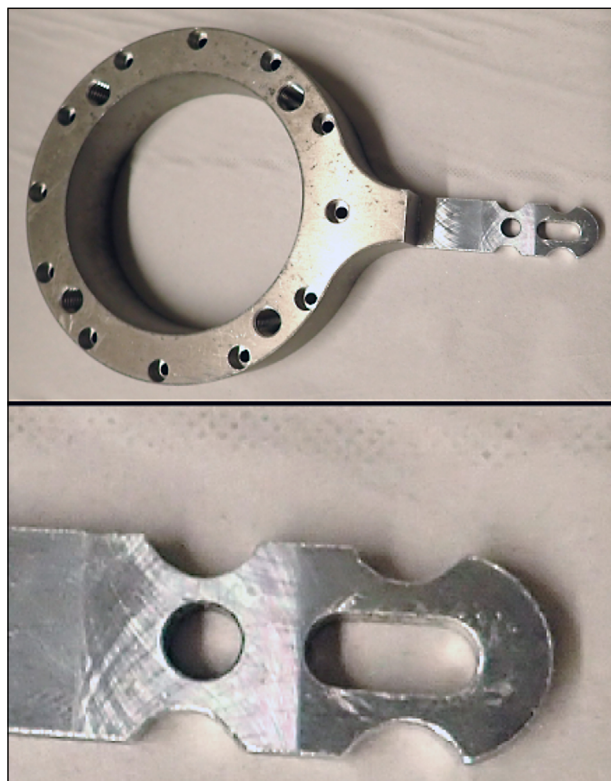


Bild 152: Angepasste Einbaulehre mit Aussparungen für Madschrauben



Bild 153: Optimiertes Unterteil der Einbaulehre mit vier Madenschrauben zur exakten Einstellung und Fixierung der Null-Lage

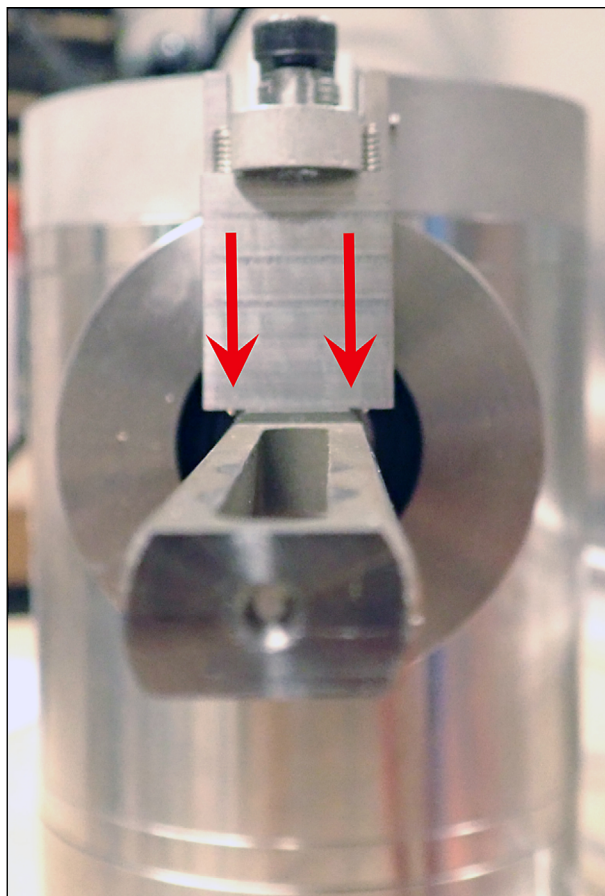


Bild 156: Einbaulehre mit gekennzeichneten Madenschrauben in rot

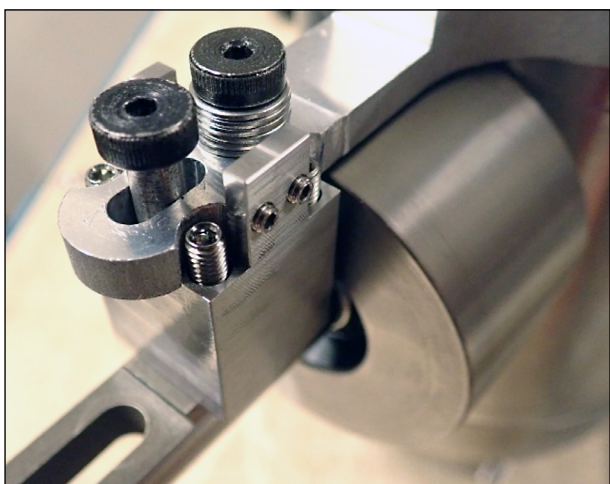


Bild 154: Zusammengebautes Sensorsystem mit optimierter Einbaulehre

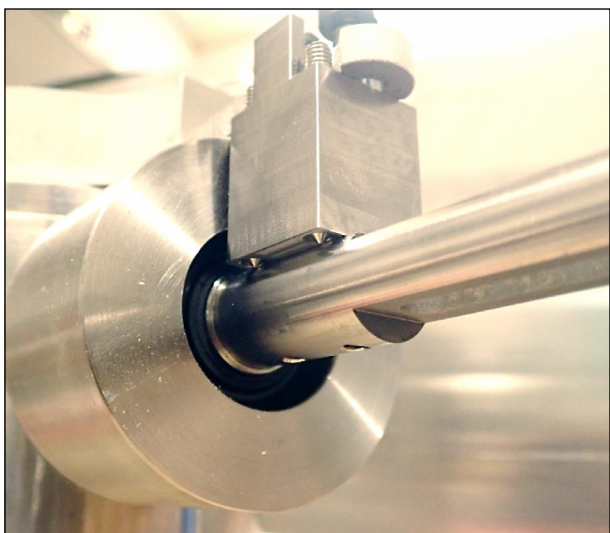


Bild 155: Zusammengebautes Sensorsystem mit optimierter Einbaulehre

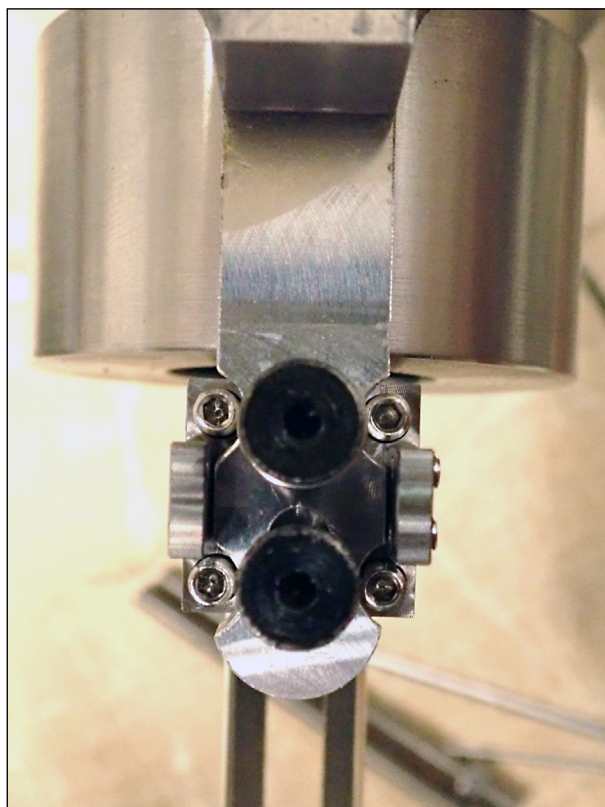


Bild 157: Einbaulehre, Ansicht von oben

Bild 156 stellt den Wirkmechanismus der optimierten Einbaulehre dar: die Madenschrauben fixieren den Anschlussgalgen in der Null-Position. Bei dem Einbau von zwei Sensoren auf der Fertigteilstrecke im August hat sich die optimierte Einbaulehre bewährt.

Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die Abdichtung des Sensors im Faltenbalgbereich mit besonderer Sorgfalt erfolgen muss. Es empfiehlt sich die Integration einer zweiten Dichtebene.

4.4.4 Schlussfolgerungen aus der Messerprobung

Zur Untersuchung der realen maximalen Fugenverformungen im BAB-Netz muss eine Fuge mindestens mit einem Sensorsystem in der Rollspur ausgestattet werden.

Zur Erhöhung der Aussagefähigkeit wird die Bestückung von mindestens drei Fugen empfohlen, die vorher mittels FWD-Messung auszuwählen sind.

Auf Grundlage der in situ durchgeführten Testmessungen mit einem 20t Lkw werden die durch Verkehr induzierten Belastungen als signifikante Formänderungsgröße im Fugenbereich detektiert und müssen deshalb (zusätzlich zu den langsam ablaufenden Formänderungen) mit einer Messfrequenz von 2000 Hz aufgenommen werden.

Zur Interpretation der gewonnenen Messergebnisse sind die Betontemperaturen (siehe Kapitel 4.6.1 und Bild 235) und klimatischen Umgebungsbedingungen zu erfassen.

Für die Möglichkeit einer Zuordnung der Verkehrsbeanspruchung zu den Messwerten (Rückführbarkeit der verkehrsinduzierten Beanspruchungen) empfiehlt sich die Kennzeichnung der Verkehrsbeanspruchung. Die Plausibilität der Messdaten (Sensorfunktion) ist in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. Darüber hinaus sind die Ausführungen des Kapitels 4.3 zu berücksichtigen.

Unter den Bedingungen des duraBAST konnte die Dauerhaftigkeit der entwickelten Sensorsysteme über den bisherigen Messzeitraum von 13 Monaten sicher nachgewiesen werden.

4.5 Ergebnisse des ersten Messzeitraums: 21. März bis 20. September 2018

Der gesamte Erprobungszeitraum wurde organisatorisch in zwei Messzeiträume gegliedert. Der erste Messzeitraum umfasst Frühling, Sommer und Herbst, der zweite Messzeitraum schließt sich lückenlos an und umfasst die Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühling.

Der erste Messzeitraum startete mit dem Abschluss der Einbaumaßnahmen bzw. dem Einbringen der ersten vier Sensorsysteme am 21. März 2018. Verschiedenartige Erprobungen direkt im Anschluss an den Einbau, im April, Juli und August, der Abgleich mit weiteren Messdaten sowie die anschließende Auswertung der Langzeitdaten bis zum 20. September 2018 bilden eine umfassende Datengrundlage über sechs Monate.

In diesem Zeitraum lag noch keine permanente Spannungsversorgung vor. Deshalb wurde anfänglich an verschiedenen Messtagen im Messmodus „manuell betreute Messung“ mit temporärer Spannungsversorgung vor Ort gemessen (siehe auch Kapitel 4.3.1). Folgende Beanspruchungsszenarien wurden für die Testmessungen initiiert:

- Überrollung mit einem 3,5 t Kleintransporter
- Überrollung mit einem 20 t Lkw zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und Temperaturbedingungen
- FWD-Beanspruchung

4.5.1 FWD-Messung nach dem Einbau der Sensorsysteme

Zur Überprüfung der Sensorsystemanzeige wurden mit einem eingeführten und bewährten Messverfah-

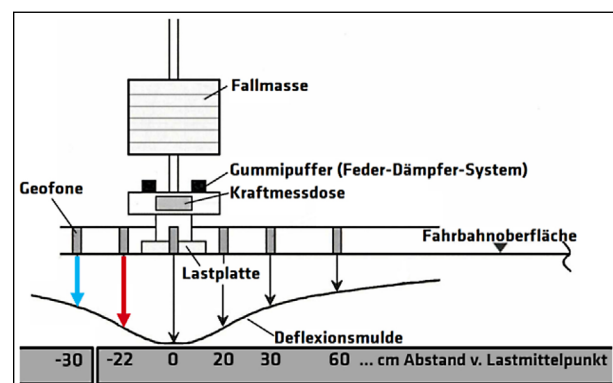


Bild 158: Skizze des FWDs; in rot und blau die beiden Geofone, die für die Differenzbildung zum Einsatz kamen

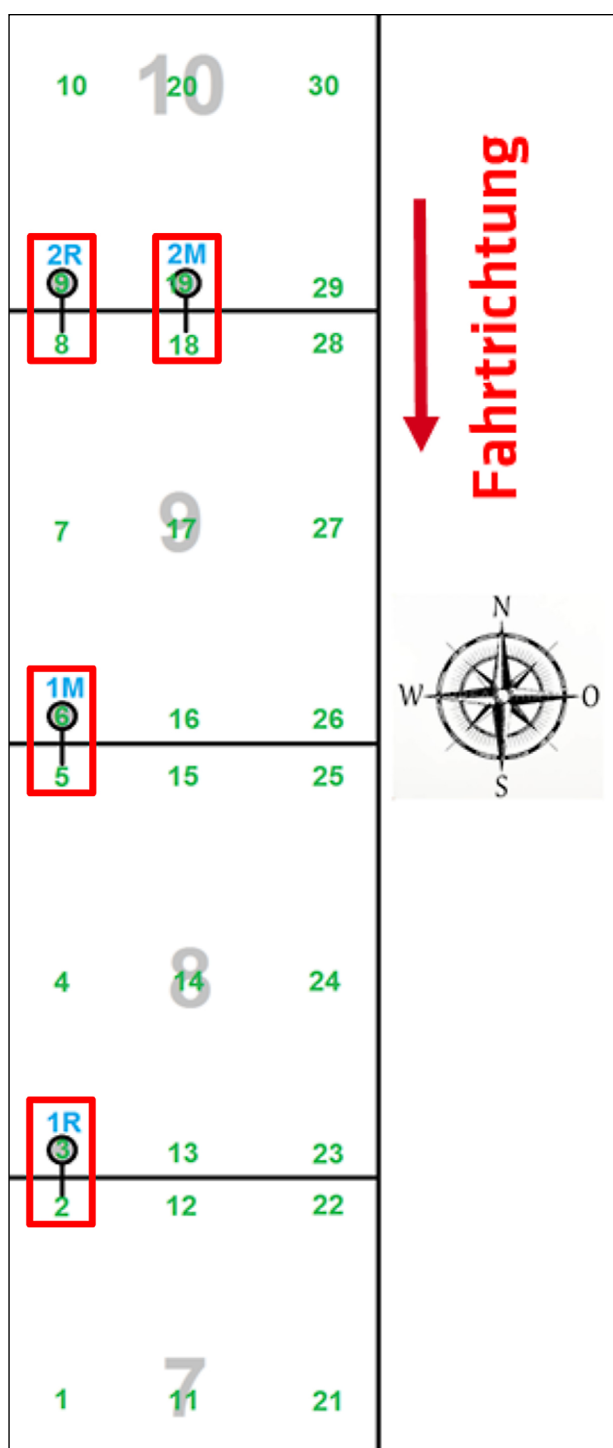


Bild 159: Lageplan der 30 FWD-Messpunkte auf der Waschbetonstrecke 40 des duraBAST mit eingezeichneten zusätzlich ausgewerteten Messpunkten

ren des Betonstraßenbaus), dem sogenannten Falling Weight Deflectometer (FWD), am 12.04.2018 Messungen durchgeführt.

Dabei wurden insgesamt 30 Messstellen auf allen Platten, in die Sensorsysteme eingebracht sind, gemessen. Ein Plan mit allen Messpunkten ist in Bild 159 dargestellt.

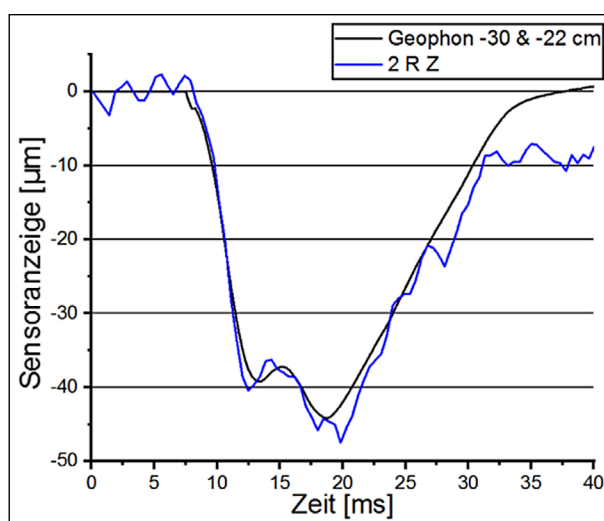


Bild 160: Vergleich der Relativbewegung der Fugenflanken; FWD-Messung und Z-Achse des Sensorsystems 2R bei Messung auf Messpunkt 8)

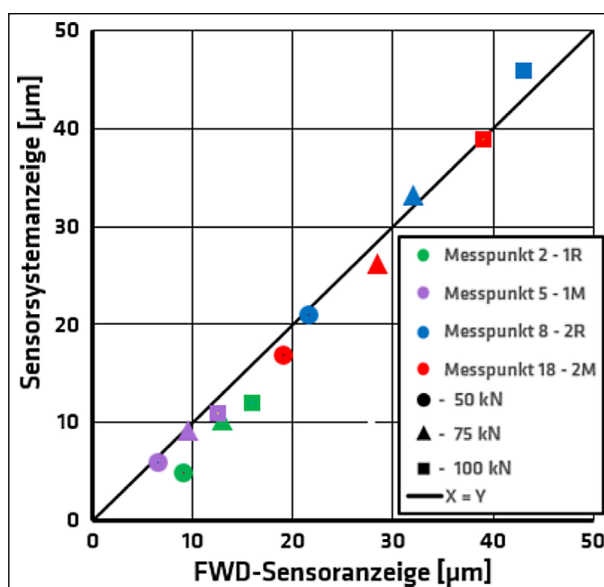


Bild 161: Relativbewegung der Fugenflanken in Z-Richtung; gemessen als Relativbewegung der beiden Geophone, die der Fuge am nächsten sind im Vergleich mit der Sensoranzeige der jeweils an den Messpunkten befindlichen Sensorsysteme (siehe Bild 159)

Vergleichend ausgewertet wurden die Messstellen, in deren Nähe auch die Sensorsysteme angeordnet sind (rot eingezeichnet siehe Bild 159).

Bei der Auswertung zeigte der Vergleich der Relativbewegungen laut FWD-Messung (Geophon -22 cm und -30 cm) mit der Sensoranzeige in Z-Richtung eine hohe Übereinstimmung (siehe Bild 160).

Sowohl der zeitliche Verlauf, als auch der Betrag der Sensoranzeigen bei 100 kN FWD-Beanspruchung stimmen überein (maximale Abweichung <3 µm). Die Auswertung und der Vergleich der Datensätze der

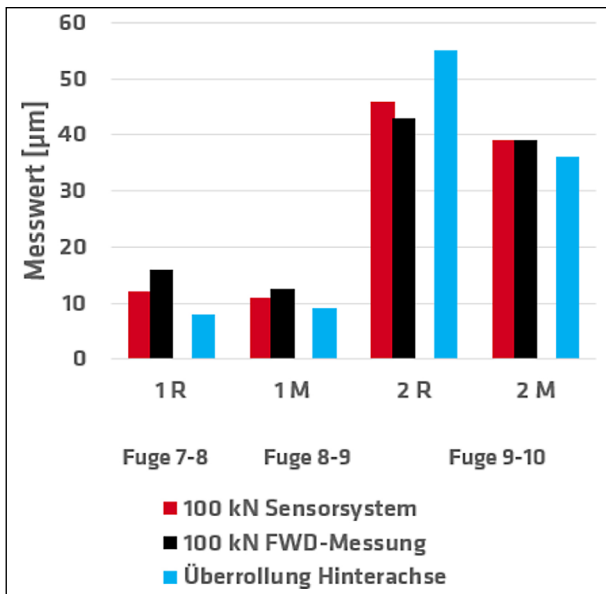


Bild 162: Vergleich der FWD-Messung mit der Überrollung einer 12 t Achse bei 5 km/h zur Ermittlung der Sensibilität des Sensorsystems auf verschiedene Belagsituationen bzw. Kerbrissbreiten

FWD-Messung bei 50, 75 und 100 kN Beanspruchung mit der jeweiligen Sensoranzeige ergab sehr gute Übereinstimmung und lässt den Schluss eines linearen Zusammenhangs zu (siehe Bild 161).

In Bild 162 sieht man, dass unterschiedlich ausgeprägte Fugenrissausbildungen und Bettungsbedingungen zu unterschiedlichen Fugenbewegungen führen. Die Sensorsysteme sind in der Lage die verschiedenen daraus resultierenden Relativbewegungen der Fugenflanken abzubilden:

Kleine Kerbrisse bzw. eine steife Bettung führen zu kleinen FWD-Werten und kleinen Sensoranzeigen, sowohl bei Beanspruchung mit FWD, als auch bei Überrollung mit schwerem Lkw. Große Kerbrisse bzw. geringere Bettungssteifigkeit führen zu größeren FWD-Werten und größeren Sensoranzeigen.

Aufgrund der hohen Übereinstimmung mit dem FWD-Verfahren ist davon auszugehen, dass die Sensoranzeige den relativen Fugenbewegungen entspricht.

Fazit:

Die Plausibilität der Sensormesswerte ist durch Übereinstimmung mit Messwerten aus der FWD-Messung nachgewiesen. Die Sensorsysteme erfassen auch schnelle Impulse sehr genau. Sowohl der nominelle Wert der Sensoranzeigen, als auch deren zeitlicher Verlauf stimmen mit den Werten der FWD-Messung überein, so dass die Sensormesswerte als bestätigt betrachtet werden können.

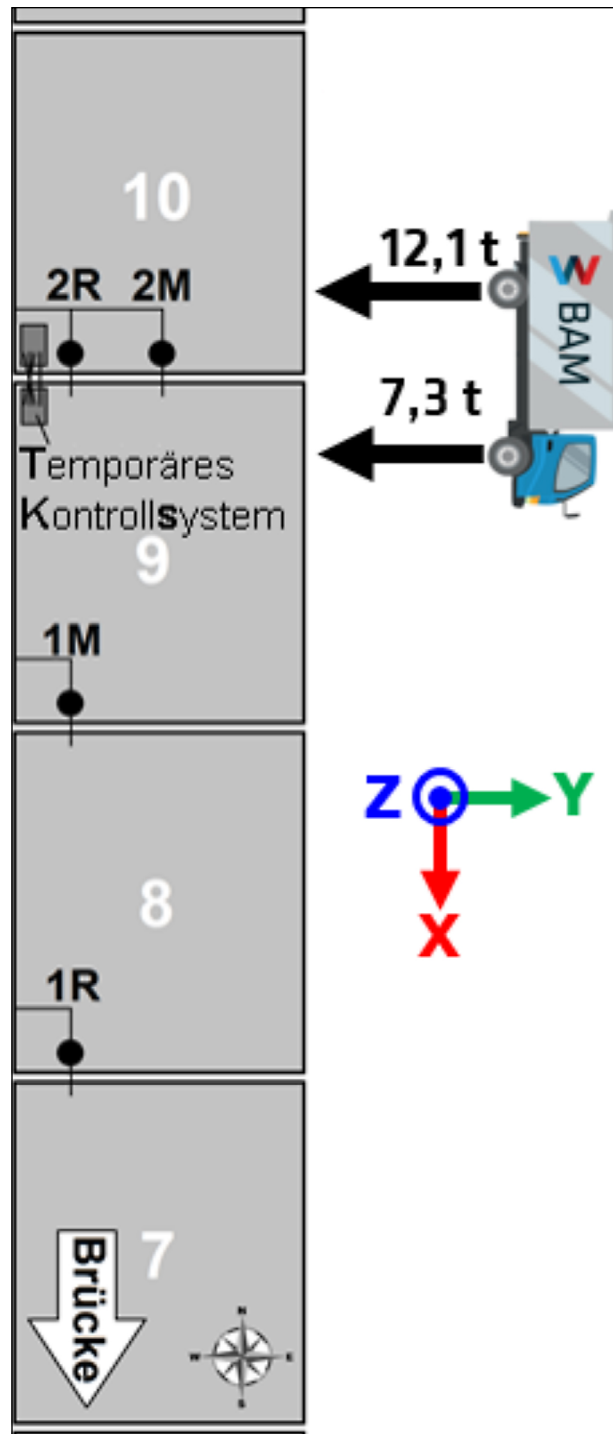


Bild 163: Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichneter Rollrichtung des Lkw und Achslasten

4.5.2 Erprobung der Sensorsysteme mit 20 t Lkw

Für eine umfassende Sensorerprobung fand ebenfalls am 12. April 2018 eine Erprobungsphase durch gezielte Überrollvorgänge mit einem 20 t Lkw statt. In Bild 163 ist die Fahrtrichtung des Lkw mit Achslasten auf der Teststrecke des duraBAsT abgebildet.

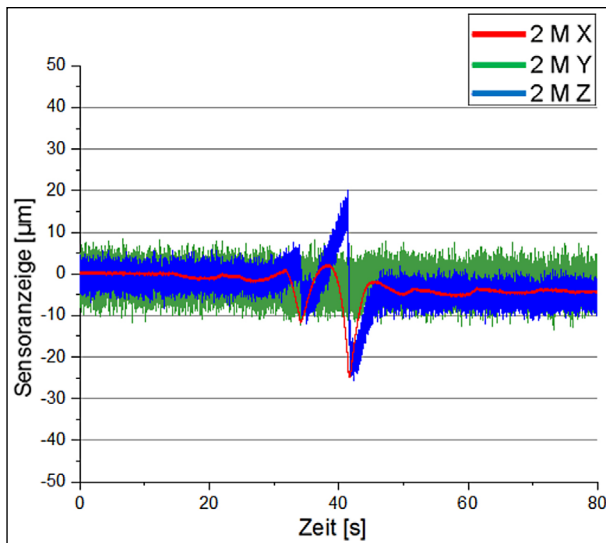


Bild 164: Sensoranzeige bei Überrollung des Sensorsystems 2M mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse: 7,3 t, Gewicht der Hinterachse: 12,1 t

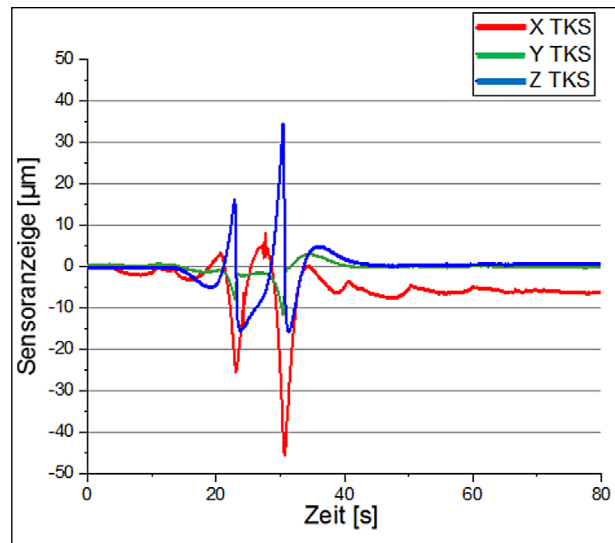


Bild 166: Sensoranzeige des externen temporären Kontrollsystems bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h

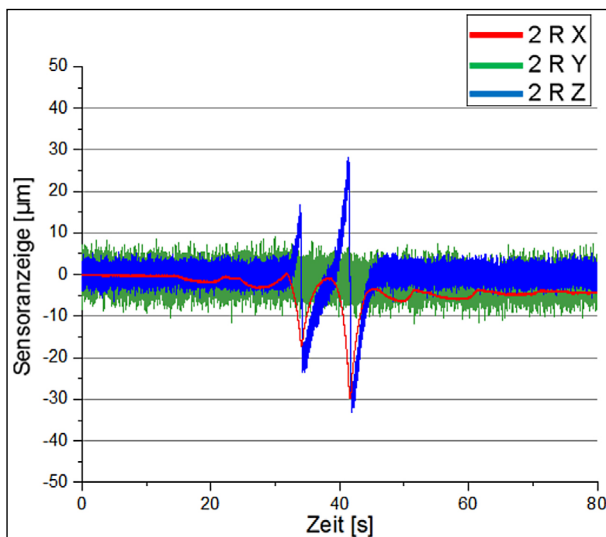


Bild 165: Sensoranzeige bei Überrollung des Sensorsystems 2R mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse: 7,3 t, Gewicht der Hinterachse: 12,1 t

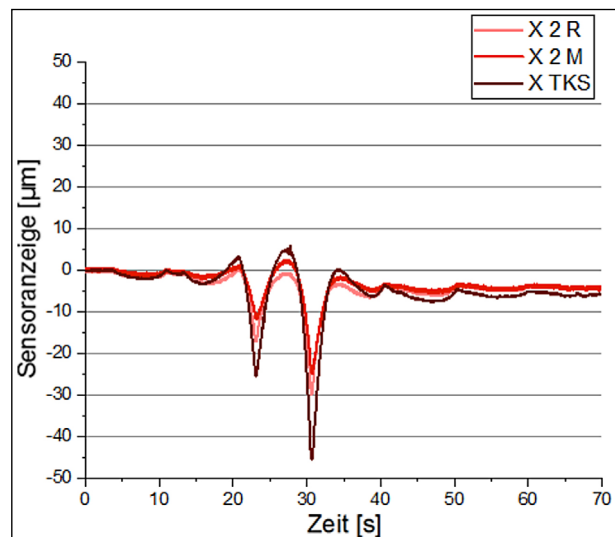


Bild 167: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in X-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h

In Bild 164 ist die Sensoranzeige des Sensorsystems 2M in allen drei Raumrichtungen abgebildet. In Y-Richtung treten keine signifikanten Veränderungen der Messwertanzeige bei einem normalen Überrollvorgang auf gerader Strecke auf. In X-Richtung wird die Fuge zusammengedrückt. Die Maximal-Werte betragen 13 µm bei Überrollung des Fugenbereichs mit der Vorderachse bzw. 27 µm mit der Hinterachse. In Z-Richtung sind ebenfalls Verformungen detektierbar von 8 µm bzw. 36 µm messbar.

In Bild 165 ist die Sensoranzeige des Sensorsystems 2R in allen drei Raumrichtungen abgebildet. In

Y-Richtung treten ebenfalls keine signifikanten Verformungen auf. In X-Richtung wird die Fuge um 17 µm bzw. 27 µm zusammengedrückt. In Z-Richtung betragen die Messwertanzeigen 33 µm bzw. 54 µm. Damit stellen sich die Bewegungen in dem direkt überrollten Fugenbereich größer dar, als in der Mitte der Rollspur.

Um die Sensoranzeigen zusätzlich zu validieren, wurde ein temporäres Kontrollsystem (TKS; siehe Kapitel 6.5.4) an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn installiert.

In Bild 166 sind die Sensoranzeigen des TKS in allen drei Raumrichtungen abgebildet. Qualitativ stim-

men diese mit den Sensoranzeigen der Sensorsysteme 2R und 2M überein.

Fazit:

Das TKS bestätigt die Sensoranzeigen in allen drei Mess-Achsen.

Für die vergleichende Beurteilung der Messwerte des TKS müssen folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Die Achsen des TKS sind nicht vollständig voneinander entkoppelt, Messungen einer Achse wirken sich teilweise in anderen Messachsen des TKS aus.
- Es ist zu berücksichtigen, dass das TKS in einer anderen Höhenlage misst (Bild 168).

Um die Sensoranzeigen des TKS mit denen der Sensorsysteme 2R und 2M zu vergleichen, wurden die drei Raumachsen jeweils in einem Diagramm zusammengefasst.

In Bild 167 sind die Messwerte der X-Achsen von drei Sensorsystemen (2R, 2M und TKS) abgebildet. Sowohl der zeitliche Verlauf an der befahrenen Fuge, als auch das Wirken des Betonplattenverbundes, ist gut zu erkennen. Vor und nach der di-

	2 M	2 R	TKS
Vorderachse	13 µm	17 µm	27 µm
Hinterachse	27 µm	27 µm	50 µm

Tab. 57: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Bild 167; Vergleich der X-Richtung

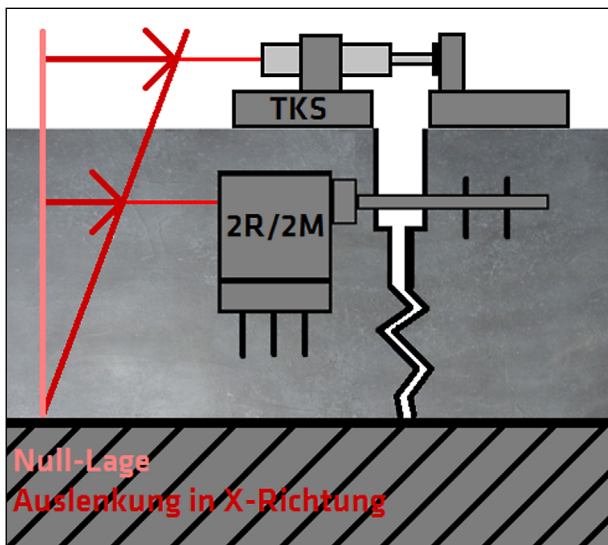


Bild 168: Skizze der Höhenlage des TKS und der Sensorsysteme 2R bzw. 2M im Vergleich mit eingezeichneter Mess-Höhe der X-Richtung

rekten Überrollung der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn sind Auswirkungen der Überrollvorgänge der anliegenden Betonfahrbahnplatten sichtbar.

Der Vergleich der nominellen Werte der Sensorsysteme zeigt, dass das TKS in X-Richtung größere Messwerte anzeigt. Dies liegt wahrscheinlich an der Bettung auf der Unterseite der Betonplatte und dem damit verbundenen größeren Hebelarm in der Mess-Ebene der X-Richtung (siehe Bild 168).

In Bild 169 ist der Vergleich der drei Y-Achsen dargestellt. Die beiden Sensorsysteme 2R und 2M zei-

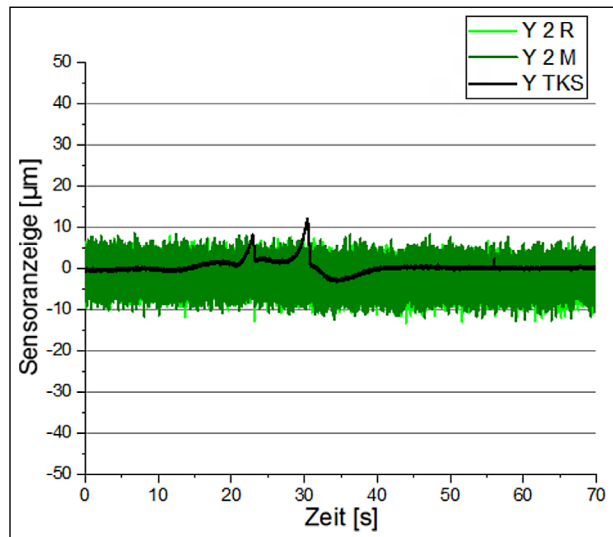


Bild 169: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Y-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h

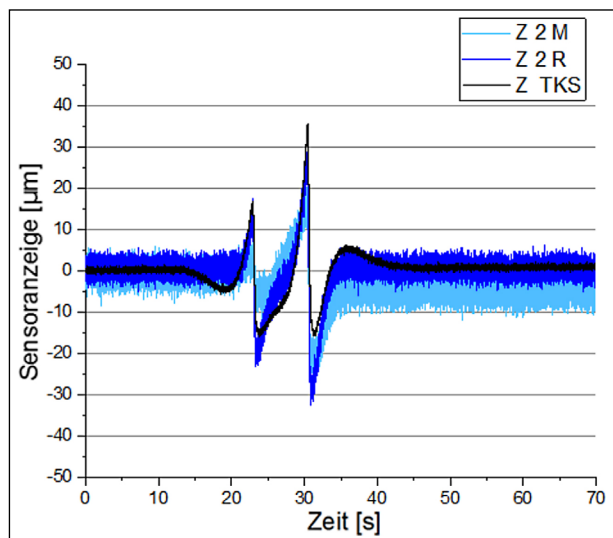


Bild 170: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h

gen keine signifikanten Anzeigewerte in Y-Richtung an. Die Sensoranzeige des TKS weist kleine Anzeigewerte auf, diese sind jedoch auf die nicht exakte Ausrichtung des Mess-Systems und die nicht vollständige Entkoppelung der drei Raumachsen des TKS zurückzuführen.

In Bild 170 und Bild 171 sind die Sensoranzeigen der drei Sensorsysteme in Z-Richtung abgebildet. Der Verlauf weist sowohl qualitativ als auch quantitativ eine hohe Übereinstimmung auf. Des Weiteren sieht man sowohl am Verlauf, als auch an den nominellen Werten, dass das Sensorsystem 2R größere Bewegungen detektiert. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Sensorsystem direkter Überrollung ausgesetzt ist, während das Sensorsystem 2M keine direkte Überrollung erfährt.

Das „Einschwingen“ bzw. „Ausklingen“ der Sensoranzeige des TKS lässt sich auf die nicht vorhandene Entkoppelung der drei Raumachsen zurückführen.

Der Vergleich der nominellen Messwerte der Sensoren zeigt, dass das TKS in Z-Richtung mit dem Sensorsystem 2R vergleichbare Messwerte anzeigt.

	2 M	2 R	TKS
Vorderachse	8 μm	33 μm	30 μm
Hinterachse	36 μm	54 μm	51 μm

Tab. 58: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Bild 302 (Kapitel 6.5.4); Vergleich der Z-Richtung

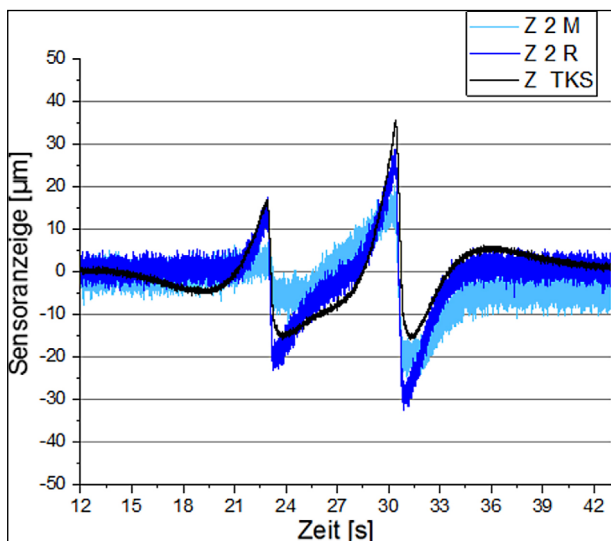


Bild 171: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h; zeitlich höher aufgelöst

Fazit:

Der quantitative Vergleich der vier Sensoranzeigen zeigt gleichartige Deformationsverläufe bei Überrollung mit einem Lkw und bestätigt damit die Sensoranzeigen.

Das TKS bestätigt ebenfalls die Funktionsfähigkeit der Sensorsysteme 2R und 2M. Das TKS stimmt mit der Anzeige des Sensorsystems 2R nahezu überein.

Ursache der quantitativen Unterschiede zwischen den Sensorsystemen 2R und 2M sind die unterschiedlichen Einbauorte bzw. Beanspruchungen in situ (direkte Überrollung vs. Mitte der Rollspur). Dieses bestätigt die Wichtigkeit einer direkten Messung in der Rollspur zur Erfassung der maßgebenden mechanischen Beanspruchungswerte.

Die Überrollvorgänge wurden mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt, um den Einfluss auf die Bewegungen der Fuge bestimmen zu können. In der Bild 172 ist ein Überrollvorgang der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h zu sehen. Sowohl die qualitative Form des Verlaufs, als auch die nominellen Werte der Differenzen der Sensoranzeigen bei der Überrollung der Achsen stimmen bei allen drei Sensorsystemen überein. Das „Einschwingen“ bzw. „Ausklingen“ des TKS ist hier ebenfalls erkennbar.

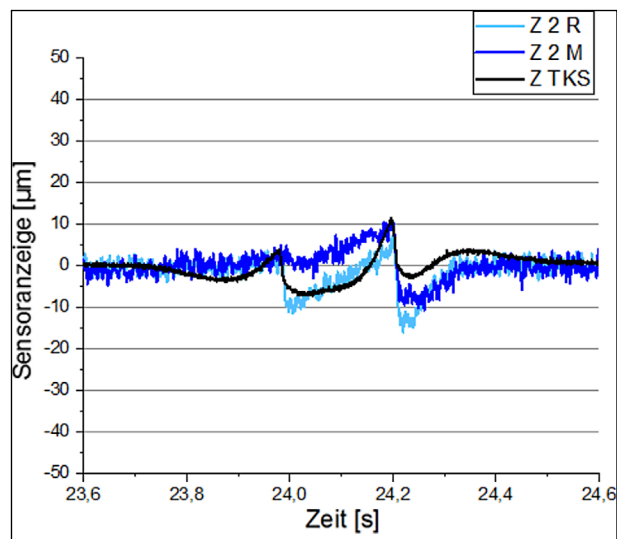


Bild 172: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 70 km/h

	2 M	2 R	TKS
Vorderachse	2 µm	10 µm	10 µm
Hinterachse	16 µm	16 µm	14 µm

Tab. 59: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Bild 172; Vergleich der Z-Richtung

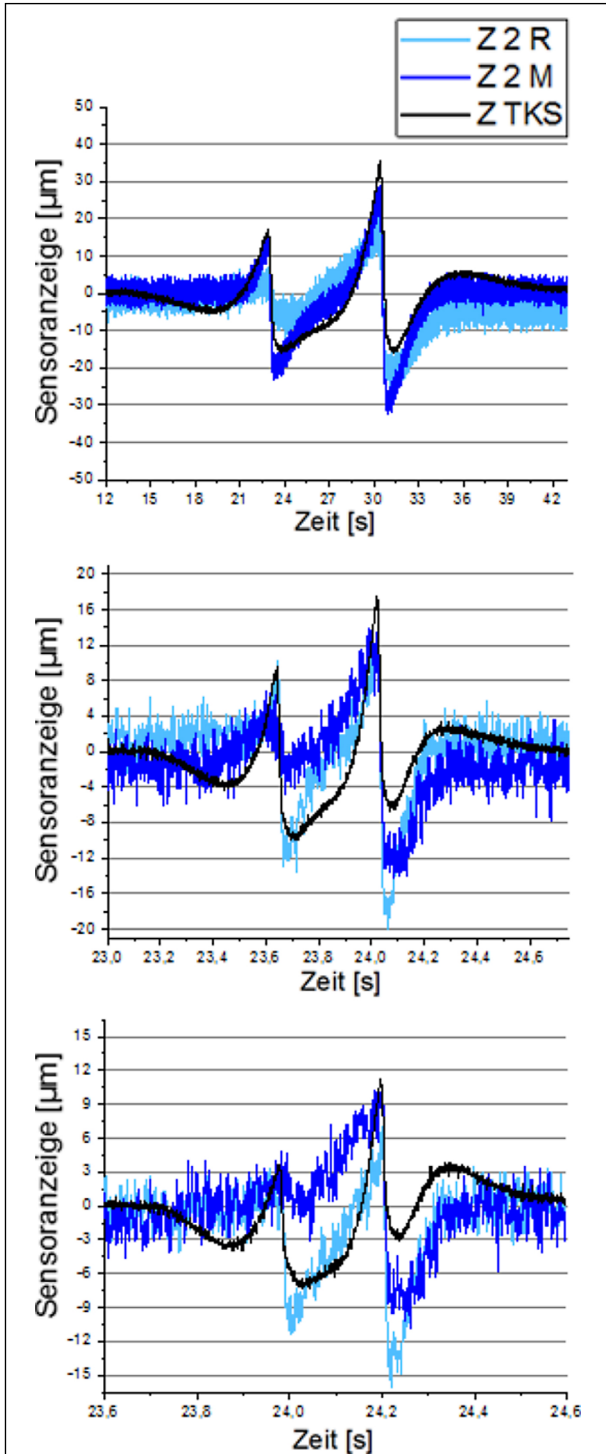


Bild 173: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und verschiedenen Geschwindigkeiten: oben 2 km/h; Mitte 40 km/h; unten 70 km/h, Abszisse und Ordinate wurden zum besseren qualitativen Vergleich der Verläufe angepasst

In Tabelle 59 sind die Differenzen des maximalen und des minimalen Werts in Z-Richtung bei der Überrollung mit der Vorderachse und der Hinterachse aus Bild 172 aufgelistet.

Zum besseren qualitativen Vergleich der Verläufe wurde die Skalierung der Diagrammachsen der Geschwindigkeit entsprechend angepasst (siehe Bild 173). Dadurch wird ersichtlich, dass der qualitative Verlauf nicht von der Überrollgeschwindigkeit beeinflusst wird. Quantitativ betrachtet nimmt mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit (kürzerer Überrollvorgang) die Relativbewegung der Fugenflanken ab (siehe Bild 174).

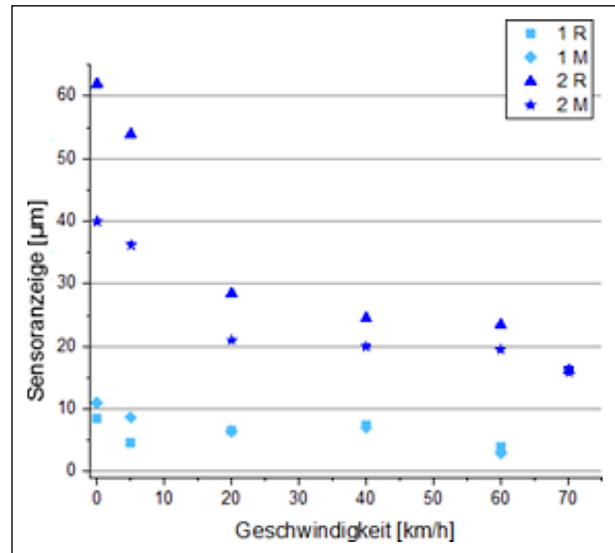


Bild 174: Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in Z-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten

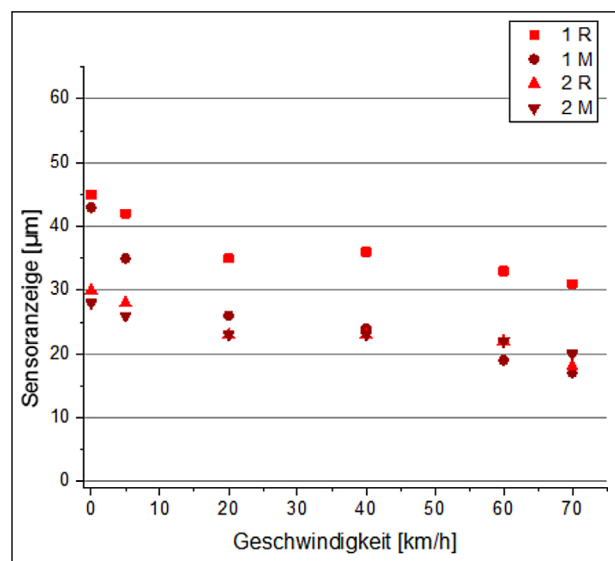


Bild 175: Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in X-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten

Der beschriebene Zusammenhang zwischen Abnahme der Fugenbewegungen bei wachsender Geschwindigkeit, lässt sich ebenfalls an der X-Achse feststellen. Dieser Zusammenhang ist jedoch nicht so stark ausgeprägt, wie in Z-Richtung (siehe Bild 175).

Da in Y-Richtung bei Überrollung mit konstanter Geschwindigkeit auf gerader Strecke keine Bewegungen gemessen wurden, kann hier kein Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Sensoranzeige festgestellt werden. Aus Gründen der Vollständigkeit wurden diese Mess-Datensätze trotzdem ausgewertet und sind in Bild 176 dargestellt.

Fazit:

Bei der Sensorerprobung mit einem einzelnen Lkw zeigte sich, dass das Lastverhältnis der beiden Fahrzeugachsen dem Verhältnis der Maximalwerte der Sensoranzeigen entspricht. Des Weiteren sind die Achsabstände, bei Kenntnis der Geschwindigkeit, aus den Messdaten ableitbar. Dieser Zusammenhang ist auch zur Ermittlung der Überrollgeschwindigkeit bei gegebenen Achsabständen nutzbar. Die Sensorsysteme bilden geschwindigkeitsabhängige Fugenbewegungen in allen Achsrichtungen sensibel ab.

In der X-Anzeige bilden sich die konstruktiven und geometrischen Eigenschaften des Fahrbahnbelages (z. B. Plattenlängen und Kopplung der Platten) ab. Unter den speziellen Neubaubedingungen des duraBAST (keine reguläre und dauerhafte Verkehrs-

beanspruchung) sind keine Y-Deformationen bei Überrollvorgängen mit konstanter Geschwindigkeit messbar.

4.5.3 Bremsvorgang mit einem 20 t Lkw

Als Sonderbeanspruchungsszenario wurden mehrere Bremsvorgänge bis zum Stillstand definiert. Hierfür wurden Bremsvorgänge mit einem 20 t Lkw durchgeführt. Für die Zuordnung der Sensoren wird auf Bild 186 verwiesen.

Auswirkungen des Bremsvorgangs in X-Richtung

In Bild 177 sind die Sensoranzeigen in X-Richtung von allen vier Sensorsystemen abgebildet. Aus den

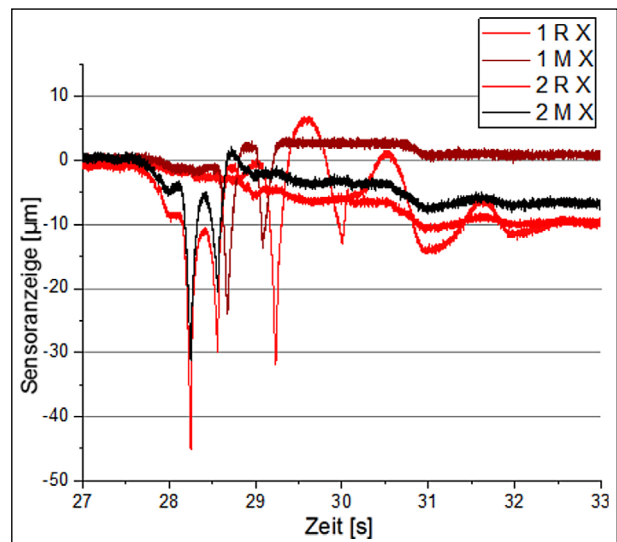


Bild 177: Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang

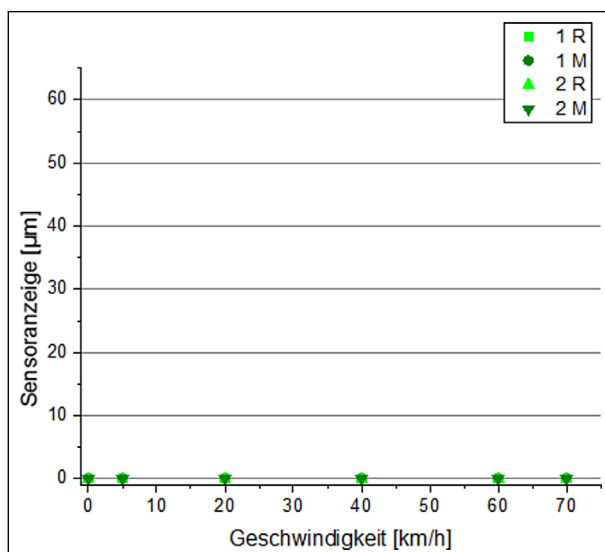


Bild 176: Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in Y-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten

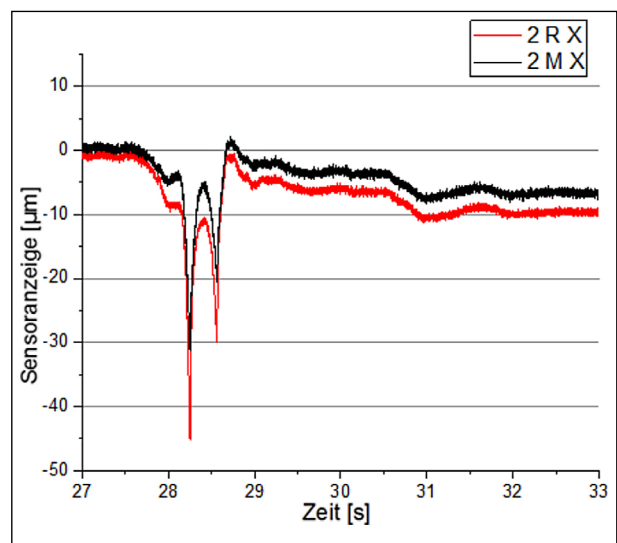


Bild 178: Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R und 2M in X-Richtung bei Bremsvorgang

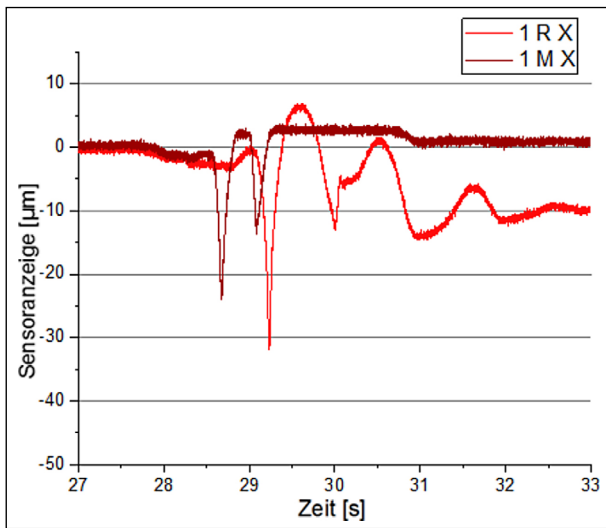


Bild 179: Sensoranzeige der Sensorsysteme 1R und 1M in X-Richtung bei Bremsvorgang

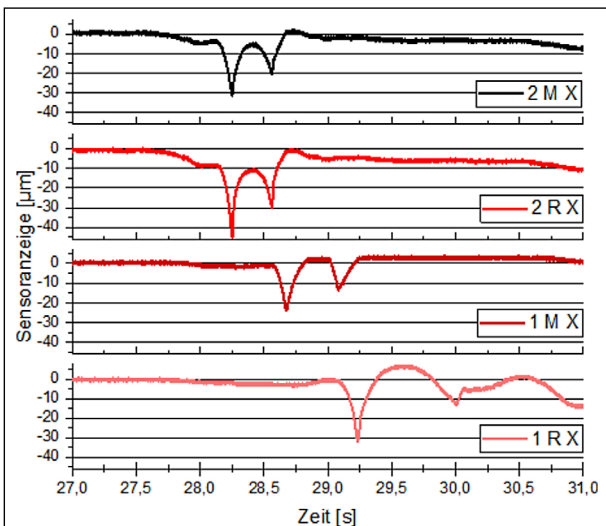


Bild 180: Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung

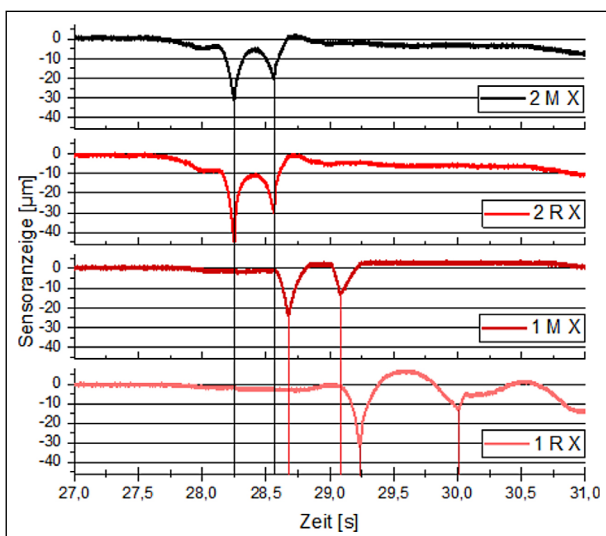


Bild 181: Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung und eingezeichnete Zeitpunkte der Achsenüberrollung

	1 R [µm]	1 M [µm]	2 R [µm]	2 M [µm]
Vorderachse	32	23	45	30
Hinterachse	20	15	28	22

Tab. 60: Differenz der Null-Lage zu den Spitzenwerten in Bild 181

Fugendeformationen können die durchschnittlichen Geschwindigkeiten der beiden Achsen des Lkws bei der Überrollung der Fugen ermittelt werden. Zur besseren Lesbarkeit wurde Bild 177 in zwei Bilder, Bild 178 und Bild 179, aufgeteilt:

- 44 km/h bei der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
- 32,9 km/h bei der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte acht und neun
- 17,8 km/h bei der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte sieben und acht

Des Weiteren erkennt man eine signifikant höhere Belastung bei der Überrollung mit der Vorderachse, im Gegensatz zu den normalen Überrollvorgängen: Das Gewicht verlagert sich bei einer Vollbremsung erwartungsgemäß auf die Vorderachse und die Sensorsysteme bilden dies ab (siehe Bild 178).

In Bild 180 sind nochmals die Sensoranzeigen der vier Sensorsysteme beim Bremsvorgang abgebildet. In Bild 181 erkennt man die Abnahme der Überrollgeschwindigkeit an dem breiter werdenden Zeitfenster zwischen der Überrollung mit der Vorder- und der Hinterachse.

Fazit:

Im Gegensatz zu Überrollvorgängen mit konstanter Geschwindigkeit erzeugt beim Bremsen die Vorderachse höhere Verformungen in X-Richtung im Fugenbereich, als die Hinterachse. Dabei werden die Fugen beim Bremsvorgang erwartungsgemäß zusammengedrückt.

Auswirkungen des Bremsvorgangs in Y-Richtung

In Y-Richtung erzeugen Bremsvorgänge signifikant detektierbare Verformungen (siehe Bild 182). Dies lässt sich eventuell auf ein geringes „Ausbrechen“ des Lkw aus der regulären Fahrspur oder auf eine andere durch diese hohe Beanspruchung hervorgerufene Bewegung zurückführen. Man kann ebenfalls eine größere Verformung bei der Überrollung mit der Vorderachse, als mit der Hinterachse erkennen. Bemerkenswert ist ebenfalls die größere Differenz der maximalen Sensoranzei-

gen der eingebauten Sensorsysteme im Gegensatz zu dem TKS.

Diese signifikante Verformung konnte nur in der Fuge mit ausgeprägtem Kerbriss zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn gemessen werden, nicht bei den beiden anderen Fugen (siehe Bild 183).

Fazit:

Überrollvorgänge mit konstanter Geschwindigkeit erzeugen keine Fugenbewegungen in Y-Achse in

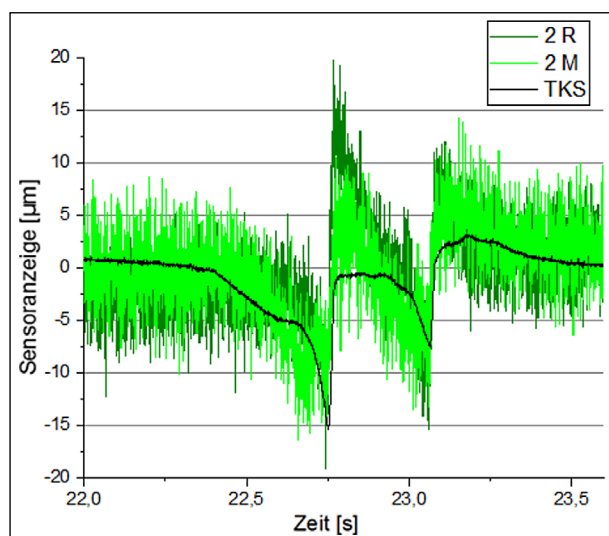


Bild 182: Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Y-Richtung bei Bremsvorgang

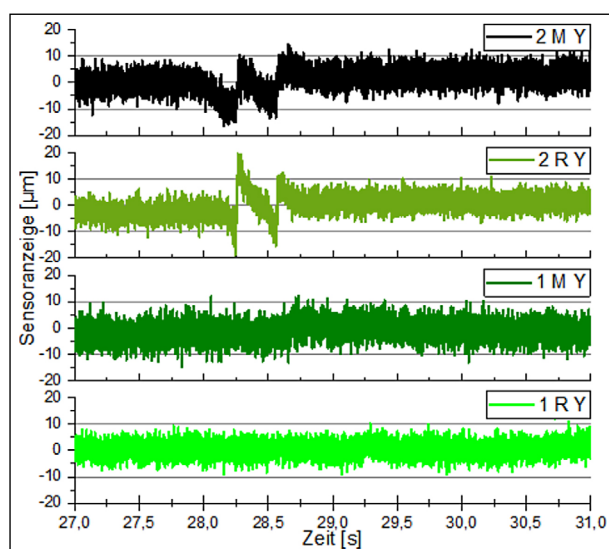


Bild 183: Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in Y-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung

	2 M [µm]	2 R [µm]	TKS [µm]
Vorderachse	14	27	16
Hinterachse	10	18	12

Tab. 61: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Bild 182

der hier untersuchten bettungstabilen Betondecke ohne Verkehrshistorie.

Bei Bremsvorgängen konnten Verformungen in Y-Richtung bis zu 30 Mikrometer gemessen werden.

In den Fugen zwischen Betonfahrbahnplatte acht und neun und sieben und acht (geringe Kerbrissausbildung) konnten durch Bremswirkungen keine Verformungen in Y-Richtung detektiert werden.

Auswirkungen des Bremsvorgangs in Z-Richtung

In Z-Richtung erzeugen Bremsvorgänge ebenfalls signifikante Messwertenzeigen (siehe Bild 184). Die Messwerte sind bei der Vorderachse größer, als bei der Hinterachse analog zu den Sensoranzeigen in X- und Y-Richtung.

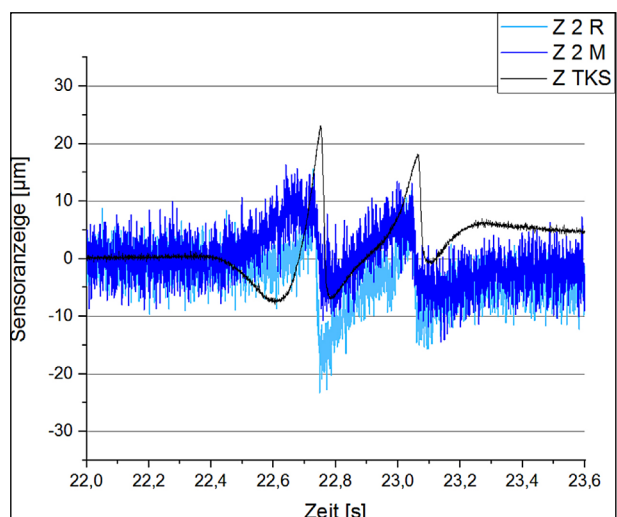


Bild 184: Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Z-Richtung bei Bremsvorgang

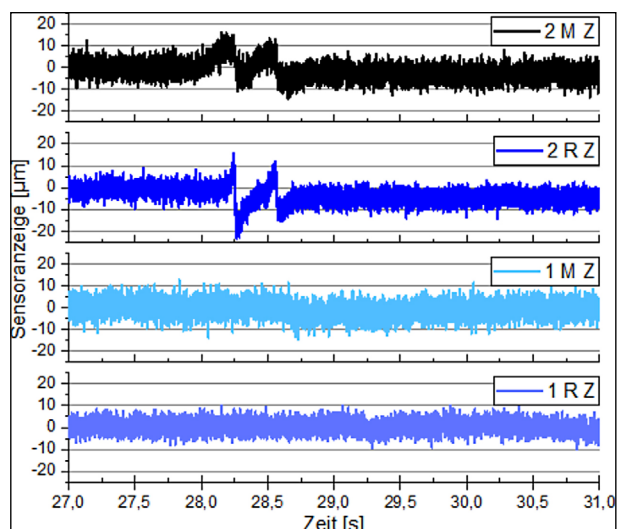


Bild 185: Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in Z-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung

	2 M [μm]	2 R [μm]	TKS [μm]
Vorderachse	15	25	29
Hinterachse	11	15	19

Tab. 62: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Bild 184

Mess-Modi	Anzahl der Wiederholungen
Quasistatische Überrollung	3
5 km/h	3
20 km/h	3
40 km/h	3
60 km/h	3
60 km/h mit Vollbremsung	3
70 km/h	3

Tab. 63: Mess-Modi bei Überrollung mit einem 20 t Lkw; durchgeführt am 11.07.2018

Diese signifikante Verformung konnte nur in der Fuge mit ausgeprägtem Kerbriss zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn gemessen werden, nicht bei den beiden anderen Fugen.

Fazit:

Bei Bremsvorgängen konnten in diesem nahezu unbeanspruchten Belag Verformungen in Z-Richtung bis zu 25 Mikrometer gemessen werden.

In den Fugen zwischen Betonfahrbahnplatte acht und neun und sieben und acht (geringe Kerbrissausbildung) konnten durch Bremswirkungen keine Verformungen in Z-Richtung detektiert werden.

4.5.4 Erneute Erprobung mit einem 20 t Lkw am 10. Juni

Am 11.07.2018 fand eine erneute Erprobung der in der Waschbetonstrecke 40 installierten Sensorsysteme mit einem 20 t schweren Lkw statt. Innerhalb dieser Erprobungsphase von knapp drei Stunden stieg die Umgebungstemperatur um 7 K von 15,4 auf 22,4 °C an. Die Temperatur in 135 mm Tiefe stieg in diesem Zeitraum jedoch nur um 1,8 K von 20,8 auf 22,6 °C. Neben der Erfassung der Sensordaten bei sommerlichen Witterungsbedingungen sollte die Reproduzierbarkeit der Sensoranzeigen bei wiederholter, gleichbleibender Beanspruchung untersucht werden. Aus diesem Grund wurden sämtliche Überrollvorgänge dreimal durchgeführt (siehe Tabelle 63).

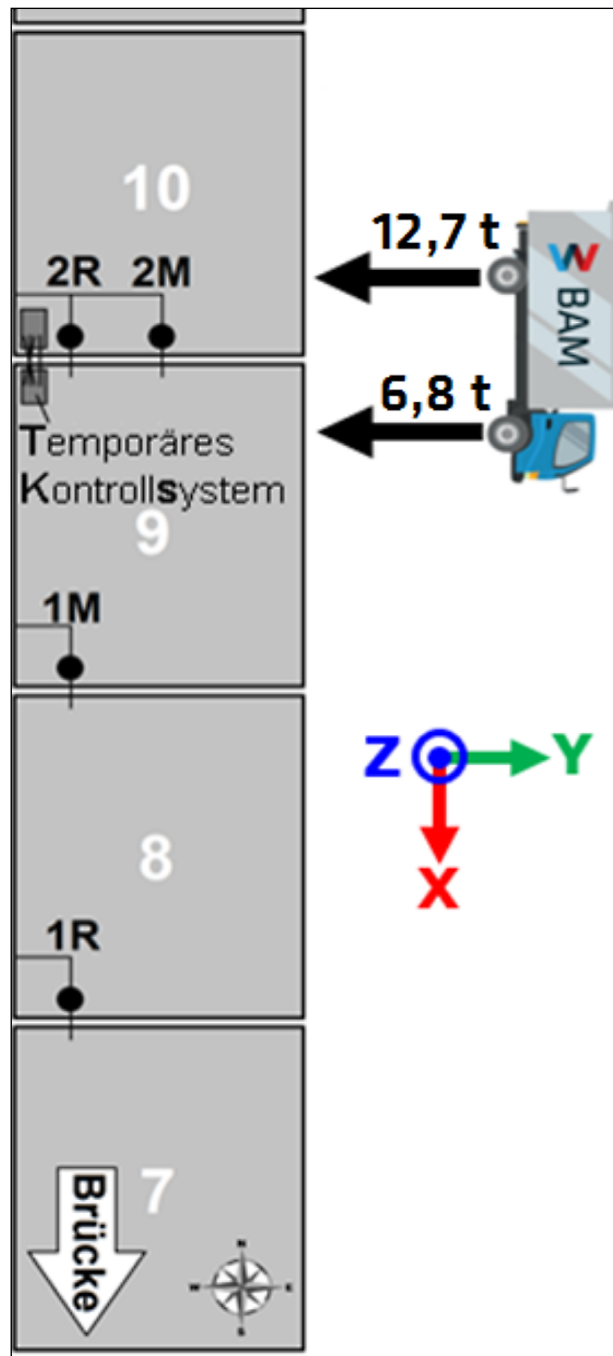


Bild 186: Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Lkw und Achslasten

Es wurde dreimal hintereinander ein Überrollvorgang mit 5 km/h durchgeführt. In Bild 187 ist die Sensoranzeige des Sensorsystems 2M bei allen drei Überrollvorgängen abgebildet.

Die drei Überrollvorgänge führten zu ähnlichen Verformungen in X-Richtung. Sowohl der qualitative Verlauf als auch die Messwerte stimmen überein.

In Y-Richtung konnten bei normalen Überrollvorgängen keine Verformungen detektiert werden (siehe Bild 188),

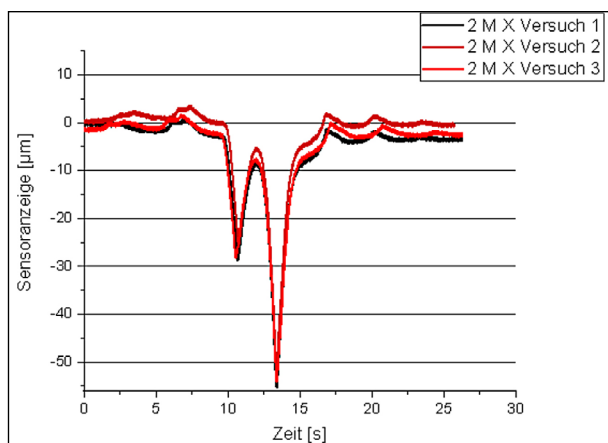


Bild 187: Sensoranzeige in X-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77% rel.F

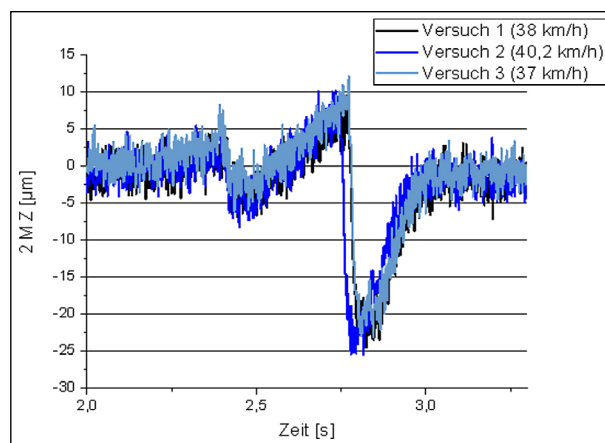


Bild 190: Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 40 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77% rel.F.

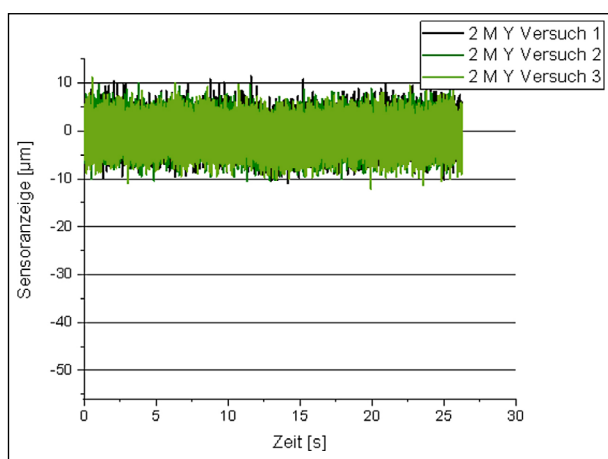


Bild 188: Sensoranzeige in Y-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77% rel.F

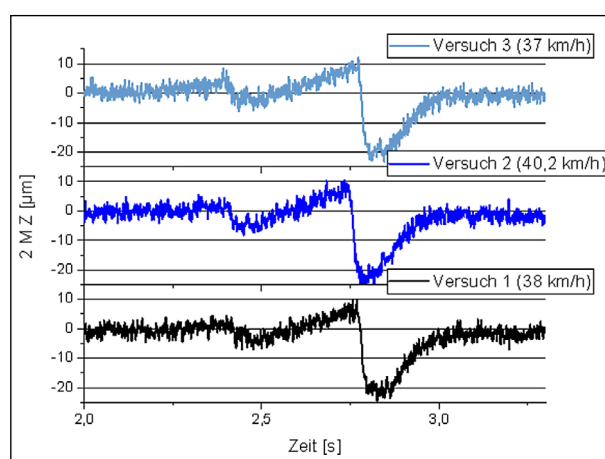


Bild 191: Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 40 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77% rel.F., gestaffelte Darstellung

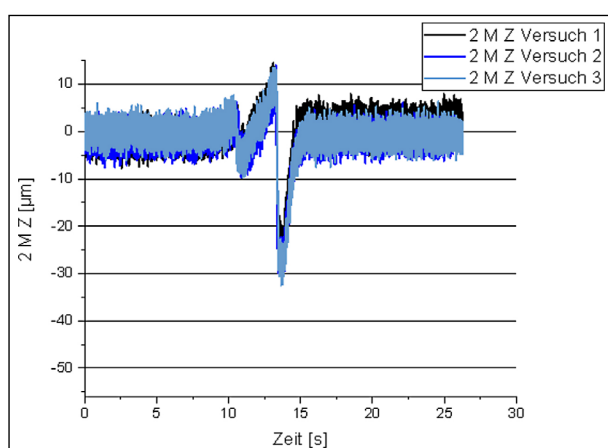


Bild 189: Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77% rel.F.

In Bild 189 ist die Z-Richtung des Sensorsystems 2M bei drei Überrollvorgängen mit 5 km/h abgebildet. Die gleichen Belastungen führten sowohl quantitativ als auch qualitativ zu gleichen Bewegungen der Fugenflanken.

In Bild 190 ist nochmals die Sensoranzeige in Z-Richtung bei den drei Überrollvorgängen mit ~40 km/h abgebildet. Die geringfügige zeitliche Abweichung der Sensoranzeige beim zweiten Versuch ist auf die höhere Geschwindigkeit zurückzuführen. Ansonsten gleichen sich auch diese Bewegungen in Form und Betrag (gestaffelte Ansicht in Bild 191).

Im Vergleich zu den Überrollvorgängen im April sind an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte 9 und 10 höhere Bewegungen in X-Richtung zu erkennen, in Z-Richtung bleiben diese jedoch gleich (siehe Bild 192).

In Bild 193 ist die Sensoranzeige des Sensorsystems in allen drei Raumrichtungen abgebildet. Im Juli kamen keine verwertbaren Signale in Y-Richtung an. Die beiden anderen Achsen zeigten jedoch signifikante Verformungen an, im Gegensatz zu der Messkampagne im April. Die Fugen haben sich geöffnet, was auch durch die Setzdehnungsmessung bestätigt werden konnte.

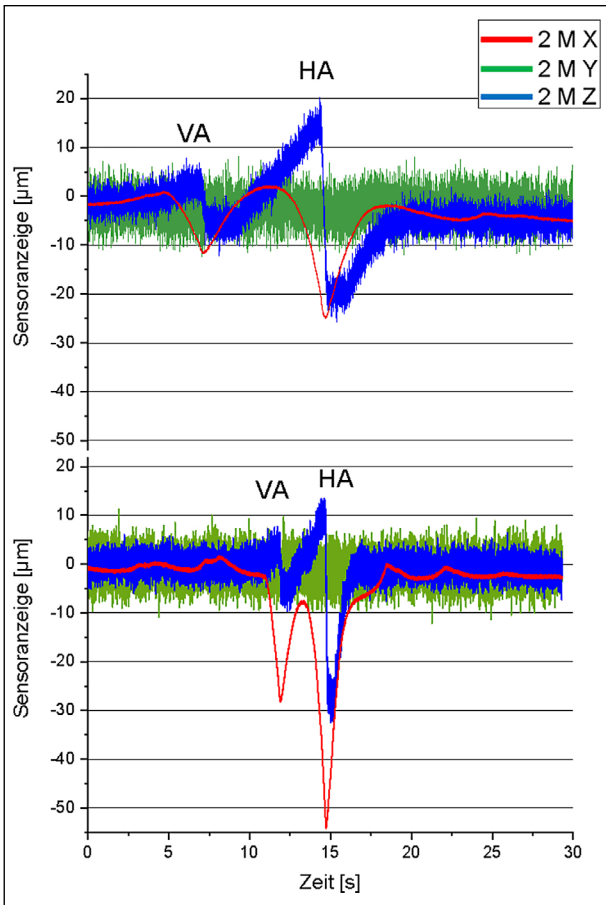


Bild 192: Überrollung am 12. April mit 2 km/h bei 15°C und am 11. Juli mit 4,7 km/h und 18 °C

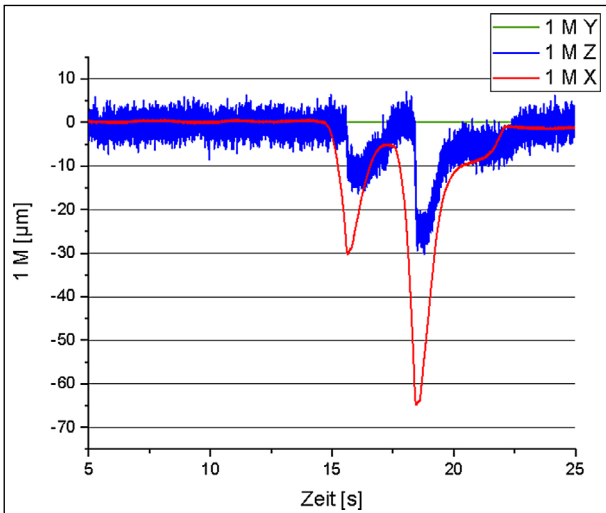


Bild 193: Sensoranzeige des Sensorsystems 1M am 11. Juli mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h

Dies führt zu einer höheren Beweglichkeit als bei einer nicht vollständig gerissenen Querscheinfuge.

In Bild 194 sind die Sensoranzeigen der vier Sensorsysteme sowie des TKS in X-Richtung abgebildet. Alle Systeme reagieren auf die Vorderachse mit 6,8 t Gewicht weniger, als auf die Hinterachse mit 12,7 t. Zudem scheinen die beiden Sensorsysteme

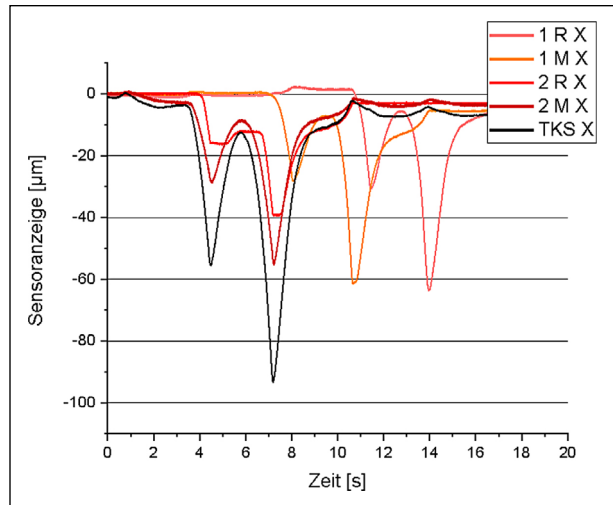


Bild 194: Sensoranzeige der vier eingebrachten Sensorsysteme sowie des TKS in X-Richtung bei Überrollung mit 5 km/h

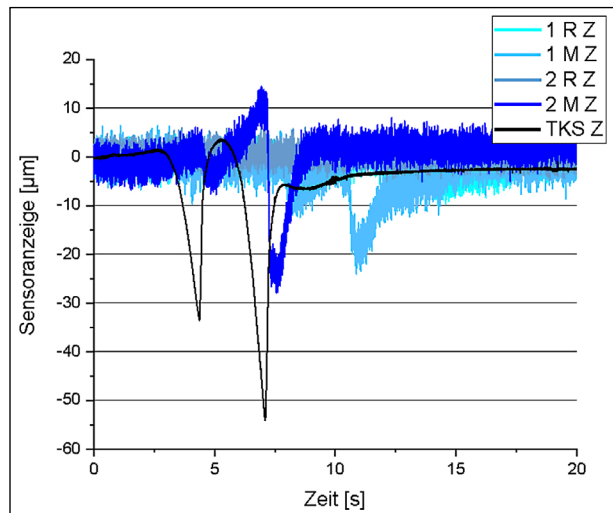


Bild 195: Sensoranzeige der vier eingebrachten Sensorsysteme sowie des TKS in Z-Richtung bei Überrollung mit 5 km/h

in den weniger stark gerissenen Fugen höhere Bewegungen in X-Richtung zu erfahren.

In Z-Richtung zeigt sich auch, dass eine höhere Achslast zu größeren Bewegungen der Fugenflanken führt. Die größeren Messwerte des TKS sowie der abweichende Verlauf sind auf die andere Höhenlage sowie die nicht vorhandene Entkoppelung der Messachsen zurückzuführen (siehe Bild 195).

Fazit:

Die Wiederholbarkeit der Sensoranzeigen bei gleicher Belastungsart konnte nachgewiesen werden. Sowohl der qualitative, als auch der quantitative Verlauf stimmen bei gleicher Belastungsart stets überein. Die Sensorsysteme 1R, 2R und 2M funktionieren weiterhin und haben die klimatischen Ge-

gebenheiten sowie etwaige Umbauten in der Umgebung über vier Monate überstanden.

Bei dem Sensorsystem 1M geben Signalkonstanz und -verläufe Hinweise auf einen Ausfall des Sensorsystems.

Fazit zum Mess-Einsatz im Juli 2018:

Die beiden Hauptziele der Messkampagne im Juli 2018, die Sensoranzeigen bzw. Fugensysteme auf Wiederholbarkeit zu überprüfen und einen vollständigen Datensatz der Sensorsysteme bei sommerlichen Witterungsbedingungen zu erfassen, wurden erreicht. Es zeigte sich, dass gleiche Belastungsarten der Fuge zu gleichen Sensoranzeigen führten. Des Weiteren konnten Bewegungen in den Fugenweiten festgestellt werden, die sich auch in der Beweglichkeit der Fugenflanken ausdrücken. So zeigten sich bei den Sensorsystemen 1R und 1M in X- und in Z-Richtung größere Bewegungen, als im April. Die Funktionsfähigkeit der Mess-Station mit Datenübertragung und Erfassung des Umgebungsklimas sowie des vertikalen Temperaturgradienten wurden ebenso überprüft und bestätigt.

4.5.5 Beanspruchung der Fertigteilebetonstrecke mit MLS30 im August 2018

Am 13. und 14. August 2018 wurden zwei weitere Sensorsysteme für zusätzliche Messkampagnen auf einer Fertigteilebetonstrecke des duraBAST installiert.

Danach erfolgten am 15. und 16.08.2018 mit einem mobilen Belastungssimulator (Mobile Load Simulator, kurz: MLS30, siehe QR-Code (Bild 197)) 100.000 Überrollungen mit einer Radlast von 50 kN mit kurzen zeitlichen Unterbrechungen auf dieser Strecke des duraBAST. Anschließend wurde die gesamte Fertigteilebetonstrecke mit dem MLS ein überrollt (Achslast 20 t; 3 km/h).



Bild 196: MLS30 auf dem Gelände des duraBAST

In Bild 198 sind die Sensorsysteme, die Messachsen, die Fahrtrichtung und die Lage der Messmarken für die Setzdehnungsmessung skizziert.

In Bild 199 ist der positionierte MLS30 auf der Fertigteilebetonstrecke mit Mess-Station abgebildet.

In Bild 200 ist die Fertigteilebetonstrecke nach 100.000 Überrollungen mit dem MLS30 zu sehen. An dem Abrieb kann man die präzise Positionierung



Bild 197: QR-Code des MLS

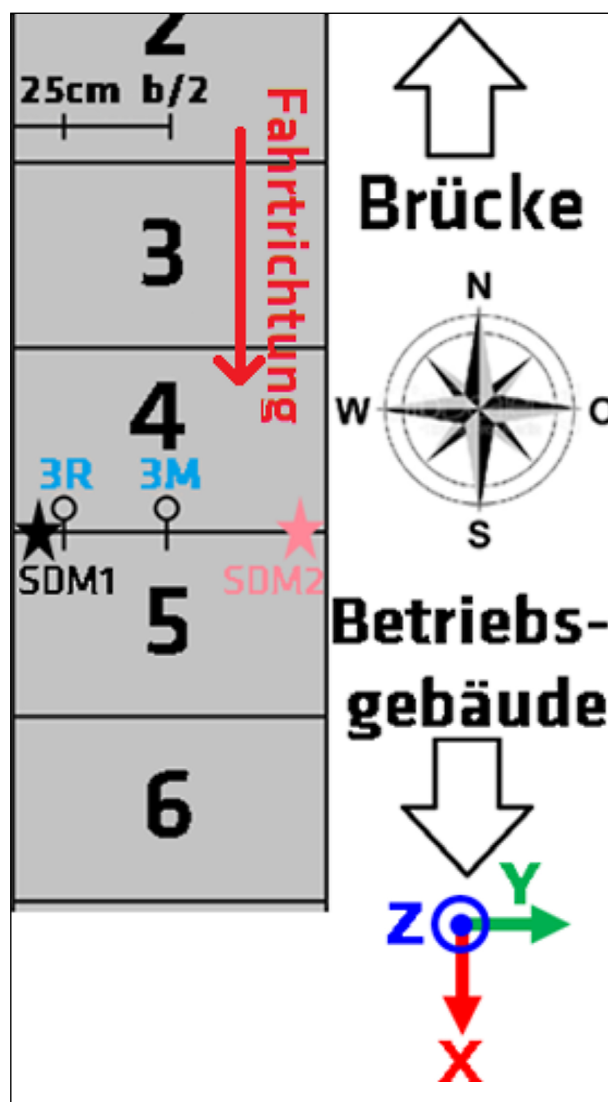


Bild 198: Lageplan der beiden Sensorsysteme sowie der Messachsen, der Fahrtrichtung und der Lage der Messmarken für die Setzdehnungsmessung auf der Fertigteilebetonstrecke



Bild 199: MLS30 in Position auf der Fertigteilbetonstrecke

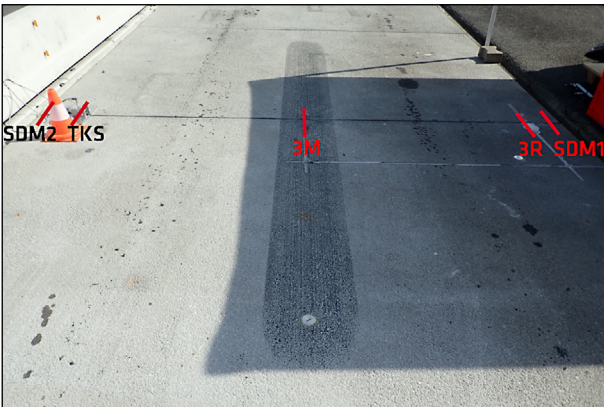


Bild 200: Fertigteilbetonstrecke nach 100.000 Überrollungen mit eingezeichneter Messtechnik (von links nach rechts): SetzDehnungsmesspunkt 2, externes temporäres Kontrollsystem, Sensorsystem 3M, Sensorsystem 3R, Setzdehnungsmesspunkt 1



Bild 201: Sensorsystem 3M auf der Fertigteilbetonstrecke des duraBAST nach 100.000 Überrollvorgängen

direkt auf dem Sensorsystem 3M erkennen sowie die Wirklänge der überrollenden Reifen mit 3,5 m bzw. 1,75 m auf jeder Seite der Fuge.

Das Sensorsystem 3R lag sowohl außerhalb der Rollspur als auch außerhalb des MLS30. Es wurde 25 cm vom Plattenrand entfernt installiert.



Bild 202: Sensorsystem 3R während der Messkampagne mit dem MLS30

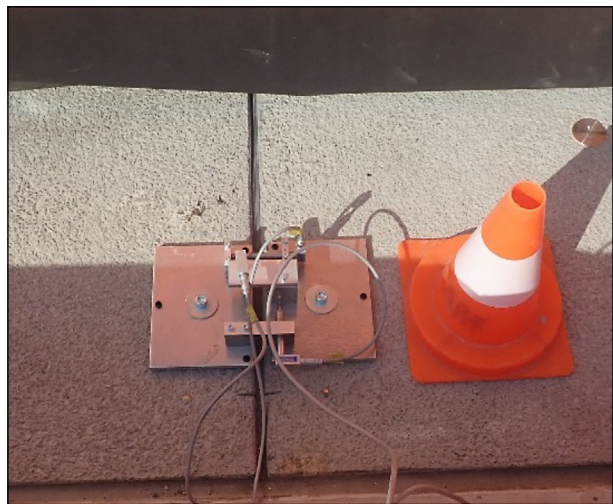


Bild 203: TKS während der Belastung durch MLS 30



Bild 204: Messmarken für die Setzdehnungsmessung und Referenzschlitz, falls sich die Platten in Y-Richtung verschieben sollten

Das TKS lag ebenfalls sowohl außerhalb der Rollspur als auch außerhalb des MLS30 und wurde ebenfalls 25 cm vom Rand installiert (siehe Bild 203).

Für die Setzdehnungsmessung wurden keine Metallstifte verwendet, wie bei der Waschbetonstrecke 40, sondern Messmarken, die auf die Oberfläche geklebt wurden. Zudem wurden die Betonplatten beidseitig angeschlitzt, um eine langfristige Verschiebung in Y-Richtung erkennen zu können (siehe Bild 204).

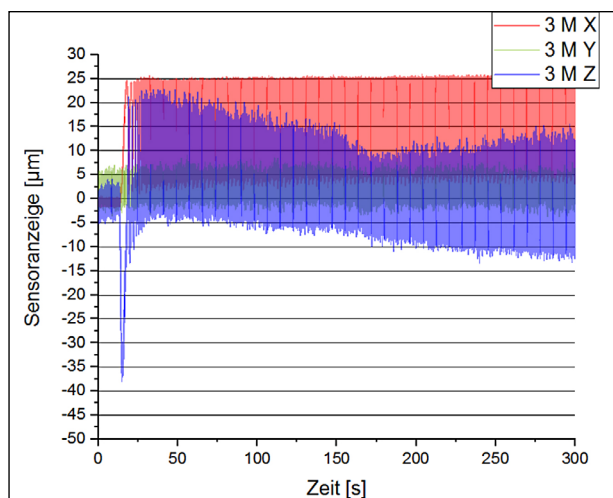


Bild 205: Anfahren der Lastzyklen des MLS; ~ 450 Lastzyklen

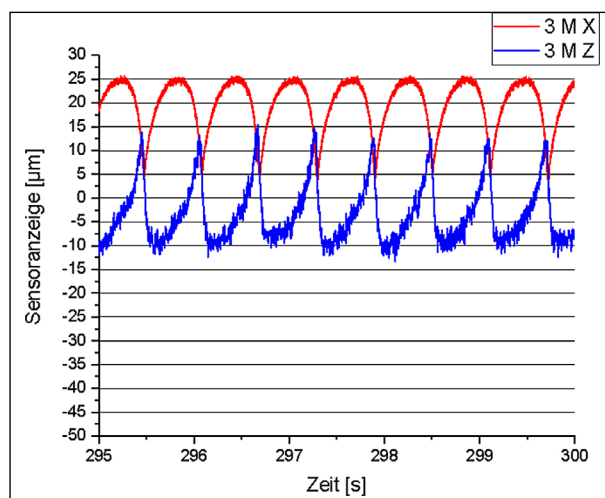


Bild 207: Verformungen in der Beanspruchungsspur nach ca. 450 Lastzyklen

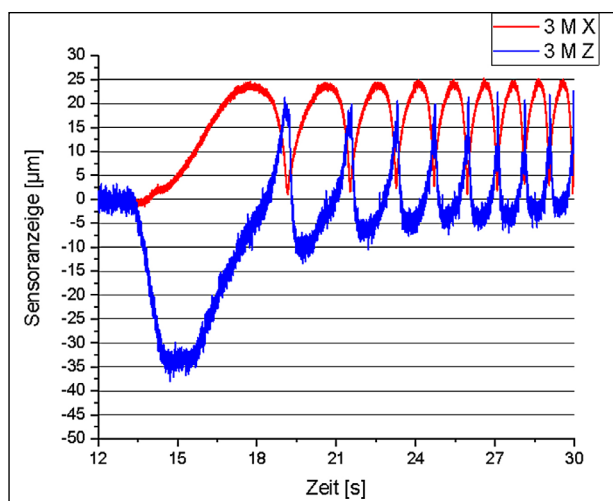


Bild 206: Anfahren der Lastzyklen des MLS30, vergrößerter Ausschnitt mit den ersten 9 Belastungen

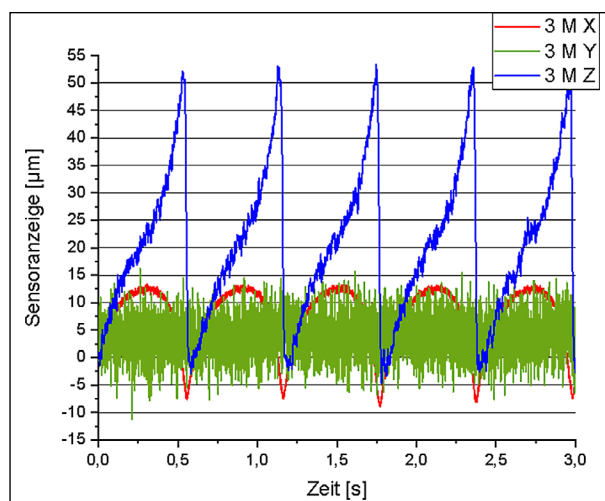


Bild 208: Verformungen in X, Y und Z-Richtung nach ca. 11.000 Zyklen

Nach der Positionierung des MLS30 über der mit Sensoren bestückten Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte 4 und 5 wurde der Belastungszyklus gestartet (siehe Bild 205).

Aufgrund der Trägheit des MLS30 ist eine regelmäßige zyklische Beanspruchung erst nach ca. fünf Überrollvorgängen vorhanden (siehe Bild 206).

Die ersten 450 Belastungszyklen zeigten ähnliche Verläufe in allen drei Raumachsen: In X-Richtung wurden Bewegungen von 20 µm gemessen, in Z-Richtung etwas größere mit 25 µm. In Y-Richtung konnten keine Bewegungen detektiert werden, weswegen auf die Darstellung im Weiteren verzichtet wird.

Alle 11.000 Zyklen wurde eine erneute Setzdehnungsmessung durchgeführt und die Messfrequenz von 20 Hz auf 2000 Hz hochgesetzt. In X-Richtung

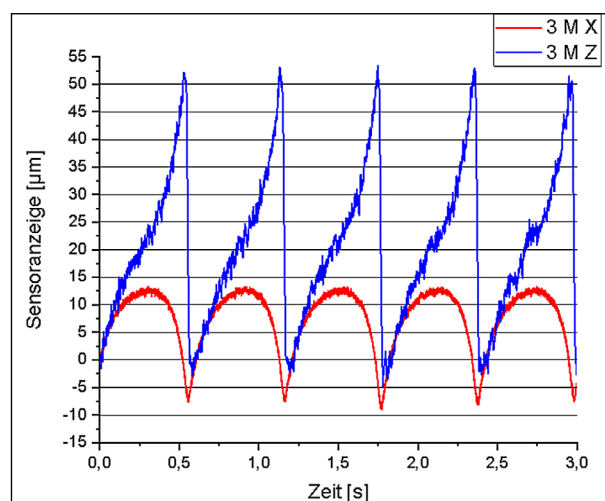


Bild 209: Verformungen in X und Z-Richtung nach ca. 11.000 Zyklen

änderte sich weder die Form noch der Betrag der Sensoranzeige mit 20 µm. In Y-Richtung konnten ebenfalls keine Bewegungen detektiert werden. In

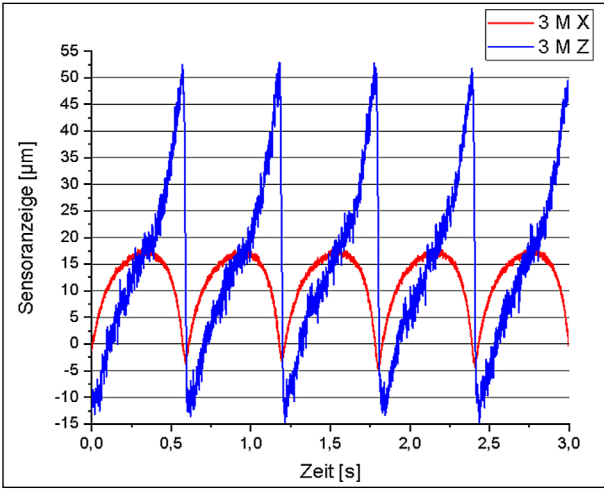


Bild 210: Verformungen in X und Z-Richtung nach ca. 48.000 Zyklen

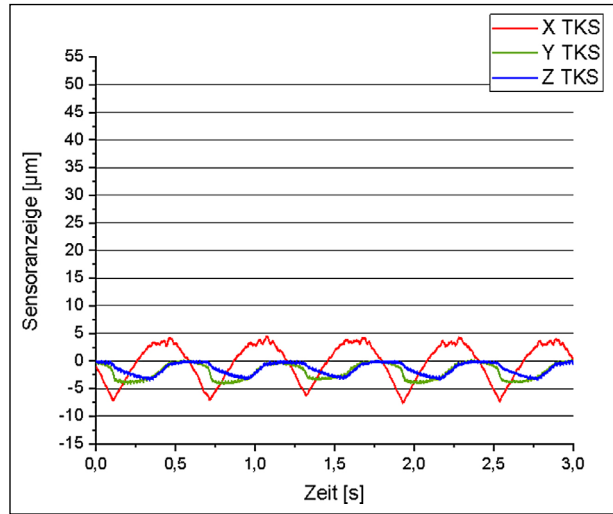


Bild 213: Sensoranzeige des TKS nach 11.000 Überrollungen

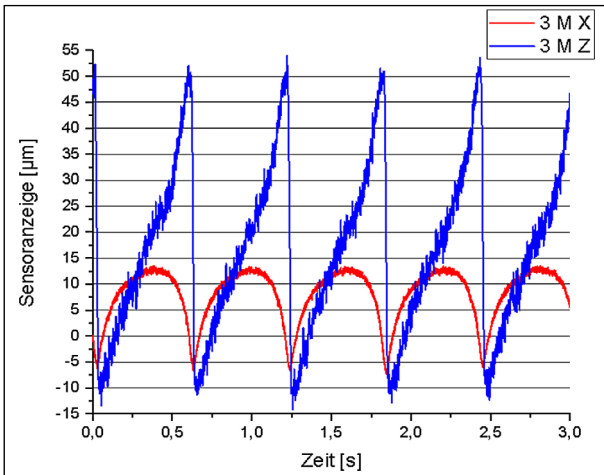


Bild 211: Verformungen in X und Z-Richtung nach ca 90.000 Zyklen

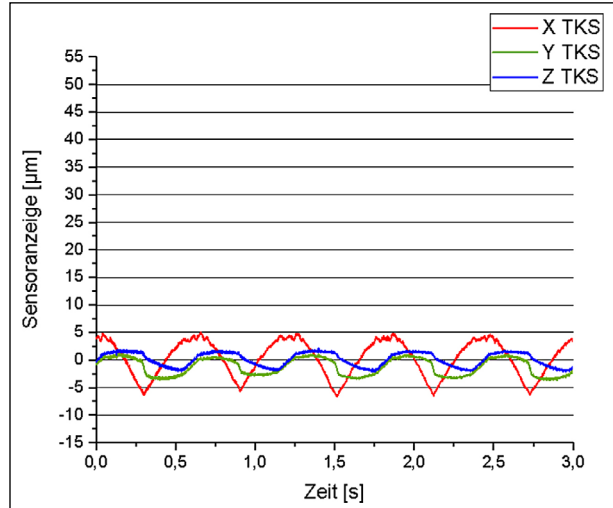


Bild 214: Sensoranzeige des TKS nach 31.000 Überrollungen

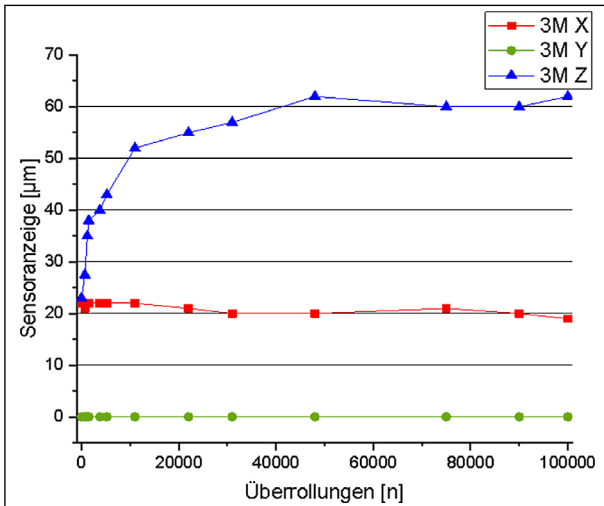


Bild 212: Dynamische Bewegungen; Peak to Peak in Abhängigkeit der Überrollungen

Z-Richtung wurden jedoch mit 52 µm größere Bewegungen gemessen. Auch die Form der Bewegungsabläufe veränderte sich (siehe Bild 208 bzw. Bild 209).

Danach blieben die dynamischen Sensoranzeigen weitgehendst unverändert. Sowohl die Form, als auch der Betrag der X- und Z-Bewegungen blieb bis zum Ende der Überrollungen durch den MLS 30 gleich (siehe Bild 210 und Bild 211).

Die Entwicklung der dynamischen Sensoranzeige des Sensorsystems 3M mit steigender Überrollungszahl ist in Bild 212 dargestellt. Nach einem steilen Anstieg über die ersten 11.000 Lastzyklen steigt der Betrag der gemessenen Deformationen in Z-Richtung nur noch geringfügig an, bis sich nach ca. 50.000 Lastzyklen und 60 µm ein stabiler Zustand einstellt. In X-Richtung bleiben die Verformungen bis zum Ende unverändert.

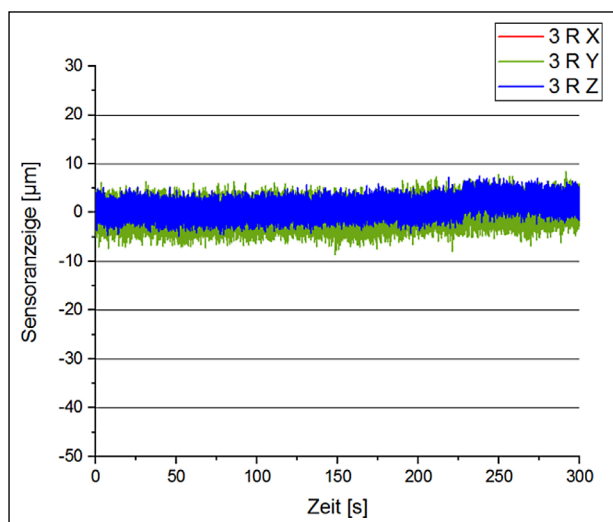


Bild 215: Sensoranzeige des Sensorsystems 3R beim Anfahren der Lastzyklen

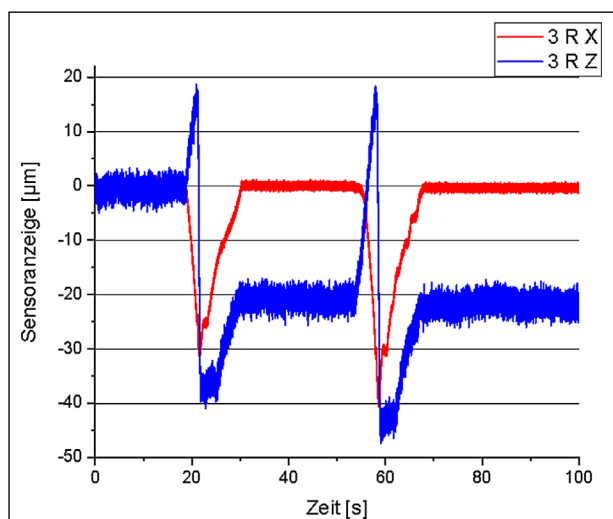


Bild 216: Sensoranzeige des Sensorsystems 3R bei einer Überrollfahrt mit einer Achslast von 20t nach 100.000 Belastungszyklen

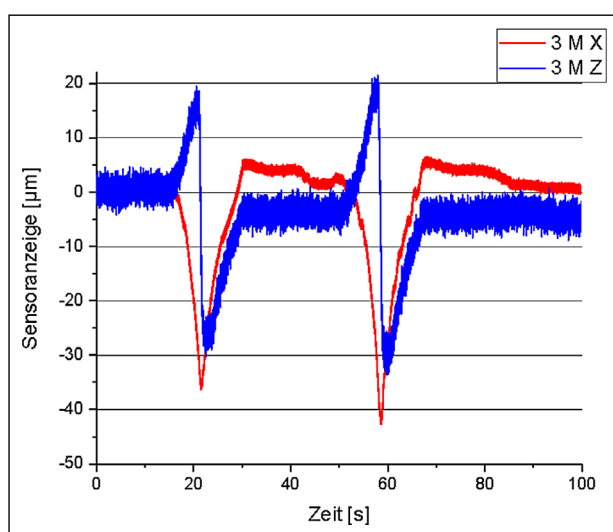


Bild 217: Sensoranzeige des Sensorsystems 3M bei einer Überrollfahrt mit einer Achslast von 20t nach 100.000 Belastungszyklen

Im Gegensatz zu dem direkt überrollten Sensorsystem 3M konnten sowohl das TKS als auch das Sensorsystem 3R keine großen Verformungen detektieren (siehe Bild 213 bis Bild 215).

Bei der anschließend stattfindenden Überfahrt mit dem MLS30 konnten hingegen bei Sensorsystem 3R und 3M signifikante Verformungen in X- und Z-Richtung festgestellt werden (siehe Bild 216 und Bild 217).

In Form und Betrag ähneln sich die Sensoranzeigen der beiden Sensorsysteme in X-Richtung. In Z-Richtung ist bei Sensorsystem 3R eine bleibende Verformung bei der Überfahrt zu erkennen, bei Sensorsystem 3M hingegen nicht. Dies lässt darauf schließen, dass die Fuge, an der das Sensorsystem 3M befestigt ist, durch die 100.000 Belastungszyklen elastischer und freier beweglich ist, als die unbelastete Stelle der Fuge, an der sich Sensorsystem 3R befindet.

Betrachtung der Langzeit-Verformungen der Fertigteil-Betonstrecke

Die Setzdehnungsmessungen und die Auswertung der Messdaten im Hinblick auf langsame Bewegungen ergaben die Verläufe in Bild 218 und Bild 219. Die Temperaturdaten wurden von den Temperatursensoren im Inneren der beiden Sensorsysteme erfasst und gemittelt.

Bei einer Erhöhung der Temperatur dehnen sich die Platten erwartungsgemäß aus und der Fugenspalt wird kleiner. So ergibt sich bei einer Maximaltemperatur von 27,5 °C eine Stauchung der Fuge um bis zu 350 µm.

In Z-Richtung wurden ebenfalls langfristige Bewegungen gemessen. Diese fallen nicht so stark aus, wie in X-Richtung und führen zu einer maximalen Abweichung von 60 µm bei der Maximaltemperatur.

Fazit zu der Mess-Kampagne im August:

Vom 13. bis 17. August 2018 fand eine Messkampagne auf dem Gelände des duraBASt mit den folgenden Zielen statt:

- Installation von zwei Sensorsystemen auf einem Fertigteilbetonabschnitt
- Einrichtung der Mess-Station auf diesem Fertigteilbetonabschnitt

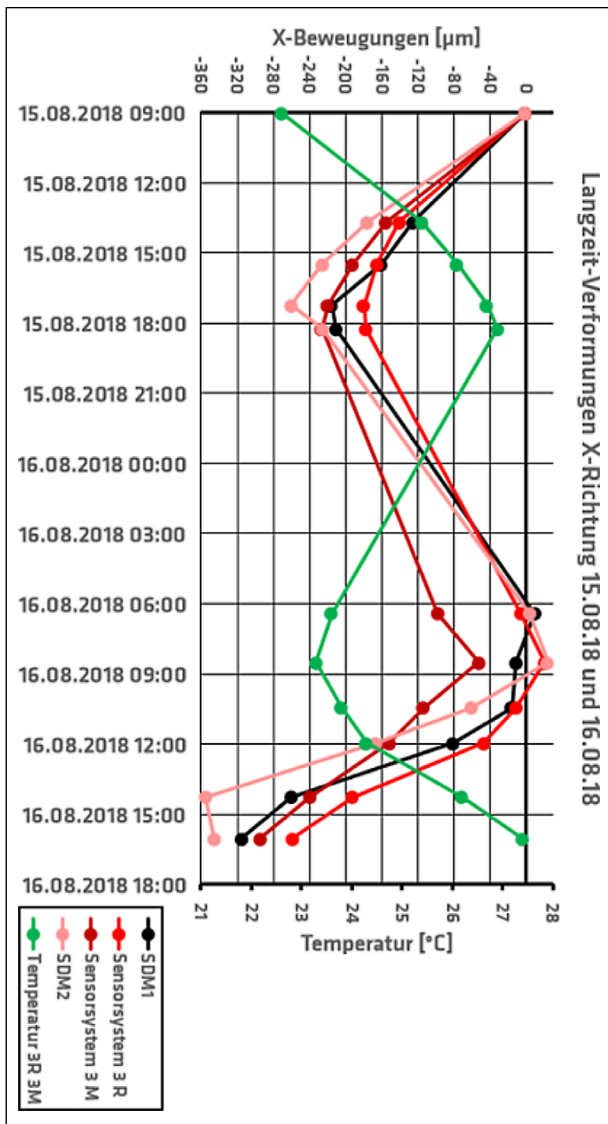


Bild 218: Langzeitverformungen der Fuge über zwei Tage in X-Richtung bei der Fertigteilbetonstrecke; 15. und 16. August 2018

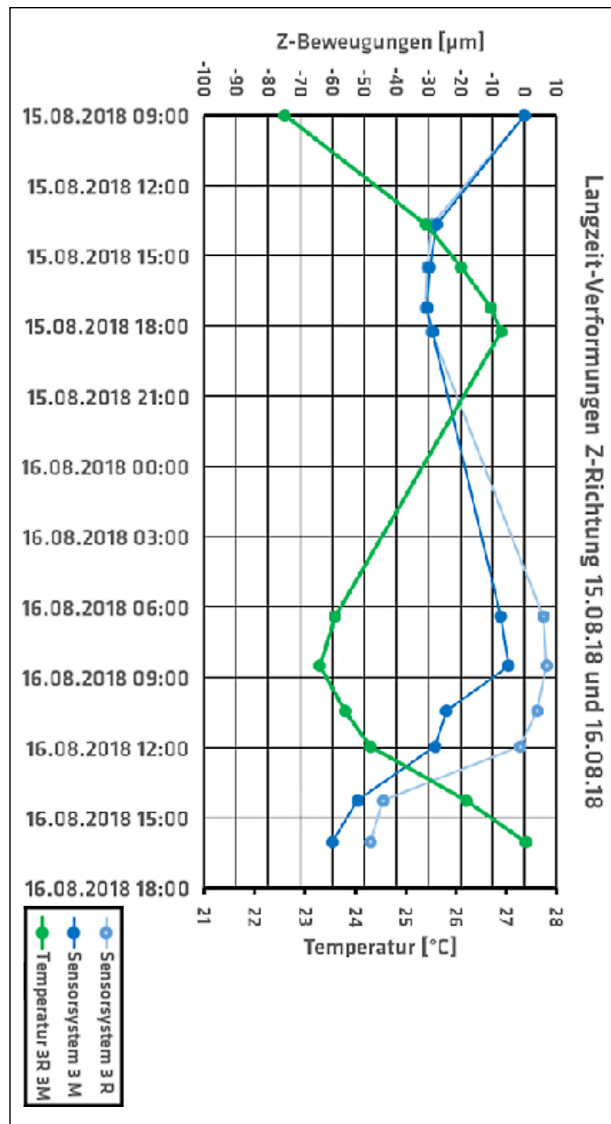


Bild 219: Langzeitverformungen der Fuge über zwei Tage in Z-Richtung bei der Fertigteilbetonstrecke; 15. und 16. August 2018

- Betreuung der Beanspruchung der Fertigteilbetonstrecke mit 100.000 Überrollungen und Datenerfassung
- Erfassung von zusätzlichen Messwerten während dieser zwei Tage
- Abschließender Rückbau und Einrichtung der Mess-Station an der Waschbetonstrecke 40 für eine kontinuierliche Datenübertragung

Alle gesetzten Ziele der Messkampagne wurden erreicht.

Die Mess-Systeme in der Fertigteilbetonstrecke lieferten plausible Ergebnisse. Sowohl die dynamischen, als auch die temperaturbedingten langfristigen Bewegungen wurden erfasst und sind in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt.

Des Weiteren lassen sich folgende Erkenntnisse aus den Daten ableiten:

- Es finden temperaturbedingte Bewegungen in der Fuge statt. Diese verhalten sich erwartungsgemäß so, dass sich bei höherer Temperatur die Platten ausdehnen und die Fugenkammer gestaucht wird.
- Der Ort der Sensorinstrumentierung ist wesentlich für das Messergebnis. Das direkt überrollte Sensorsystem erfasst die größten Bewegungen bei direkter Überrollung mit dem MLS, während das TKS und das andere Sensorsystem kaum Bewegungen detektieren. Dieser Effekt ist bei der Fertigteilbetonstrecke noch stärker ausgeprägt, als bei der Waschbetonstrecke 40.

Folgende lastinduzierte Änderungen der Fugenbewegungen wurden detektiert:

- Bei den ersten Beanspruchungen bewegte sich die Fuge 20 μm in Z-Richtung.
- Nach ca. 11.000 Zyklen wurden Bewegungen von ca. 50 μm gemessen.
- Nach ca. 50.000 Belastungszyklen stagniert der Trend zur Erhöhung der Fugenbewegungen und stabilisiert sich bei ca. 60 μm .

4.5.6 Allgemeines Fazit der dynamischen Beanspruchungskampagnen

Unter den besonderen Bedingungen (steife Bettung der Asphalttragschicht bei niedrigen Umgebungstemperaturen; unbeanspruchte Teststrecke) der ersten Messkampagne auf der Waschbetonstrecke 40 des duraBAST im März konnten mit einem Kleintransporter < 2 t Achslast lediglich geringe Verformungen des Fugenbereichs erzeugt werden, die jedoch aufgrund der Leistungsfähigkeit des Sensorsystems für eine erste Funktionsüberprüfung ausreichend waren.

Bei der zweiten Messkampagne im April (höhere Temperatur der Asphalttragschicht) wurden mit einem Lkw mit einer maximalen Achslast von 12,1 t Bewegungen von bis zu 62 μm in vertikaler Richtung (Z-Richtung) und 42 μm in Fahrtrichtung (X-Richtung) gemessen. Die Größe der Sensoranzeige ist unter anderem beeinflusst durch die Kerbrissausbildung der Fugen, Fahrzeuglast sowie Überrollgeschwindigkeit (siehe Kapitel 4.5.1).

Es ist davon auszugehen, dass unter den realen Bedingungen (Dauerbelastung, schlechtere Lagerungsbedingungen der Betonplatten, Paketreißen, Seitenbeschleunigung durch Kurvenfahrten) im deutschen Bundesautobahnnetz deutlich höhere Verformungen in den betrachteten Deformationsachsen erzeugt werden.

Die Platzierung des Sensorsystems (Mitte der Fahrbahn, in der Rollspur) hat Einfluss auf die Größe des Messwerts. Direkt überrollte Sensorsysteme zeigen stets höhere Messwerte an.

Die relative Bewegung der Fugenflanken ist maßgeblich beeinflusst durch die Qualität der Verdübelung, des Bettungsverhaltens sowie der Ausbildung des Kerbrisses.

4.6 Ergebnisse des Langzeit-Monitorings

Am 17.08.2018 konnte die Mess-Station an die Stromversorgung auf dem duraBAST angeschlossen werden. Im Folgenden sind diese Messdaten dargestellt.

4.6.1 Kontinuierliche Erfassung der Betondeckentemperaturen (Temperatur-Array)

In Bild 220 sind die Messdaten des Temperaturgradienten sowie der Lufttemperatur vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018 abgebildet. Die Übertragung funktioniert und liefert plausible Messdaten. Durch einen längeren Stromausfall am 26.08.2018 (23 Stunden) wurden keine Messdaten ermittelt (siehe Bild 222; Datenlücke am 26.8.2018). Nach 23 Stunden

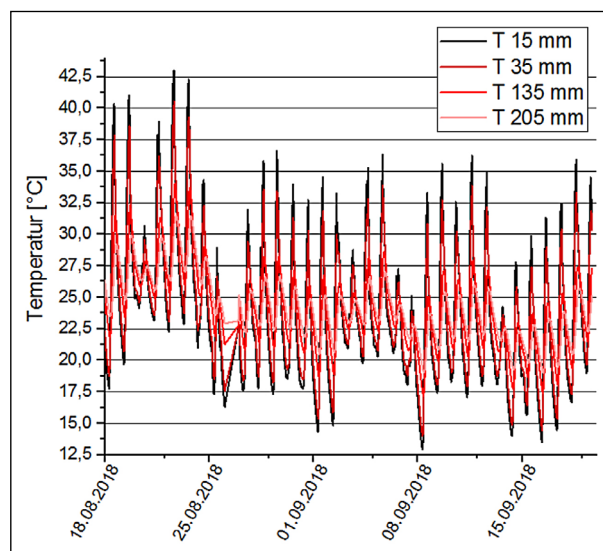


Bild 220: Messdaten des Temperaturgradienten über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018

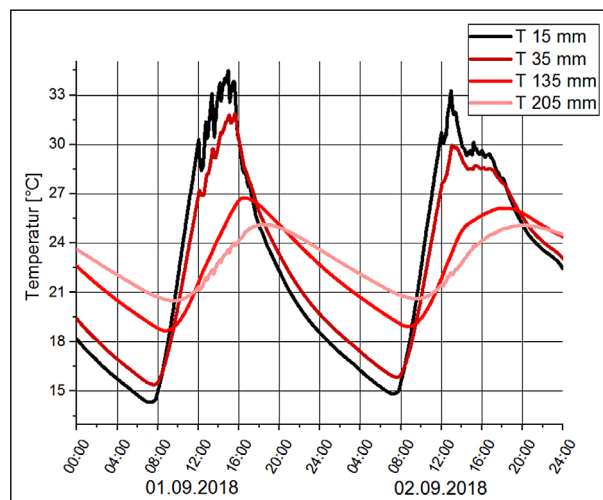


Bild 221: Messdaten des Temperaturgradienten über zwei Tage am 1.9.2018 und 2.9.2018

den (Versorgungsspannung wieder vorhanden) fuhr die Mess-Station automatisch wieder hoch und nahm den Regelbetrieb auf.

In Bild 221 sind die Messdaten des Temperaturarrays sowie die Umgebungstemperatur über zwei Tage dargestellt. Die Temperaturverläufe und Mess-temperaturen in den Tagesdifferenzen sind mit zunehmender Messtiefe im Belag gedämpft und geringer (an der Oberfläche zwischen 14 °C und 34 °C, an der Unterseite zwischen 20 °C bis 25 °C) sowie zeitlich versetzt (140 Minuten).

4.6.2 Kontinuierliche Erfassung des Umgebungsklimas

In Bild 222 sind die Messdaten des Umgebungsklimas vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018 abgebil-

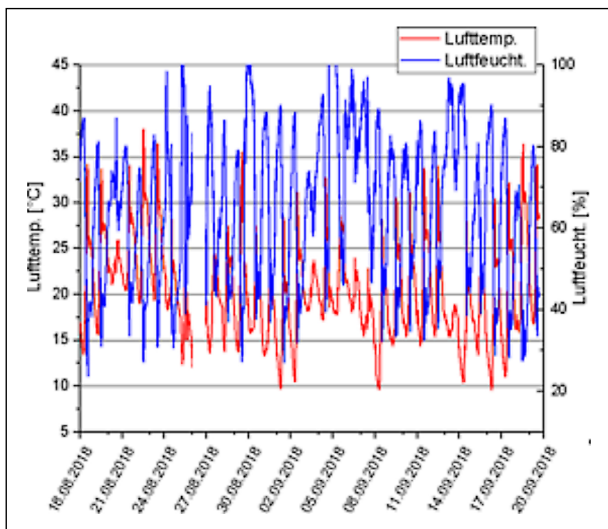


Bild 222: Messdaten des Umgebungsklimas über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018

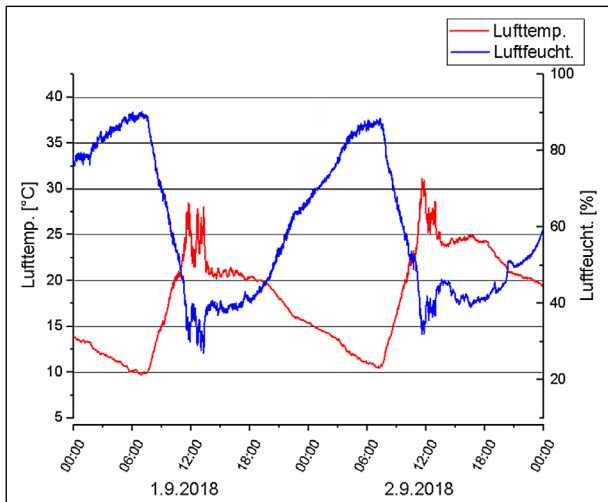


Bild 223: Messdaten des Umgebungsklimas über zwei Tage am 1.9.2018 und 2.9.2018

det. Die Übertragung funktioniert und liefert plausible Messdaten. Durch den längeren Stromausfall am 26.08.2018 (23 Stunden) wurden auch bei der Temperaturerfassung keine Messdaten ermittelt. Nach dem Ende der Spannungsunterbrechung nahm die Mess-Station automatisch den Regelbetrieb wieder auf.

In Bild 223 sind die Messdaten des Umgebungsklimas exemplarisch über zwei Tage dargestellt. Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt erwartungsgemäß mit steigender Temperatur bei gleichbleibender absoluter Feuchte und gegebenem Aggregatzustand.

4.6.3 Kontinuierliche Erfassung der Sensordaten

In Bild 224 sind die Umgebungstemperatur sowie die Relativbewegung der Fugenflanken in X-Rich-

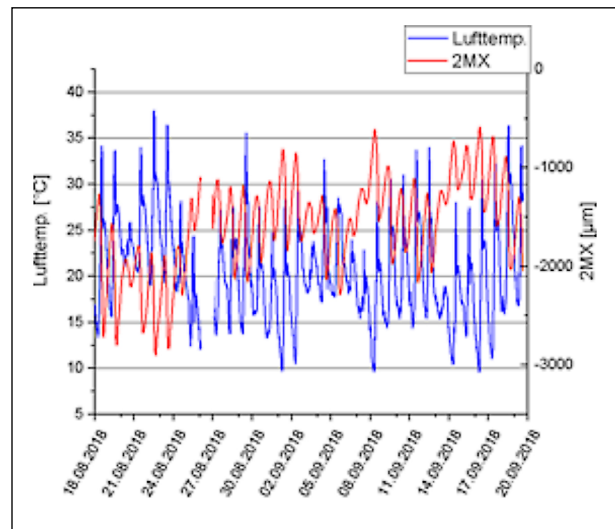


Bild 224: Messdaten der Umgebungstemperatur und der X-Richtung von Sensor 2M über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018

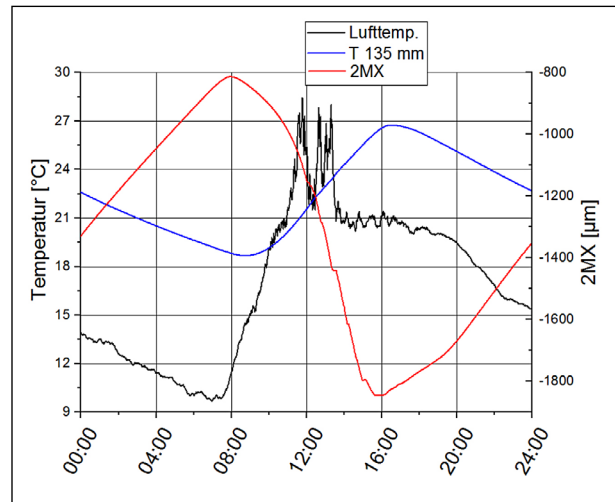


Bild 225: Messdaten der Umgebungstemperatur und der X-Richtung von Sensor 2M am 1.9.2018

tung (Sensor 2M) dargestellt. Bei ansteigender Temperatur (hier in blau dargestellt) dehnen sich die Platten aus, der Plattenabstand verringert sich und die Sensoranzeige in X-Richtung zeigt kleinere Werte an.

In Bild 225 sind die Sensoranzeigen des Sensorsystems 2M sowie die Umgebungstemperatur und die Temperatur in der Betonfahrbahndecke in einer Tiefe von 135 mm abgebildet.

Der Zusammenhang, Ausdehnung der Platten bzw. Verringerung des Fugenabstands bei Erhöhung der Temperatur, ist in Bild 225 zu erkennen und validiert damit auch die Sensorfunktionalität plausibel. Es zeigt sich, dass die Verformung mit der repräsentativen Belagstemperatur, gemessen in 135 mm Tiefe, sehr gut korrespondiert.

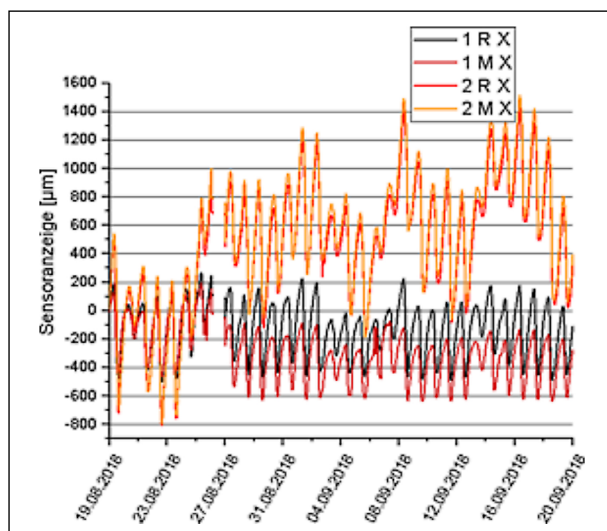


Bild 226: Sensoranzeige in X-Richtung der Sensorsysteme 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018

In Bild 226 sind die Sensoranzeigen aller vier Sensorsysteme in X-Richtung über einen Monat abgebildet. In allen Sensordaten werden die temperaturinduzierten Formänderungen (hier: Tagestemperaturgänge) plausibel erfasst und hoch aufgelöst abgebildet.

Der beschriebene Zusammenhang der Plattendeformation in Abhängigkeit von der Temperatur und dessen hoch aufgelöste Detektion durch alle 4 Sensoren ist besonders eindrücklich in Bild 227 erkennbar (hier: Detaildarstellung eines ausgewählten Tagesganges der vier Sensorsysteme in X-Richtung).

Bild 228 zeigt die gemessenen Plattenverformungen in X-Richtung mit den Ergebnissen der punktuellen Setzdehnungsmessungen an der mit Sensorsystem 2R und 2M instrumentierten Fuge. Die Er-

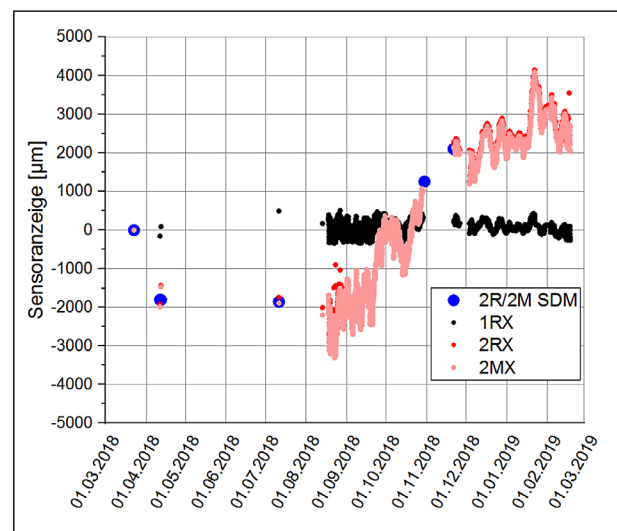


Bild 228: Sensoranzeige in X-Richtung mit validierender Setzdehnungsmessung

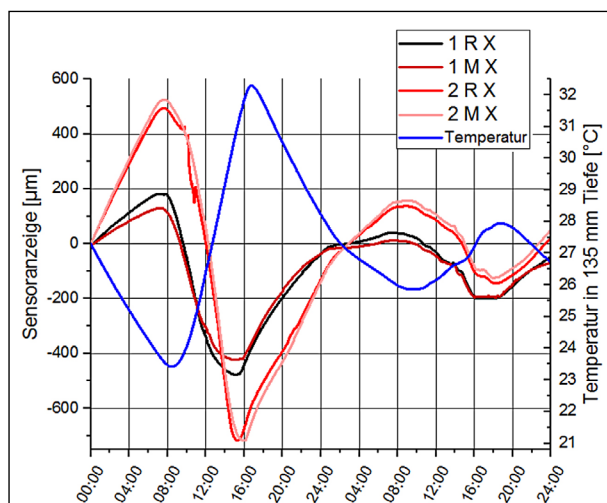


Bild 227: Sensoranzeige in X-Richtung der Sensorsysteme 1R, 1M, 2R und 2M sowie die Temperatur in 135 mm Tiefe vom 19.08. bis zum 21.08.2018

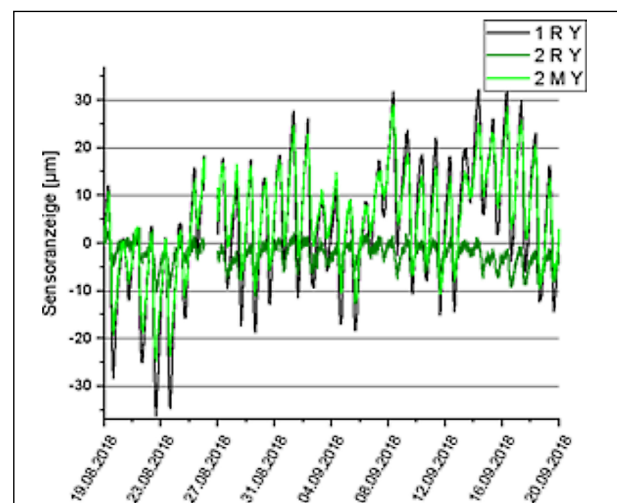


Bild 229: Sensoranzeige in Y-Richtung der Sensorsysteme 1R, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018

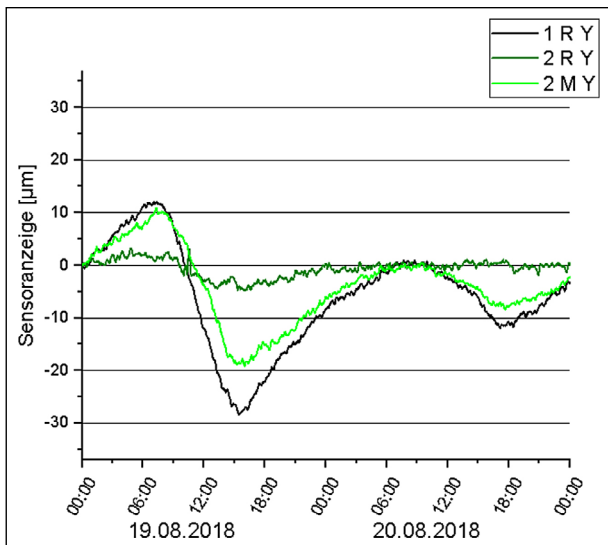


Bild 230: Sensoranzeige in Y-Richtung der Sensorsysteme 1R, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 21.08.2018

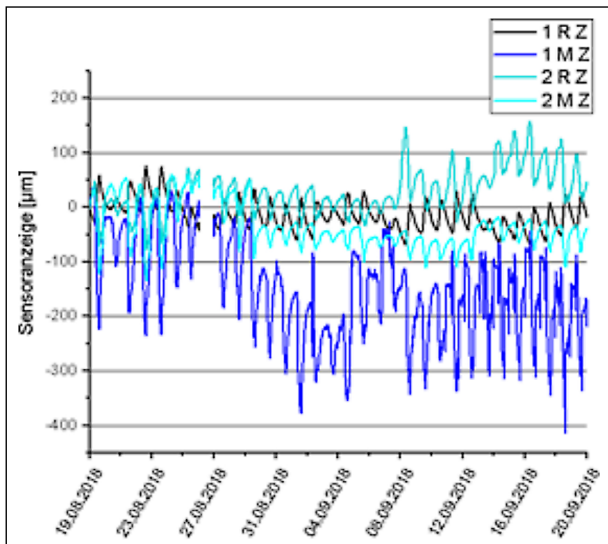


Bild 231: Sensoranzeige in Z-Richtung der Sensorsysteme 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018

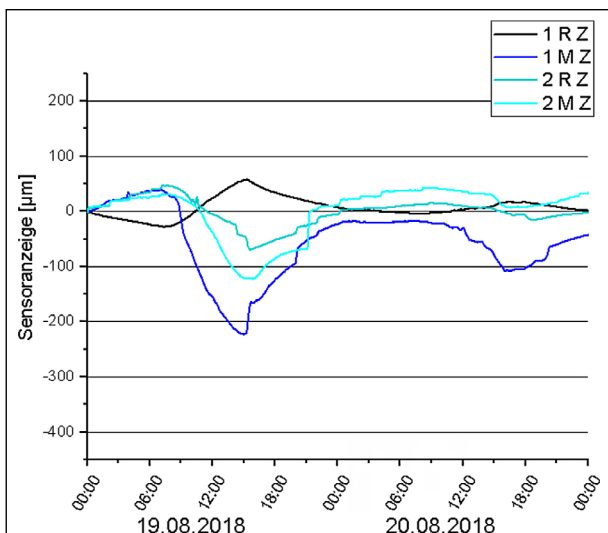


Bild 232: Sensoranzeige in Z-Richtung der Sensorsysteme 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 21.08.2018

gebnisse der Setzdehnungsmessung validieren die gemessenen Fugendehformationen (ab dem 18.08.2018 kontinuierlich gemessen).

In Bild 229 sind die Sensordaten der Sensorsysteme 1R, 2R und 2M in Y-Richtung abgebildet. Das Sensorsystem 1M zeigte in Y-Richtung keine plausiblen Werte mehr an und wurde später zur Überprüfung ausgebaut (siehe Kapitel 4.3.5).

Bild 230 zeigt zur verbesserten Lesbarkeit einen Ausschnitt von Bild 229. Es sind Bewegungen der Y-Achse unter $\pm 30 \mu\text{m}$ messbar, die mit dem Temperaturtagesgang korrelieren.

In Bild 231 sind die Messdaten der vier Sensorsysteme in Z-Richtung dargestellt. Seit der Inbetriebnahme liefern alle vier Sensorsysteme in Z-Richtung plausible Werte.

Bild 232 zeigt die Bewegungen in Z-Richtung der vier Sensorsysteme. Die Bewegungen sind, verglichen mit denen der X-Achse relativ klein. Es ist zu beachten, dass sich die Sensoren 1R und 1M nicht an derselben Fuge befinden (siehe Bild 163).

4.6.4 Fazit zur kontinuierlichen Messung

Der Anschluss an die Stromversorgung und die damit verbundene automatische Übertragung der Messdaten an die BAM wurde am 17.08.2018 realisiert. Seitdem liefert die Datenfernübertragung plausible Werte.

- Temperaturgradient: Es werden Messdaten übermittelt, welche den realen Temperaturgradienten in der Betondecke der Versuchsstrecke kennzeichnen (siehe Bild 221). Der oberste Sensor folgt der Umgebungstemperatur mit einer kleinen Verzögerung. Das heißt, dass mit zunehmender Tiefe neben einer zeitlichen Verschiebung auch eine Dämpfung der Umgebungstemperatur - und damit die Massewirkung des Belagsaufbaus - deutlich erkennbar sind.
- Umgebungsklima: Mit den kontinuierlich aufgezeichneten Umgebungsklimadaten liegen Plausibilitätsgrundlagen zur Beurteilung der Sensordaten vor. Die übermittelten Daten wurden graphisch aufbereitet und erfolgreich auf Plausibilität geprüft.
- X-Achse: Die temperaturbedingte Verformung der Platten bzw. die daraus resultierende Änderung der Fugenbreite wird hochgenau abgebil-

det. Plausibilität ist durch Vergleich der Sensorsysteme untereinander, durch temperaturadäquates Verhalten sowie durch Abgleich mit externen Messsystemen nachgewiesen. Erwartungsgemäß wurden die größten Bewegungen mit Werten bis zu 7500 μm in X-Richtung (siehe Bild 228) gemessen.

- Y-Achse: Die Sensorsysteme messen zuverlässig und hochauflösend. Die Bewegungen sind vergleichsweise klein ($< 30 \mu\text{m}$), durch ihre Korrelation mit der Temperatur jedoch plausibel. Temperaturbedingte Bewegungen in Y-Richtung sind nicht auszuschließen.
- Z-Achse: Die Sensorsysteme messen zuverlässig und hochgenau. Die temperaturinduzierten Bewegungen befinden sich in einem mittleren Bereich von bis zu 300 μm , und korrelieren ebenfalls mit der Temperatur in vertikaler Betonplattenmitte.

4.7 Ergebnisse des zweiten Messzeitraums: 21. September 2018 bis 05. April 2019

Der zweite Messzeitraum (21. September 2018 bis 05. April 2019) der Waschbetonstrecke schließt sich direkt an die Messdatenerfassung der ersten sechs Monate an. Er war lediglich unterbrochen in der Zeit vom 1. bis 16.11.2018, da die Messstation anforderungsgemäß auf einem anderen Messfeld des dura-BAST zum Einsatz kam. Aus diesem Grunde weisen die nachfolgenden Bilder für diesen Zeitraum keine Messwerte für die Waschbeton-Strecke auf.

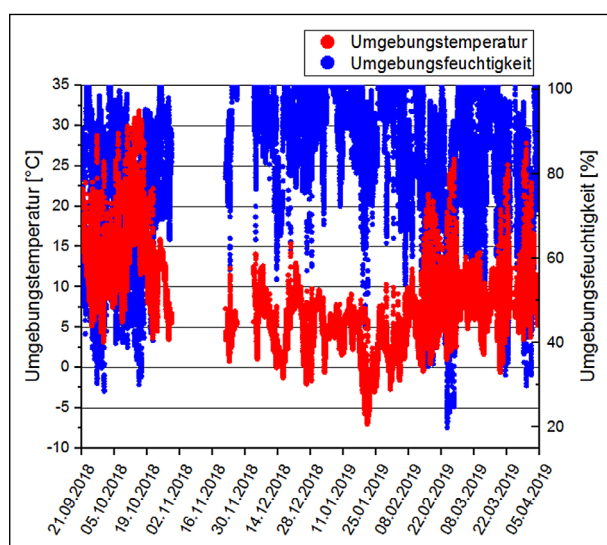


Bild 233: Umgebungs-klima im zweiten Messzeitraum vom 21.09.2018 bis 05.04.2019, Maximaltemperatur: 32 °C am 15.10.2018 um 12:45 Uhr; Minimaltemperatur: -7 °C am 21.01.2019 um 7:20 Uhr

Die weiteren Auswertungen beschränken sich auf die Darstellung der thermisch bedingten Ausdehnung der Betonfahrbahnplatten bzw. relativen Bewegungen der Fugenflanken in X-Richtung, da diese nominal am größten sind.

In Bild 233 sind die klimatischen Randbedingungen über den gesamten zweiten Messzeitraum dokumentiert.

In Bild 234 sind die Temperaturen in den verschiedenen Höhen der Betonfahrbahnplatte über den gesamten zweiten Messzeitraum dargestellt. Es zeigen sich typische tages- und jahreszeitlichen Verläufe sowie die bereits beschriebene Dämpfung in Abhängigkeit von der Einbautiefe (siehe auch Bild 299).

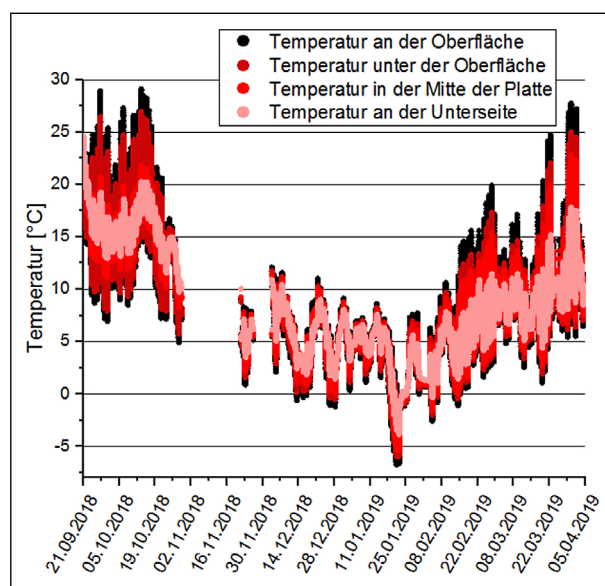


Bild 234: Betontemperaturen im zweiten Messzeitraum vom 21.09.2018 bis 05.04.2019

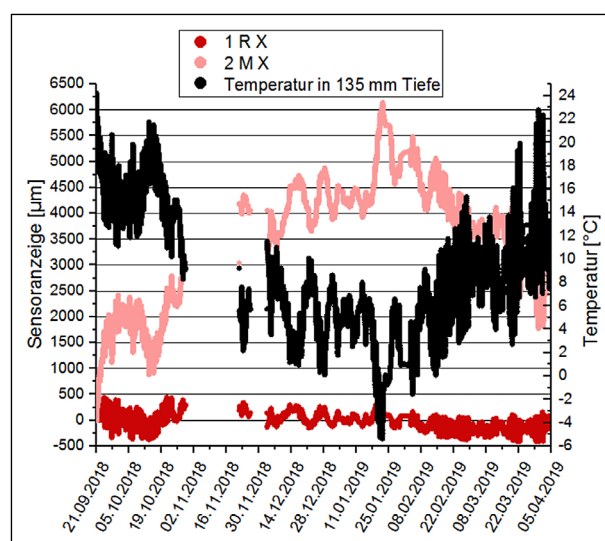


Bild 235: Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte über den gesamten Messzeitraum 2



Bild 236: Fuge zwischen Platte 7 und 8 im März 2018; mit 0,25 mm nur geringe Ausbildung des Kerbrisses



Bild 237: Fuge zwischen Platte 9 und 10 im März 2018; mit 3,0 mm Ausbildung des Kerbrisses

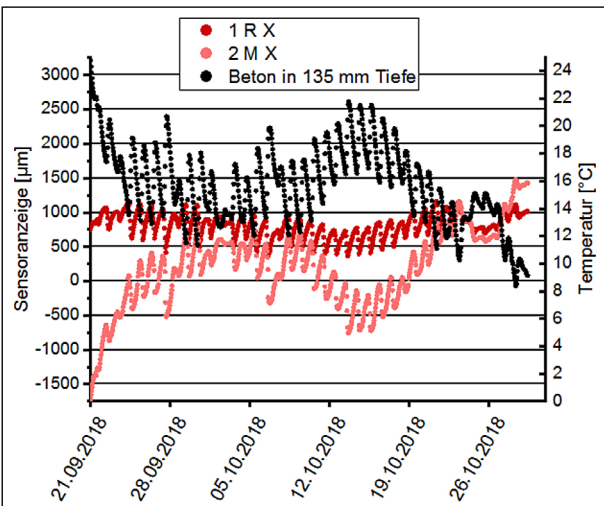


Bild 238: Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte bis zur Unterbrechung der Datenaufzeichnung am 29.10.2018

In Bild 235 sind die Relativbewegungen der Fugenflanken in Fahrtrichtung dargestellt sowie die Betontemperatur in der Mitte der Platte, über den gesamten zweiten Messzeitraum. Die Daten sind im Tagesgang und im Jahreszeitverlauf plausibel. Fugen mit stärker ausgeprägtem Kerbriss (Sensorsystem 2M bzw. die Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten 9 und 10) weisen dabei größere Bewegungen auf, als Fugen mit vergleichsweise kleinem Kerbriss (Sensorsystem 1R bzw. die Fuge zwischen den Betonfahrbahnplatten 7 und 8).

In Bild 238 sind die Relativbewegungen der Fugenflanken in Fahrtrichtung bis zur ersten planmäßigen Unterbrechung des Datensatzes dargestellt.

Um den Zusammenhang zwischen Betontemperatur und Plattenabstand bei allen drei verbliebenen Sensorsystemen klarer erkennen zu können sind die Messdaten im nächsten vorhandenen Messabschnitt zwischen 21.12. und 26.12.2018 in Bild 239, Bild 240 und Bild 241 einzeln dargestellt. Die qualitativen Kurvenverläufe gleichen sich, quantitative Unterschiede sind auf die verschiedenen Kerbrissausbildungen zurückzuführen (1R X: 260 µm; 2R X: 355 µm; 2M X: 360 µm). Im Gegensatz dazu befinden sich 2R und 2M in der gleichen Fuge, zeigen auch quantitativ den gleichen Verlauf und validieren sich damit gegenseitig.

In Bild 242 ist das Ende des zweiten Messzeitraum seit dem 04.12.2018 dargestellt. Auch hier ist der Zusammenhang zwischen Betonmittentemperatur und Plattenverformung ersichtlich.

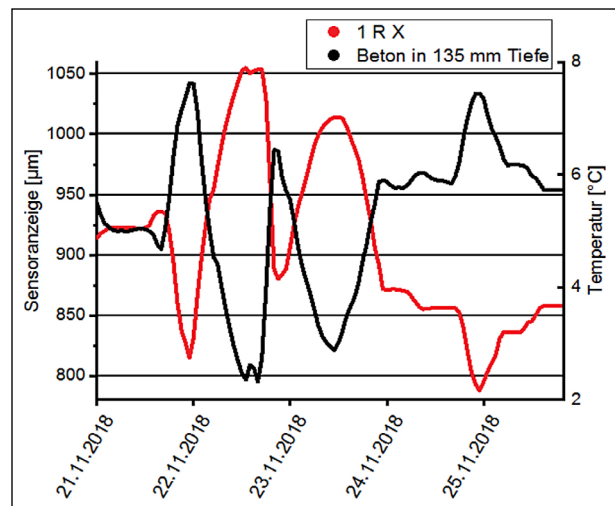


Bild 239: Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahnplatte

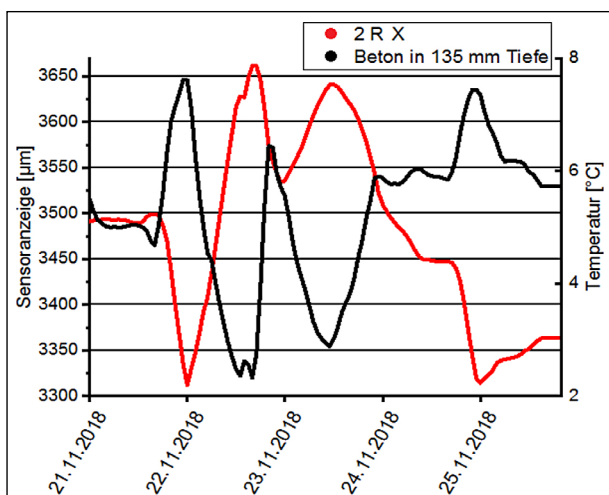


Bild 240: Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahndecke

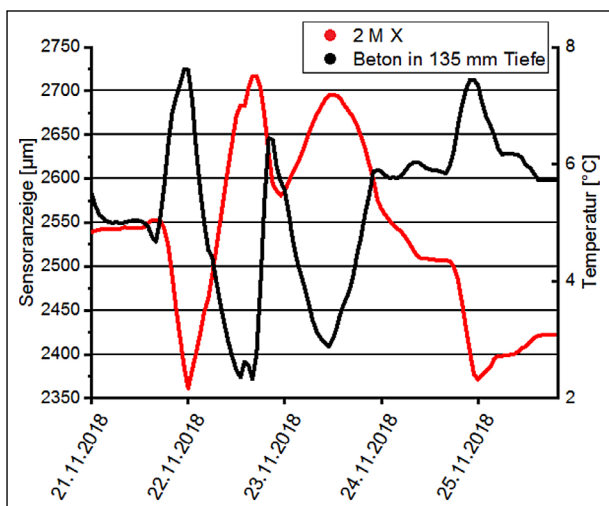


Bild 241: Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahndecke

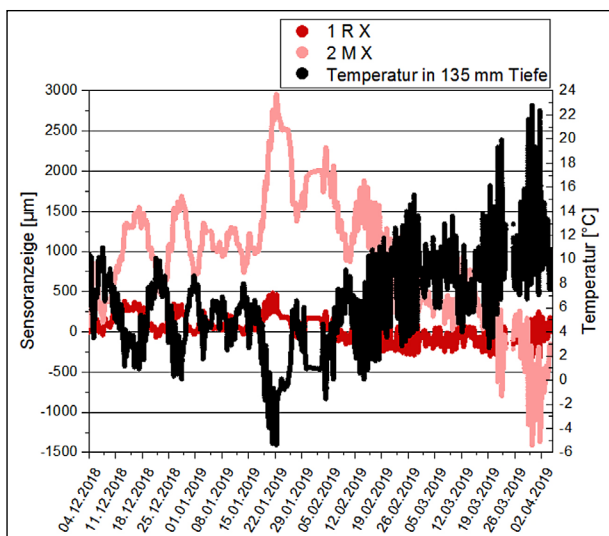


Bild 242: Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte seit der permanenten Datenübertragung am 04.12.2018 bis zum 05.04.2019

Um den Zusammenhang zwischen Betontemperatur und Plattenverformung zu verdeutlichen, sind die Messdaten des Sensorsystems 2M nochmals in Bild 243 einzeln dargestellt.

Neben den Messungen der Betonfahrbahnstrecke 40 auf dem Testgelände duraBast wurde im November eine MLS-Beanspruchungskampagne auf einer Fertigteilbetonstrecke zwischenzeitlich messtechnisch begleitet. Dazu musste der Steuerstrahl zur Aktivierung der zwei Sensorsysteme in diesem Fertigteilbeton-Versuchsabschnitt verlegt werden. Aus diesem Grunde erfolgte eine Unterbrechung der Messungen im Waschbeton-Abschnitt des duraBast.

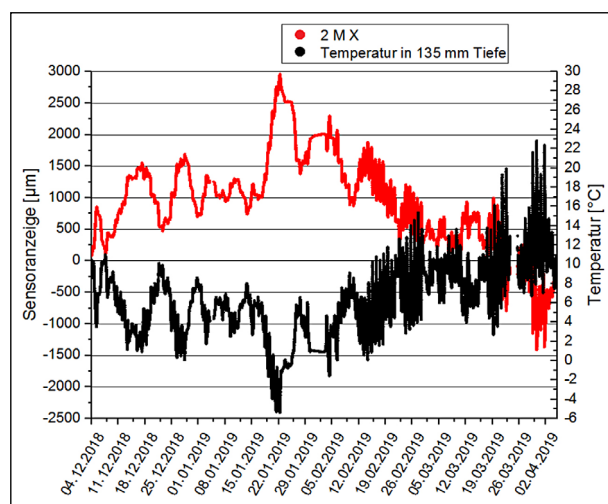


Bild 243: Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte seit der permanenten Datenübertragung am 04.12.2018, vergleichende Darstellung

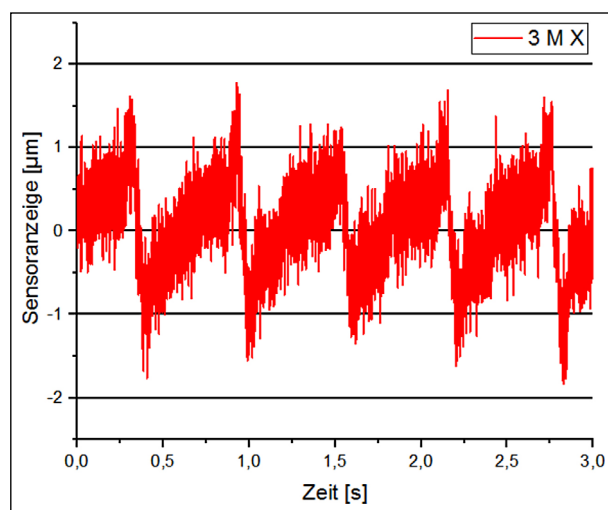


Bild 244: Fugenbewegungen bei Beanspruchung mit dem MLS drei Fugen von der instrumentierten Fuge entfernt

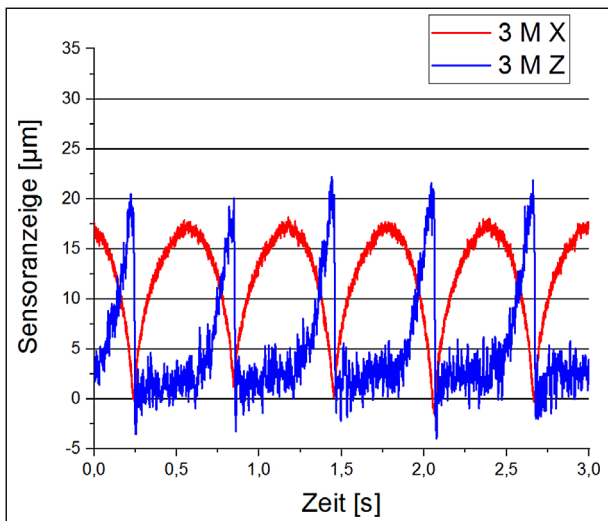


Bild 245: Fugenbewegungen bei Beginn der Beanspruchungskampagne (nach 200.000 Beanspruchungszyklen) mit dem MLS; 06.11.2018 um 10 Uhr

Bemerkenswert ist, dass selbst bei einer Beanspruchung einer zwei Fahrbahnplatten entfernten Fuge kleine Relativbewegungen der Fugenflanken detektiert werden konnten (siehe Bild 244).

Zu Beginn der Belastungskampagne (nach 200.000 Belastungszyklen) zeigten sich kleinere Bewegungen von 16 µm in X-Richtung (Fahrtrichtung) und 19 µm in Z-Richtung (siehe Bild 245). Nach 250.000 Belastungszyklen nahm die Differenz in X-Richtung ab (3 µm) und in Z-Richtung zu (35 µm) (siehe Bild 246).

Der erste Tag der Messkampagne wurde nach 250.000 Beanspruchungszyklen beendet. Die Deformationsverläufe nach zwölfstündiger Ruhephase (Nacht) sind in Bild 247 und Bild 248 dargestellt. Analog zum ersten Tag wurde ein Zuwachs der Be-

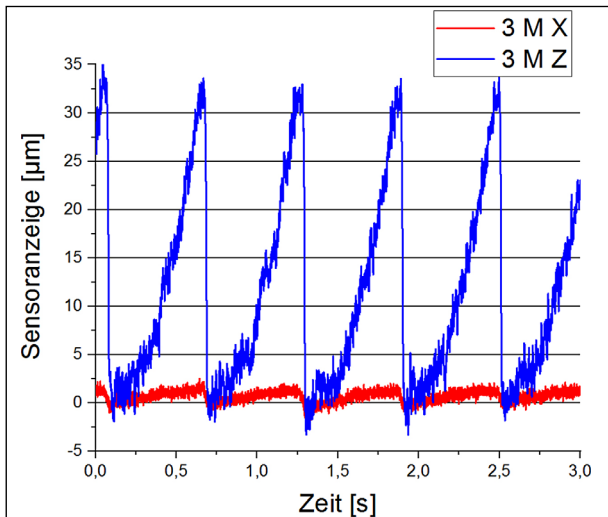


Bild 246: Fugenbewegungen nach insgesamt 250.000 Beanspruchungszyklen mit dem MLS; 06.11.2018 um 17 Uhr

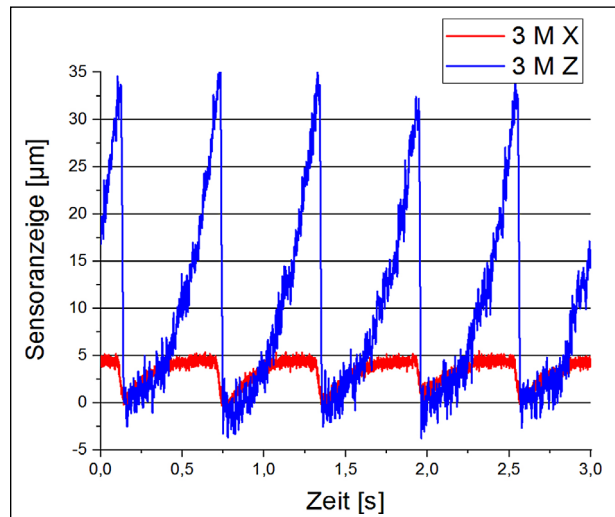


Bild 248: Fugenbewegungen nach erneuten 75.000 Beanspruchungszyklen (nach insgesamt 275.000 Beanspruchungszyklen) mit dem MLS; 06.11.2018 um 13 Uhr mittags

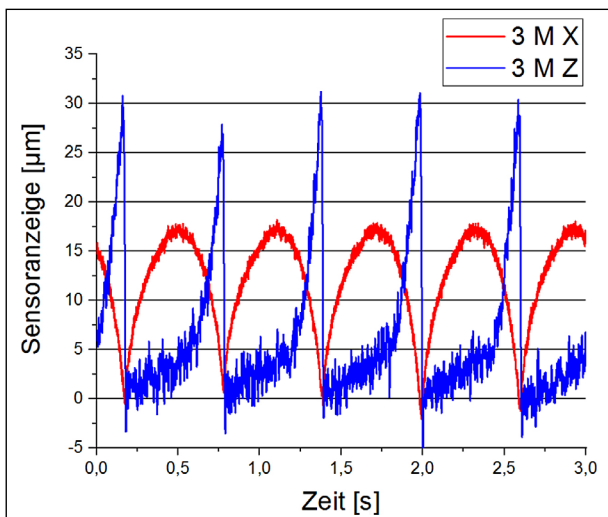


Bild 247: Fugenbewegungen nach insgesamt 251.000 Beanspruchungszyklen mit dem MLS; 07.11.2018 um 10 Uhr morgens

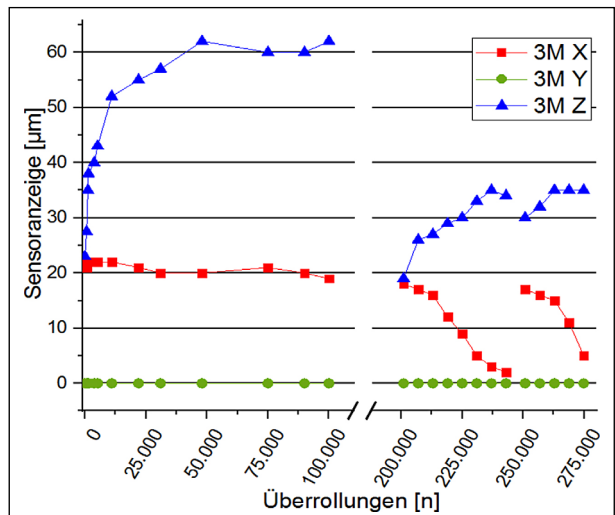


Bild 249: Dynamische Bewegungen; Peak to Peak in Abhängigkeit der Überrollungen

wegungen in Z-Richtung und eine Abnahme in X-Richtung gemessen.

Allgemein sind die gemessenen Deformationen der MLS-Belastungen im November kleiner als im August. Dies kann mit den jahreszeitlich tieferen Umgebungstemperaturen und einer damit einhergehenden steiferen Bettung zusammenhängen.

Fazit:

Die aufgenommenen Daten zeigen orts-, aufbau- und belastungsspezifische Messwertverläufe (Teststrecke duraBAST), die Hinweise darauf geben, dass sich der Zeit-Deformations-Verlauf dynamisch induzierter Deformationen näherungsweise mit einer angepassten Sinus- bzw. Sägezahn-Funktion nachbilden lässt. Die Sinnhaftigkeit einer mechanischen Ersatzfunktion zur Nachstellung verkehrsinduzierter Formänderungen im Fugenbereich ist im Ergebnis einer zukünftigen Messkampagne im realen Feld in Verbindung mit labortechnischen Validierungsprüfungen nachzuweisen. In jedem Fall bedarf es für weitere Aussagen einer breiteren repräsentativen Datenlage.

4.8 Zusammenfassende Darstellung des Monitorings über den gesamten Erprobungszeitraum der Waschbetonstrecke 40

Nachfolgend sind die Messdaten der gesamten Erprobungskampagne zusammenfassend dargestellt. Der Erprobungszeitraum beginnt am 23. März 2018

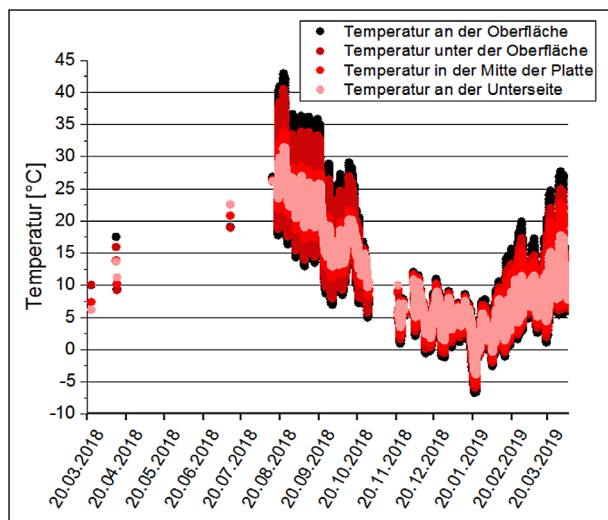


Bild 250: Temperaturen über den vertikalen Querschnitt der Betonplatte 8 auf dem Waschbetonabschnitt 40 der duraBAST; Maximaltemperatur: 43 °C am 22.08.2018 um 15:15 Uhr; Minimaltemperatur: -7 °C am 21.01.2019 um 8:29 Uhr

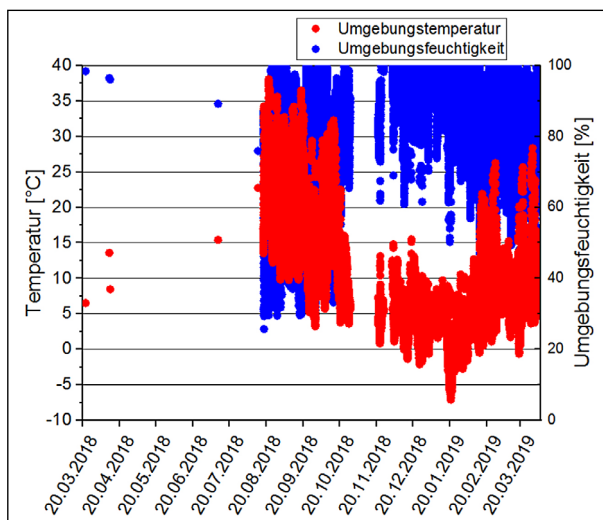


Bild 251: Umgebungsklima auf der duraBAST, Maximaltemperatur: 38 °C am 22.08.2018 um 12:45 Uhr; Minimaltemperatur: -7 °C am 21.01.2019 um 7:20 Uhr

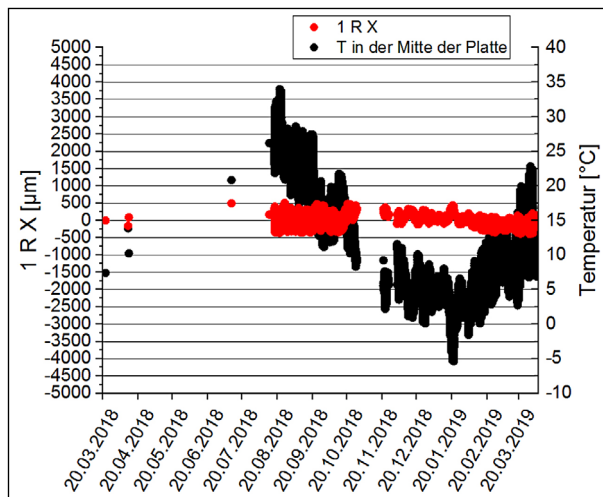


Bild 252: Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

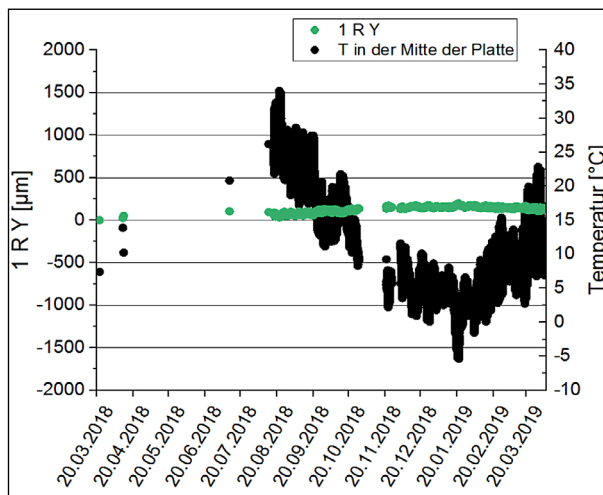


Bild 253: Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

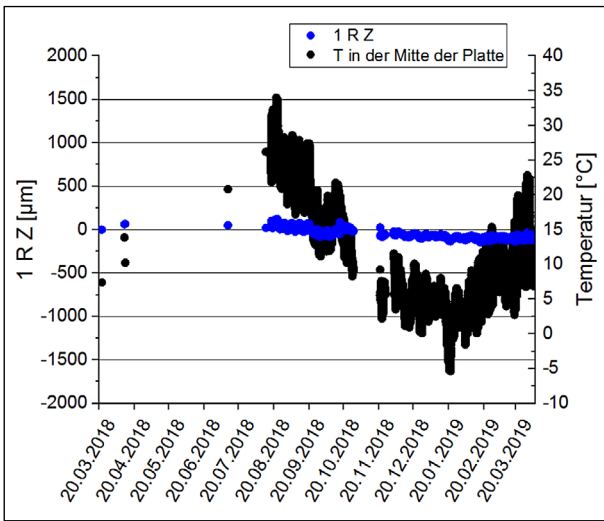


Bild 254: Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

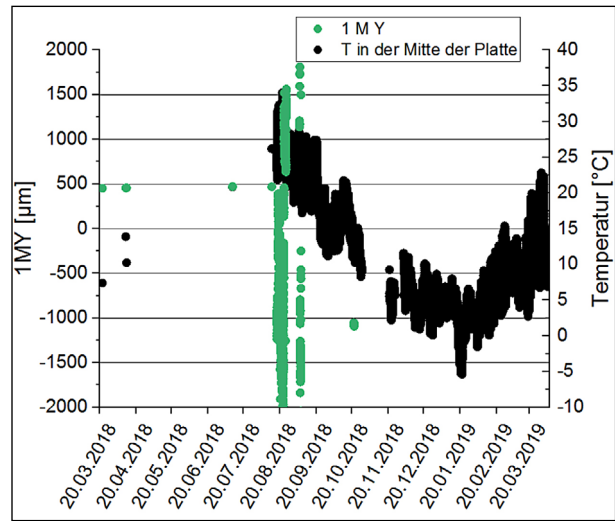


Bild 256: Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw. des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

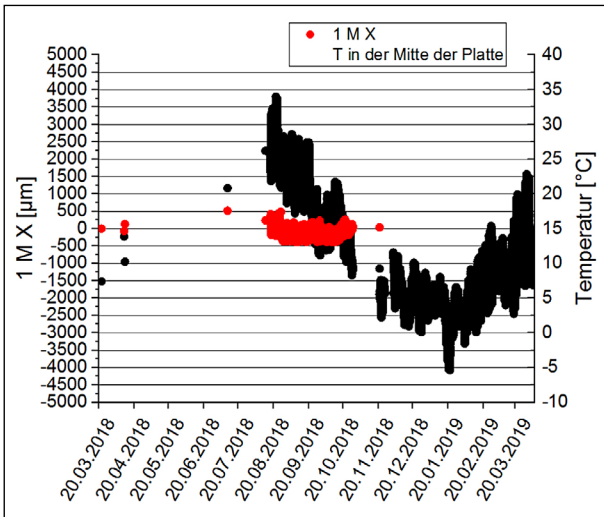


Bild 255: Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw. des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

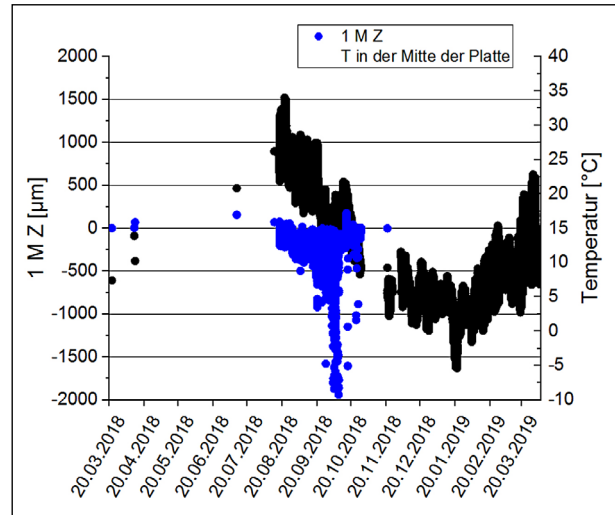


Bild 257: Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw. des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

und endet planmäßig am 05. April 2019. Das Aussagevermögen der Messdaten ist durch die Skalierung der Messwertdarstellung maßgeblich beeinflusst. Dem entsprechend kann die nachfolgende Darstellung lediglich einen zusammenfassenden Überblick liefern. Die gezielte Auswertung und Interpretation ist bereits in den vorhergehenden Abschnitten erfolgt (siehe beispielsweise Bild 220 und Bild 221 oder Bild 205 und Bild 206). Im Folgenden sind dennoch aus Gründen der Vollständigkeit und zur Detektion besonders interessierender Bereiche sämtliche Messdaten über den gesamten Erprobungszeitraum dargestellt.

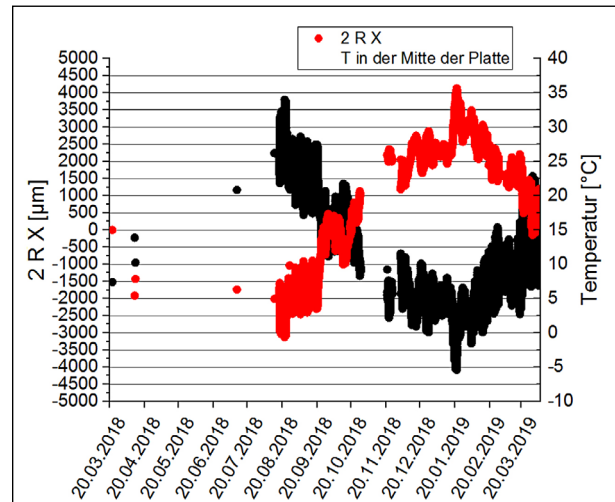


Bild 258: Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

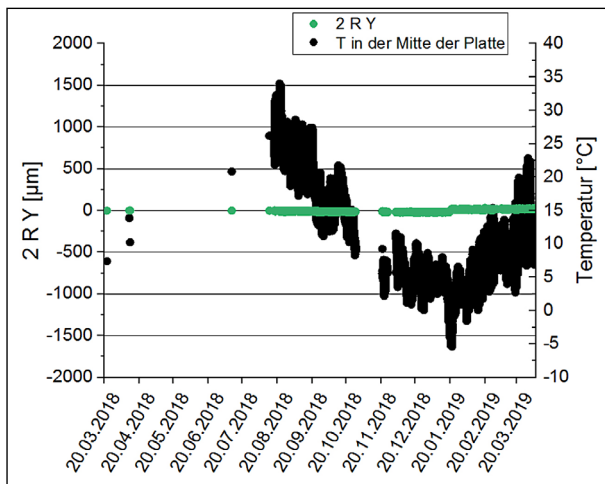


Bild 259: Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

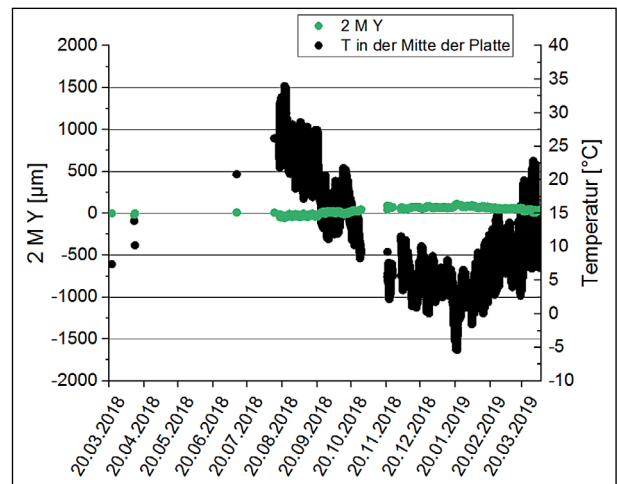


Bild 262: Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

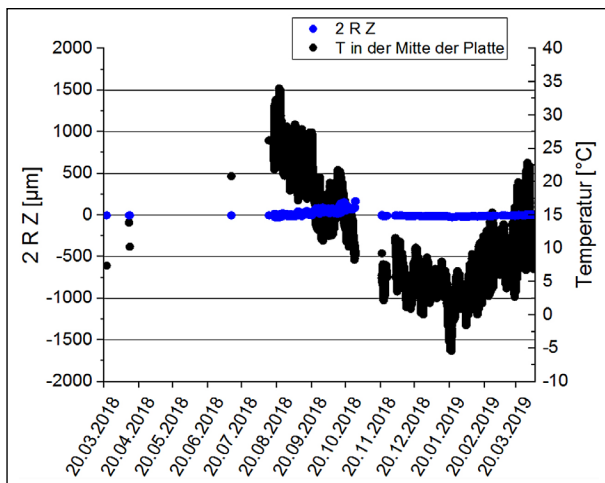


Bild 260: Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

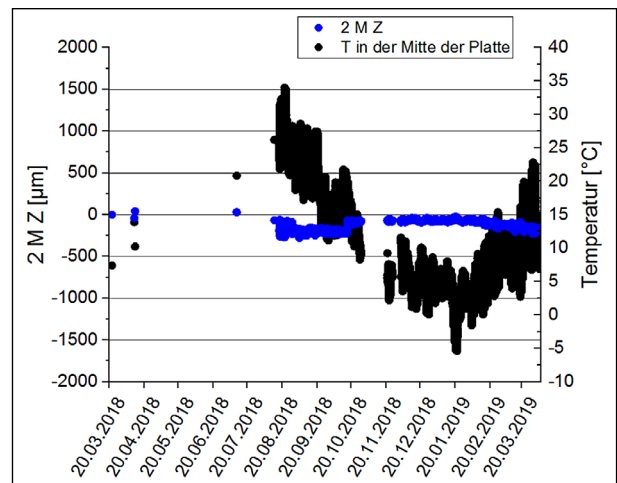


Bild 263: Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

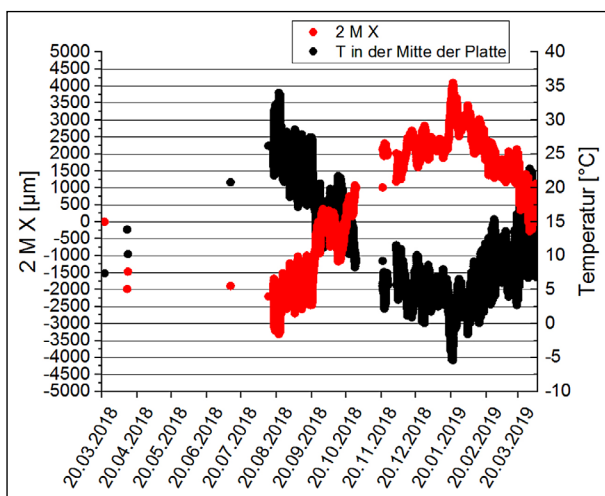


Bild 261: Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8

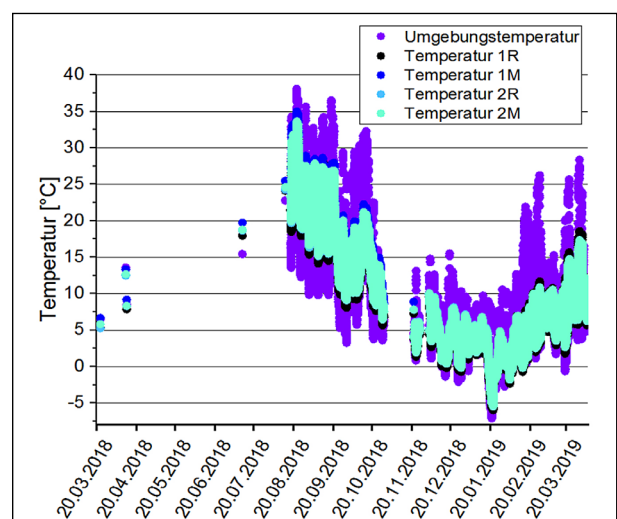


Bild 264: Temperaturen im Inneren der Sensorsysteme und Umgebungs-temperatur

Die Messdaten des Sensorsystems 1M sind aus Gründen der Vollständigkeit ebenfalls dargestellt, da dieses Sensorsystem bereits beim Start der Dauermessungen am 18.08. Ausfallerscheinungen der Y-Achse zeigte und diese sich anteilig auch in den anderen beiden Achsen niederschlägt, sind diese Messwerte nicht für den weiteren Gebrauch gedacht.

5 Konzeptionserstellung für eine zukünftige Datenerhebung im BAB-Netz

Um eine möglichst vollständige Datenlage der Beanspruchungsfunktionen von Fugenfüllsystemen in Betonautobahnen zu erhalten, wurden mehrere Parameter zur Auswahl repräsentativer Fahrbahnabschnitte untersucht und dargestellt:

- Einteilung des BAB-Netzes in Beton- und Asphaltautobahnen
Nur erstere sind Ziel dieser Untersuchungen.
- Untersuchung der Verkehrsbeanspruchungen mit Unterscheidung von Personenverkehr und Schwerlastverkehr
Es sollen hoch beanspruchte Streckenabschnitte ausgewählt werden, da diese auch schneller altern.
- Erfassung der verschiedenen klimatischen Beanspruchungen
Bei einer Auswahl verschiedener Standorte sollten alle Extremwetterbedingungen (sehr trocken und sehr feucht, sehr warm und sehr kalt, hohe Temperaturschwankungen und hohe Globalstrahlung) abgedeckt sein.
- Beachtung der Variation der Bauweise bzw. des konstruktiven Aufbaus
Nach Möglichkeit sollten die Abschnitte alle derzeit üblichen Bauweisen beinhalten.

5.1 Analyse und Kategorisierung des BAB-Netzes nach relevanten Beanspruchungen

Das bundesdeutsche Fernstraßennetz umfasst derzeit etwa eine Länge von 12993 km BAB und 38303 km Bundesfernstraßen [5.1].

Der Anteil an Betonfahrbahndecken im Netz wird aktuell zu etwa 28 % abgeschätzt [5.2]. Eine Übersichtsdarstellung zur anteiligen Verteilung (Stand 2014) liefert Bild 266.

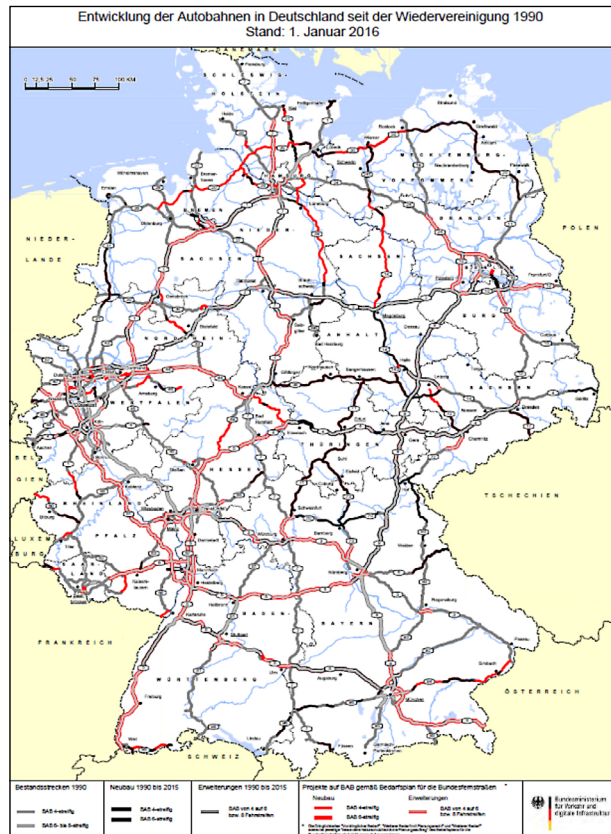


Bild 265: Autobahnnetz Stand 2016 [5.4]

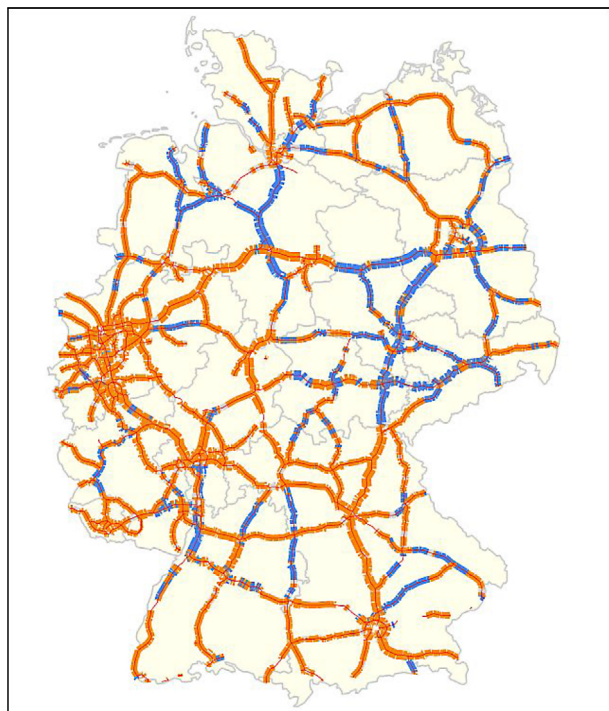


Bild 266: Anteilige Verteilung von Betondecken im BAB-Netz [5.11] (blaue – Betonfahrbahndecke; orange – Asphaltfahrbahndecke)

Demnach ergibt sich aus den Anteilen der grafischen Verteilungsdarstellung der Bild 266 ein signifikanter Anteil an Fahrbahndecken in Betonbauweise in den nachfolgend aufgeführten Bundesländern, wobei ausgeprägte Streckenabschnitte in Beton-

Bundesland	signifikante Abschnitte in Betonbauweise im Bereich der BAB	Länge Fahrbahndecke in Betonbauweise insgesamt etwa in [km]
Sachsen-Anhalt (ST)	A 2	ca. 360 km
	A 14	
	A 9	
	A 38	
Niedersachsen (NI)	A 7	ca. 430 km
	A 27	
	A 29	
Thüringen (TH)	A 1	ca. 260 km
	A 9	
	A 4	
Brandenburg (BB)	A 71	ca. 400 km
	A 9	
	A 10	
	A 11	
	A 12	
	A 13	
Sachsen (SN)	A 15	ca. 320 km
	A 2	
	A 4	
	A 13	
Sachsen (SN)	A 14	ca. 320 km
	A 17	
	A 72	
	A 4	
Bayern (BY)	A 92	ca. 500 km
	A 93	
	A 71	
	A 3	
	A 81	
Baden-Württemberg (BW)	A 5	
Rheinland-Pfalz (RP)	A 48	
Nordrhein-Westfalen (NW)	A 44	ca. 180 km
	A 31	
Schleswig-Holstein (SH)	A 1	ca. 190 km
	A 23	
	A 24	
Mecklenburg-Vorpommern (MV)	A 19	

Tab. 64: Bereiche in BAB mit signifikanten Abschnitten in Betondeckenbauweise (Auswertung der BAM auf der Grundlage von [5.11], [5.12] und [5.13])

bauweise in Bereichen von BAB gemäß Tabelle 64 vorliegen.

Unter Berücksichtigung der Verkehrs- und Achslastentwicklung - derzeit im Mittel mit einem DTV von etwa 48 800 Kfz/24 h bei einem SV-Anteil von etwa 14,9 % auf den deutschen Autobahnen quantifiziert [5.3, 5.8] - aber auch entsprechend den aktuellen Erhaltungs-Ausgaben von jährlich etwa 1,93 Mrd. € im Bundesfernstraßennetz [5.3] hat die Betondeckenbauweise und deren Weiterentwicklung zur nachhaltigen Sicherstellung der Verfügbarkeit unserer Verkehrsinfrastruktur besondere Bedeutung.

Essenzielle Grundlage einer konstruktiven und materialtechnischen Optimierung bzw. Weiterentwicklung von Fugenfüllsystemen ist eine Datenlage, die repräsentativ für die maßgebenden Randbedingungen des BAB-Netzes (Bild 265) die Beanspruchungen und Gebrauchsbedingungen für Fugenfüllsysteme in Deutschland widerspiegelt.

Im Rahmen dieses Projektes sind deshalb auch Überlegungen zur Ableitung einer Vorgehenskonzeption mit dem Ziel anzustellen, die derzeit breit streuenden Vorstellungen über die in der Realität auftretenden mechanischen und klimatischen Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen erstmals in einer repräsentativen Datensammlung zu erfassen und für den gegenwärtigen Stand der Technik objektiv darzustellen. Diese Vorgehensweise stellt die konsequente Weiterentwicklung der in den 90er Jahren begonnenen (damals überwiegend empirischen) Ansätze für eine bemessungsorientierte Dimensionierung von Fugen und Fugenfüllsystemen (siehe hierzu ZTV Fug StB 01, Tabelle 1 [1.8]) dar.

Unter Beachtung von Ergebnissen früherer Forschungsaufträge [5.5] (siehe Bild 267) sind zur Sicherstellung der erforderlichen Repräsentativität Informationen mindestens bezüglich der nachfolgend aufgeführten Einsatzbedingungen bzw. Gebrauchs-

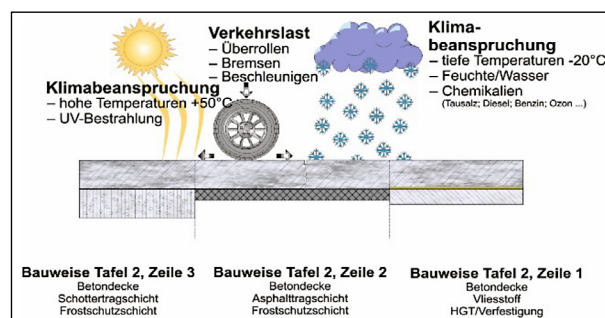


Bild 267: Maßgebende Einwirkungen auf Fugen in Betonfahrbahndecken nach [5.5]

kategorien und deren möglicher Variationen bei der Vorauswahl potenzieller Messstrecken im Rahmen einer Konzeptionserstellung zu berücksichtigen. Dazu kommen weitere erforderliche Informationen zu begleitenden Parametern, die im Rahmen der Messkampagne die spezifischen Bedingungen des realen Messortes definieren und bei der späteren Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Es ergeben sich folgende Auswahlkriterien:

- Verkehrsbeanspruchung
 - DTV_{Kfz} pro 24 h
 - Anteil SV pro 24 h
- Klimabeanspruchung
 - Temperaturspanne (Höchsttemperatur; Tiefsttemperatur)
 - Luftfeuchtigkeit
 - Frosteinwirkungszone
 - Niederschlagsmenge
 - UV-Energieeintrag
- Variation der Bauweise bzw. des konstruktiven Aufbaus gemäß [5.6]
 - Schichtenaufbau Oberbau; ggf. Auflagerungsbedingungen (Unterlage)
 - Plattenabmessungen
 - Variationen des Oberflächenprofils (z. B. Verkrümmung; Aufwölbung)

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes werden folgende Instrumente zur Konzeptionierung eines Messprogrammese und der dazu erforderlichen örtlichen Vorauswahl/Messortauswahl herangezogen:

- Datenmaterial und verkehrsstatistische Informationen des BMVI, der BASt und anderer Quellen
- Wetterstatistische Informationen des Deutschen Wetterdienstes
- Informationen aus einer Kurzabfrage der BAM an repräsentative Autobahnverwaltungen der Bundesländer

Diese werden für jeden ausgewählten Messort spezifisch durch in situ ermittelte Begleitinformationen ergänzt.

5.1.1 Auswahlkriterium Verkehrsbeanspruchung

Aus der Verkehrsbeanspruchung ist die Ausprägung folgender maßgeblicher Einflüsse auf das Gebrauchsverhalten der derzeit angewendeten Fugenfüllsysteme und Fugenfüllstoffe zu berücksichtigen:

- Dynamische Verformungen der Betondecke (Platte) infolge überrollenden Verkehrs (SV)
- Wirkung: hochfrequente wechselnde Verbundbeanspruchung
- Wirkung: Ermüdungsbeanspruchung

Zur Absicherung des Informationsbedarfes hinsichtlich der Quantifizierung der Verkehrsbeanspruchung zur Auswahl möglicher Messorte bieten sich zunächst für eine Vorauswahl relevanter Bereiche mit hohen und sehr hohen Verkehrsbeanspruchungen die Auswertung der aktuellen Verkehrsmengenkar-

SVZ 2015 Autobahnen	Netzlänge am 1.07.2015 [km]	Fahrleistung [Mio.-Kfz*km]	DTV [Kfz/24h]	SV-Anteil [%]
Baden-Württemberg	1.054	24.364,5	63.332	14,5%
Bayern	2.515	45.818,7	49.913	15,2%
Berlin	77	2.378,4	84.627	5,1%
Brandenburg	800	11.575,5	39.667	16,8%
Bremen	80	1.600,2	54.801	10,8%
Hamburg	81	2.400,9	81.208	11,8%
Hessen	988	23.553,0	65.346	13,6%
Mecklenburg-Vorpommern	561	4.285,0	20.926	11,5%
Niedersachsen	1.444	25.970,7	49.275	16,4%
Nordrhein-Westfalen	2.219	49.700,1	61.377	13,0%
Rheinland-Pfalz	877	12.857,6	40.167	15,5%
Saarland	240	2.876,2	32.833	10,5%
Sachsen	567	9.045,2	43.719	17,7%
Sachsen-Anhalt	416	6.806,0	44.823	22,0%
Schleswig-Holstein	538	7.823,0	39.838	11,1%
Thüringen	516	6.550,4	34.813	18,2%
Bundesgebiet	12.971	237.605,3	50.187	14,7%

Tab. 65: Durchschnittliche Verkehrsbeanspruchung des BAB-Netzes nach [5.12]

ten der BASt (Verkehrszählung BISStra) an. Gemäß [5.12] ergibt sich aus einer allgemeinen Auswertung der Verkehrszählung 2015 folgende durchschnittliche Verkehrsbeanspruchung über die 16 Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland (Tabelle 65).

Lässt man die Stadtstaaten aufgrund der dort geltenden spezifischen Verkehrsbedingungen außen vor, treten die höchsten flächig verteilten Verkehrsbeanspruchungen auf in den Bundesländern

- Sachsen-Anhalt,
- Baden-Württemberg,
- Hessen,
- Niedersachsen,
- Nordrhein-Westfalen,
- Sachsen,
- Bayern,
- Brandenburg und
- Thüringen.

Einen grafischen Überblick über die Autobahnen mit den höchsten Verkehrsbeanspruchungen (DTV) bzw. SV-Anteilen (Stand: 2015) liefern Bild 268 und 269.

Eine weitere Aufschlüsselung der Verkehrsbeanspruchung kann aus den Ergebnissen der 929 automatischen Zählstellen im Bundesautobahnnetz [5.7] abgeleitet werden (Bild 270).

Wertet man die Ergebnisse der Verkehrszählung 2015 unter Berücksichtigung der anteiligen Verteilung von Betondecken im BAB-Netz gemäß [5.11] (siehe auch Bild 266) auf der Grundlage der in diesen Autobahnabschnitten mit Betondecke angeordneten Zählstellen aus, so ergibt sich folgende mittlere Verteilung/Spannweite der Verkehrsbeanspruchung in signifikanten BAB-Bereichen mit Betonfahrbahndecken (Tabelle 66).

Die Bundesautobahnen in Betonbauweise mit den höchsten Verkehrsbeanspruchungen sind grau unterlegt. Wertet man in einer weiterführenden Analyse die entsprechenden Verkehrsdaten [5.11] für die ausgewählten Abschnitte detaillierter aus, lassen sich potenzielle Messbereiche weiter eingrenzen. Unter Ausschluss von unpraktikablen lokalen Bedingungen (z. B. Bereichen innerhalb von Autobahnkreuzen etc.) lassen sich unter dem Auswahlkriterium „Verkehrsbeanspruchung“ folgende Bereiche für mögliche Messorte extrahieren (Tabelle 67).

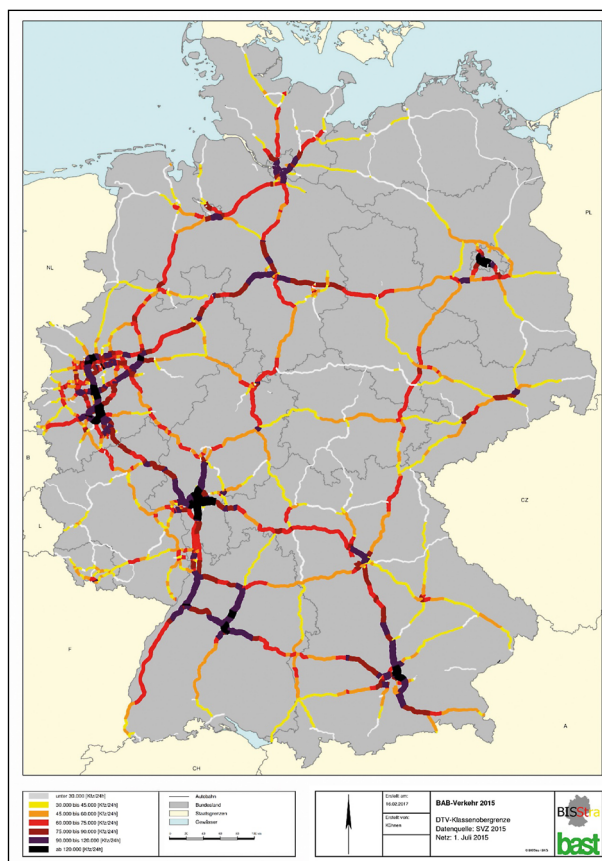


Bild 268: Verkehrsverteilung DTV im BAB-Netz gemäß [5.10]

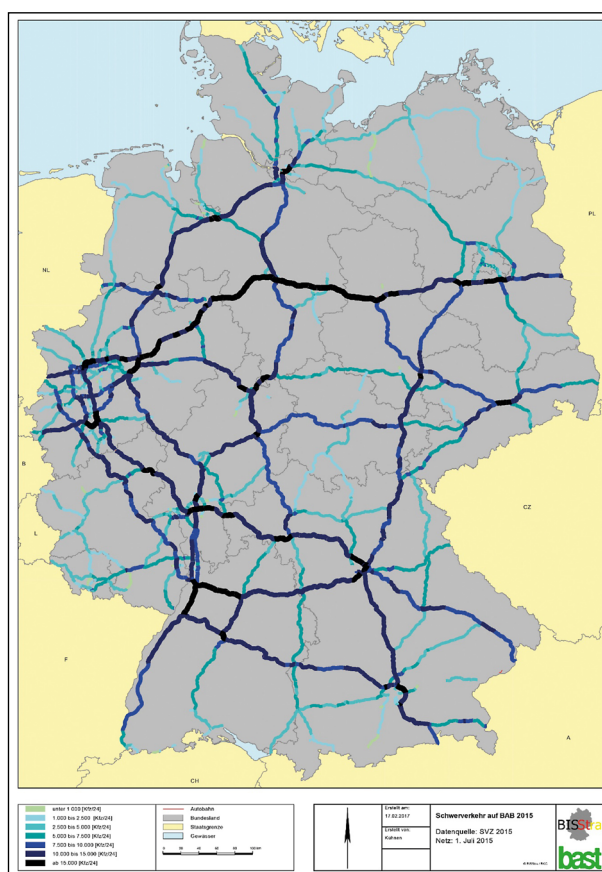


Bild 269: Verteilung SV im BAB-Netz gemäß [5.10]

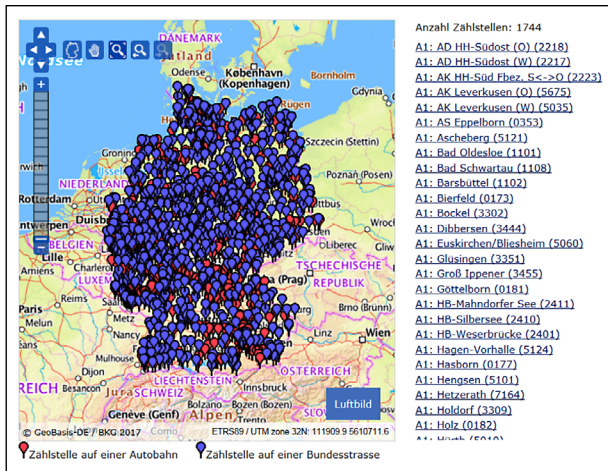


Bild 270: Schematische Darstellung des Netzes an automatischen Zahlstellen nach [5.9] zur Verdeutlichung der Netzabdeckung

Bundesland	signifikante Abschnitte in Betonbauweise im Bereich der BAB	Max. Verkehrsbeanspruchung gemäß der Verkehrszählung 2015 *
Sachsen-Anhalt (ST)	A 2	DTV: 49.400 - 75.900 Anz. SV: 13.000 - 20.250
	A 14	DTV: 4.500 - 59.600 Anz. SV: 370 - 9700
	A 9	DTV: 50.300 - 78.000 Anz. SV: 8.300 - 15.100
	A 38	DTV: 26.700 - 31.600 Anz. SV: 5.500 - 6.300
Niedersachsen (NI)	A 7	DTV: 52.100 - 91.300 Anz. SV: 9.300 - 14.900
	A 27	DTV: 13.600 - 57.200 Anz. SV: 910 - 7.030
	A 29	DTV: 13.000 - 36.500 Anz. SV: 900 - 3.800
	A 1	DTV: 50.000 - 100.800 Anz. SV: 10.300 - 17.300
Thüringen (TH)	A 9	DTV: 40.600 - 66.600 Anz. SV: 8.900 - 12.900
	A 4	DTV: 33.600 - 58.700 Anz. SV: 6.100 - 10.100
	A 71	DTV: 13.700 - 32.300 Anz. SV: 1.700 - 3.700
Brandenburg (BB)	A 9	DTV: 48.700 - 51.100 Anz. SV: 7.500 - 9.350
	A 10	DTV: 44.000 - 100.500 Anz. SV: 5.200 - 19.100
	A 11	DTV: 17.000 - 37.100 Anz. SV: 2.000 - 3.400

Bundesland	signifikante Abschnitte in Betonbauweise im Bereich der BAB	Max. Verkehrsbeanspruchung gemäß der Verkehrszählung 2015 *
Brandenburg (BB)	A 12	DTV: 25.900 - 37.700 Anz. SV: 9.300 - 11.000
	A 13	DTV: 33.200 - 49.000 Anz. SV: 4.300 - 7.700
	A 15	DTV: 10.900 - 16.600 Anz. SV: 3.000 - 4.000
Sachsen (SN)	A 2	DTV: 48.600 - 60.000 Anz. SV: 12.100 - 14.500
	A 4	DTV: 24.100 - 98.200 Anz. SV: 5.900 - 17.100
	A 14	DTV: 34.900 - 65.400 Anz. SV: 7.700 - 10.500
	A 17	DTV: 12.500 - 49.900 Anz. SV: 4.700 - 7.800
Bayern (BY)	A 72	DTV: 22.300 - 75.400 Anz. SV: 2.500 - 9.500
	A 7	DTV: 24.700 - 43.100 Anz. SV: 4.700 - 8.100
	A 92	DTV: 35.300 - 98.300 Anz. SV: 3.900 - 8.800
	A 93	DTV: 26.500 - 36.900 Anz. SV: 2.700 - 4.700
	A 71	DTV: 13.500 - 14.600 Anz. SV: 1.970 - 2.020
Baden-Württemberg (BW)	A 3	DTV: 29.400 - 57.100 Anz. SV: 9.000 - 11.200
	A 81	DTV: 33.400 - 38.300 Anz. SV: 5.200 - 5.700
	A 5	DTV: 67.800 - 110.400 Anz. SV: 11.100 - 17.900
Rheinland-Pfalz (RP)	A 1	DTV: 21.500 - 39.700 Anz. SV: 3.200 - 6.000
Nordrhein-Westfalen (NW)	A 44	DTV: 38.100 - 75.600 Anz. SV: 7.400 - 13.300
Schleswig-Holstein (SH)	A 1	DTV: 26.700 - 95.100 Anz. SV: 1.900 - 10.500
	A 23	DTV: 19.200 - 36.600 Anz. SV: 1.700 - 2.600
	A 24	DTV: 34.100 - 42.300 Anz. SV: 4.900 - 5.800
Mecklenburg-Vorpommern (MV)	A 19	DTV: 16.300 - 28.800 Anz. SV: 1.700 - 3.500

* exakte Zuordnung der Zahlstellendaten zu einer gewählten Messstelle mit BAM-Datenbankauswertung der Verkehrszählung 2015 [5.9; 5.12]

Tab. 66: Auswertung der Verkehrsstatistik 2015 bezüglich hochbeanspruchter BAB in Betonbauweise

Bundesland	signifikante Abschnitte in Betonbauweise im Bereich der BAB	Bereich der Zählstelle/max. Verkehrsbeanspruchung gemäß der Verkehrszählung 2015 *	Bundesland	signifikante Abschnitte in Betonbauweise im Bereich der BAB	Bereich der Zählstelle/max. Verkehrsbeanspruchung gemäß der Verkehrszählung 2015 *	
Sachsen-Anhalt (ST)	A 2	Alleringersleben - Eisleben DTV: 74.200 Anz. SV: 20.300	Sachsen (SN)	A 4	Chemnitz-Ost - Frankenberg DTV: 67.700 Anz. SV: 10.800	
		Eisleben - Bornstedt DTV: 74.300 Anz. SV: 19.800			Glauchau-Ost - Hohenstein-Ernstthal DTV: 37.900 Anz. SV: 6.000	
		Kannenstieg - Magdeburg-Zentrum DTV: 74.400 Anz. SV: 18.600			Dresden-Neustadt - Dresden-Wilder Mann DTV: 98.200 Anz. SV: 14.800	
	A 9	Bitterfeld/Wolfen - Halle DTV: 64.400 Anz. SV: 10.500		Bayern (BY)	A 92	Freising-Mitte - Freising-Ost DTV: 49.700 Anz. SV: 6.700
		Weißenfels - Naumburg DTV: 66.400 Anz. SV: 13.100				Erding - Moosburg-Süd DTV: 48.300 Anz. SV: 5.400
		Großkugel - Leipzig-West DTV: 78.000 Anz. SV: 15.100				Moosburg-Nord - Landshut-West DTV: 44.100 Anz. SV: 4.400
Niedersachsen (NI)	A 7	Ramelsloh - Thieshope DTV: 66.900 Anz. SV: 9.800	Baden-Württemberg (BW)		A 3	Wörth a.d. Donau/Wiesent - Wörth a.d. Donau-Ost DTV: 50.300 Anz. SV: 10.300
		Berkhof - Mellendorf DTV: 90.700 Anz. SV: 14.300				Bogen - Schwarzach DTV: 37.500 Anz. SV: 9.000
		Hildesheim-Drispfenstedt - Hildesheim DTV: 61.600 Anz. SV: 9.600				Hengersberg - Iggensbach DTV: 50.600 Anz. SV: 10.600
	A 1	Groß Ippener - Wildeshausen-Nord DTV: 53.000 Anz. SV: 12.000		A 5	Kronau - Bruchsal DTV: 107.700 Anz. SV: 17.500	
		Wildeshausen-Nord - Wildeshausen-West DTV: 52.900 Anz. SV: 12.700			Bruchsal - Karlsruhe-Nord DTV: 94.500 Anz. SV: 15.900	
	Thüringen (TH)	A 9		Eisenberg - Bad Klosterlausnitz DTV: 66.500 Anz. SV: 12.900	Nordrhein-Westfalen (NW)	A 44
Lederhose - Triptis DTV: 60.800 Anz. SV: 12.700			Soest - Soest-Ost DTV: 53.000 Anz. SV: 12.000			
Triptis - Dittersdorf DTV: 55.900 Anz. SV: 12.100			Erwitte/Anröchte - Geseke DTV: 40.600 Anz. SV: 9.300			
Brandenburg (BB)	A 10	Berlin-Marzahn - Berlin-Hellersdorf DTV: 44.000 Anz. SV: 5.200	Schleswig-Holstein (SH)	A 1		Eutin - Scharbeutz DTV: 36.300 Anz. SV: 2.500
		Erkner - Freienbrink DTV: 48.500 Anz. SV: 5.900				Reinfeld - Bad Oldesloe DTV: 68.100 Anz. SV: 8.000
		Ludwigsfelde-West - Nuthetal DTV: 54.700 Anz. SV: 14.700				Ahrensburg - Stapelfeld DTV: 95.100 Anz. SV: 10.300
	A 12	Fürstenwalde-Ost - Briesen DTV: 37.100 Anz. SV: 10.300				
		Briesen - Müllrose DTV: 37.700 Anz. SV: 10.400				
		Müllrose - FF-West DTV: 35.200 Anz. SV: 9.300				

Tab. 67: Bereiche potenzieller Messorte unter verkehrsstatistischen Bewertungskriterien

Fazit

Auswahlkriterium Verkehrsbeanspruchung:

Auf der Grundlage einer Analyse der allgemeinen Verkehrsverteilung im BAB-Netz (Bild 268 und Bild 269) erfolgte unter Berücksichtigung der lokalen Verteilung von Betonfahrbahndecken in Betonbauweise (Bild 266) eine gezielte Auswertung verkehrstatistischer Daten in Tabelle 66. Nach den Kriterien DTV und SV-Anteil wurden in der Tabelle 67 Bereiche potenzieller Messorte unter verkehrstatistischen Bewertungskriterien aus der gezielten Datenbankauswertung der Verkehrszählung 2015 [5.9] extrahiert.

5.1.2 Auswahlkriterium Klimabeanspruchung

Nach den bisher berichteten und dargestellten Praxiserfahrungen (z. B. [5.16]) sind zur Bewertung von potenziellen Messstellen unter dem Gesichtspunkt klimatischer Beanspruchungseinträge die lokalen Ausprägungen folgender maßgeblicher Einflüsse auf das Gebrauchsverhalten der derzeit angewendeten Fugenfüllsysteme und Fugenfüllstoffe zu berücksichtigen:

- lokale Verteilung der mittleren Maximalwerte der Jahreshöchsttemperaturen, der mittleren Minimalwerte der Jahrestiefsttemperaturen sowie der mittleren Lufttemperatur
- lokale Verteilung der Anzahl von Tieftemperaturereignissen (Frosttage; Eistage)
- lokale Verteilung der Anzahl von Maximaltemperaturereignissen (Sommertage; heiße Tage)
 - Wirkung: Generierung langsam ablaufender Verformungen des Fugenspaltes infolge jährlicher Temperaturspannweite
 - Wirkung: Generierung thermoplastisch bedingter Material- und Steifigkeitsänderungen der Fugenfüllmaterialien infolge jährlicher Temperaturspannweite
 - Wirkung: mögliche Beeinflussung der Verbundwirkung
 - Wirkung: Aktivierung möglicher katalytischer Effekte (z. B. Alterungseffekte; chemische Reaktivität etc.)
- maximale kurzfristige Temperaturdifferenzen zur Kennzeichnung von Gewitterregenereignissen
 - Wirkung: Definition maximaler Temperaturgradienten

- lokale Verteilung maximaler Niederschlagsereignisse
 - Wirkung: Beeinflussung des Materialverhaltens (z. B. hygroskopische Effekte)
 - Wirkung: mögliche Beeinflussung der Verbundwirkung über Kapillarwirkung des Betons
 - Wirkung: Beeinflussung des mechanischen Systemverhaltens durch kurzzeitige thermoplastische Material- und Steifigkeitsveränderungen der Fugenfüllmaterialien
- lokale Verteilung der Sonnenscheindauer als Indikator für UV-Energieeintrag
 - Wirkung: Alterung der Fugenfüllmaterialien

Entsprechend [5.17] wird das Klima in Deutschland maßgeblich durch seine Lage an der Westseite des Kontinents im Bereich der Westwindzone bestimmt. Mit den vorherrschenden Westwinden wird häufig feuchte und aufgrund des warmen Golfstroms milde Meeresluft vom Atlantik herangeführt. Dies ist Ursache dafür, dass die Temperaturen in Deutschland vor allem im Winterhalbjahr höher sind, als es seine nördliche Position vermuten lässt. Der atlantische Einfluss nimmt innerhalb des Landes von West nach Ost ab. An den Küsten, dem dahinterliegenden Binnenland sowie bis in die Kölner Bucht dominiert ein maritimer Klima-Typ mit vergleichsweise geringen Temperaturunterschieden zwischen Sommer und Winter. Nach Südosten hin, vor allem im östlichen Bayern und in Ostdeutschland dominiert ein deutlicher kontinentaler Einfluss, der sich mit wärmeren Sommern und kalten Wintern darstellt.

Der sogenannte bundesweite Gebietsmittelwert der Lufttemperatur (ein aus den Daten aller DWD-Wetterstationen errechnetes Flächenmittel) liegt im Jahresmittel bei + 8,9 °C (Erfassungszeitraum 1981–2010). Die lokale Verteilung der Jahresmitteltemperaturen nach [5.18] ist Bild 271 zu entnehmen:

Als kältester Monat stellt sich der Januar mit durchschnittlich +0,4 °C dar. Als wärmster Monat erscheint der Monat Juli mit durchschnittlich +18,0 °C. Die höchsten Jahresdurchschnittstemperaturen verzeichnet der Oberrheingraben und das angrenzende Neckartal mit über +11 °C z. B. in Karlsruhe, Heidelberg und Stuttgart, währenddessen beispielsweise in Oberstdorf nur +6,6 °C erreicht werden.

Wie auch weltweit, sind die Folgen der globalen Erwärmung in Deutschland als allgemeiner Trend zu

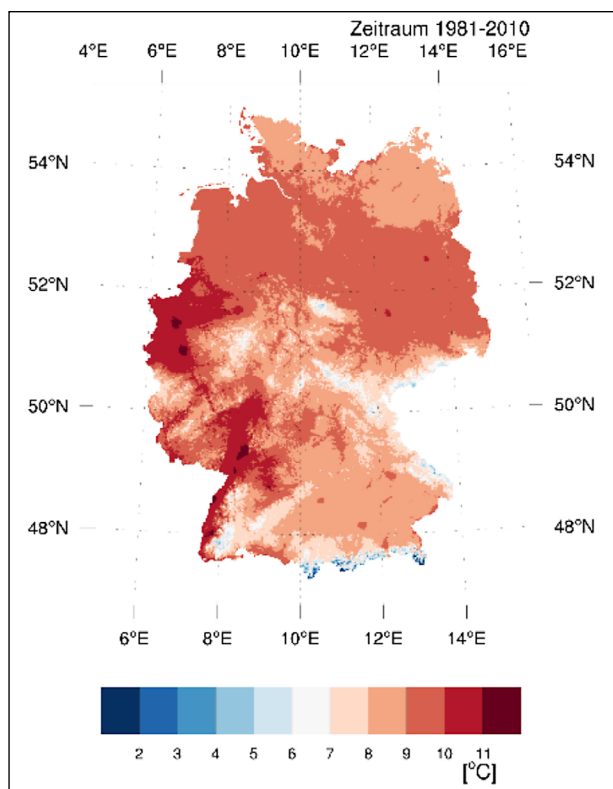


Bild 271: Lokale Verteilung der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

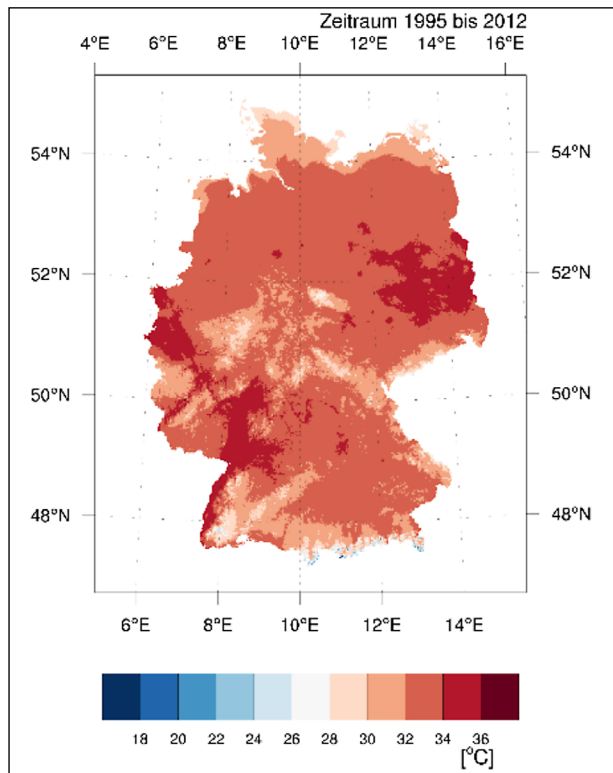


Bild 272: Lokale Verteilung der mittleren Jahreshöchsttemperaturen für den Zeitraum 1995-2012 [5.17]

höheren Temperaturen zu erkennen. Bis auf die Jahre 1996 und 2010 lagen seit 1988 die Durchschnittstemperaturen im Erfassungszeitraum jeweils über dem langjährigen Mittelwert. Die Erwär-

mung ist von Monat zu Monat sehr uneinheitlich verlaufen: Mit 1,1 °C Erwärmung hat der Juli am meisten zugelegt, gefolgt von April und Januar mit ca. 1,0 °C, während sich die Herbstmonate vergleichsweise wenig erwärmt haben.

Es ist ein Zeichen der globalen Wetterveränderungen, dass sich Wetterextreme häufiger und extremer ausbilden. Unter ganz speziellen - nichtrepräsentativen - Randbedingungen betrug die tiefste jemals in Deutschland gemessene Temperatur -45,9 °C (24. Dezember 2001 am Funtensee in den Berchtesgadener Alpen). Der Deutsche Wetterdienst gibt als Rekordwert -37,8 °C an, die am 12. Februar 1929 in Hüll (Ortsteil von Wolnzach, Kreis Pfaffenhofen) gemessen wurden. Die höchste je in Deutschland an einer Station des DWD gemessene Temperatur wurde erst 2015 am 5. Juli im unterfränkischen Kitzingen mit 40,3 °C erreicht. Entsprechend der Analyse in [5.18] stellt sich die lokale Verteilung der mittleren Maximalwerte der Jahres-Höchsttemperatur wie in Bild 272 dar.

Anhand dieser Darstellung wird deutlich, wo es in Deutschland im Mittel am wärmsten wird. Im Gegensatz dazu wurden im Zuge der Klimaanalyse in [5.18] auch die Bereiche lokalisiert, in denen es im Zeitraum 1995-2012 am kältesten war.

Zur Ergänzung werden in Bild 274 die lokalen Bereiche mit den größten jährlichen Temperaturunterschieden im Bereich der Bundesrepublik Deutschland dargestellt.

Weitere wichtige Indikatoren der Bewitterung sind die zeitbezogenen Witterungszustände (z. B. durchschnittliche Verweildauer relevanter Temperaturzustände etc.) gemäß den Kategorien des DWD.

Langanhaltende winterliche Kälteperioden werden durch die Rubriken „Frosttage“ ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) und „Eistage“ ($T_{\max} < 0 \text{ °C}$) erfasst.

Langanhaltende sommerlich warme Perioden werden in den Rubriken „Sommertag“ und „Heiße Tage“ erfasst.

Aufgrund der beschränkten kolorierten Temperaturspannungen ist ergänzend festzustellen, dass einzelne Extremsituationen z. B. in den Hochalpen in den aufgeführten lokalen statistischen Auswertungen nicht erfasst wurden. Auf dieses Extremum wurde bewusst verzichtet, da der lokale Bezug zu vorhandenen Infrastrukturprojekten wie Autobah-

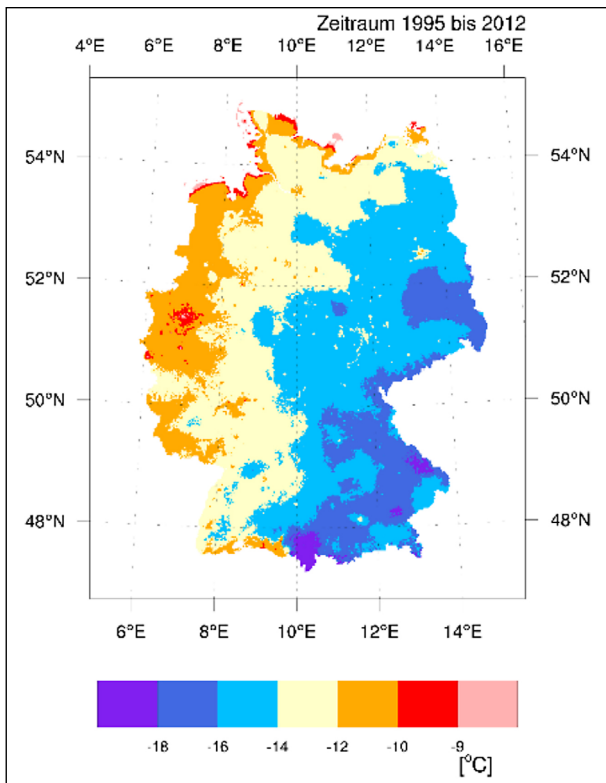


Bild 273: Lokale Verteilung der mittleren Jahrestiefsttemperaturen für den Zeitraum 1995-2012 [5.17]

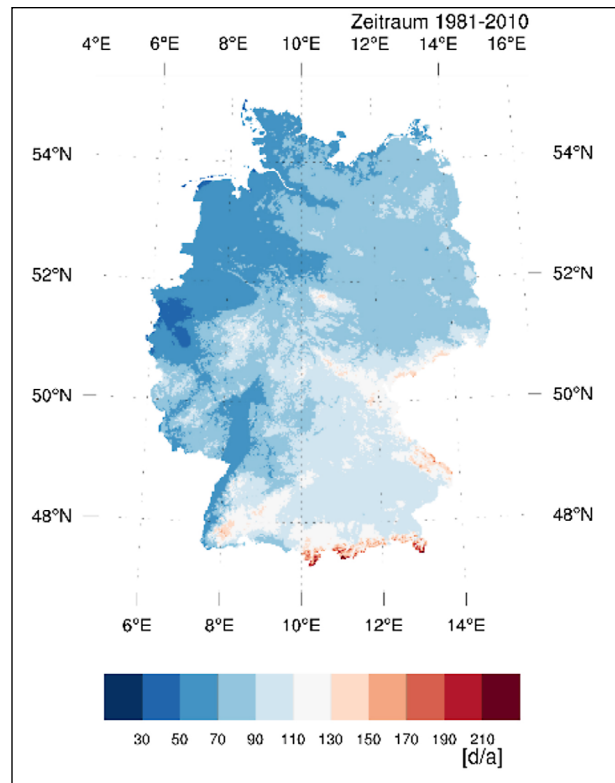


Bild 275: Mittlere lokale Verteilung der „Frosttage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

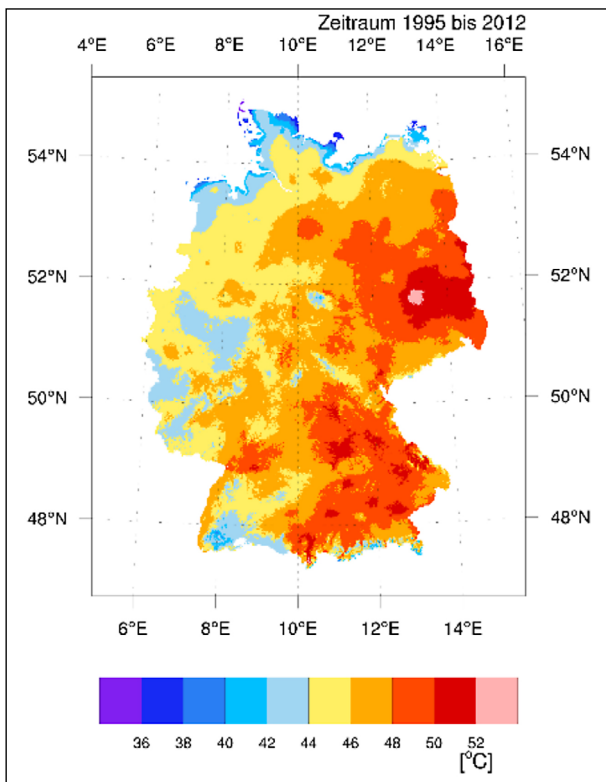


Bild 274: Lokale Verteilung der jährlichen maximalen Temperaturunterschiede für den Zeitraum 1995 bis 2012 [5.17]

nen oder Ingenieurbauwerken des Verkehrswegebbaus nicht gegeben ist.

Mit diesen Darstellungen sind mögliche Messorte bezüglich der zu erwartenden Temperaturbeanspruchungen in ausreichender Weise kennzeichnbar.

Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe beträgt 819 mm (Zeitraum 1981 – 2010). Eine örtliche Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagsmengen liefert Bild 279.

Als trockenster Monat stellte sich bisher der Februar dar, welcher aber in den vergangenen 10 – 15 Jahren zunehmend durch den April sogar noch unterboten wird. Die nassesten Monate sind die Sommermonate, die Niederschläge fallen dann häufig als vergleichsweise kurze und heftige Schauer bei Gewittern und weniger als Dauerregen aus.

Die Niederschlagshöhen variieren zwischen weit über 1000 mm in den Alpen und den Mittelgebirgen und unter 500 mm im Regenschatten des Harzes zwischen Magdeburg im Norden, Leipzig im Osten und Erfurt im Süden. Generell nimmt die Luftfeuchtigkeit von West nach Ost ab. Eine Vorstellung von

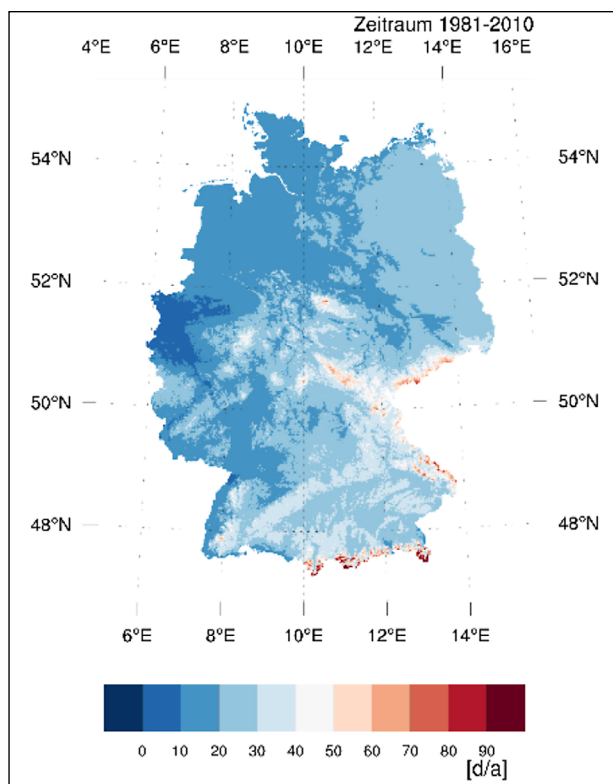


Bild 276: Mittlere lokale Verteilung der „Eistage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

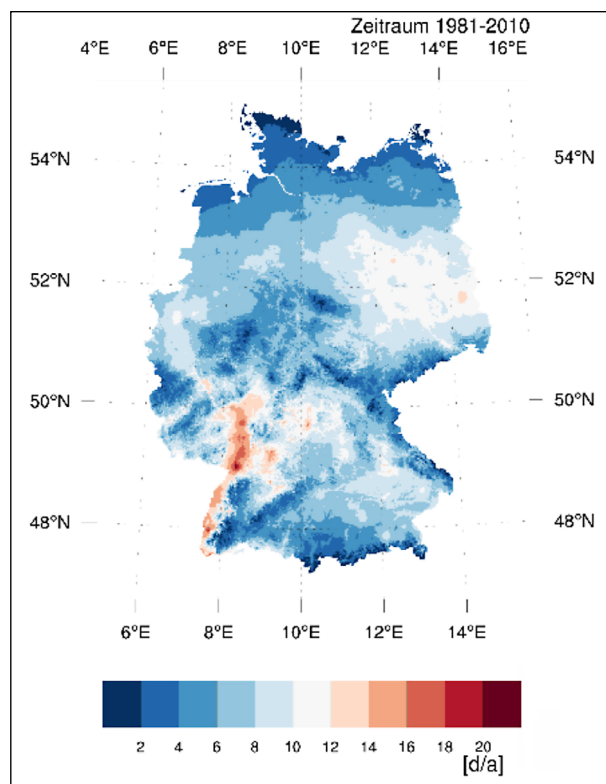


Bild 278: Mittlere lokale Verteilung der Kategorie „Heiße Tage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

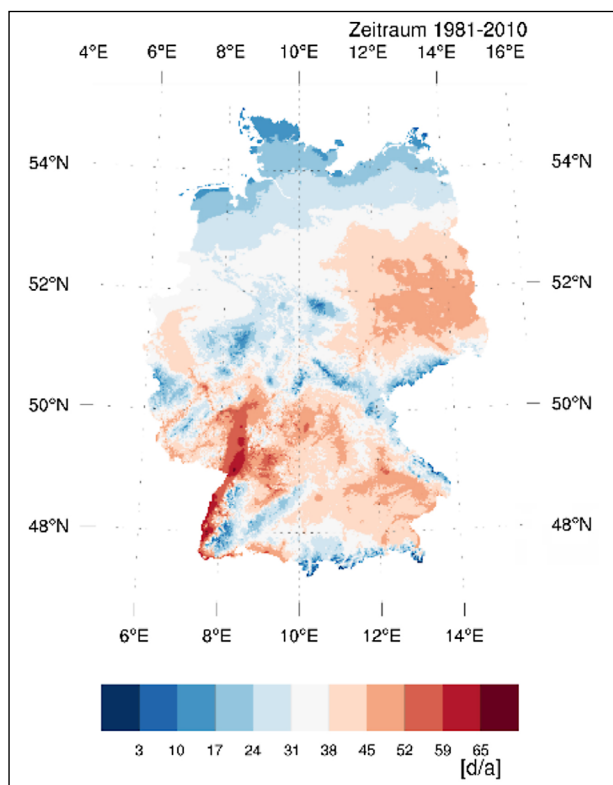


Bild 277: Mittlere lokale Verteilung der „Sommertage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

der Anzahl der mittleren jährlichen Regenereignisse mit geringer bis mittlerer Niederschlagsmenge (hier: 100 mm am Tag) liefert Bild 280.

Bild 281 beantwortet die Frage, wo in Deutschland an wie vielen Tagen im Jahr tägliche große Niederschlagsmengen (> 30 mm) auftreten können.

Zur Abschätzung niederschlagsinduzierter Temperaturänderungen wie z. B. Abkühlungen nach sommerlichen Gewitterregenereignissen wurden in [5.17] die maximalen Temperaturveränderungen innerhalb einer Stunde (Bild 282) bzw. von zwei aufeinanderfolgenden Stunden (Bild 283) untersucht und lokal aufgeschlüsselt.

Mithilfe dieser Informationen können regenbedingte Witterungseinflüsse und auch damit einhergehende maximale Temperaturgradienten lokal abgeschätzt werden.

Eine weitere wichtige klimatische Kategorie ist die Kennzeichnung der sonnenbedingten Einwirkungen. Einige Gebiete, vor allem an der westlichen/nordwestlichen Mittelgebirgsschwelle, an der sich die aus Westen hereinziehenden Wolken stauen –

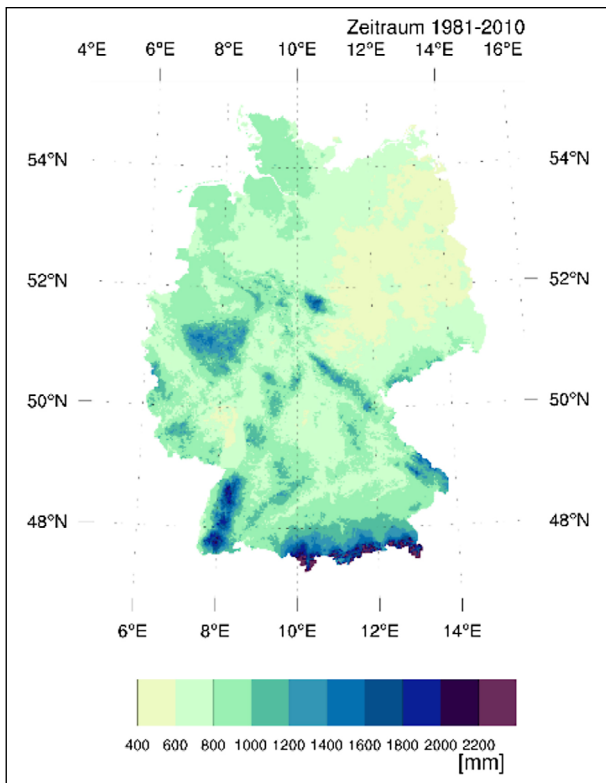


Bild 279: Mittlere jährliche Niederschlagsmengen für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]

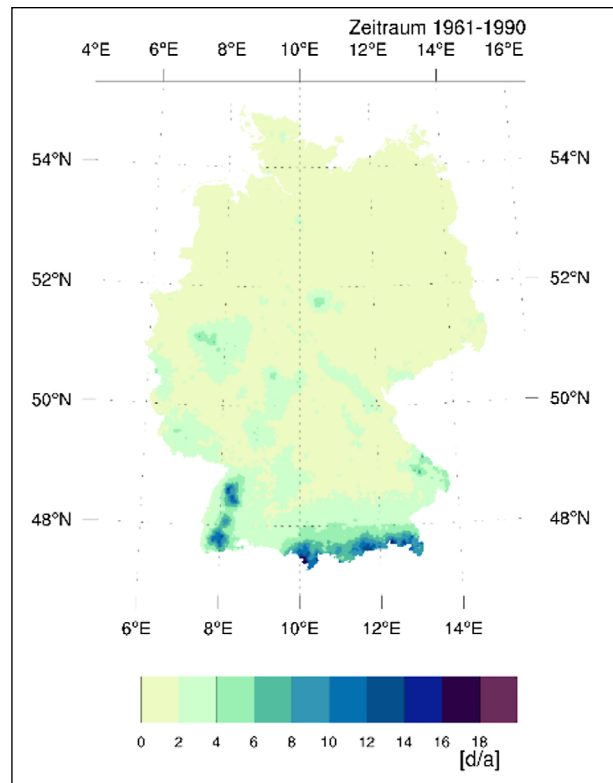


Bild 281: Lokale Verteilung der Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge >10 mm [5.17]

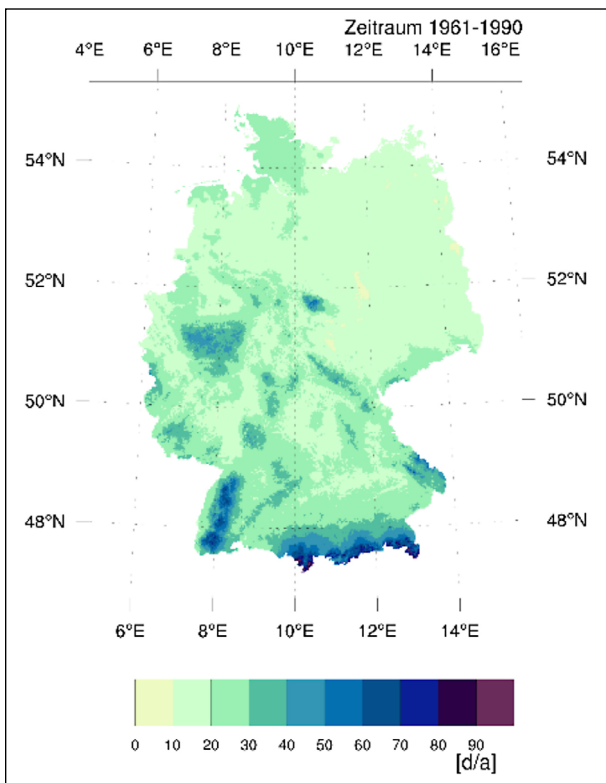


Bild 280: Lokale Verteilung der Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge >10 mm [5.17]

also vor allem Teile Nordrhein-Westfalens, Niedersachsens, Hessens und von Rheinland-Pfalz – gehören mit jährlich teilweise unter 1400 Sonnenstunden zu den sonnenscheinarmen Regionen Europas. Vergleichbare und noch tiefere Werte werden in dichtbesiedelten Regionen europaweit nur noch in manchen Gegenden der britischen Inseln sowie an Norwegens Westküste verzeichnet. Etwa seit Ende der achtziger Jahre hat ein Trend zu insgesamt mehr Sonnenschein in Deutschland eingesetzt. So ist das deutsche Flächenmittel beim Sonnenschein (vom DWD jährlich aus Rasterdaten ermittelter Mittelwert) zwischen den beiden Referenzperioden 1961 – 1990 und 1981 – 2010 von 1544 auf 1601 Sonnenstunden angestiegen und liegt für die letzten 15 Jahre gar bei 1674 Sonnenstunden.

Deutschlands sonnigste Regionen liegen an den nördlichen und südlichen Rändern des Landes. Deutschlandweiter Spitzenreiter beim Sonnenschein sind die vorpommerschen Inseln Rügen und Usedom. Mit 1869 Sonnenstunden pro Jahr ist Kap Arkona auf Rügen für die aktuelle Referenzperiode 1981 – 2010 die sonnigste deutsche Wetterstation.

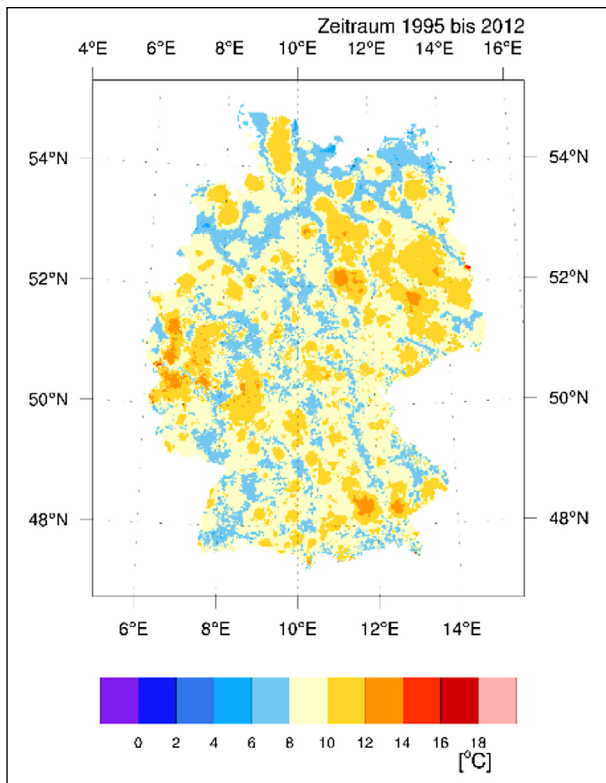


Bild 282: Max. Temperaturveränderungen innerhalb 1 Stunde für den Zeitraum 1995 – 2012 nach [5.17]

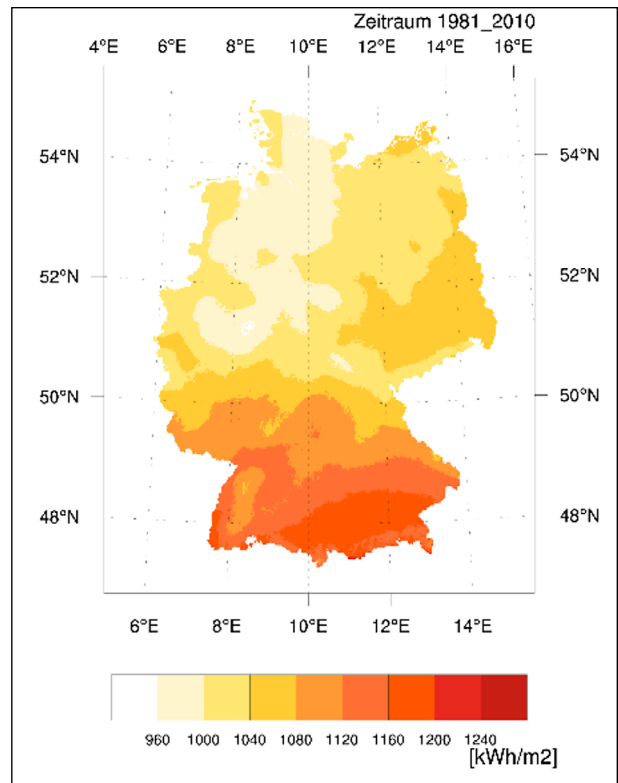


Bild 284: Mittlere lokale Verteilung der Globalstrahlung für den Zeitraum 1981 - 2010 gemäß [5.17]

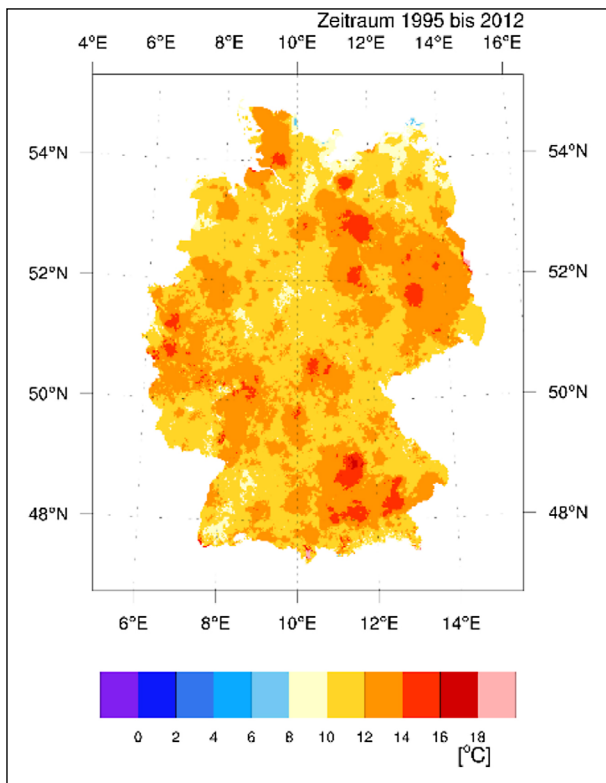


Bild 283: Max. Temperaturveränderungen innerhalb von 2 Stunden für den Zeitraum 1995 – 2012 nach [5.17]

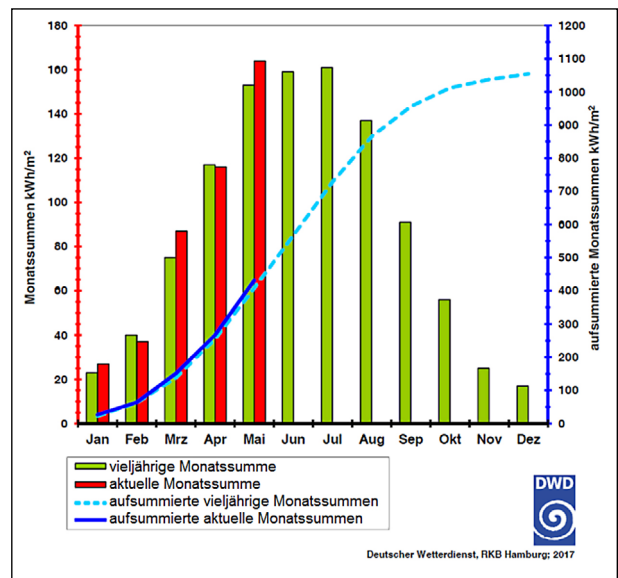


Bild 285: Aktuelle Entwicklung des Globalstrahlungseintrages für die BRD

Ebenfalls vergleichsweise sonnig ist die Hauptstadtregion Berlin und das angrenzende Brandenburg. Im Süden sind die sonnigsten Regionen der südliche Oberrhein etwa zwischen Karlsruhe und Lörrach, die Region Stuttgart und das bayerische Alpenvorland inkl. der Landeshauptstadt München, die jeweils Durchschnittswerte um 1800 Sonnen-

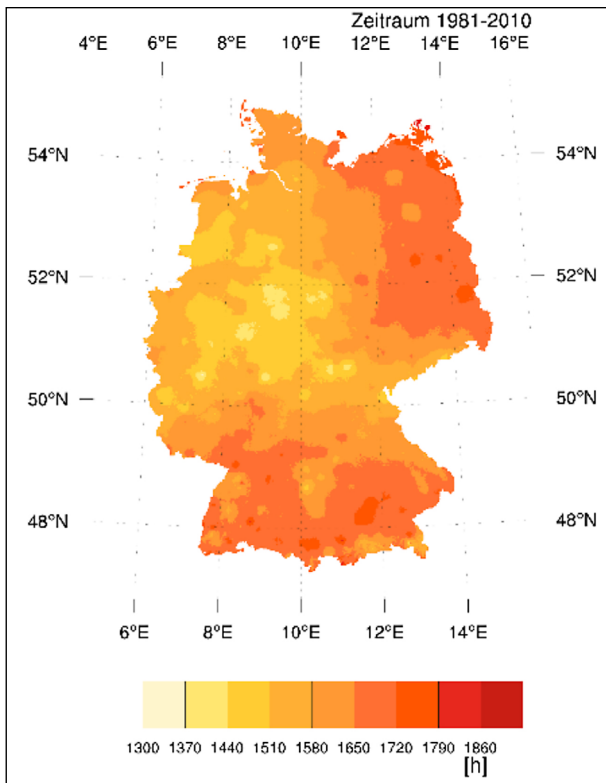


Bild 286: Mittlere lokale Verteilung der Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1981 - 2010 gemäß [5.17]

stunden aufweisen. Weniger profitiert vom allgemeinen Trend zu mehr Sonne hat der westliche Rand des Landes vom Saarland bis nach Ostfriesland sowie das nördliche Schleswig-Holstein. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung wächst auch der Anteil der Globalstrahlung einschließlich des alterungsrelevanten UV-A und UV-B Anteils (rd. 5 % der auf dem Boden ankommenden Globalstrahlung). Für den Zeitraum 1981 – 2010 betrug die mittlere Jahressumme der Globalstrahlung 1055 kWh/m².

Damit ergibt sich überschläglich ein jährlicher Anteil an UV-Strahlungseintrag im Wellenlängenbereich 380 bis 280 nm von etwa 53 kWh/m², welcher gemäß Bild 285 tendenziell weiter zunimmt.

Dieser Energieeintrag erfolgt im Wesentlichen im Verlauf der nachfolgend aufgeführten Verteilung der Sonnenscheindauer.

Zusammen mit bereits vorliegenden straßenbauspezifischen Auswertungen von Klimadaten (Bild 287: Frostzonen im Gebiet der BRD gemäß BAST) können mithilfe dieser aufgabenspezifisch überwiegend über den Zeitraum der vergangenen 30 Jahre hinweg tiefgehend und detailliert aufbereiteten Informationen die klimatischen Beanspruchungsbedingungen repräsentativ quantifiziert werden.

Unter dem Aspekt der witterungsbedingten Beanspruchungen liefern insbesondere die Messdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und deren gezielte statistische Auswertungen [5.18], geeignete Rahmenbedingungen für eine repräsentative Auswahl möglicher Messstellen.

Fazit

Auswahlkriterium Klimabeanspruchung:

Auf der Grundlage einer Analyse der allgemeinen Klimadaten für die Bundesrepublik Deutschland [5.17] sowie insbesondere unter Auswertung einer speziell beauftragten Datenauswertung durch den Deutschen Wetterdienst [5.18] können die Bereiche ausgeprägter Klimabeanspruchungen (Temperaturen, Niederschläge, UV-Bestrahlungsintensität) lokal zugeordnet und analysiert werden. Unter Berücksichtigung der lokalen Verteilung von BAB in Betondeckenbauweise (Bild 266) ergibt sich eine globale Bewertung der bundesdeutschen Klimabeanspruchung wie folgt (Tabelle 68):

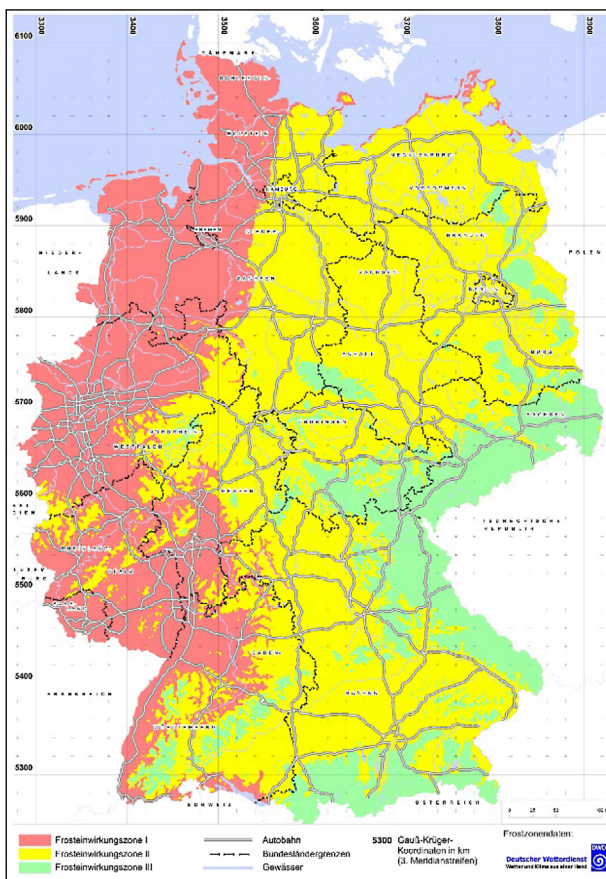


Bild 287: Frostzoneneinteilung gemäß [5.19]

Bereiche höchster Jahrestemperaturen	Brandenburg (BB); Sachsen (SN); Sachsen-Anhalt (ST); Thüringen (TH); Baden-Württemberg (BW); Rheinland-Pfalz (RP); Bayern (BY); Nordrhein-Westfalen (NW)
Bereiche tiefster Jahrestemperaturen	Brandenburg (BB); Sachsen (SN); Sachsen-Anhalt (ST); Thüringen (TH); Bayern (BY); Niedersachsen (NI);
Bereiche größter jährlicher Temperaturunterschiede	Brandenburg (BB); Sachsen (SN); Sachsen-Anhalt (ST); Thüringen (TH); Bayern (BY); Niedersachsen (NI)
Bereiche längster Kälteperioden	Bayern (BY); Thüringen (TH); Sachsen (SN); Niedersachsen (/NI) Brandenburg (BB); Sachsen-Anhalt (ST);
Bereiche längster Hitzeperioden	Brandenburg (BB); Sachsen-Anhalt (ST); Sachsen (SN); Niedersachsen (/NI); Thüringen (TH) Bayern (BY); Baden-Württemberg (BW); Rheinland-Pfalz (RP)
Bereiche höchster Niederschläge	Bayern (BY); Sachsen (SN); Nordrhein-Westfalen (NW); Baden-Württemberg (BW) Niedersachsen (NI); Thüringen (TH); Schleswig-Holstein (SH)
Bereiche maximaler kurzfristiger Temperaturveränderungen	Brandenburg (BB); Bayern (BY); Sachsen-Anhalt (ST); Sachsen (SN); Niedersachsen (/NI) Schleswig-Holstein (SH) Nordrhein-Westfalen (NW); Thüringen (TH)
Bereiche höchster Globalstrahlungen	Bayern (BY); Brandenburg (BB); Baden-Württemberg (BW); Sachsen-Anhalt (ST); Sachsen (SN); Schleswig-Holstein (SH) Niedersachsen (NI); Nordrhein-Westfalen (NW);
besonders relevant	

Tab. 68: Vorauswertung der Klimaverteilung

5.1.3 Auswahlkriterium Variation der Bauweise bzw. des konstruktiven Aufbaus

Maßgebend für die konstruktive Ausbildung von Betondecken im Bundesfernstraßenbereich sind die „RStO“ [5.14]. Die wesentlichen Variationen im Verbundaufbau Deckschicht – ggf. Zwischenschicht -Tragschicht sind dort in den konstruktiven Ausführungen der Tabelle 2, Zeile 1 bis 3 aufgeführt. (Bild 288)

Zur Absicherung ausreichenden Bezuges der zu wählenden Messorte zum Stand der Bautechnik/

Baukonstruktion und zu den entsprechenden aktuellen technischen Regelungen [5.14], zur Berücksichtigung möglicher lokaler Ausführungspräferenzen aber insbesondere auch zur Erfassung möglicher Untersuchungswünsche der Autobahnverwaltungen der Bundesländer erfolgte mit Rücksicht auf die Verteilung von Betonfahrbahndecken im Netz der BAB ein Informationsabfrage zu potenziellen Messorten im Sinne der Aufgabenstellung bei den Autobahnverwaltungen der Bundesländer (Tabelle 69):

- Sachsen-Anhalt,
- Niedersachsen,
- Brandenburg,
- Thüringen,
- Sachsen,
- Bayern,
- Mecklenburg-Vorpommern,
- Schleswig-Holstein und
- Rheinland-Pfalz

Frage	Antwort
1. Benennen Sie bitte 2 BAB-Bereiche mit hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken	1.1 BAB A: RF: km: Herstelljahr: Autobahnmeisterei: 1.2 BAB A: RF: km: Herstelljahr: Autobahnmeisterei:
2. Kurzangaben zum konstruktiven Aufbau - Deckschicht - ggf. Zwischenschicht bzw. Vliesstoff - Tragschicht	2.1 BAB A: Bauweise (RSTO): Deckschicht: - Dicke: - Festigkeitsklasse: - Körnung: - Bauweise (Textur): - Plattenabmessung: Zwischenschicht: Tragschicht: - Dicke:

Tab. 69: Abfrage zur Erstellung einer bundesweiten Messkonzeption zur Datenerhebung maßgeblicher Fugenbeanspruchungen in hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken im BAB-Netz

Frage	Antwort
2. Kurzangaben zum konstruktiven Aufbau - Deckschicht - ggf. Zwischenschicht bzw. Vliesstoff - Tragschicht	2.2 BAB A: Bauweise (RSTO): Deckschicht: - Dicke: - Festigkeitsklasse: - Körnung: - Bauweise (Textur): - Plattenabmessung: Zwischenschicht: Tragschicht: - Dicke:
3. Kurzangaben zu maßgebenden Beanspruchungen:	3.1 BAB A: DTV: Anteil SV: - Längsgefälle: - Luft-Tmax./min. 3.2 BAB A: DTV: Anteil SV: - Längsgefälle: - Luft-Tmax./min.

Tab. 69: Abfrage zur Erstellung einer bundesweiten Messkonzeption zur Datenerhebung maßgeblicher Fugenbeanspruchungen in hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken im BAB-Netz (Fortsetzung)



Bild 288: Maßgebende Varianten der konstruktiven Ausführung von Betondecken im Bundesfernstraßenbereich [5.14]

Aus den eingegangenen Rückmeldungen ergaben sich in einer zusammenfassenden Auswertung der Daten zur Kennzeichnung des Deckenaufbaus die in Tabelle 70 dargestellten verfügbaren Messstellen.

Ausführungen gemäß RSTO, Tafel 2, Zeile 2 (Betondecke auf Asphalttragschicht und FSS), wurden leider nicht gemeldet.

Es ist weiterhin aufgrund der gemeldeten Messoptionen festzustellen, dass eine Berücksichtigung auszuwählender Messstellen auf die in Tabelle 66 und Tabelle 67 benannten maximalen Verkehrsbeanspruchungen immer nur bedingt möglich sein wird.

Brandenburg (BB)	RSTO Zeile 3 Waschbeton 29 cm - STS 30 cm - A 2 ABM Werder
	RSTO Zeile 3.1 Waschbeton 29 cm - STS 30 cm - A 12 ABM Fürstenwalde
Sachsen (SN)	RSTO Zeile 1 Waschbeton 27 cm Vlies HGT 20 cm - A 13 ABM Dresden-Hellerau
	RSTO Zeile 3 Waschbeton 30 cm - STS 30 cm - A 14 ABM Magdeburg
Mecklenburg-Vorpommern (MV)	In Anlehnung RSTO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Jutetuch) - HGT 15 cm 18 cm FSS - A 19 ABM Malchow
	In Anlehnung RSTO Zeile 1 Deckbeton 26 cm (Jutetuch) - HGT 15 cm 20 cm HGT 30 cm FSS - A 24 ABM Hagenow
Thüringen (TH)	RSTO Zeile 3 Deckbeton 30 cm (Jutetuch) - STS 30 cm - A 4 ABM Erfurt
	RSTO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Jutetuch) Vlies Verfestigung FSS 20 cm - A 4 ABM Erfurt
Schleswig-Holstein (SH)	RSTO Zeile 1 Waschbeton 27 cm Vlies Fahrbahnaufbruch 18 cm - A 1 ABM Bad Oldesloe
Niedersachsen (NI)	RSTO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Kunstrasen) Vlies HGT 15 cm - A 7 ABM Fallingbommel Grunderneuerung ab 2017
	RSTO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Kunstrasen) Vlies HGT 15 cm - A 7 ABM Langenhagen Grunderneuerung ab 2017
Rheinland-Pfalz (RP)	RSTO Zeile 1 Waschbeton 27 cm/Vlies Verfestigung FSS 25 cm - A 3 ABM Heiligenroth
	RSTO Zeile 1 Waschbeton 27 cm Vlies Verfestigung FSS 20 cm - A 61 ABM Mendig
Sachsen-Anhalt (ST)	RSTO Zeile 3 Deckbeton 30 cm - STS 20 cm - A 14 ABM Peißen
	RSTO Zeile 3 Deckbeton 29 cm - S TS 30 cm - A 9 ABM Weißenfels

Tab. 70: Rückmeldungen zu potenziellen Messstellen

Fazit

Auswahlkriterium konstruktiver Aufbau:

Als Optionen für Messstellen wurden im Ergebnis einer Abfrage konstruktive Ausführungen gemäß Zeile 1 und Zeile 3 der RSTO 12 gemeldet (siehe Tabelle 69). Rückmeldungen über Ausführungen nach Zeile 2 lagen nicht vor.

5.2 Konzeptionsvorschläge für die Organisation einer repräsentativen Messkampagne

Die aufwandsoptimierte Konzeptionierung einer Messkampagne kann den Erfordernissen z. B. aus verkehrlichen und straßenbaupraktischen Randbedingungen - einschließlich der damit verbundenen organisatorischen und arbeitsschutzrechtlichen Konsequenzen - nur adäquat angepasst werden, wenn folgende Grundlagen definiert sind:

- Anzahl von Messfeldern der Kampagne, sowie deren erforderliche technische Nutzungsvoraussetzungen und Anordnung der Messstellen je Messfeld
- lokale Verteilung (Betreuungsaufwand des zu betreuenden Einzugsgebietes)
- organisatorische und technische Vorbereitungsarbeiten, Einrichtungszeitpunkt der Messstellen und Einrichtungsdauer je Messstelle
- Vergabe von Aufträgen an Fremdfirmen
- Erfassung relevanter Beanspruchungszustände
 - langsam ablaufende Deformationen (permanent; ortsaufgelöst)
 - schnell ablaufende Deformationen (zeit- und ortsaufgelöst)
 - Lufttemperatur; Luftfeuchtigkeit
 - Temperaturverteilung in der Betondecke
 - Zuordnung der Verkehrsbeanspruchung
 - Lagestabilität der Betondeckenoberfläche
 - bisherige Nutzungsdauer
- Gesamtdauer der Messkampagne
- Anzahl und zeitliche Abstände der Begutachtungs- bzw. Kontrollintervalle
- Aufwand zur Datenauswertung
- Aufwand zur Berichterstellung

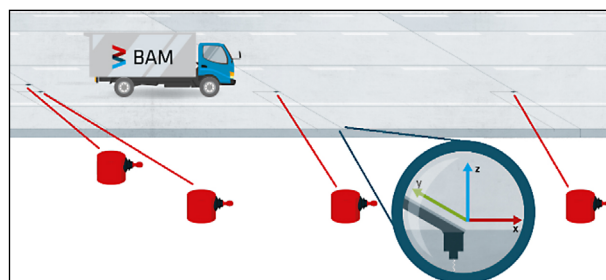


Bild 289: Mögliche schematische Darstellung der Sensor-Bestückung je Messfeld

Unter Berücksichtigung der Vielzahl und Variabilität der zu beachtenden Einflusskriterien für eine Messkampagne, erscheint eine Anzahl von 5 bis 6 Messfeldern mit je mindestens vier Sensorsystemen sinnvoll. Dies folgt insbesondere der Vorstellung, in einer zeit- und aufwandsoptimierten Weise möglichst schnell repräsentative und verwertbare Erkenntnisse, über die für den bundesdeutschen Fernstraßenbereich relevanten Beanspruchungen von Fugen und Fugenfüllsystemen erarbeiten zu können. In den einzelnen, entsprechend der Ausführungen in Kapitel 5.3 ausgewählten Messfeldern, werden unter Anleitung durch die streckenkundige Autobahnverwaltung/Autobahnmeisterei jeweils drei repräsentative (funktionsgerecht ausgebildete) Fugen im ersten Fahrstreifen (SV-Verkehr) bestimmt. Zur Separation direkter Überrolleinwirkungen wird vorgeschlagen, je Fuge jeweils einen Sensor direkt in der Rollspur des SV sowie einen Sensor zwischen den Rollspuren anzuordnen. Als begleitende Information zur Bewertung der Deformationsmessungen erfolgt in unabhängiger Anordnung zu den Deformationssensoren die Anordnung einer Messstelle zur Ermittlung der Temperaturverteilung über die Höhe der Betondecke innerhalb einer Betonplatte separat von den Deformationsmessstellen.

Als optimaler Kompromiss zwischen Aufwand und Informationsgewinn wird die Anordnung von insgesamt sechs Deformationssensoren (mit inkludierten Temperaturkontrollsensoren), vier Temperatursensoren in der Betondecke, je ein Lufttemperatursensor und ein Luftfeuchtesensor sowie eine Überwachungskamera je Messfeld angesehen.

Voraussetzungen für die Anwendung der Sensor-methodik in den gewählten Messfeldern sind nach derzeitiger Entwicklungslage:

- Verfügbarkeit eines Aufstellortes für einen Stationscontainer in unmittelbarer Entfernung mit Sichtkontakt zum Messfeld

- Verfügbarkeit einer Spannungsversorgung
- Zugänglichkeit
- Netzverfügbarkeit (mind. 1 Mbit/s Uplink) zur Datenübertragung

Die lokale Verteilung der Messstellen über den Bereich der bundesdeutschen Autobahnen sollte trotz der Einhaltung der erforderlichen klimatischen Bandbreiten zur Aufwandsminimierung möglichst eng sein. Dazu wird eine Konzentration auf potenzielle Messstandorte in Mitteldeutschland bzw. an deren nördlicher (z. B. Mecklenburg-Vorpommern) oder südlicher (z. B. Bayern) Peripherie vorgeschlagen.

Der erforderliche zeitliche Vorbereitungsaufwand, so zeigen aktuelle Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Vorbereitung eines Erprobungsabschnittes, wird geprägt durch mehrstufige Abstimmungs- und Genehmigungsprozesse mit den jeweiligen Autobahnverwaltungen und -meistereien. Daneben sind Beschaffungen, Fertigungen und insbesondere Einstell- und Kalibrieraufwendungen für die entsprechenden Sensorstationen als erforderlicher Vorbereitungsaufwand vorzusehen. Nach den derzeitigen Erkenntnissen ist - nach Vorliegen der genannten Vorbereitungen - von einer praktischen Einrichtungsdauer je Messstelle von etwa fünf Arbeitstagen auszugehen (z. B. Tag 1: Anreise und Vorbereitungen; Tag 2: Einrichtung der Absperrungs- und Sicherungsmaßnahmen und Beginn Aufbau; Tag 3 und 4: Fortsetzung und Abschluss Aufbau, Einrichtung und Nullmessungen; Tag 5: Abreise)

Für die Konzeptionierung der Messkampagne ist zu berücksichtigen, dass aus Kompetenzgründen, aber auch unter arbeitsschutzrechtlichen Gesichtspunkten, eine Vergabe der Aufträge an spezialisierte Fachfirmen zu empfehlen ist. Diese sollen insbesondere die Schneidarbeiten im Rahmen der Einrichtung jeder Messstelle abdecken.

Die Messkampagne sollte folgende Dinge beinhalten:

- kontinuierliche Erfassung langsam ablaufender Deformationen
- temporäre Erfassung schnell ablaufender Deformationen
- kontinuierliche Erfassung Lufttemperatur; Luftfeuchte
- kontinuierliche Temperaturverteilung in der Betondecke
- punktuelle Erfassung der Verkehrsbeanspruchung (SV)

und eine Datenerfassung über mindestens alle saisonalen Umgebungsschwankungen eines Nutzungsjahres ermöglichen.

Die Einrichtung von Messfeldern in Neubauabschnitten erleichtert nicht nur die Randbedingungen bei der Einrichtung der Messstelle (Verzicht auf zusätzliche Sperr- und Sicherungsmaßnahmen), sondern hilft auch, mögliche einmalige Beanspruchungsspitzen (z. B. aus Kriech- und Schwindprozessen) und deren mögliche Konsequenzen für die Fugenbewegungen zu erfassen. Diesen Einwirkungen sollte mindestens mit einem exemplarischen Messfeld entsprochen werden.

Zur Sicherstellung und Überprüfung der Funktionsfähigkeit zusätzlicher Datensicherungs- und Wartungsmaßnahmen ist die örtliche Begutachtung der einzelnen Messfelder unerlässlich. Als praktikables Kontrollintervall wird ein Zeitraum von etwa vier bis fünf Monaten abgeschätzt. Je nach gewünschter Kampagnenlänge sind je Messfeld zwischen mindestens drei bis fünf Kontrollbegutachtungen/Wartungsbesuche erforderlich.

Der Zeitaufwand für die Auswertung der in hoher Erfassungsdichte ermittelten Messwerte zur Ableitung der gewünschten Informationen ist für eine Messfeldanzahl von fünf bis sechs Messfeldern auf sechs Monate abzuschätzen.

5.3 Auswahl potenzieller Messorte

Betrachtet man die lokale Verteilung von Betonfahrbahndecken im Bundesautobahnbereich (siehe Bild 266) ist eine ungleichmäßige Verteilung über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland festzustellen. Ein besonderer Schwerpunkt der Betonbauweise ist für den mitteldeutschen Bereich festzustellen. Hier sind zwar gemäß der Auswertung klimatischer Daten in Tabelle 68 auch besonders anspruchsvolle klimatische Beanspruchungen zu erwarten (z. B. max. jährliche Temperaturspannen), jedoch korreliert diese örtliche Verteilung nicht mit der Verteilung von hohen Verkehrsbeanspruchungen (siehe Bild 269).

Ausgehend von den vorliegenden Gegebenheiten liegen unserem Vorschlag für eine Auswahl potenzieller Messstandorte folgende Überlegungen zugrunde:

- Erfassung der maßgebenden Bauarten gemäß RStO
- Auswahl potenzieller Messstellen der maßgebenden Bauarten des Betondeckenbaus unter

1) Sachsen (SN)	RStO Zeile 1 Waschbeton 27 cm Vlies HGT 20 cm - A 13 ABM Dresden-Hellerau
	Anm.: - hohe Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - hohe Verkehrsbeanspruchung gemäß Bild 4 und 5 - gute Erreichbarkeit
2) Thüringen (TH)	RStO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Jutetuch) Vlies Verfestigung FSS 20 cm - A 4 ABM Erfurt
	Anm.: - mittlere bis hohe Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - mittlerer bis hohe Verkehrsbeanspruchung gemäß Bild 4 und 5 - gute Erreichbarkeit
3) Mecklenburg-Vorpommern (MV)	In Anlehnung RStO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Jutetuch) - HGT 15 cm 18 cm FSS - A 19 ABM Malchow
	Anm.: - mittlere bis geringe Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - mittlere bis geringe Verkehrsbeanspruchung gemäß Bild 4 und 5 - gute Erreichbarkeit
Optional Niedersachsen (NI)	RStO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Kunstrasen) Vlies HGT 15 cm - A 7 ABM Fallingbostal Option: Grunderneuerung ab 2017
	RStO Zeile 1 Deckbeton 27 cm (Kunstrasen) Vlies HGT 15 cm - A 7 ABM Langenhagen Option: Grunderneuerung ab 2017
	Anm.: - mittlere Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - mittlerer bis hohe Verkehrsbeanspruchung gem. Bild 4/5 - Neubau - aufwändige Erreichbarkeit

Tab. 71: Vorschläge für Messstellen für Ausführungen gemäß RStO Zeile 1

Variation der klimatischen und verkehrlichen Einsatzbedingungen nach hoch, mittel bis hoch; mittel bis gering

Für die Betondeckenausführung gemäß RStO 12, Tafel 2, Zeile 1, werden die in Tabelle 71 aufgelisteten Messstellen mit abgestuften Beanspruchungen vorgeschlagen.

Als mögliche Option wird explizit auf die im Zuge der für die Jahre 2018 ff. geplanten grundhaften Erneuerungen der A 7 (Niedersachsen) und den damit verbundenen Erkenntnisoptionen im Verlauf von Neubaumaßnahmen hingewiesen.

Für die Betondeckenausführung gemäß RStO 12, Tafel 2, Zeile 3, werden die in Tabelle 72 aufgelisteten Messstellen mit abgestuften Beanspruchungen vorgeschlagen.

Die umfassenden Analysegrundlagen bezüglich Verkehrsbeanspruchungen und Klimabeanspruchungen eröffnet uns generell die Möglichkeit, auch alternative Auswahl- und Einbauoptionen und deren repräsentative Verteilung vornehmen zu können.

1) Brandenburg (BB)	RStO Zeile 3 Waschbeton 29 cm - STS 30 cm - A 2 ABM Werder
	Anm.: - hohe Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - hohe Verkehrs-Beanspruchung gemäß Bild 4/5 - gute Erreichbarkeit
2) Sachsen-Anhalt (ST)	RStO Zeile 3 Deckbeton 29 cm - STS 30 cm - A 9 ABM Weißenfels
	Anm.: - mittlere bis hohe Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - hohe Verkehrsbeanspruchung gemäß Bild 4 und 5 - gute Erreichbarkeit
3) Sachsen (SN)	RStO Zeile 3 Waschbeton 30 cm - STS 30 cm - A 14 ABM Magdeburg
	Anm.: - mittlere Klimabeanspruchung gemäß Tabelle 5 - mittlere Verkehrsbeanspruchung gemäß Bild 4 und 5 - gute Erreichbarkeit

Tab. 72: Vorschläge für Messstellen für Ausführungen gemäß RStO Zeile 3

6 Zusammenfassung der Arbeitsergebnisse

Im Folgenden sind die wesentlichen Bestandteile dieses Forschungsvorhabens kurz zusammengefasst.

- Bau eines innovativen Sensorsystems (siehe Kapitel 3.1)
- Errichtung einer Mess-Station in situ (siehe Kapitel 3.3)
- Realisierung der Datenübermittlung (siehe Kapitel 3.2)
- begleitende und ergänzende Datenerfassung (siehe Kapitel 3.4, 4.3.3 und 4.5.1)
- erste Ergebnisse der Messkampagnen in situ (siehe Kapitel 4.2, 4.5 und 4.7)

6.1 Realisierung eines Sensorsystems zur Erfassung der Relativbewegung von Fugenflanken in Betonautobahnen

Zu Beginn wurden drei verschiedene messtechnische Lösungen als zielführend im Sinne der Aufgabenstellung erachtet – ein elektro-mechanischer Ansatz, ein elektro-magnetischer und ein optischer Ansatz nach dem Prinzip einer Lochkamera. Von diesen dreien wurde die erste ausgewählt, die sich in Vorversuchen als robusteste und am weitesten fortgeschrittene herausstellte, bestehend aus einem induktiven Wegaufnehmer und zwei Drehwinkelgebern. Die technischen Eigenschaften lassen sich wie folgt zusammenfassen:



Bild 290: 3D-Sensorsystem mit Anschlussarm für die Befestigung auf der gegenüberliegenden Fugenflanke

- Messbereich und Auflösung in XRichtung (Fahrtrichtung): ± 5 mm; bis zu $0,5 \mu\text{m}$
- Messbereich und Auflösung in YRichtung (quer zur Fahrtrichtung): ± 2 mm; bis zu $15 \mu\text{m}$
- Messbereich und Auflösung in ZRichtung (vertikal): ± 2 mm; bis zu $5 \mu\text{m}$
- Arbeitsbereich: -20 bis $+50$ °C
- Umgebungsfeuchtigkeit: bis 100 %
- Spritzwasserfest
- Abmessungen:
Durchmesser < 100 mm
Höhe < 100 mm
- Mechanische Belastbarkeit:
 $1,76$ N/mm²
Theoretische Einzelradlast bei Überrollungen:
12 t
- Interner Temperatursensor
- Messfrequenz bis zu 2000 Hz
- Korrosionsfest
- Säure- und Laugebeständig

Ende März 2018 wurden vier Sensorsysteme erfolgreich auf einer Teststrecke, des duraBAST, ins-

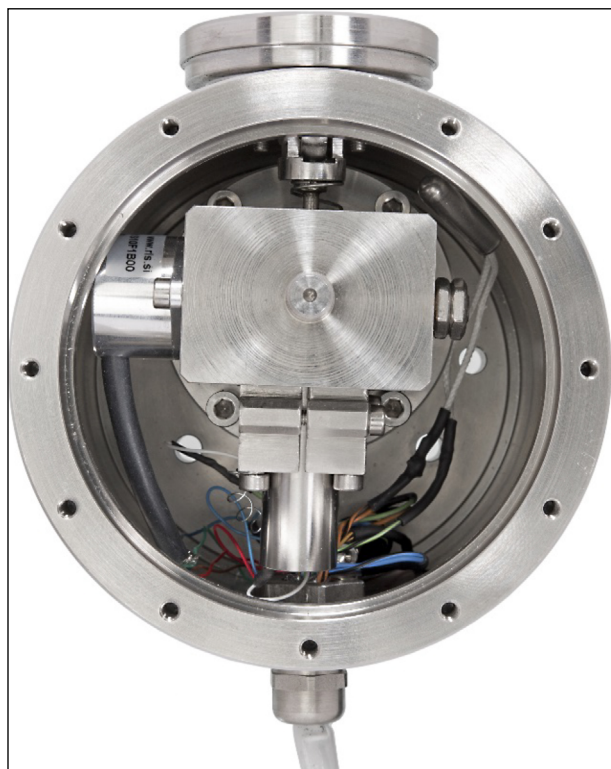


Bild 291: Geöffnetes Sensorsystem mit sichtbaren Einzelsensoren

talliert. Kontrollierte Überfahrten mit einem 20t Lkw im April und Juli sowie der Abgleich mit einem Falling Weight Deflectometer (FWD) führten zu plausiblen Messergebnissen und bestätigten die Funktionsfähigkeit der Sensorsysteme. Zwei weitere Sensorsysteme wurden zudem auf einer Fertigteilstrecke montiert. Der permanente Anschluss an eine Spannungsversorgung der vier Sensorsysteme konnte erst im August 2018 erfolgen.

Der Abgleich mit weiteren Messmethoden wie Setzdehnungsmessung, externem temporärem Kontrollsystem, sowie die Beständigkeit über bisher elf Monate zeigen, dass die oben genannten Anforderungen an die Sensorsysteme erfüllt wurden.

Fazit:

Es konnte ein innovatives robustes Mess-System entwickelt werden, welches allen geforderten Ansprüchen des Leistungskatalogs genügt bzw. diese sogar übertrifft.

6.2 Konzeption einer Mess-Station

Für die Messungen vor Ort sind neben den Sensorsystemen noch folgende Komponenten und Vorgänge notwendig:

- Wandlung der Messdaten
- Klassierung der Messdaten
- Versendung der Messdaten an die BAM
- Überbrückung von kurzzeitigen Stromausfällen
- Erfassung von Umgebungstemperatur und Feuchtigkeit
- Erfassung der Betondeckentemperatur in verschiedenen Tiefen
- Aufzeichnung des Verkehrs zum Abgleich der Messdaten

Für diese Aufgaben wurde eine Mess-Station errichtet, die im Wesentlichen aus einem DIN-gemonten Schaltschrank besteht, in der alle Komponenten untergebracht sind. Lediglich die Kamera ist gesondert auf einem Metallstab angebracht.

In Bild 292 ist das Innere des Schaltschranks abgebildet. Eine Liste mit den Komponenten sowie eine Betriebsanweisung sind an der Innenseite der Tür angebracht. Eine Abnahme zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit wurde vor dem Aufbau in



Bild 292: Fertig konfektionierter Schaltschrank von innen mit allen Steuerungskomponenten



Bild 293: Teil der installierten Mess-Station in situ

den Räumlichkeiten der BAM durch eine externe Firma durchgeführt.

Fazit:

Die Realisierung einer vorkonfektionierten Mess-Station für den Einsatz in situ wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Widerstandsfähigkeit gegenüber sämtlichen Witterungsbedingungen über dreizehn Monate ohne Einbuße der Leistungsfähigkeit bestätigt die sorgfältige Vorarbeit und die Auswahl der robusten Komponenten.

6.3 Fazit zur Datenübertragung

Im August 2018 wurde die Mess-Station (inklusive Datenfernübertragung) an eine permanente Spannungsversorgung angeschlossen. Seitdem werden Mess-Daten automatisch vor Ort verarbeitet und verschlüsselt an die BAM gesendet.

Bis auf temporäre Unterbrechungen liegt ein vollständiger Messdatensatz seit dem 18.08.2018 vor (siehe Bild 294).

Nach jeder Unterbrechung fuhr die Mess-Station automatisiert hoch und setzte das Messregime inklusive Übertragung planmäßig fort.

6.4 Fazit zur Datenauswertung

Aus den folgenden drei Gründen fand die Datenauswertung bisher weitgehendst manuell statt:

- Es liegt keine reale Verkehrsbelastung vor.
- Für die außerplanmäßigen Testszenarien musste das reguläre Testregime unterbrochen und manuelle Messungen gestartet werden.
- In den ersten fünf Monaten nach der Installation der Sensorsysteme waren diese von der Spannungsversorgung getrennt und konnten nur instationär mit Kabelverlängerungen versorgt werden.

Seit dem 18.08.2018 liegen Messdaten vor, die automatisch klassiert werden. Von jedem Tag werden die Maximal-, Minimal und Mittelwerte sowie mittlere Abweichungen vor. Stündlich wird ein maximales Zeitereignis von 12 Sekunden automatisch gespeichert. Zudem sind täglich vormittags und nachmittags zwei Zeitschriebe von zehn Minuten vorhanden. Da kein regulärer Verkehr auf der Teststrecke

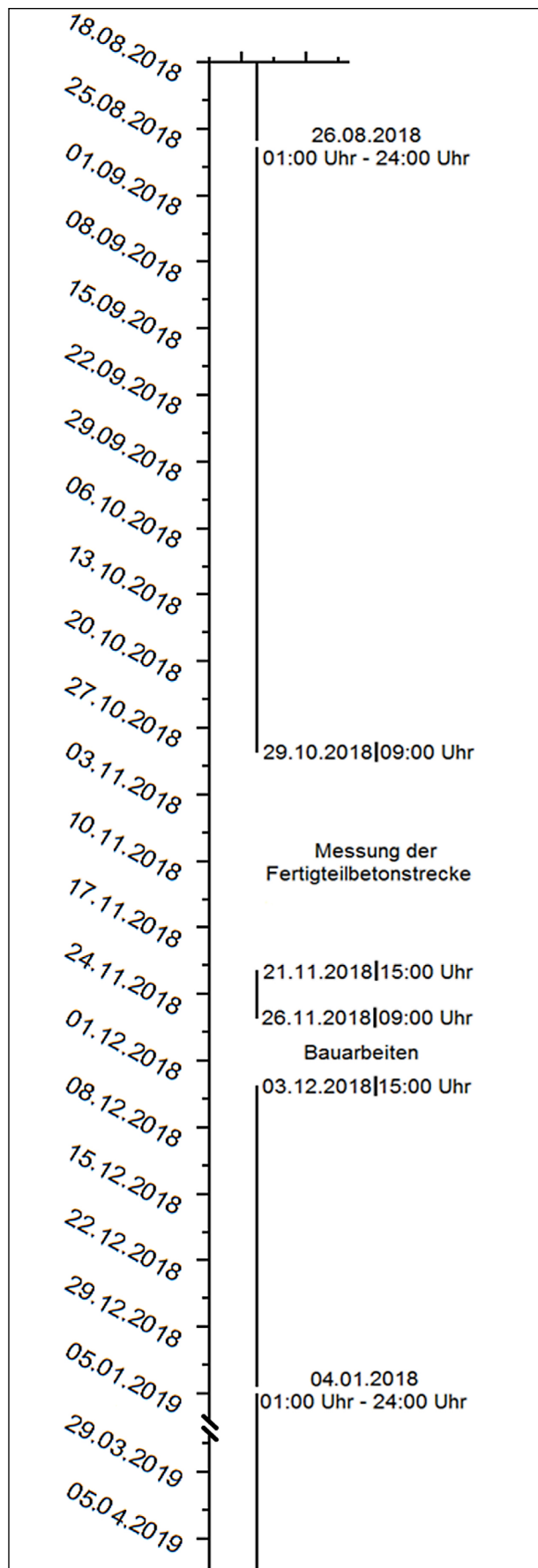


Bild 294: Erfassung der Messdaten auf der Waschbetonstrecke 40 des duraBAST



Bild 295: Plausibilität durch zusätzliche Messung mit einem Setzdehnungs-Messgerät (SDM)

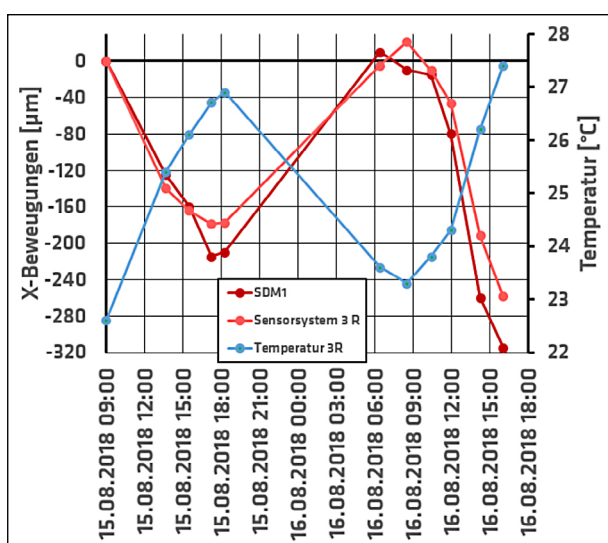


Bild 296: Messwertanzeige eines Sensorsystems und einer Setzdehnungsmessung in X-Richtung mit eingezeichneter Temperatur im Inneren des Sensorsystems über zwei Tage

vorhanden ist, sind lediglich die Temperaturwerte sowie die temperaturbedingten Bewegungen von Interesse (siehe auch Bild 297 und Bild 299).

Die manuellen Testmessungen zu Mess-Einsätzen mit Test-Lkw und FWD sind in den folgenden Abschnitten enthalten. Dabei zeigte sich die Vorgehensweise sowie die verwendete Software als zielführend.

6.5 Begleitende und validierende Datenerfassung

Neben der Erfassung der Relativbewegungen der Fugenflanken durch die oben beschriebenen Sensorsysteme wurden weitere Mess-Daten erfasst, teilweise um die Sensorsystemanzeigen zu validieren, teilweise um eine Interpretation zu erleichtern bzw. den Wirkmechanismus der Betonfahrbahndecke zu erfassen.

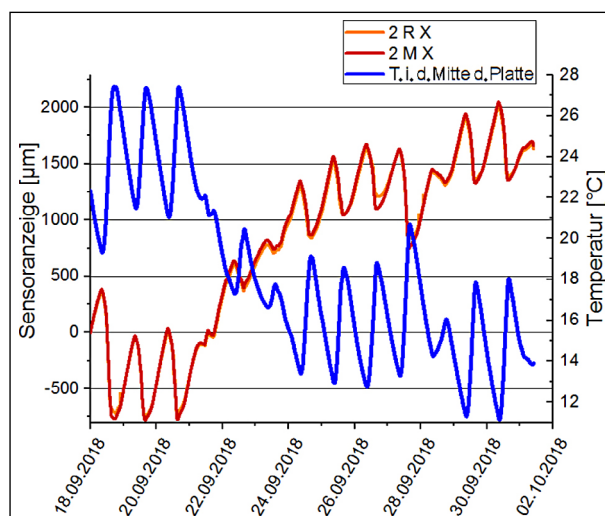


Bild 297: Betontemperatur in der vertikalen Mitte der Platte (T. i. d. Mitte d. Platte) und Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R und 2M in X-Richtung

6.5.1 Setzdehnungsmessung

Zur Validierung des Messwerts in X-Richtung wurden auf die Fahrbahnoberfläche Messmarken links und rechts der Fugen angebracht und mit einem Setzdehnungsmessgerät unter Anwendung eines speziellen Messnormals abgeglichen.

Fazit:

Die mittels Setzdehnungsmessgerät punktuell ermittelten Verformungen sind ein geeignetes Mittel, um die Messwerte des Sensorsystems zu validieren. Diese Vorgehensweise stellt die erste von drei Validierungsstufen dar (siehe Bild 296).

6.5.2 Erfassung des Umgebungsklimas

Das Umgebungsklima hat direkten Einfluss auf die Relativbewegungen der Fugenflanken. Steigende Temperaturen führen zu einer Ausdehnung der Fahrbahnplatten und damit zu einer Verringerung der Fugengbreite. Sinkende Temperaturen führen zu einer Vergrößerung der Breite des Fugenspaltes, da sich die Betonfahrbahnplatten zusammenziehen. Die Umgebungsfeuchtigkeit führt ggf. zu einem Aufquellen der Betonfahrbahnplatten und hat somit ebenfalls einen Einfluss auf die Sensoranzeigen.

Aus diesen Gründen sind die Deformationsmesswerte mit den erfassten Klimamessdaten zu verknüpfen.

Das Umgebungsklima wurde direkt neben den gemessenen Fugen erfasst. Die Auswertung bestätigte sowohl den oben beschriebenen Sachverhalt der Temperaturexpansion als auch die Sensoranzeige in X-Richtung (siehe Bild 297).

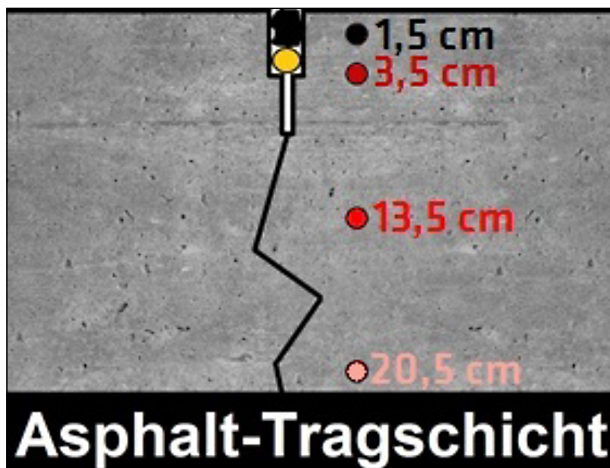


Bild 298: Anordnung der Temperatursensoren zur Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten

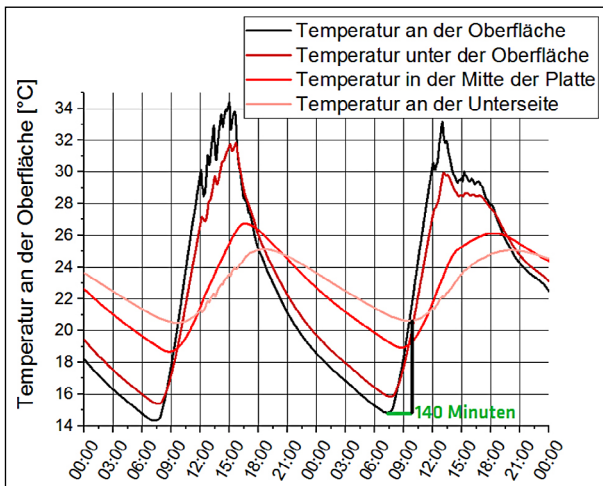


Bild 299: Temperaturverlauf am 1. und 2. September 2018

Es zeigte sich, dass die Dehnungen und Stauchungen der Betonfahrbahndecke aufgrund der Trägheit nicht direkt mit der Umgebungstemperatur zusammenhängen, sondern mit der in der Mitte der Fahrbahndecke gemessenen Betontemperatur.

Fazit:

Das erfasste Umgebungsklima ist eine sinnvolle Ergänzung, zur Bewertung der Ergebnisse sind jedoch die gemessenen Betontemperaturen wesentlich.

6.5.3 Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten in der Betonfahrbahndecke

Zur genauen Erfassung der Temperatureinwirkung auf die Betonfahrbahndecke wurden vier Temperatursensoren in den Fahrbahndeckenbelag eingebracht. Die genaue Anordnung ist in Bild 298 dargestellt.

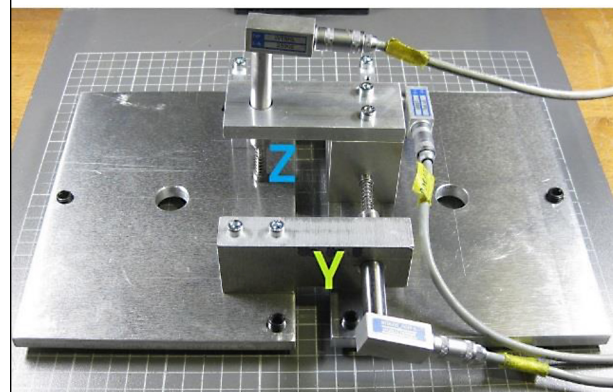
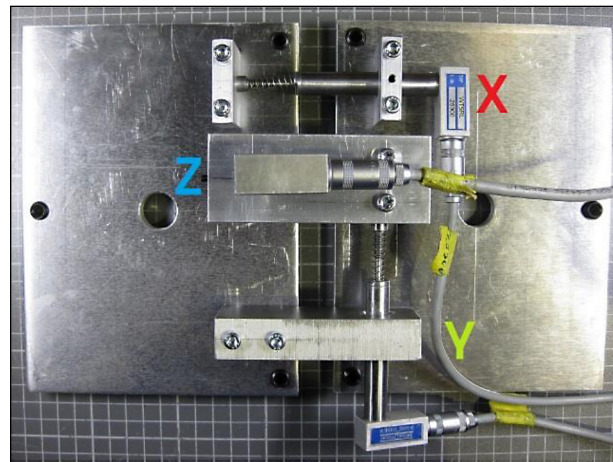


Bild 300: Temporäres Kontrollsystem mit eingezeichneten Mess-Richtungen; X = in Fahrtrichtung, Y = in Fugenrichtung (quer zur Fahrtrichtung), Z = vertikal

Aufgrund der Trägheit der Betonmasse sowie des Wärmeleitwiderstands sind die Temperaturverläufe in den Tagesdifferenzen mit der Tiefe geringer (an der Oberfläche zwischen 14 °C und 34 °C, an der Unterseite zwischen 20 °C bis 25 °C) und zeitlich versetzt (140 Minuten (siehe Bild 299)).

Fazit:

Die Einbaulage der Temperatursensoren erwies sich als zielführend. Es konnten plausible Zusammenhänge zu den Messwerten der Sensorsysteme hergestellt werden.

6.5.4 Zusätzliches Temporäres Kontrollsystem

Zur hochauflösenden und mehraxialen Validierung der durch Verkehr induzierten schnell ablaufenden Relativbewegungen der Fugenflanken wurde ein weiteres Sensorsystem entwickelt, dass auf die Fahrbahnoberfläche geschraubt werden kann. Dieses ist in der Lage in allen drei Raumrichtungen bis auf ein Mikrometer genau und mit der gleichen Messfrequenz wie die entwickelten Sensorsysteme zu messen.



Bild 301: Externes Temporäres Kontrollsystem im Praxiseinsatz an einer Fuge

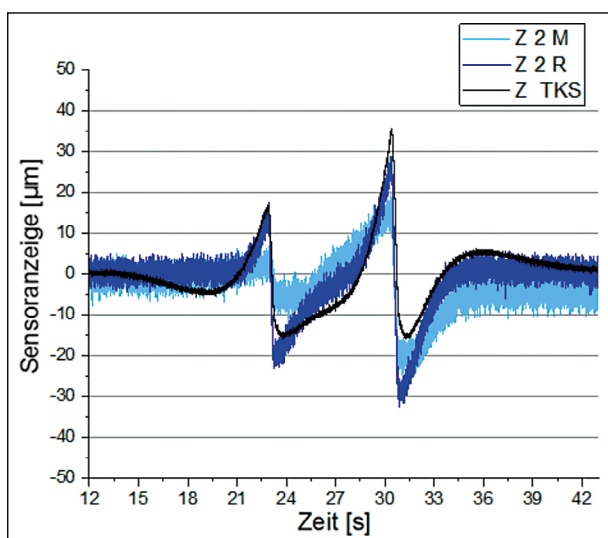


Bild 302: Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von zwei km/h

Fazit:

Mit dem temporären Kontrollsystem konnten die durch Verkehr induzierten Messwertverläufe des Sensorsystems validiert werden (siehe Bild 302). Zusätzlich zur Setzdehnungsmessung bestätigt diese zweite Stufe der Validierung die Eignung der Sensorsysteme.

6.5.5 Achslast-Messungen des überrollenden Lkw

Zur Kontrolle der Messwerte bei kontrollierten Überfahrten mit einem Test-Lkw wurden zuvor die Achslasten des Lkw durch die BASt bestimmt. Dies ergab, dass die vordere Achslast bei beiden Messeinsätzen jeweils etwa halb so viel wog, wie die hintere. Die genauen Achslasten waren:

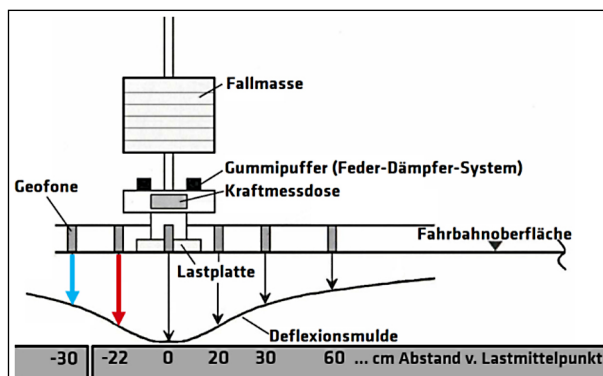


Bild 303: Skizze des FWDs; in rot und blau die beiden Geofone, die für die Differenzbildung zum Einsatz kamen

- Lkw 1 (April):
 - Gesamtlast: 19,48 t
 - Vorderachse: 7,34 t
 - Hinterachse: 12,14 t
- Lkw 2 (Juli):
 - Gesamtlast: 19,74 t
 - Vorderachse: 6,84 t
 - Hinterachse: 12,7 t

Das Verhältnis entspricht auch dem Verhältnis der Z-Achsen Sensoranzeigen der Sensorsysteme (siehe auch Bild 302).

6.5.6 Falling Weight Deflectometer (FWD)

Als dritte Validierungsstufe der Sensorsystemanzeige wurden FWD-Messungen durchgeführt. Dabei wird ein Impulseintrag mit einer Fallmasse auf die Fahrbahn aufgebracht. Die errechnete maximale Stoßkraft betrug 100 kN (siehe Bild 303).

Die Messdaten des FWDs an den beidseitig der Fugen liegenden Geofone wurden voneinander abgezogen und mit den Messdaten des darunter befindlichen Sensorsystems verglichen (siehe Bild 304).

Fazit:

Mit den FWD-Messungen konnten die Sensorsystemanzeigen in Z-Richtung validiert werden. Zusätzlich zur Setzdehnungsmessung und zum temporären Kontrollsystem bestätigt diese dritte Stufe der Validierung die Eignung der Sensorsysteme. Somit konnten die Sensorsysteme auch mit einem in der Praxis bewährten Impaktverfahren zur Zustandsbewertung von Betonfahrbahndecken validiert werden.

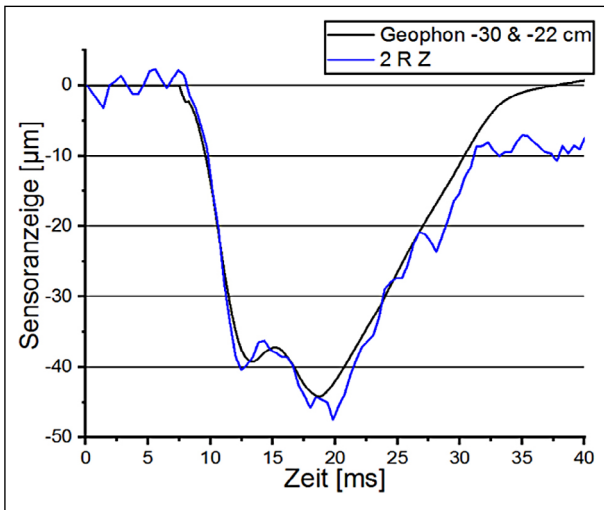


Bild 304: Vergleich der FWD-Messwerte und der Sensoranzeige des darunter liegenden Sensorsystems bei FWD-Beanspruchung

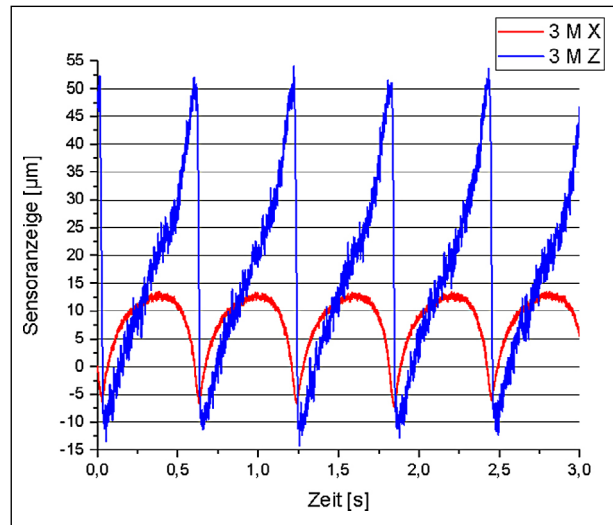


Bild 307: Verformungen in X- und Z-Richtung nach ca 90.000 Zyklen

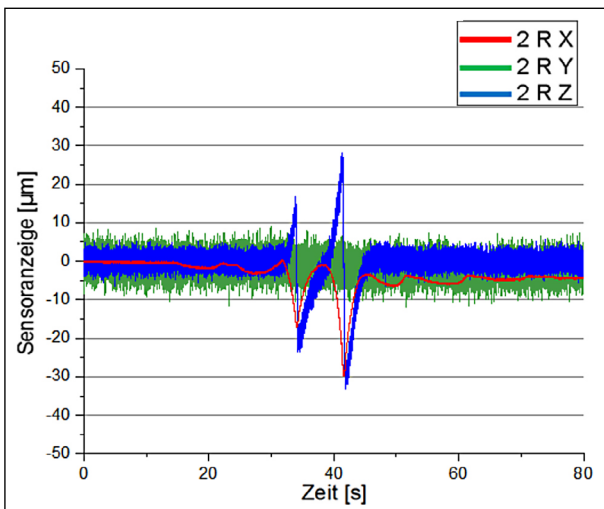


Bild 305: Überrollung der Sensorsysteme mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse: 7,3 t, Gewicht der Hinterachse: 12,1 t

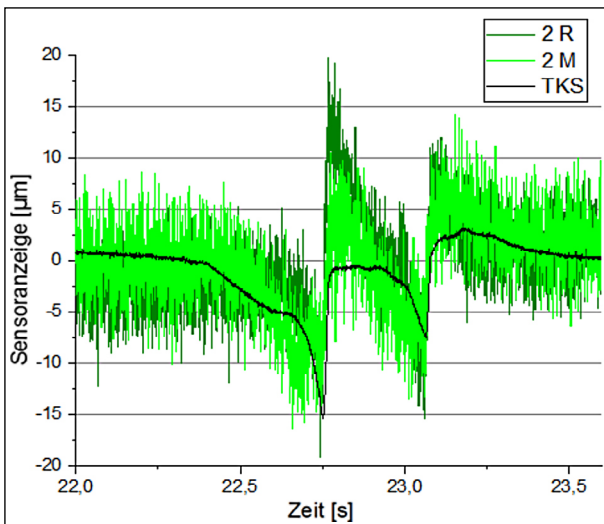


Bild 306: Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Y-Richtung bei Bremsvorgang

6.6 Ergebnisse der Feldmessungen unter realen Beanspruchungen

Zur Ermittlung realer Beanspruchungen von Fugensystemen wurden mehrere Messkampagnen durchgeführt:

- Lkw: 2 Messeinsätze (12. April und 11. Juli)
- MLS : 2 Messeinsätze (15. August und 01. November)
- Langzeitdaten seit 18.08.2018

Die Überrollung mit einem Lkw führte zu signifikanten Bewegungen in X- und Z-Richtung (siehe Bild 305). Bei einem Bremsvorgang konnten auch Bewegungen in Y-Richtung gemessen werden (siehe Bild 306).

Die Beanspruchung mit einem mobilen Belastungssimulator der BAST führte zu signifikanten Fugenbewegungen in X- und Z-Richtung (siehe Bild 307).

Die Langzeitdaten zeigen thermisch bedingte Ausdehnungen der Betonfahrbahnplatten bzw. Stauungen der Fugenkammer (siehe Bild 297).

Fazit:

Die Relativbewegungen der untersuchten Fugenflanken konnten in dynamischen und quasistatischen Belastungsmodi hochauflösend und in drei Bewegungsachsen gemessen werden. Damit können die realen Beanspruchungen der Fugenfüllsysteme in der Straßenbaupraxis ermittelt werden.

7 Fazit zum Forschungsvorhaben „Optimierung von Fugenkonstruktionen“

7.1 Zusammenfassende Bewertung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Mess-Station mit sechs wiederverwendbaren Sensorsystemen entwickelt, konstruiert, gefertigt und unter realen Bedingungen erprobt. Die Mess-Station ist so ausgelegt, dass eine automatische Übertragung der im Feld gewonnenen Messdaten unter den Bedingungen im BAB-Netz möglich ist. Das Funktions- und Entwicklungsschema der entwickelten messtechnischen Lösung ist in nachfolgendem Bild dargestellt (siehe Bild 308). Mithilfe von mehraxial messenden Sensorsystemen sowie begleitender Sensorik (Temperaturmessung des Betonbelags, Klima-Sensorik, Sensorik zur Verkehrserfassung) unter digitaler Ansteuerung sowie Datenerfassung und Datentransfer ist eine online Datenerfassung, -klassifizierung und -bereitstellung entsprechend der Aufgabenstellung möglich.

Es zeigte sich, dass unter praktischen Nutzungsbedingungen mehraxiale Relativbewegungen der Fugenflanken in einer großen Messbereichsspanne auftreten und bei der zukünftigen Optimierung und Dimensionierung von Fugenfüllsystemen für hochbeanspruchte Betonfahrbahndecken berücksichtigt werden müssen, will man die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit erhöhen.

Für eine umfassende repräsentative Bewertung der realen Beanspruchungen von Fugenfüllsystemen in den derzeitigen Betonfahrbahnkonstruktionen unter den gegebenen verkehrlichen und verschiedenen klimatischen Bedingungen liegt eine robuste, kompakte, variabel einsetzbare und hochauflösende messtechnische Lösung zur Verfügung. Die Fragestellungen und Ziele des Forschungsvorhabens wurden vollumfänglich beantwortet bzw. erfüllt.

7.2 Ausblick

Durch die erfolgreiche Entwicklung eines innovativen, hochgenauen und robusten Sensorsystems zur Ermittlung der Relativbewegung von Fugenflanken in Betonautobahnen ergibt sich erstmalig die Möglichkeit einer umfassenden Ermittlung realer Beanspruchungen von Fugensystemen im Bundesfernstraßenbereich.

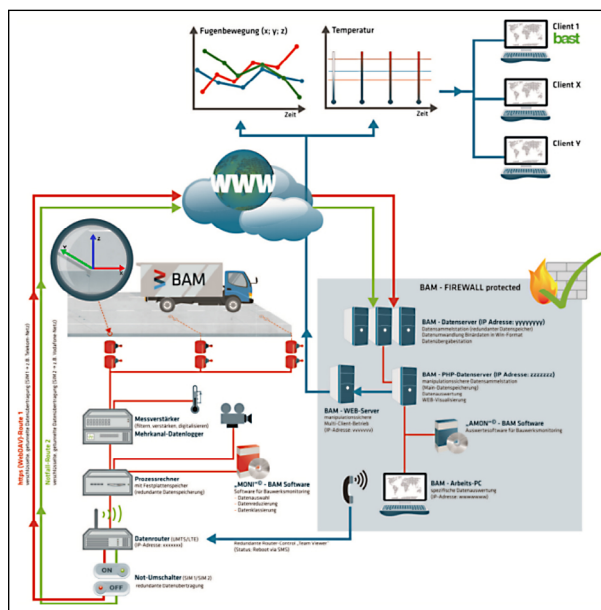


Abbildung 308: Funktionsschema des Projekts "SensoJoint"

Mit einer hinreichend großen Datenmenge durch den Einsatz des neu entwickelten Sensorsystems in verschiedenen beanspruchten Abschnitten des deutschen BAB-Netzes und verschiedenen Bauweisen lassen sich die realen Verformungen ermitteln und möglicherweise Beanspruchungskategorien zuordnen. Es ergibt sich erstmals die Option einer wissenschaftlich fundierten ingenieurtechnischen Bemessung von Fugen und Fugenfüllsystemen. Dies eröffnet die Möglichkeit, das bisher empirisch basierte Regelwerk auf eine performance-basierte Bemessungsgrundlage umzustellen. Gleichzeitig kann die Bauproduktzulassung auf eine baupraxisnahe Basis gestellt werden. Fugenfüllsysteme können nunmehr unter realen Beanspruchungsbedingungen validiert und zugelassen werden. Die im Lebensdauermodus zu erwartenden Dauerhaftigkeitsbeanspruchungen können erstmals quantifiziert werden.

Damit sind die technischen Grundlagen einer qualifizierten Abschätzung der Restnutzungsdauer, der Wartungsintervalle und des Instandsetzungsbedarfs von hochbeanspruchten Fugenbereichen in Bundesautobahnen geschaffen.

Schlussendlich bietet eine fundierte Datengrundlage die Möglichkeit einer gezielten Optimierung und Fortentwicklung von Fugenfüllsystemen für hochbeanspruchte Betonfahrbahndecken und kann zur Aufstellung performance-orientierter Dimensionierungsregeln verwendet werden.

Für erweiterte wissenschaftlich-technische Fragestellungen kann es sich als sinnvoll erweisen zu-

sätzliche Messgrößen zu ermitteln und diese in direkten Bezug zu den Messgrößen der Sensorstation zu stellen. Eine Anregung hierzu kann die wissenschaftliche Entwicklung einer integrierten Absolut-Bewegungsmesseinheit darstellen. Dies kann eine zusätzliche Beurteilung des Formänderungsverhaltens des Deckensystems ermöglichen.

Allgemein sind weitere Voraussetzungen geschaffen, jede Art von erforderlichen Fugenkonstruktionen auf eine aktuelle messtechnische Dimensionierungs- und Bewertungsgrundlage zu stellen (zum Beispiel Raumbaugen bei Belagswechsel, Übergang von der freien Strecke auf Ingenieurbauwerke).

Die digitale Datenstruktur ermöglicht es, die reale Beanspruchung von Betondeckenoberbauten in situ in einen digitalen Zwilling zu überführen und mithilfe unterschiedlichster Parameterstudien weiterführende Forschungen zur Langlebigkeit der Bundesfernstraßen durchzuführen. Sie bietet weiterhin die Option der Übertragung von Echtzeit-Daten aus dem Feld in moderne Versuchseinrichtungen und kann somit eine direkte Labor-Praxis-Anbindung eröffnen.

Literatur

- [1.1] Bundesverkehrswegeplan 2030
Herausgegeben vom: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
2016; 185 Seiten
- [1.2] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen RStO 12
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement
FGSV Verlag GmbH; Heft 499/12/12; 50999
Köln; Wesselinger Straße 17
ISBN 978-3-86446-021-0
- [1.3] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen RDO Beton 09
Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement
FGSV Verlag GmbH; Heft 497; 50999 Köln;
Wesselinger Str. 17
ISBN 978-3-941790-27-8
- [1.4] BMVBS-BAST_Industrie Ad-hoc-Sitzungen
„Aktuelle Situation Fugenverguss – Problemanalyse und Entwicklung von Problemlösungen“
2012; Bundesanstalt für Straßenwesen
14.08.2012
2013; Bundesanstalt für Straßenwesen
06.08.2013
- [1.5] VATER; RECKNAGEL; MÜHLNIKEL
Literaturauswertung und Übersicht zum Stand der Forschung und Technik sowie der Prüfvorschriften auf nationaler und internationaler Ebene zur Kennzeichnung des Alterungsverhaltens von Fugenfüllsystemen
1997; Forschungsbericht FE 08.146 G95G;
213 Seiten
- [1.6] RECKNAGEL; HUTH
Untersuchungen zur Kennzeichnung der Dauerhaftigkeit von Fugenfüllstoffen unter praktischer Beanspruchung im Bundesfernstraßenbereich (Feldversuchsstrecke)
2012; Fo.-bericht FE 08.169/2001/FRB; 228
Seiten
- [1.7] Merkblatt für den Bau von Betonstraßen;
1928; STUFA Studiengesellschaft für das Straßenwesen
Vorläufige Lieferungsbedingungen für bituminöse Fugenvergussmassen für Betonstraßen; 1936 STUFA Studiengesellschaft für das Straßenwesen
In Strassenforschung - 50 Jahre Forschungsgesellschaft für das Strassenwesen
1924 - 1974
1974; Kirschbaum Verlag Bonn; 387 Seiten
- [1.8] ZTV Fug-StB 15; TL Fug-StB 15; TP Fug-StB 15
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Fugenfüllungen in Verkehrsflächen 2015
2015; FGSV-Verlag Nr. 897/1; 38 Seiten
- [1.9] DIN EN 14188-1
Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 1: Anforderungen an heiß verarbeitbare Fugenmassen
2004; Beuth Verlag GmbH; 20 Seiten
- [1.10] DIN EN 14188-2
Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 2: Anforderungen an kalt verarbeitbare Fugen-

- massen
2005; Beuth Verlag GmbH; 21 Seiten
- [1.11] DIN EN 14188-3
Fugeneinlagen und Fugenmassen – Teil 2:
Anforderungen an elastomere Fugenprofile
2006; Beuth Verlag GmbH; 18 Seiten
- [1.12] RECKNAGEL; PIRSKAWETZ
Entwicklung eines Prüfverfahrens zum Alterungsverhalten von Fugenfüllsystemen in Verkehrsflächen
2005; BAST; Forschungsbericht FE 08.169/2001/FRB Bearbeitungphase 1; 95 Seiten
- [1.13] RECKNAGEL; HUTH
Untersuchungen zur Kennzeichnung der Dauerhaftigkeit von Fugenfüllstoffen unter praktischer Beanspruchung im Bundesfernstraßenbereich (Feldversuchsstrecken)
2012; BAST; Forschungsbericht FE 08.169/2001/FRB Bearbeitungphase 5; 228 Seiten
- [2.1] VATER; RECKNAGEL; MÜHLNIKEL
Alterungsverhalten von Fugenfüllsystemen in Verkehrsflächen - Literaturlauswertung und Übersicht zum Stand der Forschung und Technik sowie der Prüfvorschriften
1997; BAST; Forschungsbericht FE 08.146 G95G; 213 Seiten, unveröffentlicht
- [2.2] Stephan FREUDENSTEIN, Dieter BIRMANN
Auswertung von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (S65)
Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft
2010
- [2.3] Günter LEYKAUF, Dieter BIRMANN, Olaf WELLER
Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB), Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (S55)
Wirtschaftsverlag N.W. Verlag für neue Wissenschaft
2008
- [2.4] Günter LEYKAUF, Dieter BIRMANN
Langzeitverhalten von Betondecken mit über 20 Jahren Liegedauer: [Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 08.142 G 96 C des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen], Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 807, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr
2001
- [2.5] Josef EISENMANN, Dieter BIRMANN
Experimentelle Untersuchungen des Abriebes und der Erosion von gebundenen Tragschichten unter Betondecken; Erosion zementgebundener Tragschichten unter Betondecken
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H.725
Typo-Dr.- und Verl.-Ges.
1996
- [2.6] Andres ZACHLEHNER
Beanspruchung von Betonfahrbahnen durch Einflüsse aus Hydratation und Witterung
Technische Universität München, Dissertation
1989
- [2.7] Olaf WELLER
Das Tragverhalten ungebundener Schichten und der Einfluss von Wasser unter Betondeckensystemen
Technische Universität München, Dissertation
2008
- [2.8] Josef EISENMANN, Dieter BIRMANN
Erforschung des Langzeitverhaltens eines neuartigen Deckensystems mit Geotextileinlagen zur flächenhaften Entwässerung
Prüfamt für Bau von Landesverkehrswegen der Technischen Universität München
1988
- [2.9] Walter EGER
Langzeitverhalten von Betonstrassen: eine Untersuchung mit statistischen und wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden
Prüfamt für Bau von Landesverkehrswegen der Technischen Universität München
Technische Universität München, Dissertation
1995
- [2.10] Bernhard ZANKER
Biegebeanspruchung in Betondecken für Straßenverkehrsflächen: Einfluß von Tragfähigkeit und Verformungsverhalten der Unterlage sowie von Vorverformungen im Deckensystem

- Technische Universität München, Dissertation
1988
- [2.11] Stephan FREUDENSTEIN
Untersuchungen über den Einfluss reduzierter Dübelbindelängen auf die Wirksamkeit der Fugenkonstruktion bei Betonstraßen
Prüfamt für Bau von Landesverkehrswegen der Technischen Universität München
2001
- [2.12] Günther LEYKAUF, Nasser MALEKI
Tragverhalten von Betondecken im Fugen- und Rissebereich: Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente
Prüfamt für Bau von Landesverkehrswegen der Technischen Universität München
1983
- [2.13] Güther LEYKAUF, Dieter BIRMANN
Messungen an einer Bundesautobahn mit einer dünnen Asphaltsschicht auf einer neuen Betondecke: (A93 bei Brannensburg)
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr
2001
- [2.14] Stephan FREUDENSTEIN
Beanspruchungskonforme Dimensionierung von Betonfahrbahnen
Zeitschrift Straße und Autobahn (6)
2014
- [2.15] Stephan FREUDENSTEIN, J. EID
Eigenschaften und Anwendung von White-topping
Zeitschrift Straße und Autobahn (6)
2012
- [2.16] Stephan FREUDENSTEIN, Dieter BIRMANN
Auswertung von Dübellagen zur Qualitätssicherung beim Betondeckenbau
Zeitschrift Straße und Autobahn (11)
2011
- [2.17] Stephan FREUDENSTEIN, Dieter BIRMANN
Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenaufbaus
Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (S 65)
2011
- [2.18] M. RAY
Hydrodynamik des Pumpens und Materialentzug durch Auswaschung an Tragschichten unter Betondecken
Zeitschrift Straße und Autobahn (10), S. 445, 0690
1979
- [2.19] P. GRÜBL
Fugen mit und ohne Verguß in Verkehrsflächen aus Beton – Erfahrungen in den USA
Zeitschrift Straße und Autobahn (2), S. 57, 0719
1986
- [2.20] L. PFEIFER
Bau von Betondecken auf ungebundenen Tragschichten
Zeitschrift Straße und Autobahn (3), S. 143, 0764
1996
- [2.21] R. GRÜNING
Fahrbahndecken für hohe Verkehrsbelastung
Zeitschrift Straße und Autobahn (6), S. 297, 0769
1997
- [2.22] P. SULTEN u. a.
Anwendung von Geotextilien im Betondeckenbau
Zeitschrift Straße und Autobahn (6), S. 287, 0780
1999
- [2.23] Günther LEYKAUF
Betondecken nach 30 Jahren schwerer Verkehrsbeanspruchung
Zeitschrift Straße und Autobahn (9)
1999
- [2.24] EILERS
Fugenbewegungen an der Ruhrthalbrücke Mintard
BASt-Bericht B 90; 2012
- [2.25] BBM Müller
Einfluss der Fugenbreite auf akustische Eigenschaften von Fahrbahndecken aus Beton
BASt-Bericht FE 08.232 (derzeit noch in Bearbeitung)

- [2.26] GOLKOWSKI, Wolf
Untersuchungen zum Schadensmechanismus im Fugenbereich von Betonfahrbahnen unter simulierter Verkehrsbelastung durch Dauerbelastungsversuche mit dem Impulsgeber an einer Modellstraße
BASt-Bericht ITRD 06 343/S4
- [2.27] LECHNER
Technische Universität München
Anforderungen an Fugenfüllsysteme aufgrund des Temperaturverhaltens von Betondecken
BASt-Bericht S 15; ITRD D 704922
1997
- [2.28] FREUND, GROSSMANN, ROOS, STAMMLER
Langzeitverhalten von dicken Betondecken
BASt-Bericht FE 08.134 G94 C
1999 Karlsruhe
- [2.29] FREUND, GROSSMANN, ROOS, STAMMLER
Vergleichende Untersuchungen der Gebrauchseigenschaften von Betonfahrbahnen mit unterschiedlichem Konstruktionsaufbau auf der Grundlage systematischer oberflächenbezogener Messungen
BASt-Bericht FE 08.134 G94C
2004 Karlsruhe
- [2.30] ROSSBACH
Untersuchungen des Verhaltens von Fugenfüllungen in Erprobungsstrecken
BASt-Bericht AP-Nr. 02332/S3
2005
- [2.31] FREUND, GROSSMANN, ROOS, STAMMLER, GROSSMANN, MÜLLER, GUSE
Untersuchungen an Betonfahrbahnen mit HGT
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (942)
2006
- [2.32] RÜBENSAM, HELLMANN, STAROSTE, STOLTZ
Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit und bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt und Beton auf bestehende Bundesautobahnen
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (914)
2005
- [2.33] STEIGENBERGER, PICHLER, WISTUBA, LITZKA
Fugen in Betonstraßen im Freilandbereich – Sonderuntersuchungen
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Schriftreihe Straßenforschung (536)
2003 Wien
- [2.34] Dieter BIRMANN, Günther LEYKAUF
Verhalten von Betondecken auf Geotextileinlagen...
BASt-Bericht FE 08.145 R 95 C
2000
- [2.35] BIRMANN, D.
Langzeitbeobachtung der Fugenöffnung von Betonfahrbahnen/ Long-term behaviour of joint grooves in concrete pavements – measurements and evaluation
Zeitschrift Straßen- und Tiefbau/
M90011006683
1989
- [2.36] GUNIA, K.
Moderne Fugenabdichtungen – je mehr Wasser desto dichter/ Modern joint seals – the more water there is, the more effective they are
Zeitschrift Tunnel/ M89020644694
1988
- [2.37] BLÜMEL, W.; LIERSE, J.
Baubegleitende Verformungsmessungen an einem Schlitzwandschacht mit großem Durchmesser/ Deformation measurements at a subterranean curtain during construction
Tagung der VDI-Gesellschaft Meß- und Automatisierungstechnik, GESA-Kolloquium, Experimentelle Verfahren zur Lösung bautechnischer Aufgaben
Beitrag (Konferenz) VDI-Berichte
1995
- [2.38] STEIGENBERGER, J.
Aktuelle Entwicklungen beim Betonstraßenbau
Zeitschrift Zement und Beton/ 20000400991
2000
- [2.39] FASTABEND, M.; BRAASCH, T.; AMEND, H.
Betonfahrbahnplatten auf gedämmten Parkdecks. Beanspruchungen und Erfahrungen/ Concrete road slabs of insulated parking floors – Action effects and recommendations

- Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20030304078
2003
- [2.40] SAIANG, D.; MALMGREN, L.; NORDLUND, E.
Laboratory tests on shotcrete-rock joints in
direct shear tension and compression/ La-
borversuche an Spritzbeton-Gesteinsfugen
mit direkter Scherung, Zug und Druck
Zeitschrift Rock Mechanics and Rock Enge-
nering/ 20060202378
2005
- [2.41] Anonym
Bauwerksabdichtung mit Dehnfugenkonstruk-
tion
Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20051202505
2005
- [2.42] MANGOLD, M.
Risse, Fugen, Flächen – dicht.
Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20050901547
2005
- [2.43] BREITENBÜCHER, R.
Potenzielle Ursachen der Rissbildung in Be-
tonfahrbahndecken
Beitrag (Konferenz) Internationale Baustoff-
tagung/ 20070107350
2006
- [2.44] LEYKAUF, G.; BIRMANN, D.; MEIER, S.
Durchgehend bewehrte Betondecke/ Conti-
nuously reinforced concrete pavements
Report Forschung Straßenbau und Straßen-
verkehrstechnik/ 20061001125
2006
- [2.45] HÖLLER, S.; SULTEN, P.
Vliesstoff zwischen Betonfahrbahndecke
und Tragschicht – ein flexibler Verbund
Beitrag (Konferenz) Bewehrungen mit Geo-
kunststoffen, Bautex/ 20061101566
2006
- [2.46] HÖLLER, S.
Untersuchungen zur Wirkung von Vliesstof-
fen unter Betondecken
2003; BASt Bericht 00330/S3;
50 Seiten
- [2.47] ZHA, X.; XIAO, Y.; WENQIANG, W.
Testing method of crack width for continu-
ously reinforced concrete pavement based
on image processing technique/ Testverfah-
ren zur Rissbreite in fugenlosem Stahlbeton-
straßenbelag auf der Grundlage der Bildver-
arbeitungstechnik
Beitrag (Konferenz) Structural Faults and
Repair, Int. Conference and Exhibition/
20060806711
2006
- [2.48] FÖRSTER, M.-O.; HOTHAN, J.
Blow Up – Hitzeschäden an Betonfahrbah-
nen
Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20071007792
2007
- [2.49] MÜLLER, A. J.
Zum Zug- und Schubtragverhalten von Be-
tonfugen
Dissertation/ 20090903586
2009
- [2.50] Anonym
Sanierung von Beton-Fahrbahnen
Zeitschrift Bauingenieur/ 20100205802
2010
- [2.51] MÜLLER, C.; EICKSCHEN, E.;
PIERKES, R.
Untersuchungen zur Verzögerung des Scha-
densfortschritts bei AKR-geschädigten Fahr-
bahndecken aus Beton
Report Forschung Straßenbau und Straßen-
verkehrstechnik/ 20101005566
2010
- [2.52] LIEBSCHER, M.; REDMANN, A.; BER-
SUCK, F.
Neuartiges System zur Fugenvermessung
beim Rohrvortrieb – Praxistest/ Innovative
system for inspection of joints in pipe ja-
cking: A practical test
- [2.53] KIRSCHKE, D.
Spezifische Mängel und Schäden an Block-
fugen: Ursachen und Möglichkeiten der Ver-
meidung
Zeitschrift Felsbau magazin/ 20120100014
2011
- [2.54] WARREN, K. A.; WHELAN, M.; ADAMS, M.;
NICKS, J.
Preliminary Evaluation of Thermally Induced
Strains and Pressures Developed in a GRS

- Integrated Bridge System
Beitrag (Konferenz) Geosynthetics Conference/ 20140607640
2013
- [2.55] RIFFEL, S.
Whitetopping – Beton für die Instandsetzung!
Zeitschrift Straßen- und Tiefbau/
20141206653
2014
- [2.56] HOHMANN, R.
Auswahl und Planung von Fugenabdichtungssystemen für WU-Konstruktionen/ Selection and Design of joint Waterproofing Systems for Watertight Concrete Structures
Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20141010768
2014
- [2.57] STEIGENBERGER, J.
Aktuelle Entwicklung beim Betonstraßenbau
Zeitschrift Zement und Beton/ 20000400991
2000
- [2.58] SULTEN, P.
Eine innovative Bauweise: Betonfahrbahn-
decke auf Vliesstoff nach RStO 01/ A concrete roadway covering on nonwoven fabrics according to RStO 01
Zeitschrift Straßen. Und Tiefbau/
20030105532
2002
- [2.59] EILERS, M.
Fugenbewegungen an der Ruhrtalbrücke
Mintard/ Joint movements on the Ruhr Valley Bridge
- [2.60] Mintard
Zeitschrift Straßen- und Tiefbau/
20130505723
2013
- [2.61] WRIGHT, JARED R.; RAJABIPOUR, F.; LAMAN, J. A.; RADLINSKA, A.; KAPPOS, A.
Causes of Early Age Cracking on Concrete Bridge Deck Expansion Joint Repair Sections
Zeitschrift Advances in Civil Engineering/
20140405850
2014
- [2.62] TAKABATAKE, H.; YASUI, M.; NAKAGAWA, Y.; KISHIDA, A.
Relaxation method for pounding action between adjacent buildings at expansion joint
Zeitschrift Earthquake Engineering and Structural Dynamics/ 20140606376
2014
- [2.63] YU, J.-L.; YANG, D.
Construction Technical Measures and Control of Concrete Temperature Cracking for a Mass Flat Plate Type Raft Foundation
Beitrag (Konferenz) Mechanics and Materials/ 20140320575
2014
- [2.64] SCHMIDT, M.; FEHLING, E.; BRAUN, T.
Grouted Connections von Offshore-Windenergieanlagen. Teil 1: Zustimmung im Einzelfall, Materialien und Qualitätssicherung
Zeitschrift Stahlbau/ 20140510676
2014
- [2.65] GEBHARDS, G.; SCHRÖDER, L.
Innovative Produkte und Techniken: Bauliche Erhaltung der Straßeninfrastruktur/
Structural maintenance of the road infrastructure
Zeitschrift Straßen- und Tiefbau/
20111103869
2011
- [2.66] Anonym
Abdichtungen mit Fugenblech, Injektions-schläuchen und Quellbändern
Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau/
20050501855
2005
- [2.67] Anonym
700 m Schwerlastrinnen für Entwässerung und sicheren Verkehr
Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau/ 20041002996
2004
- [2.68] WILMERS, W.
Einsatz von Geotextilien im Betondeckenbau
Zeitschrift Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau/ M99116047574
1999
- [2.69] BERKES, G.; KELLNER, L.
Begleitende und Ergänzende Messungen/
Accompanying and additional measurements
Kapitel (Buch)/ E95116433245
1995

- [2.70] LIU, X.-X.; WANG, S.-T.
Joint sealant fatigue property of airport concrete pavement
Zeitschrift Journal of Traffic and Transportation Engineering
2006
- [2.71] ROGERS, A. D.; LEE-SULLIVAN, P.; BREMNER, T.
Method of fatigue testing of concrete highway joint sealants in shear/ Methode der Ermüdungsprüfung durch Scherung von Straßenbetonbindemitteln
Zeitschrift Journal of Testing and Evaluation/ W98060113430
1998
- [2.72] CHAUCHOT, J.; DARBOIS, B.; BALAY, J.; NISSOUX, J.
Experiment of concrete pavements on LCPC's fatigue test track
1992
Literaturverzeichnis Dokumentation Straße
- [2.73] IOANNIDES, A.M.; ALEXANDER, D.R.; HAMMONS, M.I.
Die Anwendung von künstlichen Neuralnetzen für die Beurteilung von Fugen in Betonstraßen
1996
- [2.74] BIEL, T.D.; LEE, H.
Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Fugenabdichtungen bei Zementbetondecken
1997
- [2.75] SHOBER, S.F.
Das große Nichtvergießen eine Perspektive des Fugenvergusses von Betondecken
1997
- [2.76] KHAZANOVICH, L.; DARTER, M.I.
Das Abbrechen an den Querfugen von unbewehrten und bewehrten Betonfahrbahnen
1998
- [2.77] ALQADI, I.L; ABOQUADIS, S.; KUHRI, R.E.
Methode zur Beurteilung des Fugenfüllstoffes unter periodischen Schub- und konstanten horizontalen Verformungen
1999
- [2.78] MORIAN, D.A.; SUTHAHAR, N.; STOFFELS, S.
Bewertung der Bewegungen von Fugenabdichtungen in Betondecken
1999
- [2.79] HAWKINS, K.K.; IONNIDES, A.M.; MINKARAH, I.A.
Verfüllung oder nicht verfüllen - Ein Großversuch zur Lösung des alten Problems
2001
- [2.80] HEAN, S.; PARTL, M.N.
Fugenabdichtungen: Langzeitverhalten von Fugenvergussmassen aus Polymerbitumen auf Versuchsstrecken
2003
- [2.81] IONNIDES, A.M.; LONG, A.R.; MINKARAH, I.A.
Fugenfüllstoffe und Dauerhaftigkeit der Betondecke auf dem Testabschnitt der Route 50 in Ohio
2004
- [2.82] FÖRSTER, M.-O.
Temperaturbedingte Beanspruchungen von Betonfahrbahnen
2005
- [2.83] JEONG, J.H. ; LEE, J.H. ; SUH, Y.C.
Der Einfluss der Plattenverformung auf die Bewegung und die Querkraftübertragung an Fugen
2006
- [2.84] HERABAT, P.; KERDPUT, N.
Analyse des Schadensmechanismus der Fugendichtung in bewehrten Betondecken
2006
Literaturverzeichnis ITRD
- [2.85] NESHVADIAN, KEIVAN; ZOLLINGER, DANG
Definition of Wet Days and Evaluation of Joint Seal Effectiveness in Concrete Pavement Design
2015
- [2.86] ROGER, A D; LEE-SULLIVAN, P; BREMNER, T W
Selection Concrete Pavement Joint Sealants. I: Proposed Test Protocol
1999

- [2.87] CHO, YONG K
Advanced Cleaning Device to Remove Debris and Chemicals for Crack/Joint Sealing in Pavement
2013
Literaturverzeichnis FOST
Pavement Research Plan
2015; www.cproadmap.org/publications
- [2.88] Dr. KARCHER, Dipl.-Ing. KUBANK KIT
Karlsruhe
Auswirkungen der Fugenpflege auf die Lebensdauer von Betondecken
BASt-Bericht B 68
2009
- [2.89] KRELLE; MARQUORDT
Fahrbahndecken aus Beton aus Sicht des Auftraggebres
Zeitschrift Straße und Autobahn (3), S. 174, 183
2016
- [2.90] KEMPKENS; SAWO
Ingenieurbauwerke – Konzepte zur leistungsfähigen Sensordatenüberwachung
Zeitschrift Straße und Autobahn (4), S. 272
285
2016
- [2.91] BIRMANN
Tragschichten ohne Bindemittel unter Betondecken
Zeitschrift „Griffig“; Heft 2/2009; Seite 10 – 15
2009
- [2.92] Verhalten von Betondecken auf Geotextil-Einlagen und Anforderungen an Geotextilien
Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 901; 86 Seiten
2004
- [2.93] WERNER; SHOOJATI; CAPREZ
Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen
Bericht des Schweizerischen Bundesamtes für Strassen Nr. 1465; 48 Seiten
2014
- [2.94] Jason WEISS
Concrete pavement Joint Deterioration: Recent Findings to reduce the Potential for Damage
Zeitschrift: “Moving Advancements into Practice”; MAP Brief 06/2015 of the Concrete
Pavement Research Plan
2014; www.cproadmap.org/publications
- [2.95] Peter TAYLOR
Construction Concrete Pavements with durable Joints
Zeitschrift: “Moving Advancements into Practice”; MAP Brief 06/2014 of the Concrete
Pavement Research Plan
2014; www.cproadmap.org/publications
- [2.96] EICKSCHEN, E; EHRLICHER N.
Schwinden von Betonfahrbahndecken
Zeitschrift „Griffig“; Heft 1/2015; Seite 9 – 12
2015
- [2.97] Dipl.-Ing. W. HEIL
Messungen von Fugenbewegungen auf der A9 Firma Possehl, Spezialbau
2013 – 2015
- [2.98] EISENMANN; LEYKAUF
Hochwölbung der Plattenränder von Betonfahrbahnen – Ursachen, Berechnungen, Folgerungen
Zeitschrift Straße und Autobahn (10), S. 565
570
1991
- [2.99] EISENMANN; BIRMANN
Langzeitmessungen an Betondecken
Zeitschrift Straße und Autobahn (3), S. 81 86
1987
- [2.100] SPRINGENSCHMID
Neue Erkenntnisse beim Straßenbeton
Zeitschrift Straße und Autobahn (12), S. 464
468
1987
- [2.101] EISENMANN
Bedeutung und konstruktive Ausbildung von Fugen in Betonstraßen
Zeitschrift Straße und Autobahn (8), S. 317
320
1987
- [2.102] EISENMANN
Bemessung und Konstruktion von Betonstraßen
Zeitschrift Straße und Autobahn (12), S. 701
707
1996

- [2.103] WOLF
Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
BAST-Bericht S 61; 71 Seiten
2010
- [2.104] VILLARET; FROHBÖSE et.al.
Ermittlung von repräsentativen Substanzwerten in homogenen Abschnitten
BAST-Bericht S 89; 118 Seiten
2015
- [2.105] MÜLLER; GUSE
Untersuchungen zur Beanspruchung und Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen
2005; Schlussbericht zur BAST-Forschungsvorhaben FE 08.156/1999/LRB; 33 Seiten
- [2.106] SACHS
Pt100, Pt1000 oder NTC – welches Mess-element ist das Richtige?
<http://blog.wika.de/know-how/pt100-pt1000-oder-ntc-welches-messelement-ist-das-richtige/>
2015
- [2.107] FISCHER; TWER
Bestimmung von Kenndaten zur sicheren Charakterisierung von Fugenvergussmassen
Unveröffentlichter Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben FE 08.0228/2013/BRB
2015; 59 Seiten
- [2.108] HABEL; NIEMANN; HILLE
Langzeitmonitoring der äußeren Brücken des Berliner Hauptbahnhofs
Buchbeitrag: Bahnmetropole Berlin (2006), S. 116 – 123; Eurailpress Tetzlaff-Hestra
2006; ISBN 3-7771-0349-7; 7 Seiten
- [2.109] ROHRMANN; SAID; SCHMID; RÜCKER
Dauerüberwachung zur Messung der Erschütterungseinwirkungen aus Verkehr auf das Brandenburger Tor
Gutachterlicher Bericht BAMVII.23/26047 im Auftrag des Senats von Berlin
1998; 27 Seiten
- [2.110] RÜCKER et.al.
IMO-WIND: Integrales Monitoring- und Bewertungssystem für Offshore-Windenergieanlagen
Abschlussbericht zum InnoNet-Projekt:
16INO326 gefördert durch das BMWi
2010; Sonderdruck Zeitschrift „Straße + Autobahn“; Heft 56 (2005); Kirschbaum Verlag
Bonn; S. 1-32
- [2.111] SAID, ROHRMANN, RÜCKER et. al.
Dauerüberwachung der Putlitzbrücke in Berlin
Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 7220 im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung
2006; 64 Seiten
- [2.112] SAID; ROHRMANN; SCHMID; RÜCKER
Ergebnis der automatischen Dauerüberwachung an der Westendbrücke in Berlin
Bericht im Auftrag der Berliner Senatsverwaltung für Stadtentwicklung; Teile A bis D
1996
- [2.113] Auswertung statistischer Wetterdaten (Temperatur Minima; Temperatur Maxima)
<http://www.wetterdienst.de>
Kapitel 6
- [5.1] <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/entwicklung-der-autobahnen-in-deutschland-seit-der-wiedervereinigung.html>
- [5.2] <https://www.beton.org/wissen/infrastruktur/bundesfernstrassen.html>
- [5.3] Verkehrsinvestitionsbericht 2014
<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/verkehrsinvestitionsbericht-2014.html>
- [5.4] BMVI; <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/entwicklung-der-bundesautobahnen-seit-der-wiedervereinigung.pdf?>
- [5.5] RECKNAGEL et.al.
Forschungsberichte im Rahmen des BAST-Fo.-auftrages FE 08.169/2001
- [5.6] RStO 12 - Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen
FGSV-Nr. 499; 52 S. A 4 (R 1)
ISBN 978-3-86446-021-0
- [5.7] http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Aktuell/zaehl_aktuell_node.html
- [5.8] FITSCHEN; NORDMANN
Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen

- 2014; BAST-Bericht V 278
2016; 293 Seiten
- [5.9] http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/zaehl_node.html
- [5.10] <http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Verkehrsmengenkarten.html;jsessionid=138FFE3C055691EBD5CAB-846B481E21C.live21302?nn=797458>
- [5.11] Dipl.-Ing. A. GRÜNEWALD
InformationsZentrum Beton GmbH; Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern
- [5.12] http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Fahrleistungen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [5.13] Kurzabfrage der BAM an ausgewählte Autobahnverwaltungen der Bundesländer
- [5.14] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RSTO 2012); FGSV Verlag Köln; FGSV-Nr.:499
- [5.15] http://www.bast.de/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Autobahnen-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [5.16] RECKNAGEL; HUTH
Untersuchungen zur Kennzeichnung der Dauerhaftigkeit von Fugenfüllstoffen unter praktischer Beanspruchung im Bundesfernstraßenbereich (Feldversuchsstrecken) 2013; Fo.-bericht FE 08.169/2001/FRB der Bundesanstalt für Straßenwesen; 228 Seiten
- [5.17] https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/deutschland/deutschland_node.html
- [5.18] Dr. F. KREIENKAMP
Auftragsanalyse zur repräsentativen lokalen Verteilung von Witterungsereignissen (Zeitraum 191 – 2010 bzw. 1995 – 2012) durch den Deutschen Wetterdienst; Abt. Klima- und Umweltberatung (KU1); Regionalbüro Potsdam
- [5.19] <http://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/Sonstige/S2-Frostzonekarte.html>
- ## Bilder
- Bild 1 Schematische Darstellung der angestrebten Aufgabenlösung (Lösungsansatz)
- Bild 2 Schematische Darstellung der maßgebenden Einwirkungen auf Fugenfüllsysteme
- Bild 3 Festlegung der drei Messachsen mit farblicher Codierung für die spätere Auswertung
- Bild 4 Lösungskonzept Sensor/Sensor-Umhausung
- Bild 5 Das Innere des elektro-mechanischen Sensorsystems mit den drei Raumachsen
- Bild 6 Koordinatensystem des Sensors und des Anbindungspunktes
- Bild 7 Berechnung von Kugelkoordinaten
- Bild 8 Erste Anordnungsstudie für Funktionstests eines elektromagnetischen Ansatzes mit drei Spulensystemen
- Bild 9 Prinzip einer Lochkamera
- Bild 10 Verschiebung des Referenzbildes um jeweils 2 mm in y- und in z-Richtung
- Bild 11 Annäherung 4 mm in x-Richtung
- Bild 12 Sensorsystem mit Gehäuse aus V4a-Edelstahl
- Bild 13 Mess-Regime von 09:10 Uhr bis 15:00 Uhr und von 15:30 Uhr bis 09:00 Uhr
- Bild 14 Fertig konfektionierter Schaltschrank von innen mit allen darin befindlichen Komponenten
- Bild 15 Fertig konfektionierter Schaltschrank mit Sockel von vorne
- Bild 16 In situ installierter Messverteiler hinter der Leitplanke
- Bild 17 Vorrichtung zur Positionierung der Temperaturmessfühler, der Pfeil markiert eine Sollbruchstelle
- Bild 18 Messkonfiguration in situ, derzeit angeschlossene Temperaturmessfühler in der Betonfahrbahnplatte 8

Bild 19	Größenvergleich eines Pt100 mit Metallgehäuse und Anschlussdrähten	Bild 33	Repräsentative Sensoranzeige während der ersten quasistatischen Erprobungsphase (hier Sensorsystem 1M)
Bild 20	Schema einer Mess-Station	Bild 34	Sensoranzeige bei $\pm 100 \mu\text{m}$ Auslenkung in X-Richtung; Abweichung $\sim 2 \mu\text{m}$ (hier: Sensorsystem 1M)
Bild 21	Darstellung der Genauigkeit, Präzision und Richtigkeit	Bild 35	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $+ 3000 \mu\text{m}$ Auslenkung in X-Richtung; Abweichung $19 \mu\text{m}$
Bild 22	Erfassung der achsenbezogenen Abweichung von vorgegebenen Raumkoordinaten im 3D-Messbereich, exemplarisch dargestellt für X-Achse (rote Kalibrier-Positionen)	Bild 36	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $- 3000 \mu\text{m}$ Auslenkung in X-Richtung; Abweichung $35 \mu\text{m}$
Bild 23	Veranschaulichung des Auflösungsvermögens der Sensorsysteme	Bild 37	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $\pm 200 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 5 \mu\text{m}$
Bild 24	Vorrichtung zum Kalibrieren der induktiven Wegaufnehmer	Bild 38	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $+ 1000 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 5 \mu\text{m}$
Bild 25	Repräsentativer linearer Zusammenhang zwischen Sensorstellung und Ausgangssignal; hier induktiver Wegaufnehmer Nummer 343	Bild 39	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei $-1000 \mu\text{m}$ Auslenkung in Z-Richtung; Abweichung $\sim 15 \mu\text{m}$
Bild 26	Repräsentativer (quasi-)linearer Zusammenhang zwischen Sensorstellung und Ausgangssignal; hier Drehwinkelgeber Nummer 0CW134 im vorgesehenen Messbereich $\pm 7^\circ$	Bild 40	Zielfunktion zur Ermittlung der quasistatischen Abweichung der Ist-Werte der Sensoranzeigen von den Soll-Werten; Trapezfunktion mit großen Auslenkungen und überlagerte Trapezfunktion mit kleinen Auslenkungen
Bild 27	Exemplarisches Temperaturprofil für die induktiven Wegaufnehmer und Anzeige des Wegaufnehmers 337 (eingebaut in 3M) zur Erfassung möglicher Temperatureinflüsse	Bild 41	Alle angefahrenen Punkte der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum in X- und Z-Richtung; neun Punkte im Raum mit kleinen überlagerten Kreuzen
Bild 28	Temperaturprofil für die Drehwinkelgeber zur Erfassung möglicher Temperatureinflüsse	Bild 42	Detail aus Bild 41; Angefahrene Sollkoordinate bei $+0,9 \text{ mm}$ in Z-Richtung und $+2,9 \text{ mm}$ in X-Richtung bei der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum mit vier weiteren Punkten mit jeweils $100 \mu\text{m}$ Abstand in X- und Z-Richtung; Ausschnitt aus Bild 41 rechts oben
Bild 29	Mechanischer Nullpunkt im Einbauzustand (in der Mitte der Messbereiche der Y- und Z- Achse) hier dargestellt durch Schnittpunkt des Fadenkreuzes	Bild 43	Zeitliche Sensoranzeige des Sensorsystems 1M bei überlagerten Auslenkungen in X- und Z-Richtung gemäß Bild 41
Bild 30	Mechanischer Nullpunkt im Einbauzustand; Hebelarm im Einbauzustand 25 mm von der Sensorachse entfernt in x-Achse	Bild 44	Alle angefahrenen Punkte der quasistatischen überlagerten Beanspruchungsfunktion im Raum in X- und Z-Richtung; mit exemplarisch eingezeichnetem
Bild 31	Erfassung der mittleren Abweichung im inneren des 3D-Messbereichs mit eingezeichnetem Messpunktbeispiel in einer Würfecke mit $(X/Y/Z \parallel +2 \text{ mm}/ + 2 \text{ mm}/ + 2 \text{ mm})$		
Bild 32	Sensorsysteme in einem zwei-axialen Prüfstand mit Heiz- und Kühlfunktion		

	Vektor bzw. Verschiebung zum Nullpunkt	Bild 56	Sensordisplay des Sensorsystems 1R in Z-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz; ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 89,7 µm; Minimalwerte
Bild 45	Präzision des Sensorsystems 1R an neun verschiedenen Punkten im Messraum	Bild 57	Sensordisplays aller sechs Sensorsysteme in Z-Richtung bei 100 µm Amplitude in X-Richtung; Achsen weitestgehend entkoppelt
Bild 46	Sensordisplay (hier exemplarisch für Sensorsystem 2M) bei einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von fünf Hz und einer Amplitude von 100 µm	Bild 58	Referenznormal aus INVAR-Stahl mit einem Lochabstand von 200 mm
Bild 47	Die Sensordisplays aller Sensorsysteme in X-Richtung während des gesamten Messregimes	Bild 59	Klassierung der Daten bei verschiedenen Überroll Szenarien
Bild 48	Sensordisplays aller sechs Sensorsysteme in X-Richtung bei 100 µm Amplitude	Bild 60	Elektrischer Leistungsbedarf einer Mess-Station in Watt mit anteiligen Verbrauchern
Bild 49	Sensordisplay des Sensorsystems 1R in X-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz bei den ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 95,3 µm; Maximalwerte	Bild 61	Ermittlung der Scherkräfte-Festigkeit zwischen Vergussmörtel und glatter (unbehandelter) Stahlplatte
Bild 50	Sensordisplay des Sensorsystems 1R in X-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz bei den ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 94,4 µm; Minimalwerte	Bild 62	Probekörper für den Nachweis der Scherfestigkeit; Beton (1), Vergussmörtel (2), Beton (3); zwischen 1 und 2 befindet sich eine Stahlplatte
Bild 51	Sensordisplays aller sechs Sensorsysteme in X-Richtung bei 100 µm Amplitude in Z-Richtung; Achsen weitestgehend entkoppelt	Bild 63	Herstellung der Probekörper für den Haftverbund bei Zugbeanspruchung; Oberfläche aufgeraut durch Sandstrahlen (1) und einmal glatt durch nachträgliches Fräsen (2)
Bild 52	Sensordisplay aller sechs Sensorsysteme in Y-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz in X- und Z-Richtung	Bild 64	Schalung (in lila) zum Verschließen des Anbindungsbauteils
Bild 53	Die Sensordisplays aller Sensorsysteme in Z-Richtung während des gesamten Messregimes	Bild 65	Überrollvorgang über verschlossenes Sensorsystem mit einem 4,5 t schweren Gabelstapler
Bild 54	Sensordisplays aller sechs Sensorsysteme in Z-Richtung bei 100 µm Amplitude	Bild 66	Kreuz Köln-Ost in normaler Landkartenausrichtung
Bild 55	Sensordisplay des Sensorsystems 1R in Z-Richtung bei einer Schwingung mit 100 µm Amplitude und einer Frequenz von 5 Hz; ersten 5 Schwingungen; Mittelwert = 90,2 µm; Maximalwerte	Bild 67	In grün eingezeichnetes Areal mit verschiedenen Testabschnitten in rot und gelb
		Bild 68	Areal der duraBAST mit eingezeichneter Lage der drei mit Sensorsystemen bestückten Fugen
		Bild 69	Sensordisplay auf dem Waschbetonabschnitt 40

Bild 70	Endgültige Einbaulage in situ auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBASt; Sensorsystemnummern in blau	Bild 86	Auffinden der Dübel mithilfe eines Radargeräts
Bild 71	Schaltschrank in situ mit Kamera neben der Mitte der Platte 8	Bild 87	Anzeichnen der Schlitzmaße auf der Waschbetonstrecke 40
Bild 72	Lage der Sensorsysteme 2M und 2R an der Fuge zwischen Platte 9 und 10	Bild 88	Anzeichnen der Schlitzmaße auf der Fertigteilbetonstrecke
Bild 73	Sicht nach Norden auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBASt	Bild 89	Schlitzarbeiten an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
Bild 74	Sicht nach Süden auf dem Waschbetonabschnitt 40 des duraBASt	Bild 90	Fertige Schlitzarbeiten für Sensorsystem 2R an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
Bild 75	Einbaulage der Sensorsysteme auf der Waschbetonstrecke 40, Blick nach Süden	Bild 91	Fertiges Schlitzbild an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
Bild 76	Areal der duraBASt mit eingezeichneter Lage der beiden Sensorsysteme	Bild 92	Positionierte Bohrschablone an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
Bild 77	Endgültige Einbaulage in situ auf dem Fertigbetonteilabschnitt eines anderen Projektes des duraBASt; Sensorsystemnummern in blau	Bild 93	Positionierte Bohrschablone
Bild 78	Eingebaute Sensoren 3 R und 3 M auf der Fertigteilbetonstrecke	Bild 94	Bohrarbeiten der großen Bohrlöcher für das Sensorsystem
Bild 79	in die Leitungsschlitze eingebrachte Wehre aus Schaumstoff, um einen zur Plattenoberkante ebenen Abschluss zu erzeugen	Bild 95	Fertiges Bohrbild der großen Bohrungen
Bild 80	Baustelleneinrichtung, Bohrschablonen, Werkzeug, Einbau- und Verschlussmaterialien und Sicherheitsbedarf im Lager der BAM	Bild 96	Bohrarbeiten der zwei 12 mm Bohrungen für die Fixierung des Anschlussgalgens; vorne ist bereits die zweite Bohrschablone in das große Bohrloch eingebracht und auf der unteren Bohrschablone fixiert
Bild 81	Baustelleneinrichtung, Bohrschablonen, Werkzeug, Einbau- und Verschlussmaterialien auf dem duraBASt	Bild 97	Bohrarbeiten der tieferliegenden Bohrlöcher für die Verankerung des Sensorsystems mit einer zweiten eingesetzten Bohrschablone
Bild 82	Ausgehobene Grube vor dem Kabelkanal und vor der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel	Bild 98	Prüfung der Sensoranzeigen der Sensorsysteme
Bild 83	Durchbruch unter dem Kabelkanal zur Durchführung der Messkabel	Bild 99	Einrichtung eines provisorischen PC-Arbeitsplatzes auf dem duraBASt
Bild 84	Ausgehobene Grube hinter der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel	Bild 100	Reinigung des fertigen Bohr- und Schlitzbildes
Bild 85	Grube vor der Leitplanke zur Durchführung der Messkabel	Bild 101	Prüfen aller Bohrtiefen mit Zollstock
		Bild 102	Probeinsatz eines Sensorsystems
		Bild 103	Eingebrachte Vergusschablone in der Fugenkammer mit Sensorsystem kurz vor der Installation
		Bild 104	Einfüllen des Vergussmörtel bis 13 cm unter Oberkante

- Bild 105 Fertig vorbereitetes Bohrbild mit Vergusschablone, Vergussmörtel und Abdichtungsmörtel
- Bild 106 Installation eines Sensorsystems mit aufmontiertem Hilfskreuz und Einbaulehre
- Bild 107 Verschluss des Anschlussgalgens
- Bild 108 Entfernung des Einbaukreuzes
- Bild 109 Abnahme der Einbaulehre
- Bild 110 Verschluss eines Sensorsystems mit einem speziellen Betonersatzsystem
- Bild 111 Verschlossenes Sensorsystem
- Bild 112 Anbringung von Klebeband für Verguss
- Bild 113 Verguss der Leitungsschlitze
- Bild 114 Trocknung der Fugenkammer
- Bild 115 Vorbereitete Fuge ohne Unterfüllschnur
- Bild 116 Unterfüllschnur für Heiß-Verguss
- Bild 117 Einbringen der Unterfüllschnur in die Fugenkammer
- Bild 118 Für den Heiß-Verguss vorbereitete Fuge
- Bild 119 Heiß-Verguss der Fuge
- Bild 120 Verschlossene Sensorsysteme 2R und 2M an der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn
- Bild 121 Verlegung der Anschlusskabel für die Temperatursensoren; Fixierung in rot
- Bild 122 Verschluss des Leitungsschlitzes für die Temperatursensoren
- Bild 123 Eingebaute Temperatursensoren in der Mitte der Betonplatte 8
- Bild 124 Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Kleintransporter und Achslasten
- Bild 125 Sensoranzeige des Sensorsystems 2R in Z-Richtung bei quasistatischer Überrollung mit einem Kleintransporter
- Bild 126 Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Lkw und Achslasten
- Bild 127 Überrollung der Sensorsysteme mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse 7,3 t, Gewicht der Hinterachse 12,1 t
- Bild 128 Langzeitverformungen vom Einbau im März 2018 bis Mitte Februar 2019 mit validierender Setzdehnungsmessung
- Bild 129 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Y-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h
- Bild 130 X-Bewegungen über zwei Tage an der Fertigteilebetonstrecke
- Bild 131 Vergleich der FWD-Messwerte und der Sensoranzeige des darunter liegenden Sensorsystems bei FWD-Bearbeitung
- Bild 132 Ausbau des Sensorsystems 1M am 29.10.2018 auf dem duraBAST
- Bild 133 Verwendete Bohrkronen; Innendurchmesser 190 mm; Außendurchmesser 200 mm; Länge 400 mm
- Bild 134 Ausgebohrtes Sensorsystem
- Bild 135 Ausbau-Bohrloch vor Verschluss
- Bild 136 Verfülltes Bohrloch (unreagierter Giessbeton)
- Bild 137 Verfülltes Bohrloch (Gießbeton ausgehärtet)
- Bild 138 Fuge mit eingebrachter Unterfüllschnur
- Bild 139 Vergossene Fuge
- Bild 140 Ausgebautes Sensorsystem kurz nach der Entfernung aus dem Fahrbahnbelag auf der Teststrecke
- Bild 141 Ausgebautes Sensorsystem im Labor, Ansicht von oben
- Bild 142 Ausgebautes Sensorsystem im Labor, Ansicht von der Seite
- Bild 143 Ausgebautes Sensorsystem in Fräseinrichtung zum Freilegen des Deckels
- Bild 144 Sensorsystem in Einspannung mit freigelegtem Deckel
- Bild 145 Sensorsystem nach seitlichen Abtragarbeiten zum Freilegen einer Sensorseite
- Bild 146 Entfernung der zwölf Schrauben zum Öffnen des Deckels
- Bild 147 Öffnen des Deckels

- Bild 148 Geöffnetes Sensorsystem 1M nach sieben Monaten Einsatz im Feld
- Bild 149 Freigelegtes Sensorsystem 1M mit Bruchstücken des Mörtels
- Bild 150 Freigelegtes Sensorsystem 1M
- Bild 151 Alle freigelegten Komponenten des Sensorsystems 1M
- Bild 152 Angepasste Einbaulehre mit Aussparungen für Madenschrauben
- Bild 153 Optimiertes Unterteil der Einbaulehre mit vier Madenschrauben zur exakten Einstellung und Fixierung der Null-Lage
- Bild 154 Zusammengebautes Sensorsystem mit optimierter Einbaulehre
- Bild 155 Zusammengebautes Sensorsystem mit optimierter Einbaulehre
- Bild 156 Einbaulehre mit gekennzeichneten Madenschrauben in rot
- Bild 157 Einbaulehre, Ansicht von oben
- Bild 158 Skizze des FWDs; in rot und blau die beiden Geofone, die für die Differenzbildung zum Einsatz kamen
- Bild 159 Lageplan der 30 FWD-Messpunkte auf der Waschbetonstrecke 40 des duraBAST mit eingezeichneten zusätzlich ausgewerteten Messpunkten
- Bild 160 Vergleich der Relativbewegung der Fugenflanken; FWD-Messung und Z-Achse des Sensorsystems 2R bei Messung auf Messpunkt 8)
- Bild 161 Relativbewegung der Fugenflanken in Z-Richtung; gemessen als Relativbewegung der beiden Geofone, die der Fuge am nächsten sind im Vergleich mit der Sensoranzeige der jeweils an den Messpunkten befindlichen Sensorsysteme (siehe Bild 159)
- Bild 162 Vergleich der FWD-Messung mit der Überrollung einer 12 t Achse bei 5 km/h zur Ermittlung der Sensibilität des Sensorsystems auf verschiedene Belagsituationen bzw. Kerbrissbreiten
- Bild 163 Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichneter Rollrichtung des Lkw und Achslasten
- Bild 164 Sensoranzeige bei Überrollung des Sensorsystems 2M mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse 7,3 t, Gewicht der Hinterachse 12,1 t
- Bild 165 Sensoranzeige bei Überrollung des Sensorsystems 2R mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse 7,3 t, Gewicht der Hinterachse 12,1 t
- Bild 166 Sensoranzeige des externen temporären Kontrollsystems bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h
- Bild 167 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in X-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h
- Bild 168 Skizze der Höhenlage des TKS und der Sensorsysteme 2R bzw. 2M im Vergleich mit eingezeichneter Mess-Höhe der X-Richtung
- Bild 169 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Y-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h
- Bild 170 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h
- Bild 171 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h; zeitlich höher aufgelöst
- Bild 172 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von 70 km/h
- Bild 173 Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und verschiedenen Geschwindigkeiten oben 2

	km/h; Mitte 40 km/h; unten 70 km/h, Abszisse und Ordinate wurden zum besseren qualitativen Vergleich der Verläufe angepasst		2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77 % rel.F.
Bild 174	Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in Z-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten	Bild 188	Sensoranzeige in Y-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77 % rel.F.
Bild 175	Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in X-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten	Bild 189	Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 5 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77 % rel.F.
Bild 176	Vergleich der Differenz der Spitzenwerte in Y-Richtung bei Überrollung mit einer 12,1 t Achse und verschiedenen Geschwindigkeiten	Bild 190	Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 40 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77 % rel.F.
Bild 177	Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang	Bild 191	Sensoranzeige in Z-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems 2M mit 40 km/h am 11. Juli; 17,7 °C; 77 % rel.F., gestaffelte Darstellung
Bild 178	Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R und 2M in X-Richtung bei Bremsvorgang	Bild 192	Überrollung am 12. April mit 2 km/h bei 15°C und am 11. Juli mit 4,7 km/h und 18 °C
Bild 179	Sensoranzeige der Sensorsysteme 1R und 1M in X-Richtung bei Bremsvorgang	Bild 193	Sensoranzeige des Sensorsystems 1M am 11. Juli mit einer Geschwindigkeit von 5 km/h
Bild 180	Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung	Bild 194	Sensoranzeige der vier eingebrachten Sensorsysteme sowie des TKS in X-Richtung bei Überrollung mit 5 km/h
Bild 181	Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in X-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung und eingezeichnete Zeitpunkte der Achsenüberrollung	Bild 195	Sensoranzeige der vier eingebrachten Sensorsysteme sowie des TKS in Z-Richtung bei Überrollung mit 5 km/h
Bild 182	Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Y-Richtung bei Bremsvorgang	Bild 196	MLS30 auf dem Gelände des duraBAST
Bild 183	Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in Y-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung	Bild 197	QR-Code des MLS
Bild 184	Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Z-Richtung bei Bremsvorgang	Bild 198	Lageplan der beiden Sensorsysteme sowie der Messmarken für die Setzdehnungsmessung auf der Fertigteilbetonstrecke
Bild 185	Sensoranzeige der vier Sensorsysteme in Z-Richtung bei Bremsvorgang; gestaffelte Darstellung	Bild 199	MLS30 in Position auf der Fertigteilbetonstrecke
Bild 186	Lageplan der Sensorsysteme mit eingezeichnetem Lkw und Achslasten	Bild 200	Fertigteilbetonstrecke nach 100.000 Überrollungen mit eingezeichneter Messtechnik (von links nach rechts) SetzDehnungsmesspunkt 2, externes temporäres Kontrollsystem, Sensorsystem 3M, Sensorsystem 3R, Setzdehnungsmesspunkt 1
Bild 187	Sensoranzeige in X-Richtung bei mehrmaliger Überrollung des Sensorsystems		

- Bild 201 Sensorsystem 3M auf der Fertigteilbetonstrecke des duraBAST nach 100.000 Überrollvorgängen
- Bild 202 Sensorsystem 3R während der Messkampagne mit dem MLS30
- Bild 203 TKS während der Belastung durch MLS 30
- Bild 204 Messmarken für die Setzdehnungsmessung und Referenzschlitz, falls sich die Platten in Y-Richtung verschieben sollten
- Bild 205 Anfahren der Lastzyklen des MLS; ~ 450 Lastzyklen
- Bild 206 Anfahren der Lastzyklen des MLS30, vergrößerter Ausschnitt mit den ersten 9 Belastungen
- Bild 207 Verformungen in der Beanspruchungsspur nach ca. 450 Lastzyklen
- Bild 208 Verformungen in X, Y und Z-Richtung nach ca 11.000 Zyklen
- Bild 209 Verformungen in X und Z-Richtung nach ca 11.000 Zyklen
- Bild 210 Verformungen in X und Z-Richtung nach ca. 48.000 Zyklen
- Bild 211 Verformungen in X und Z-Richtung nach ca 90.000 Zyklen
- Bild 212 Dynamische Bewegungen; Peak to Peak in Abhängigkeit der Überrollungen
- Bild 213 Sensoranzeige des TKS nach 11.000 Überrollungen
- Bild 214 Sensoranzeige des TKS nach 31.000 Überrollungen
- Bild 215 Sensoranzeige des Sensorsystems 3R beim Anfahren der Lastzyklen
- Bild 216 Sensoranzeige des Sensorsystems 3R bei einer Überrollfahrt mit einer Achslast von 20t nach 100.000 Belastungszyklen
- Bild 217 Sensoranzeige des Sensorsystems 3M bei einer Überrollfahrt mit einer Achslast von 20t nach 100.000 Belastungszyklen
- Bild 218 Langzeitverformungen der Fuge über zwei Tage in X-Richtung bei der Fertigteilbetonstrecke; 15. und 16. August 2018
- Bild 219 Langzeitverformungen der Fuge über zwei Tage in Z-Richtung bei der Fertigteilbetonstrecke; 15. und 16. August 2018
- Bild 220 Messdaten des Temperaturgradienten über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018
- Bild 221 Messdaten des Temperaturgradienten über zwei Tage am 1.9.2018 und 2.9.2018
- Bild 222 Messdaten des Umgebungsklimas über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018
- Bild 223 Messdaten des Umgebungsklimas über zwei Tage am 1.9.2018 und 2.9.2018
- Bild 224 Messdaten der Umgebungstemperatur und der X-Richtung von Sensor 2M über einen Monat vom 18.08.2018 bis zum 19.09.2018
- Bild 225 Messdaten der Umgebungstemperatur und der X-Richtung von Sensor 2M am 1.9.2018
- Bild 226 Sensoranzeige in X-Richtung der Sensoren 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018
- Bild 227 Sensoranzeige in X-Richtung der Sensoren 1R, 1M, 2R und 2M sowie die Temperatur in 135 mm Tiefe vom 19.08. bis zum 21.08.2018
- Bild 228 Sensoranzeige in X-Richtung mit validierender Setzdehnungsmessung
- Bild 229 Sensoranzeige in Y-Richtung der Sensoren 1R, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018
- Bild 230 Sensoranzeige in Y-Richtung der Sensoren 1R, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 21.08.2018
- Bild 231 Sensoranzeige in Z-Richtung der Sensoren 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 20.09.2018
- Bild 232 Sensoranzeige in Z-Richtung der Sensoren 1R, 1M, 2R und 2M vom 19.08. bis zum 21.08.2018
- Bild 233 Umgebungsklima im zweiten Messzeitraum vom 21.09.2018 bis 05.04.2019, Maximaltemperatur °C am

	15.10.2018 um 12:45 Uhr; Minimaltemperatur -7 °C am 21.01.2019 um 7:20 Uhr	Bild 246	Fugenbewegungen nach insgesamt 250.000 Beanspruchungszyklen mit dem MLS; 06.11.2018 um 17 Uhr
Bild 234	Betontemperaturen im zweiten Messzeitraum vom 21.09.2018 bis 05.04.2019	Bild 247	Fugenbewegungen nach insgesamt 251.000 Beanspruchungszyklen mit dem MLS; 07.11.2018 um 10 Uhr morgens
Bild 235	Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte über den gesamten Messzeitraum 2	Bild 248	Fugenbewegungen nach erneuten 75.000 Beanspruchungszyklen (nach insgesamt 275.000 Beanspruchungszyklen) mit dem MLS; 06.11.2018 um 13 Uhr mittags
Bild 236	Fuge zwischen Platte 7 und 8 im März 2018; mit 0,25 mm nur geringe Ausbildung des Kerbrisses	Bild 249	Dynamische Bewegungen; Peak to Peak in Abhängigkeit der Überrollungen
Bild 237	Fuge zwischen Platte 9 und 10 im März 2018; mit 3,0 mm Ausbildung des Kerbrisses	Bild 250	Temperaturen über den vertikalen Querschnitt der Betonplatte 8 auf dem Waschbetonabschnitt 40 der duraBAST; Maximaltemperatur 43 °C am 22.08.2018 um 15:15 Uhr; Minimaltemperatur -7 °C am 21.01.2019 um 8:29 Uhr
Bild 238	Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte bis zur Unterbrechung der Datenaufzeichnung am 29.10.2018	Bild 251	Umgebungs-klima auf der duraBAST, Maximaltemperatur 38 °C am 22.08.2018 um 12:45 Uhr; Minimaltemperatur -7 °C am 21.01.2019 um 7:20 Uhr
Bild 239	Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahndecke	Bild 252	Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8
Bild 240	Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahndecke	Bild 253	Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8
Bild 241	Relativbewegungen der Fugenflanke in X-Richtung und Temperatur in der vertikalen Mitte der Betonfahrbahndecke	Bild 254	Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte sieben und acht bzw. des Sensorsystems 1R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8
Bild 242	Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte seit der permanenten Datenübertragung am 04.12.2018 bis zum 05.04.2019	Bild 255	Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw. des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8
Bild 243	Relativbewegung der Fugenflanken in X-Richtung und Betontemperatur in vertikaler Mitte seit der permanenten Datenübertragung am 04.12.2018, vergleichende Darstellung	Bild 256	Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw. des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8
Bild 244	Fugenbewegungen bei Beanspruchung mit dem MLS drei Fugen von der instrumentierten Fuge entfernt	Bild 257	Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte acht und neun bzw.
Bild 245	Fugenbewegungen bei Beginn der Beanspruchungskampagne (nach 200.000 Beanspruchungszyklen) mit dem MLS; 06.11.2018 um 10 Uhr		

	des Sensorsystems 1M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 272	Lokale Verteilung der mittleren Jahreshöchsttemperaturen für den Zeitraum 1995-2012 [5.17]
Bild 258	Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte	Bild 273	Lokale Verteilung der mittleren Jahrestiefsttemperaturen für den Zeitraum 1995-2012 [5.17]
Bild 259	Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 274	Lokale Verteilung der jährlichen maximalen Temperaturunterschiede für den Zeitraum 1995 bis 2012 [5.17]
Bild 260	Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2R und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 275	Mittlere lokale Verteilung der „Frosttage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]
Bild 261	Bewegungen in X-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 276	Mittlere lokale Verteilung der „Eistage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]
Bild 262	Bewegungen in Y-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 277	Mittlere lokale Verteilung der „Somertage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]
Bild 263	Bewegungen in Z-Richtung an der Fuge zwischen Betonplatte neun und zehn bzw. des Sensorsystems 2M und die Temperatur in der Mitte der Betonplatte 8	Bild 278	Mittlere lokale Verteilung der Kategorie „Heiße Tage“ für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]
Bild 264	Temperaturen im Inneren der Sensorensysteme und Umgebungstemperatur	Bild 279	Mittlere jährliche Niederschlagsmengen für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]
Bild 265	Autobahnnetz Stand 2016 [5.4]	Bild 280	Lokale Verteilung der Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge >10 mm [5.17]
Bild 266	Anteilige Verteilung von Betondecken im BAB-Netz [5.11] (blaue – Betonfahrbahndecke; orange – Asphaltfahrbahndecke)	Bild 281	Lokale Verteilung der Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge >10 mm [5.17]
Bild 267	Maßgebende Einwirkungen auf Fugen in Betonfahrbahndecken nach [5.5]	Bild 282	Max. Temperaturveränderungen innerhalb 1 Stunde für den Zeitraum 1995 – 2012 nach [5.17]
Bild 268	Verkehrsverteilung DTV im BAB-Netz gemäß [5.10]	Bild 283	Max. Temperaturveränderungen innerhalb von 2 Stunden für den Zeitraum 1995 – 2012 nach [5.17]
Bild 269	Verteilung SV im BAB-Netz gemäß [5.10]	Bild 284	Mittlere lokale Verteilung der Globalstrahlung für den Zeitraum 1981 - 2010 gemäß [5.17]
Bild 270	Schematische Darstellung des Netzes an automatischen Zählstellen nach [5.9] zur Verdeutlichung der Netzabdeckung	Bild 285	Aktuelle Entwicklung des Globalstrahlungseintrages für die BRD
Bild 271	Lokale Verteilung der Jahresmitteltemperatur für den Zeitraum 1981-2010 [5.17]	Bild 286	Mittlere lokale Verteilung der Sonnenscheindauer für den Zeitraum 1981 - 2010 gemäß [5.17]
		Bild 287	Frostzoneneinteilung gemäß [5.19]
		Bild 288	Maßgebende Varianten der konstruktiven Ausführung von Betondecken im Bundesfernstraßenbereich [5.14]

Bild 289	Mögliche schematische Darstellung der Sensor-Bestückung je Messfeld	Sensorsystems bei FWD-Beanspruchung
Bild 290	3D-Sensorsystem mit Anschlussarm für die Befestigung auf der gegenüberliegenden Fugenflanke	Bild 305 Überrollung der Sensorsysteme mit einem 20 t Lkw und einer Geschwindigkeit von 2 km/h, Gewicht der Vorderachse 7,3 t, Gewicht der Hinterachse 12,1 t
Bild 291	Geöffnetes Sensorsystem mit sichtbaren Einzelsensoren	Bild 306 Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R, 2M und des TKS in Y-Richtung bei Bremsvorgang
Bild 292	Fertig konfektionierter Schaltschrank von innen mit allen Steuerungskomponenten	Bild 307 Verformungen in X- und Z-Richtung nach ca 90.000 Zyklen
Bild 293	Teil der installierten Mess-Station in situ	Bild 308 Funktionsschema des Projekts "SensoJoint"
Bild 294	Erfassung der Messdaten auf der Waschbetonstrecke 40 des duraBASt	
Bild 295	Plausibilität durch zusätzliche Messung mit einem Setzdehnungs-Messgerät (SDM)	
Bild 296	Messwertanzeige eines Sensorsystems und einer Setzdehnungsmessung in X-Richtung mit eingezeichneter Temperatur im Inneren des Sensorsystems über zwei Tage	Sämtliche Bildrechte liegen bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und/oder wurden von Mitarbeitern dieser Einrichtung erstellt mit Ausnahme von Abbildung 9, die Teile eines gemeinfreien Werkes enthält und somit auch abgedruckt werden darf.
Bild 297	Betontemperatur in der vertikalen Mitte der Platte (T. i. d. Mitte d. Platte) und Sensoranzeige der Sensorsysteme 2R und 2M in X-Richtung	
Bild 298	Anordnung der Temperatursensoren zur Erfassung des vertikalen Temperaturgradienten	
Bild 299	Temperaturverlauf am 1. und 2. September 2018	
Bild 300	Temporäres Kontrollsystem mit eingezeichneten Mess-Richtungen; X = in Fahrtrichtung, Y = in Fugenrichtung (quer zur Fahrtrichtung), Z = vertikal	
Bild 301	Externes Temporäres Kontrollsystem im Praxiseinsatz an einer Fuge	
Bild 302	Vergleich aller Sensorsystemanzeigen der Fuge zwischen Betonfahrbahnplatte neun und zehn in Z-Richtung bei einer Überrollung mit einem Lkw und einer Geschwindigkeit von zwei km/h	
Bild 303	Skizze des FWDs; in rot und blau die beiden Geofone, die für die Differenzbildung zum Einsatz kamen	
Bild 304	Vergleich der FWD-Messwerte und der Sensoranzeige des darunter liegenden	
Tabellen		
Tab. 1:	Messprinzipien für eine innovative Sensorenlösung mit Vor- und Nachteilen	
Tab. 2:	Maximale achsenbezogene Abweichungen der Sensorsysteme in Mikrometer bei langsam ablaufenden Messungen und bei 2000 Herz, R = in der Rollspur, M = in der Mitte der Betondecke	
Tab. 3:	Auflistung aller verwendeten Einzelsensoren	
Tab. 4:	Ermittelte Kompensationsfunktionen der Drehwinkelgeber	
Tab. 5:	Zuordnung der Einzelsensornummern zu den Sensorsystembezeichnungen (R= Rollspur; M= Mitte)	
Tab. 6:	Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 341	
Tab. 7:	Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CXW73	
Tab. 8:	Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ16	

- Tab. 9: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 10: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer
- Tab. 11: Mittlere und maximale Abweichung im Inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)
- Tab. 12: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 342
- Tab. 13: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ15
- Tab. 14: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr. 0AHK17
- Tab. 15: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 16: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen (X-Achse: $\pm 5\text{mm}$; Y-Achse: $\pm 2\text{mm}$; Z-Achse: $\pm 2\text{mm}$) in Mikrometer
- Tab. 17: Mittlere und maximale Abweichung im Inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)
- Tab. 18: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 343
- Tab. 19: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CW134
- Tab. 20: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr. 0CW135
- Tab. 21: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 22: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer
- Tab. 23: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)
- Tab. 24: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 339
- Tab. 25: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0CXW72
- Tab. 26: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ13
- Tab. 27: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 28: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer
- Tab. 29: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)
- Tab. 30: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 340
- Tab. 31: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0N8K25
- Tab. 32: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0ANR60
- Tab. 33: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 34: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer
- Tab. 35: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)
- Tab. 36: Kalibrierwerte für den induktiven Wegaufnehmer mit der Nr. 337
- Tab. 37: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0EYQ14
- Tab. 38: Kalibrierwerte für den magnetischen Drehwinkelgeber mit der Nr.0ANR59
- Tab. 39: Umkehrspiele der drei Achsen bei verschiedenen Temperaturen in Mikrometer
- Tab. 40: Mittlere und maximale Abweichungen bei überlagerten Maximalstellungen in Mikrometer
- Tab. 41: Mittlere und maximale Abweichung im inneren des Messbereichs in Mikrometern, jeweils acht Eckpunkte eines Würfels mit einem bzw. zwei Millimetern Kantenlänge (KL)

- Tab. 42: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Auslenkungen in μm und prozentual zur Auslenkung bei $+21\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 43: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Auslenkungen in μm und prozentual zur Auslenkung bei $21\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 44: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $+50\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 45: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $+50\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 46: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $0\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 47: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $0\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 48: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in X-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $-25\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 49: Abweichung der Sensoranzeige vom Sollwert in Z-Richtung bei verschiedenen Fahrwegen in μm und prozentual zum Fahrweg bei $-25\text{ }^\circ\text{C}$
- Tab. 50: Exemplarische Ist-Werte für das Sensorsystem 1R an einer Sollwertkoordinate in Abbildung 44 mit rotem Viereck markiert; angefahrener Punkt bei $\pm 0,0\text{ mm}$ in Z-Richtung und $+2,9\text{ mm}$ in X-Richtung im Raum mit vier weiteren Punkten mit jeweils $100\text{ }\mu\text{m}$ Abstand in X- und Z-Richtung
- Tab. 51: Exemplarische durch Vektorrechnung bereinigte Sensoranzeige (Nullung) des Sensorsystems 1R;
- Tab. 52: Maximale und mittlere Abweichungen der jeweils 36 Ist-Werte von den Soll-Werten in Mikrometer; Präzision im 2D-Raum
- Tab. 53: Abweichungen des Ist-Werts vom Vorgabewert bei einer Sinusschwingung mit einer Frequenz von 5 Hz und einer Amplitude von $100\text{ }\mu\text{m}$
- Tab. 54: Autarke Laufzeit der Mess-Station in Tagen bei Betrieb mit einer Brennstoffzelle bei verschiedenen Tankgrößen und verschiedenen Leistungen
- Tab. 55: Autarke Mindestlaufzeit der Mess-Station in Tagen bei Betrieb mit einer Brennstoffzelle in Kombination mit einem 200 Watt Solarpanel bei verschiedenen Tankgrößen und verschiedenen Leistungen
- Tab. 56: Ergebniswerte für die erreichte Haftzug- und Scherfestigkeit
- Tab. 57: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Abbildung 167; Vergleich der X-Richtung
- Tab. 58: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Abbildung 302 (Abschnitt 6.5.4); Vergleich der Z-Richtung
- Tab. 59: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Abbildung 172; Vergleich der Z-Richtung
- Tab. 60: Differenz der Null-Lage zu den Spitzenwerten in Abbildung 181
- Tab. 61: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Abbildung 182
- Tab. 62: Differenz zwischen dem oberen und unteren Spitzenwert in Abbildung 184
- Tab. 63: Mess-Modi bei Überrollung mit einem 20 t Lkw; durchgeführt am 11.07.2018
- Tab. 64: Bereiche in BAB mit signifikanten Abschnitten in Betondeckenbauweise (Auswertung der BAM auf der Grundlage von [5.11], [5.12] und [5.13])
- Tab. 65: Durchschnittliche Verkehrsbeanspruchung des BAB-Netzes nach [5.12]
- Tab. 66: Auswertung der Verkehrsstatistik 2015 bezüglich hochbeanspruchter BAB in Betonbauweise
- Tab. 67: Bereiche potentieller Messorte unter verkehrstatistischen Bewertungskriterien
- Tab. 68: Vorauswertung der Klimaverteilung

- Tab. 69: Abfrage zur Erstellung einer bundesweiten Messkonzeption zur Datenerhebung maßgeblicher Fugenbeanspruchungen in hochbeanspruchten Betonfahrbahndecken im BAB-Netz
- Tab. 70: Rückmeldungen zu potenziellen Messstellen
- Tab. 71: Vorschläge für Messstellen für Ausführungen gemäß RSTO Zeile 1
- Tab. 72: Vorschläge für Messstellen für Ausführungen gemäß RSTO Zeile 3

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherkenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton

Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAS

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins

€ 15,50

S 133: Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken

Botor, Tost

€ 15,50

S 136: KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt

Augter, Kayser

€ 16,50

S 137: Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr

€ 22,50

S 138: Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn

Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen

Radenberg, Flottmann, Drewes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummi-modifiziertem Bindemittel

Radenberg, Manke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 150: Abschätzung des Restwerts im PMS am Ende des Bewertungszeitraums

Stöckner, Sagnol, Brzuska, Wellner, Blasl, Sommer, Krause, Komma € 19,50

S 151: Prognose der Griffigkeitsentwicklung von Waschbetonfahrbahndecken mit der Prüfanlage nach Wehner/Schulze

Klein, Gehlen, Kränkel
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 152: Wiederverwendung von RC-Baustoffen aus AKR-geschädigten Betonfahrbahndecken

Mielich
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 153: Optimierung von Fugensystemen in Betonfahrbahndecken – Messtechnische Grundlage zur Ermittlung realer Beanspruchungen in situ

Recknagel, Spitzer, Hoppe, Wenzel, Pirsakawetz € 23,00

2020

S 142: Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch

Bräu, Vogt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

S 145: Schadenskategorie-spezifische Bewertung von AKR-Prüfverfahren

Weise, Werner, Maier, Wilsch
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 146: Untersuchungen zur Möglichkeit der Verarbeitung von Gussasphalt bei maximal 230 °Celsius ohne viskositätsverändernde Zusätze

Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2021

S 147: Numerische Modellierung der Lysimeteruntersuchungen der BAST

Birle, Cudmani, Melsbach
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 148: Ermittlung und Prognose von Spannungszuständen in Betonfahrbahndecken

Freudenstein, Eger, Pichotka, Riwe, K. Villaret, S. Villaret, Frohböse
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 149: Untersuchungen zur Durchsickerung von RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten bei Bauweisen für technische Sicherungsmaßnahmen

Koukoulidou, Birle, Cudmani
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.