

Schlussbericht

zum Forschungsauftrag

Schwingungsreduzierung in Betonfahrbahnen
durch Optimierung der Plattengeometrie

FE 08.0216/2011/CRB

Forschungsnehmer: Universität der Bundeswehr München
Institut für Verkehrswesen und Raumplanung

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. W. Wirth
Bearbeiter: M. Sc. Benedikt Bracher

1. Einleitung	- 3 -
2. Literaturstudie	- 5 -
3. Methodik	- 8 -
4. Erfassung der Messdaten	- 10 -
4.1 Beschreibung der Messstelle	- 10 -
4.2 Datenauswertung	- 14 -
5. Simulation	- 26 -
5.1 Modellierung im Finite-Elemente-Programm	- 26 -
5.2 Kalibrierung des Modells anhand der Messdaten	- 31 -
5.3 Auswertung der Berechnung	- 34 -
6. Fazit	- 42 -
7. Abstract	- 44 -
Quellen	- 46 -

1. Einleitung

Autobahnfahrbahnen aus unbewehrtem Beton sind durch Quer- und Längsfugen in diskrete Plattenelemente mit Standardmaßen (z. B. 5 x 3,75 m) unterteilt, wobei die Plattenabmessungen auf mehr oder weniger wissenschaftlich begründeten Erfahrungswerten beruhen: Kriterium für die Plattenlänge ist das Vermeiden von wilden Schwindrissen im abbindenden und aushärtenden Beton sowie dessen durch Temperaturschwankungen begründete Ausdehnung und Kontraktion, Kriterium für die Plattenbreite die Fahrstreifenbreite des jeweiligen Autobahnregelquerschnitts, Kriterium für die Plattendicke die in 10-t-Standardachsen umgerechnete, über die Lebensdauer zu erwartende prognostizierte Verkehrsbelastung. Alle gängigen Dimensionierungsverfahren beruhen auf einer quasistatischen Betrachtungsweise der Belastung.

Die Betonplatten werden beim Überfahren zu erzwungenen Schwingungen angeregt. Die dabei in die Fahrbahn eingebrachte Energie kann zu diversen Schäden an der Fahrbahnbefestigung führen, z. B. Zerstörung der Fugenfüllung, Plattenabbrüchen, Materialtransport in der Unterlage (Pumpen) und zu Schallabstrahlung. Es soll untersucht werden, ob durch eine Veränderung der standardisierten, derzeit üblichen Plattenabmessungen die Eigenfrequenz der Platte so verstimmt werden kann, dass sich die Zerstörungsanfälligkeit und eventuell auch die Schallabstrahlung unter schwerer Lkw-Belastung verringert.

Das Problem soll sowohl von der empirischen als auch von der theoretischen Seite angegangen werden.

Für den empirischen Teil wurden zunächst Beschleunigungssensoren in eine Betonplatte auf einer realen Autobahnstrecke mit hohem Schwerverkehrsan teil eingebaut. Die Messergebnisse sollen Auskunft darüber geben, ob über-

haupt zerstörungsrelevante Schwingungen in der Platte entstehen und in welchem Frequenzbereich die Antwort der Platte auf eine reale Schwerverkehrsbelastung liegt. Da es sich hierbei um ein komplexes, nichtlineares Phänomen handelt, bei dem sowohl die zeitliche Abfolge als auch die Größe und Häufigkeit von Ereignissen zu berücksichtigen sind, ist die empirische Vorweganalyse unerlässlich, um Lösungsansätze für die Gesamtproblematik zu finden.

Im theoretischen Teil des Projektes wird eine geeignete FE-Modellierung entwickelt, deren Validität exemplarisch an den im empirischen Teil gewonnenen Ergebnissen überprüft wird.

2. Literaturstudie

Bei der Literaturstudie zeigte sich, dass sich bis zum jetzigen Zeitpunkt noch kaum jemand mit dem Schwingungsverhalten von Beton-Fahrbahnplatten unter Verkehrsbelastung beschäftigt und dieses erforscht hat. Die meisten Veröffentlichungen und Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Ausschwingverhalten des gesamten Fahrbahnaufbaus nach Anregung durch einen FWD-Impuls, um Werkstoffkennwerte der Fahrbahnplatte und des Untergrundes zu bestimmen, nicht mit dem Verhalten der Platte auf ansatzweise elastischem Untergrund und auch nicht mit der Interaktion von in Folge eingebauten Platten an sich. Die Interaktion der einzelnen Platten untereinander oder die Interaktion mit der Verkehrslast wird weitestgehend vernachlässigt. Mit dem Verhalten der Fahrbahnbefestigung bei Anregung durch einen Lkw beschäftigen sich nur vereinzelte Berichte.

Zum Beispiel wurde bei [KENNEDY] zwar das Verhalten der Fahrbahnbefestigung bei Überfahrt eines realen Lkw behandelt und auch mit Hilfe eines FE-Systems nachgebildet, jedoch nur in Hinblick auf die hierbei in der Fahrbahnplatte erzeugten Spannungen, nicht auf das dynamische Schwingungsverhalten der Platte oder die in der Platte auftretenden Verformungen. Auch fand diese Untersuchung unter den „künstlichen“ Bedingungen einer Teststrecke und mit einem überschweren Lkw mit einer Achslast von 16 t statt.

In [SHOUKRY] wurde das Verhalten einer Fahrbahnplatte bei Belastung durch einen realen Lkw bei verschiedenen Temperaturgradienten untersucht und dazu ein numerisches Rechenmodell erstellt. Hierbei wurde zwar das Verhalten der Platte unter einer bewegten, realitätsnahen Last untersucht, um hiermit das entwickelte Rechenmodell zu kalibrieren. Jedoch wurde nicht das dynamische Verhalten der Platte betrachtet, sondern es wurden wieder die dadurch erzeugten Spannungen bewertet. Auch lag das Hauptaugenmerk dieser

Untersuchung auf den durch variierende Temperaturgradienten der Platte erzeugten Spannungen, nicht auf dem Verhalten der Platte selbst unter der dynamischen Anregung.

Bei [ZAGHLOUL] wurde ein 3D-Rechenmodell für Fahrbahnbefestigungen erstellt, welches sowohl mittels statischer als auch dynamischer Daten kalibriert wurde. Jedoch wurde auch hier nur die Beanspruchung des Oberbaus untersucht, diesmal jedoch anhand der Durchbiegung. Hierbei stellte sich heraus, dass bei höheren Geschwindigkeiten geringere Einsenkungen zu erwarten sind. Jedoch wurde auch hier nicht auf das dynamische Verhalten der Fahrbahnplatte eingegangen. Vielmehr wurden das Langzeitverhalten der Platte und die durch die Belastung erzeugten Verformungen betrachtet, um hierdurch einen ‚Äquivalenten Lastfaktor‘ zu bestimmen. Durch diesen sollten indirekt Aussagen über die Schädigung der Straßenbefestigung gewonnen werden.

In [DIE STRASSE] wurde das Verhalten einer Betonstraße unter dynamischer Beanspruchung untersucht, wobei die Anregung mittels einer Schwingungsmaschine erfolgte. Es wurden Laufzeit und die Amplitude der Schwingungen analysiert. Allerdings wurde hier weder das Schwingungsverhalten in der Platte betrachtet, noch wurde die Platte durch einen Lkw in Schwingungen versetzt, sondern durch einen statischen Schwingungserreger wurden Sinusschwingungen konstanter Amplitude erzeugt. Als Ergebnis wurde postuliert, dass sich bei guten Untergrundverhältnissen die Schwingungen von Platte und Untergrund angleichen, bei schlechten Untergrundverhältnissen die Schwingungseigenschaften des Untergrundes durch die Platte verbessert werden. Da jedoch nur 2 verschiedene Messstellen untersucht wurden, ist die Aussagekraft für eine weiterführende Verwendung noch zu prüfen.

Auch [WILK] untersuchte das dynamische Verhalten einer Betonfahrbahn, wobei er zu dem Schluss kam, dass es nicht möglich ist, den Fahrbahnoberbau in periodische Schwingungen zu versetzen, so dass eine Systembeschreibung durch Eigenschwingungen (Modalanalyse) nicht möglich sei, da eine sehr hohe Dämpfung vorliegt, wobei die Systemdynamik sehr stark durch die Bettungseigenschaften des Unterbaus beeinflusst wird. Es war eine sehr gute Koppelung der Betonplatte mit dem Untergrund zu verzeichnen, sowie ein Wechsel des Systemverhaltens von einer Feder- zu einer Massencharakteristik für Frequenzen >50 Hz.

Auch [RAMSPECK] versuchte mittels eines Schwingungserzeugers die Schwingungsausbreitung in der Betondecke zu erfassen. Er stellte fest, dass die Decke im Wesentlichen den Schwingungen des Unterbaus folgt, falls sehr guter Unterbau vorhanden ist. Auch habe die Zwischenlage zwischen Decke und Unterbau keine Auswirkungen auf die Schwingungsausbreitung. Ebenso stellte er keinen merklichen Einfluss der Querruge auf die Weiterleitung der Schwingung fest, da die Biegeschwingung der Platte nur in der Nähe des Erregers wesentliche Wirkungen hatte. Dort waren jedoch Querschwingungen sehr kleiner Wellenlänge feststellbar, die er als mögliche Eigenschwingungen identifizierte. Jedoch konnten sich solche Schwingungen nur bei einem stehenden Erreger ausbilden. Bewegte sich der Erreger, konnten sich solche Querschwingungen nicht ausbilden, so dass die Betrachtung der sich längs fortpflanzenden Wellen ausreichte.

3. Methodik

Zur Erforschung des Schwingungsverhaltens von Betonfahrbahnplatten wurde eine Prototypen-Messstelle eingerichtet, die im Gegensatz zu konventionellen Messstellen, welche meist die in der Platte auftretenden Kräfte oder die Einsenkungen der Plattenoberfläche erfassen, mit Beschleunigungsaufnehmern ausgestattet wurde. Hierzu wurden 18 Beschleunigungssensoren in einer Betonplatte auf einer realen Autobahnstrecke mit hohem Schwerverkehrsanteil (A 5 bei Eppelheim) verbaut. Hier wurde die Beanspruchung der Platte durch den regulär dort auftretenden Verkehr ermittelt. Ergänzend wurden Messfahrten mit einem speziell beladenen Fahrzeug mit bekannten Abmessungen und bekanntem Gewicht durchgeführt. Aus den hierbei gemessenen Beschleunigungen konnten die Einsenkungen und die Bewegung der Platte rückgerechnet werden. Auch wurde das Leistungsdichtespektrum der Beschleunigungen bestimmt, wodurch Aussagen über eventuelle Eigenfrequenzen oder Resonanzerscheinungen gemacht werden konnten. Anhand dieser Messstelle konnten Fehler bei der Erstellung dieser neuen Art von Messstellen erkannt werden. Hierdurch lassen sich Empfehlungen für die messtechnische Ausgestaltung bei evtl. weiteren Untersuchungen zu dieser Thematik ableiten.

Des Weiteren wurde ein Finite-Element-Programm der Fahrbahnplatte und ihres Unterbaus erzeugt, um die gemessenen Daten auch simulativ nachbilden zu können, und um die Auswirkungen von Änderungen an der Plattengeometrie leicht analysieren zu können. Die Baustoffkennwerte für dieses Simulationsmodell wurden an Probekörpern aus der direkten Umgebung der realen Messstelle bestimmt. Das FE-Modell wurde sowohl mittels erprobter statischer Berechnungsmethoden als auch anhand der durch die Messstelle erlangten Einsenkungen kalibriert. Es wurden Berechnungen des Verhaltens der Betonplatte mit variierenden Abmessungen und Dämpfungswerten vorge-

nommen. Diese wurden hinsichtlich der Auswirkung dieser Variationen auf die Differenzbewegung der Plattenenden in der Fuge untersucht, da diese als die Hauptursache für das Pumpen und für Schäden an den Fugen angesehen wird.

4. Erfassung der Messdaten

4.1 Beschreibung der Messstelle

Im Zuge des Forschungsprojektes wurde eine Messstelle auf der Autobahn A 5 bei Heidelberg zwischen dem Kreuz Heidelberg und der Anschlussstelle Heidelberg-Schwetzingen, Fahrtrichtung Süden, eingerichtet. Hierzu wurden in der Lkw-Fahrspur 18 1-axiale Beschleunigungssensoren der Firma ASC mit einem Messbereich von 10 [g] zwischen Ober- und Unterbeton, möglichst nahe der Fahrbahnoberfläche der Betonfahrbahn, eingebaut. Die Platzierung der Sensoren wurde so gewählt, dass a) die wesentlichen Anregungsbereiche der Fahrbahnplatte erfasst sind und b) physikalische Werte ermittelt werden können, die ggf. Aufschluss über Aufwand und erforderliche Tiefe der weiteren Vorgehensweise im Anschluss an dieses Pilotprojekt erlauben. So wurden die Sensoren in den Rollspuren des Schwerverkehrs und in der Mitte zwischen den beiden Rollspuren platziert.

Um das Kopplungsverhalten der Platten erfassen zu können, wurden Sensoren in Längsrichtung kurz vor dem Ende der Dübel und an spiegelbildlicher Position in der Nachbarplatte verbaut. Die genauen Positionen der Sensoren sind in Bild 1 gezeigt. Um das Schwingungsverhalten der Betonplatte möglichst wenig zu beeinflussen, wurden diese während einer kurzen Unterbrechung des Baufortschrittes installiert, wodurch eine gute Verbindung zu dem umgebenden Beton gewährleistet ist. Hierbei wurde die Standzeit des Betondeckenfertigers möglichst kurz gehalten. Von einem nachträglichen Einbauen der Sensoren nach Fertigstellung der Straße in Bohrlöchern wurde Abstand genommen, da hierbei das Gefüge der Betonplatte unweigerlich stark gestört worden wäre. Im Interesse möglichst geringer Gefügestörungen

wurden auch die Kabel der Sensoren ohne Hüllrohre verlegt. Es wird die Vertikalbeschleunigung mit einer Messfrequenz von 1 kHz erfasst, auf eine Messung der Längs- und Querbeschleunigung wird verzichtet, da in diesen Richtungen keine nennenswerten Beschleunigungen der Betondecke erwartet werden.

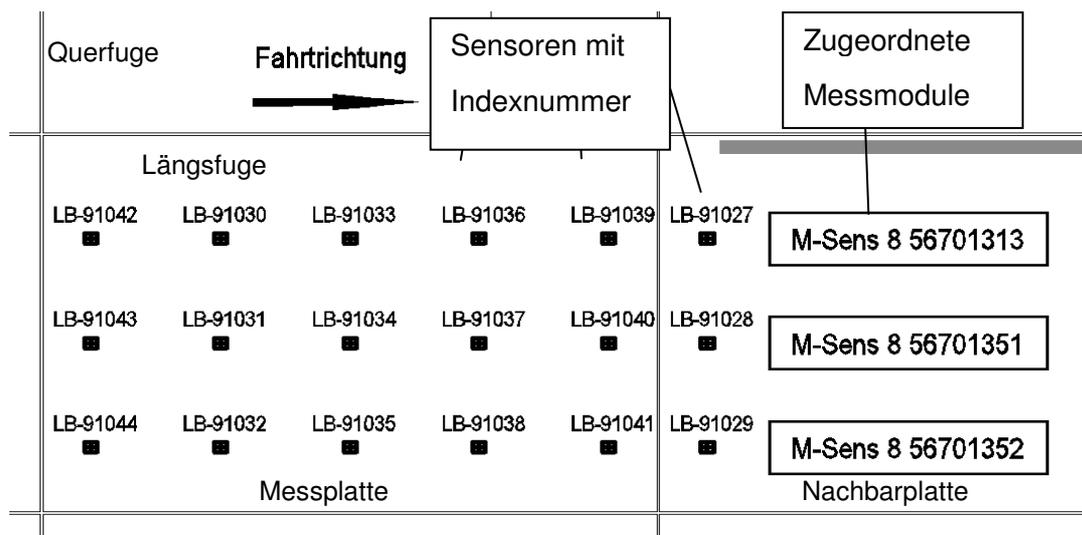


Bild 1: Anordnung der verbauten Beschleunigungssensoren

Parallel zur Erfassung der Beschleunigungsdaten wird ein Videobild der Messstelle aufgezeichnet, welches dazu dient, die Verkehrsbelastung der Messstelle bei der Auswertung nachvollziehen zu können.

Die Verkabelung der Sensoren wird zu einem Schaltschrank am Rand der Autobahn geführt, wo im Falle einer Messung die zusätzlich benötigte, mobile Messeinrichtung, bestehend aus Messmodulen, CAN-Bus und Laptop, angeschlossen wird. Auf eine kontinuierliche Messung der Daten wird verzichtet, da das anfallende Datenvolumen nur schwer kontinuierlich übertragen und gespeichert werden kann. Dies kann akzeptiert werden, da eine probabilistische Betrachtung von stationären Zuständen zwischen der auftretenden Verkehrslast und der Platte durchgeführt wird. Da sich die Messstelle

auf einer realen, dauerhaft unter Verkehr befindlichen Autobahn befindet (DTV 88079 Kfz/d; 11,3 % Schwerververkehrsanteil [SVZ 2009]), kann jederzeit die Reaktion der Fahrbahnplatte auf den aktuell vorhandenen Lkw-Verkehr gemessen werden.

Der Aufbau der Autobahnbefestigung entspricht RStO 12 Tafel 2, Zeile 1.2. Es wurde eine 27 cm dicke Betonplatte auf einer ca. 20 cm mächtigen Verfestigungsschicht ausgeführt, welche durch Einfräsen von 60 kg Zement/m² in die bereits vorhandene Frostschutzschicht erstellt wurde. Diese Schichten sind durch eine Vlies-Zwischenschicht voneinander getrennt. Der genaue Aufbau ist in Bild 2 ersichtlich.

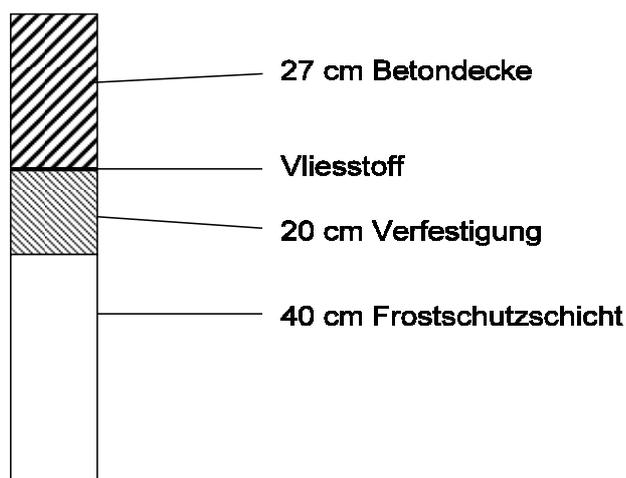


Bild 2: Straßenaufbau an der Messstelle

Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten und die Auswertung zu erleichtern, wurde entschieden, zusätzlich zu Messungen des normal auftretenden Verkehrs auch Messungen mit einem Fahrzeug mit bekannten Abmessungen, definierter Beladung und definiertem Reifendruck durchzuführen. Nachdem sich in ersten Versuchen ein 40-t-Tieflader aufgrund der geringen auftretenden Beschleunigungswerte als ungeeignet herausstellte, wird nun ein Mercedes Benz Axor für diese Messungen verwendet (Bild 3). Dieses

Fahrzeug kann von Seiten der Bundeswehr durch die Fliegerhorstgruppe des Jagdbombergeschwaders 33 in Büchel mit immer gleicher Beladung zur Verfügung gestellt werden. Diese besteht aus jeweils 1,2 t schweren Stahlplatten, womit der Lkw bis zum Erreichen des maximal zulässigen Gesamtgewichtes beladen wird.



Bild 3: Verwendeter Belastungs-Lkw

Das Belastungsfahrzeug besitzt bei der gewählten Beladung Achslasten von 8,64 t hinten und 7,42 t vorne. Diese Beladung kann jederzeit rekonstruiert werden, so dass bei allen Messüberfahrten eine konstante Belastung der Messplatte gewährleistet werden kann. Durch den kurzen Achsabstand von 4,15 m des Fahrzeuges lastet bei jeder Überfahrt kurz das gesamte Fahrzeuggewicht von 16 t auf der Betonplatte.

Eine Beladung des Fahrzeuges über das zulässige Gesamtgewicht mit den damit verbundenen höheren Achslasten ist nicht möglich, da die Zufahrt zur Messstelle nur über öffentliche Straßen erfolgen kann.

Insgesamt wurden 81 Datensätze in den Messkampagnen erhoben, wobei hiervon 16 durch Überfahrt mit dem speziell beladenen Lkw erzeugt wurden. Die restlichen Datensätze wurden durch Messung des Plattenverhaltens unter der Beanspruchung des an der Messstelle auftretenden Schwerverkehrs erzeugt. Diese Daten liegen sowohl an der Universität der Bundeswehr München, Lehrstuhl Verkehrswesen und Raumplanung, als auch an der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und können dort eingesehen werden.

4.2 Datenauswertung

Bei der Analyse des gemessenen Beschleunigungssignales stellte sich heraus, dass die Spitzenwerte der bei einer Lkw-Überfahrt gemessenen Beschleunigungen in der Größenordnung von 0,01 g bis 0,015 g liegen, wobei das Grundrauschen des Messsignales etwa 20 % bis hin zu 40 % dieser Werte beträgt. Dies ist teils auch von den betrachteten Sensoren abhängig (vergleiche Bild 1). So ist die Datenqualität des Sensors 91035 generell so schlecht, dass dessen Signale nicht ausgewertet werden können und der Sensor somit als Totalausfall verbucht werden muss. Auch die drei Sensoren an den Dübelenden (91029, 91028, 91027) der nachfolgenden Platte liefern nicht verwertbare Signale. Hier ist ein Problem mit der Verkabelung zu vermuten, welches höchstwahrscheinlich im Bereich der Querfuge zu finden ist. Wegen des Ausfalls dieser Sensoren musste die beabsichtigte Untersuchung der Dübelbeanspruchung während einer Überfahrt der Fuge durch einen Lkw leider unterbleiben, da die Bewegung beider Dübelenden nicht mehr erfassbar war. Andere Sensoren lieferten bei unterschiedlichen Messsituationen Signale unterschiedlicher Qualität, wobei der Grund hierfür nicht ersichtlich ist. So kam es vereinzelt auch zu einer Verbesserung des Signalbildes bei zuvor

schon als ausgefallen betrachteten Sensoren, wobei sich auch hier der Grund nicht erschließt.

Bei Betrachtung der zeitsynchron aufgezeichneten Videobilder lässt sich eine gute Korrelation zwischen den Signalspitzen und der Überrollung der Platte, beziehungsweise des jeweiligen Sensors, durch den Lkw erkennen (Bild 4).

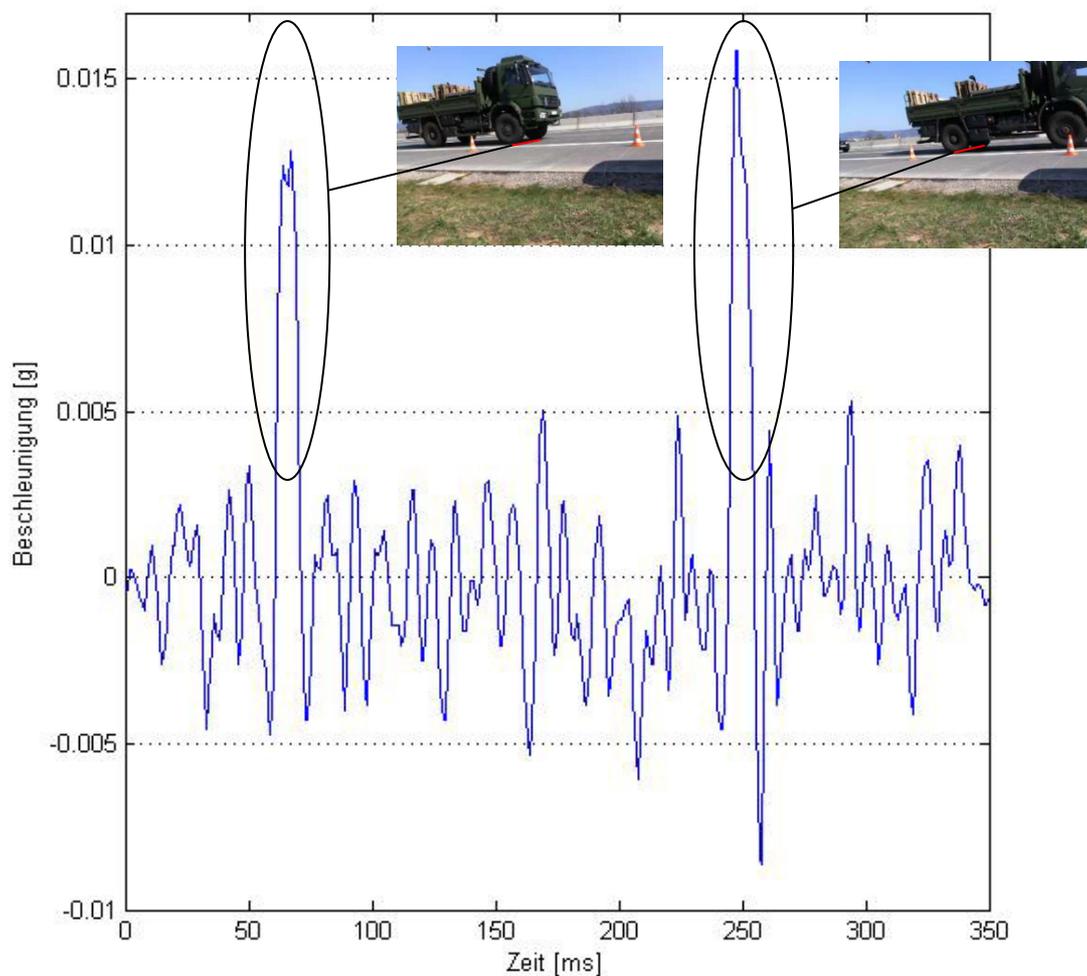


Bild 4: Gemessene Beschleunigungsdaten eines Sensors bei Überfahrt der Betonfahrbahnplatte durch den Mess-Lkw (das Messfahrzeug)

Nach zweimaliger Integration des Beschleunigungssignals über die Zeit erhält man den zurückgelegten Weg der Sensormassen. Hier zeigt sich, dass schon geringste Abweichungen in der Nulllage des gemessenen Signals zu exponentiell anwachsenden Abweichungen des Integrationsergebnisses führen. Um dies zu kompensieren, ist eine Bereinigung des Ergebnisses um diesen Fehlerwert erforderlich. Hierzu wurde nach jedem Integrationsschritt eine Glättung des Ergebnisses vorgenommen, um die Abweichung von der Nulllage zu quantifizieren, und daraufhin das Integrationsergebnis um diesen Wert bereinigt. Dabei wurde zu jedem Wert y ein Polynom ersten Grades über die Werte $(y-(n/2), y-(n/2)+1, \dots, y, \dots, y+(n/2)-1, y+(n/2))$ nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gesucht, wobei der Wert n , über die Anzahl der in die Mittelung einbezogenen Werte, die Anpassung der gemittelten Kurve an die Ausgangswerte bestimmt.

Um die besonders interessanten Schwingungsspitzen nicht zu stören, wurden Werte, die mehr als die sechsfache mittlere Standardabweichung von den umgebenden Werten abweichen, nicht mehr in die Glättungsberechnung einbezogen, so dass diese erhalten bleiben. Da die Überrollung eines Sensors durch einen Reifen (Aufstandsfläche 30 cm) bei 80 km/h (= 22.2 m/s) ca. 13 ms dauert, muss n so gewählt werden, dass Impulse dieser Dauer durch die Glättung nicht zu sehr beeinträchtigt werden, aber noch immer eine ausreichende Bereinigung des Signales stattfindet. Hier stellte sich ein Wert $n = 21$ (entsprechend einer Mittelung über 21 ms $\approx 1,5 \cdot$ Überrollungsdauer) als optimal heraus.

Bei Betrachtung der Einsenkung desselben Sensors lässt sich eindeutig die Überfahrt durch den Versuchs-Lkw und die dadurch verursachte Verformung der Platte erkennen, wobei die Bewegungen der Platte in Plattenmitte naturgemäß deutlich geringer ausfallen. In Bild 5 sind die Bewegungen aller Sen-

soren bei einer Überfahrt durch den Belastungs-Lkw zu erkennen (Fahrtrichtung von links nach rechts), wobei die Anordnung der Diagramme der Positionen der Sensoren in der Fahrbahnplatte entspricht. Hier sind auch gut der ausgefallene Sensor 91032 und die nicht auswertbaren Signale der Sensoren der Nachbarplatte zu erkennen (Rot umrandet).

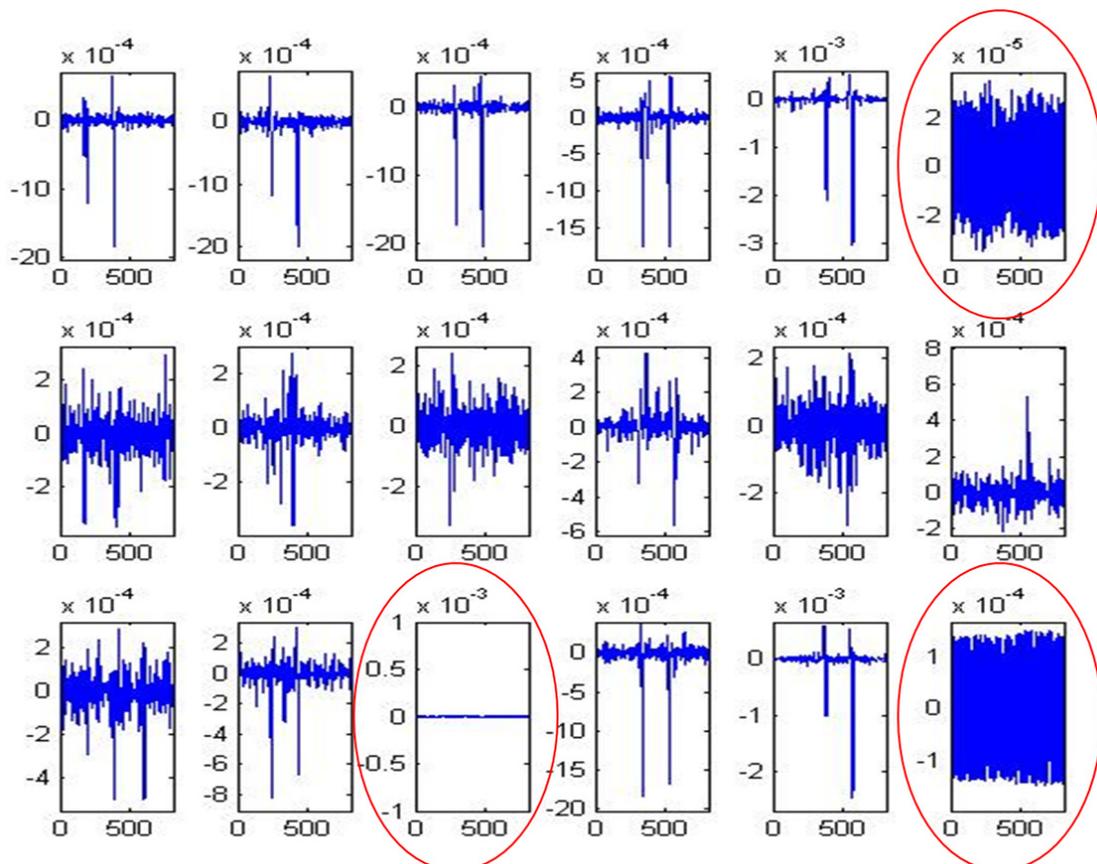


Bild 5: Einsenkungen der Sensoren bei Überfahrt

Von den so ermittelten Einsenkungswerten wurde die statistische Verteilung ermittelt und diese in Histogrammen aufbereitet, um einen besseren Überblick zu erlangen. Hierbei zeigt sich, dass es sich bei den Hauptanteilen um Schwingungen um die Nulllage der Sensoren handelt, was sich durch das Rauschen der Signale erklären lässt, wobei die Häufigkeitsverteilung dieser Signale sehr gut einer Gaußschen Glockenkurve entspricht, siehe auch Bild 6.

Im Fall der vorliegenden Untersuchung zur Validierung der korrekten Integration der Messdaten interessieren jedoch mehr die maximalen Werte der Einsenkungen in den Rollspuren und damit die „Randwerte“ der Histogramme, so dass diese Streuung um die Nulllage vorerst ignoriert werden kann. Auch wurden zu stark verrauschte Sensordaten von dieser Analyse ausgenommen.

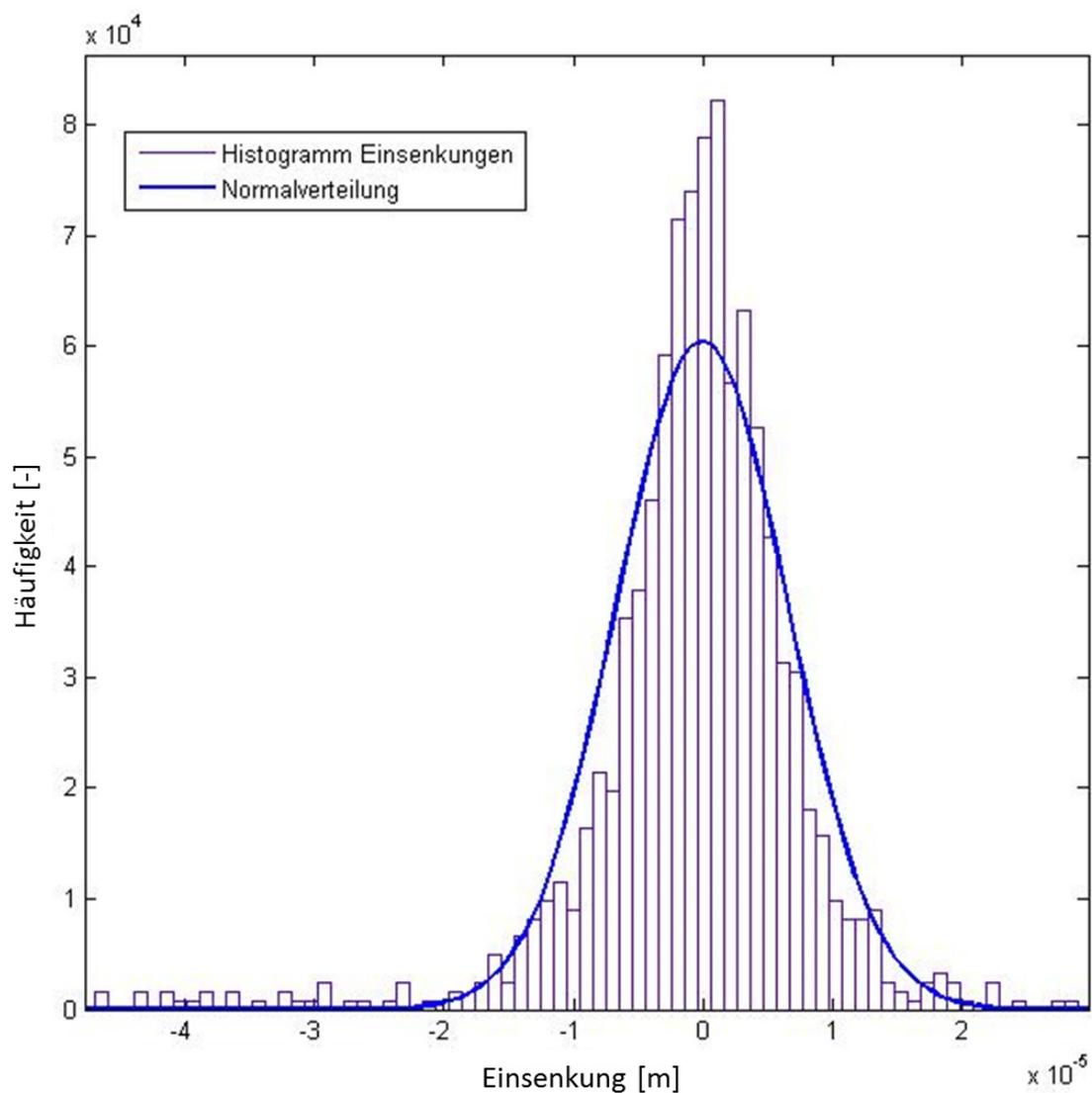


Bild 6: Häufigkeitsverteilung der berechneten Einsenkungen

Aus den von zu stark verrauschten Werten bereinigten Randwerten der Einsenkungshistogramme der Sensoren in den Rollspuren des Verkehrs lässt

sich wieder eine statistische Häufung erkennen, welche einer Normalverteilung entspricht (Bild 7). Diese ist durch einen Mittelwert μ von -0.000147 m und die Standardabweichung σ von 0.00011 m gekennzeichnet. Da die so bestimmte mittlere Einsenkung der Fahrbahnplatte unter dem Belastungs-Lkw von $0,147$ mm in einem realistischen Bereich liegt (Einsenkung nach Westergaard $0,113$ mm), ist von der Richtigkeit des Integrationsvorganges und der Datenbereinigung auszugehen. Falls man die wenigen, in den negativen Bereich ragenden Werte als ‚Ausreißer‘ von der Bestimmung der Verteilung ausnimmt, verschiebt sich diese mit ihrem Mittelwert noch weiter in Richtung des Ergebnisses nach Westergaard ($\mu = -0,00012$ m, $\sigma = 0,000078$).

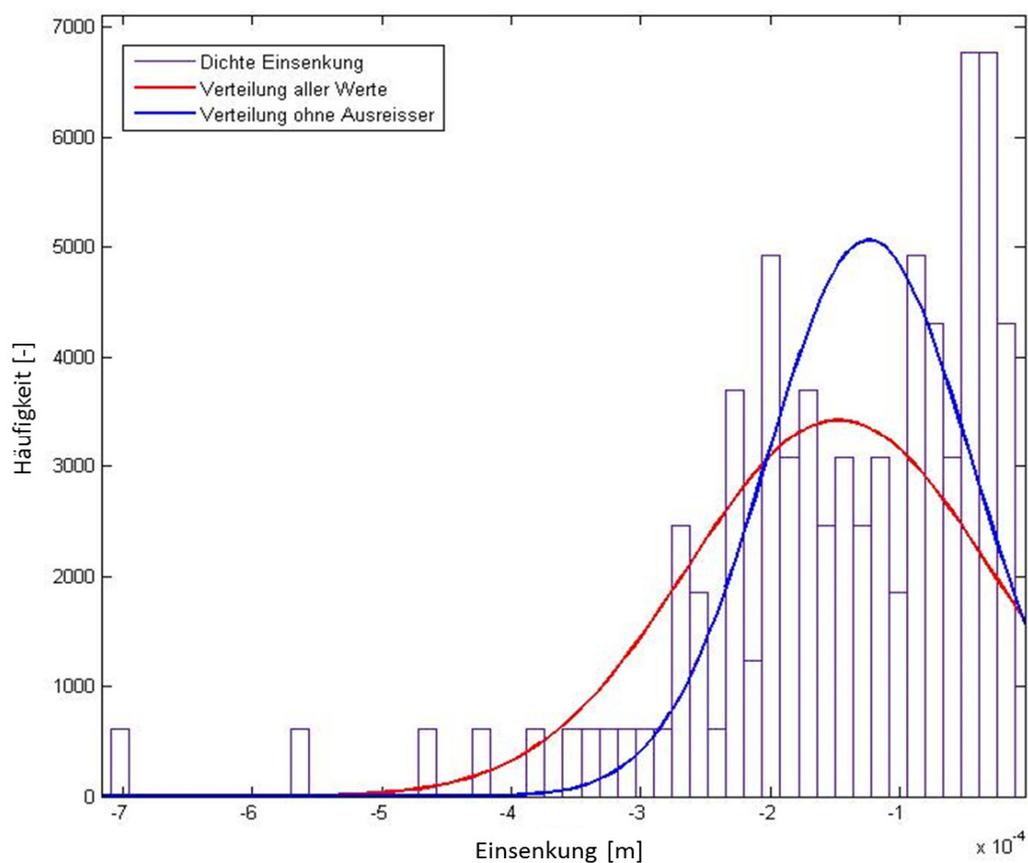


Bild 7: Verteilung der maximalen Einsenkungen

Zusätzlich wurde eine Spitzenwertzählung der gemessenen Beschleunigungen durchgeführt. Bei dieser wurden offensichtlich fehlerhafte Messungen (alle Werte Null oder außerhalb des Klassierungsbereiches) von der Analyse ausgeschlossen. Durch diese Spitzenwertzählung lässt sich die Zusammensetzung des Lastkollektivs und der dadurch erzeugten Beschleunigungen ermitteln. Das Ergebnis dieser Klassierung ist in Tabelle 1 zu sehen.

Tabelle 1: Klassierung der Beschleunigungsmessungen

Klasse Nr	obere Grenze	untere Grenze	Mittelwert Klassengrenzen	Ereignisse je Klasse
	[g]	[g]	[g]	[-]
1	-0,027	-0,025	-0,026	0
2	-0,025	-0,023	-0,024	1
3	-0,023	-0,021	-0,022	2
4	-0,021	-0,019	-0,020	6
5	-0,019	-0,017	-0,018	13
6	-0,017	-0,015	-0,016	29
7	-0,015	-0,013	-0,014	97
8	-0,013	-0,011	-0,012	328
9	-0,011	-0,009	-0,010	1053
10	-0,009	-0,007	-0,008	4733
11	-0,007	-0,005	-0,006	26586
12	-0,005	-0,003	-0,004	74779
13	-0,003	-0,001	-0,002	148741
14	-0,001	0,001	0,000	957842
15	0,001	0,003	0,002	156033
16	0,003	0,005	0,004	79798
17	0,005	0,007	0,006	24860
18	0,007	0,009	0,008	3886
19	0,009	0,011	0,010	566
20	0,011	0,013	0,012	146
21	0,013	0,015	0,014	98
22	0,015	0,017	0,016	72
23	0,017	0,019	0,018	72
24	0,019	0,021	0,020	71
25	0,021	0,023	0,022	56
26	0,023	0,025	0,024	43
27	0,025	0,027	0,026	38
28	0,027	0,029	0,028	22
29	0,029	0,031	0,030	6
30	0,031	0,033	0,032	3
31	0,033	0,035	0,034	0

Wird diese Amplituden-Häufigkeits-Beziehung grafisch aufgetragen (Bild 8), lässt sich die Zusammensetzung des Lastkollektives des Verkehrs ermitteln. So kann aus der Darstellung einfach abgelesen werden, dass sich die gemessenen Beschleunigungen in der Klasse von ca. $\pm 0,01$ g nahezu symmetrisch verhalten, und mit ca. 1,4841514 Mio. Ereignissen den mit Abstand größten Teil der Ereignisse ausmachen. Diese Beanspruchung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit repräsentativ für die Belastung durch leichte Lkw und Pkw. Die maximalen Belastungsspitzen (53 Ereignisse) dürften dem extremen Schwerlastverkehr entsprechen und wohingegen die dazwischenliegenden Ereignisse wohl dem durch den normalen Lkw-Verkehr zuzuordnen sein.

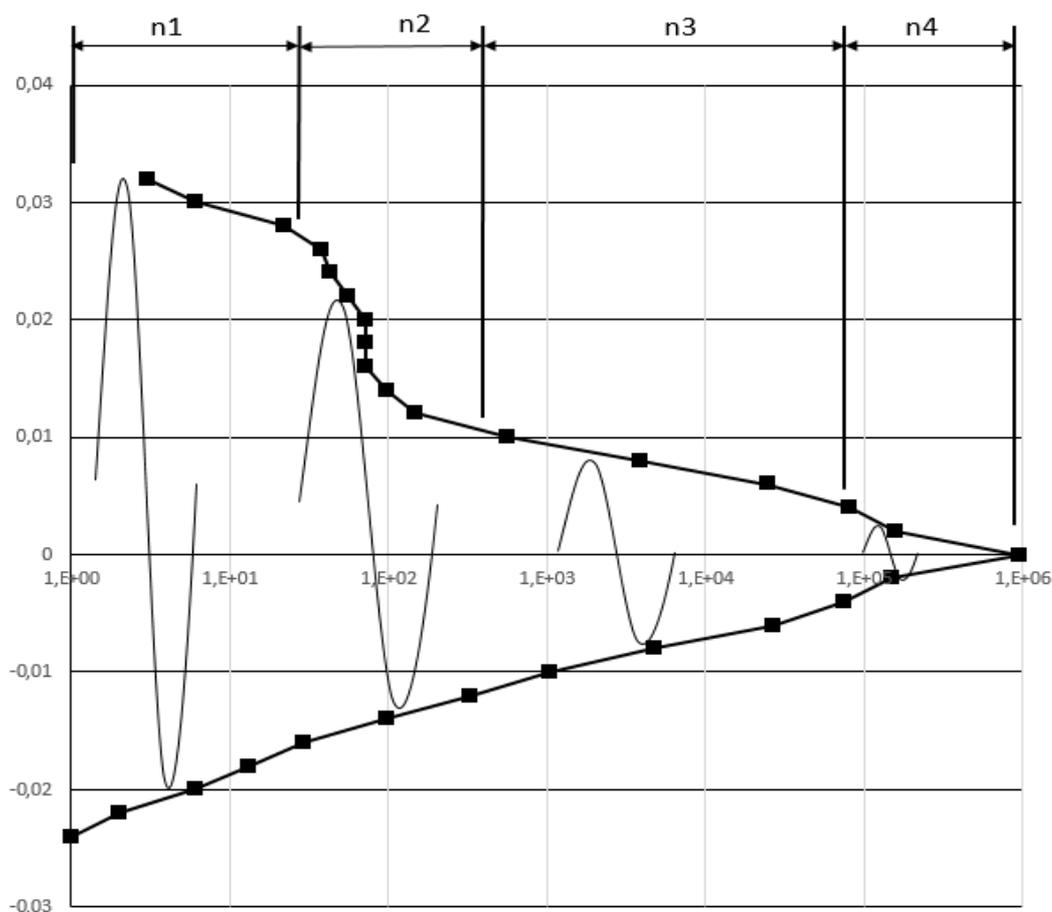


Bild 8: Klassifizierte Beschleunigungsspitzenwerte

Auffällig ist, dass zwischen der Grundbelastung durch leichte Fahrzeuge und der Belastung durch Schwerverkehr eine erhebliche Verschiebung der Mittelwertbelastung zu erkennen ist. Dies ist in Tabelle 2 verdeutlicht.

Tabelle 2: Mittelwerte der Beschleunigungsklassen

Bereich	Max. Amplitude	Min Amplitude	Mittelwert	Anzahl Ereignisse
[-]	[g]	[g]	[g]	[-]
1	0,035	-0,027	0,00886792	53
2	0,027	-0,017	0,00427238	1050
3	0,011	-0,011	-0,00235315	136463
4	0,005	-0,003	0,00024864	1342414

Dass vor allem diese wenigen Belastungsspitzen sehr stark zur Schädigung der Straße beitragen, steht außer Frage, besonders mit Blick auf die damit einhergehende Verschiebung des Belastungsmittelpunktes auf einen mittleren Beschleunigungswert von 0,009 g, was im Bereich der durch normalen Verkehr erzeugten Belastungsspitzen liegt. Ihr genauer Einfluss auf das Langzeitverhalten der Fahrbahnbefestigung kann jedoch im Zuge dieses Projektes nicht bewertet werden. Dies wäre Aufgabe weiterführender Untersuchungen, die sich speziell mit diesem Thema befassen.

Um Aussagen über das Schwingungsverhalten der Betonplatte treffen zu können, wurden sowohl von den gemessenen Beschleunigungsdaten als auch von den Einsenkungsdaten die Leistungsdichtespektren bestimmt. So kann dargestellt werden, welche Energien in welchen Frequenzbereichen der Platte auftreten. Durch eine Überführung der Bewegung der Platte ins Frequenzspektrum können Resonanzeffekte und kontinuierliche Schwingungen anhand der damit einhergehenden überhöhten Energiedichten in dem dazugehörigen Frequenzband erkannt werden. Hier zeigt sich, dass in den Leistungsdichtespektren der schon als defekt erkannten Sensoren starke Überhö-

ungen im Frequenzband von 50 Hz und den ganzzahligen Vielfachen davon auftreten, wie auch in Bild 9 zu sehen ist.

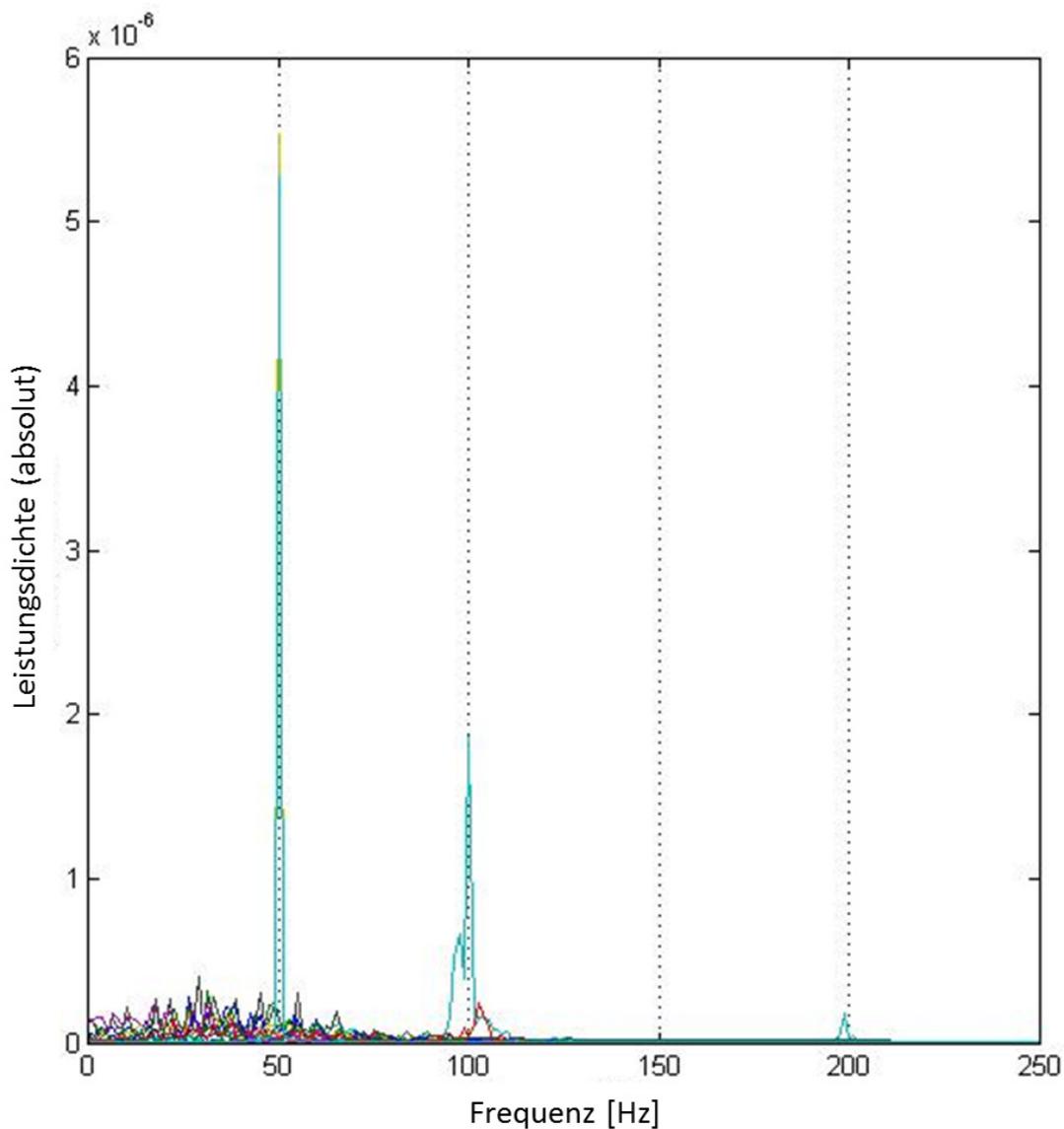


Bild 9: Leistungsdichtespektrum der Einsenkung aller Sensoren

Dieser Fehler tritt sowohl bei den gemessenen Beschleunigungs- als auch bei den errechneten Einsenkungswerten auf, so dass ausgeschlossen werden kann, dass dieser in der Integration begründet ist. Aufgrund der Störungsfrequenz von 50 Hz könnte man eine Störung durch ein Wechselstromfeld vermuten, was jedoch sehr unwahrscheinlich ist, da nur einzelne, voneinander

mitunter weit entfernte Sensoren davon betroffen sind, und es – wie gesagt - auch zu einer teilweisen ‚Heilung‘ der Sensoren zwischen den Messterminen kam. Auch ein Einfluss durch die Messelektronik kann ausgeschlossen werden, da diese durch Gleichstrom-Batterien mit Energie versorgt wird, und auch die Sensoren mit Gleichstrom angesteuert werden.

Daher werden auch bei der Ermittlung der Leistungsdichtespektren wieder die als defekt erkannten Sensoren nicht mit einbezogen, da diese das Ergebnis stark verfälschen würden.

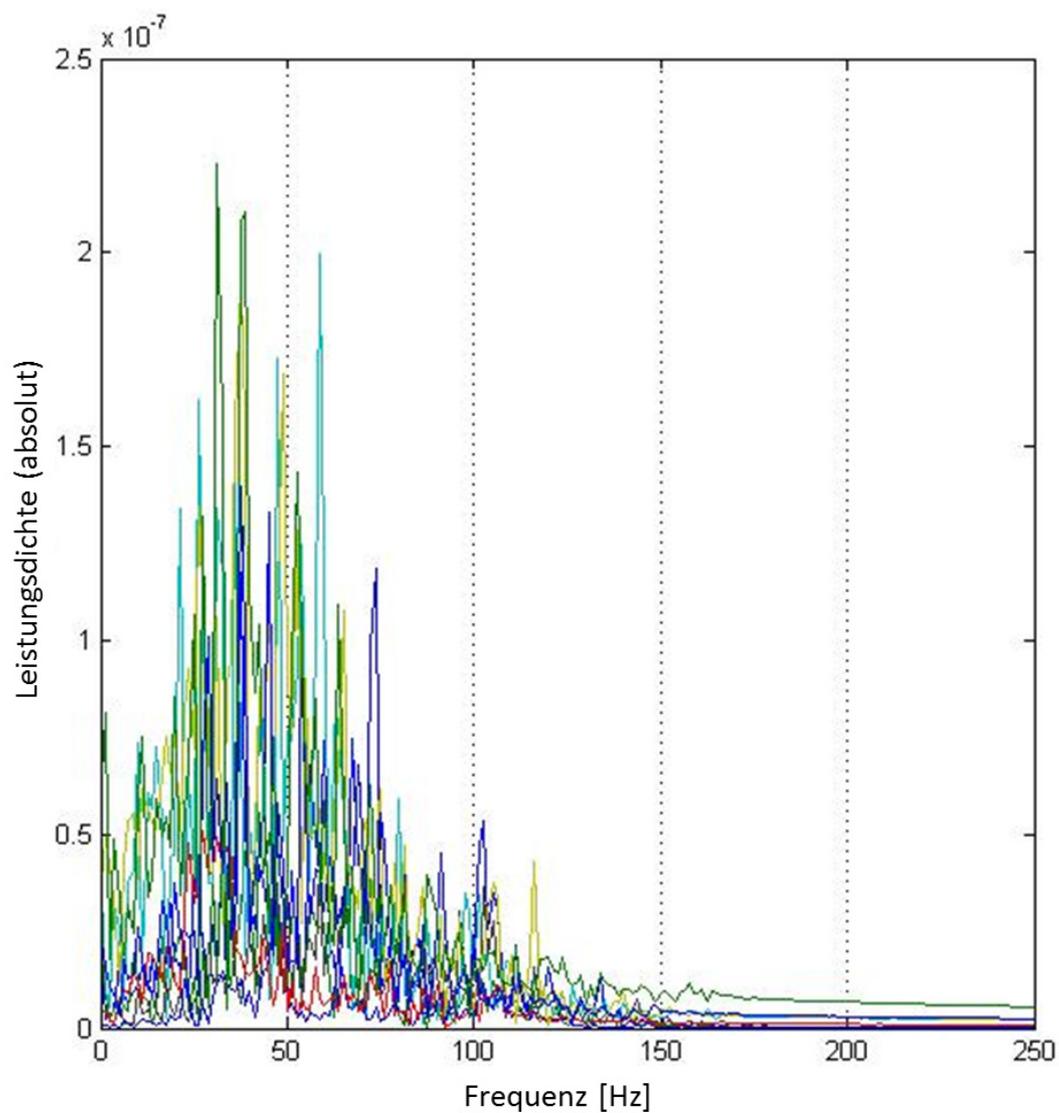


Bild 10: Bereinigte Leistungsdichtespektren

Aus der Betrachtung der Leistungsdichte lässt sich in Bild 10 erkennen, dass es nach einem starken Anstieg der Leistungsdichte bei steigenden Frequenzen zu einer Häufung der spektralen Energieverteilung im Bereich von 30 bis 50 Hz kommt, welche danach exponentiell abfällt. Auf Grund der spiegelsymmetrischen Eigenschaften der Spektren ist es hierbei ausreichend, den positiven Frequenzbereich zu betrachten. Es sind nirgends Anzeichen spezifische Frequenzüberhöhungen zu erkennen, was für das Auftreten eines statischen Schwingungsbildes oder einer modalen Schwingungsform sprechen würde. Dass solche nicht zu finden sind, stimmt auch mit der erwähnten Literatur und dem Ansinnen dieser Untersuchung überein.

5. Simulation

5.1 Modellierung im Finite-Elemente-Programm

Zur numerischen Simulation des Schwingungsverhaltens wurde ein Finite-Elemente-Modell mit dem FE-Programm ADINA erstellt.

Die Eingabe der Geometrie erfolgt hierbei über eine Textdatei, die so gestaltet wurde, dass vor allem Änderungen der Plattengeometrie leicht vorgenommen werden können. Es handelt sich hierbei um ein dreidimensionales Volumenkörper-Modell einer auf dem mehrschichtigen Untergrund aufliegenden Platte, wie in Bild 11 zu sehen ist.

Für die numerische Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente werden 8-Knoten-Elemente verwendet, da bei Verwendung von 27-Knoten-Elementen die Rechenzeit sehr stark ansteigt, jedoch nur ein geringer Genauigkeitsgewinn zu verzeichnen ist. Die Platte liegt frei auf der darunter befindlichen Schicht auf, ein Abheben der Platte vom Untergrund ist möglich. In der zwischen den Schichten modellierten Kontaktfläche kann die durch die Vliesschicht stark reduzierte Reibung zwischen der Betonplatte und der darunterliegenden Bodenverfestigung abgebildet werden.

Zur Berücksichtigung der Interaktion an den Querfugen wird sowohl vor als auch hinter der betrachteten Platte jeweils ein Stück der Nachbarplatte mitmodelliert, welches in der Länge etwa einer halben Platte entspricht und durch Dübel mit der Hauptplatte verbunden ist.

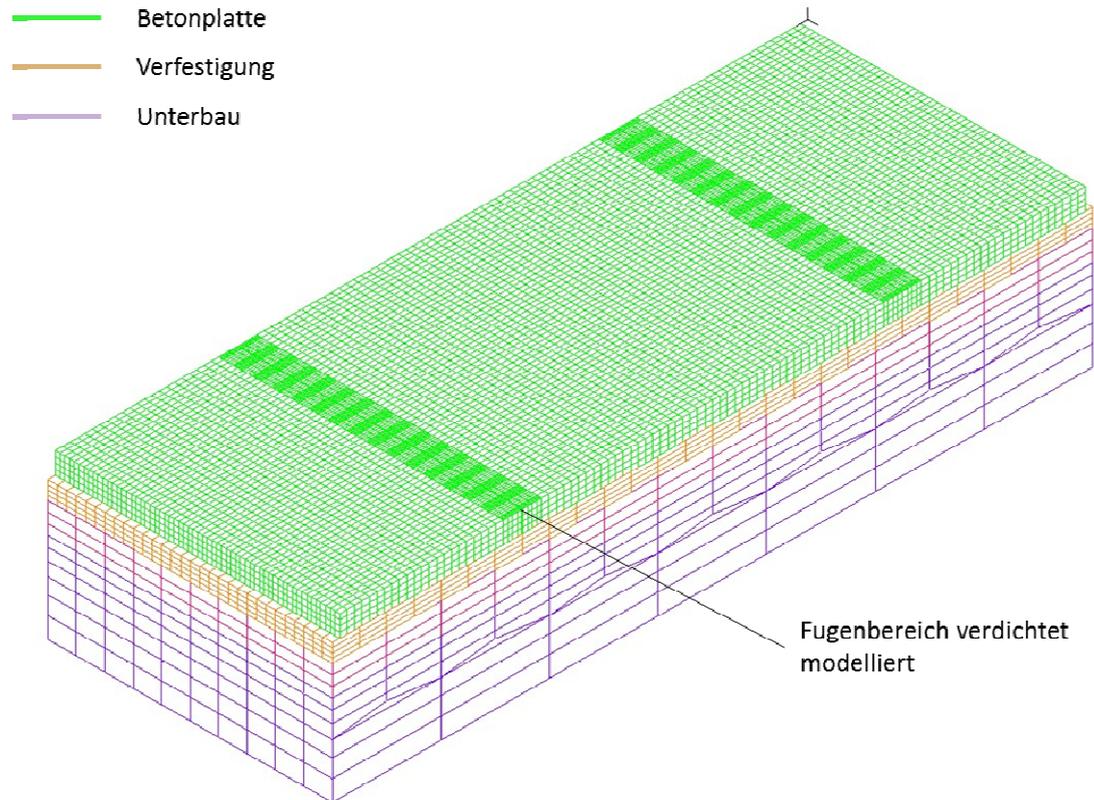


Bild 11: Ansicht des FE-Modelles der Platte mit den darunter liegenden Schichten

Die Dübel wurden als Balken-Elemente mit 50 cm Länge und 2 cm Durchmesser modelliert und sind durch Stabelemente an die Platte angebunden, wodurch sich auch eine eventuelle Hohlage und ein damit verbundenes „Spiel“ der Dübel nachbilden lässt. Die Elementgröße verringert sich im Bereich der Dübel, um eine höhere Genauigkeit der Berechnung im Bereich der Fuge zu erhalten, wie in Bild 12 ersichtlich. Auf eine Modellierung der Dübel als 3D-Volumenkörper wurde verzichtet, da dies nur eine unwesentliche Verbesserung der Modellgenauigkeit bewirken, jedoch die benötigten Rechnerkapazitäten stark erhöhen würde.

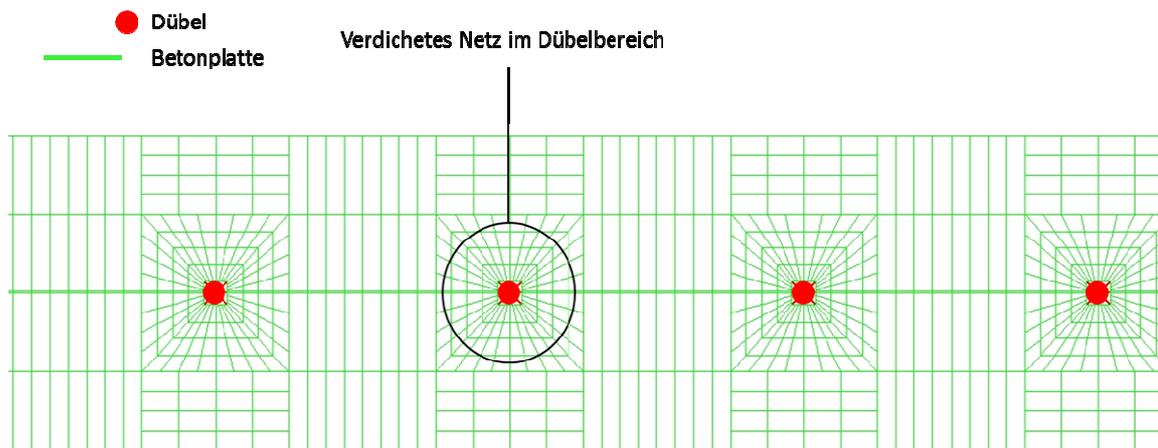


Bild 12: Blick auf den Fugenquerschnitt mit Dübeln

Die unter der Platte liegenden Schichten wurden ebenfalls als 3D-Volumenmodelle modelliert, wobei hier die Größe der Elemente mit zunehmender Tiefe gesteigert wird, da der Einfluss auf das Schwingungsverhalten der Platte abnimmt. Diese Schichten wurden auch bis in weiter entfernte Umgebungsbereiche modelliert, um den Einfluss des umgebenden Unterbaus mit zu berücksichtigen. So kann auch auf eine mit groben Annahmen verbundene Modellierung der Randbedingungen des Systems verzichtet werden, da diese nur mit starken Abweichungen möglich wäre. Auch hier wurde für die weiter entfernten Bereiche ein gröberes Netz gewählt (Bild 13), um dem geringeren Einfluss dieser Gebiete Rechnung zu tragen und die Rechenzeit möglichst gering zu halten.

Zum Abschätzen einer sinnvollen unteren Grenze des modellierten Bereiches wurde die Druckspannung, welche durch die belastete Platte im Unterbau erzeugt wird, mit den Druckspannungen, welche durch das Eigengewicht des Unterbaus erzeugt werden, verglichen, wie dies auch bei Setzungsberechnungen im Grundbau praktiziert wird.

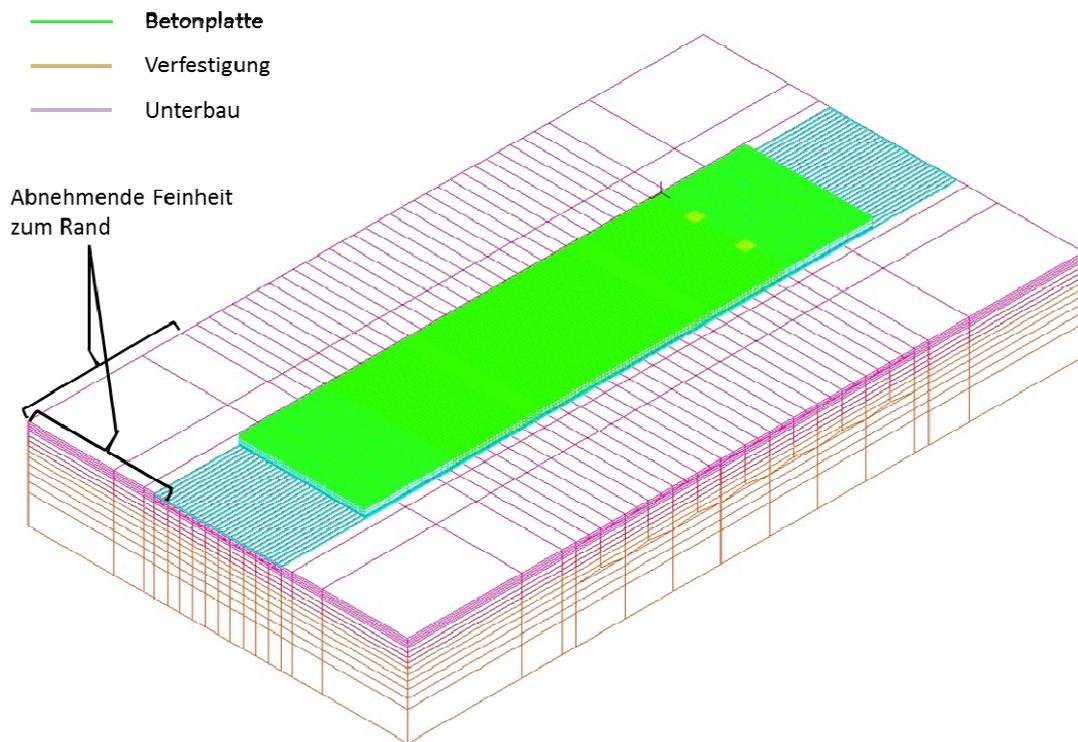


Bild 13: Ansicht des Gesamtmodells mit den umgebenden Bereichen

Dabei wird im Grundbau davon ausgegangen, dass es zu keinen nennenswerten Setzungen mehr kommen kann, sobald die durch die Last erzeugten Spannungen weniger als 20 % der Eigengewichtsspannungen betragen. In dieser Tiefe wird die Setzungsberechnung dann beendet. Bei der Bildung des Modells wurde als untere Grenze, auf der sicheren Seite liegend, ein Grenzwert von 5 % der Eigenspannung gewählt, um auch sicher eventuell störende Randeffekte ausschließen zu können. Wie in Bild 14 zu sehen ist, wird diese Bedingung bereits bei einer Tiefe von 3 Metern erfüllt, so dass dieser Wert als Untergrenze des Modelles gewählt wird.

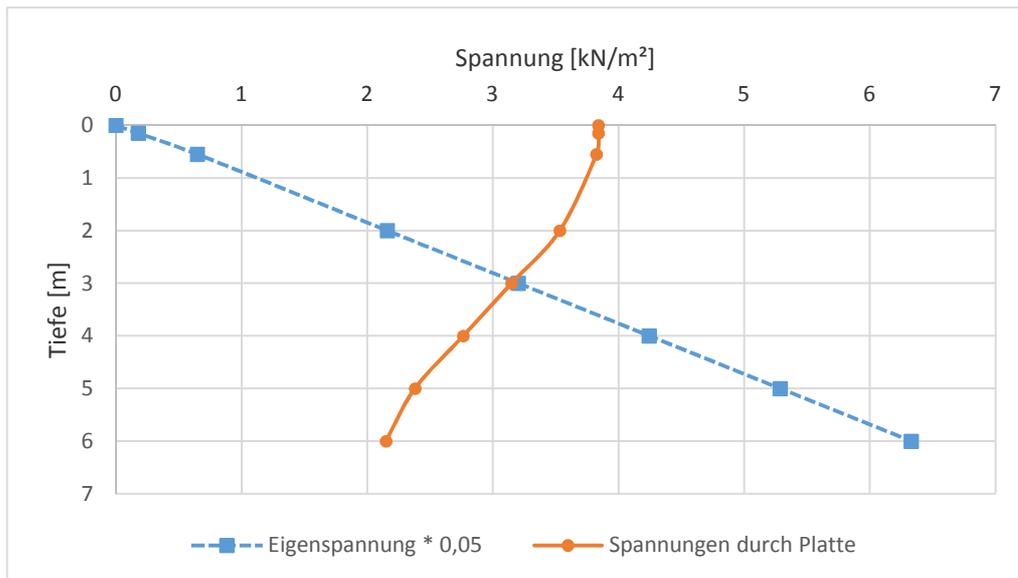


Bild 14: Spannungsverlauf unter der Platte

Symmetrieeigenschaften können bei der Modellierung nicht genutzt werden, da die Überfahrt nicht exakt in der Mitte des Plattenquerschnitts, sondern etwa in der Mitte des aufmarkierten Fahrstreifens erfolgt. Auch können die dämpfenden Eigenschaften der Gesamtplatte durch Randbedingungen nicht ausreichend genau erfasst werden.

Die Lastaufbringung im Modell erfolgt, indem Flächen von 30x30 cm, was der Aufstandsfläche des Lkw-Rades entspricht, mit der jeweiligen Radlast belastet und dann über die Platte verschoben werden. So ist eine gleichmäßige, der Wirklichkeit möglichst nahekommende Verteilung der Last gewährleistet, und ein unrealistisches ‚Springen‘ der Last von Punkt zu Punkt ausgeschlossen, wie es der Fall wäre, wenn man die einzelnen Knoten direkt belasten würde. Auch der Lastübergang über die Querfuge kann so realitätsnah abgebildet werden.

Die Berechnung des Modelles erfolgte sowohl statisch zur Kalibrierung des Modelles mittels des Berechnungsverfahrens nach Westergaard, welches ja

nur die Einsenkungen unter einer statischen Last berechnet, als auch dynamisch unter Verwendung der gemessenen Belastungen auf der Messstelle.

5.2 Kalibrierung des Modells anhand der Messdaten

Um eine genaue Kalibrierung des Modells vornehmen und die gemessenen Beschleunigungen mit dem Simulationsprogramm nachvollziehen zu können, sind möglichst genaue Werkstoffkennwerte der einzelnen Oberbauschichten erforderlich. Aus diesem Grund wurden Bohrproben aus der Fahrbahnplatte und der Verfestigung in der näheren Umgebung der Messstelle genommen. Durch die Kenntnis der tatsächlich vorhandenen Werkstoffkennwerte des Fahrbahnaufbaus können diese in das erstellte FE-Modell übernommen werden, um die Kalibrierung des Modelles zu verbessern. Es wurden 3 Bohrkerne aus den benachbarten Platten der Messstelle gezogen und geprüft.

Bei der Auswertung der Probekörper konnte festgestellt werden, dass die ausgeführte Dicke der Betonplatte nicht wie geplant 27 cm sondern 28,5 cm beträgt, wohingegen die Verfestigung unter der Platte anstatt der projektierten 20 cm im Mittel 24 cm dick ausgeführt wurde. Die über die Probekörper gemittelten Festigkeitskennwerte sind Tabelle 3 zu entnehmen. Die Bohrkerne wurden in ihre einzelnen Schichten aufgeteilt und nach Planschliff der Stirnseiten und genauer Vermessung in eine Druckpresse eingespannt. Zusätzlich wurden die so erstellten Prüfkörper mit seitlichen Wegaufnehmern ausgestattet, um auch die Querdehnung bestimmen zu können. Hierbei wurde auch der statische E-modul bestimmt, wozu die Probekörper mehrmals be- und entlastet wurden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Die Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmodules erfolgte, indem die Probekörper in Längs- und in Querrichtung mit Ultraschall durchleuchtet und die Signalverzögerung gemes-

sen wurde, wodurch man die Stoßwellengeschwindigkeit und aus dieser den dynamischen E-Modul bestimmen kann. Das FE-Rechenmodell wurde daraufhin an die so ermittelten Abmessungen und Kennwerte angepasst.

Tabelle 3: Materialkennwerte der beprobten Schichten

	Beton	Verfestigung
Dichte	2,397	2,157
Druckfestigkeit [N/mm ²]	80,0	16,3
E-Modul (statisch) [N/mm ²]	38513	13161
E-Modul (dynamisch) [N/mm ²]	58269	25307
Stoßwellengeschw. [m/s]	4930	3425
Querdehnmodul [N/mm ²]	146265	81082
Querdehnzahl [-]	0,263	0,162

Mit diesen Abmessungen und Werkstoffkennwerten wurden die zu erwartenden Einsenkungen und Betonzugspannungen an der Unterseite der Betonplatte mittels des Verfahrens nach Westergaard berechnet. Es wurde entsprechen der Radlast des Belastungsfahrzeuges eine Belastung von 43200 N gewählt, so dass die theoretischen Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen der Messungen verglichen werden können. So ist laut den Berechnungen nach Westergaard bei Laststellung Plattenmitte eine Betonzugspannung von 761 kN/m² bei einer Durchbiegung von 0,113 mm zu erwarten. Die durch die Integration der Beschleunigungsdaten gewonnene mittlere Einsenkung

unter dem Belastungsfahrzeug von 0,14 mm liegt auch in diesem Bereich, wobei sich über die tatsächlichen Zugspannungen an der Plattenunterseite aufgrund fehlender Messeinrichtungen keine Aussage treffen lässt. Die Ein-senkungen des FE-Modelles unter der Radlast liegen bei 0,122 mm, und die Spannungen an der Unterseite der Platte bei 783 kN/m² (Bild 15). Hier ist eine sehr gute Annäherung an die Berechnungsergebnisse nach Westergaard zu sehen.

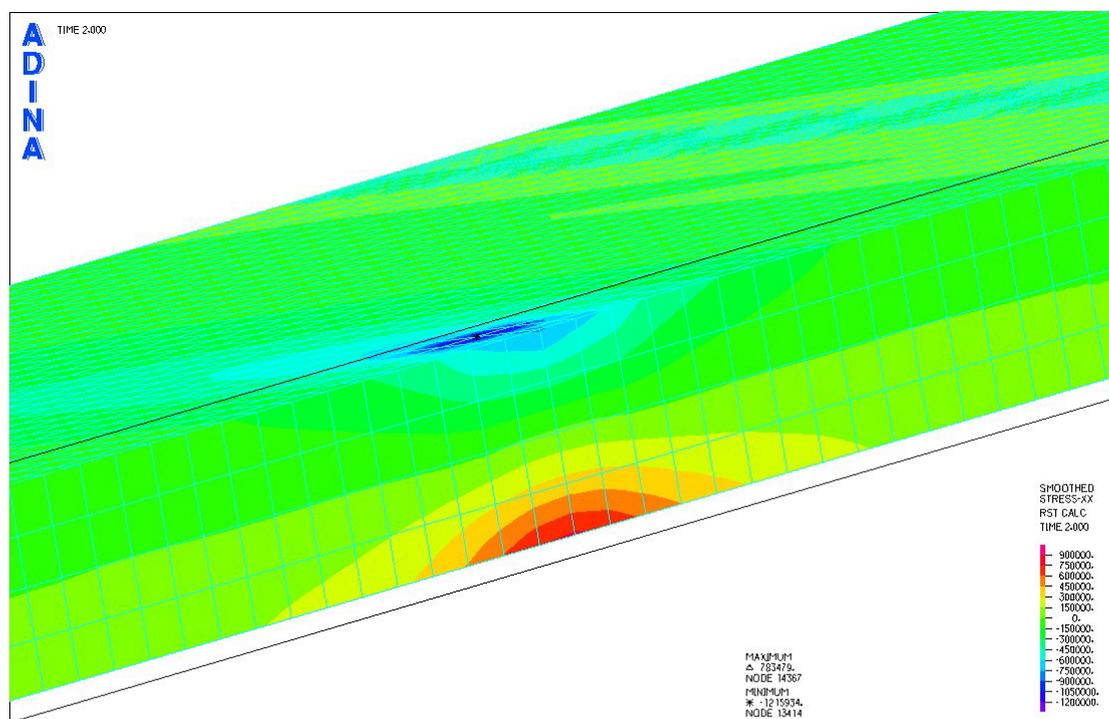


Bild 15: Spannungsverlauf in der Betonplatte, Schnitt unter der Last

Die Abweichungen zwischen Berechnung und gemessenen Daten bewegen sich in einem vertretbaren Rahmen angesichts des Pilotcharakters der Messstelle und sind durch die notwendige Bereinigung der Messdaten um das Signalrauschen und die darauf folgende Integration der Beschleunigungsmesswerte zu erklären.

Die Einsenkung an der Fuge der Betonplatte beträgt laut Westergaard in Kombination der Formel von Sutherland und Teller je nach Wirksamkeitsindex W der Querkraftübertragung

$$y_{Fuge} = 3,46 * y_{Mitte} * \left(1 - \frac{W}{200}\right).$$

Bei der Berechnung des FE-Modells kann von einer guten Querkraftübertragung ausgegangen werden (keine Dübelhohlage). Deshalb wird der Wirksamkeitsindex in der Berechnung zu 100% gesetzt, was eine Durchbiegung am Plattenrand von $1,73 * y_{Mitte} = 0,195$ mm ergibt. Bei Betrachtung des Berechnungsergebnisses des FE-Modelles stellt sich an der Fuge eine Einsenkung von 0,224 mm ein, was dem 1,836-fachen der berechneten Mitteneinsenkung entspricht, und somit sehr nah an dem zu erwartenden Wert liegt. Somit kann von der Richtigkeit der Berechnung der Einsenkungen durch das erstellte FE-Modell ausgegangen werden. Da für das dynamische Verhalten einer Fahrbahnplatte keine numerische Lösung vorhanden ist, kann diese nicht durch bekannte Rechenverfahren kalibriert werden, sondern nur durch die gewonnenen Messdaten.

5.3 Auswertung der Berechnung

Bei der dynamischen Berechnung des Schwingungsverhaltens der Platte kann die reale Anregung der Platte durch einen darüber fahrenden Lkw nicht exakt nachgebildet werden. Bei einem Lkw handelt es sich um einen dynamischen Mehrmassenschwinger, dessen Schwingungsverhalten sich durch die Reifen auf die Straße überträgt. Dieses Schwingungsverhalten hängt stark von unterschiedlichsten Eigenschaften des Lkw ab. So sind hier unter anderem Federung und Dämpfung des Fahrzeuges, Reifendruck und –zustand,

Vibration des Motors, Art und Verhalten der Ladung und der Zustand und die Ebenheit der zuletzt befahrenen Straßenstrecke mit für die in die Fahrbahn eingebrachte Belastung einzubeziehen. Da all diese Einflussgrößen nicht genau bekannt sind, und deren genaue Quantifizierung den Rahmen dieses Forschungsprojekts gesprengt hätte, können die so verursachten Lastschwankungen nur geschätzt werden. Um diese dynamische Anregung zu berücksichtigen wurde vereinfachend eine normalverteilte Schwankung der Last von 10% der Achslast angenommen.

In weiteren Berechnungen wurde der Einfluss der Dämpfung auf das dynamische Verhalten der Platte untersucht. Die Dämpfung der Betonplatte wurde zwischen 0,05 % und 2 % variiert, wohingegen die Dämpfung des Untergrundes nicht verändert wurde. Die Abmessungen der Modellplatte betragen in der Länge 5 m, in der Breite 3,75 m und Dicke 0,285 m, wie dies bei der realen Platte auch der Fall ist. Die Dämpfung des Unterbaus wurde mit 1 % sehr gering gewählt, um eventuell auftretenden dynamischen Effekten der Platte möglichst wenig Widerstand entgegenzusetzen. Bei der Auswertung der Einsenkung der Platte wurden 2 Punkte jeweils auf beiden Seiten der Fuge und die Einsenkung in Mitte der Platte betrachtet.

Der Verlauf der Einsenkungen an der Fuge und in Plattenmitte ist jeweils in Bild 16 und Bild 17 zu sehen. Der Verlauf der Einsenkungslinien der Betonplatte ist trotz des sehr großen Unterschieds der Dämpfung sehr ähnlich, mit nur sehr geringen Abweichungen zueinander. Da das Einsenkungsverhalten der Platte wie erkennbar von den Eigenschaften des Unterbaus und nicht von der Dämpfung der Platte bestimmt wird, wurde für die weiteren Berechnungen auf Variationen der Dämpfungseigenschaften der Platte selbst verzichtet, sondern nur noch die Dämpfung des Gesamtsystems, bestehend aus Platte und Unterbau, variiert.

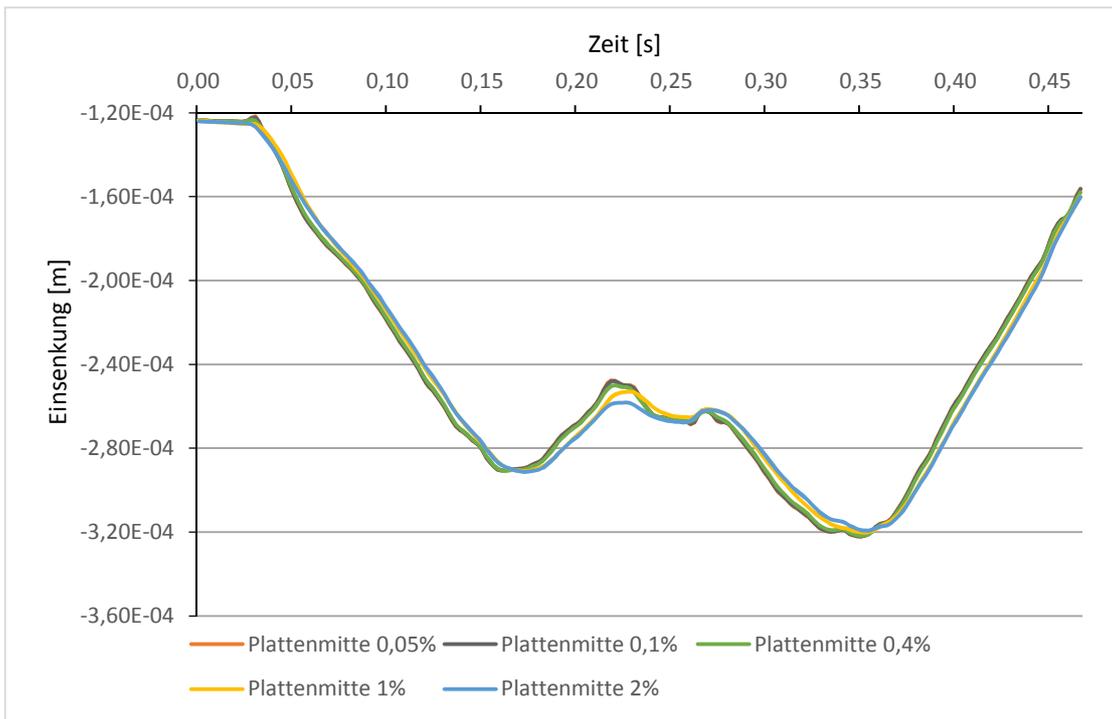


Bild 16: Einsenkung in Plattenmitte bei unterschiedlicher Dämpfung der Betonplatte

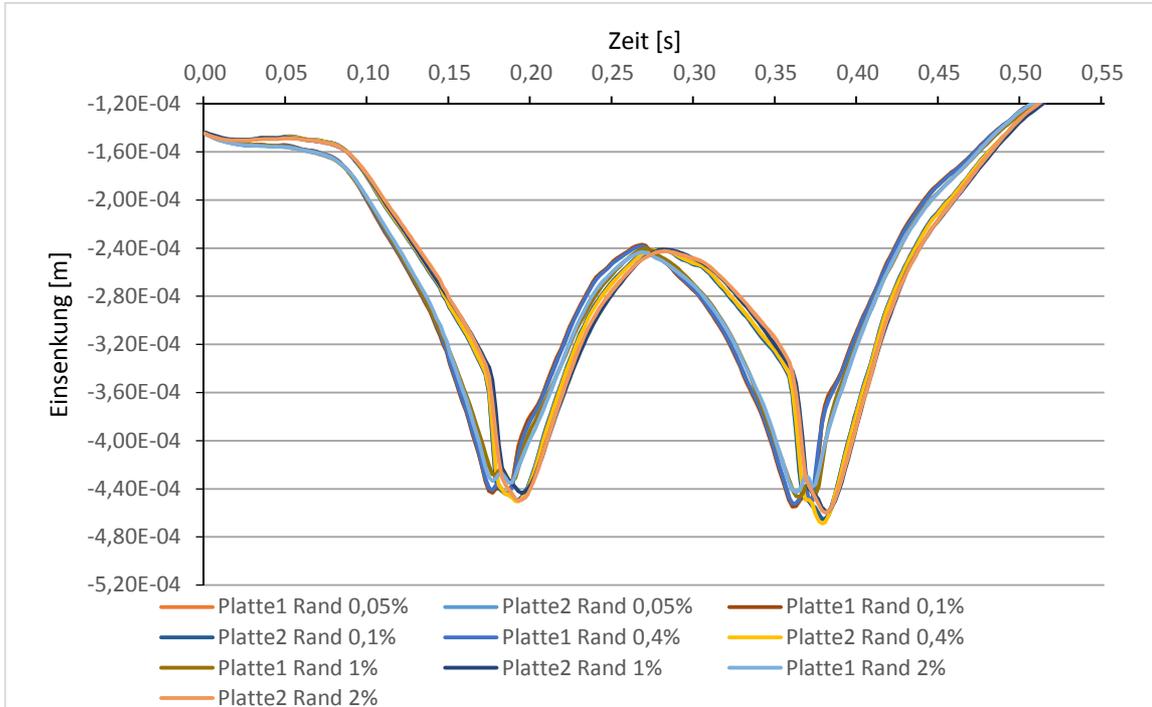


Bild 17: Einsenkung an der Fuge bei unterschiedlicher Dämpfung der Betonplatte

Des Weiteren wurden unterschiedliche Plattenlängen und ihr Einfluss speziell auf das Einsenkungsverhalten im Fugenbereich untersucht, da hier das bekannte ‚Pumpen‘, ein häufiger Schadensmechanismus, stattfindet. Da dies durch die Differenz der Einsenkung der beiden Plattenränder beim Übergang der Last von einer auf die andere Platte verursacht wird, ist davon auszugehen, dass bei einer Verringerung dieser Relativbewegung die Entstehung dieser Schadenswirkung verzögert werden kann.

Um das Ergebnis der Simulation mit unterschiedlichen Plattenlängen und deren Einfluss auf die Einsenkungsdifferenz der Plattenränder vergleichen zu können, wurden bei der Auswertung immer dieselben Punkte am Plattenrand betrachtet, welche sich in der Mitte der entstehenden Einsenkungsmulde befinden. Die Geschwindigkeit der Überfahrt wurde konstant bei 80 km/h belassen, Dicke und Breite der Platte sowie der Aufbau des Untergrundes wurden beibehalten.

In Bild 18 wird das Ergebnis einer Simulation einer solchen Überfahrt der Fuge bei einer Plattenlänge von 5 m gezeigt. Man erkennt dass die Einsenkung der ersten Platte der zweiten vorausseilt, jedoch sich auch die zweite Platte bereits einsenkt, ohne dass sich die Last schon auf dieser befindet. Dies ist sowohl in der guten Querkraftübertragung in der Fuge als auch in der guten Lastverteilung in der sehr tragfähigen Verfestigungsschicht der Unterlage begründet. Diese Differenz nimmt bei Annäherung der Last an die Fuge immer weiter zu, bis es zum Übergang der Belastung auf die folgende Platte kommt. Hier ist kurzzeitig eine gleichzeitige Bewegung der Plattenränder für den Zeitraum festzustellen, an dem sich die Last gleichzeitig auf beiden Platten befindet.

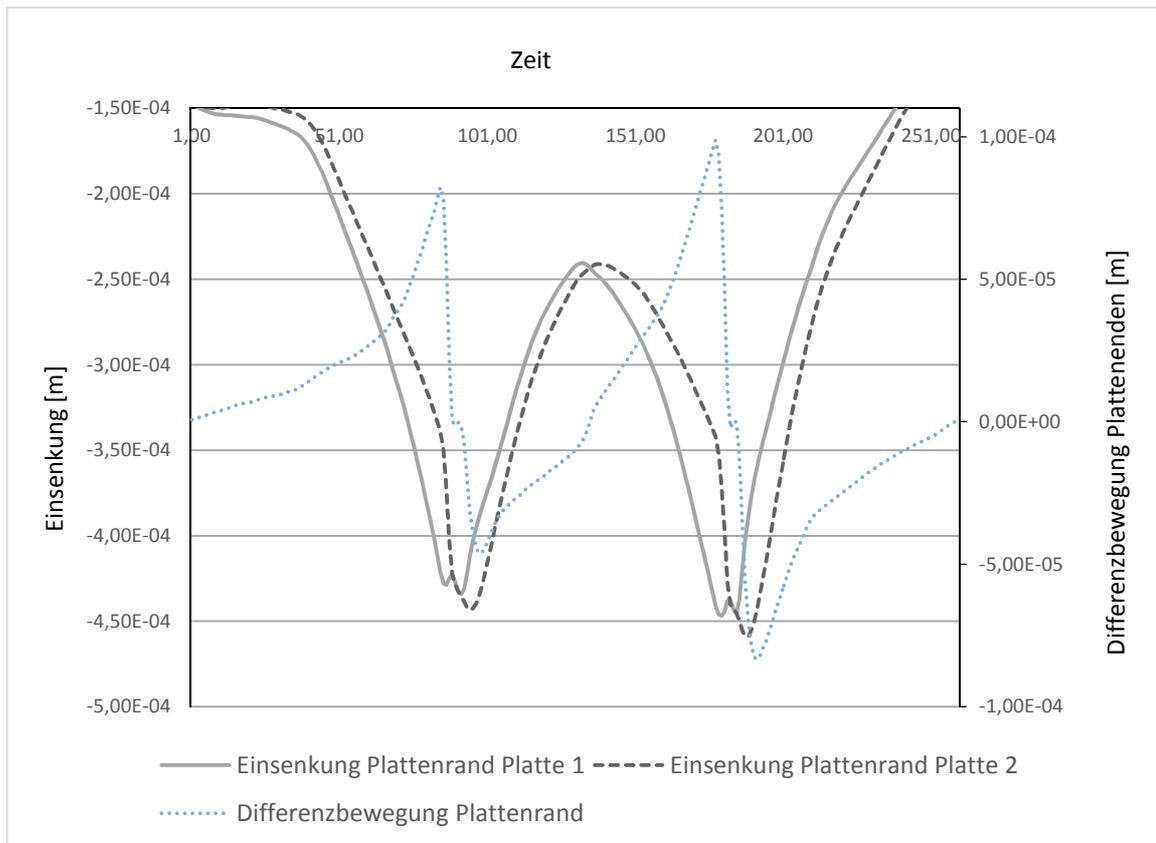


Bild 18: Einsenkung des Plattenrandes bei Überfahrt (Plattenlänge 5m)

Daraufhin erfolgt das Ausfedern der ersten Platte bei gleichzeitigem Einfedern der zweiten von Platte, bevor die Einsenkung beider Plattenränder mit steigendem Abstand der Last abnimmt. Daraufhin folgt die Wiederholung dieses Ablaufs für Achse 2 mit einer entsprechend der höheren Achslast stärkeren Einsenkung und Gesamtbewegung. Da für das Pumpen unter den Platten nur die Relativbewegung der Plattenränder von Bedeutung ist, wurden einige der berechneten Ergebnisse in Bild 19 gegenübergestellt. Die unterschiedliche zeitliche Position der Kurven ist durch die unterschiedlichen Plattenlängen und die damit verbundene Zeit, bis die Last die Fuge erreicht, begründet.

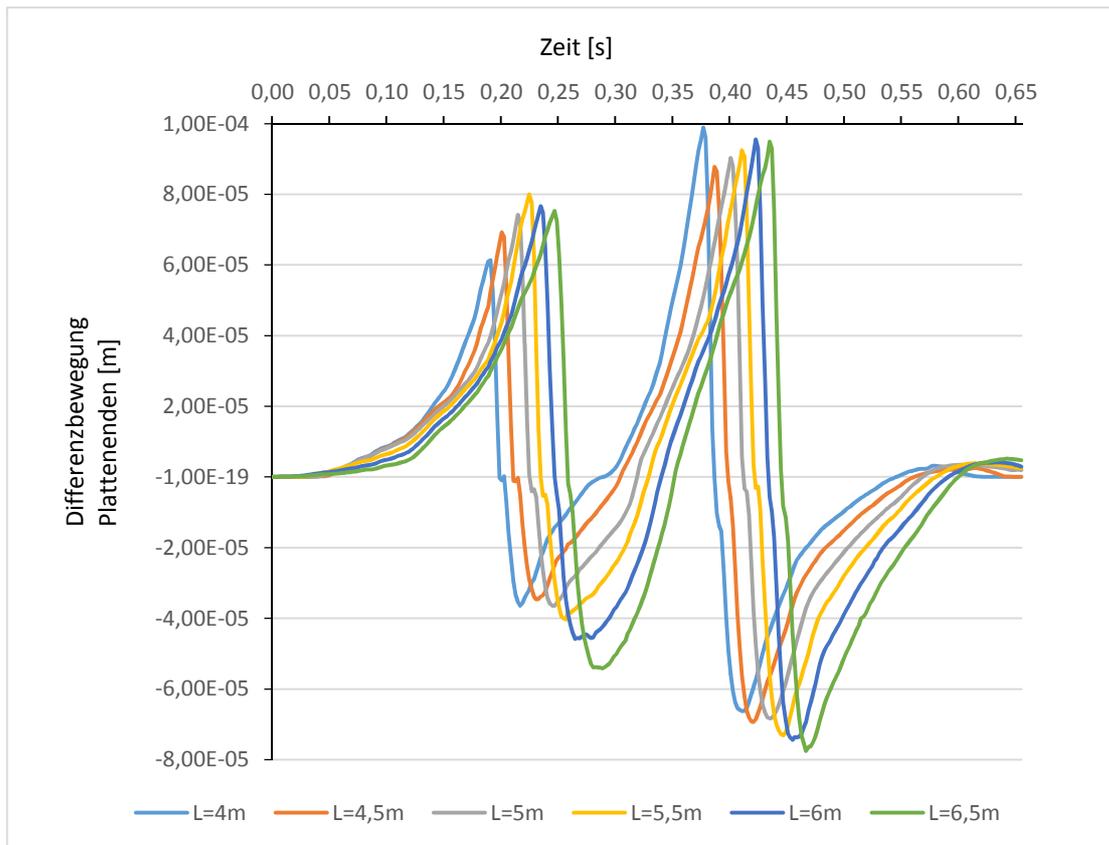


Bild 19: Differenzbewegung der Fuge bei verschiedenen Plattenlängen (Dämpfung 2 %)

Es zeigt sich, dass die Einsenkung der ersten Platte durch die Länge der Platte kaum beeinflusst wird, jedoch bei Entlastung der ersten Platte eine mit zunehmender Plattenlänge größer werdende Relativbewegung der Plattenenden zu verzeichnen ist. Dies ist besonders bei Plattenlängen größer als 5 m zu verzeichnen, bei kleineren Plattenlängen zeigt sich kaum ein Unterschied. Ob diese Differenzen aus einer schnelleren Rückfederung der entlasteten Platte oder einer schnelleren Einfederung der nun belasteten Platte resultiert, lässt sich hier jedoch nicht beantworten. Bei Variation der Dämpfung des Systems lässt sich feststellen, dass die Relativbewegung in der Fuge vor allem bei Entlastung der ersten Platte mit abnehmender Systemdämpfung zunimmt, wie in Bild 20 gut zu erkennen. Dies beruht auf der durch die geringere Dämpfung höheren Beschleunigung des entlasteten Plattenrandes, welcher wieder nach

oben schnell. Die Einsenkung unter der Last bleibt hingegen von der Dämpfung weitestgehend unberührt, da diese durch die Auflagerbedingungen der Platte auf dem Unterbau und nicht durch das dynamische Dämpfungsverhalten bestimmt wird. Ein Ausschlagen der Platte über ihre Ausgangslage ist in keinem Fall zu verzeichnen, jedoch kommt es durch die sehr hohe Geschwindigkeit der Ausfederungsbewegung des entlasteten Plattenrandes zu einem geringen Abheben der Plattenunterseite von der Oberfläche der darunterliegenden Verfestigung. Hier kann die bereits bestehende Theorie des Pumpens und der damit verbundenen Stoffumlagerung in den so geschaffenen Hohlraum bekräftigt werden.

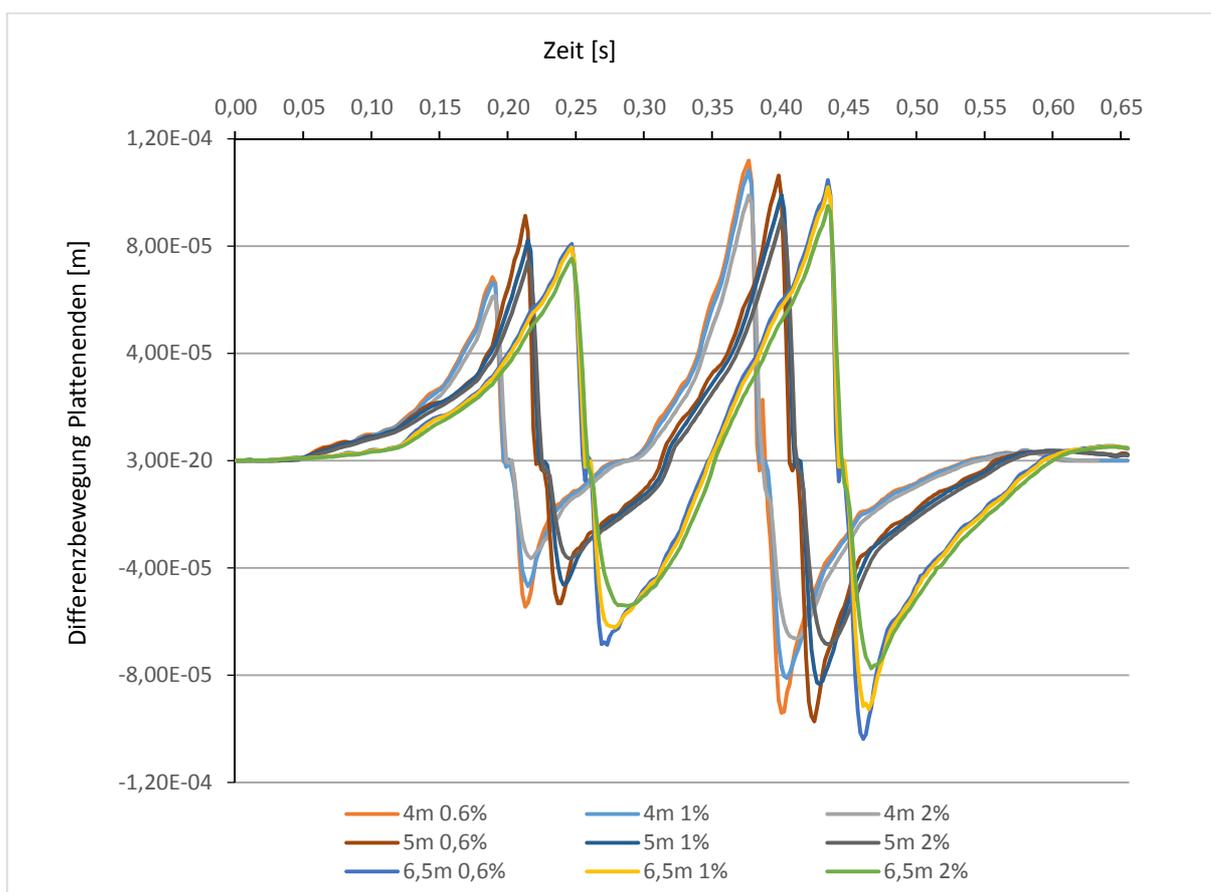


Bild 20: Einfluss der Dämpfung auf die Bewegung in der Fuge

Jedoch bleibt ungeachtet der höheren Rückstellungsgeschwindigkeit der Platte bei geringerer Dämpfung die vorher gefundene Aussage bestehen, dass die Relativbewegung der Plattenränder mit steigender Plattenlänge, besonders bei Längen größer 5 m, zunimmt.

6. Fazit

In diesem Projekt wurde anhand eines Prototypen einer Messstelle versucht, das Schwingungsverhalten von Betonfahrbahnplatten genauer zu erforschen. Hierbei erwies sich die Verwendung von Beschleunigungssensoren zur Erfassung des Plattenverhaltens durchaus als brauchbar. Es wurde ein Finites-Elemente-Modell der Messstelle erstellt und es wurden sowohl das Verhalten der Platte bei Überfahrt eines Lkw als auch die Auswirkungen unterschiedlicher Abmessungen darauf untersucht. Dabei konnte kein Schwingungsbild der Platte oder ein nennenswertes Nachschwingverhalten festgestellt werden. Jedoch zeigte sich in der Simulation ein Einfluss der Plattenlänge auf die Relativbewegung in der Fuge, welche bei zunehmender Plattenlänge ebenfalls zunimmt. Ansonsten ist das Einsenkungsverhalten der Platte stark durch das Tragverhalten des Unterbaus bestimmt.

Für weitere noch zu errichtende Beschleunigungsmessstellen auf Autobahnfahrbahnen lassen sich aus diesem Projekt wertvolle Empfehlungen ableiten, und auch manche in Zukunft vermeidbare Fehler bei der Ausgestaltung der Messstelle lassen sich identifizieren.

So sollte man bei der Platzierung der Beschleunigungssensoren ein Hauptaugenmerk auf die Sensoren in den Rollspuren des Lkw-Verkehrs legen, da in der Mitte der Fahrstreifen nur sehr geringe Bewegungen der Platte stattfinden, was nur zu sehr geringen Messsignalen der Sensoren mit nur sehr begrenztem Mehrwert für das Verständnis des Plattenverhaltens führt. In den Rollspuren sind die Sensoren an den Enden der Platte und in Plattenmitte ausreichend, um das Bewegungsverhalten der Platte im Ganzen erfassen zu können. Sollten auch Sensoren in einer benachbarten Platte installiert werden, so ist darauf zu achten, dass die Kabel nicht durch die Quertuge gelegt werden, sondern erst seitlich aus der jeweiligen Betonplatte herausgeführt werden und

dann in Längsrichtung verzogen werden. Alternativ könnten die Kabel auch in Schutzrohren verlegt werden, wobei dadurch allerdings verfälschende Einflüsse auf das Gesamtverhalten der Platte zu erwarten sind.

Bei den Sensoren sollte es sich um Beschleunigungssensoren mit einem möglichst kleinen Messbereich handeln, je nach Verfügbarkeit des gewählten Herstellers. Da durch die Erdbeschleunigung bereits ein dauernder Beschleunigungswert von 1 g in z-Richtung an den Sensoren anliegt, sind mindestens Sensoren mit einem Messbereich größer 1 g zu wählen. Jedoch sollte der Messbereich auch nicht übermäßig groß gewählt werden, um das Grundrauschen der Sensoren möglichst gering zu halten, da dieses aufgrund der geringen zu messenden Beschleunigungen stark ins Gewicht fällt. Auf die kostspieligeren und auch deutlich baugrößeren Sensoren mit 3-axialer Beschleunigungsmessmöglichkeit kann hingegen verzichtet werden, da im Verhältnis zu den vertikalen Beschleunigungen und Bewegungen die horizontalen Anteile vernachlässigbar gering sind.

Als zusätzliche, an der Messstelle vorzusehende Messeinrichtungen wären unter anderem Temperaturmesssensoren an Ober- und Unterseite der Befestigung sinnvoll, um direkte Aussagen über Eigenspannungszustände insbesondere aus ungleichmäßiger Temperaturverteilung über die Querschnittshöhe der Platte (Aufschüsselung/Aufwölbung) zu gewinnen. Auch wäre eine ergänzende Ausstattung der Messstelle mit Druckmessdosen im Unterbau, Dehnungsmessstreifen an der Plattenunterseite, Einsenkungsmesseinrichtungen oder dergleichen denkbar, um z.B. unmittelbar geometrische Messgrößen zu erhalten, mit deren Hilfe auf der Grundlage anerkannter mechanischer Verfahren für die Veränderung der Plattenform die Validität des FE-Modells genauer überprüft werden könnte bzw. einzelne Ergebnisse der Beschleunigungsmessung besser interpretiert werden könnten.

7. Abstract

Im Zuge dieses Forschungsprojekt wurde versucht, das Schwingungs- und Verformungsverhalten einer Betonfahrbahnplatte genauer zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurde eine neuartige Art von Messstelle errichtet, bei welcher Beschleunigungssensoren zur Erfassung der Plattenbewegung benutzt wurden. Es stellte sich heraus, dass sich so durchaus die Einsenkungen der Platte bestimmen lassen.

Während der Auswertung der gemessenen Daten konnten Aussagen über verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich Auswahl, Anzahl und Platzierung der Sensoren, der Detailausführung der Messstelle, und zusätzlicher, bei der Kalibrierung hilfreicher bewährter Messsysteme gewonnen werden. So sind 1-axiale Beschleunigungssensoren mit einem möglichst geringen Messbereich ausreichend, jedoch ist ein besonderes Augenmerk auf die Kabelführung, speziell über Fugen, zu richten. Auch die Anzahl der Beschleunigungssensoren kann reduziert werden, wohingegen konventionelle Sensorik zur Kalibrierung hilfreich wäre.

Nach Analyse der Messdaten hinsichtlich Einsenkung und spektraler Leistungsdichte konnte festgestellt werden, dass ein harmonisches Schwingungsverhalten oder ein Nachschwingen der Platte durch die sehr starke Dämpfung des Systems ausgeschlossen werden kann.

Des Weiteren wurde ein FE-Modell der Betonplatte mit den dort vorkommenden Abmessungen und Materialkennwerten erstellt und anhand der Messwerte und des Verfahrens nach Westergaard kalibriert. An diesem können Variationen von Länge, Breite und Höhe der Platte berechnet und das Verhalten bei Überfahrt eines Lkw untersucht werden. Hierbei zeigte sich ein dominanter

Einfluss des Untergrundes, sowohl auf das Schwingungs- als auch auf das Verformungsverhalten der Platte.

Bei Variation der Plattenlänge konnte ein Einfluss der Länge auf die Relativbewegung in der Fuge ermittelt werden. Hier ist besonders bei Längen von mehr als 5 m eine starke Zunahme zu bemerken, somit kann von Plattenlängen von mehr als 5 m abgeraten werden. Durch Betrachten des Plattenverhaltens beim Lastübergang zwischen den Platten konnte die bereits bestehende Theorie des Pumpens und der durch die damit verbundene Stoffumlagerung verursachten Stufenbildung bestätigt werden.

Quellen

[DIE STRAßE]: N.N.; Schwingungsuntersuchungen an Betonstrecken der Autobahnen München und Frankfurt a.M.; Die Straße; 1935, 2.Jahrgang, Ausgabe Nr.10

[KENNEDY]: Kennedy, J.C.; Everhart, D: Modeling Pavement Response to Vehicular Traffic on Ohio Test Road; In: TRR 1629, Washington, DC; 1998

[RAMSPECK]: Ramspeck,A.: Dynamische Untersuchungen auf Betonfahrbahndecken, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen; Volk und Reich Verlag; Berlin; 1937

[SHOUKRY]: Shoukry, S.N.; Fahmy, M.; Prucz, J.; William, G.: Validation of 3DFE Analysis of Rigid Pavement Dynamic Response to Moving Traffic and Nonlinear Temperature Gradient Effect; In: International Journal of Geomechanics, Vol. 7; Nr. 1; 2007

[SVZ 2009]: Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2009; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen; Heft V 205; Dauerzählstelle Eppelheim, BAST-Nr: 8010

[WILK] Wilk, W.; Eberl, J.; Käuli, E.: Schwingungsverhalten von Betonstraßen unter Anregung durch rollenden Verkehr; Forschungsauftrag 10/89 auf Antrag der Vereinigung Schweizer Straßenfachleute VSS; 1995

[ZAGHLOUL]: Zaghoul, S.M.; White, T.D.; Kuczek, T.: Evaluation of Heavy Load Damage Effect on Concrete Pavement using Three-Dimensional, Nonlinear Dynamic Analysis; In: TRR 1449; Washington, DC; 1994