

# Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung in Asphaltkörpern

Manuel Pfeiffer, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida, Technikumplatz 17, 09648 Mittweida

*Ziel dieser Untersuchungen war die Erforschung der Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen opto-akustischen Messtechnologie für eine mobile, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen. Diese basiert auf der Impulseinkopplung hochenergetischer Laserpulse, die in die Fahrbahnoberfläche eingetragen werden und auf der Auswertung der Ausbreitungs- und Reflexionsmuster der so generierten Körperschallwellen. Hierfür wurden in einem ersten Schritt Laborversuche zur generellen Signalgenerierung durch laserinduzierte Schockwellen in Asphaltkörpern vorgenommen und deren potenzielle Ausbreitungsreichweite für die Anwendung auf realen Asphaltfahrbahnen untersucht. Für die Untersuchung an den Asphaltprobekörpern wurde eine Laboranlage mit einem integrierten KrF-Excimerlaser LPX Pro 305F (Wellenlänge 248 nm, Pulsdauer 30 ns, Pulswiederholfrequenz 1-50 Hz & maximale Pulsenergie 1,2 J) verwendet.*

---

## 1. Motivation und Zielstellung

Im heutigen Straßenbau stellt die Erhaltung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur den Schwerpunkt in Deutschland dar. Die Erhaltung der Straßenbefestigung wird dabei in Erneuerungs- und Instandsetzungsmaßnahmen unterschieden und dient der Beseitigung der Schäden an der Oberfläche, an einzelnen Schichten oder der gesamten Straßenbefestigung. Grundsätzlich bestehen Asphaltfahrbahnen aus mehreren Schichten wie Trag- und Deckschicht, oder je nach Geländeart und Beanspruchung aus komplexeren Schichtsystemen inkl. Unterbau. Sichtbare Straßenschäden betreffen dabei lediglich die Deckschicht, welche durch die Belastung und äußeren Wettereinflüsse hervorgerufen werden können, aber häufig Symptome von Fehlern und Schäden im Untergrund bzw. im Schichtsystem der Asphaltstruktur oder deren Zusammensetzung sind. Eine Erneuerung der Deckschicht als gängige Instandsetzungsmaßnahme ist daher in den meisten Fällen nur eine temporäre Lösung. Die Herausforderung der Erhaltungsmaßnahmen sollte sein, nicht nur die Symptome, sondern die eigentlichen Ursachen zu beheben, wodurch die Qualität der Straßenbefestigung erhöht, deren langfristige Nutzungsdauer gesichert und die Beeinträchtigung für Verkehrsteilnehmer reduziert werden kann.

Um eine gezielte Erhaltungsplanung zu realisieren, ist es daher nötig die Ursachen für Straßenschäden vorausschauend oder zeitnah zu erkennen und genau zu lokalisieren. Gemäß aktuellen Richtlinien für die Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltbefestigungen [1] werden hierfür aufwendig und mit Straßensperrungen verbundene Kernbohrungen unternommen, welche lediglich punktuell und unter hohem Aufwand zeitverzögert ausgewertet werden können.

Die Grundlagen für ein alternatives, zerstörungsfreies Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltfahrbahnen wurden in einem Forschungsprojekt [2] entwickelt und die Idee mit einer Patentschrift [3] geschützt. In diesem Verfahren wird durch einen mechanischen Kraftstoß in die Fahrbahnbefestigung mit Hilfe eines elektrodynamischen Wandlers („Shaker“) ein Körperschallfeld induziert und anschließend durch ein Array von Beschleunigungsaufnehmern in unterschiedlichen Entfernungen zur Quelle detektiert (siehe Abbildung 1). Die so akquirierten örtlich verteilten Beschleunigungs-Zeitverläufe können mit Hilfe eines multimodalen Modells basierend auf der MASW-Methode („Multichannel analysis of surface waves“ [4]) weiterverarbeitet werden, wodurch Angaben zum Steifigkeitsmodul einzelner Schichten der Fahrbahn und in einem nächsten Schritt Aussagen zum Zustand der Fahrbahn möglich sind. In diesem Entwicklungsschritt erfolgt die Anregung der Struktur jedoch statisch und nicht berührungslos, was keine schnelle und flächendeckende Untersuchung ermöglicht. Aufgrund dessen wurden die im Folgenden dargestellten Untersuchungen zur Weiterentwicklung der zerstörungsfreien Prüfung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen, durch ein berührungsloses Anregungsverfahren, vorgenommen.

Ziel dieser Untersuchungen war es, den mechanischen Kraftstoß durch den Shaker durch eine Impulseinkopplung durch hochenergetische Laserpulse zu ersetzen (siehe nachfolgende Abbildung 1), wobei dann die Signalerzeugung durch laserinduzierte Schockwellen in den Asphaltkörpern erfolgt. Der Vorteil einer solchen Impulseinkopplung ist ein berührungs- und nahezu zerstörungsfreies, alternatives Anregungsverfahren, wodurch eine schnelle und mobile Messung und infolgedessen eine kontinuierliche und flächendeckende Fahrbahnprüfung ermöglicht werden könnte.

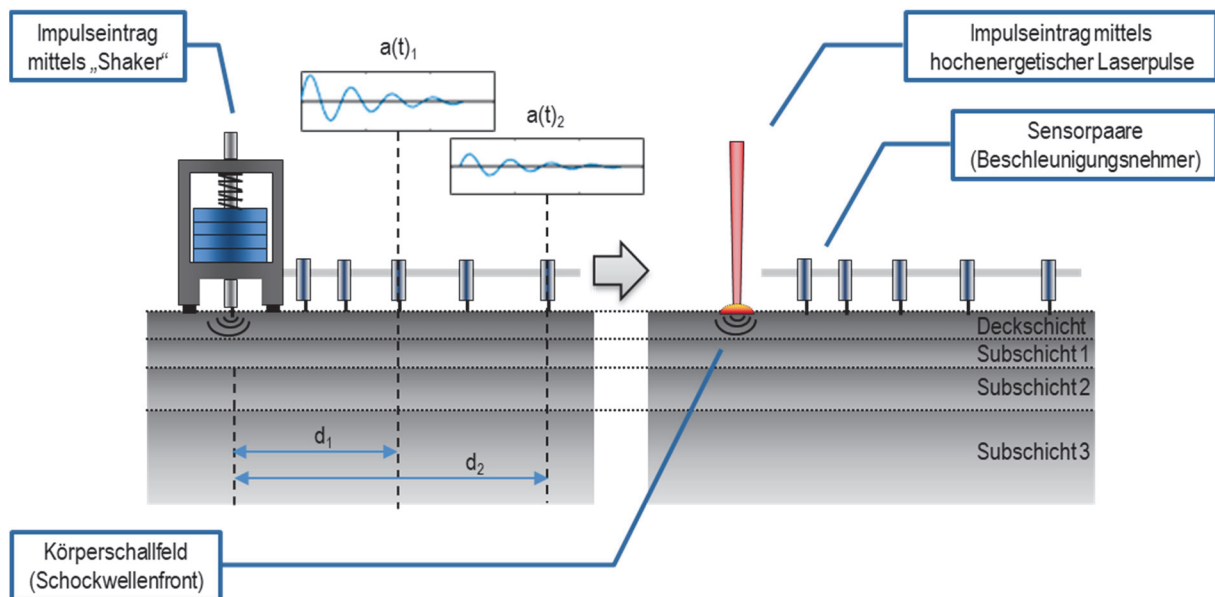


Abbildung 1: Darstellung des Verfahrens zur zerstörungsfreien Bewertung der strukturellen Substanz von mehrschichtigen Asphaltbahnen. Links: Der Impulseintrag erfolgt mechanisch mit einem elektrodynamischen Wandler („Shaker“) statisch und nicht berührungslos. Rechts: Der Impulseintrag erfolgt durch hochenergetische Laserpulse berührungslos.

Um den mechanischen Impulseintrag mittels Shaker ersetzen zu können, mussten bei der alternativen Signalgenerierung durch laserinduzierte Schockwellen grundlegend zwei Anforderungen erfüllt und untersucht werden. Zum einen muss für eine Informationszuordnung innerhalb einer Asphaltenschicht ein frequenzabhängiges Schockwellensignal erzeugt werden. Untersuchungen im vorangegangenen Forschungsprojekt [2] zeigten, dass für die Asphaltbewertung der Bereich zwischen 2 kHz und 20 kHz für Signalfrequenzen interessant ist, wobei hochfrequente Anteile, die Informationen der oberflächennahen und niederfrequente Anteile die Informationen der tieferen Bereiche der Asphaltkörper enthalten. Zum anderen muss für eine Zuordnung frequenzgleicher Signale in horizontal geschichteten Medien, was den Aufbau einer realen Asphaltbahn mit mehreren Subschichten entspricht, eine Mindestsignalreichweite von 50 cm, für die Anordnung des Arrays von Beschleunigungsaufnehmern, bei der Nutzung der MASW-Methode zur Verfügung stehen. Hintergrund für die Signalzuordnung mittels MASW-Methode ist die dispersive Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen, hier speziell der untersuchten Rayleighwellen, in Festkörpern mit verschiedenen Eigenschaften [5].

## 2. Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung

Die laserinduzierte Schockwellenanregung basiert auf der Absorption hochenergetischer Laserpulse in der Probekörperoberfläche [6]. Bei ausreichend kurzen Pulsdauern im Nanosekundenbereich und gleichzeitig hohen Laserpulsfluenzen  $> 30 \text{ J/cm}^2$  erfolgt infolge des Materialabtrags vom Probekörper mit Abtragstiefen pro Puls von 10 nm bis 100 nm eine explosionsartige Plas-

mabildung. Durch die Plasmaexpansion wird ein Rückstoß hervorgerufen, in dessen Folge eine resultierende Schockwellenfront im Probekörper entsteht (siehe Abbildung 2) und sich in Form eines Körperschallfeldes u. a. als Rayleighwellen ausbreitet.

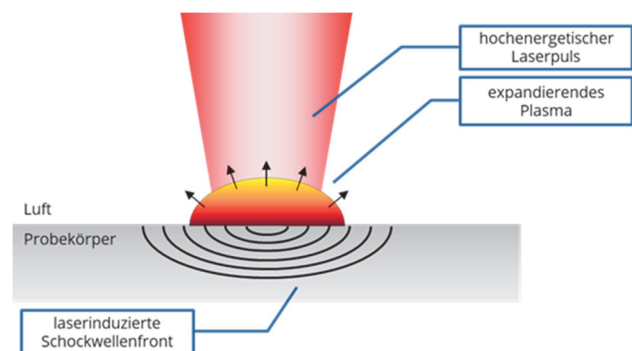


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Generierung von Körperschallwellen in Form einer sich ausbreitenden Schockwellenfront durch den Eintrag hochenergetischer Laserpulse und dadurch als Folge eines so erzeugten, expandierenden Plasmas.

Das so generierte Schockwellenprofil folgt dabei grob den zeitlichen Eigenschaften der verwendeten Laserstrahlung, wobei der Schockwellendruck von der Laserstrahlwellenlänge, der Pulsdauer, der Fokus-Spot-Größe sowie vom Probekörpermaterial selbst als auch von der Art der Plasmaexpansion abhängt [6].

## 3. Experimentelle Durchführung und Anlagentechnik

Die Durchführung der Versuche für die hier dargestellten Ergebnisse erfolgte in zwei Schritten. Für die Bestimmung der Signalreichweite wurden mechanische Untersuchungen zur Signalabschwächung an einer realen Asphaltbahn vorgenommen. Die Untersuchungen zur

frequenzabhängigen Signalerzeugung mit Hilfe von hochenergetischen Laserpulsen erfolgte an Asphaltprobeplatten aus Deckschichtmaterial AC 8 DS im Labor. Da das Übertragungsverhältnis von Kräfteintrag zur gemessenen Signalstärke bei der mechanischen Anregung auf der realen Asphaltfahrbahn und den Probeplatten vergleichbar war wird davon ausgegangen, dass sich die Ergebnisse der Laboruntersuchung zur laserinduzierten Schockwellenanregung ebenfalls auf die realen Bedingungen übertragen lassen.

Allgemein erfolgte die Aufnahme der Signale unter Verwendung eines Datenerfassungssystems Ni cDAQ-9178 mit einem Schall- und Schwingungsmessmodul (Modell NI 9232) der Firma National Instruments. Für die Darstellung der aufgenommenen Signale und die weitere Verarbeitung der Daten wurde das Programm MatLab (Version R2018b) der Firma MathWorks genutzt.

### 3.1. Schockwellenanregung mittels Excimerlaser

Die Grundlage des experimentellen Aufbaus für die Laboruntersuchung an den Asphaltprobeplatten zur Schockwellenanregung mittels hochenergetischer Laserpulse bildet eine Excimerlaser-Laboranlage (Maskenprojektionssystem) mit einem integrierten KrF-Excimerlaser LPX Pro 305F der Firma Coherent GmbH mit einer Wellenlänge von 248 nm, einer Pulsdauer von 30 ns und einer maximalen Pulsenergie am Strahlausgang am Lasergerät von 1,2 J. Die Pulsrepetitionsrate kann im Bereich von 1 - 50 Hz variiert werden. Der Laser weist ein äußerst inhomogen verteiltes Ausgangsstrahlprofil auf und benötigt für die Abbildung der Maskenebene im Strahlengang einen komplexen, optischen Aufbau zur Homogenisierung u.a. mit Hilfe von einer Teleskopanordnung, Zylinderlinsen-Arrays und Feldlinsen. Das Strahlprofil in der Maskenebene bildet dann einen homogenen 20 x 20 mm<sup>2</sup> großen Flat-Top-Verlauf, der sich

hervorragend zur optischen Abbildung eignet (Abbildungsverhältnis 15:1). In der nachfolgenden Abbildung 3 kann die Excimerlaser-Bearbeitungsstation mit schematisch dargestelltem Strahlengang betrachtet werden.

Für die Versuche zur frequenzabhängigen Signalerzeugung wurde das vollständige 20 mm x 20 mm homogene Strahlprofil in der Maskenebene auf der Oberfläche der Asphaltprobeplatte fokussiert, wodurch eine Fleckgröße von 0,5 mm<sup>2</sup> mit einer Laserpulsfluenz von 40 J/cm<sup>2</sup> erreicht werden konnte. Die Repetitionsrate bei den Untersuchungen betrug 1 Hz bzw. 50 Hz. Die Dauer eines Messversuchs betrug 10 Sekunden, wobei die Datenaufzeichnung durch angebrachte Beschleunigungsaufnehmer an der Asphaltplatte erfolgte.

### 3.2. Bestimmung der Signalabschwächung in einer realen Asphaltfahrbahn

Die Bestimmung der Signalabschwächung mit zunehmendem Abstand zur Signalquelle erfolgte an einer neuverlegten weitestgehend unbenutzten realen Asphaltfahrbahn. Für die Signalerzeugung wurde ein mechanischer Krafthammer mit integriertem Kraftaufnahmesensor vom Modell 086C03 (Modally Tuned® Impulse Hammer) von der Firma PCB Piezotronics. verwendet. Die Detektion der Signale erfolgte mit Hilfe von IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) Beschleunigungsnehmern mit der Modellbezeichnung 352C33 ebenfalls von der Firma PCB Piezotronics. Die nachfolgende, schematische Darstellung (Abbildung 4) zeigt den prinzipiellen Versuchsaufbau.

Durch den Impulshammer wurden pro Messvorgang 30 Sekunden lang intervallartig, punktuell Schockwellen unmittelbar in der Nähe vom Referenzbeschleunigungssensor (Sensor 1) induziert. Der Abstand vom zweiten Beschleunigungsnehmer (Sensor 2) zum Referenzsensor wurde je nach Messvorgang im Bereich von 2 cm bis 100 cm variiert.

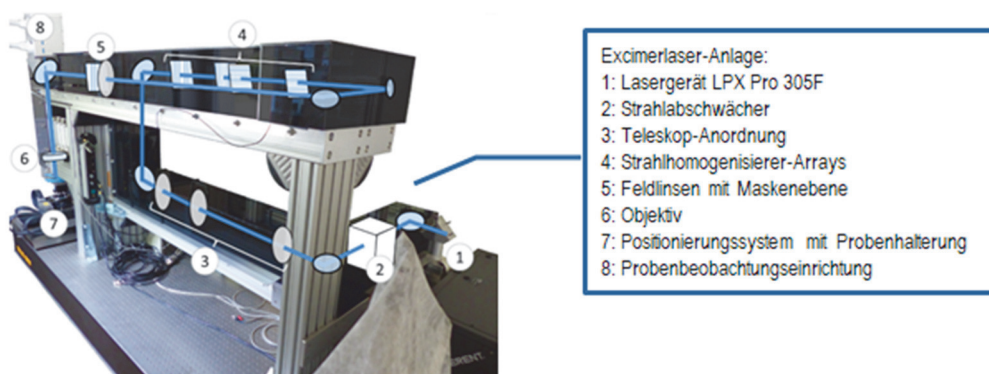


Abbildung 3: Fotoaufnahme der Excimerlaser-Bearbeitungsstation mit Strahlengang und Lasergerät. Die blaue Linie zeigt schematisch den Verlauf der Laserstrahlung durch den Strahlengang inkl. der verbauten optischen & mechanischen Komponenten.

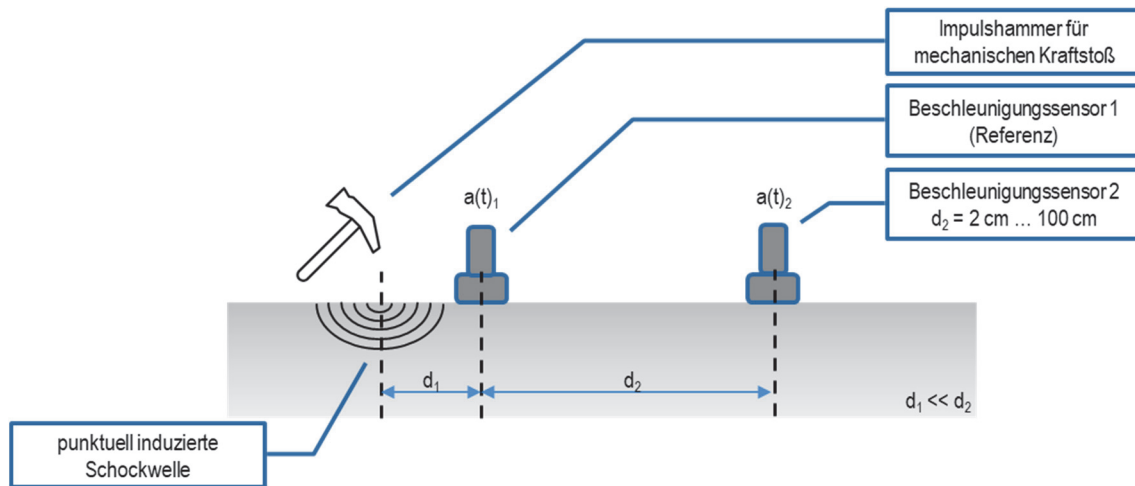


Abbildung 4: Schematische Darstellung von der Vermessung der Signalabschwächung auf der realen Asphaltfahrbahn. Der Impulseintrag für die Erzeugung der Schockwelle erfolgte mit Hilfe eines Impulshammers unmittelbar neben dem Referenzsensor. Der Abstand  $d_2$  des zweiten Beschleunigungsnehmers zum Referenzsensor variierte von 2 cm bis 100 cm

## 4. Ergebnisse zur laserinduzierten Signal-generierung

### 4.1. Generierung laserinduzierter, frequenz-abhängiger Schockwellensignale in Asphaltkörpern

Die gemessenen Signalverläufe aus den Versuchen zur Generierung von laserinduzierten Schockwellensignalen in Asphaltkörpern bei unterschiedlichen Pulsrepetitionsraten sind in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Hierfür wurden die mittels der Beschleunigungsnehmer in 15 mm Entfernung zum Signalerzeugungsort aufgenommenen, zeitdiskreten Signalverläufe der erzeugten Körperschallwellen durch Fourier-Transformation in den Frequenzraum transformiert.

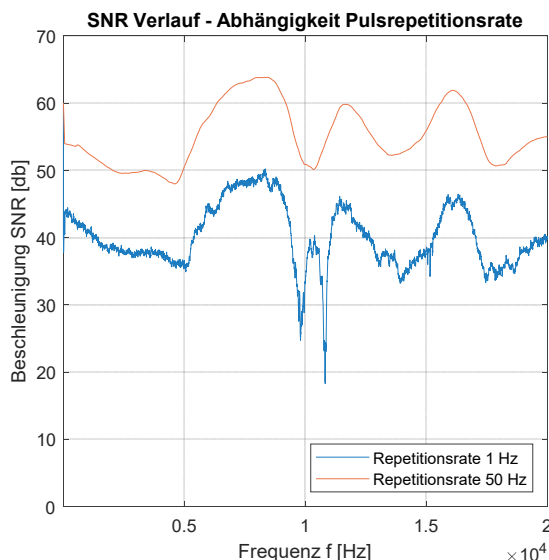


Abbildung 5: Frequenzabhängige Signalverläufe (SNR – Signal-Rausch-Verhältnis) der laserinduzierten Schockwellensignale in dem Asphaltkörper bei Laserpulsrepetitionsraten von 1 Hz und 50 Hz.

Die Verläufe zeigen, dass unabhängig von der verwendeten Pulsrepetitionsrate im interessanten Frequenzbereich von 2 kHz bis 20 kHz die Erzeugung von Schockwellensignalen durch hochenergetische Laserpulse grundlegend möglich ist. Im Durchschnitt konnten in diesem Frequenzbereich SNR Stärken von 40 db bei einer Pulsrepetitionsrate von 1 Hz gemessen werden. Die Laserpulsrepetitionsrate selbst hat auf den frequenzabhängigen Signalverlauf nahezu keinen Einfluss, lediglich wird mit zunehmender Repetitionsrate die Signalstärke und -glättung erhöht, da für die Signalverarbeitung mehr angeregte Schockwellensignale pro Zeiteinheit für Mittelungen zur Verfügung stehen und so die Fensterbreite für den Erhalt höherer SNR Werte bei der FFT Transformation angepasst werden kann.

### 4.2. Abschätzung der Signalreichweite für Asphalt-fahrbahnen

Die Ergebnisse zur Ermittlung der Signalabschwächung mit zunehmender Entfernung zur Signalquelle auf einer realen Asphaltspur durch Impulshammerversuche sind in Abbildung 6 dargestellt. Der Verlauf zeigt, dass die relative Signalstärke der Körperschallwellen mit zunehmenden Sensorabstand zur Quelle abnimmt. In einem Abstand von 100 cm ist die Signalstärke auf ca. 5 % vom Ausgangswert gesunken.

Für eine Abschätzung der Signalreichweite bei der laserinduzierten Schockwellenanregung mit dem verwendeten Laborsetup konnten anschließend die Ergebnisse zur laserinduzierten Signalerzeugung an den Asphaltprobekörpern mit den Ergebnissen zur Ermittlung der Signalabschwächung durch die Impulshammerversuche auf der realen Asphaltspur kombiniert werden (siehe Abbildung 7). Hierbei erfolgte die Annahme, dass die Übertragungsfunktion bei der laserinduzierten Anregung von Probe und Asphaltspur vergleichbar ist.

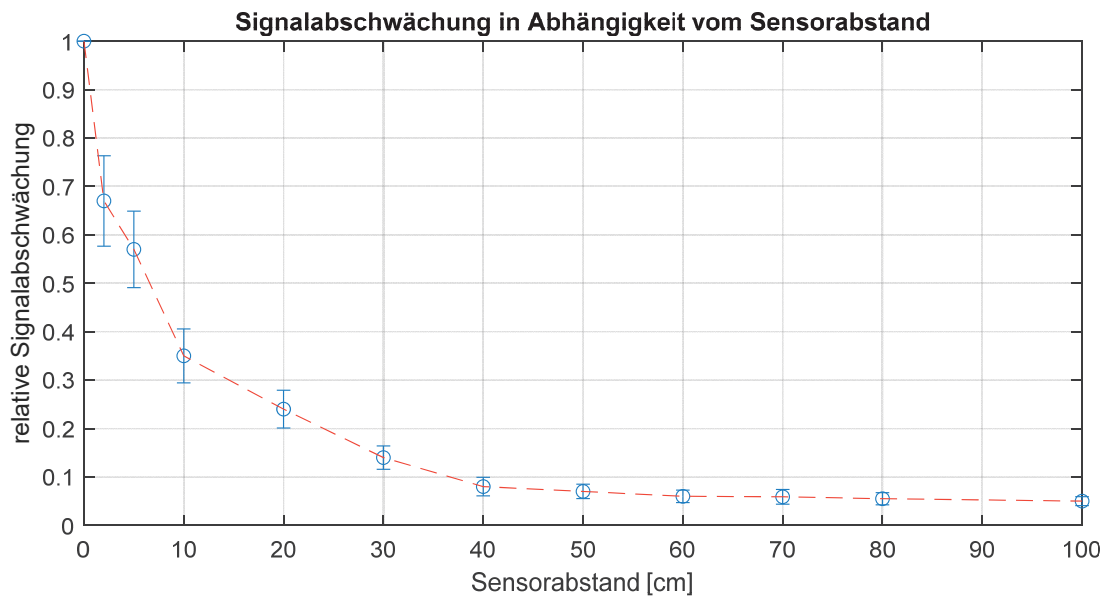


Abbildung 6: Verlauf der bestimmten relativen Signalabschwächung auf einer Asphaltfahrbahn mit zunehmendem Abstand zur Signalquelle. Die Generierung der Schockwellensignale erfolgt mit Hilfe eines Impulshammers.

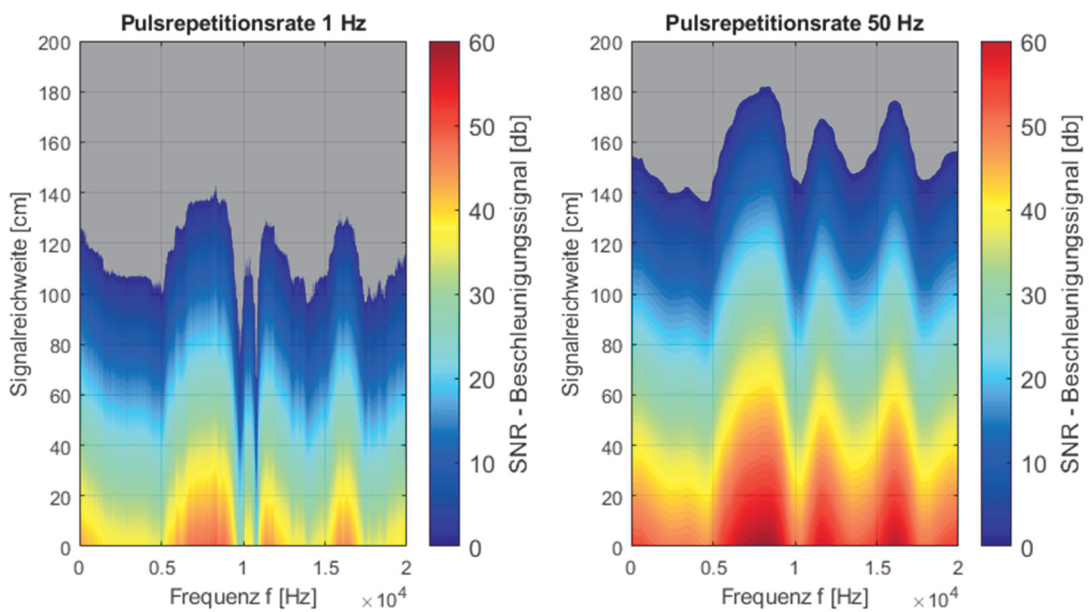


Abbildung 7: Simulation der laserinduzierten Signalreichweite auf einer Asphaltspur in Abhängigkeit von der Signalfrequenz bei verschiedenen Pulsrepetitionraten.

Die Simulation der laserinduzierten Signalreichweite auf einer Asphaltspur zeigt, dass die unter Laborbedingung erzeugte Signalstärke im kompletten untersuchten Frequenzspektrum für die angestrebte Reichweite von 50 cm ausreicht und diese bereits bei Verwendung einer Pulsrepetitionrate von 1 Hz und einer Laserpulsfluenz auf der Probenoberfläche von  $40 \text{ J/cm}^2$  deutlich überschreitet (Abbildung 7, links). Ab ca. 1 m Entfernung zum Signalerzeugungsort würde die SNR Stärke erst unter 10 db fallen. Durch die Erhöhung der Laserpulsrepetitionrate von 1 Hz auf 50 Hz würde sich, wie die Simulation zeigt (siehe Abbildung 7, rechts), die Signalreichweite

weiter bis auf ca. 1,4 m steigern lassen. Eine Signalreichweitenerhöhung über die angestrebten 50 cm bis hin zu 200 cm würde die Genauigkeit und die Zuordnung der Messdaten bei Anwendung der MASW-Methode deutlich erhöhen. Weitere Ansatzmöglichkeiten zur Erhöhung der Signalreichweite wären u. a. die Anpassung der Sensorempfindlichkeit und der Sensorart auf den abgezielten Signalfrequenzraum oder die Erhöhung der erzeugten Schockwellensignalstärke durch Modulation der Laserpulse wie beispielsweise die Erhöhung der Pulsenergie.

## 5. Zusammenfassung

Die Generierung laserinduzierter Schockwellensignale in Asphaltkörpern im für die Fahrbahncharakterisierung interessanten Frequenzbereich von 2 kHz bis 20 kHz ist grundsätzlich möglich. Die in 15 mm Entfernung zum Erzeugungsort gemessenen Signalstärken (SNR) liegen bei einer verwendeten Pulsrepetitionsrate von 1 Hz und einer Laserpulsfluenz auf der Probenoberfläche von 40 J/cm<sup>2</sup> im Durchschnitt bei 40 db. Die simulierte Signalreichweite mit den unter Laborbedingungen erzeugten Werten wäre mit ca. 1 m für die aktuell relevante, finale Vermessungsmethode (MASW - „Multichannel Analysis of Surface Waves“) auf realen Fahrbahnbefestigungen für den kompletten untersuchten Frequenzbereich bereits ausreichend. Eine Steigerung der Ausgangssignalstärke und eine daraus resultierende Erhöhung der Signalreichweite bis hin zu 2 m wäre zur Steigerung der Genauigkeit bei Anwendung der MASW-Methode noch anstrebenswert. Eine Erhöhung der Signalstärke wäre u. a. durch den Einsatz von Festkörperlasern mit höheren Pulsenergien oder durch Anpassung der Sensorempfindlichkeiten möglich. Verschiedene Pulsrepetitionsraten im untersuchten Bereich von 1 Hz bis 50 Hz haben auf den Signalverlauf nahezu keinen Einfluss, lediglich die Signalglättung und die Signalstärke lässt sich mit zunehmender Pulsrepetitionsrate aufgrund von mathematischen Anpassungen bei der Signalverarbeitung steigern. Höhere Pulsrepetitionsraten sowie der Einfluss weiterer Laserparameter, wie Wellenlänge, Pulsdauer,

zeitlicher Pulsverlauf und Fokus-Spot-Größe auf die Signalanregung müssen darüber hinaus noch untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] FGSV. (2013). Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RSO Asphalt 13). Köln: FGSV-Verlag.
- [2] Hübelt, J. et al.: Innovationen im Straßenbau – Zerstörungsfreie Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz. Forschungsbericht, FE 88.0136/2014, 2016.
- [3] Lindemann, Jutta; Hübelt, Jörn: Einrichtung zur zerstörungsfreien Prüfung Bestimmung der Haltbarkeit von Fahrbahnen. Patentschrift: DE 10 2013 015 461, 09/2016.
- [4] C. B. Park, R. d. Miller, J. Xia, „Multichannel analysis of surface waves“ in GEOPHYSICS, Volume 64, Issue 3 (1999), 800-808.
- [5] N. Jafri, et al.: „Assessment of soil compaction properties based on surface wave techniques“, International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON 2017), E3S Web of Conferences 34, 01002 (2018).
- [6] M. Boustie, L. Berthe, T. Resseguier, M. Arrigoni, „Laser shock waves: fundamentals and applications,“ in Proceedings of 1st International Symposium on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications. Montreal, Canada (2008), 32–40.