

Erzeugung von laserinduzierten Schockwellensignalen für die Vermessung von Asphaltkörpern

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

Ziel dieser Untersuchungen war die Erforschung und Entwicklung einer neuartigen opto-akustischen Messtechnologie für eine mobile, berührungslose, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen, speziell der dafür notwendigen laserinduzierten Signalerzeugung. Diese Messtechnologie 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 Versuche zur Bestimmung der generellen Einflussparameter hinsichtlich der laserinduzierten Signalgenerierung vorgenommen. Ziel war die Generierung von Schockwellensignalen mit Frequenzen von 1 Hz bis 20 kHz mit ausreichender Signalstärke & -reichweite für die Anwendung einer MASW-Vermessungsmethode (MASW – „Multichannel Analysis of Surface Waves“), welche für die anschließende Signalzuordnung in einem horizontal geschichteten Medium (Asphaltfahrbahn, notwendig ist.

1. Motivation und Zielstellung

Im heutigen Straßenbau stellt die Erhaltung der vorhandenen Verkehrsinfrastruktur den Schwerpunkt in Deutschland dar. 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 Idee und die Grundlagen für ein alternatives, zerstörungsfreies Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz von Asphaltfahrbahnen wurden 2016 in einem Forschungsprojekt [2] entwickelt und mit einer Patentschrift [3] geschützt. In diesem Verfahren wird in die Fahrbahnbefestigung durch einen mechanischen Kraftstoß ein Körperschallfeld induziert und anschließend durch ein Array von Beschleunigungsaufnehmern in unterschiedlichen Entfernungen zur Quelle detektiert. 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 ermöglichen konnte.

Die Signalanregung wurde nun dahingehend weiterentwickelt, dass ein Impulseintrag durch hochenergetische Laserpulse und infolgedessen eine laserinduzierte Schockwellensignalanregung den mechanischen Kraftstoß ersetzt (siehe Abbildung 1). Der Vorteil eines sol-

chen optischen Kräfteintrags ist ein berührungs- und nahezu zerstörungsfreies, alternatives Anregungsverfahren, wodurch nun eine schnelle und mobile Messung und infolgedessen eine kontinuierliche und flächendeckende Fahrbahnprüfung ermöglicht wird.

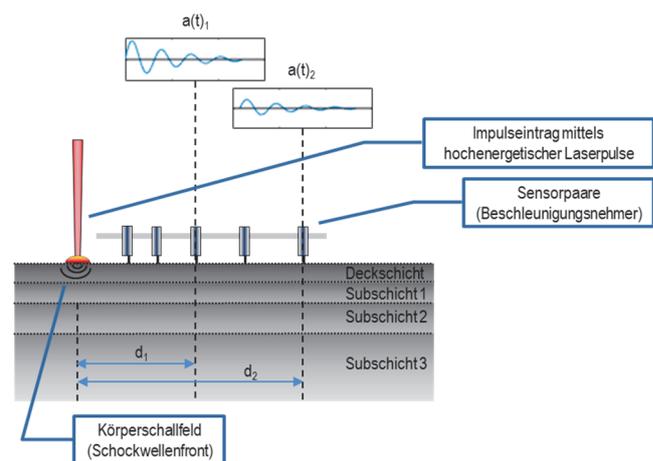


Abbildung 1: Schematische Darstellung des MASW-Verfahrens zur zerstörungsfreien Bewertung der strukturellen Substanz von mehrschichtigen Asphaltfahrbahnen. Der Impulseintrag und infolgedessen die Schockwellenanregung erfolgt durch hochenergetische Laserpulse berührungslos.

Hierfür wurden sowohl Versuche an Asphaltprobekörpern zur Bestimmung von generellen Einflussfaktoren hinsichtlich der laserinduzierten Signalgenerierung als auch Untersuchungen zu den Eigenschaften der erzeugten Signale vorgenommen. Ziel war dadurch die Generierung und Modellierung von laserinduzierten Schockwellensignalen mit Frequenzen von 1 Hz bis mindestens 20 kHz mit ausreichender Signalstärke & Signalreichweite für die Anwendung einer MASW-Vermessungsmethode für Asphaltfahrbahnen. Für eine Zuordnung frequenzgleicher Signale in horizontal geschichteten Medien, was einem Aufbau einer realen Asphaltfahrbahn mit mehreren Subschichten entspricht, wird eine Mindestsignalreichweite von 100 cm für die Anordnung des

Arrays von Beschleunigungsaufnehmern bei gleichzeitig SNR (signal-to-noise ratio) Signalstärke an allen Positionen von mindestens 10 db angestrebt. Hintergrund für die Signalzuordnung mittels MASW-Methode ist die dispersive Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen, hier speziell der untersuchten Rayleighwellen, in geschichteten 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 Plasmabildung. 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.

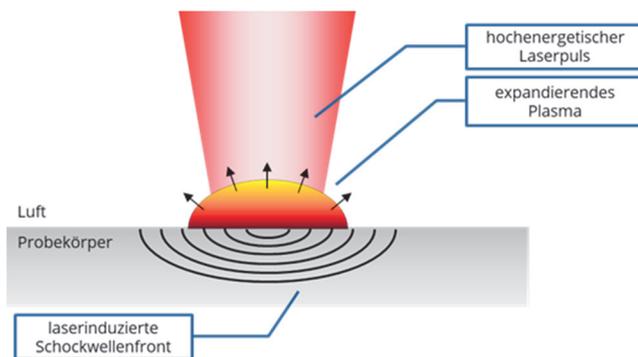


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Generierung von Körperschallwellen in Form einer sich ausbreitenden Schockwellenfront durch den Eintrag hochenergetischer Laserpulse und dadurch als Folge eines so erzeugten, expandierenden Plasmas.

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 Grundlage des experimentellen Aufbaus für die Laboruntersuchung an den Asphaltprobekörpern zur Schockwellenanregung mittels hochenergetischer Laserpulse bildet eine Excimerlaser-Laboranlage 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 frei bis 50 Hz eingestellt werden. Das höhenverstellbare Halterungssystem der Anlage für die Probekörper erlaubte eine punktuelle Lagerung zur Verringerung von äußeren Störsignalen sowie vorder- und rückseitige Befestigungsmöglichkeiten für Sensoren für die Signalaufzeichnung.

Bei den verwendeten 310 mm x 260 mm großen Asphaltprobekörpern handelt es sich um AC 8 DS Deckschichtmaterial. Die Probekörperdicken der Platten betragen 40 mm, 85 mm und 120 mm. Für die Versuche zur laserinduzierten Signalerzeugung wurde das vollständige, nicht homogenisierte Profil der Excimerlaserstrahlung auf die Oberfläche der Asphaltprobenplatten fokussiert, wodurch eine Fleckgröße von $0,5 \text{ mm}^2$ mit einer Laserpulsfluenz von maximal 70 J/cm^2 erreicht werden konnte. Die Repetitionsrate bei den Untersuchungen wurde zwischen 1 Hz und 50 Hz variiert.

Allgemein erfolgte die Aufnahme der laserinduzierten Signale unter Verwendung eines Datenerfassungssystems Ni cDAQ-9178 mit einem Schall- und Schwingungsmessmodul (Modell NI 9232) der Firma National Instruments. Die Datenaufzeichnungsdauer eines Messversuchs betrug zwischen 1 und 30 Sekunden, wobei die Datenaufzeichnung durch an der Asphaltplatte angebrachte IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) Beschleunigungsnehmer mit der Modellbezeichnung 352C33 von der Firma PCB Piezotronics, erfolgte. Für die Darstellung der aufgenommenen Signale und die weitere Verarbeitung der Daten wurde das Programm MatLab (Version R2018b) der Firma MathWorks genutzt.

4. Einflussfaktoren auf die Signalerzeugung und Eigenschaften der laserinduzierten Schockwellensignale

Entscheidend für die Charakterisierung der untersuchten Einflussfaktoren auf die Schockwellenanregung war maßgeblich der Signalverlauf und die dabei erreichbaren SNR Signalstärken im Frequenzraum. 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.

4.1. Einflussfaktor Probenmaterial

Um den Einfluss vom Probenmaterial selbst zu charakterisieren, wurden die laserinduzierten Schockwellensignale außer auf der untersuchten Asphaltprobenplatte zusätzlich auf einer vergleichbaren Eisenplatte unter Verwendung von gleichen Anlagenparametern untersucht. Die Eisenplatte stellt im Unterschied zum inhomogenen Asphalt bestehend aus Korn, Bitumen und Bindemitteln ein homogenes Festkörpermedium mit für die Ausbreitung eines Körperschallfeldes bekannten Eigenschaften dar. Die aufgenommenen Zeitsignale, sowie die zugehörigen frequenzabhängigen Signalverläufe der auf

den beiden Probematerialien erzeugten Schockwellensignale sind in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt.

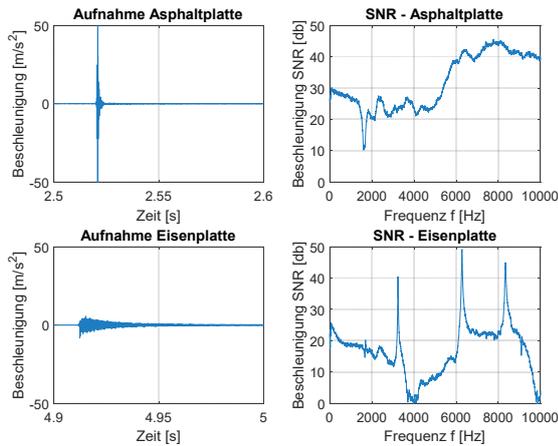


Abbildung 4: Aufgenommene Zeitsignale (links) und dazugehörige frequenzabhängige Signalverläufe für laserinduzierte Schockwellensignale, angeregt auf einer Asphaltprobe (oben) und im Vergleich auf einer gleichgroßen Eisenprobe (unten). Anlagenparameter: Pulsrepetitionsrate 1 Hz, Laserpulsfluenz $40 J/cm^2$.

Im Vergleich zur Eisenplatte konnten auf der Asphaltplatte bei der Signalanregung mit hochenergetischer Excimerlaserstrahlung mit einer Laserpulsfluenz von $40 J/cm^2$ höhere SNR Stärken erhalten werden. Hintergrund ist hierfür eine geringere Ablationsschwellfluenz bei Asphalt, wodurch mehr Energie bei der Plasmaentwicklung und somit auch der resultierenden Schockwelle zur Verfügung steht. Dies zeigt sich bereits im Zeitverlauf im maximalen Ausschlag der aufgenommenen Beschleunigungssignale. Bei Asphalt betrug der maximale Signalausschlag über $\pm 50 m/s^2$ und bei der Eisenprobe nur $\pm 8 m/s^2$. Neben dem sehr hohen Signalausschlag ist im Zeitsignal im Asphalt gegenüber Eisen aber auch eine sehr hohe Signaldämpfung zu erkennen. Im resultierenden frequenzabhängigen Signalverlauf macht sich diese Dämpfung allerdings erst bei Messungen der Signalabschwächung in unterschiedlichen Entfernungen zum Erzeugungsort bemerkbar. In der Eisenprobe ist die Signaldämpfung deutlich geringer, wodurch sich hier im Frequenzraum Interferenzpeaks aufgrund der Grenzflächenreflexion bei der großemäßig begrenzten Probenplatte ausbilden konnten.

4.2. Einflussfaktor Laserstrahlfluenz

Für die Bestimmung der Auswirkungen der Änderungen der Laserstrahlfluenz auf das erzeugte Schockwellensignal wurden an ein und demselben Ort auf der Asphaltprobe Signalanregungen mit Laserpulsfluenzen im Bereich von $40 J/cm^2$ bis $70 J/cm^2$ vorgenommen. Die Ergebnisse der gemessenen Signalverläufe im Frequenzraum sind in Abbildung 5 dargestellt.

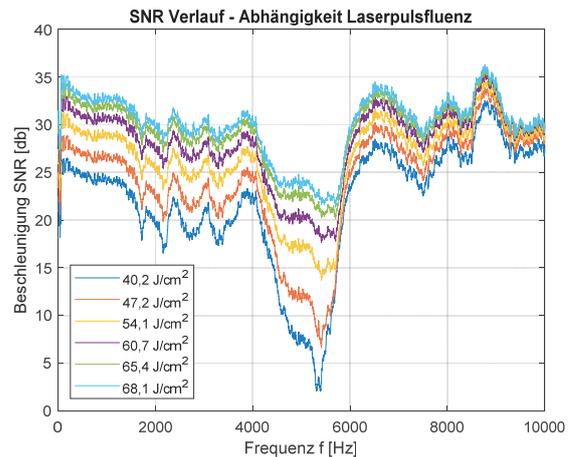


Abbildung 5: Frequenzabhängige Signalverläufe bei unterschiedlichen Laserpulsfluenzen bei Pulsrepetitionsraten von 1 Hz und Aufnahmedauern von 10 Sekunden.

Die Auswertung der Versuche hat gezeigt, dass durch eine Erhöhung der Laserpulsfluenz von $40 J/cm^2$ auf $70 J/cm^2$ die durchschnittliche SNR Signalstärke im frequenzabhängigen Signalverlauf von 20 dB auf 30 dB erhöht werden konnte. Generell ändert sich aber bei Steigerung der Laserpulsfluenz der frequenzabhängige Signalverlauf selbst nicht. Durch höhere Signalstärken können Minima bzw. Bereiche mit Signalstärken unter 10 dB im Frequenzverlauf ausgeglichen werden. Die Änderungen in der Laserpulsfluenz haben somit maßgeblich einen Einfluss auf die erhaltenen Signalstärken.

4.3. Einflussfaktor Aufnahmedauer bzw. Anzahl der generierten Signalanregungen

Die Auswirkungen der Änderung der Aufnahmedauer bzw. der Anzahl der generierten Signalanregungen auf den frequenzabhängigen Signalverlauf sind nachfolgend in Abbildung 6 dargestellt.

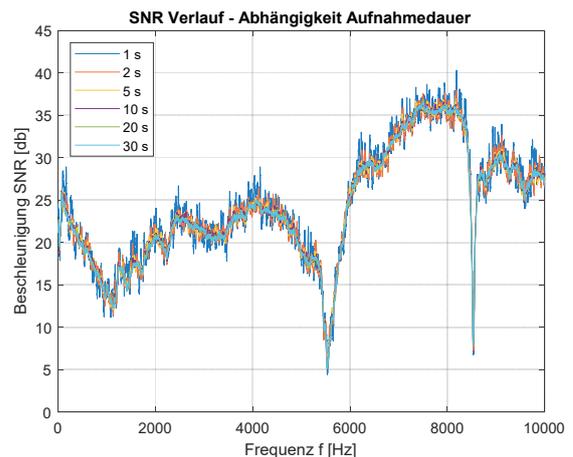


Abbildung 6: Frequenzabhängige Signalverläufe von laserinduzierten Schockwellen angeregt an ein und derselben Position auf der Asphaltprobe bei unterschiedlichen Aufnahmedauern. Die Pulsrepetitionsrate bei diesen Versuchen betrug 1 Hz wodurch die Aufnahmedauer genau der Anzahl der aufgenommenen Signalanregungen entspricht.

Weder hat sich durch eine längere Aufnahmedauer bzw. durch eine höhere Anzahl von Signalanregungen die Signalstärke, als auch der grundlegende frequenzabhängige Signalverlauf geändert. Bereits nach einer Signalanregung konnte der grundsätzliche Signalverlauf des laserinduzierten Schockwellensignals bestimmt werden. Durch mehr Signalanregungen bzw. eine höhere Aufnahmedauer kann jedoch eine Mittelung der Signale erfolgen und der frequenzabhängige Signalverlauf geglättet werden. In den Laborversuchen waren für eine Signalglättung bereits 10 Signalanregungen, bzw. eine Aufnahmedauer von 10 Sekunden bei einer Pulsrepetitionsrate von 1 Hz mehr als ausreichend. Für die spätere Praxisanwendung könnten temporäre Störsignale bei der Asphaltvermessung ebenfalls durch eine Mittelung mehrerer laserinduzierter Schockwellensignale ausgeglichen werden.

4.4. Einflussfaktor Probenoberfläche

Aufgrund der inhomogenen Materialzusammensetzung von Asphalt und der gleichzeitig geringen Fleckgröße der Laserstrahlung von 0,5 mm² im Fokus haben Änderungen in der lokalen Oberflächenzusammensetzung bzw. in deren Eigenschaften einen Einfluss auf die Plasmabildung und somit auf das resultierende Schockwellensignal. Für die Untersuchung der Auswirkung dieser Änderungen wurden in einem gleichen Abstand von 15 mm um den IEPE Beschleunigungssensor herum an vier verschiedenen Stellen auf der Asphaltprobe laserinduzierte Signale erzeugt und untersucht. Die Verläufe der an den vier verschiedenen Positionen aufgenommenen Signalen sind in Abbildung 7 dargestellt.

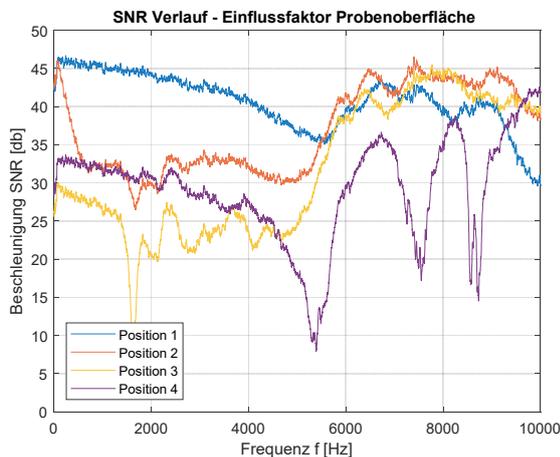


Abbildung 7: Frequenzabhängige Signalverläufe von laserinduzierten Schockwellen, angeregt an 4 unterschiedlichen Positionen auf der Asphaltprobe in einem Abstand von 15 mm um den Beschleunigungssensor herum. Anlagenparameter: Pulsrepetitionsrate 1 Hz, Aufnahmedauer 10 Sekunden, Laserpulsfluenz 40 J/cm².

Die aufgenommenen Verläufe zeigen, dass die an den vier Positionen unterschiedlich herrschenden lokalen Materialbedingungen einen maßgeblichen Einfluss auf den gemessenen frequenzabhängigen Signalverlauf haben. Für eine Anwendung der MASW-Vermessungsmethode ist allerdings der grundlegende Signalverlauf nicht

entscheidend solange die Signalstärken im kompletten Signalverlauf nicht die Mindestanforderung von 10 db unterschreiten. Die Berechnung der Asphalteeigenschaften erfolgt später bei der MASW-Methode über die Änderung der Phasenlage der in unterschiedlichen Entfernungen gemessenen Schockwellensignale.

4.5. Einflussfaktor Pulsrepetitionsrate

Die Änderung der Pulsrepetitionsrate hat grundlegend keinen Einfluss auf die Signalstärke oder den frequenzabhängigen Signalverlauf führt aber dazu, dass mit höheren Pulsrepetitionsraten mehr Signalanregungen pro Zeiteinheit für die Mittelung einer Messung zur Verfügung stehen. Alternativ kann zum Erhalt höherer SNR Stärken aber auf Kosten der Signalauflösung die Fensterbreite bei der FFT Transformation der gemessenen Schockwellensignale angepasst werden. Für die Datenverarbeitung bei laserinduzierten Signalen entspricht die optimale Fensterbreite der eingestellten Abtastrate dividiert durch die verwendete Pulsrepetitionsrate. Dabei entspricht der Divisor, also die Pulsrepetitionsrate selbst, der resultierenden Signalauflösung. Für die Weiterverarbeitung der Messdaten bei der späteren Anwendung der MASW-Methode wird eine Signalauflösung ≥ 50 Hz für den frequenzabhängigen Signalverlauf angestrebt. In Abbildung 8 ist zum Vergleich der ermittelte Signalverlauf bei Verwendung einer Pulsrepetitionsrate von 1 Hz und der mathematisch angepasste Signalverlauf bei Verwendung von einer Pulsrepetitionsrate von 20 Hz dargestellt. Durch die Anpassung der Fensterbreite konnten so um 12 db höhere Signalstärken bei einer gleichzeitig reduzierten Signalauflösung von 1 Hz auf 20 Hz erhalten werden.

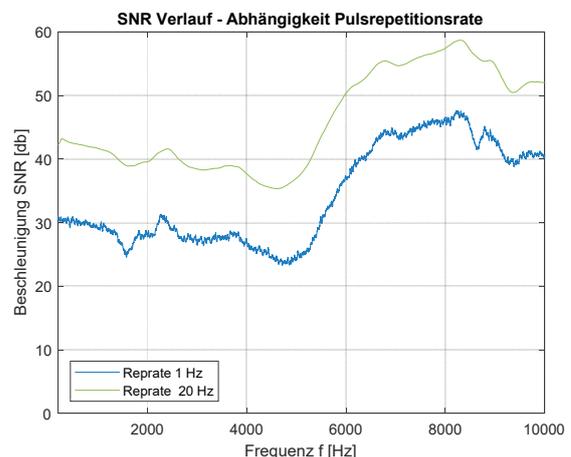


Abbildung 8: Frequenzabhängige Signalverläufe von laserinduzierten Schockwellensignalen bei Verwendung von Pulsrepetitionsraten von 1 Hz und 20 Hz. Anlagenparameter: Aufnahmedauer 10 Sekunden, Laserpulsfluenz 70 J/cm². Aufgrund der größeren Anzahl von generierten Schockwellensignalen, bei der Verwendung einer Pulsrepetitionsrate von 20 Hz, konnte die Signalverarbeitung hinsichtlich des Erhalts höherer SNR Stärken angepasst werden.

5. Generierung von laserinduzierten Schockwellensignalen für MASW Vermessungen

Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung der Einflussgrößen auf die Signalanregung in Asphaltproben wurden die Parameter hinsichtlich der Generierung von potentiellen Schockwellensignalen für MASW Messungen an der Excimerlaser-Anlage angepasst und untersucht, ob diese den beschriebenen Mindestanforderungen entsprechen.

Zur Steigerung der erhaltenen Signalstärken wurde die maximale zur Verfügung stehende Laserpulsfluenz von 70 J/cm^2 und, für eine Anpassung der Fenstergröße bei der mathematischen Verarbeitung der Messdaten, eine Pulsrepetitionsrate von 50 Hz verwendet. Die Aufnahmedauer für die Mittelung der Signale betrug 2 Sekunden. Der gemessene frequenzabhängige Signalverlauf bei den optimierten Anlagenparametern ist in der nachfolgenden Abbildung 9 dargestellt. Die Messung dieses Schockwellensignals erfolgte in 15 mm Entfernung zum Erzeugungsort und es konnten im untersuchten Frequenzbereich bis 20 kHz durchgehend Signalstärken von über 50 db erreicht werden.

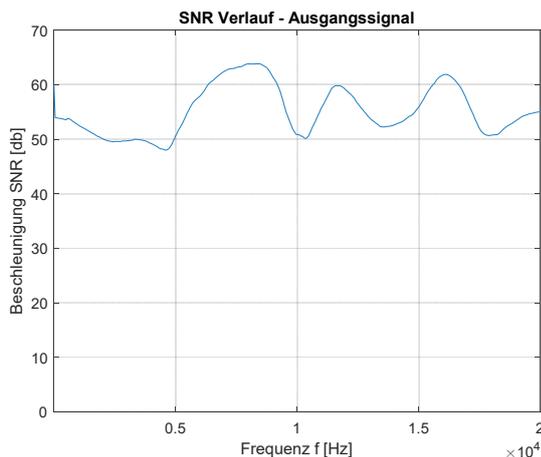


Abbildung 9: Frequenzabhängiger laserinduzierter Signalverlauf bis 20 kHz bei für MASW-Vermessungen geeigneten Anlagenparametern (Pulsrepetitionsrate 50 Hz, Aufnahmedauer 2 Sekunden, Laserpulsfluenz 70 J/cm^2) auf der Asphaltprobe gemessen in 15 mm Abstand.

5.1. Frequenzabhängige Signaleindringtiefe

Um die Signaleindringtiefe für spätere Vermessungen an geschlossenen Asphaltfahrbahnen nachvollziehen zu können, wurden Schockwellensignale bei den optimierten Anlagenparametern auf unterschiedlich dicken Asphaltproben angeregt und durch vorder- und rückseitig angebrachte Beschleunigungsaufnehmer vermessen. Das Ergebnis der vermessenen frequenzabhängigen Signaleindringtiefe in Asphalt, bis zu einer Frequenz von 20 kHz ist in der Abbildung 10 dargestellt. Im kompletten Frequenzbereich konnten die Schockwellensignale eine Tiefe von 120 mm erreichen. Zwischen 2 kHz und 4 kHz gab es die geringste Signalabschwächung in dieser Tiefe. Die Signalstärken betragen in diesem Bereich über 30 db. Im Bereich von 4 kHz bis 18 kHz konnten in einer

Tiefe von 120 mm noch Signalstärken von ca. 20 db gemessen werden.

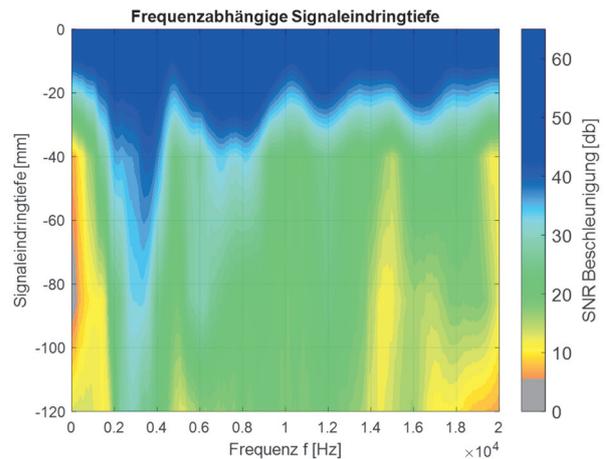


Abbildung 10: Frequenzabhängige Signaleindringtiefe in Asphalt bis 20 kHz und bis zu einer Probentiefe von 120 mm. Anlagenparameter: Pulsrepetitionsrate 50 Hz, Aufnahmedauer 2 Sekunden, Laserpulsfluenz 70 J/cm^2 .

Die Untersuchungen zur Signaleindringtiefe konnten zeigen, dass bei der laserinduzierten Signalanregung ebenfalls Informationen in den durchlaufenden Schockwellen aus tieferen Asphaltsschichten enthalten sind. Mit Hilfe der MASW Messmethode könnten diese Informationen dann aufgrund der dispersiven Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen in geschichteten Festkörpern [5] für die einzelnen Asphaltsschichten getrennt und ausgewertet werden.

5.2. Frequenzabhängige Signalreichweite

Aufgrund der inhomogenen Materialzusammensetzung von Asphalt und der Eigenschaften der einzelnen Bestandteile konnte neben einer starken Signaldämpfung im Zeitsignal auch eine starke Signalabschwächung der Schockwellen mit zunehmender Entfernung zum Ort der Signalerzeugung gemessen werden (siehe Abbildung 11).

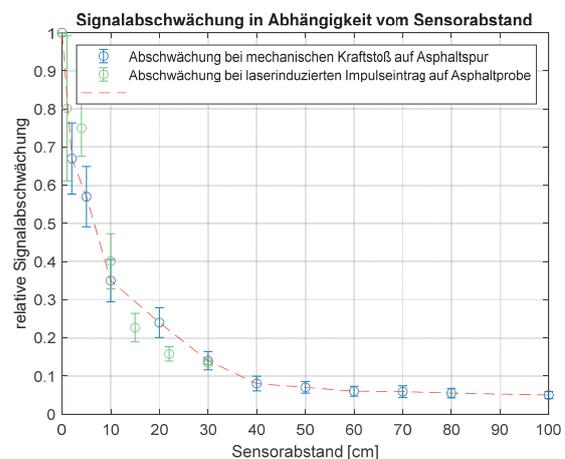


Abbildung 11: Gemessene relative Signalabschwächung mit zunehmendem Sensorabstand zum Ort der Signalerzeugung bei laserinduzierter und mechanischer Anregung auf Asphalt.

Der Verlauf der bestimmten relativen Signalabschwächung auf Asphalt zeigt, dass in einem Abstand von 100 cm die Signalstärke auf ca. 5 % vom Ausgangswert gesunken ist. Dabei ist die Signalabschwächung unabhängig von der Art der Signalanregung.

Für eine Abschätzung der potentiellen Signalreichweite konnten anschließend die Ergebnisse zur laserinduzierten Signalerzeugung an den Asphaltprobekörpern mit den Ergebnissen zur Ermittlung der Signalabschwächung kombiniert werden. Die Simulation der Signalreichweite in einer Asphaltspur bei einer Signalanregung durch hochenergetische Laserpulse, ist in Abbildung 12 dargestellt.

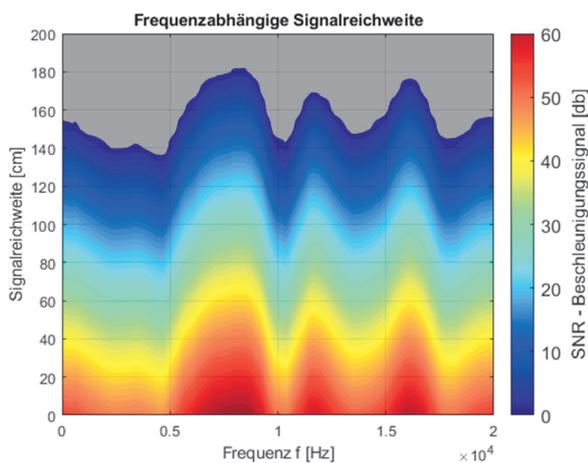


Abbildung 12: Simulation der frequenzabhängigen Signalreichweite bis 20 kHz. Anlagenparameter vom Ausgangssignal: Pulsrepetitionsrate 50 Hz, Aufnahmedauer 2 Sekunden, Laserpulsfluenz 70 J/cm².

Die Abschätzung der potentiellen Reichweite der laserinduzierten Schockwellensignale bei optimierten Anlagenparametern zeigt, dass in einer Entfernung von 120 cm zum Erzeugungsort noch SNR Signalstärken von über 10 db erhalten werden können. Diese Entfernung und die Signalstärken würden für die Anordnung eines Arrays von Beschleunigungssensoren für die Anwendung der MASW-Vermessungsmethode und somit für eine Vermessung von Asphaltspuren ausreichen.

6. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Bestimmung der Einflussfaktoren auf die laserinduzierte Schockwellenanregung auf Asphaltprobekörpern haben gezeigt, dass grundsätzlich bereits bei einer Laserpulsfluenz von 40 J/cm² mit der fokussierten Excimerlaserstrahlung Schockwellensignale im Frequenzbereich bis 20 kHz mit Signalstärken im Durchschnitt von 20 db bei einer Sensorentfernung von 15 mm zum Erzeugungsort erhalten werden können. Durch eine Steigerung der Laserstrahlfluenz bis auf 70 J/cm² konnte maßgeblich die erreichte Signalstärke bis auf durchschnittlich 30 db gesteigert werden. Der Signalverlauf hat sich bei Signalanregungen am gleichen Ort bei der Steigerung der Laserstrahlfluenz nicht geändert. Ausschlaggebend für den grundlegenden, frequenzabhängigen Signalverlauf sind das Probematerial und die

lokale Oberflächenbeschaffenheit selbst. Bei Asphalt handelt es sich um eine inhomogene Materialzusammensetzung, bestehend aus Korn, Bitumen und Bindemitteln, wodurch es bei laserinduzierten Signalanregungen an unterschiedlichen Positionen auf der Probe und aufgrund der dort vorliegenden lokalen Oberflächenbedingungen zu Schwankungen im Signalverlauf kommen kann. Bei Anwendung der MASW-Vermessungsmethode sind für die Berechnungen der Asphalteeigenschaften die Änderungen in der Phasenlage der Schockwellen entscheidend, wodurch diese Schwankungen im Signalverlauf keinen signifikanten Einfluss auf die anschließende Signalauswertung haben solange die Signalstärken in jedem Frequenzbereich nicht die Mindestanforderung von 10 db unterschreiten. Über die Anzahl der angeregten Signale bzw. die Aufnahmedauer kann durch Mittelungen weiterhin die Glättung des Signalverlaufs eingestellt werden. Drüber hinaus besteht dadurch die Möglichkeit den Einfluss von temporären Störsignalen bei der Signalverarbeitung zu verringern. Durch Erhöhung der verwendeten Pulsrepetitionsrate werden mehr Signalanregungen pro Zeiteinheit generiert. Neben kürzeren Aufnahmedauern zur Mittelung von Signalen kann durch Anpassung der Fenstergröße bei der mathematischen Verarbeitung der Daten höhere SNR Signalstärken auf Kosten der Signalaufösung im Frequenzraum erreicht werden. Eine Signalaufösung von ≥ 50 Hz wäre für die Auswertung der Daten mehr als ausreichend.

Die in 15 mm Entfernung zum Erzeugungsort gemessenen laserinduzierten Signalstärken bei an der verwendeten Excimerlaser-Anlage optimierten Parametern (Pulsrepetitionsrate 50 Hz, Aufnahmedauer 2 Sekunden, Laserpulsfluenz 70 J/cm²) liegen im untersuchten Frequenzbereich bis 20 kHz durchgehend bei über 50 db. Zusammen mit der gemessenen Signalabschwächung in Asphaltkörpern konnte mit diesen laserinduzierten Signalstärken die mögliche Signalreichweite für Asphaltspuren simuliert werden. Ausgehend von dieser Abschätzung sind in einer Entfernung vom 120 cm zum Erzeugungsort noch Signalstärken von über 10 db im gesamten untersuchten Frequenzbereich erreichbar, was für die Anordnung eines Arrays von Beschleunigungssensoren für die Anwendung der MASW-Vermessungsmethode bereits ausreicht. Ebenfalls konnten bei den Untersuchungen an den Probelplatten durch Anbringung von vorder- und rückseitigen Sensoren die Signalstärken in Tiefen von bis zu 120 mm gemessen werden. Dadurch wurde nachgewiesen, dass bei der laserinduzierten Signalanregung ebenfalls Informationen in den durchlaufenden Schockwellen aus tieferen Asphalt-schichten enthalten sind. Eine neuartige Messtechnologie zur zerstörungsfreien Bewertung der strukturellen Substanz von mehrschichtigen Asphaltfahrbahnen wäre mit einer Signalanregung durch hochenergetische Laserpulse somit möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] FGSV. (2013). Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RSO Asphalt 13). Köln: FGSV-Verlag.
- [2] Hübel, J. et al.: Innovationen im Straßenbau – Zerstörungsfreie Verfahren zur Bewertung der strukturellen Substanz. Forschungsbericht, FE 88.0136/2014, 2016.
- [3] Lindemann, Jutta; Hübel, 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.