

# Charakterisierung von laserinduzierten Schockwellensignalen für die zerstörungsfreie Vermessung von Asphaltsschichten

Manuel Pfeiffer, Jörn Hübelt, Steffen Weißmantel  
Hochschule Mittweida, Mittweida, Deutschland

Ziel dieser Untersuchungen war die Charakterisierung der laserinduzierten Signalerzeugung auf Asphaltkörpern, welche speziell für die Entwicklung und Anwendung einer neuartigen opto-akustischen Messtechnologie für eine mobile, berührungslose, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen von Bedeutung ist. Diese Art der Messtechnologie basiert auf der Impulseinkopplung hochenergetischer Laserpulse, die in die Fahrbahnoberfläche eingetragen werden und aus der Auswertung der Ausbreitungs- und Reflexionsmustern der so generierten Körperschallwellen. Notwendig hierfür waren Versuche in Abhängigkeit von verschiedenen Laserparametern (Pulsenergie, Fluenz und Strahlradius) zur Generierung von Schockwellensignalen mit ausreichend hoher Signalstärke für die Anwendung einer MASW-Vermessungsmethode (MASW – „Multichannel Analysis of Surface Waves), welche so für die anschließende Signalzuordnung in einem horizontal geschichteten Medium (Asphaltfahrbahn) umgesetzt werden kann.

## 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.

Ausgehend von dieser Ausgangslage entstand ein Verbundprojekt zur Entwicklung und Anwendung einer alternativen, neuartigen opto-akustischen Messtechnologie für eine mobile, berührungslose, zerstörungsfreie Bestimmungsmethode des strukturellen Zustands von Asphaltfahrbahnen.

In diesem in-situ, flächendeckend anwendbaren Verfahren wird in die Fahrbahnbefestigung 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“ [2, 3]) weiterverarbeitet werden, wodurch Angaben zum Steifigkeitsmodul einzelner Schichten der Fahrbahn und in einem nächsten Schritt Aussagen zum Zustand der Fahrbahn möglich sind. Hintergrund für die Signalzuordnung mittels MASW-Methode ist die dispersive Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen, hier speziell der untersuchten Rayleighwellen, oder Biegewellen in geschichteten Festkörpern mit verschiedenen Eigenschaften [4].

Die dafür notwendige Signalanregung wurde dahingehen entwickelt, dass ein Impulseintrag durch

hochenergetische Laserpulse und infolgedessen eine laserinduzierte Schockwellensignalanregung erfolgt (siehe Abbildung 1). Der Vorteil eines solchen optischen Kräfteintrags ist ein berührungs- und nahezu zerstörungsfreies Anregungsverfahren, wodurch eine schnelle und mobile Messung und infolgedessen eine kontinuierliche und flächendeckende Fahrbahnprüfung erst ermöglicht wird.

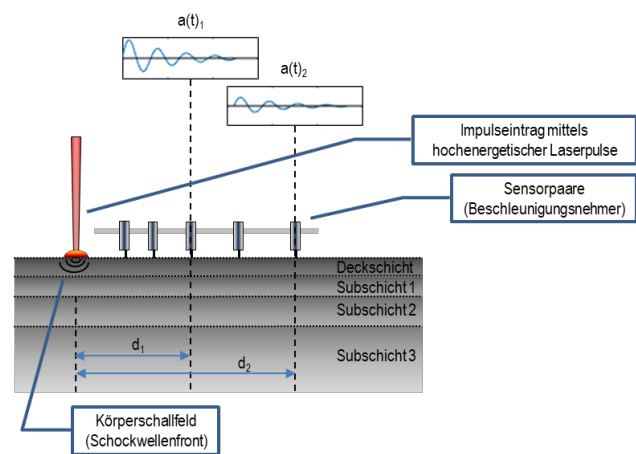


Abbildung 1: Schematische Darstellung des MASW-Verfahrens zur zerstörungsfreien Bewertung der strukturellen Substanz von mehrschichtigen Asphaltfahrbahnen. Der Impulseintrag und infolgedessen die Schockwellenanregung erfolgt durch hochenergetische Laserpulse berührungslos.

Hierfür wurden in der Vergangenheit sowohl grundlegende Versuche an Asphaltprobekörpern zur Bestimmung von generellen Einflussfaktoren hinsichtlich der laserinduzierten Signalgenerierung [5] als auch Untersuchungen zu den notwendigen Voraussetzungen zur Generierung von laserinduzierten Schockwellensignalen mit Frequenzen von 1 Hz bis mindestens 20 kHz mit ausreichender Signalstärke & Signalreichweite für die Anwendung der angestrebten opto-akustischen Vermessungsmethode für Asphaltfahrbahnen vorgenommen [6].

Gegenstand der hier dargestellten Untersuchungen war es nun aufbauend darauf die Signaleigenschaften, speziell die mittlere Pegelstärke  $L_m$  in Abhängigkeit von den Laserparametern (Pulsenergie, Fluenz und Strahlradius auf der Probenoberfläche) zu charakterisieren. Ziel war es die laserinduzierten Schockwellensignale ausreichend zu verstärken, dass eine berührungslose Signalerfassung mittels Laservibrometer bei der Asphaltvermessung ermöglicht wird. Hintergrund dieser Charakterisierung war außerdem die Reduzierung von Störsignalen u. a. die bei der Signalgenerierung sekundär entstehenden Signale durch Luftschallwellen, welche ebenfalls bei der Signaldetektion erfasst werden und dadurch die Datenverarbeitung negativ beeinflussen können.

## 2. Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung

Die laserinduzierte Schockwellenanregung basiert auf der Absorption hochenergetischer Laserpulse in der Probekörperoberfläche. 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 und Biegebewelle ausbreitet.

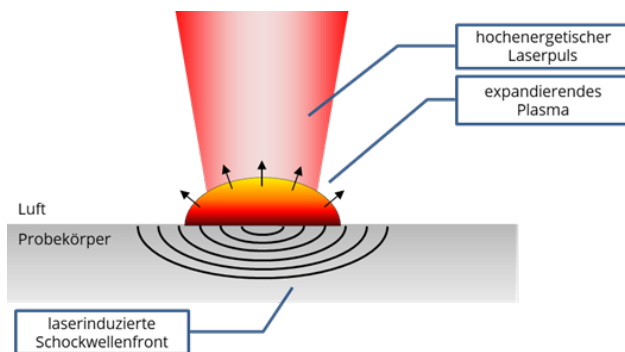


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Generierung von Körperschallwellen in Form einer sich ausbreitenden Schockwellenfront durch den Eintrag hochenergetischer Laserpulse und dadurch als Folge eines so erzeugten, expandierenden Plasmas.

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 [7].

## 3. Anlagentechnik und experimentelle Details

Die Grundlage für die Untersuchungen zur Schockwellenanregung mittels hochenergetischer Laserpulse bildete ein Quantel Festkörperlaser-System der YG Serie mit

einer Wellenlänge von 1064 nm, einer Pulsdauer von 12 ns und einer maximalen Pulsenergie auf der Probenoberfläche von bis zu 400 mJ. Die Pulsrepetitionsrate konnte im Bereich von 1 - 10 Hz variiert werden. Für die Untersuchungen an den Asphaltprobekörpern wurde eine Objektivbrennweite von  $f = 200 \text{ mm}$  verwendet.

Das für die Untersuchungen genutzte Probenmaterial bestand aus 1,2 m x 0,8 m x 0,2 m großen geschichteten Asphaltplatte mit einer 60 mm dicken AC 16 DS 50/70 Deckschicht und einer 140 mm dicken AC 22 TS 50/70 Tragschicht.

Allgemein erfolgte die Aufnahme der erzeugten 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, oder mit Hilfe eines Laservibrometers erfolgte. Für die Darstellung der aufgenommenen Signale und die weitere Verarbeitung der Daten wurde das Programm MatLab (Version R2018b) der Firma MathWorks genutzt.

## 4. Eigenschaften der erzeugten laserinduzierten akustischen Signale

Grundlegend sind für die Asphaltvermessung mit Schockwellensignalen nicht einzelne frequenzabhängigen Signalstärken entscheidend, sondern wichtig ist, dass ein kontinuierlich starkes Frequenzspektrum erzeugt werden kann. In [6] konnte bereits gezeigt werden, dass mit Hilfe der laserinduzierten Signalerzeugung ein solches kontinuierliches Frequenzspektrum im Bereich von 1 Hz bis 20 kHz auf Asphaltprobekörpern erzeugt werden kann. Für eine weitergehende Charakterisierung und zur Beschreibung der Abhängigkeiten von den Laserparametern kann dahingehend nun auf die Betrachtung einer durchschnittlichen Signalstärke dieser laserinduzierten akustischen Signalverläufe zurückgegriffen werden. Die Bestimmung der durchschnittlichen Signalstärke erfolgt durch Bestimmung des Mittelungspegels  $L_m$  des frequenz- und zeitabhängigen Signalverlaufs  $L_p(f,t)$  wie folgt:

$$L_m(f) \text{ dB} = 10 \cdot \lg \left( \frac{1}{T} \cdot \int_0^T 10^{\frac{L_p(f,t)}{10 \text{ dB}}} dt \right) \text{ dB},$$

wobei  $T$  der Zeitdauer der Messung entspricht. Die so ermittelte Abhängigkeit der mittleren Pegelstärke  $L_m$  der akustischen Signale von der verwendeten Laserpulsenergie  $Q$  für unterschiedliche Messentfernungen zum Ort der Signalanregung ist in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellt.

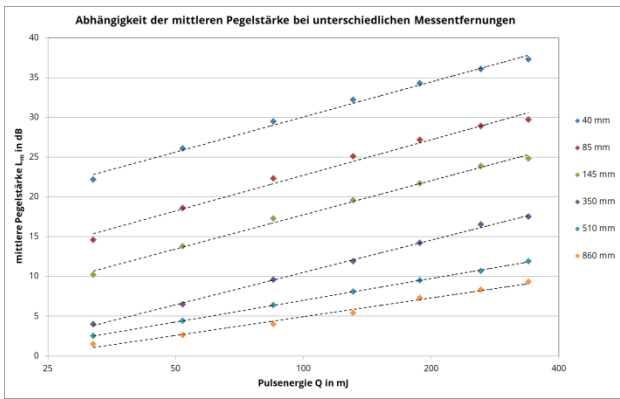


Abbildung 3: Darstellung der gemessenen Werte für die mittlere Pegelstärke  $L_m$  der laserinduzierten Signale in Abhängigkeit von der verwendeten Laserpulsenergie  $Q$  auf der Probekörperoberfläche für unterschiedliche Messentfernungen zum Ort der Signalanregung.

Hierbei ist zu erkennen, dass die Werte für die mittlere Pegelstärke  $L_m$  der akustischen gemessenen Signale mit zunehmender Pulsenergie zunehmen. Der Verlauf der Zunahme beschreibt dabei eine logarithmische Abhängigkeit. Weiterhin ist zu erkennen, dass bei vergleichbaren Pulsenergien die mittlere Pegelstärken mit zunehmender Entfernung zum Ort der Signalanregung sinken. Dieser Signalabfall ist, wie in [6] beschrieben auf die Materialdämpfung durch das Asphaltmaterial und dessen Zusammensetzung zurückzuführen und grundsätzlich unabhängig von der Art der Signalanregung. Ausgehend von den gemessenen Verläufen der mittleren Pegelstärken  $L_m$  und der bestimmten Signalabschwächung konnten so Energieschwellen für die mindestens notwendigen Laserpulsenergien abgeleitet werden um bestimmte Pegelstärken der akustischen Signale in Abhängigkeit von der Messentfernung zu erhalten. Die Pulsenergieschwellen sind für mittlere Pegelstärken  $L_m$  von 0 dB, 5 dB und 10 dB in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

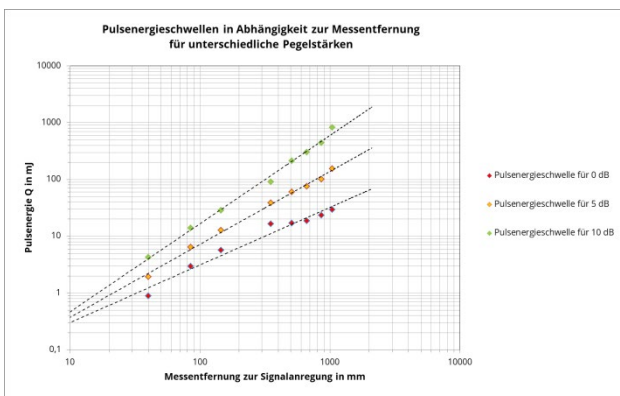


Abbildung 4: Darstellung der ermittelten Pulsenergieschwellen, welche in Abhängigkeit von der Entfernung zur Signalanregung mindestens überschritten werden müssen, um mittlere Signalpegelstärken  $L_m$  von 0 dB, 5 dB und 10 dB auf den Asphaltprobekörpern zu erreichen.

Diese Abhängigkeit bildet die Grundlage für die Parameterwahl der Laserstrahlung bei der Asphaltvermessung. Für beispielsweise eine durchschnittliche Signalstärke der messbaren laserinduzierten akustischen Signale von 5 dB in einer Messentfernung von 1000 mm müsste eine

Pulsenergie von ca. 200 mJ mit dem angegebenen optischen Setup verwendet werden.

Bei weiteren Untersuchungen in Hinblick auf die Zusammensetzung der erzeugten laserinduzierten akustischen Signale musste festgestellt werden, dass unabhängig von der Signalerfassung (kontaktbehaftete IEPE Sensoren oder kontaktlose laservibrometrische Messung) ein hoher Signalanteil der gemessenen Verläufe auf die bei der Signalgenerierung sekundäre auftretenden Luftschallwellen und nicht auf die eigentlich bei der Asphaltvermessung nutzbaren Schockwellensignale zurückzuführen ist. Hintergrund der Entstehung dieser Schallwellen ist die Plasmaexpansion vom Probekörper und infolgedessen die Kompression des Luftraums über der Materialoberfläche. Ein K.O.-Kriterium für die Asphaltvermessung stellen diese Luftschallsignale nicht dar, da diese aufgrund unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten in der finalen Datenauswertung von einander getrennt werden können. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallsignale über den Luftraum beträgt ca. 340 m/s und die der Schockwellensignale im Asphaltmaterial mindestens 1500 m/s. Eine laservibrometrische Messaufzeichnung, in der der Unterschied beider Signalanteile sichtbar ist, kann in der nachfolgenden Abbildung 5 betrachtet werden.



Abbildung 5: Messaufzeichnung der laserinduzierten akustischen Signale auf dem Asphaltprobekörper. Die im roten Bereich markierten Signalausschläge werden aufgrund der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit dem, für die Asphaltvermessung notwendigen Schockwellensignal zugeordnet.

Infolgedessen wurde zur Optimierung der mittleren Pegelstärke  $L_m$  bei der laserinduzierten Signalgenerierung die akustischen Signalanteile und insbesondere die der Schockwellensignale im Asphaltmaterial einzeln betrachtet. Zur Bestimmung des Luftschallsignalanteils wurde ein von dem Probematerial entkoppelter Sensor verwendet. Die Datenerfassung der Schockwellensignale erfolgte unter Verwendung eines Luftschallabsorbers (Aluminiummantelrohr mit Abdeckung und poröser Kunststofffüllung) um den Ort der Signalzeugung herum. Die ermittelten durchschnittlichen Signalstärken der jeweiligen Signalanteile gegenüber dem Gesamtsignal sind in der Abbildung 6 dargestellt. Bei diesen Versuchen konnte außerdem ein Einfluss der Fokusposition bzw. der Größe der bestrahlten Materialoberfläche auf die einzelnen Signalanteile festgestellt werden.

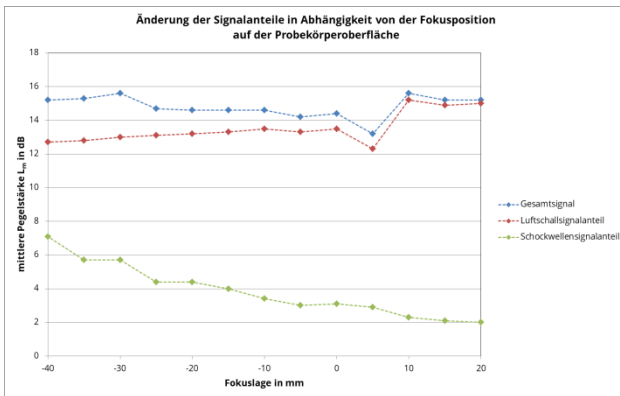


Abbildung 6: Darstellung der Änderung der mittleren Pegelstärke  $L_m$  der laserinduzierten Signalanteile in Abhängigkeit von der Fokusposition auf der Probekörperoberfläche (Fokuslage 0 mm  $\hat{=}$  Fokuspunkt der Laserstrahlung liegt direkt auf der Materialoberfläche). Ein positiver Wert der Fokuslage bedeutet, dass sich die Fokusposition über der Probekörperoberfläche befindet und sich somit der Abstand zwischen Objektiv und Oberfläche vergrößert.

Die experimentell ermittelten Werte zeigen, dass die Verhältnisse der Signalanteile von Schockwelle und Luftschall abhängig von der verwendeten Fokuslage sind. Eine positive Fokuslage (Fokuspunkt liegt oberhalb der Materialoberfläche) bewirkt aufgrund der hohen Pulsenergie eine zusätzliche Plasmabildung in der Luft (Luftdurchschlag), wodurch weniger Pulsenergie für die eigentliche Schockwellenbildung auf der Materialoberfläche zur Verfügung steht und dadurch der Signalanteil der Luftschallsignale am gemessenen Gesamtsignal steigt. Bei einer negativen Fokuslage konnte hingegen ein deutlicher Anstieg der Schockwellensignale gegenüber einem gleichbleibenden Gesamtsignal ermittelt werden. Hintergrund hierfür ist, dass durch den Druck bei der Plasmaexpansion ein höherer Kräfteintrag bei der Schockwellengenerierung durch eine gleichmäßigere Energieverteilung auf eine größere Materialoberfläche infolge der Defokussierung erreicht werden konnte. Diesen Effekt kann man bei der Vermessung der von Probekörpern ausnutzen um so die gewünschten Schockwellensignale, hier speziell für die Asphaltvermessung im Nachgang zu optimieren.

## 5. Generierung von laserinduzierten Schockwellensignalen für die Vermessung von Asphaltsschichten.

Ausgehend von den Erkenntnissen bzgl. der Eigenschaften der erzeugten laserinduzierten akustischen Signale kann abgeleitet werden, dass die Erzeugung der für die Asphaltvermessung notwendigen Schockwellensignale in Asphalt von dem Energieeintrag pro Fläche (der Laserstrahlfluenz) und ebenfalls von der Größe der bestrahlten Materialoberfläche maßgeblich abhängt. Hierfür wurden für die Bestimmung der mittleren Pegelstärke  $L_m$  der laserinduzierten Schockwellensignale Versuche unter Verwendung eines Luftschallabsorbers in Abhängigkeit von der Laserstrahlfluenz durchgeführt. Die Datenerfassung erfolgt dabei in einer Messentfernung von

200 mm zum Ort der Signalerzeugung und die Variation der Größe der bestrahlten Materialoberfläche durch Änderung der Fokusposition bzgl. der Probekörperoberfläche oder durch Anpassung der Objektivbrennweite im optischen Setup der Anlagentechnik. Als Kennwert und zur Gegenüberstellung der Messergebnisse wird die Größe der bestrahlten Materialoberfläche über den jeweils auf der Asphaltkörperoberfläche resultierenden Strahlradius  $\omega$  angegeben. Die so ermittelten Verläufe für die durchschnittliche Signalstärke der laserinduzierten Schockwellensignale sind in der nachfolgenden Abbildung 7 dargestellt.

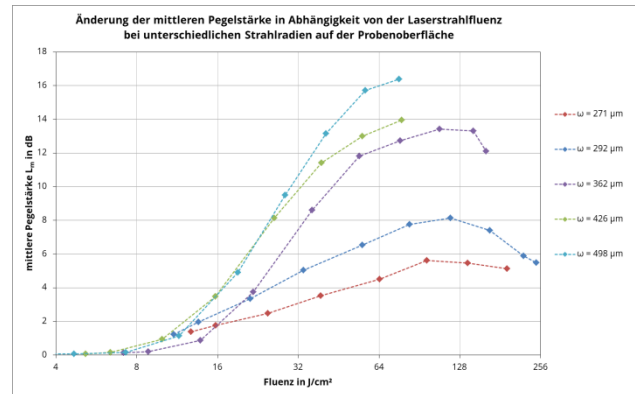


Abbildung 7: Darstellung der Änderung der gemessenen mittleren Pegelstärke  $L_m$  der laserinduzierten Schockwellensignale in Abhängigkeit von der Laserstrahlfluenz für unterschiedlich verwendete Strahlradien  $\omega$  auf der Asphaltprobekörperoberfläche.

Die Messergebnisse zeigen, dass bis zu einem gewissen Punkt die Werte für die mittlere Pegelstärke  $L_m$  der Schockwellensignale mit zunehmender Laserstrahlfluenz ansteigen. Bei Fluenzen über dieses Signalpegelmaximum hinaus sinkt der Wert wieder ab. Grund hierfür ist ein starker Anstieg des Luftschallsignals aufgrund der Art der Plasmaexpansion und der Energieabsorption bzw. -abschirmung bei sehr hohen Fluenzwerten. Für eine detailliertere Betrachtung der Ursache müssten jedoch noch weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet vorgenommen werden. Für die Vermessung von Asphaltsschichten bedeutet hier das Signalpegelmaximum, dass der Signalanteil der laserinduzierten Schockwellensignale am Gesamtsignalanteil (Luftschallsignal + Schockwellensignal) seinen größtmöglichen Wert erreicht hat. Aus den Untersuchungen ergab sich unabhängig vom verwendeten Strahlradius  $\omega$  ein Signalpegelmaximum auf Asphalt bei ca. 95 J/cm<sup>2</sup>. Weiterhin konnte eine grundsätzliche Schwellfluenz von 8,75 J/cm<sup>2</sup> für die laserinduzierte Schockwellensignalerzeugung auf Asphalt aus den Daten ermittelt werden.

Neben der verwendeten Laserstrahlfluenz kann die durchschnittliche Signalstärke der Schockwellensignale weiterhin durch den verwendeten Strahlradius  $\omega$  auf der Asphaltprobekörperoberfläche beeinflusst werden. Die Messergebnisse zeigen, dass bei vergleichbaren Fluenzwerten höhere mittlere Pegelstärken  $L_m$  mit größeren Strahlradien erreicht werden konnten. Eine solche Abhängigkeit der mittleren Pegelstärken  $L_m$  der

laserinduzierten Schockwellensignale von dem verwendeten Strahlradius  $\omega$  auf der Asphaltoberfläche ist für die Fluenz zum Erreichen des Signalpegelmaximums auf Asphalt von  $95 \text{ J/cm}^2$  und einer nicht optimalen Fluenz von  $50 \text{ J/cm}^2$  in Abbildung 8 dargestellt.

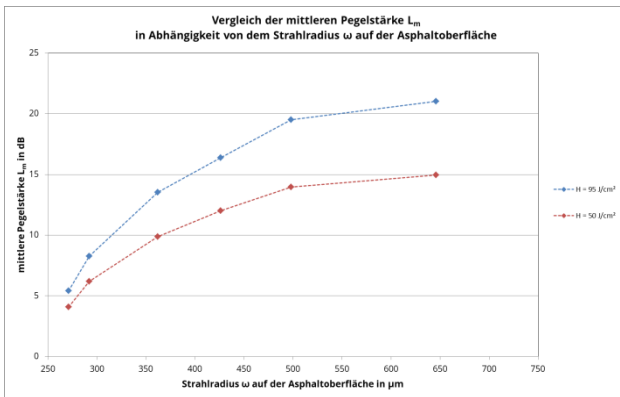


Abbildung 8: Vergleich der Werte der mittleren Pegelstärke  $L_m$  der laserinduzierten Schockwellensignale in Abhängigkeit von der Größe der bestrahlten Asphaltoberfläche (bestimmt über Strahlradius  $\omega$ ) bei Verwendung von Laserstrahlfluenzen von  $50 \text{ J/cm}^2$  und  $95 \text{ J/cm}^2$  (Signalpegelmaximum für Asphalt).

## 6. Zusammenfassung

Für die Charakterisierung der Abhängigkeiten der laserinduzierten akustischen Signale von den verwendeten Laserparametern konnte gezeigt werden, dass die Betrachtung der durchschnittlichen Signalstärke, in Form der mittleren Pegelstärke  $L_m$  geeignet ist. Die Untersuchungen ergaben, dass mit Zunahme der Pulsenergie ebenfalls eine Zunahme der mittleren Pegelstärke  $L_m$  erfolgt. Eine detailliertere Analyse der Signalanteile von Luftschallwellen und Schockwellen am akustischen Gesamtsignal ergab jedoch unterschiedliche Abhängigkeiten und Anteilsverhältnisse. Das für die Asphaltvermessung relevante Schockwellensignal, welches sich im Material selbst und mit einer höheren Geschwindigkeit als das Luftschallsignal ausbreitet, hat einen optimalen Wert für den Energieeintrag pro Fläche bis zu diesem die durchschnittliche Pegelstärke ansteigt und anschließend

wieder abfällt. Für Asphaltschichten beträgt dieser Fluenzwert für das Signalpegelmaximum der Schockwellen ca.  $95 \text{ J/cm}^2$  und bedeutet hier, dass der Signalanteil der laserinduzierten Schockwellensignale am Gesamtsignalanteil (Luftschallsignal + Schockwellensignal) seinen größtmöglichen Wert erreicht hat. Eine Signalerzeugung ohne Luftschallsignal ist grundsätzlich nicht möglich, da beide auf den gleichen Entstehungsmechanismus durch das expandierende Plasma zurückzuführen sind. Weiterhin konnten die Untersuchungen zeigen, dass bei Verwendung der optimalen Laserstrahlfluenz die mittleren Pegelstärken  $L_m$  zusätzlich mit Vergrößerung des verwendeten Strahlradius  $\omega$  auf der Asphaltoberfläche erhöht werden können. Hieraus ergibt sich, dass das optische Setup der Anlagentechnik bei der laserinduzierten Schockwellengenerierung entsprechend der maximal zur Verfügung stehenden Pulsenergie angepasst werden muss. Für die zerstörungsfreie Vermessung von Asphaltschichten durch die neuartige optoakustischen Bestimmungsmethode mit Hilfe von laserinduzierten Schockwellensignalen kann die notwendige Pulsenergie  $Q$  in Abhängigkeit von dem verwendeten Strahlradius  $\omega$  der Abbildung 9 entnommen werden.

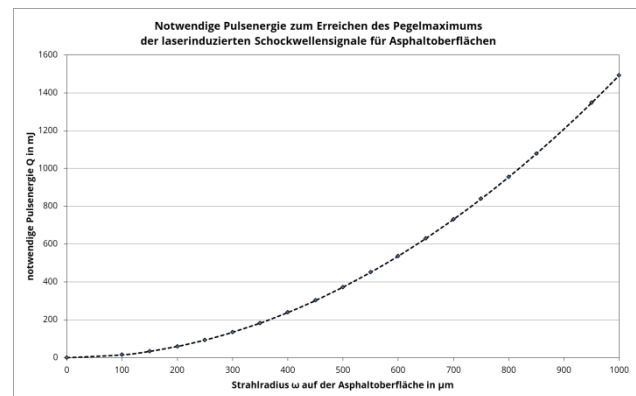


Abbildung 9: Darstellung der ermittelten notwendigen Pulsenergie  $Q$  in Abhängigkeit von der Größe der bestrahlten Probeoberfläche (bestimmt über Strahlradius  $\omega$ ) zum Erreichen des Signalpegelmaximums der laserinduzierten Schockwellensignale in Asphaltpartikeln.

## Literaturverzeichnis

- [1] FGSV. „Richtlinien zur Bewertung der strukturellen Substanz des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht“, *RSO Asphalt 13*, Köln: FGSV-Verlag, 2013.
- [2] C. B. Park, R. d. Miller, J. Xia, „Multichannel analysis of surface waves“, *GEOPHYSICS*, Volume 64, Nr. 3, S. 800-808, 1999. DOI: 10.1190/1.1444590.
- [3] N. Jafri, et al., „Assessment of soil compaction properties based on surface wave techniques“, *E3S Web of Conferences*, Volume 34 EDP Sciences, S. 01002, 2018. DOI: 10.1051/e3sconf/20183401002.
- [4] L. Cremer, und M. Heckl, „Körperschall: physikalische Grundlagen und technische Anwendungen“, Springer-Verlag, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-49922-7.
- [5] M. Pfeiffer, J. Hübel und S. Weißmantel, „Grundlagen zur laserinduzierten Schockwellenanregung in Asphaltpartikeln“, *12. Mittweidaer Lasertagung*, Nr. 003, S. 147-152, 2021. DOI: 10.48446/opus-12842.
- [6] M. Pfeiffer, J. Hübel und S. Weißmantel, „Erzeugung von laserinduzierten Schockwellensignalen für die Vermessung von Asphaltpartikeln“, *12. Mittweidaer Lasertagung*, Nr. 003, S. 106-112, 2021. DOI: 10.48446/opus-12868.
- [7] M. Boustie, L. Berthe, T. Resseguier, M. Arrigoni, „Laser shock waves: Fundamentals and Applications“, *1st International symposium on laser ultrasonics: science, technology and applications*, Volume 6, 2008.