

Untersuchungen zur zerstörungsfreien Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Asphaltsschichten

F. Mielentz, B. Milmann, J. Wöstmann, M. Krause, Ch. Maierhofer, BAM Berlin
A. Römer, W. Völkel, HAMM, Tirschenreuth

Zusammenfassung

Die Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Asphalt ist eine wichtige Fragestellung im Straßenbau. Im Rahmen einer Vorstudie wurden Möglichkeiten untersucht, diesen Hohlraumgehalt zerstörungsfrei zu bestimmen. Dabei war zu beachten, dass bei einer späteren Anwendung eines Messverfahrens auf einer Baustelle die Asphaltsschichten nur einseitig zugänglich sind. Während der Verdichtung des Asphalts verändert sich außer dem Hohlraumgehalt zusätzlich auch die Schichtdicke.

Als zerstörungsfreie Prüfverfahren kamen Niederfrequenz-Ultraschallverfahren im Frequenzbereich von 55 kHz bis 200 kHz und das Radarverfahren mit einer Antenne der Mittenfrequenz von 1,5 GHz zum Einsatz. Ein Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist sowohl bei den elastischen als auch bei den elektromagnetischen Wellen erkennbar. Vielversprechend für die Bestimmung des Hohlraumgehaltes ist ein Verfahren, bei dem das Rückstreuverhalten des Asphalts mit in die Auswertung der Ultraschallmessungen einbezogen wird. Über das Verhältnis der Echoamplitude der Asphaltrückwand zur Rauschamplitude konnten prinzipiell die Hohlraumgehalte unterschieden werden.

1 Einleitung

Beim Neubau von Straßen in Asphaltbauweise ist der Verdichtungsgrad eine wichtige Information. Das rechtzeitige Erkennen ausreichender Verdichtung der Asphaltsschichten während des Baufortschrittes führt beim Walzen zur Minimierung der Anzahl der Überfahrten und erleichtert die Herstellung qualitativ hochwertiger Asphaltsschichten. Herkömmliche Messmethoden zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes erfordern die Entnahme von Proben und beeinträchtigen den Arbeitsablauf auf der Baustelle. Außerdem ist i. d. R. das Probenvolumen gering und ermöglicht nur eine stichprobenartige Überwachung.

Es gibt bereits Messsysteme, die mit Beschleunigungsaufnehmern arbeiten und eine Verdichtungskontrolle direkt beim Verdichten erlauben [1]. Um die Bestimmung des Verdichtungsgrades von Asphaltsschichten weiter zu verbessern, wurden im Rahmen einer wissenschaftlichen Vorstudie [2] zusätzliche Möglichkeiten der zerstörungsfreien Messung des Hohlraumgehaltes geprüft. Die Untersuchungen erfolgten an einer Serie von Asphaltproben der Dicke von 5 cm, 8 cm und 12 cm mit Hohlraumgehalten von 3,8 % bis 8,2 %.

Ziel der Untersuchungen war es, die Grundlagen für eine Verfahrensentwicklung zu schaffen, mit der messtechnisch von der Oberfläche aus der Hohlraumgehalt von Asphaltsschichten erfasst werden kann. Dabei war zu beachten, dass sich bei einer späteren Anwendung auf der Baustelle während der Verdichtung sowohl der Hohlraumgehalt als auch die Dicke ändern.

2 Verfahrensbeschreibungen

Beim Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren wird ein Ultraschallimpuls von einem Prüfkopf in das Prüfobjekt abgestrahlt, der sich im untersuchten Medium mit Schallgeschwindigkeit ausbreitet. An Grenzflächen, an denen sich der Schallwiderstand ändert, wird ein Teil der Ultraschallenergie reflektiert. Grenzflächen bilden

zum Beispiel die Begrenzungen des Prüfobjektes, wodurch die Bauteilabmessungen aus den Echolaufzeiten bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt werden können. Die Messung der Empfangssignale erfolgt mit demselben oder einem zweiten Prüfkopf. Für Strukturuntersuchungen mit der Impuls-Echo-Methode an grobkörnigen inhomogenen Materialien gibt es spezielle Verfahren, die in [3] und [4] näher beschrieben werden. Außerdem kommt es zu Streuungen an Korngrenzen, die sich z. B. dem Echo der Rückwand eines Bauteils überlagern. Dieser Einfluss kann zur zerstörungsfreien Gefügecharakterisierung herangezogen werden [5].

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit einer vielseitigen Entwicklungsapparatur, mit der Durchschallungs- oder Impulsechomessungen mit zwei bis zehn Prüfköpfen möglich sind, durchgeführt (siehe **Abb. 1**). Zur Anregung der Ultraschallprüfköpfe wurde ein CS-Sender (controlled signals) benutzt, um die Prüffrequenzen variieren zu können. Es wurden unterschiedliche Prüfköpfe eingesetzt, die sich in der Mittenfrequenz, Wellenart und Ankoppelmöglichkeit unterschieden.



Abb. 1: Ultraschall-Messapparatur.



Abb. 2: Radargerät (SIR 10A) mit 1,5 GHz Antenne der Fa. GSSI.

Beim Radar handelt es sich um ein Verfahren zur Untersuchung von Strukturen und zur Detektion von Objekten im Untergrund und im Bauwerk. Das Verfahren beruht auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen in ein Medium, meist in Form von Impulsen mit Mittenfrequenzen im Bereich von ca. 20 MHz bis ca. 2,5 GHz. Die Wellenausbreitung hängt von den elektromagnetischen Materialeigenschaften ab. Auf ihrem Weg durch das Material wird die Welle an Diskontinuitäten gestreut, reflektiert und gebeugt sowie durch Absorption geschwächt. Beim Einfall einer elektromagnetischen Welle auf eine Grenzfläche von zwei Medien mit sprunghafter Änderung der elektrischen Eigenschaften wird sie teilweise reflektiert. Für eine ausführliche Beschreibung des Radarverfahrens sei auf die Literaturstellen [3], [6], [7] und [8] verwiesen. Für die Durchführung der Radarmessungen wurde das kommerzielle SIR 10A Radargerät von der Firma GSSI (USA) mit zwei 1,5 GHz Antennen vom gleichen Hersteller verwendet (siehe **Abb. 2**).

3 Ultraschalluntersuchungen

Die Ultraschallmessungen erfolgten mit unterschiedlichen Prüfköpfen im Frequenzbereich von 55 kHz bis 200 kHz in Durchschallung und im Echo-Betrieb. Bei der Untersuchung wurde der Einfluss des Hohlraumgehaltes von Asphaltproben auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallsignale geprüft. Zusätzlich wurde die Auswirkung des Hohlraumgehaltes auf das Rückstreuverhalten ermittelt.

In der Literatur werden bereits Möglichkeiten zur Anwendung von Ultraschallverfahren bei der Prüfung von Asphaltbeton vorgestellt. Die Untersuchungen stützen sich im Wesentlichen auf den Einfluss der Materialzusammensetzung und der Dichte auf die Ultraschall-Longitudinalwellengeschwindigkeit [9] und [10]. Um dieses grundsätzliche Ergebnis, den Einfluss des Hohlraumgehaltes bzw. der Dichte auf die

Schallgeschwindigkeit, zu überprüfen, wurden an den Asphaltproben im ersten Schritt die Schallgeschwindigkeiten bestimmt.

3.1 Ultraschall-Durchschallungsmessung

Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeiten erfolgte an den Asphaltproben mit einer Dicke von 12 cm und Hohlraumgehalten von 3,8 % bis 8,2 % in Durchschallung mit einer Sendeimpulsmittenfrequenz von 100 kHz (s. **Abb. 3** und **Abb. 4**). **Abb. 5** zeigt, dass mit steigendem Hohlraumgehalt der Asphaltproben die Schallgeschwindigkeit sinkt.

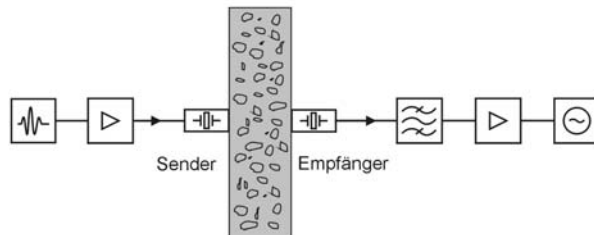


Abb. 3: Blockschaltbild der Messapparatur für Impulsecho- und Durchschallungsmessungen.

Abb. 4: Durchschallungsmessung.

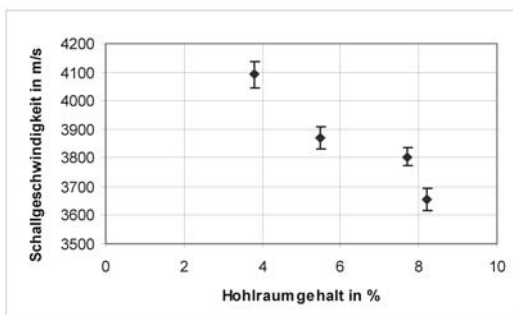
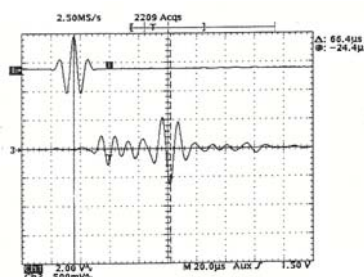


Abb. 5: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt.

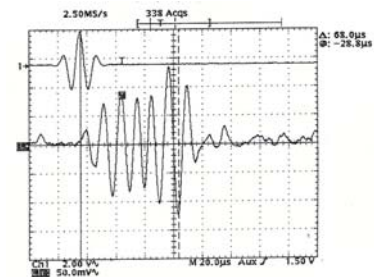
Die Geschwindigkeit wurde für jede Probe aus zehn Laufzeitmessungen mit unterschiedlichen Prüfkopfpositionen bestimmt. Für die Laufzeitbestimmung wurde jeweils die Einhüllende des Sende- und Empfangssignals berechnet und die Zeitdifferenz zwischen den Maxima der Hüllkurven unter Berücksichtigung der Prüfkopfvorlaufzeit abgelesen. Eine Angabe zur Messunsicherheit des Hohlraumgehaltes liegt nicht vor.

3.2 Impulsecho-Messungen und laufzeitkorrigierte Überlagerung

Als weiterer Ansatzpunkt für eine Bestimmung des Hohlraumgehaltes wird untersucht, inwieweit die Bewertung der Rückstreuung einer Ultraschallmessung herangezogen werden kann. Durch die Porosität des Asphalts kommt es zu Streuungen, weil sich an den Grenzflächen zu den Hohlräumen der Schallwiderstand ändert.



Hohlraumgehalt 3,8 %



Hohlraumgehalt 7,7 %

Abb. 6: Impulsechomesung.

Abb. 7: Ultraschall-Impulsechomesung (Kanal 1: Unverstärkter Sendeimpuls, Kanal 3: Empfangssignal).

Daher erfolgte im nächsten Schritt der Übergang zur Echomessung, wie sie bei einseitiger Zugänglichkeit erforderlich ist (s. **Abb. 6**).

Die **Abb. 7** zeigt als Beispiel die Empfangssignale von Ultraschallmessungen an zwei Asphaltproben der Dicke von 12 cm und Hohlraumgehalten von 3,8 % und 7,7 %. Zur Anwendung kam das Impulsechoverfahren mit getrenntem Sende- und Empfangsprüfkopf (Prüfköpfe Fa. Krautkrämer; G0,2R4), die direkt nebeneinander positioniert waren. Der Sendepuls hatte bei der Messung eine Mittenfrequenz von 85 kHz (**Abb. 7**, Kanal 1). Das Rückwandecho der Asphaltprobe mit dem geringeren Hohlraumgehalt ist wesentlich deutlicher (**Abb. 7** links, Kanal 3), was durch die geringeren Rückstreuungen bedingt ist. Die größere Streuung im rechten Oszillogramm führt zu einer geringeren Amplitude des Rückwandechos und zu Störechos verschiedener Laufzeiten, die eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit mit dem Impuls-Echo-Verfahren erschweren.

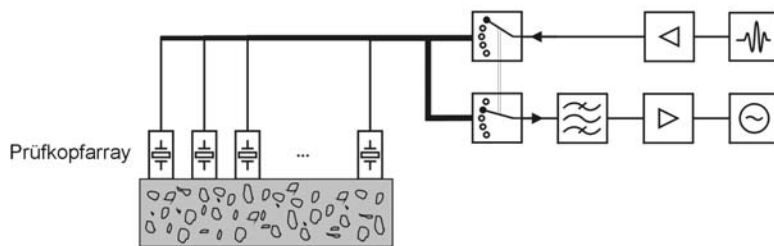


Abb. 8: Blockschaltbild der Messapparatur.

Abb. 9: Ultraschallarray.

Um die Abhängigkeit der Rückstreuung vom Hohlraumgehalt näher zu untersuchen, wurden Messungen mit einem Prüfkopfarray durchgeführt. Dabei kamen zehn Prüfköpfe zum Einsatz, die sequenziell als Sender oder Empfänger betrieben wurden (s. **Abb. 8** und **Abb. 9**). Dadurch erhielt man insgesamt 90 Ultraschall-Empfangssignale, mit denen eine Auswertung nach dem Prinzip der laufzeitkorrigierten Überlagerung durchgeführt wurde [4].

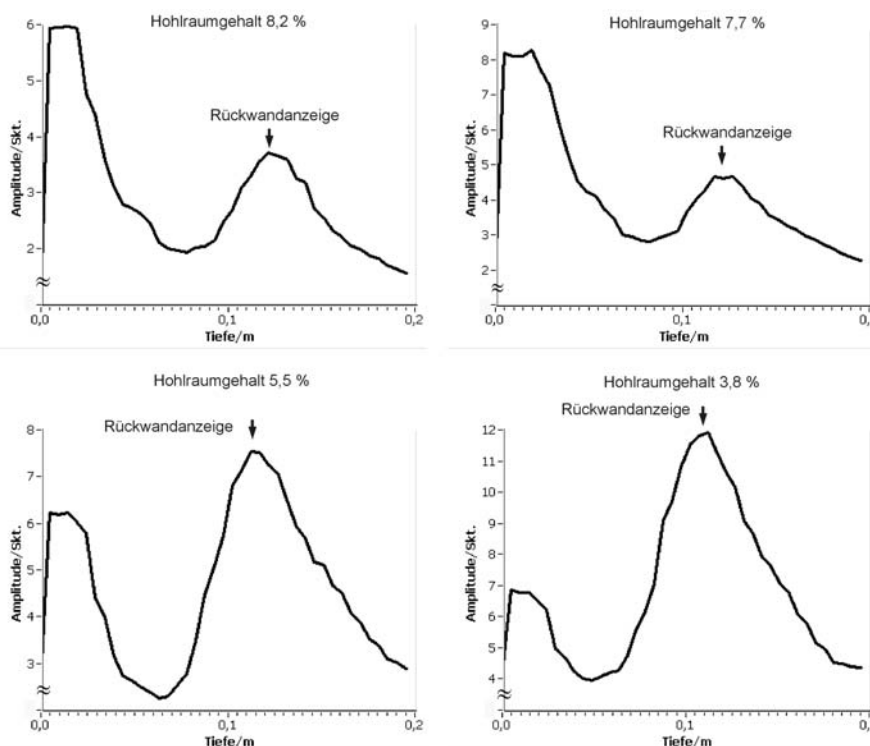


Abb. 10: Auswertungen der Arraymessungen mit gleichgerichteten Messsignalen und laufzeitkorrigierter Überlagerung (Asphaltprobendicke 12 cm).

Der Ultraschall-Sendeimpuls hatte eine Mittenfrequenz von 100 kHz. Damit sich bei der lauffzeitkorrigierten Überlagerung auch die Streusignale additiv überlagern, wurden für die in **Abb. 10** dargestellten Auswertungen die Messsignale vor der Berechnung gleichgerichtet.

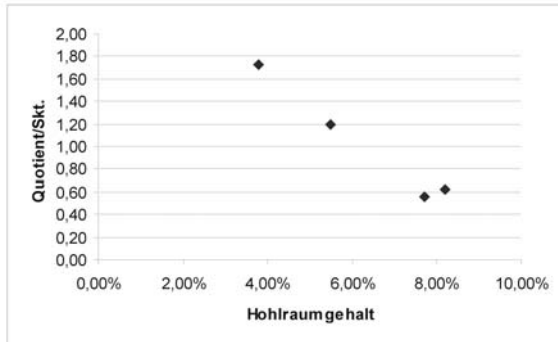


Abb. 11: Verhältnisse der Amplitudenwerte der Rückwandanzeige zur maximalen Rauschanzeige.

Das Verhältnis des Amplitudenwertes der Rückwandanzeige zum Gefügerauschen ist bei den Proben mit den Hohlraumgehalten von 5,5 % und 3,8 % deutlich größer als bei den Proben mit den Hohlraumgehalten von 8,2 % und 7,7 % (s. **Abb. 11**).

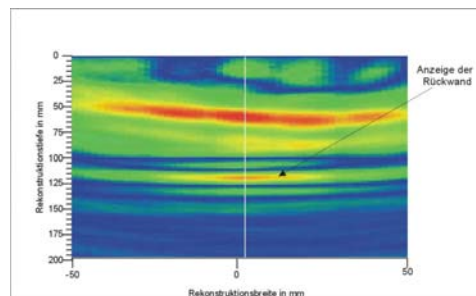
Eine Wiederholung dieser Messungen mit Sendepuls-Mittenfrequenzen von 85 kHz und 150 kHz ergab prinzipiell dieselben Ergebnisse.

3.3 Ultraschall-Messungen mit Punktkontakt-Prüfkopfarray

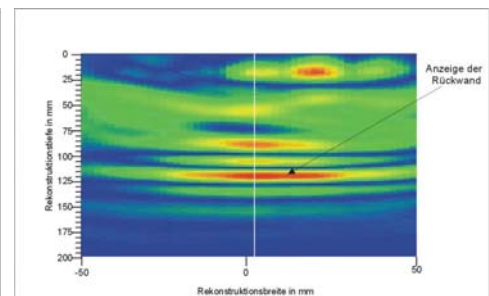
Die folgenden Messungen wurden mit einem multistatischen Prüfkopfarray (Fa. ACSYS), bestehend aus 36 Transversalwellen-Punktkontaktprüfköpfen der Mittenfrequenz von 50 kHz, durchgeführt (s. **Abb. 12**). Das Array wird zur Messung ohne Koppelmittel auf die Oberfläche gedrückt und jeder Prüfkopf arbeitet sequenziell als Sender und Empfänger.



[Fa. ACSYS, Russland]



Hohlraumgehalt 8,2 %



Hohlraumgehalt 3,8 %

Abb. 12: Prüfkopfarray.

Abb. 13: SAFT-Auswertungen der Messungen mit dem Punktkontakt-Prüfkopfarray an Asphaltproben der Dicke von 12 cm (Blau: 0 % Amplitude, Rot: 100 % Amplitude).

Anschließend wurden die Messdaten mit SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) ausgewertet [11]. Bei dem Verfahren wird das Volumen der Asphaltprobe unterhalb des Prüfkopfes ($100 \times 100 \text{ mm}^2$) in kleine Volumenelemente bzw. Voxel unterteilt. Jedes Voxel wird als Reflektorort betrachtet und die Signale jeweils nach Betrag und Phase überlagert. Als Ergebnis erhält man die Zuordnung eines Amplitudenwertes zu jedem Voxel, was mit einer entsprechenden Rekonstruktionsrechnung zur dreidimensionalen Darstellung des Inneren der Probe führt. Die Auswertungen sind als B-Bilder in **Abb. 13** dargestellt. Die Auswertung der Messung an der Asphaltprobe mit dem Hohlraumgehalt von 3,8 % zeigt eine deutlichere Rückwandanzeige und geringere Störanzeigen als die Probe mit dem Hohlraumgehalt von 8,2 %. Mit dem Punktkontakt-Prüfkopfarray wurden auch Testmessungen an den dünneren Asphaltproben durchgeführt. Generell war eine Messung und Auswertung nach dem SAFT-Verfahren möglich, aber bedingt durch die Wellenlänge im Asphalt wird bei den dünneren Proben eine Trennung zwischen Rückwandanzeige

und Rückstreuungen schwieriger. Bei diesen Proben müsste mit einer höheren Frequenz gemessen werden, was speziell angepasste Prüfköpfe erforderlich macht. Die Messungen zeigen, dass auch mit den Punktkontaktprüfköpfen eine Aussage über den Hohlraumgehalt aussichtsreich ist.

4 Radaruntersuchungen

In der Literatur werden für das Radarverfahren Möglichkeiten zur Prüfung von Asphaltbeton vorgestellt. Verwiesen sei hier u. a. auf die Literaturstellen [12] und [13]. Die Untersuchungen und theoretischen Überlegungen stützen sich im Wesentlichen auf den Einfluss der dielektrischen Eigenschaften (abhängig von der Materialzusammensetzung, Feuchte und Dichte) auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen im Material. Beispielsweise beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft ca. 0,3 m/ns, in Asphalt dagegen sind Geschwindigkeiten von 0,10 m/ns bis 0,13 m/ns typisch.

4.1 Transmissionsmessungen

Zur experimentellen Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurden im ersten Schritt an den vorliegenden Asphaltproben Transmissionsmessungen vorgenommen. Die von der Sendeantenne abgegebenen elektromagnetischen Impulse breiten sich durch das Probenmaterial aus und werden auf der gegenüberliegenden Seite von der Empfangsantenne empfangen. Erfasst und aufgezeichnet werden die Signallaufzeit und Signalamplitude. Die Versuchsanordnung ist in **Abb. 14** auf einem Foto zu sehen.

In **Abb. 15** sind die Ergebnisse der Transmissionsmessungen dargestellt, die an den vier Proben mit jeweils einer Dicke von 12 cm erfolgten. In dem Diagramm sind die aus den Signallaufzeiten berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom jeweiligen Hohlraumgehalt der untersuchten Asphaltplatten aufgetragen. Tendenziell nimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit steigendem Hohlraumgehalt zu. Die grafisch dargestellte Messunsicherheit berechnet sich aus der Standardabweichung von 10 Einzelmessungen und der Messunsicherheit bei der Bestimmung der Plattendicke.



Abb. 14: Radar-Durchstrahlungsmessung.

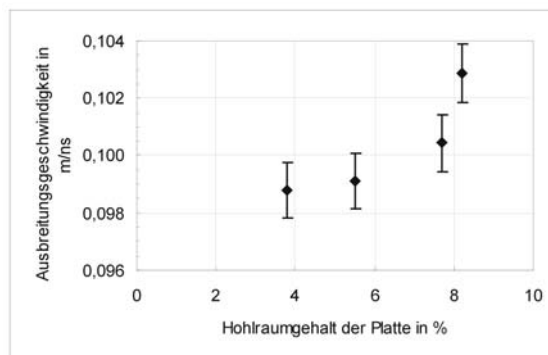


Abb. 15: Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt, ermittelt mit Radar-Transmissionsmessungen.

4.2 Reflexionsmessungen

In der Praxis ist die auf den Untergrund aufgebrachte Asphaltsschicht nur einseitig zugänglich. Aus diesem Grund wurden weitere Untersuchungen mit dem Radarverfahren in Reflexionsanordnung durchgeführt. Eine übliche Anordnung des Reflexionsradars ist, dass Sende- und Empfangsantenne in einem Gehäuse angeordnet sind und einseitig über das zu untersuchende Material geführt werden. Die von der Sendeantenne ausgesandten Impulse wandern durch das Asphaltmaterial, werden

an der Grenzschicht zum Untergrund teilweise reflektiert und gelangen wieder zurück zur Empfangsantenne. Eine Auswertung erfolgt dann über die Laufzeit und Amplitude der empfangenen Signale, die u.a. abhängig von Schichtdicke, Material, Feuchtigkeit und Porengehalt sind. Das Foto in **Abb. 16** zeigt die Reflexionsmessung an einer Asphaltprobe mit einem Hohlraumgehalt von 7,7 %.

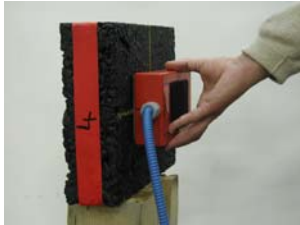


Abb. 16: Radar-Reflexionsmessung mit einer 1,5 GHz Antenne der Firma GSSI (USA).

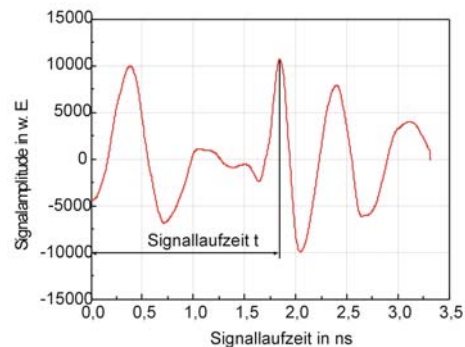


Abb. 17: Signalamplitude in Abhängigkeit von der Signallaufzeit, ermittelt mit Radar-Reflexionsmessungen (Hohlraumgehalt 7,7 %).

Die Reflexion an der Asphaltprobenoberfläche ist durch drei sinusförmige Halbwellen gekennzeichnet, wobei der Nullpunkt der Laufzeitachse in das erste Extrem (Minimum) gelegt wurde. Bei tiefer liegenden Reflexionen (hier die Rückwand der Asphaltplatten) ist deshalb ebenfalls zur Laufzeitbestimmung die Lage des ersten Extremwertes der Reflexion entscheidend. Aufgrund eines an der Rückwand stattfindenden Phasensprunges ist hier der erste Extremwert ein Maximum. In **Abb. 17** ist schematisch die Laufzeit für die Probe mit einem Hohlraumgehalt von 7,7 % gekennzeichnet.

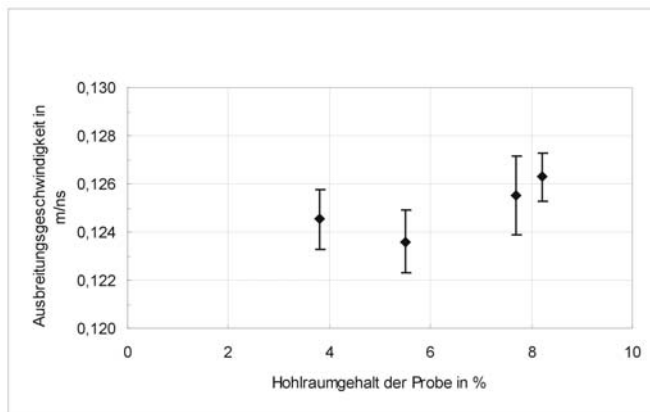


Abb. 18: Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Hohlraumgehaltes, ermittelt mit Radar-Reflexionsmessungen.

In **Abb. 18** sind die ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Hohlraumgehalten für die Plattendicke von 12 cm aufgeführt. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert von 20 Einzelmessungen. Die grafisch dargestellte Messunsicherheit berechnet sich aus der Standardabweichung der 20 Einzelwerte und der Messunsicherheit bei der Bestimmung der jeweiligen Plattendicke.

Festzustellen ist eine tendenzielle Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Zunahme des Hohlraumgehaltes. Dies entspricht auch den theoretischen Überlegungen, da die Geschwindigkeit in Luft deutlich höher liegt als in Asphalt. Die an den Proben ermittelten Geschwindigkeitsunterschiede sind jedoch so gering, dass sie innerhalb der Messunsicherheit liegen.

5 Ergebnisse und Ausblick

Die Ultraschallmessungen der Schallgeschwindigkeiten ergaben, dass mit steigendem Hohlraumgehalt der Asphaltproben die Schallgeschwindigkeit sinkt. Bei den Messungen nach der Impulsecho-Methode ist bei einem großen Hohlraumgehalt des Asphalts die Rückstreuung besonders groß. Durch diese Rückstreuungen erkennt

man bei einigen Messungen im Einzelbild kein deutliches Rückwandsignal, aber eine Dickenbestimmung nach dem Verfahren der laufzeitkorrigierten Überlagerung ist an allen untersuchten Proben erfolgreich. Vor der Auswertung wurden die Messsignale gleichgerichtet damit sich die Störsignale durch Gefügerauschen nicht mehr auslösen können und eine Beurteilung der Rückstreuung möglich ist. Ein Vergleich der Amplitudenwerte in den Auswertungen der unterschiedlichen Messungen ist durch mögliche Ankoppelschwankungen nicht aussagekräftig. Für eine qualitative Bewertung einer Messung bietet sich erfahrungsgemäß eine Quotientenbildung von Echoanzeigen an. Dieses Verfahren wird z. B. für die Beurteilung von Grenzschichtübergängen zwischen Bauteilen erfolgreich eingesetzt.

Wählt man für das Verhältnis die Amplituden der Dickenanzeige und des Gefügerauschens, ergab sich noch keine eindeutige Korrelation zwischen den Amplitudenverhältnissen und den Hohlraumgehalten. Tendenziell zeigt sich aber, dass eine Asphaltprobe mit einem geringen Hohlraumgehalt eine hohe Echoamplitude der Rückwand und eine geringe Rauschamplitude zur Folge hat. Diese Tendenz bestätigt sich auch bei den SAFT-Auswertungen der Messungen mit den Transversalwellenprüfköpfen. Für spätere Anwendungen auf der Baustelle wäre ein Schwellwertverfahren denkbar, das das Verhältnis der Echoanzeigen bewertet. Beim Verfahrenseinsatz an realen Asphalttragschichten ist durch den mehrschichtigen Aufbau mit kleineren Echoanzeigen der Rückwand zu rechnen, was eine Beurteilung erschweren könnte.

Die an den Asphaltproben durchgeführten Radaruntersuchungen haben eine tendenzielle Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei Zunahme des Hohlraumgehaltes gezeigt. Die an den Proben ermittelten Geschwindigkeitsunterschiede sind jedoch sehr gering und liegen bei den Reflexionsmessungen innerhalb der Messunsicherheit. Es fällt ein Unterschied in der absoluten Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen den Reflexions- und Transmissionsmessungen auf. Dies ist ein systematischer Fehler, der durch den räumlichen Abstand zwischen Sender und Empfänger innerhalb der Antenne begründet ist. Zusätzlich ist die Unsicherheit des zeitlichen Nullpunktes zu berücksichtigen. Die Ergebnisse der Reflexionsmessungen sind jedoch untereinander vergleichbar.

In der Praxis wird die auf den Untergrund aufgebrachte Asphalttschicht nur einseitig zugänglich sein. Eine sinnvolle Möglichkeit zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit bei zusätzlich unbekannter Asphalt-Schichtdicke ist die sog. Common Midpoint (CMP)-Anordnung. Bei der CMP-Anordnung werden Sende- und Empfangsantenne stufenweise voneinander getrennt. Die beiden Antennen müssen also separierbar und frei beweglich sein. Die verschiedenen Einzelspuren werden wiederum zusammengefasst und über den Abstand Sender-Empfänger aufgetragen. Reflexionen bilden sich in Form von sog. Reflexionshyperbeln aus. Die Analyse der Krümmung der Hyperbeln erlaubt wiederum die Bestimmung der mittleren Mediumgeschwindigkeit oberhalb des Reflektors (Asphalt/Untergrund). Eine Anwendung dieser Methode konnte an den vorhandenen Proben aufgrund der zu geringen Größe nicht durchgeführt werden.

Diese ersten vielversprechenden Ergebnisse wurden an den Asphaltproben der Dicke von 12 cm erzielt. Um die Aussagesicherheit für weitergehende Untersuchungen zu verbessern, müssten die Messungen an einer größeren Anzahl von Asphaltproben erfolgen. Hierfür würden sich dickere Asphaltproben mit einer größeren Spreizung der Hohlraumgehalte anbieten. Insgesamt kann also gesagt werden, dass die erzielten Ergebnisse eine Weiterführung der Untersuchung in Richtung einer Verfahrensentwicklung für die Praxis nahe legen.

6 Literatur

- [1] Hamm AG Firmenschrift: HCN, Compaction Navigator. www.hammag.com. Produktinformation 2004.
- [2] Mielentz, F., Wöstmann, J. und M. Krause: Untersuchung des Einflusses des Hohlraumgehaltes in Asphaltproben auf die Ausbreitung von elastischen und elektromagnetischen Wellen. Forschungsbericht zur wissenschaftlichen Vorstudie. BAM, Vorhaben 4515, Kennziffer 0838, Januar 2005 (unveröffentlicht).
- [3] Bauphysik-Kalender 2004: S. 333-352, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2004.
- [4] Mielentz, F., Milman, B., Krause, M. und H. Wiggerhauser: Praxiseinsatz eines Ultraschallecho-Verfahrens zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen. In: DGZfP (Hrsg.); Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 21.-22. Januar 1999 in München, DGZfP-Berichtsband 66-CD (1999) Poster 3.
- [5] Willems, H. und K. Goebels: Zerstörungsfreie Gefügeanalyse mittels Ultraschall-Rückstreuung. Konferenz-Einzelbericht: Sonderbände der praktischen Metallographie, DGM-Metallographietagung Band 16, 1985.
- [6] Daniels, D. J., Gunton, D. J. and H. F. Scott: Introduction to subsurface radar. IEEE Proc. Vol. 135, Pt. F, No. 4, 1988, pp. 278-320.
- [7] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP): Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10). Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin (2001).
- [8] Maierhofer, Ch. und T. Funk: Auswertung von Radarmessungen im Bauwesen: Signalverarbeitung - Visualisierung - Interpretation. Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Tagungsband des Querschnittseminars Bildverarbeitung 1995 in Stutensee, Berichtsband 50, S. 101 - 110.
- [9] Sztukiewicz, R. J.: Application of ultrasonic methods in asphalt concrete testing. Zeitschriftenaufsatz: Ultrasonics, Band 29 Heft 1, Seite 5-12, 1991.
- [10] Popovics, S. and J. S. Popovics: NDT methods for the in-situ evaluation of pavements in the USA. A review. Zeitschriftenaufsatz: Insight, 1998.
- [11] Schickert, M., Krause, M. and W. Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique, Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE), ASCE Vol. 15 (2003) 3, pp. 235-246, 2003.
- [12] Al-Qadi, I. L., Lahouar, S. and A. Loulizi: In situ measurements of hot-mix asphalt dielectric properties. NDT&E International 34, (2001), pp. 427 - 434.
- [13] Saarenketo, T. and P. Roimela: Ground penetrating radar technique in asphalt pavement density quality control. Konferenz-Einzelbericht: GPR '98. Seventh International Conference on Ground-Penetrating Radar, 1998.