

TU Dresden, HS Mittweida  
Name der Forschungsstelle(n)

15700 BR /  
IGF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.09.08 - 28.02.10  
Bewilligungszeitraum

**Schlussbericht für den Zeitraum : 01.09.08 - 28.02.10**

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten IGF-Forschungsvorhaben

- Normalverfahren  
 Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema :

Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigen  
Fahrbahnbelägen unmittelbar nach Einbau zum Erzielen von optimalen akustischen  
Eigenschaften

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- ist beigefügt  
 liegt bereits vor  
 wird fristgerecht nachgereicht

18. Mai 2010

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN  
FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN  
LEHRSTUHL STRASSENBAU  
UNIV.-PROF. DR.-ING. HABIL. F. WELLNER  
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt  
Hochschule Mittweida  
University of Applied Sciences  
Fakultät Mathematik/Physik/Informatik  
Technikumplatz 17 - 09648 Mittweida



Schlussbericht zum AiF- Forschungsprojekt Nr. 15700 BR

„Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen  
Hohlraumgehalts von offenporigen Fahrbahnbelägen  
unmittelbar nach Einbau zum Erzielen von  
optimalen akustischen Eigenschaften“

Mitgliedsvereinigung: Deutsches Asphaltinstitut e.V.  
Schieffelingsweg 6  
53123 Bonn

Forschungsstelle 1: Technische Universität Dresden  
Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau  
Professur für Straßenbau  
01062 Dresden

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frohmüt Wellner

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Anita Blasl

Kontakt: [www.strassenbau.tu-dresden.de](http://www.strassenbau.tu-dresden.de)

Forschungsstelle 2: Hochschule Mittweida  
University of Applied Sciences  
Institut für technische Akustik und Umweltprozesse e. V.  
Technikumplatz 17  
09648 Mittweida

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Bearbeiter: Dr. rer. nat. Christian Kühnert  
Dipl.-Ing. Uta Figula

Kontakt: [www.mpi.hs-mittweida.de](http://www.mpi.hs-mittweida.de)

## **Kurzfassung**

Offenporige Asphalte werden in Deutschland unter anderem für Lärm mindernde Deckschichten sowie als Tragschichtmaterial für wasserdurchlässige Befestigungen eingesetzt. Des Weiteren werden diese Asphalte auf Grund ihres Lärmabsorptionsvermögens und der Verringerung des Airpumping-Effekts zur Reduzierung der Geräuschemission genutzt. Sowohl das Airpumping als auch das Lärmabsorptionsvermögen hängen sehr stark von dem während des Einbaus eines offenporigen Asphaltes erreichten zugänglichen Hohlraumgehalt ab. Der zugängliche Hohlraumgehalt wird in der Regel an aus der Asphaltdeckschicht entnommen Bohrkernen bestimmt. Dieses Verfahren bringt jedoch einige Nachteile mit sich. So ist die Methode nicht zerstörungsfrei, der zugängliche Hohlraumgehalt kann nur exemplarisch an bestimmten Stellen, jedoch nicht flächendeckend und somit i.d.R. nicht mit statistischer Sicherheit bestimmt werden. Da der zugängliche Hohlraumgehalt erst nach dem Einbau an einer bereits erkalteten Schicht ermittelt werden kann, ist während der Bauausführung eine Einflussnahme auf die Verdichtung ausgeschlossen. Wird nachträglich festgestellt, dass die Verdichtung so unzureichend ist, dass die bereits fertige Schicht großflächig komplett erneuert werden muss, so ist dies in jedem Fall mit hohem Mehraufwand an Kosten, insbesondere hinsichtlich der Faktoren Zeit und Material, verbunden.

Die Entwicklung einer zerstörungsfreien Methode zur Bestimmung des Verdichtungsgrades unmittelbar nach dem Asphalteinbau ermöglicht es, in den Prozess der Verdichtung einzugreifen und diesen gezielt bei einem gewünschten zugänglichen Hohlraumgehalt bzw. Verdichtungsgrad zu beenden.

Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war zunächst die Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigem Asphalt. Das Verfahren soll sowohl zerstörungsfrei als auch unmittelbar nach Asphalteinbau einsetzbar sein. Hierdurch soll eine verbesserte Qualitätskontrolle im Rahmen der Herstellung und des Einbaus von Asphaltsschichten ermöglicht werden, wodurch insbesondere kleine und mittlere Unternehmen wirtschaftliche Vorteile erzielen.

Grundlage der Arbeit bildet die Entwicklung eines geeigneten Berechnungsverfahrens, wonach aus den messtechnisch einfach zu bestimmenden akustischen Eigen-

schaften einer offenporigen Befestigung der zugängliche Hohlraumgehalt und die Schichtdicke der gleichen Befestigung numerisch ermittelt werden können.

Die Genauigkeit und Einsetzbarkeit des entwickelten Messverfahrens wurden umfassend überprüft. Hierfür fand ein von der Firma Microflown Technologies (Niederlande) für die Projektlaufzeit zur Verfügung gestellter Druck- und Schnelle-Sensor Anwendung.

Im Rahmen der Projektbearbeitung konnte ein bedingt einsetzbares Messverfahren entwickelt werden, dessen Weiterentwicklung jedoch unabdingbar ist. Eine Weiterführung des Berechnungsmodells erfordert zudem die Anpassung des Phänomenologischen Modells.

Dieses Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und das Deutsche Asphaltinstitut e.V. (DAI) unter der IGF-Vorhaben-Nr. 15700 BR gefördert.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.**

## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation .....	1
1.1	Wissenschaftlich – technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	1
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	3
2	Ergebnisse des Forschungsvorhabens.....	5
2.1	Ergebnisse Arbeitspaket A: Verfahrensentwicklung Berechnungsmodell .....	5
2.1.1	Herstellung von Marshall-Probekörpern.....	5
2.1.2	Messung akustischer Parameter im Kundtschen Rohr .....	8
2.1.3	Messung akustischer Parameter am Strömungswiderstandsmessplatz .....	12
2.1.4	Berechnungsverfahren.....	13
2.1.4.1	Phänomenologisches Modell nach Hamet .....	14
2.1.4.2	Zusammenhang zwischen Materialparametern und akustischen Eigenschaften .....	15
2.1.4.3	Zusammenhänge zwischen einzelnen Materialparametern .....	17
2.1.4.4	Verfahren zur Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts .....	21
2.1.5	Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit Wasser .....	24
2.1.5.1	Versuchsablauf .....	24
2.1.5.2	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.....	26
2.1.6	Vergleich der Ergebnisse aus dem Schätzverfahren und den Labormessungen .....	27
2.2	Ergebnisse Arbeitspaket B: Weiterentwicklung des in-situ- Messverfahrens zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von offenporigen Befestigungen auf der Basis des Druck-Schnelle-Sensors von Microflown Technologies.....	31
2.2.1	In-situ Messsysteme .....	31
2.2.1.1	in-situ Messsystem nach DIN ISO 13472-1.....	31
2.2.1.2	Microflown Sonde.....	31
2.2.1.3	Vergleich der Messsysteme .....	33
2.2.1.4	Fresnelzone - größte erfasste Fläche .....	34
2.2.2	Messtechnische Untersuchungen im Labor .....	36
2.2.2.1	Voruntersuchungen.....	36

2.2.3	Bestimmung des Schallabsorptionsgrads an Asphaltplatten .....	45
2.2.4	Vergleichende Untersuchungen an Bohrkernen im Kundtschen Rohr nach DIN EN ISO 10534-2.....	48
2.2.5	Messvorschrift für in-situ-Messungen .....	49
2.3	Ergebnisse Arbeitspaket C: Untersuchung der Temperaturabhängigkeit akustischer Eigenschaften .....	49
2.3.1	Messtechnische Untersuchung an Asphaltplatten .....	49
2.3.2	Direkte volumetrische Messung des zugänglichen Hohlraumgehalts .....	53
2.3.3	Vergleich der gewonnenen Daten des zugänglichen Hohlraumgehalts.....	54
2.3.4	Weiterentwicklung des Modells.....	55
2.4	Ergebnisse Arbeitspaket D: Bestätigung der Genauigkeit des Verfahrens an realen Probestrecken.....	57
2.4.1	Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts .....	57
2.4.1.1	Feld 3 – zweischichtiger offenporiger Asphalt .....	59
2.4.1.2	Feld 4 – zweischichtiger offenporiger Asphalt .....	63
2.4.1.3	Feld 11 – einschichtiger offenporiger Asphalt .....	66
2.4.1.4	Feld 12 – einschichtiger offenporiger Asphalt .....	69
2.4.2	Entnahme von Bohrkernen, Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts durch direkte volumetrische Messung.....	71
2.4.3	Bewertung der Ergebnisse.....	72
2.5	Arbeitspaket E: Bewertung, Interpretation, Zusammenfassung .....	73
2.5.1	Arbeitspaket A (vgl. Kapitel 2.1).....	73
2.5.2	Arbeitspaket B (vgl. Kapitel 2.2).....	73
2.5.3	Arbeitspaket C (vgl. Kapitel 2.3) .....	74
2.5.4	Arbeitspaket D (vgl. Kapitel 2.4) .....	75
3	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse.....	76
4	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen .....	77
5	Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse; erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	78
6	Literatur.....	79

7	Danksagung.....	83
	Anhang.....	84
A	Messvorschrift.....	84
B	Ergänzung Abschnitt 2.1.3 – Strömungsresistenz Marshall-Probekörper .....	96
C	Ergänzung Kapitel 2.2.3 – Schallabsorptionsgrad Flächenreduktion, Variante B.....	97
D	Ergänzung Kapitel 2.2.4 – Schallabsorptionsgrad, Vergleich Messsysteme.....	98
E	Ergänzung Kapitel 2.3.1 – Schallabsorptionsgrad, Einfluss Feuchtigkeit.....	99
F	Ergänzung Kapitel 2.4.1 – Wetterdaten .....	100
G	Ergänzung Kapitel 2.4.1 – Schallabsorptionsgrad, in-situ Messung .....	102
H	Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 3, untere Schicht.....	103
I	Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 3, obere Schicht.....	103
J	Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 11 .....	105
K	Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 12.....	105

# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Wissenschaftlich – technische und wirtschaftliche Problemstellung

Offenporige Asphalte werden in Deutschland unter anderem für Lärm mindernde Deckschichten sowie als Tragschichtmaterial für wasserdurchlässige Befestigungen eingesetzt. Des Weiteren werden diese Asphalte auf Grund ihres Lärmabsorptionsvermögens und der Verringerung des Airpumping-Effekts zur Reduzierung der Geräuschemission genutzt. Hierbei wird die vom Reifen zusammengepresste Luft in die zugänglichen Kanäle einer offenporigen Befestigung gedrückt und dadurch die Variation der Luftdichte, und folglich auch die Schallemission, drastisch verringert. Auf diese Weise wird eine Lärmreduktion von bis zu 10 dB erreicht.

Sowohl das Airpumping als auch das Lärmabsorptionsvermögen hängen sehr stark von dem während des Einbaus eines offenporigen Asphalttes erreichten zugänglichen Hohlraumgehalt ab. Der zugängliche Hohlraumgehalt wird in der Regel an aus der Asphaltdeckschicht entnommenen Bohrkernen bestimmt. Dieses Verfahren bringt jedoch einige Nachteile mit sich. So ist die Methode nicht zerstörungsfrei, der zugängliche Hohlraumgehalt kann nur exemplarisch an bestimmten Stellen, jedoch nicht flächendeckend und somit i.d.R. nicht mit statistischer Sicherheit bestimmt werden. Da der zugängliche Hohlraumgehalt erst nach dem Einbau an einer bereits erkalteten Schicht ermittelt werden kann, ist während der Bauausführung eine Einflussnahme auf die Verdichtung ausgeschlossen. Wird nachträglich festgestellt, dass die Verdichtung so unzureichend ist, dass die bereits fertige Schicht großflächig komplett erneuert werden muss, so ist dies in jedem Fall mit hohem Mehraufwand an Kosten, insbesondere hinsichtlich der Faktoren Zeit und Material, verbunden.

Die Entwicklung einer zerstörungsfreien Methode zur Bestimmung des Verdichtungsgrades unmittelbar nach dem Asphalteinbau ermöglicht es, in den Prozess der Verdichtung einzugreifen und diesen gezielt bei einem gewünschten zugänglichen Hohlraumgehalt bzw. Verdichtungsgrad zu beenden.

Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war zunächst die Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigem Asphalt. Das Verfahren soll sowohl zerstörungsfrei als auch unmittelbar nach

Asphalteinbau einsetzbar sein. Hierdurch soll eine verbesserte Qualitätskontrolle im Rahmen der Herstellung und des Einbaus von Asphaltsschichten ermöglicht werden, wodurch insbesondere kleine und mittlere Unternehmen wirtschaftliche Vorteile erzielen.

Grundlage der Arbeit bildet die Entwicklung eines geeigneten Berechnungsverfahrens, wonach aus dem messtechnisch einfach zu bestimmenden Schallfeldgrößen einer offenporigen Fahrbahnbefestigung der zugängliche Hohlraumgehalt und die Schichtdicke der gleichen Befestigung numerisch ermittelt werden können. Anwendung hierfür findet ein eigens für offenporige Fahrbahnbefestigungen entwickeltes phänomenologisches Modell [HAMET 1992]. Die Genauigkeit dieses Modells konnte bereits durch Vergleich von Berechnung und Messung an einer Anzahl von Proben bestätigt werden [HUEBELT 2003].

Zur Messung akustischer Eigenschaften offenporiger Fahrbahnen wurde in der Vergangenheit bereits ein Messgerät auf der Basis von [DIN ISO 13472-1 2004] entwickelt [HUEBELT 2002]. Dieses Messgerät arbeitet zerstörungsfrei und kann direkt vor Ort und während des Einbaus von offenporigen Asphalten eingesetzt werden. Grundlage des hierbei angewandten Messverfahrens ist die Beschallung des offenporigen Asphalts mit Hilfe eines Lautsprechers und die Bestimmung des von der Fahrbahnoberfläche reflektierten Schallfeldanteils mit Hilfe eines Mikrofons (Impuls-Echo-Methode). Nachteil des Messgerätes ist jedoch dessen aufwendige Handhabung.

Ein weiteres Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften basiert auf der Messung des Wechseldrucks und der Wechselschnelle [DE BREE 1996] unmittelbar über der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines Druck- und Schnellesensors [DE BREE 2003]. Dieser Sensor ist so klein konzipiert, dass dessen Anbringung in Nähe einer Walze durchaus denkbar ist. Bis zu Beginn der Projektbearbeitung wurde der Sensor bereits erfolgreich zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften herkömmlicher Absorber eingesetzt. Erfahrungen zur Messung akustischer Eigenschaften während des Einbaus offenporiger Asphalte existierten bis dahin jedoch noch nicht.

Darüber hinaus bestanden erste Erfahrungen bei der Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts anhand gemessener akustischer Eigenschaften. Die in diesem Zu-

sammenhang durchgeführten Untersuchungen fanden jedoch zunächst im Labor statt [HUEBELT 2005].

Eine besondere Herausforderung bei der Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts stellte die Änderung der Temperatur beim Erkalten des frisch eingebauten offenporigen Asphalts dar. Es war denkbar, dass sich die akustischen Eigenschaften des offenporigen Asphalts beim Erkalten drastisch ändern und somit der zugängliche Hohlraumgehalt unzureichend genau bestimmt wird. Aus diesem Grund wurde in einer Voruntersuchung vor Projektbeginn die Abhängigkeit der akustischen Eigenschaften von der Temperatur zunächst rechnerisch untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Änderung der Temperatur beim Erkalten des offenporigen Asphalts nur einen geringen Einfluss auf die akustischen Eigenschaften hat [HUEBELT 2005]. Dieses Ergebnis sollte im Rahmen der Forschungsarbeit durch gezielte Experimente an im Walzsektorverdichter hergestellten Platten überprüft werden.

## **1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Ziel der hier vorgestellten Forschungsarbeit war zunächst die Entwicklung eines Messverfahrens zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigem Asphalt. Das Verfahren sollte sowohl zerstörungsfrei als auch unmittelbar nach Asphalteinbau einsetzbar sein.

Im Folgenden wird das Prinzip eines zerstörungsfreien Verfahrens vorgestellt, welches auf dem Zusammenhang zwischen den Materialparametern einer offenporigen Asphaltsschicht, wie dem zugänglichen Hohlraumgehalt und dem Schallfeld über ihrer Oberfläche, basiert. Unter Anwendung eines geeigneten Messgerätes wurden zunächst verschiedene Schallfeldgrößen bestimmt und aus diesen im Anschluss der zugängliche Hohlraumgehalt berechnet. Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es direkt während des Einbaus einer Asphaltsschicht angewendet werden kann. Auf diese Weise kann der Verdichtungsprozess beendet werden, sobald der gewünschte Hohlraumgehalt erzielt ist.

In [DIN ISO 13472-1 2004] sind messtechnische Festlegungen zur Messung von Schallabsorptionseigenschaften von Fahrbahnoberflächen definiert. Allerdings sind diese vorrangig auf Messungen ausgerichtet, deren Ziel die Bestimmung akustischer Parameter im abgekühlten Zustand ist. Während des Einbaus einer Asphaltsschicht

gelten jedoch Messbedingungen, für welche die in der Norm vorgeschriebene Messausrüstung nicht geeignet ist. Innerhalb der hier vorgestellten Arbeit wurde deshalb ein anderes Messsystem verwendet und hinsichtlich seiner Einsatzfähigkeit unter diesen speziellen Messbedingungen untersucht. Hierfür wurden sowohl umfangreiche Voruntersuchungen unter Laborbedingungen als auch Testmessungen in der Praxis durchgeführt.

Aufgrund der Interdisziplinarität des hier zugrunde liegenden Forschungsprojektes erwies es sich als erforderlich, die im Antrag festgelegten Arbeiten auf mehrere Forschungsstellen und somit auch Bearbeiter aufzuteilen. So erforderte das Projekt verschiedene organisatorische, experimentelle und theoretische Tätigkeiten, die stets parallel stattfanden. Datenbasis für die Entwicklung und Validierung eines Verfahrens zur Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts stellten zunächst kontinuierlich durchgeführte experimentelle Untersuchungen dar. Dies beinhaltet vor allem das akustische Vermessen von im Rahmen des Projekts hergestellten Marshall-Probekörpern und Asphalt- und Basotectplatten, sowie Messungen an realen Versuchsstrecken.

Die Durchführung der Messungen an realen Probestrecken erforderte eine eingehende Prüfung der Eignung des entwickelten handgehaltenen Messsystems. Hierzu musste in umfassenden Tests geprüft werden, ob das Messgerät unter realen Bedingungen (hohe Temperaturen, laute Hintergrundgeräusche, Witterungsumstände) eingesetzt werden kann und wie es ggf. zu modifizieren ist. Damit verbunden war außerdem der konstruktive Entwurf der Messeinrichtung, sowie dessen Ausführung.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen musste aufgrund bereits vorhandener theoretischer Modelle ein Algorithmus entwickelt werden, der die Berechnung des Hohlraumgehalts aus den akustischen Daten ermöglicht. Ausgehend davon musste weiterhin eine Umkehrung des Modells entwickelt werden. Aufgrund dessen hoher Komplexität und Nichtlinearität waren zunächst verschiedene theoretische Ansätze zu verfolgen und auf ihre Eignung zu prüfen. Darüber hinaus war das einmal aufgefundene Verfahren anhand der experimentell gewonnenen Daten in mehreren Schritten in seiner Genauigkeit zu verbessern.

## 2 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

### 2.1 Ergebnisse Arbeitspaket A: Verfahrensentwicklung Berechnungsmodell

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines Verfahrens zur Berechnung der zugänglichen Hohlraumgehalte von offenporigen Asphalten anhand von Labormesswerten akustischer Eigenschaften. Hierfür wurden Marshall-Probekörper sowohl im Kundtchen Rohr nach [DIN EN ISO 10534-2] als auch am Strömungswiderstandsmessplatz nach [EN 29053] akustisch vermessen.

#### 2.1.1 Herstellung von Marshall-Probekörpern

Zur Herstellung von Marshall-Probekörpern aus offenporigem Asphalt und mit unterschiedlichem Hohlraumgehalt wurde ein offenporiges Asphaltmischgut (PA 8) mit einem hochpolymermodifizierten Bindemittel (PmB 40-100/65 H; Gesamtbindemittelgehalt: 6,2 Vol.-%) verwendet.

Tabelle 1: Korngrößenverteilung des zur Herstellung der Marshall-Probekörper verwendeten offenporigen Asphaltgemisches

Sieblochweite [mm]	Rückstand [M.-%]	Durchgang [M.-%]
16	0,00	100,00
11,2	0,00	100,00
8	7,30	92,70
5	85,30	7,40
2	2,20	5,20
0,71	0,20	5,00
0,25	0,00	5,00
0,09	0,40	4,60
0	4,60	0,00

Die graphische Darstellung der Korngrößenverteilung erfolgt in Abbildung 1.

Die Einstellung des Hohlraumgehalts von 30 Marshall-Probekörper (MPK) aus offenporigem Asphalt erfolgte durch gezielte Variation der Einwaage und der Anzahl der Verdichtungsschläge während der Probekörperherstellung. Folgende Kombinationen wurden gewählt:

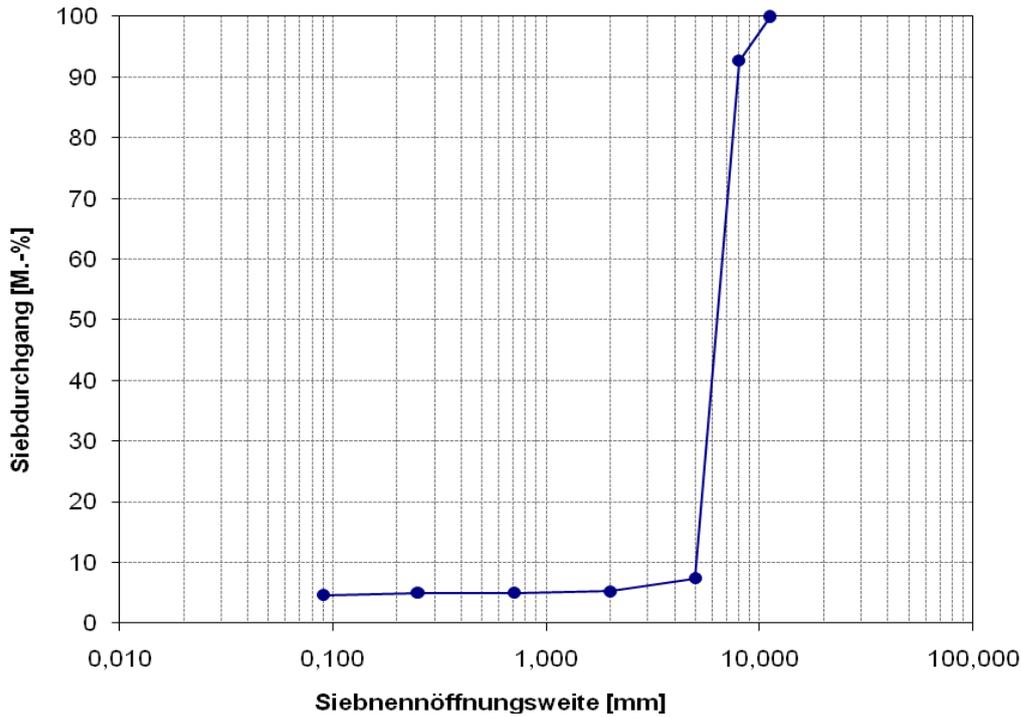


Abbildung 1: Korngrößenverteilung des verwendeten offenporigen Asphaltgemisches

Je Kombination wurden drei Marshall-Probekörper hergestellt. Im Rahmen der Herstellung von Probekörpern mit jeweils 50 Verdichtungsschlägen ergänzend 6 weitere Probekörper gefertigt, deren Einwaage nochmals geringfügig variiert wurde.

Tabelle 2: Variation des Hohlraumgehalts durch Änderung der Materialeinwaage und der Verdichtungsschläge zur gezielten Herstellung von Marshall-Probekörpern

Sollleinwaage [g]	Anzahl Verdichtungsschläge
885	20; 35
910	35; 50
935	35; 50
960	50; 65

Die tatsächlichen Probekörperabmessungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. In diesem Zusammenhang sei bemerkt, dass zum Einen der Verdichtungsgrad von der Dauer der Probekörperherstellung abhängig ist und zum Anderen die Verwendung von hochpolymer-modifiziertem Bitumen (PmB H) auf Grund dessen Klebkraft dazu führt, dass die Einwaage zweier Probekörper nicht exakt identisch eingestellt werden kann. Da außerdem die Probekörperhöhe (vergleichbar mit der Schichtdicke einer Asphaltdecke) einen Einfluss auf die jeweiligen akustischen Eigenschaften hat und

Tabelle 3: Variation des Hohlraumgehalts durch Änderung der Materialeinwaage und der Verdichtungsschläge zur gezielten Herstellung von Marshall-Probekörpern

Bezeichnung MPK	Anzahl Verdichtungsschläge	Gewicht trocken [g]	mittlerer Durchmesser [mm]	mittlere Höhe [mm]
V1-1	50	965,4	102,21	65,35
V1-2	50	1006,8	102,51	67,80
V1-3	50	1012,5	102,15	69,01
V1-4	50	921,4	102,35	63,10
V1-5	50	930,8	102,16	64,58
V1-6	50	891,5	101,96	61,99
V2-1	20	900,3	102,03	63,80
V2-2	20	903,3	102,38	63,50
V2-3	20	907,2	101,74	64,01
V3-1	35	864,3	102,23	59,65
V3-2	35	862,8	102,40	59,10
V3-3	35	852,3	102,19	59,45
V4-1	50	926,6	102,38	62,50
V4-2	50	925,5	102,10	62,45
V4-3	50	918,9	102,55	61,85
V5-1	65	924,1	102,24	61,84
V5-2	65	922,4	102,10	63,30
V5-3	65	942,1	102,14	63,38
V6-1	35	853,3	101,93	58,25
V6-2	35	838,4	102,46	57,50
V6-3	35	873,9	102,10	59,23
V7-1	35	903,7	102,40	62,98
V7-2	35	908,6	101,88	62,63
V7-3	35	910,1	102,48	62,80
V8-1	50	884,0	102,11	59,80
V8-2	50	891,8	102,30	59,35
V8-3	50	893,2	102,33	60,75
V9-1	50	943,2	102,03	62,98
V9-2	50	949,1	102,06	64,01
V9-3	50	950,2	102,13	65,99

es nur mit sehr hohem Versuchs- und Materialaufwand möglich ist, Probekörper gleicher Höhe und unterschiedlichem Hohlraumgehalt herzustellen, wurden Probekörper nur eines Gesteins bzw. Gemisches hergestellt. Auf diese Weise kann die Anzahl unbekannter nicht definierbarer Einflussgrößen minimiert werden.

## 2.1.2 Messung akustischer Parameter im Kundtschen Rohr

Die Bestimmung akustischer Eigenschaften im Kundtschen Rohr erfolgte auf Grundlage der [DIN EN ISO 10534-2]. Dabei kam das Zwei-Mikrofon-Verfahren zum Einsatz. Bei diesem Verfahren wird die zu untersuchende Probe am Ende eines Impedanzrohres platziert (vgl. Abbildung 2 und Abbildung 3). Als Schallquelle wird ein Lautsprecher eingesetzt, der ein Breitbandsignal erzeugt, welches sich in Form ebener Wellen im Impedanzrohr ausbreitet. Zwei vor der Probe positionierte Mikrofone messen den Schalldruck.

Die komplexen Schalldrücke einer einfallenden Welle  $\underline{p}_I$  bzw. einer reflektierenden Welle  $\underline{p}_R$  ergeben sich zu:

$$\underline{p}_I = \hat{p}_I \cdot e^{jk_0x} \quad (1)$$

und

$$\underline{p}_R = \hat{p}_I \cdot e^{-jk_0x} \quad (2)$$

mit der komplexen Wellenzahl  $k_0$  und der Bezugsebene  $x$ .

An den Mikrofonpositionen sind die Schalldrücke  $\underline{p}_1$  und  $\underline{p}_2$  folgendermaßen definiert:

$$\underline{p}_1 = \hat{p}_I \cdot e^{jk_0x_1} + \hat{p}_R \cdot e^{-jk_0x_1} \quad (3)$$

und

$$\underline{p}_2 = \hat{p}_I \cdot e^{jk_0x_2} + \hat{p}_R \cdot e^{-jk_0x_2} \quad (4)$$

Darin bezeichnen  $x_1$  und  $x_2$  die Abstände der Mikrofone vom Prüfling:

Die Übertragungsfunktionen der einfallenden Welle  $\underline{H}_I$  bzw. der reflektierten Welle  $\underline{H}_R$  setzen sich wie folgt zusammen:

$$\underline{H}_I = \frac{\underline{p}_{2I}}{\underline{p}_{1I}} \quad (5)$$

$$\underline{H}_R = \frac{\underline{p}_{2R}}{\underline{p}_{1R}} \quad (6)$$

Diese beiden komplexen Übertragungsfunktionen werden mit Hilfe des Mikrofonabstandes  $s$  bestimmt (vgl. [DIN EN ISO 10534-2] und Abbildung 2). Aus den Gleichungen (3) und (4) und mit  $\underline{p}_R = r\underline{p}_I$  wird die Übertragungsfunktion  $\underline{H}_{I2}$  des gesamten Schallfeldes ermittelt:

$$\underline{H}_{12} = \frac{\underline{p}_2}{\underline{p}_1} \quad (7)$$

Die komplexen akustischen Übertragungsfunktionen der beiden Mikrofonsignale stellen die Grundlage der Berechnung des komplexen Reflexionsfaktors, des Absorptionsgrades und des Impedanzverhältnisses des Prüflings dar.

Die Berechnung des Reflexionsfaktors  $\underline{r}$  erfolgt mit:

$$\underline{r} = \frac{\underline{H}_{12} - \underline{H}_I}{\underline{H}_R - \underline{H}_{12}} \cdot e^{2jk_0x_1} \quad (8)$$

Dabei sind  $k_0$  die Wellenzahl in Luft,  $x_1$  der Abstand zwischen Probekörper und dem am weitesten entfernten Mikrofon.  $\underline{H}_{12}$  stellt die Übertragungsfunktion beider Mikrofonsignale dar.  $\underline{H}_I$  und  $\underline{H}_R$  beschreiben die Übertragungsfunktionen von einfallender und reflektierter Schallwelle, die mit Hilfe des Mikrofonabstands  $s$  bestimmt werden.

Das spezifische akustische Impedanzverhältnis  $\underline{Z}/Z_0$  und der Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  bei senkrechtem Schalleinfall lassen sich anschließend über

$$\frac{\underline{Z}}{Z_0} = \frac{1 + \underline{r}}{1 - \underline{r}} \quad (9)$$

und

$$\alpha = 1 - |\underline{r}|^2 \quad (10)$$

berechnen.

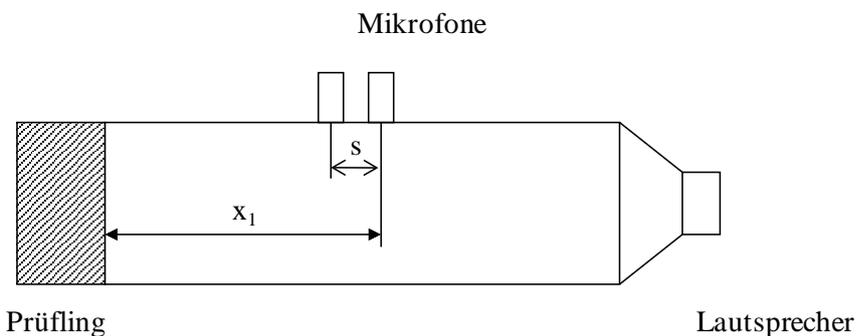


Abbildung 2: Prinzipische Skizze Impedanzmessrohr

Für die messtechnischen Untersuchungen wurden folgende Geräte eingesetzt:

- Two-microphone Impedance Measurement Tube Type 4206 von Brüel & Kjaer
- Application Software BZ 5050
- Dual Channel Real-time Frequency Analyzer Type 2144
- Verstärker Typ 2706 von Brüel & Kjaer
- Rauschgenerator WB 1314 von Brüel & Kjaer
- 2 Kondensatormikrofone Typ 4187

Abbildung 2 zeigt eine Prinzipskizze des Impedanzmessrohres und Abbildung 3 den tatsächlich verwendeten Messaufbau zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrads sowie weiterer akustischer Eigenschaften im Impedanzrohr.



Abbildung 3: Messaufbau zur Bestimmung akustischer Eigenschaften im Impedanzmessrohr

Um eine Schallausbreitung an der Probe vorbei zu verhindern, wurden die 30 Marshall-Probekörper akustisch dicht im Impedanzrohr positioniert. Dabei kam sowohl Knetmasse als auch Papier zum Einsatz. Zur statistischen Absicherung erfolgten je Probekörper drei Einzelmessungen, welche nur geringfügige Abweichungen untereinander aufwiesen. Zur Verdeutlichung sind nachfolgend in Abbildung 4 ausgewählte Einzelmessergebnisse zum Schallabsorptionsgrad für den Probekörper V5-3 dargestellt, welcher mit einer Einwaage von 942,1 g und mittels Verdichtung von 65 Schlägen je Deckfläche hergestellt wurde.

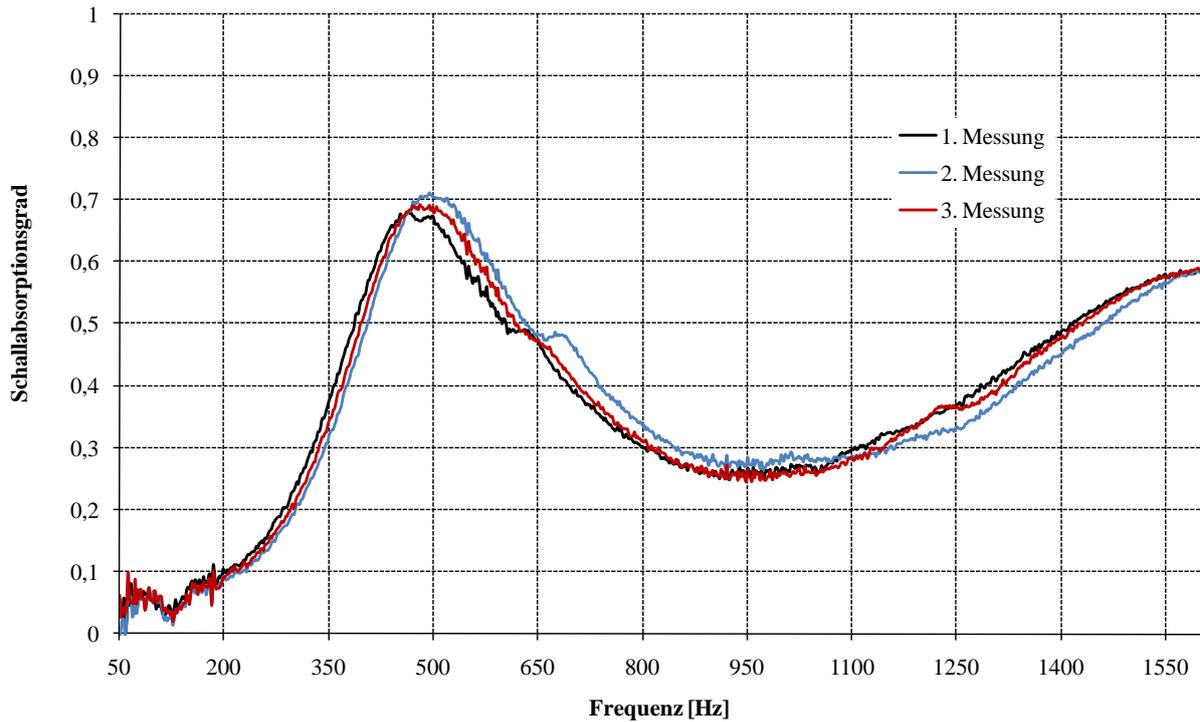


Abbildung 4: Dreifachbestimmung des Schallabsorptionsgrades im Kundtschen Rohr des Probekörpers V5-3 (Einwaage von 942,1 g und Verdichtung mittels 65 Schlägen je Deckfläche)

In Abbildung 5 wird zunächst eine Auswahl der gemessenen Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit von der Anzahl der bei der Herstellung verwendeten Verdichtungs-

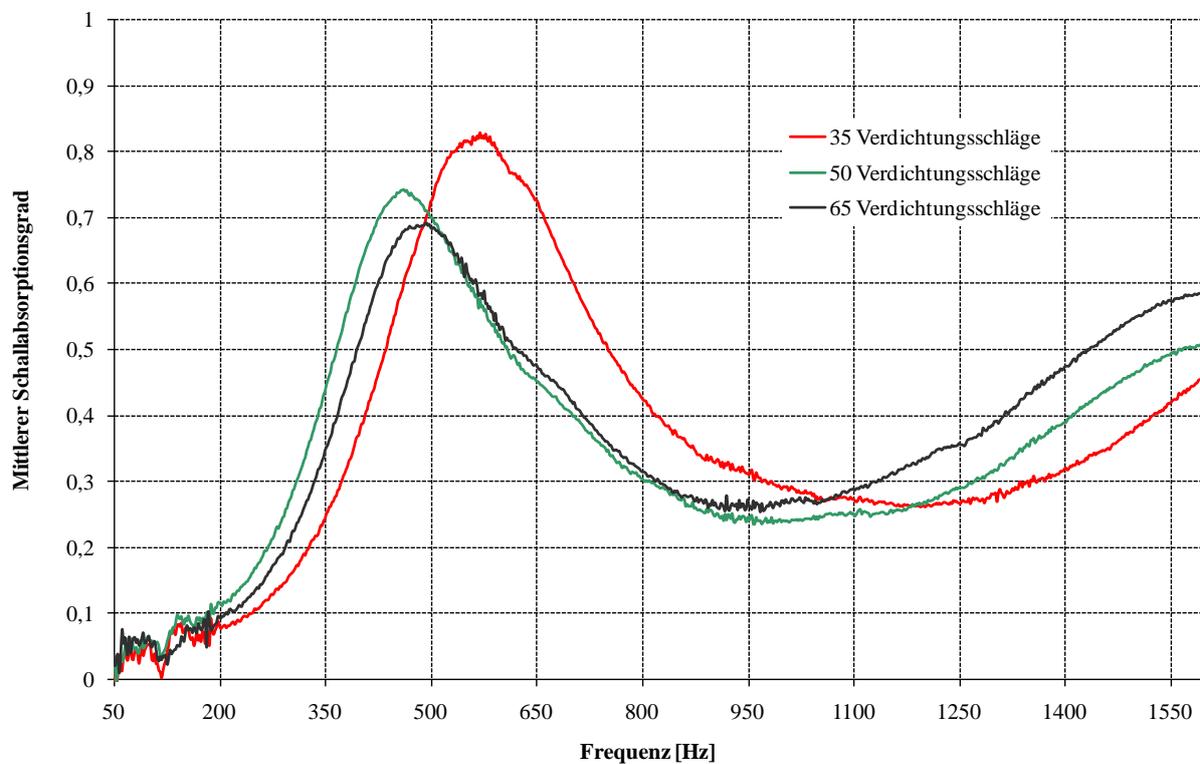


Abbildung 5: Mittlerer Schallabsorptionsgrad verschiedener Probekörper offenporigen Asphalts in Abhängigkeit der Anzahl der Verdichtungsschläge, ermittelt im Kundtschen Rohr

schläge zusammengefasst. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der Ergebnisse über drei Einzelmessungen. Es kann bestätigt werden, dass mit steigender Anzahl der Verdichtungsschläge, unter der Annahme verhältnismäßig geringer Masse-schwankungen, der Schallabsorptionsgrad der Probekörper aus offenporigem Asphalt sinkt.

### 2.1.3 Messung akustischer Parameter am Strömungswiderstandsmessplatz

Die messtechnischen Untersuchungen am Strömungswiderstandsmessplatz zur Bestimmung des längenbezogenen Strömungswiderstands erfolgten nach dem in [EN 29053] beschriebenen Luftgleichstromverfahren. Sie wurden von der Akustikforschung Dresden GmbH durchgeführt.

Bei diesem Verfahren wird eine poröse Probe akustisch dicht in ein Messgefäß eingepasst und von einer gerichteten Luftströmung durchströmt. Die auftretende Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen Vorder- und Rückseite des Probekörpers und der durch diesen hindurchtretende Volumenstrom  $q_v$  werden gemessen. Der längenbezogene Strömungswiderstand (Strömungsresistenz) resultiert anschließend aus:

$$\Xi = \frac{\Delta p}{q_v} \frac{A}{d}. \quad (11)$$

Hierbei steht  $A$  für die Querschnittsfläche des Probekörpers und  $d$  für dessen Ausdehnung in Durchströmungsrichtung. In Abbildung 6 ist der zur Bestimmung der Strömungsresistenz verwendete Messaufbau dargestellt.



Abbildung 6: Messaufbau zur Bestimmung der Strömungsresistenz

Die Ergebnisse der Strömungsresistenz für eine Auswahl der hergestellten Marshall-Probekörper sind in Abbildung 7 dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei Betrachtung

derjenigen Marshall-Probekörper mit annähernd gleicher Einwaage bei höherer Anzahl an Verdichtungsschlägen erwartungsgemäß eine höhere Strömungsresistenz zu verzeichnen ist. Weitere Ergebnisdarstellungen befinden sich in Anhang B.

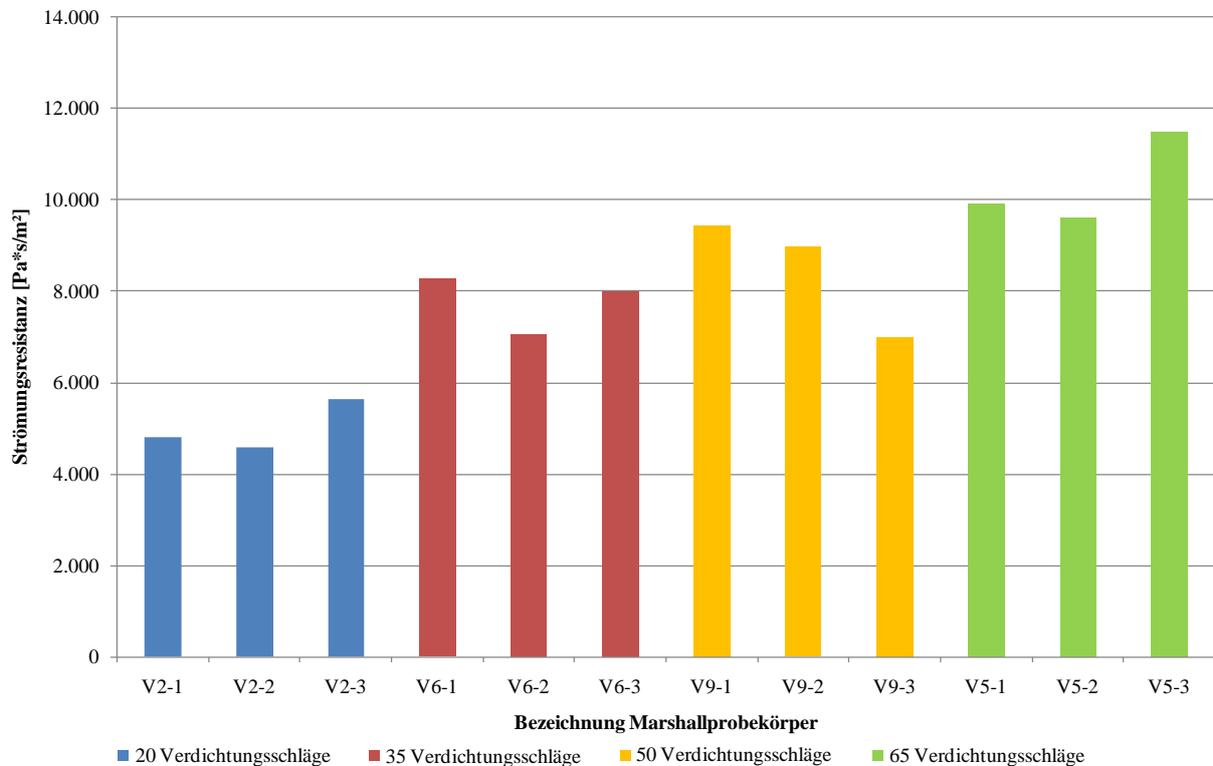


Abbildung 7: Strömungsresistenz der Marshall-Probekörper der Gruppen V2 und V6 (Materialsolleinwaage 885 g) bzw. V9 und V5 (Materialsolleinwaage 960 g) bei unterschiedlicher Anzahl an Verdichtungsschlägen

### 2.1.4 Berechnungsverfahren

Um die Materialparameter eines offenporigen Asphalts, insbesondere die Porosität, aus akustisch gemessenen Variablen ermitteln zu können, müssen zunächst die einzelnen Beziehungen zwischen den Schallfeldgrößen und den Materialparametern

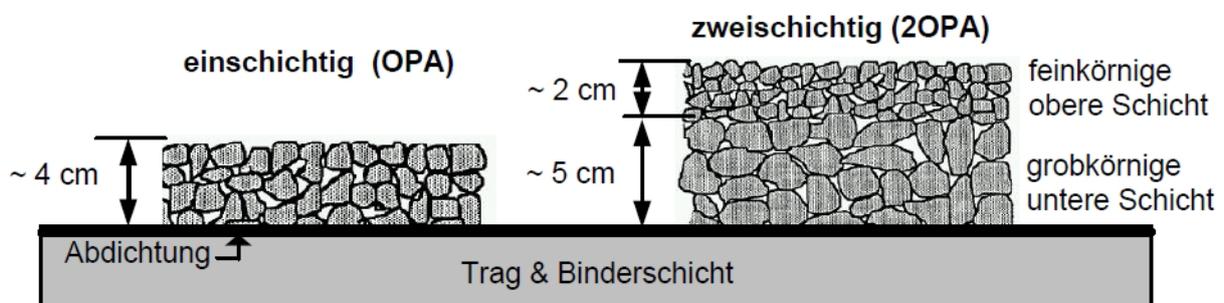


Abbildung 8: Beispiele Aufbau offenporiger Asphalte [INGOLSTADT 2006]

bekannt sein. Aufgrund ihrer Struktur (vgl. Abbildung 8) lassen sich offenporige Asphalte als geschichtete homogene poröse Absorber betrachten.

#### 2.1.4.1 Phänomenologisches Modell nach Hamet

Für poröse Absorber eignet sich das Modell nach Hamet ([HAMET 1992], [HAMET 1993]) besonders gut, um den gesuchten Zusammenhang zu beschreiben. In dem Modell wird die poröse Struktur als verlustbehaftetes Fluid interpretiert, worunter im Folgenden ein homogenes schallführendes Medium verstanden wird, welches einzig die Ausbreitung von Longitudinalwellen zulässt und in dem ein dissipativer Energieumsatz von Schall in Wärmeenergie erfolgt.

Bei hohen Frequenzen lässt sich auch Luft als verlustbehaftetes Fluid beschreiben. Im Bereich tiefer bis mittlerer Frequenzen sowie bei kurzen Abständen zwischen Schallquelle und -empfänger sind die bei der Schallausbreitung in Luft zu beobachtenden Verluste jedoch gering. Aus diesem Grund wird in den folgenden Betrachtungen die Luft näherungsweise als verlustloses Fluid betrachtet. Für eine spätere Anwendung ist zu beachten, dass die Grenzen des Modells eingehalten werden müssen, insbesondere wenn Messungen bei hohen Frequenzen erfolgen, bei denen die Verluste der Luft nicht mehr vernachlässigt werden können.

Für ein verlustfreies Fluid sind bei ebenen Wellen die Wellenzahl  $k_0$  und die Impedanz  $Z_0$  reell:

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} \quad (12)$$

$$Z_0 = \rho_0 c_0. \quad (13)$$

Die Ausführungen in diesem Abschnitt folgen im Wesentlichen [HUEBELT u. a. 2001] sowie den dort angegebenen Referenzen.

Das Schallfeld der ebenen Welle im verlustbehafteten Fluid lässt sich eindeutig mit Hilfe eines Kennwertpaares komplexwertiger Größen beschreiben. Im Folgenden werden dafür die Kennimpedanz  $\underline{Z}_A$  und die Wellenzahl  $\underline{k}_A$  der Schallwelle herangezogen, die anhand der Eigenschaften des Fluids berechenbar sind.

Da die Beschallung der untersuchten Asphalte und Probekörper senkrecht erfolgte, werden in den theoretischen Betrachtungen als Randbedingung ebene Wellen angenommen [HUEBELT u. a. 2001].

#### 2.1.4.2 Zusammenhang zwischen Materialparametern und akustischen Eigenschaften

##### *Absorbermodell*

Die Nachbildung der inhomogenen mikroskopischen Struktur eines porösen Absorbers ist ein aufwendiger Prozess, der bedingt vereinfacht werden kann. Da die Strukturgrößen der untersuchten Absorber (i.d.R. Korngrößendurchmesser  $\leq 11$  mm) sehr klein gegenüber den im betrachteten Frequenzbereich zu beobachtenden Schallwellenlängen (ca. 10 cm – 50 cm) sind, besteht die Möglichkeit, den porösen Absorber als homogenes verlustbehaftetes Medium zu betrachten.

Zur Vorhersage der Kennwerte (Kennimpedanz  $Z_A$  und die Wellenzahl  $k_A$ ) aus den Parametern der Absorberstruktur existieren verschiedene Theorien. Eine Gruppe dieser Theorien wird unter dem Begriff Struktur-Theorien zusammengefasst. Grundlage der Modelle dieser Art ist die Auffassung eines porösen Absorbers als regelmäßige Struktur, z.B. eine Anordnung parallel verlaufender Kapillaren. Den Angaben in [HUEBELT 2006] folgend, erweist sich ein Modell dieser Gruppe, das „Mikrostrukturmodell“ nach zur Modellierung von offenporigen Fahrbahnbelägen als besonders geeignet. In [HUEBELT 2003] werden die Ergebnisse der Vorhersagen des „Mikrostrukturmodells“ den Berechnungsergebnissen eines von [HAMET 1992] auf phänomenologischer Basis entwickelten Modells zur Beschreibung von offenporigen Asphalten gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die Anwendung der beiden Theorien zur Beschreibung des akustischen Verhaltens von offenporigen Asphalten zu gleichwertigen Ergebnissen führt. Das „Phänomenologische Modell“ nach HAMET benötigt zur Berechnung jedoch nur drei Eingangsparameter, die durch direkte Messung an der Struktur gewonnen werden können. Zur Vorhersage der akustischen Eigenschaften von offenporigen Fahrbahnbelägen ist demzufolge der Einsatz des „Phänomenologischen Modells“ besonders geeignet.

Das Modell nach HAMET wird deshalb der Berechnung der im vorliegenden Projekt erforderlichen Parameter zugrunde gelegt.

Zur Berücksichtigung der viskosen und thermischen Zusammenhänge werden die Funktionen

$$f_{\mu} = \frac{\sigma \Xi}{\omega \rho_0 \tau^2} \quad (14)$$

bzw.

$$f_g = \frac{\Xi}{\omega \rho_0 Pr} \quad (15)$$

eingeführt. In den beiden Funktionen sind die Eingangparameter des Modells integriert. Zu den drei Absorberparametern zählt die offene Porosität  $\sigma$ , die Strömungsresistenz  $\Xi$  und die Tortuosität  $\tau$ . Mit  $Pr$  wird die „Prandtl-Zahl“ und mit  $\rho_0$  die Dichte des schallführenden Fluids bei Normaldruck  $p_0$  bezeichnet. Für die komplexe dynamische Dichte  $\underline{\rho}_A$  und die komplexe dynamische Kompressibilität  $\underline{K}_A$  gilt:

$$\underline{\rho}_A(\omega) = \rho_0 \tau^2 (1 - if_{\mu}) \quad (16)$$

und

$$\underline{K}_A(\omega) = \kappa \rho_0 \frac{1 - if_g}{1 - if_g \kappa}. \quad (17)$$

Der Zusammenhang zwischen dem in dieser Arbeit gewählten Absorberkennwertepaar  $(\underline{k}_A, \underline{Z}_A)$  und dem von HAMET verwendeten  $(\underline{\rho}_A, \underline{K}_A)$  lautet nach [HUEBELT 2003]:

$$\underline{k}_A = \omega \sqrt{\frac{\underline{\rho}_A}{\underline{K}_A}} \quad (18)$$

$$\underline{Z}_A = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\underline{\rho}_A \underline{K}_A}. \quad (19)$$

Diese Größen entsprechen  $Z_i$  und  $k_i$  in Gleichung (28) und (29).

#### *Absorberparameter*

Die offene Porosität  $\sigma$  ist als Verhältnis aus zugänglichem Porenvolumen  $V_p$  und Gesamtvolumen  $V_g$  definiert:

$$\sigma = \frac{V_p}{V_g}. \quad (20)$$

Die labortechnische Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts  $V_p$  erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes mittels Wasser in Anlehnung an [ALP A-StB] und gemäß [LERCH 1997].

Die Strömungsresistanz  $\Xi$  ist, wie in Gleichung (11) angegeben, definiert und wird im laminaren Luftstrom gemäß Norm [EN 29053] gemessen (vgl. Abschnitt 2.1.3)

Nach [CARMAN 1937] gilt für die hydraulische Tortuosität

$$\tau = \frac{l_w}{l_{min}}. \quad (21)$$

Mittels der hydraulischen Tortuosität wird die „Impuls-Dissipation“ der Schallwelle infolge der ständigen Richtungswechsel der schwingenden Luftteilchen berücksichtigt. Diese Richtungswechsel werden durch Bestandteile des Absorberskeletts erzwungen, die sich als Hindernis in Ausbreitungsrichtung der Luftteilchen befinden. Die Änderung des Weges der Teilchen kann auch als „Windung“ der Porenkanäle innerhalb einer porösen Struktur interpretiert werden. Bei Strukturen mit größeren Skelettbestandteilen, wie z.B. bei offenporigen Asphalten (i.d.R. Korngrößendurchmesser  $\leq 11$  mm), ist die Richtungsänderung zu berücksichtigen. Die effektive Länge eines gewundenen Porenkanals wird mit  $l_w$  und die Länge des geraden Kanals ohne Windungen mit  $l_{min}$  bezeichnet.

#### 2.1.4.3 Zusammenhänge zwischen einzelnen Materialparametern

Im Rahmen der Entwicklung des Berechnungsverfahrens konnte auf eine Datenbank zurückgegriffen werden, die im Rahmen eines vorangegangenen Forschungsvorhabens entstand. Die einbezogene Datenbank beinhaltet verschiedene Angaben zu 250 Marshall-Probekörpern. Theoretische Betrachtungen zu den Parametern der 250 Marshall-Probekörper ergaben statistische Zusammenhänge zwischen den Parametern der Probekörperstruktur, z.B. der Korngrößenverteilung, und den einzelnen Absorberparametern, siehe Abbildung 9.

Den Ergebnissen der Untersuchungen in [SARRADJ 2004] und [GERRETSEN 1997] zufolge lässt sich der Zusammenhang zwischen Strömungsresistanz und Porosität wie folgt modellieren:

$$\Xi = \frac{\mu}{C} \frac{1}{(\sigma')^{A_s}} \frac{1}{D^2}. \quad (22)$$

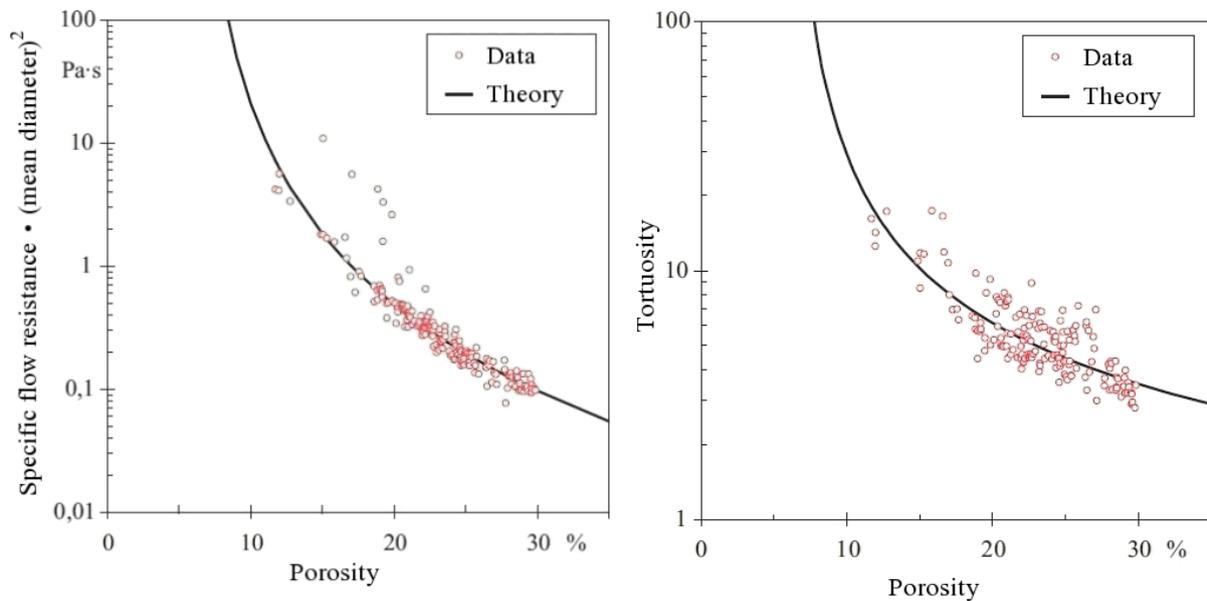


Abbildung 9: Streudiagramme für Porosität und Strömungsresistenz \* (mittlerer Korndurchmesser)<sup>2</sup> (links) sowie Porosität und Tortuosität (rechts), basierend auf Messwerten von 250 Marshall-Probekörpern. Die durchgängig eingezeichneten theoretisch ermittelten Graphen resultieren aus den Gleichungen (22) bzw. (25) mit den im Text angegebenen Parametern [SARRADJ 2004].

Das Verhältnis aus  $\mu$  und  $C$  wird mit  $\mu/C = 0,028 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  und der Exponent  $A_s$  mit  $A_s = 3$  als konstant angenommen. Unterhalb der Durchströmungsschwelle  $\sigma_p$  [MAVKO AND NUR 1997] kommt es zum Verschluss der Porenkanäle, es existiert kein zugänglicher Hohlraumgehalt. Eine Durchströmung des porösen Materials ist dadurch unmöglich. Die auf diese Weise modifizierte Porosität  $\sigma'$  berechnet sich nach:

$$\sigma' = \frac{\sigma - \sigma_p}{1 - \sigma_p} \quad (23)$$

Der mittlere Durchmesser  $\bar{D}$  ist aus der Korngrößenverteilung zu ermitteln. Er stellt einen mit den Masseanteilen  $y_i$  gewichteten Mittelwert der maximalen Durchmesser  $D_{\max,i}$  einer Kornklasse  $i$  dar [HUEBELT 2006].

$$\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i D_{\max,i} \quad (24)$$

Gemäß [SARRADJ 2004] gilt für die Tortuosität:

$$\tau = \sigma(\sigma')^m \quad (25)$$

Die Auswertung der Kennwerte der Marshall-Probekörper der Datenbank ergibt für den Exponent  $m = 1,6$ . Die Durchströmungsschwelle kann mit  $\sigma_p = 0,06$  angenommen werden.

Ein- bzw. zweischichtige offenporige Strassenbefestigungen lassen sich als ein- bzw. zweischichtige Absorberschichten modellieren, über denen sich eine unendlich ausgedehnte Luftschicht befindet.

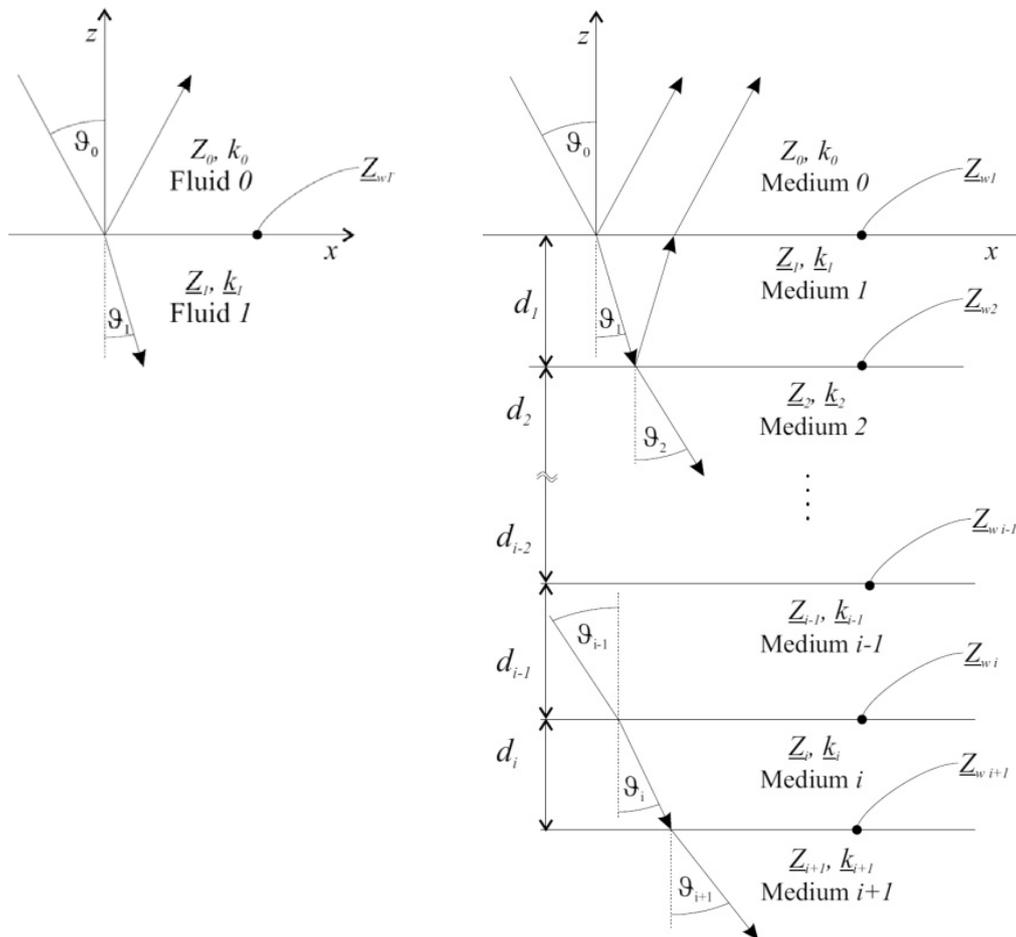


Abbildung 10: Ebene Welle an der Grenzfläche zweier Fluide (links) bzw. mehrerer Schichten (rechts), aus [HUEBELT 2006]

Um die notwendigen Kennwerte eines Asphalttes berechnen zu können, muss die Wandimpedanz der Grenzfläche Luft/Asphalt (bzw. aus ihr abgeleitete Größen) in Abhängigkeit der Frequenz gemessen werden. Allgemein ist die Impedanz  $\underline{Z}$  als Verhältnis von Schalldruck  $\underline{p}$  und -schnelle  $\underline{v}$  in Richtung der Flächennormalen definiert:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{p}}{\underline{v}}. \quad (26)$$

Für die Wandimpedanz an der Stelle  $z = 0$  gilt somit:

$$\underline{Z}_w = -\frac{\underline{p}}{\underline{v}} \Big|_{z=0}. \quad (27)$$

Das Vorzeichen richtet sich nach der Definition des Richtungssinns der  $z$ -Achse.

Für die Wandimpedanz  $\underline{Z}_{W_i}$  einer beliebigen Schicht  $i$  gilt:

$$\underline{Z}_{W_i} = \underline{Z}_i \frac{\underline{Z}_{W_{i+1}} + i \frac{\underline{Z}_i}{\cos \underline{\vartheta}_i} \tan \underline{\vartheta}_i}{\frac{\underline{Z}_i}{\cos \underline{\vartheta}_i} + i \underline{Z}_{W_{i+1}} \tan \underline{\vartheta}_i}. \quad (28)$$

Hierbei ist  $\underline{Z}_i$  die Impedanz der  $i$ -ten Schicht und

$$\underline{\vartheta}_i = \underline{k}_i d_i \cos \underline{\vartheta}_{i-1}. \quad (29)$$

Diese Rekursionsformel ermöglicht die Darstellung einer Wandimpedanz  $\underline{Z}_{W_i}$  durch die Wandimpedanz der in Schallausbreitungsrichtung folgenden Grenzfläche  $\underline{Z}_{W_{i+1}}$ . Die Wandimpedanz  $\underline{Z}_{W_i}$  der Grenzfläche zwischen Luft und geschichtetem Absorber lässt sich folglich als Funktion von Wandimpedanzen der nachfolgenden Grenzflächen berechnen. Für die Wandimpedanz  $\underline{Z}_{W_s}$  einer als nahezu schallhart angenommenen Grenzfläche zweier Medien an der Stelle  $z = d_s$  gilt mit der Definitionsgleichung (27) und der Randbedingung  $v|_{z=d_s} = 0$ :

$$\underline{Z}_{W_s} \rightarrow \infty. \quad (30)$$

Gleichung (28) reduziert sich in diesem Fall auf

$$\lim_{\underline{Z}_{W_{i+1}} \rightarrow \infty} \underline{Z}_{W_i} = -i \underline{Z}_i \cot \left( \underline{k}_{i-1} d_i \sqrt{\underline{n}_i^2 - \sin^2 \underline{\vartheta}_{i-1}} \right), \quad (31)$$

mit

$$\underline{n}_i = \frac{\underline{k}_i}{\underline{k}_{i-1}}. \quad (32)$$

Können die einzelnen Absorberschichten als lokal reagierend aufgefasst werden, so gilt:

$$n_i \gg 1 \quad \text{und} \quad \cos |\vartheta_i| \approx 1$$

und man erhält:

$$\underline{Z}_{W_i} = -i \underline{Z}_i \cot(\underline{k}_i d_i). \quad (33)$$

#### 2.1.4.4 Verfahren zur Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts

Mit den oben dargelegten Beziehungen gilt:

$$\underline{Z}_S(\omega) = -i\underline{Z}_A(\sigma, \tau, \Xi, \omega) \cdot \cot(\underline{k}_A(\sigma, \tau, \Xi, \omega) \cdot d) \quad (34)$$

Sowohl die Impedanz der Schicht  $\underline{Z}_A$  als auch der Wellenvektor  $\underline{k}_A$  sind auf die oben angegebene komplexe Weise von den genannten Materialparametern abhängig. Die Tortuosität und der Strömungswiderstand können mit Hilfe der dargestellten statistischen Zusammenhänge durch die Porosität ausgedrückt werden:

$$\underline{Z}_W(\omega) = -i\underline{Z}_A(\sigma, \tau(\sigma), \Xi(\sigma), \omega) \cdot \cot(\underline{k}_A(\sigma, \tau(\sigma), \Xi(\sigma), \omega) \cdot d) \quad (35)$$

Um die Porosität zu ermitteln, gilt es, Gleichung (35) nach  $\sigma$  umzustellen. Aufgrund der komplizierten Abhängigkeiten lässt sich für  $\sigma$  keine eindeutige analytische Lösung der Form  $\sigma_p = f(\underline{Z}_W)$  angeben. Aus diesem Grund werden die Materialparameter

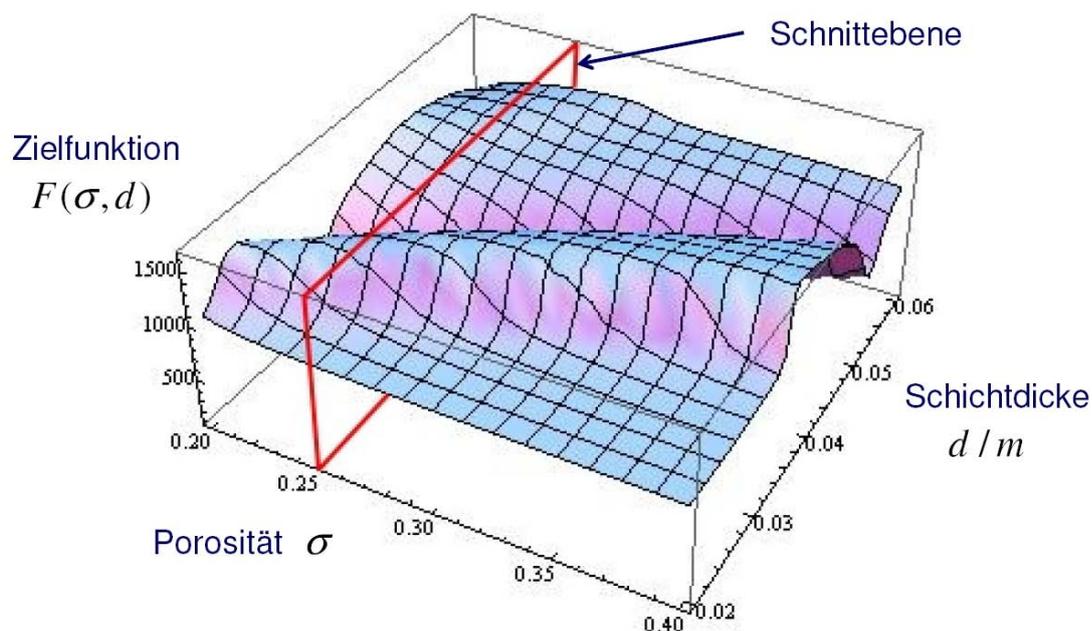


Abbildung 11: Darstellung der Zielfunktion in Abhängigkeit von Porosität und Schichtdicke

durch eine Anpassung des Phänomenologischen Modells an die gemessenen Impedanzkurven bestimmt. Die Lösungsalgorithmen für die dabei verwendeten Least-Square-Schätzverfahren sind im Allgemeinen Iterationsverfahren, welche die Abweichungen zwischen Modellgleichung und Messdaten mittels einer geeigneten Zielfunktion quantifizieren.

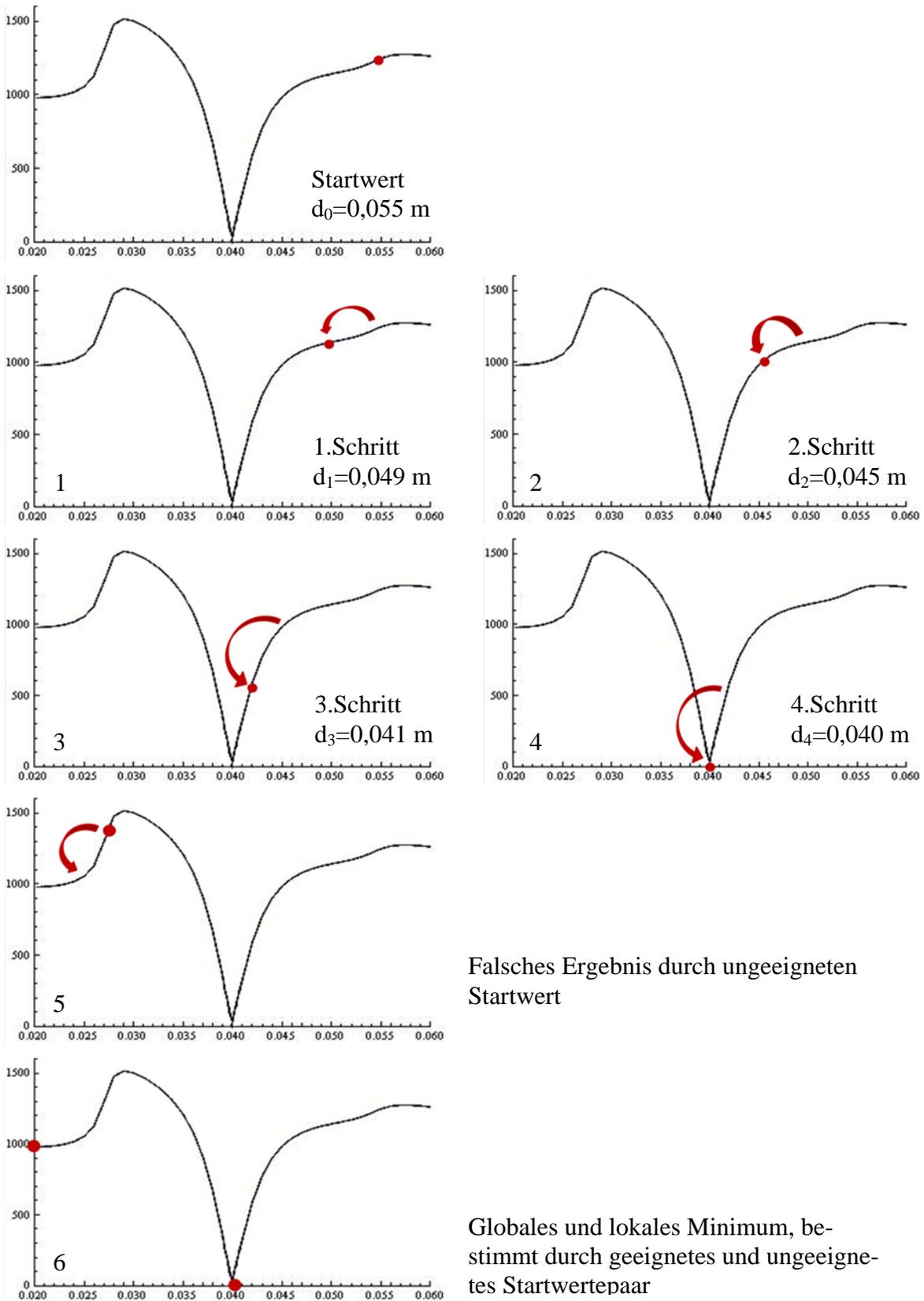


Abbildung 12: Beispiel Iterationsverlauf zur Bestimmung der optimalen Parameter; dargestellte Ebene entspricht der Schnittebene aus Abbildung 11

Dabei wird ausgehend von vorzugebenden Startwerten in mehreren Schritten versucht, ein lokales Minimum dieser Zielfunktion zu erreichen (vgl. Abbildung 12).

$$F(\sigma, d) := \sum_{n=1}^N \left| f(\underline{Z}_W^{mess}(\omega_n)) - f(\underline{Z}_W^{theor.}(\sigma, d, \omega_n)) \right|^2 \rightarrow \min \quad (36)$$

Entscheidend für die Berechnung der akustischen Parameter eines Absorbers sind die Genauigkeit des zugrundeliegenden Modells, die Auswahl einer geeigneten Zielfunktion und die Wahl der Startwerte. Auf die Genauigkeit wird in Abschnitt 2.1.6 und 2.2.4 näher eingegangen.

Mit Hilfe der in Abschnitt 2.2.1.2 beschriebenen PU-Sonde kann die komplexe Wandimpedanz  $\underline{Z}_W$  gemessen werden. Die Zielfunktion muss somit eine Funktion von  $\underline{Z}_W$  sein. Untersuchungen zeigten, dass es sich im vorliegenden Fall als besonders günstig erweist, die Zielfunktion in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad  $\alpha$  zu formulieren.

Die zweite Schwierigkeit bei der Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts aus der gemessenen Wandimpedanz stellt die Wahl der Startwerte dar. Diese sollten innerhalb realistischer Intervalle der Materialparameter gewählt werden. Die Materialparameter Porosität und Schichtdicke sind in der Praxis begrenzt. So können offeneporige Asphalte zu Beginn des Einbaus einen Hohlraumgehalt von beispielsweise 40 Vol.-% aufweisen. Der Hohlraumgehalt am Ende des sich anschließenden Verdichtungsprozesses liegt i. d. R. über 20 Vol.-%. Des Weiteren ist für eine Zieldicke von 3 cm beispielsweise vor Beginn der Verdichtung eine Ausgangsdicke von bis zu 5 cm realistisch. Die zu verwendenden Startwerte für  $\{\alpha, d\}$  sollten demnach vorzugsweise in den Intervallen [20 Vol.-%, 40 Vol.-%] und [3 cm, 5 cm] liegen. Betrachtet man für jedes Parameterpaar  $\{\alpha, d\}$  im jeweiligen Gültigkeitsbereich die Menge  $S_0(\{\sigma, d\})$  von Paaren  $\{\sigma_0, d_0\}$ , die als Startwertpaare geeignet sind, so ist die Schnittmenge aller dieser Mengen an Startwertpaaren leer:

$$\bigcap_{(\sigma, d) \in [20 \text{ Vol.-%}, 40 \text{ Vol.-%}] \times [3 \text{ cm}, 5 \text{ cm}]} S_0(\{\sigma, d\}) = \emptyset \quad (37)$$

Aus diesem Grund werden aus dem Parameterbereich [20 Vol.-%, 40 Vol.-%] x [3 cm, 5 cm] zunächst eine größere Anzahl verschiedener Wertepaare als Startwertpaare eingesetzt. Anschließend wird von allen als Resultat erhaltenen Wertepaaren die Zielfunktion berechnet. Das Schätzwertpaar  $\{\sigma, d\}$ , für welches diese den kleins-

ten Wert aufweist, wird als wahres Paar des zugänglichen Hohlraumgehalts  $\sigma$  und der Dicke  $d$  angesehen<sup>1</sup>.

Die messtechnischen Voruntersuchungen (vgl. Abschnitt 2.1) zeigen, dass der Frequenzbereich von etwa 500 Hz bis 3.000 Hz gut reproduzierbare Messwerte liefert, so dass die weiteren Untersuchungen, soweit möglich, in diesem Frequenzintervall durchgeführt wurden.

Die Implementation erfolgte mittels Mathematica 6.0.

### **2.1.5 Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit Wasser**

Zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit Hilfe von Wasser wurde das von Tappert und Weiland in [TAPPERT 1989] beschriebene Verfahren durch Lerch ([LERCH 1997]) weiterentwickelt. Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde dieses Verfahren, angelehnt an [ALP A-StB], besonders hinsichtlich Genauigkeit und Verbesserungspotential kritisch betrachtet.

#### 2.1.5.1 Versuchsablauf

Bei verwendetem Verfahren wird ein Probekörper auf drei Stifte, verankert im Behälterboden eines verschließbaren Kunststoffzylinders, aufgelagert. Über einen Hahn, der am Boden angeordnet ist, erfolgt die Wasserzuführung. Zur Evakuierung des Behälters ist der Behälterdeckel aus Plexiglas ebenfalls mit einem Hahn versehen, welcher zum Anschluss einer Vakuumpumpe dient. Die Abdichtung des Kunststoffzylinders erfolgt mit einer entsprechenden Dichtung. Um eine exakte Wasserfüllung zu gewährleisten, ist sowohl im Behälterboden als auch im Deckel eine Messspitze angebracht. Die Verwendung zweier Messspitzen hat den Vorteil, dass sich das maßgebende Volumen exakt aus geometrischen Messwerten bestimmen lässt. Dabei wird das Wasservolumen über eine Wägung unter Berücksichtigung des Tabellenwertes der Dichte von Wasser bei einer bestimmten Temperatur ermittelt.

Hierbei werden zunächst der Behälter bis zur unteren Messmarke mit Wasser gefüllt und der zu prüfende Probekörper eingelegt. Anschließend erfolgt die Bestimmung

---

<sup>1</sup> Eine vorangegangene Überlegung beruht darauf, die Häufigkeit der auftretenden Lösungspaare  $\{\sigma, d\}$  zu bestimmen und dasjenige Paar als wahres Wertepaar anzusehen, welches am häufigsten auftritt. Im Rahmen der Validierung zeigte sich jedoch, dass dieser Ansatz unzureichend ist. Zum einen beinhaltet die einbezogene Datenbank Marshall-Probekörper, bei denen die wahren Werte nicht die am häufigsten auftretenden Werte sind, zum anderen ist die Größe des relativ willkürlich wählbaren Startwertebereichs entscheidend für die erforderliche Häufigkeitsverteilung.

der Anfangsmasse des Behälters mit Probekörper und Anfangsfüllung. Im Weiteren wird der Behälter mit Wasser kurz bis unter die obere Messmarke gefüllt, der Behälter evakuiert und nochmals nachgefüllt und die Masse im gefüllten Zustand bestimmt. Die Differenz der beiden Massen entspricht der Masse des enthaltenen Wassers, aus welcher wiederum das Volumen des zugänglichen Hohlraumgehalts berechnet werden kann. Hierfür ist allerdings die volumetrische Bestimmung des Volumens eines Probekörpers durch Ausmessen mittels einer Schieblehre gemäß [DIN 1996 Teil 7] erforderlich. Abbildung 13 zeigt den verwendeten Messaufbau.



Abbildung 13: Messaufbau zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit Hilfe von Wasser

Um Messfehler weitestgehend zu begrenzen und konstante Versuchsbedingungen zu gewährleisten, erfolgten die Wägungen stets nach Demontage von Wasser- und Druckluftschlauch. Zur anschließenden Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts sind verschiedene Lösungswege möglich. So kann der zugängliche Hohlraumgehalt beispielsweise wie folgt ermittelt werden:

$$V_i = V_W - V_{ex} + V_{Probe} \quad (38)$$

und

$$H_{zu} = \frac{V_i}{V_{Probe}} \cdot 100 \% \quad (39)$$

Wobei  $V_i$  dem Volumen innerhalb des Probekörpers,  $V_w$  dem Volumen des zugeführten Wassers,  $V_{ex}$  dem Volumen des Exsikkators als Messplatzkonstante und  $V_{Probe}$  dem Volumen des Probekörpers entspricht.

Die Ergebnisse der experimentell bestimmten zugänglichen Hohlraumgehalte sind in Abschnitt 2.1.6, Tabelle 4 zusammengefasst und zeigen weitestgehend plausible Unterschiede zwischen dem zugänglichen und dem Gesamthohlraumgehalt.

### 2.1.5.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Da unter anderem in [LERCH 1997] darauf hingewiesen wird, dass möglicherweise ein 100 % iges Trocknen der gewässerten Probekörper nicht möglich ist und eine Restfeuchte im Probekörper akustische Messungen beeinflussen würde, sind zunächst die akustischen Messungen im Kundtschen Rohr und am Strömungswiderstandsmessplatz abgeschlossen worden, bevor experimentell der zugängliche Hohlraumgehalt mit Hilfe von Wasser bestimmt wurde. Nach massekonstantem Trocknen der Marshall-Probekörper wurden an ausgewählten Probekörpern nochmals akustische Eigenschaften bestimmt und mit den anfänglichen Werten verglichen.

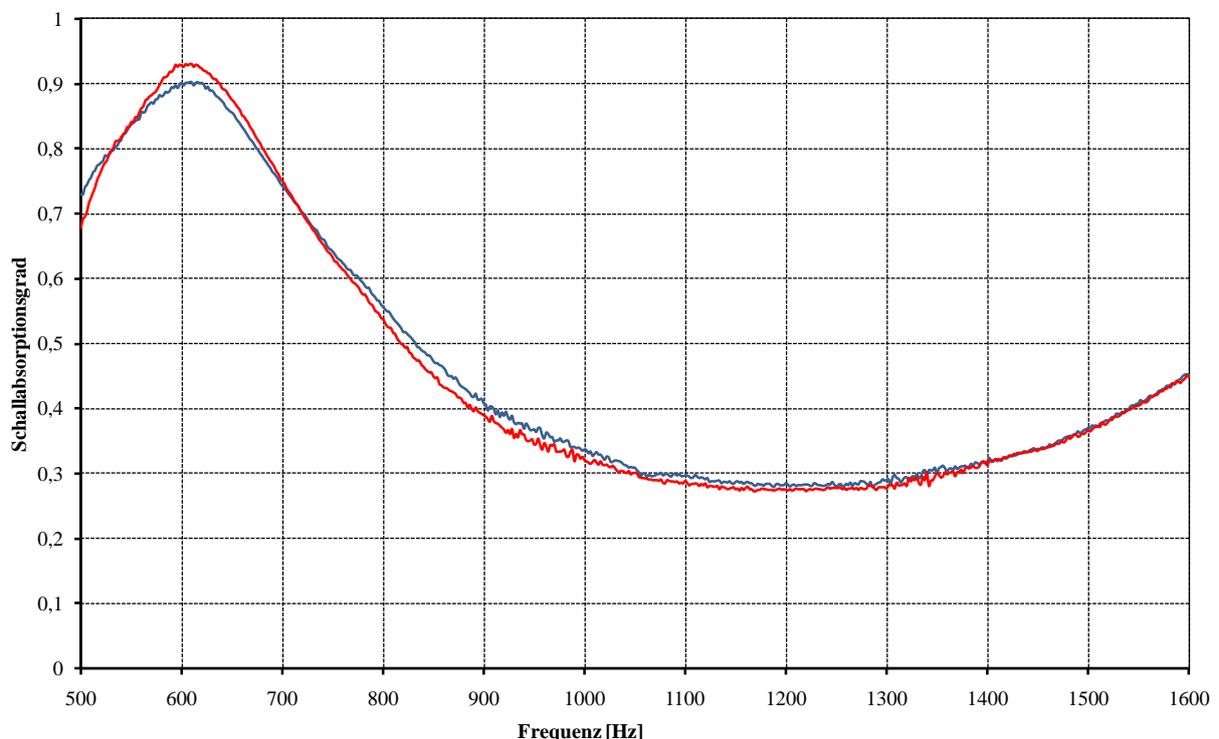


Abbildung 14: mittlerer Schallabsorptionsgrad des Marshall-Probekörpers V2-1 vor und nach Wasserlagerung.

In Abbildung 14 ist exemplarisch der mittlere Schallabsorptionsgrad, bestimmt mit dem in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Verfahren, für einen Marshallprobekörper vor und nach Wasserlagerung dargestellt. Insgesamt wurden an 9 Marshall-Probekörpern Kontrollmessungen nach der Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehaltes mittel Wasser und anschließendem massekontantem Trocknen durchgeführt. Alle Probekörper weisen vergleichbare Ergebnisse auf, so dass angenommen werden kann, dass Unterschiede zwischen den Vorher- / Nachhermessungen auf eine über Wägung nicht messbare Restfeuchte im Probekörper zurückzuführen ist. Die Restfeuchte bedingt somit unter anderem eine gewisse Verringerung des Schallabsorptionsgrades. Dies ist vor Allem im Rahmen von in-situ Messungen von Bedeutung.

### **2.1.6 Vergleich der Ergebnisse aus dem Schätzverfahren und den Labormessungen**

In einem ersten Schritt zur Validierung des Verfahrens wurden der zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Schichtdicke vorgegeben und hieraus mit Hilfe der Gleichungen in Abschnitt 2.1.4 des Phänomenologischen Modells Simulationsdaten für den Absorptionsgrad erzeugt. Anschließend flossen diese Daten in das Berechnungsverfahren als Eingangswerte ein, bevor im Weiteren daraus der zugängliche Hohlraumgehalt und die Schichtdicke (zurück-)berechnet wurden.

Dies diente als Test der Implementation des Modells. Der Vergleich der ursprünglich verwendeten Parameter mit den rückberechneten Werten zeigte eine 100%-ige Übereinstimmung.

In einem zweiten Schritt erfolgte die Validierung mit den Resultaten der Messungen an den im Rahmen des Projekts hergestellten Marshall-Probekörpern. Dazu wurde das oben beschriebene Verfahren auf die an diesen Probekörpern gemessenen Absorptionsgrade angewandt und der jeweilige zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Dicke berechnet. Anschließend erfolgte der Vergleich mit den gemessenen Werten.

Eine tabellarische Gegenüberstellung der gemessenen und berechneten Daten wird mit Tabelle 4 gegeben. In Abbildung 15 wird eine graphische Darstellung präsentiert.

Auf der Abszisse sind hier die Abweichungen zwischen dem direkt gemessenen und dem rechnerisch ermittelten Hohlraumgehalt in Form von Klassen aufgetragen, die Ordinate gibt die zugehörigen relativen Häufigkeiten wieder.

Tabelle 4: Gegenüberstellung Gesamthohlraumgehalt und zugänglicher Hohlraumgehalt bestimmt mit dem Verfahren gemäß Abschnitt 2.1.4.4 sowie direkt gemessen gemäß dem Verfahren aus Abschnitt 2.1.5 für Marshallprobekörper

Bez. MPK	HRG (Ausmessverfahren) [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (gemessen) [Vol.-%]	Differenz HRG <sub>A</sub> -H <sub>zu,gem.</sub> [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	Differenz H <sub>zu,gem.</sub> -H <sub>zu,gem.</sub> [Vol.-%]
V1-1	27,90	25,27	2,62	25,30	-0,03
V1-2	27,74	27,80	-0,07	23,10	4,70
V1-3	28,31	28,00	0,31	23,90	4,10
V1-4	28,92	25,69	3,24	22,30	3,39
V1-5	29,58	28,26	1,31	26,60	1,66
V1-6	29,46	27,01	2,45	26,90	0,11
V2-1	30,87	28,30	2,57	25,70	2,60
V2-2	30,79	28,16	2,63	25,70	2,46
V2-3	30,18	26,97	3,21	25,60	1,37
V3-1	29,30	29,72	-0,42	26,30	3,42
V3-2	29,01	27,57	1,44	25,50	2,07
V3-3	29,99	28,95	1,04	25,40	3,55
V4-1	27,87	26,57	1,30	24,00	2,57
V4-2	27,51	27,37	0,14	26,30	1,07
V4-3	27,96	26,74	1,23	25,80	0,94
V5-1	27,10	24,52	2,58	24,40	0,12
V5-2	28,72	26,88	1,84	25,80	1,08
V5-3	27,34	25,86	1,48	24,20	1,66
V6-1	28,10	26,43	1,67	25,70	0,73
V6-2	29,18	27,88	1,31	26,10	1,78
V6-3	27,82	26,22	1,60	26,20	0,02
V7-1	30,22	28,30	1,92	27,10	1,20
V7-2	28,72	26,89	1,82	26,30	0,59
V7-3	29,63	28,56	1,07	27,00	1,56
V8-1	27,71	25,10	2,61	25,70	-0,60
V8-2	26,79	24,32	2,47	25,40	-1,08
V8-3	28,40	27,70	0,69	25,40	2,30
V9-1	26,63	23,50	3,13	22,40	1,10
V9-2	27,42	23,75	3,67	23,90	-0,15
V9-3	29,60	26,69	2,91	26,40	0,29

Jene Probekörper, bei denen auf Grund von möglichen Messungenauigkeiten der experimentell bestimmte zugängliche Hohlraumgehalt geringfügig größer als der Gesamthohlraumgehalt ist (V1-2 und V3-1), wurden in die Auswertung nicht mit einbezogen.

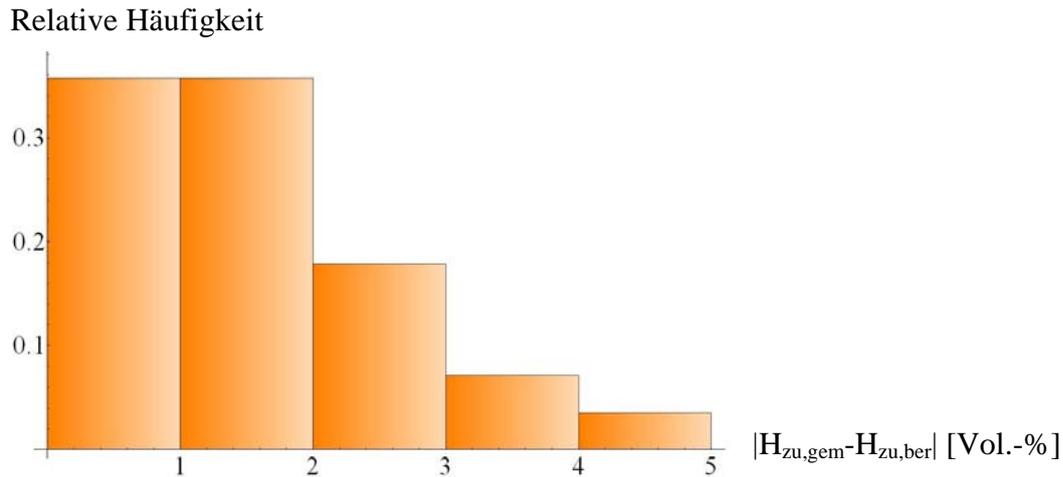


Abbildung 15: Histogramm der Abweichung zwischen dem zugänglichen Hohlraumgehalt, bestimmt mit dem Verfahren nach Kapitel 2.1.4.4, und dem zugänglichen Hohlraumgehalt, direkt gemessen nach dem Verfahren aus Kapitel 2.1.5

Die statistische Auswertung der Abweichungen von direkt gemessenem und mittels Berechnungsverfahren bestimmtem zugänglichen Hohlraumgehalt ergibt:

- Mittelwert: 1,44 Vol.-%
- 95 % - Quantil: 3,60 Vol.-%
- Maximalwert: 4,12 Vol.-%

Um die Ergebnisse durch eine breitere Datengrundlage stützen zu können, wurden zusätzlich die in einer Datenbank vorhandenen Messdaten von 250 Marshall-Probekörpern [HUEBELT 2003] Parameter geschätzt und mit den gemessenen Werten verglichen. Von den Probekörperdatensätzen konnte ein Großteil nicht zur Validierung herangezogen werden, da z.T. unzureichende Messwerte vorhanden, Messungen nicht als valid gekennzeichnet oder Messkurven offenbar nicht nachvollziehbar und realistisch sind. Insgesamt erwiesen sich 106 Datensätze der Datenbank als geeignet für die Validierung. Die vorhandenen Impedanzen wurden im Kundtschen Rohr mit 10 cm Durchmesser bestimmt, so dass die obere Grenzfrequenz ca. 1.600 Hz beträgt. In Abbildung 16 wird die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Porositäten gegenüber gestellt.

Für die Probekörper der zur Verfügung gestellten Datenbank ergibt sich somit:

- mittlere Abweichung: 1,46 Vol.-%
- 95 % - Quantil: 3,71 Vol.-%
- Maximalwert: 5,92 Vol.-%

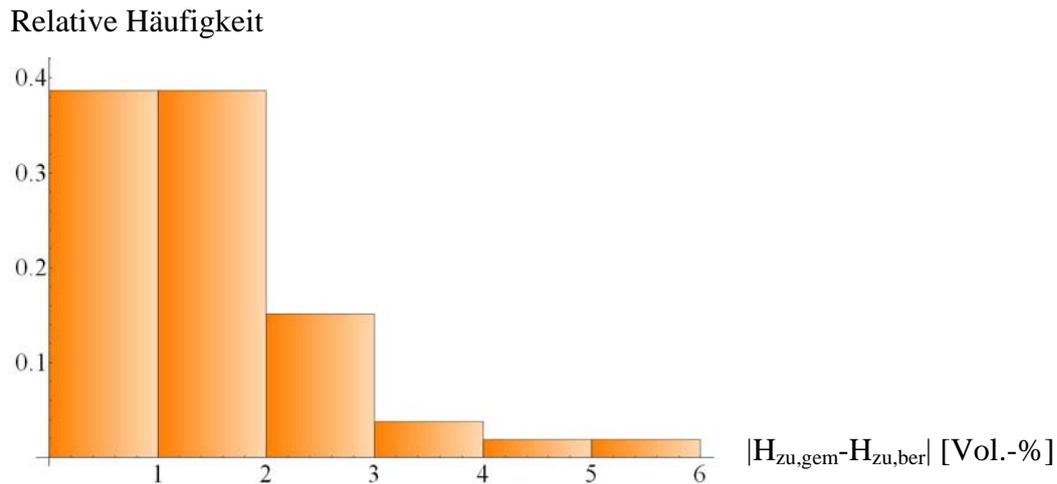


Abbildung 16: Histogramm der Abweichungen zwischen berechneten und gemessenen Porositäten (zugänglicher Hohlraumgehalt) für Marshall-Probekörper einer Datenbank ([SARRADJ 2004]).

Die Ergebnisse für beide Datensätze sind sehr ähnlich, wie Abbildung 15 und Abbildung 16 erkennen lassen. D.h. für ca. 80 % der einbezogenen Probekörper liegt die Abweichung unter 2 Vol.-%, für ca. 40 % sogar unterhalb der angestrebten Genauigkeit von maximal 1 Vol.-%.

Für den praktischen Einsatz muss das Verfahren mit genügender statistischer Sicherheit (z.B. mit einer Häufigkeit von 95 %) die angestrebte Genauigkeit von 1 Vol.-% liefern. Das heißt, dass eine Weiterführung der hier beschriebenen Forschungsarbeit eine Anpassung des Phänomenologischen Modells erfordert.

Unter Anderem folgende Ursachen begünstigen die Abweichungen zwischen geschätzten und labortechnisch bestimmten Hohlraumgehalten:

1. Messunsicherheiten bei der Bestimmung der Materialparameter der Marshall-Probekörper (sowohl der für das Projekt hergestellten als auch der Probekörper aus der Datenbank)
2. akustische Messungen auf den Frequenzbereich von 500 Hz bis 1.600 Hz beschränkt (bedingt durch Kundtsches Rohr)
3. Messunsicherheit bei der Messung im Kundtschen Rohr und am Strömungswiderstandsmessplatz
4. Näherungen im Phänomenologischen Modell.

Zu Projektbeginn war vorgesehen, die Abweichungen zwischen geschätzten und experimentell bestimmten Hohlraumgehalten mittels Korrekturfaktoren allgemeingültig zu beschreiben. Das Einführen von Korrekturfaktoren ist zwar möglich würde jedoch

nur eine weitere Näherung des Phänomenologischen Modells bedeuten. Zufällige Abweichungen durch herstellungs- und messtechnisch bedingte Einflüsse blieben durch Korrektoreinflüsse jedoch unberücksichtigt.

Da die durchgeführten Untersuchungen, u. a. aufgrund der verhältnismäßig kurzen Projektlaufzeit, jedoch keine Auskünfte über den anteiligen Einfluss der einzelnen Fehlerquellen liefern, wurde im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsprojektes auf die Entwicklung von Korrekturfaktoren verzichtet. Für nachfolgende Forschungsvorhaben wird jedoch empfohlen, gezielte Untersuchungen hinsichtlich möglicher Fehlerquellen und des jeweiligen Einflusses durchzuführen.

## **2.2 Ergebnisse Arbeitspaket B: Weiterentwicklung des in-situ-Messverfahrens zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von offenporigen Befestigungen auf der Basis des Druck-Schnelle-Sensors von Microflown Technologies**

### **2.2.1 In-situ Messsysteme**

#### 2.2.1.1 in-situ Messsystem nach DIN ISO 13472-1

Die [DIN ISO 13472-1 2004] beschreibt die messtechnische Bestimmung der Schallabsorptionseigenschaften von Straßenoberflächen vor Ort. Das darin beschriebene in-situ-Messverfahren erfordert eine umfangreiche Messausrüstung. Die Norm ist vorrangig auf Untersuchungen bei trockener Straßenoberfläche mit einer Temperatur zwischen 0 °C und 50 °C ausgerichtet. Während des Einbaus von Asphalt sind allerdings Temperaturen von über 140 °C vorhanden. Das in der Norm beschriebene Messverfahren ist somit nur begrenzt einsetzbar.

#### 2.2.1.2 Microflown Sonde

Ein von der Firma Microflown Technologies B. V. zur Verfügung gestelltes Messsystem, das einer weniger umfangreichen Ausrüstung bedarf und sich daher durch Benutzerfreundlichkeit auszeichnet, sollte auf mögliche Eignung zum Einsatz für messtechnische Untersuchungen im Rahmen des zu Grunde liegenden Projektes untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Voruntersuchungen unter Laborbedingungen sowie Testmessungen in der Praxis durchgeführt.

Dieses handgehaltene in-situ-Messsystem dient der Bestimmung der Oberflächenimpedanz, des Reflexionsfaktors und des Schallabsorptionsgrads eines porösen Absorbers.

In Abbildung 17 ist der Messaufbau dargestellt. Das Messsystem verfügt über einen Lautsprecher als Schallquelle, einen Druck-Schnelle-Sensor (PU-Sensor) sowie diverse Geräte zur Datenerfassung. Der Sensor basiert auf einem Mikrofon als Schalldruckmesser und einem Sensor für die Schallschnelle, dem sogenannten Microflow. Dieser Schnellesensor besteht aus zwei dünnen heißen Platindrähten. Eine einfallende Schallwelle verursacht eine zeitabhängige Änderung der Temperatur der Drähte. Die auftretende Temperaturdifferenz führt zu einer zeitabhängigen Differenz des elektrischen Widerstandes der beiden Drähte, wodurch die Schallschnelle in linearer Weise bestimmt wird.

Die Konstruktions- und Messprinzipien des Druck-Schnelle-Sensors sind in der Literatur ([DE BREE 1996] und [DE BREE 2003]) detailliert beschrieben.

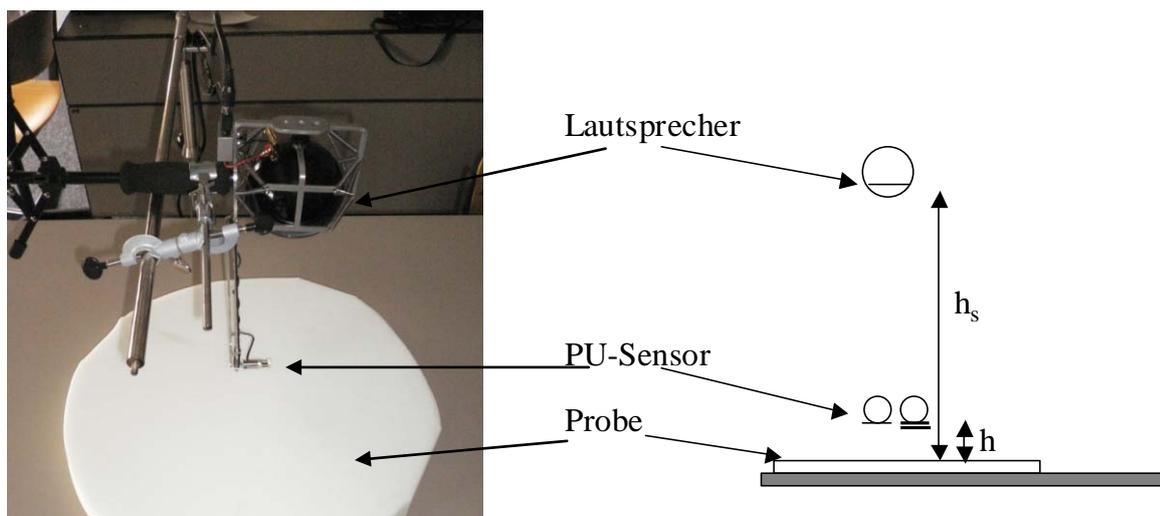


Abbildung 17: Links: Messaufbau zur Bestimmung der notwendigen Probengröße (Probe: Melaminharzschäum Basotect); Rechts: Schematischer Messaufbau für Messungen mit dem Microflow PU-Sensor

Abbildung 17 (rechts) zeigt außerdem den schematischen Messaufbau für Messungen mit dem Microflow PU-Sensor. Der Messabstand  $h$  zwischen zu untersuchender Probe und PU-Sensor sollte für den verwendeten PU-Sensor zwischen 2 mm und 20 mm ([DE BREE 2008]) liegen. Der Abstand  $h_s$  beschreibt die Distanz zwischen dem Lautsprecher und der Probe.

Auf der Grundlage des vom Lautsprecher emittierten Signals wird mit dem Sensor der komplexe Schalldruck  $\underline{p}$  und die komplexe Schallschnelle  $\underline{v}_\perp$  auf der Probenoberfläche bestimmt. Die komplexe Oberflächenimpedanz lässt sich anschließend, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, berechnen. Der Reflexionsfaktor  $\underline{R}$  und der Absorptionsgrad  $\alpha$  bei senkrechtem Schalleinfall, wie in den Gleichungen (40) und (41) angegeben, sind abhängig von der Wandimpedanz  $\underline{Z}_W$ :

$$\underline{R} = \frac{\underline{Z}_W - \underline{Z}_0}{\underline{Z}_W + \underline{Z}_0} \quad (40)$$

und

$$\alpha = 1 - |\underline{R}|^2 \quad (41)$$

### 2.2.1.3 Vergleich der Messsysteme

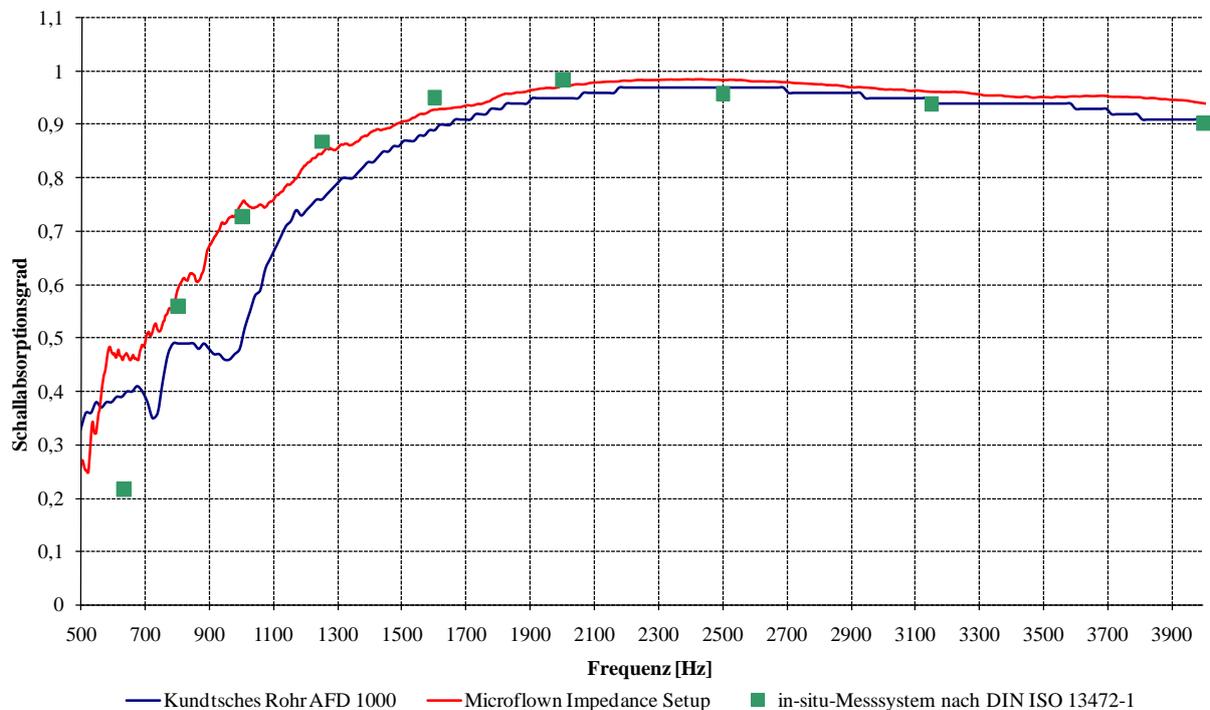


Abbildung 18: Schallabsorptionsgrad des Melaminharzschaumes Basotect, ermittelt mit dem Kundtschen Rohr, dem Druck-Schnelle-Sensor (Microflow Impedance Setup) und dem in-situ-Messsystem nach [DIN ISO 13472-1 2004]

In Abbildung 18 sind Ergebnisse des Schallabsorptionsgrads gegenübergestellt, die mit Hilfe der beiden genannten in-situ-Messsysteme sowie dem Kundtschen Rohr ermittelt wurden. Untersuchungsobjekt war der Melaminharzschaumstoff Basotect. Es ist erkennbar, dass die Messergebnisse der beiden in-situ-Messsysteme in guter Näherung eine Übereinstimmung aufweisen. Die im Kundtschen Rohr ermittelten Werte zeigen im Vergleich dazu Abweichungen von bis zu 20 %, vor allem im Fre-

quenzbereich zwischen 700 Hz und 1.500 Hz. Ein plausibler Grund hierfür ist die Tatsache, dass im Kundtschen Rohr ein ebenes Schallwellenfeld erzeugt wird, welches von den Rohrwänden begrenzt wird.

#### 2.2.1.4 Fresnelzone - größte erfasste Fläche

Die Größe der Fläche, die maßgeblich den Reflexionsfaktor bzw. den Schallabsorptionsgrad beeinflusst, ist abhängig vom zu betrachtenden Frequenzbereich. Jene Fläche, die im interessierenden Frequenzbereich einen wesentlichen Einfluss auf die Messwerte hat, wird Fresnelzone genannt. Bei senkrechtem Schalleinfall hat diese Fläche die Form eines Kreises mit dem Radius  $r$ , der über Gleichung (42) berechnet wird:

$$r = \frac{h_s + h + F \cdot \lambda}{2} \quad (42)$$

Darin stellt die Variable  $h_s$  den Abstand zwischen Lautsprecher und Prüffläche dar,  $h$  den Abstand zwischen Sensor und Prüffläche und  $\lambda$  die Wellenlänge.

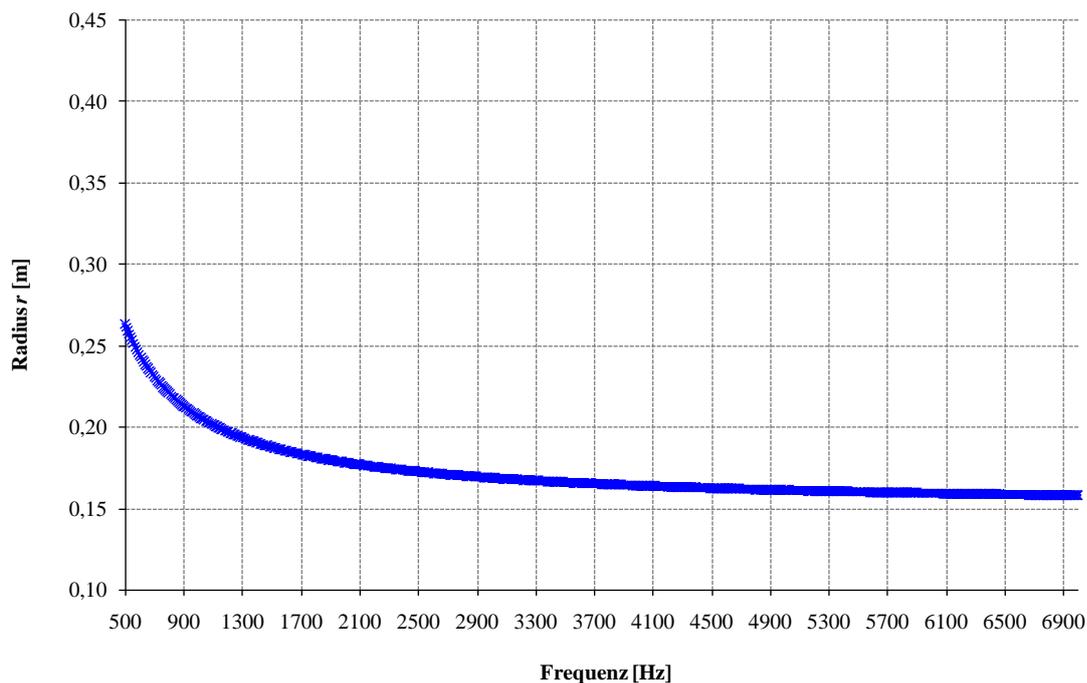


Abbildung 19: Berechnete Radien  $r$  der Fresnelzone bei senkrechtem Schalleinfall und Schallgeschwindigkeit von 340 m/s (20 °C) für die PU-Sonde mit Messabstand  $h = 0,01$  m

Für weitere Berechnung wurde für die Konstante  $F$  nach [BOULANGER 1997] ein Wert von  $1/3$  gewählt. Um im Frequenzbereich ab 500 Hz sowie bei einem Messabstand  $h$  von 2 cm präzise Ergebnisse zu erhalten, wurde für das verwendete Mess-

system ein notwendiger Radius der Fresnelzone von ca. 0,25 m berechnet (vgl. Abbildung 19). Mit steigender Frequenz nimmt der Radius dieser Fläche ab.

Abbildung 20 zeigt vergleichend die berechneten Radien der Fresnelzone bei Anwendung des in-situ Messsystems nach [DIN ISO 13472-1 2004]. Als Prüftemperatur wurden dabei 30 °C angenommen. Es ist ersichtlich, dass sich für das in-situ Messsystem nach [DIN ISO 13472-1 2004] sowohl bei einem Messabstand  $h$  von 2 cm als auch bei dem in der Norm angegebene Wert von 25 cm ein größerer Radius der Fresnelzone ergibt. Des Weiteren ist es möglich, den Radius der größten erfassten Fläche zu ermitteln. Dadurch wird die Fläche in der Reflexionsebene beschrieben, in der sich keine störenden reflektierenden Gegenstände befinden dürfen. Im Falle senkrechten Schalleinfalls wird die größte erfasste Fläche ebenfalls durch einen Kreis dargestellt.

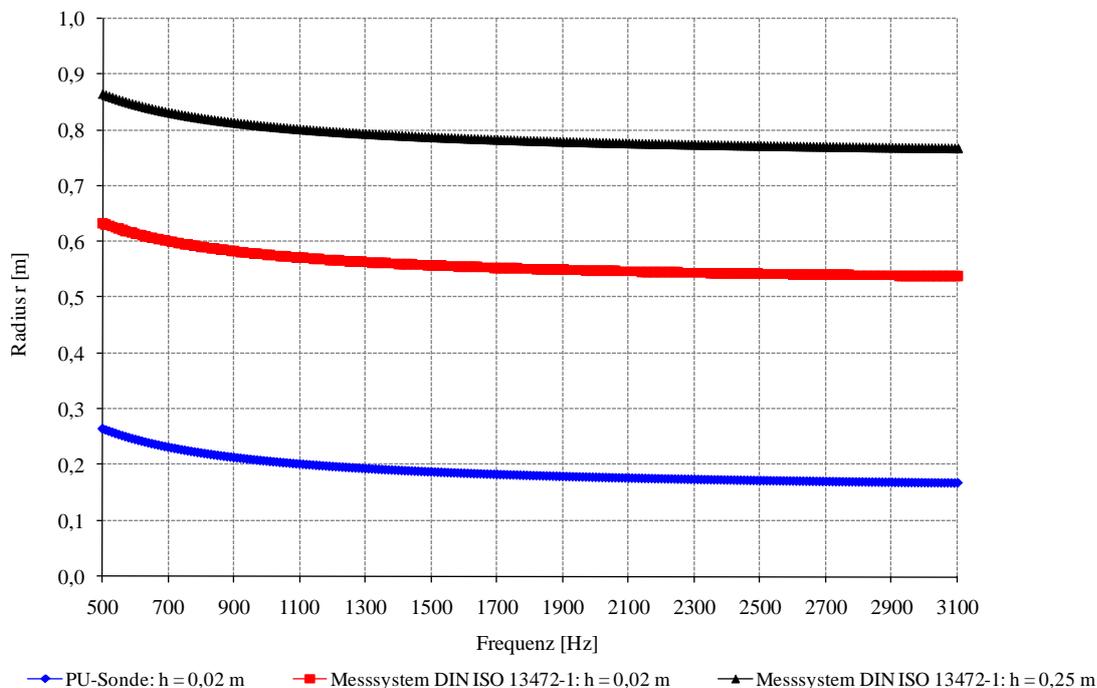


Abbildung 20: Radien  $r$  der Fresnelzone bei senkrechtem Schalleinfall und einer Temperatur von 30 °C für die PU-Sonde mit Messabstand  $h$  von 0,02 m und für das Messsystem nach [DIN ISO 13472-1 2004] mit Messabständen von 0,02 m bzw. 0,25 m

In Abbildung 21 ist der berechnete frequenzabhängige Radius der größten erfassten Fläche unter Anwendung der PU-Sonde bzw. des Messsystems nach [DIN ISO 13472-1 2004] dargestellt. Es ist erkennbar, dass bei Einbeziehung des Druck-Schnelle-Sensors im Vergleich zum Messgerät nach [DIN ISO 13472-1 2004] abermals ein geringerer Radius und damit eine geringere Fläche notwendig ist, die von reflektierenden Gegenständen freigehalten werden muss.

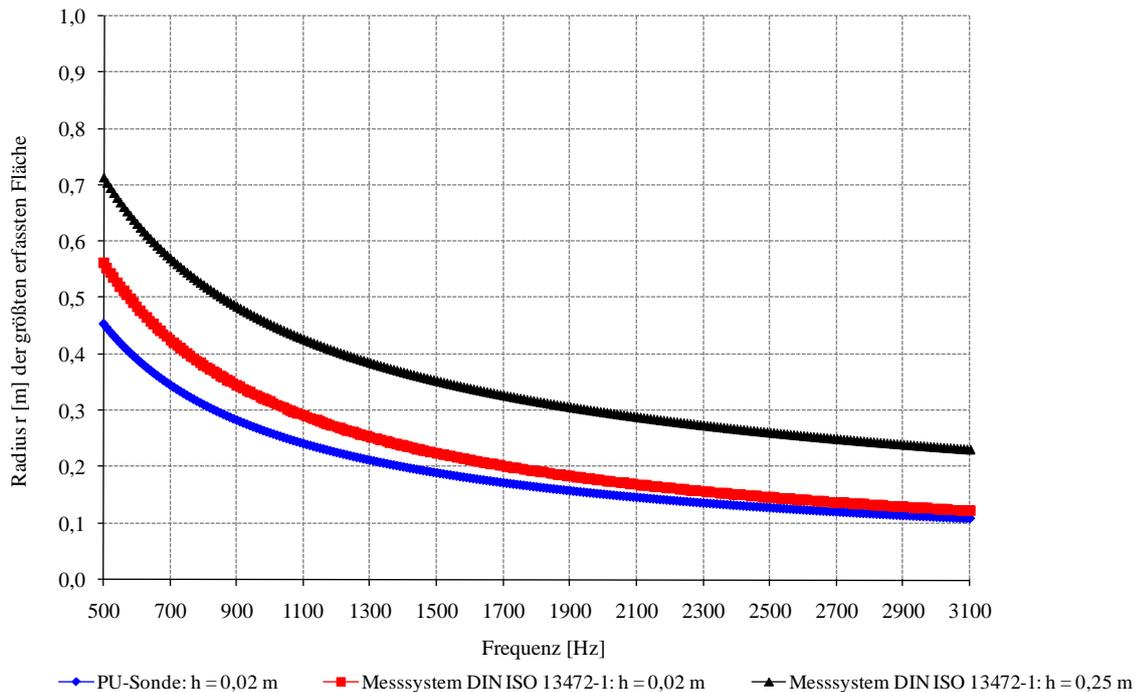


Abbildung 21: Radien  $r$  der größten erfassten Fläche bei senkrechtem Schalleinfall und einer Temperatur von 30 °C für die PU-Sonde mit Messabstand  $h$  von 0,02 m und für das Messsystem nach [DIN ISO 13472-1 2004] mit Messabständen von 0,02 m bzw. in der Norm vorgeschlagenen 0,25 m

## 2.2.2 Messtechnische Untersuchungen im Labor

### 2.2.2.1 Voruntersuchungen

Das in-situ-Messsystem soll für Messungen während des Einbaus von offenporigem Asphalt zum Einsatz kommen. Einige spezifische Umgebungsbedingungen sind dabei zu beachten, die die messtechnischen Untersuchungen zum Teil erheblich beeinflussen können:

- Störgeräusche: Transport, Einbau und Verdichtung des Mischgutes gehen mit Geräuschemissionen der verschiedenen Maschinen und Geräte einher. Wird im Rahmen von Straßenbaumaßnahmen eine Fahrbahn eingeschränkt genutzt und nicht vollständig für den Straßenverkehr gesperrt, so sind auch die aus dem Verkehrsfluss resultierenden Geräusche einzubeziehen.
- Temperatur: Der verwendete Sensor wird bei Temperaturen oberhalb von 70 °C beschädigt. Beim Einbau von Asphaltmischgut liegt die Mischguttemperatur i. d. R. jedoch deutlich höher. Ein Sensor, der bei Temperaturen von bis zu 250 °C eingesetzt werden kann, befindet sich beim Unternehmen Microflown Technologies in der Entwicklung.

- Wasserdampf: Der verwendete Sensor darf nicht mit Sprüh-/ Wasser in Berührung kommen. Andernfalls ist eine Beschädigung des Sensors unausweichlich. Das heißt, die Bildung von Wasserdampf ist so lange unkritisch wie es am Sensor nicht zur Tropfenbildung kommt.
- Wettereinflüsse: Bei Windgeschwindigkeiten von mehr als 4 m/s lassen sich mit dem verwendeten PU-Sensor keine zuverlässigen Messungen durchführen. Mit einem geeigneten Windschutz für den Sensor kann dem abgeholfen werden. Ein spezieller Windschutz des Unternehmens Microflow Technologies befindet sich ebenfalls in der Entwicklung.

### Verwendete Materialien

Um die Anforderungen des Messsystems unter ausgewählten Bedingungen zu untersuchen, wurden zunächst Tests mit Proben aus Melaminharzschaum „Basotect“, für den bereits Erfahrungswerte der akustischen Eigenschaften vorliegen, sowie Platten aus offenporigem Asphalt durchgeführt.

### Reproduzierbarkeit der Messergebnisse

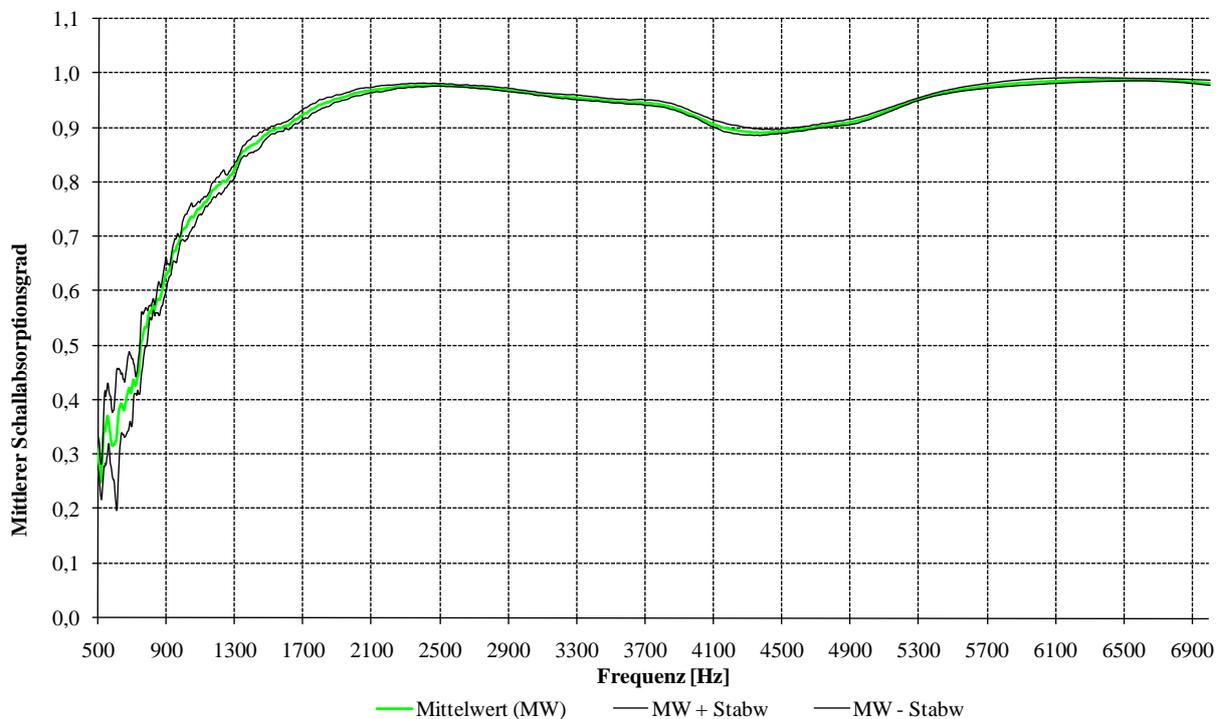


Abbildung 22: Mittlerer Schallabsorptionsgrad von Basotect mit Standardabweichung aus messtechnischen Untersuchungen an sieben nicht aufeinanderfolgenden Tagen

Um die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu prüfen wurde der Melaminharz-schaum ("Basotect") mit einer Dicke von 4 cm an sieben nicht aufeinander folgenden Tagen messtechnisch untersucht. Der Messabstand  $h$  betrug dabei 1 cm. Abbildung 22 zeigt den mittleren Schallabsorptionsgrad und die Standardabweichung der Messergebnisse. Die Standardabweichung ist besonders gering im Bereich des Maximums des Schallabsorptionsgrads.

Gleichartige Untersuchungen an Platten aus offenporigem Asphalt wurden an sechs nicht aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Aufgrund der Herstellung mittels Walzsektorverdichter sind die untersuchten Platten aus offenporigem Asphalt rechteckiger Form mit den Abmaßen von 320 mm x 260 mm. An einer Fläche von 2 x 2 Platten wurden mit einem Messabstand von  $h = 1$  cm an sechs unterschiedlichen Tagen messtechnische Untersuchungen im Labor durchgeführt.

In Abbildung 23 sind der Mittelwert des Schallabsorptionsgrads sowie die Standardabweichung der Messergebnisse dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass die Werte der Standardabweichung ab einer Frequenz von etwa 3.200 Hz deutlich zunehmen. Aus diesem Grund wird in den folgenden Untersuchungen der Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 3.000 Hz betrachtet.

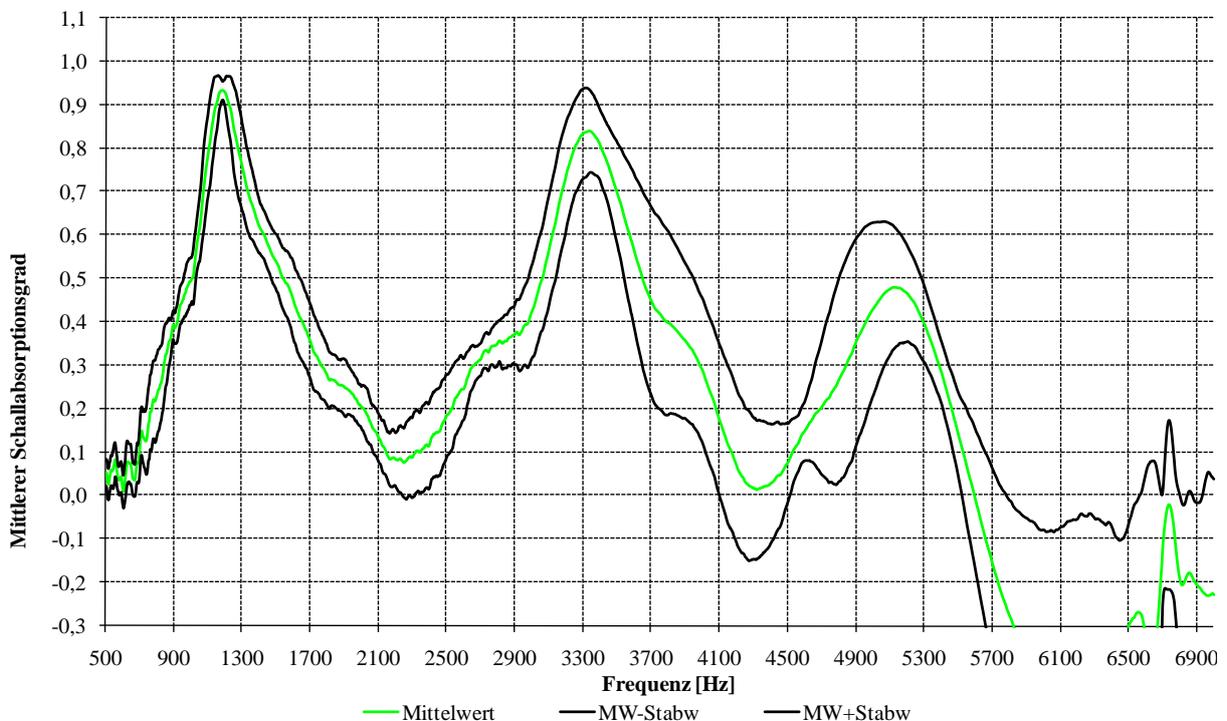


Abbildung 23: Mittlerer Schallabsorptionsgrad von offenporigem Asphalt mit Standardabweichung aus messtechnischen Untersuchungen an sechs nicht aufeinanderfolgenden Tagen

### Einfluss des Messabstandes von der Versuchsfläche

Die Temperatur an der Position des PU-Sensors muss vor Messbeginn und während der messtechnischen Untersuchung überprüft und in das Mess-Programm eingegeben werden. Der PU-Sensor kann bei Temperaturen bis 70 °C eingesetzt werden und wird gemäß Herstellerangaben oberhalb dieser Temperatur beschädigt. Der Abstand zwischen Probekörper und Sensor sollte eine entsprechend geringe Temperatur an der Position des Mess-Sensors garantieren. Wird dieser Abstand jedoch zu groß gewählt, so führt dies zu Messungenauigkeiten. Nach vorliegenden Erkenntnissen ([DE BREE 2008]) sollte der Messabstand  $h$  etwa zwischen 2 mm und 20 mm liegen. Um die größtmögliche Distanz zu definieren, wurden Untersuchungen an einer Basotect-Platte (0,51 m x 1,05 m) durchgeführt. Der Messabstand  $h$  wurde zwischen 5 mm und 200 mm variiert. In Abbildung 24 ist die jeweilige Schallabsorptionsgraddifferenz bei unterschiedlichen Messabständen dargestellt. Der Bezugswert ist  $h = 5$  mm. Es ist erkennbar, dass Schwankungen der Ergebnisse merklich zunehmen, sobald der Abstand  $h$  einen Wert von 20 mm übersteigt.

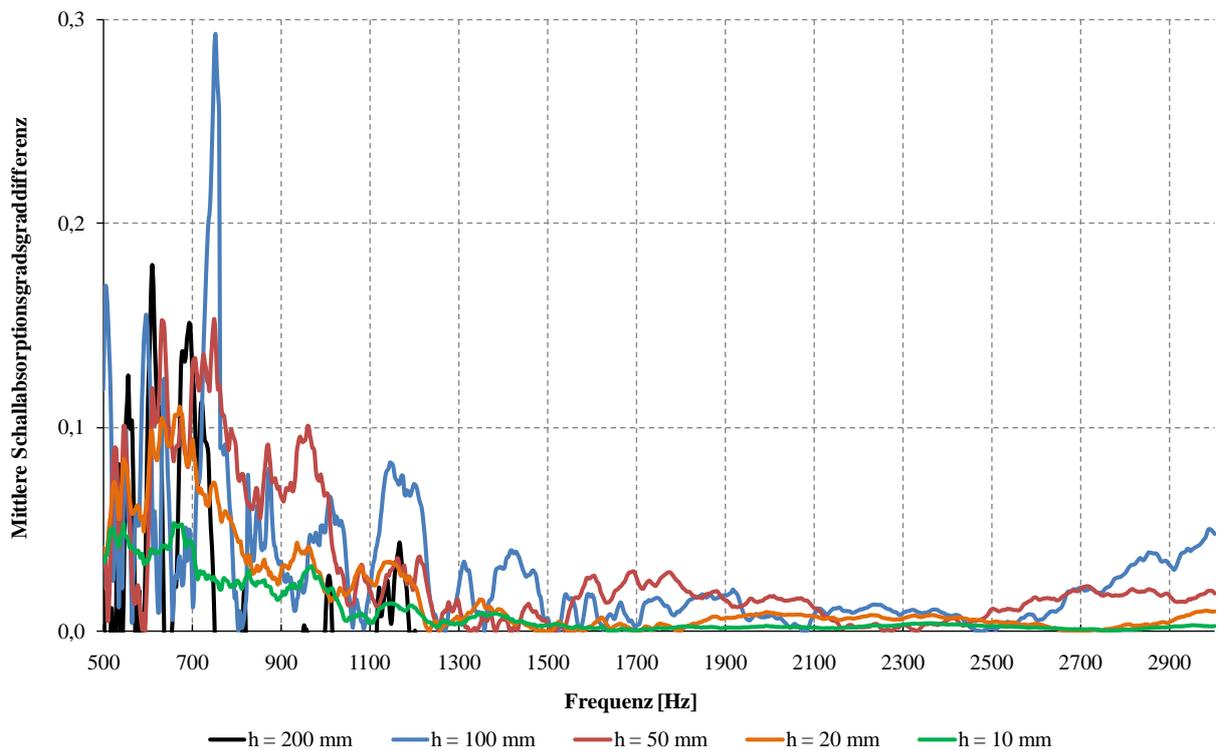


Abbildung 24: Mittlere Differenz des Schallabsorptionsgrades von Melaminharz-Schaumstoffproben (Basotect) bei unterschiedlichen Messabständen  $h$ , Bezugswert für die Differenzbildung ist  $h = 5$  mm

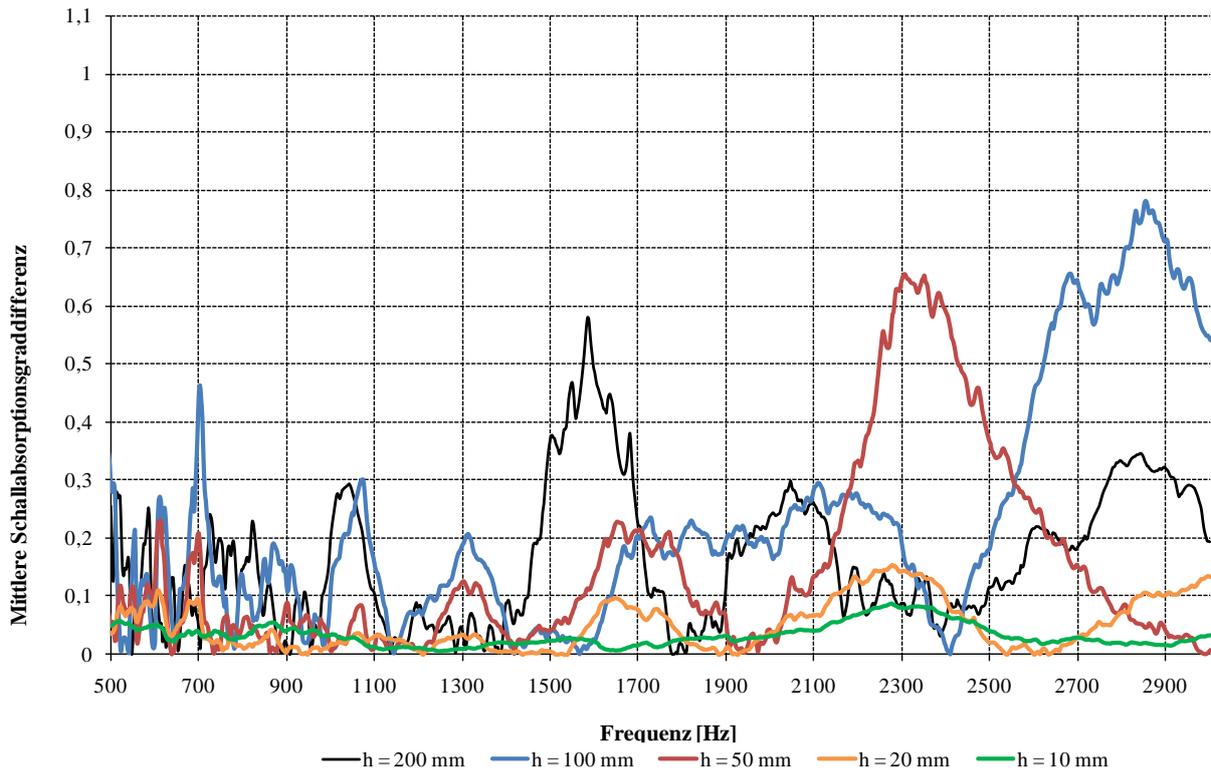


Abbildung 25: Mittlere Differenz des Schallabsorptionsgrades einer 0,3 m<sup>2</sup> großen Fläche offenporigen Asphalts bei unterschiedlichen Messabständen  $h$ , Bezugswert für die Differenz ist  $h = 5$  mm

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss des Messabstandes an offenporigen Asphaltplatten. Die Differenzen der ermittelten Schallabsorptionsgrade sind abermals in Bezug auf die Ergebnisse für den Messabstand  $h = 5$  mm dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Messabstand oberhalb von ca. 20 mm auch in diesem Fall zu einer erheblichen Schwankung des Schallabsorptionsgrads führt.

### Einfluss der Größe einer Versuchsfläche / Versuchsprobe

Aufgrund von Untersuchungsergebnissen des Unternehmens Microflow Technologies wird das Messergebnis nachweislich durch die Größe der verwendeten Probe beeinflusst ([DE BREE 2005]). Darüber hinaus weist das Unternehmen darauf hin, dass der Einfluss der Probengröße ebenfalls vom Probenmaterial abhängig ist.

Zur Bestimmung der notwendigen Probengröße unter Beachtung des begrenzten Messabstandes  $h$  wurden Messungen ähnlich den in der Literatur ([DE BREE 2008]) beschriebenen durchgeführt. Abweichend davon wurden kreisförmige Proben unterschiedlicher Radien untersucht (vgl. Abbildung 26). Untersuchtes Material war Melaminharzschaum "Basotect" mit einer Dicke von 4 cm. Zunächst wurde eine Probe mit

einem Durchmesser von 50 cm messtechnisch betrachtet. Der zu untersuchende Probendurchmesser wurde daraufhin systematisch verringert.

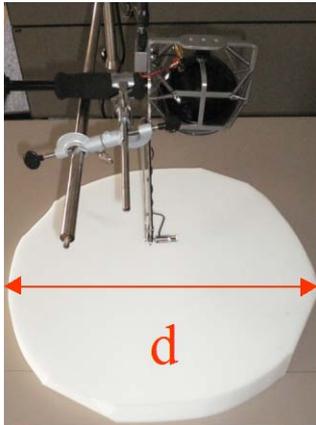


Abbildung 26: Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses der Größe der Versuchsfläche an kreisförmigen Melaminharzschaumstoff-Proben mit unterschiedlichen Durchmessern  $d$

Abbildung 27 zeigt den mithilfe des PU-Sensors ermittelten Schallabsorptionsgrad bei einem Messabstand von  $h = 1$  cm sowie die mittels Kundtschen Rohres bestimmten Messergebnisse. Es ist erkennbar, dass die Resultate für die Probe mit einem Durchmesser von 20 cm mit denen für das Kundtsche Rohr vergleichbar sind.

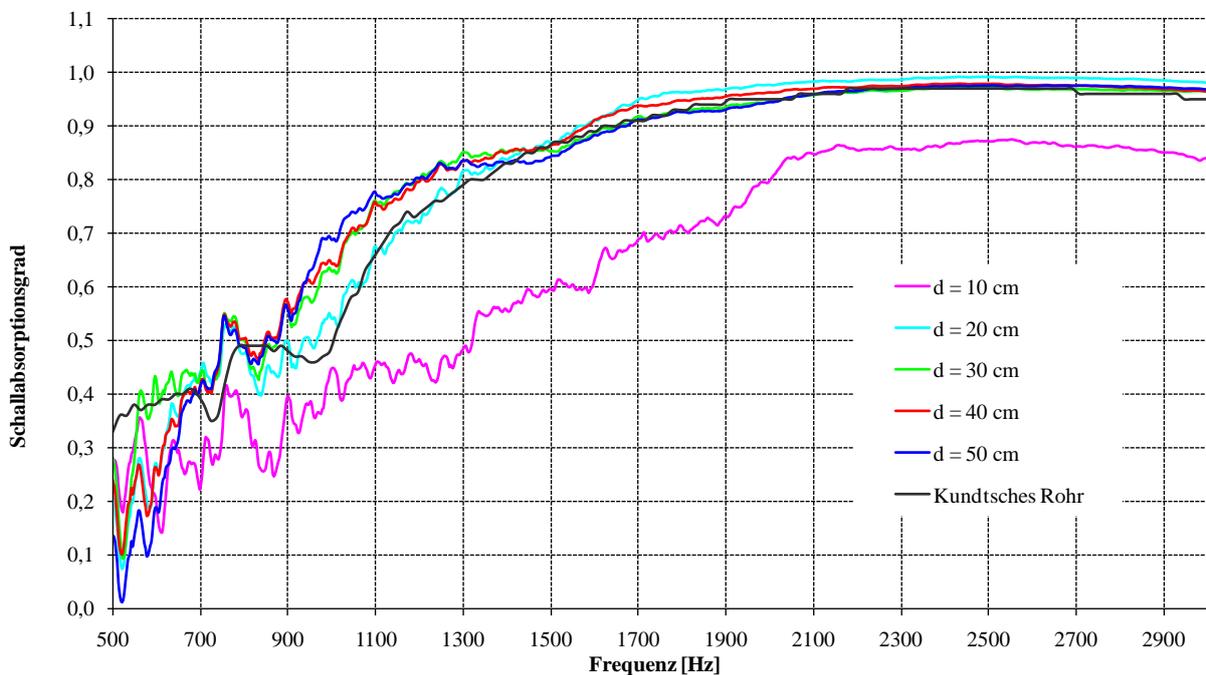


Abbildung 27: Schallabsorptionsgrad von Melaminharzschaumstoff-Proben mit unterschiedlichen Durchmessern  $d$ , ermittelt mit dem Druck-Schnelle-Sensor; zum Vergleich Messergebnis im Kundtschen Rohr

Die Messergebnisse für die Proben mit einem Durchmesser von mehr als 30 cm zeigen weniger Abweichungen untereinander, so dass davon ausgegangen werden

kann, dass eine Probengröße von mindestens 30 cm im Durchmesser zu genaueren Messergebnissen führt.

Zusätzlich sollte der Radius der Fresnelzone beachtet werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.4). Um im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 3.000 Hz präzise Ergebnisse zu erhalten, wurde für das verwendete Messsystem ein notwendiger Radius der Fresnelzone von ca. 16 cm bis 25 cm bestimmt. Dies entspricht einem mittleren Durchmesser von 38 cm im zu betrachtenden Frequenzbereich.

In Abbildung 28 ist die mittlere Schallabsorptionsgraddifferenz zwischen den Messergebnissen, bestimmt mit dem PU-Sensors und dem Kundtschen Rohr, dargestellt. Ergänzend dazu ist der mittlere Durchmesser der Fresnelzone von 38 cm angegeben. Dieser berechnete Wert entspricht in guter Näherung dem Ergebnis der experimentellen Untersuchungen.

Zusätzlich zu den Untersuchungen mit Melaminharzschaum wurden Tests mit 2 x 20 Platten aus offenporigem Asphalt mit jeweils unterschiedlichem Hohlraumgehalt durchgeführt (siehe Abschnitt 2.2.3).

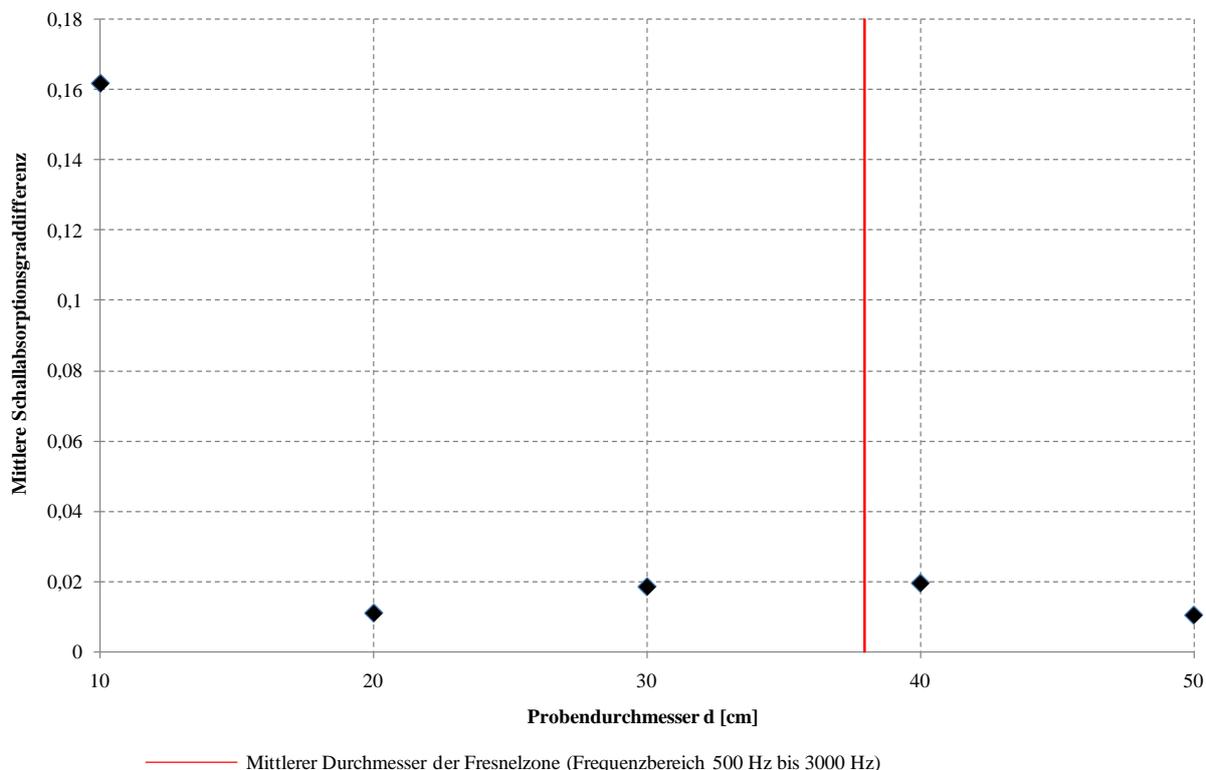


Abbildung 28: Mittlere Schallabsorptionsgraddifferenz (Frequenzbereich 500 Hz bis 3.000 Hz) von Messungen an Melaminharzschaum-Proben mit unterschiedlichen Durchmessern  $d$ , ermittelt mit dem Druck-Schnelle-Sensor und im Kundtschen Rohr; mittlerer Durchmesser der ermittelten Fresnelzone

## Einfluss der Störgeräusche

Da das in-situ-Messsystem von Microflown auf realen Probestrecken angewendet werden soll, wurden im Labor Voruntersuchungen zum Einfluss von Umgebungsgeräuschen durchgeführt. Ein Lautsprecher, der weißes Rauschen emittiert, wurde in 1 Meter Abstand vom Messsystem positioniert. Der von der Störquelle generierte Schalldruckpegel wurde nahe des Sensors im Oktavband von 2.000 Hz bestimmt und mehrfach variiert, um den Signal-Rausch-Abstand zu bestimmen, der zu akzeptablen Werten für die Kohärenz während einer Messung führt.

In Abbildung 29 ist der verwendete Messaufbau als Prinzipskizze dargestellt. Die Untersuchungen erfolgten an einer Basotect-Probe bei einem Messabstand von  $h = 1$  cm in einem Büroraum. Zunächst wurde ohne Störgeräusch gemessen, anschließend wurde der von der Störquelle erzeugte Störpegel systematisch variiert, konkret um -10 dB bis -30 dB im Vergleich zum Oktavband-Schalldruckpegel bei 2.000 Hz, der durch den Originallautsprecher des in-Situ-Messsystems erzeugt wird.

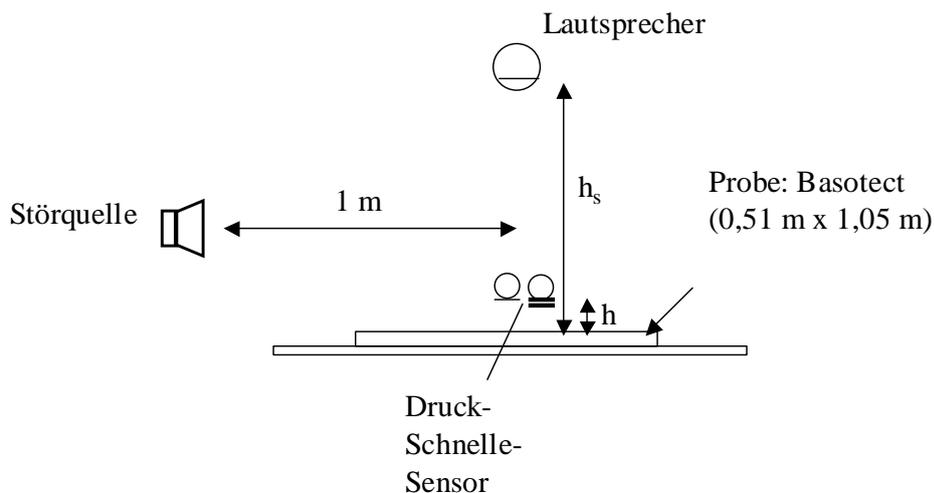


Abbildung 29: Messaufbau zur Bestimmung des Einflusses einer Störquelle im Abstand von 1 Meter

Die Messergebnisse des Schallabsorptionsgrades sind in Abbildung 30 dargestellt.

Unter den genannten Umgebungsbedingungen werden bei einem Signal-Rausch-Abstand von bereits 20 dB die Messergebnisse kaum beeinflusst. Im Frequenzbereich unterhalb von 1.300 Hz führt ein Signal-Rausch-Abstand von 10 dB zu Abweichungen in den Ergebnissen gegenüber denen ohne Störgeräuscheinfluss. Oberhalb von 1.300 Hz besitzt ein Störgeräusch mit einem Signal-Rausch-Abstand von 10 dB kaum Einfluss auf die Messergebnisse. Andererseits sollte zum Erreichen eines akzeptablen Wertes für die Kohärenz während einer Messung der Signal-Rausch-

Abstand mindestens 30 dB betragen. Der Hersteller weist darauf hin, dass Schallschnelle-Sensoren weniger stör anfällig gegenüber Störquellen sind als Schalldruckwandler ([DE BREE 2005], [DE BREE 2009]).

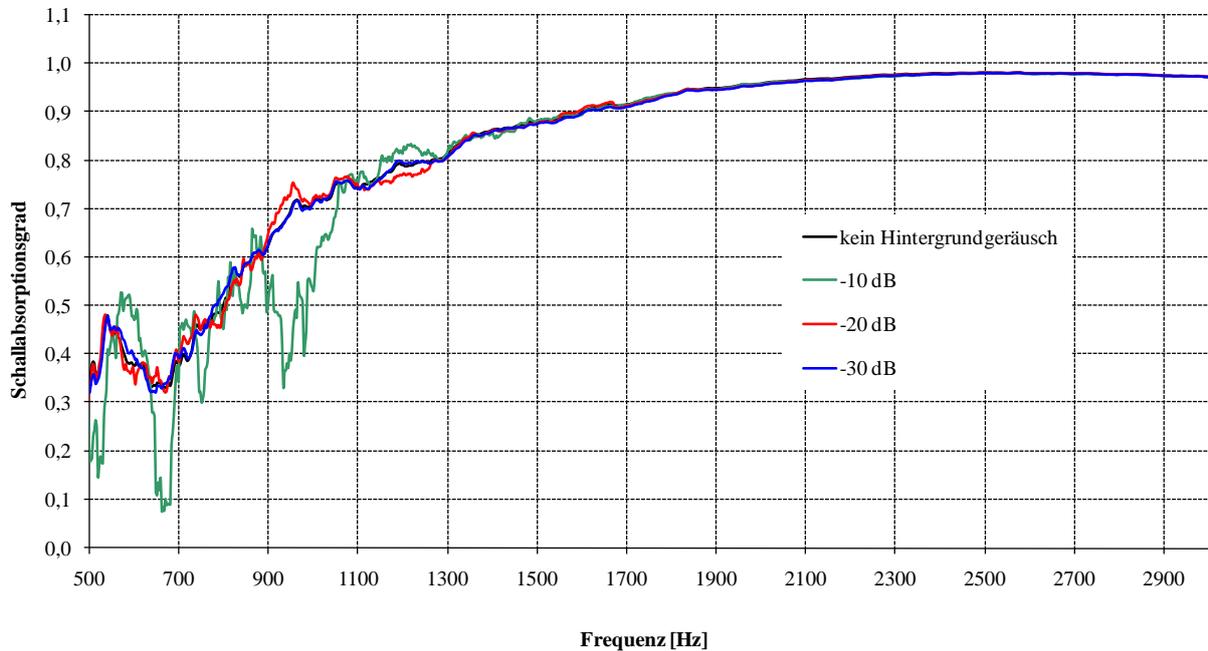


Abbildung 30: Schallabsorptionsgrad von Basotect bei verschiedenen von einer Störquelle erzeugten Schalldruckpegeln der Oktave 2.000 Hz in Bezug auf den durch den Lautsprecher des Messsystems generierten Oktavschalldruckpegel (2.000 Hz)

### Winkelabhängigkeit / Signal-Rausch-Abstand

Des Weiteren wurden messtechnische Untersuchungen bei winkelabhängiger Anordnung einer Störquelle durchgeführt.

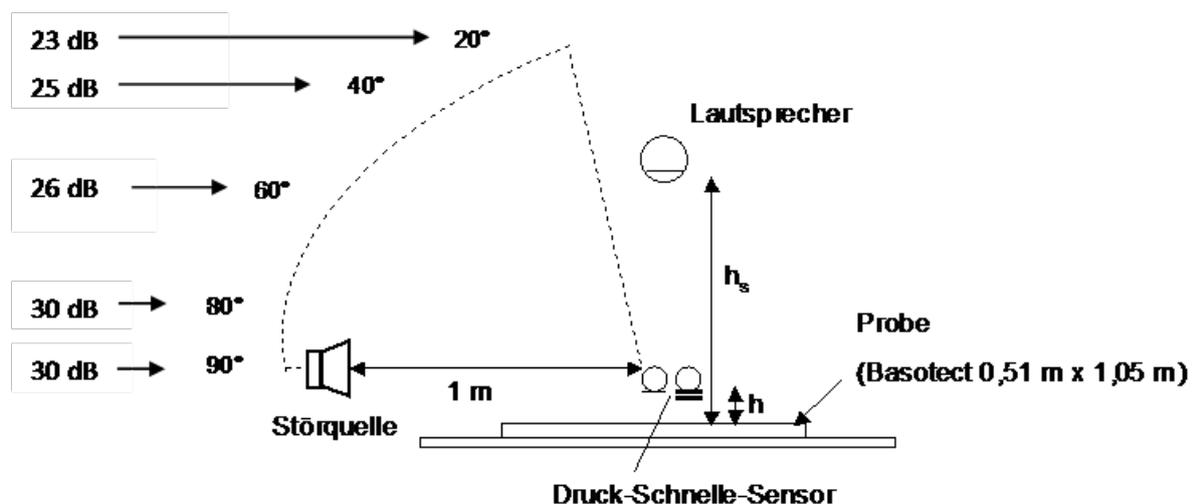


Abbildung 31: Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses von winkelabhängigen Hintergrundgeräuschen und ermittelter notwendiger Signal-Rausch-Abstand

Als Störquelle kam wiederum ein Lautsprecher zum Einsatz, der in Bezug auf den Ort des Messsystems zwischen  $20^\circ$  und  $90^\circ$  angeordnet war. Dabei wurde der notwendige Signal-Rausch-Abstand ermittelt. In Abbildung 31 ist der prinzipielle Messaufbau dargestellt. Bei einer Anordnung der Störquelle im Winkel von  $20^\circ$  im Verhältnis zum Druck-Schnelle-Sensor sollte der Signal-Rausch-Abstand mindestens 23 dB betragen. Die Untersuchungen, bei denen die Störquelle in Winkeln von größer als  $20^\circ$  angeordnet wurde, ergaben, dass für genaue Messergebnisse höhere Signal-Rausch-Abstände notwendig sind.

### 2.2.3 Bestimmung des Schallabsorptionsgrads an Asphaltplatten

Um die Genauigkeit des Messverfahrens bei kleiner werdender Asphaltprobenfläche zu untersuchen, wurden mittels Walzsektorverdichter aus einem offenporigem Asphaltgemisch (PA 8 mit PmB 40-100/65 H) 2 x 20 Asphaltplatten 2 unterschiedlicher Hohlraumgehalte (Variante A und B, Mischgut wie in Abschnitt 2.1.1) hergestellt. Die Platten eines Hohlraumgehalts wurden anschließend als eine ca.  $1,7 \text{ m}^2$  große Fläche ausgelegt und im Weiteren systematisch reduziert. Vor jedem Reduzierungsschritt erfolgte die Messung des Schallabsorptionsgrads mittels Druck-Schnelle-Sensor. Auf diese Weise konnte die Genauigkeit des Messverfahrens bei kleiner werdenden Probenflächen untersucht werden. Der gewählte Messabstand  $h$  betrug dabei 1 cm. Abbildung 32 zeigt den verwendeten Messaufbau über der zu untersuchenden Asphaltfläche.

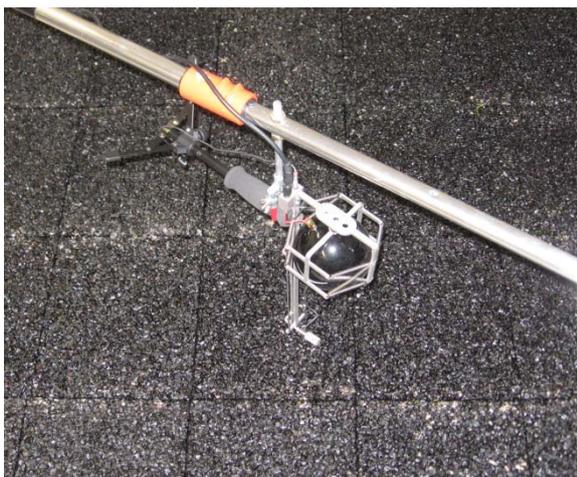


Abbildung 32: Bestimmung des Schallabsorptionsgrads an im Walzsektorverdichter hergestellten Asphaltplatten, systematisch Verkleinerung der Versuchsfläche

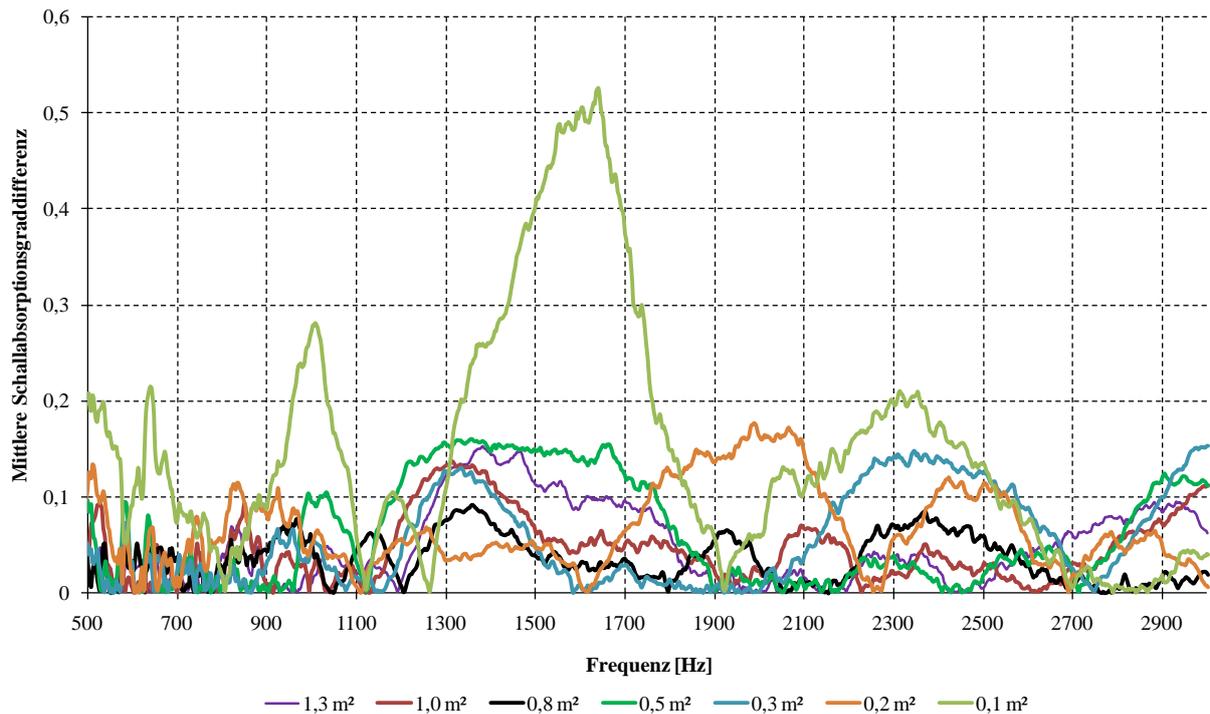


Abbildung 33: Mittlere Differenz des Schallabsorptionsgrads einer systematisch reduzierten Fläche offenporigen Asphalts (Variante A und B; PA 8 mit PmB 40-100/65 H)

In Abbildung 33 sind die mittleren Schallabsorptionsgraddifferenzen dargestellt, wobei die Messergebnisse für eine Fläche von 1,7 m<sup>2</sup> (20 Asphaltplatten) als Bezugswerte gelten. Aus den Untersuchungen ergibt sich, dass die Prüfoberfläche mindestens 0,3 m<sup>2</sup> (640 mm x 520 mm) betragen sollte. Dies entspricht einer Fläche von 2 x 2 Asphaltplatten. Die Ergebnisse des Schallabsorptionsgrads sind dabei außerdem von der Beschaffenheit der jeweiligen Asphaltplatte abhängig, über der das Messsystem angeordnet wurde. Daher sind auch bei größeren untersuchten Flächen teilweise höhere Schallabsorptionsgraddifferenzen erkennbar. Die geringsten Unterschiede im Vergleich zur Fläche von 1,7 m<sup>2</sup> werden bei einer Fläche von 0,8 m<sup>2</sup> erreicht. Um präzisere Ergebnisse zu erhalten, erweist sich eine größtmögliche Probenfläche in jedem Falle als vorteilhafter.

In Anhang C sind die Untersuchungsergebnisse der Plattenvariante B mit differierendem Hohlraumgehalt dargestellt.

### Untersuchungen an einer Stoßstelle der Asphaltplatten

Zusätzlich wurden Untersuchungen an einer Stoßstelle der aneinandergelegten Asphaltplatten durchgeführt. Dazu wurden Messungen mit dem Druck-Schnelle-Sensor mit einem Messabstand von 1 cm an den in Abbildung 34 dargestellten Messpunkten

auf einer Asphaltplattenfläche von 1,7 m<sup>2</sup> durchgeführt. Abbildung 35 zeigt die Messergebnisse des Schallabsorptionsgrads. Daraus ist ersichtlich, dass im Bereich der Stoßstelle eine größere Schallabsorption zu verzeichnen ist, die durch einen minimalen Zwischenraum zwischen zwei Platten verursacht wird, der sich bei Positionierung der einzeln im Walzsektorverdichter hergestellten Platten nicht vermeiden lässt.

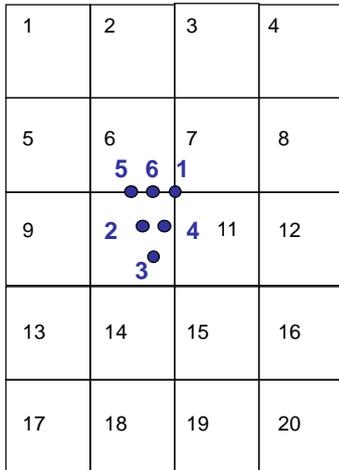


Abbildung 34: Anordnung der Asphaltplatten und der gewählten Messpunkte zur Untersuchung einer Stoßstelle zwischen den Asphaltplatten

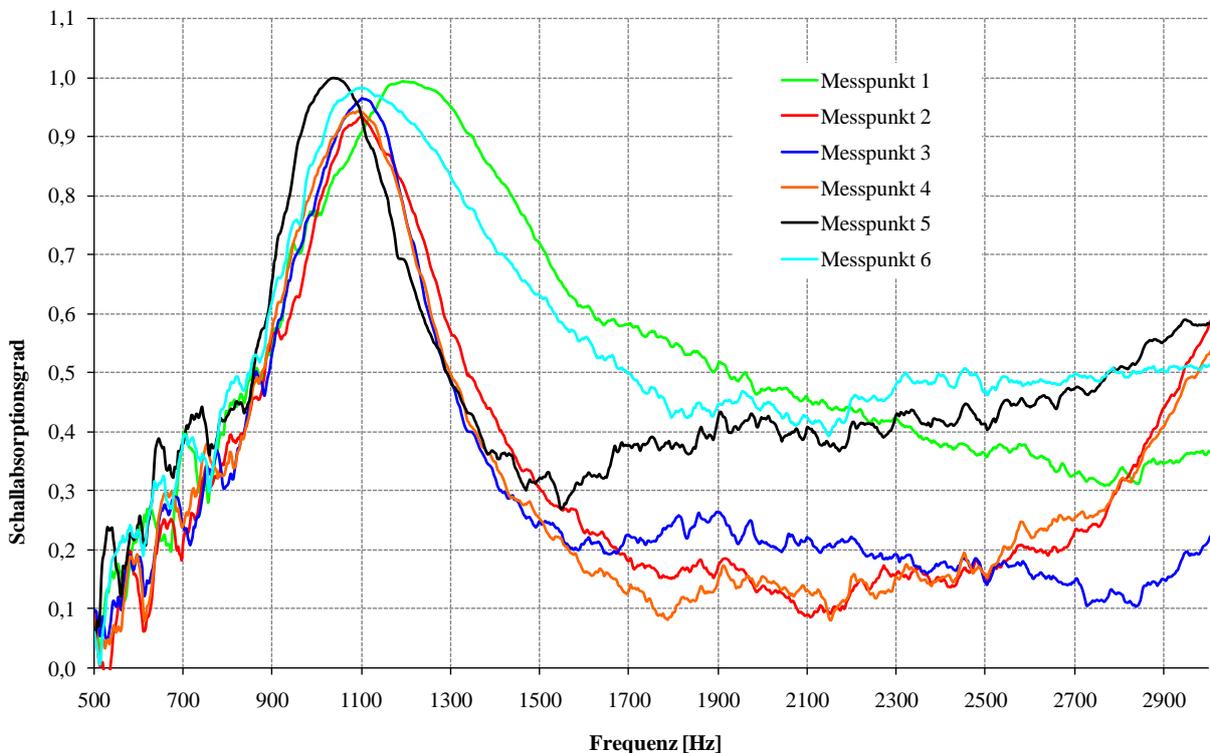


Abbildung 35: Schallabsorptionsgrad von offenporigem Asphalt (PA 8 mit PmB 40-100/65 H, Variante A): Messpunkte 1, 5 und 6 jeweils in 1 cm Höhe über Stoßstelle zwischen Asphaltplatten; Messpunkte 2 bis 4 jeweils in 1 cm Höhe über Asphaltplatte

## 2.2.4 Vergleichende Untersuchungen an Bohrkernen im Kundtschen Rohr nach DIN EN ISO 10534-2

Aus vier für die Flächenreduktionsuntersuchungen verwendeten Asphaltplatten (siehe Abschnitt 2.2.3) wurden anschließend jeweils zwei Bohrkern entnommen, um die Absorptionseigenschaften nach [DIN EN ISO 10534-2] mit Hilfe des Kundtschen Rohrs bestimmen zu können. Es kamen diejenigen Asphaltplatten zur Anwendung, denen während der Untersuchungen mit dem PU-Sensor ein wesentlicher Einfluss auf die Messwerte zugeordnet werden konnte, da das Messsystem direkt über diesen Platten angeordnet wurde. Abbildung 36 zeigt den Vergleich der Ergebnisse des

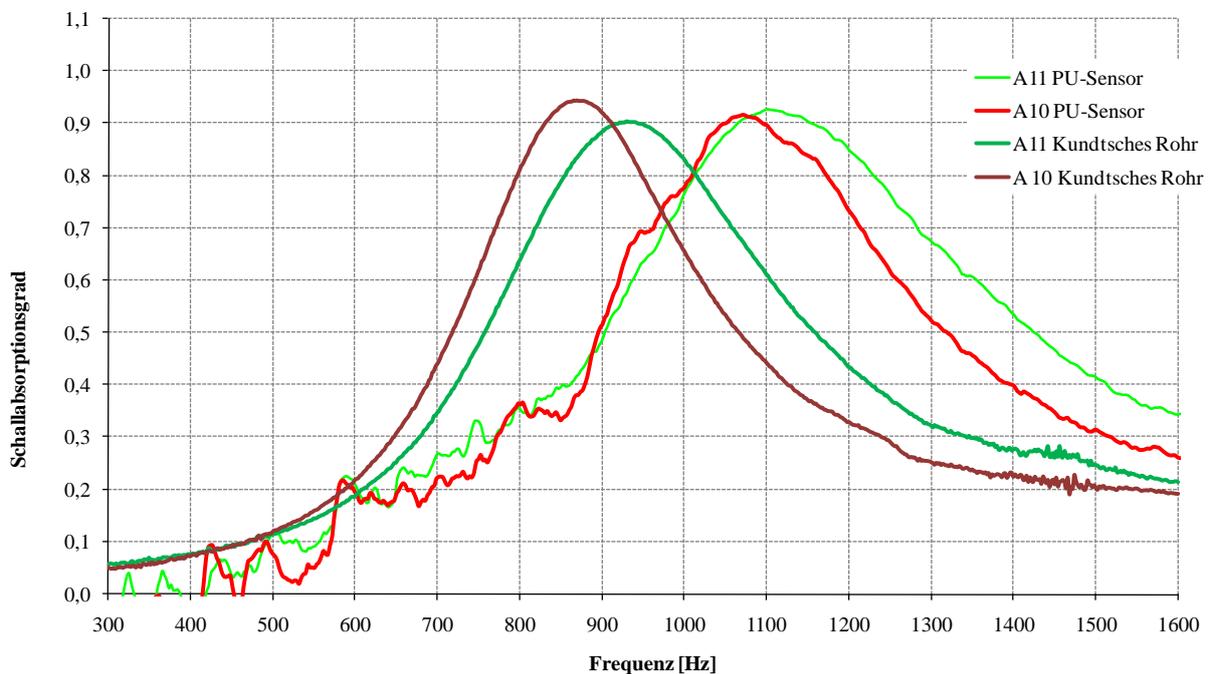


Abbildung 36: Schallabsorptionsgrad aus messtechnischen Untersuchungen mit dem PU-Sensor an einer Versuchsfläche offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40-100/65 H, Variante A) sowie mit dem Kundtschen Rohr an Bohrkernen aus der jeweiligen Asphaltplatte über der der PU-Sensor angeordnet wurde; dargestellt sind die Ergebnisse der Platten mit der Bezeichnung A 11 und A 10

Schallabsorptionsgrads aus den messtechnischen Untersuchungen mit dem PU-Sensor an einer Asphaltfläche und mit dem Kundtschen Rohr an einem Bohrkern aus der jeweiligen Platte offenporigen Asphalts. Die Asphaltplatten wurden durchnummeriert, im Folgenden sind demnach die Messergebnisse der Platten A 11 und A 10 dargestellt. In der Abbildung sind die Maxima des Schallabsorptionsgrads aus Untersuchungen im Kundtschen Rohr in einem um 150 Hz niedrigeren Frequenzbereich gegenüber den Ergebnissen mit PU-Sensor zu finden. Erklärbar ist dieser Umstand damit, dass bei den Untersuchungen an der Asphaltfläche (vgl. Abschnitt 2.2.3) der Einfluss aller benachbarten Asphaltplatten durch den PU-Sensor ebenfalls aufge-

zeichnet wird. Der im Kundtschen Rohr untersuchte Bohrkern ist demgegenüber lediglich ein Ausschnitt einer einzelnen Asphaltplatte.

Weitere Ergebnisse der Plattenvarianten A und B, die ebenfalls eine Frequenzverschiebung des Absorptionsgradmaximums aufweisen, befinden sich in Anhang D.

### **2.2.5 Messvorschrift für in-situ-Messungen**

Diesem Bericht ist in Anhang A eine Messvorschrift zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrads mit Hilfe des Druck-Schnelle-Sensors der Firma Microflown Technologies beigefügt. In der Messvorschrift sind zusätzliche Erkenntnisse aus den im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten messtechnischen Untersuchungen an realen Probestrecken berücksichtigt worden.

## **2.3 Ergebnisse Arbeitspaket C: Untersuchung der Temperaturabhängigkeit akustischer Eigenschaften**

### **2.3.1 Messtechnische Untersuchung an Asphaltplatten**

Anknüpfend an die im Arbeitspaket B gewonnenen Erkenntnisse über die benötigte Mindestprobenfläche (~ 9 Asphaltplatten) war die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit relativ schwierig durchzuführen. So konnten die nötigen neun Probenplatten nicht in genügend kurzen Zeitabständen hergestellt werden. Dies wäre für einen Abkühlvorgang mit genügender Homogenität nötig gewesen. Alternativ mussten die Untersuchungen an neun bereits abgekühlten und wiedererwärmten Asphaltplatten durchgeführt werden. Während des erneuten Abkühlens wurde die erwärmte Asphaltfläche anschließend akustisch mittels PU-Sensor vermessen.

Aus Abbildung 37 können die Werte des Schallabsorptionsgrads entnommen werden. Im Bereich des Maximums der Absorption sind die Abweichungen der Ergebnisse besonders gering. Dies lässt sich auch in Abbildung 38 feststellen. Die maximale Differenz unter Bezugnahme auf die Ergebnisse der Schallabsorption bei 70 °C innerhalb des Mischguts beträgt ca. 0,3.

Aufgrund dessen, dass im Wärmeschrank wiedererwärmte Platten im Gegensatz zu frisch hergestellten Platten eine Anfangstemperatur von nur ca. 70 °C statt 120 °C besitzen ist der untersuchte Temperaturbereich kleiner als ursprünglich geplant. Um diese Lücke zu schließen, wurden zum Vergleich Einzelplatten unterschiedlichen

Hohlraumgehalts (über die Einwaage gesteuert) und identischer Höhe unter Verwendung von 2 offenporigen Asphaltgemischen im Walzsektorverdichter hergestellt.

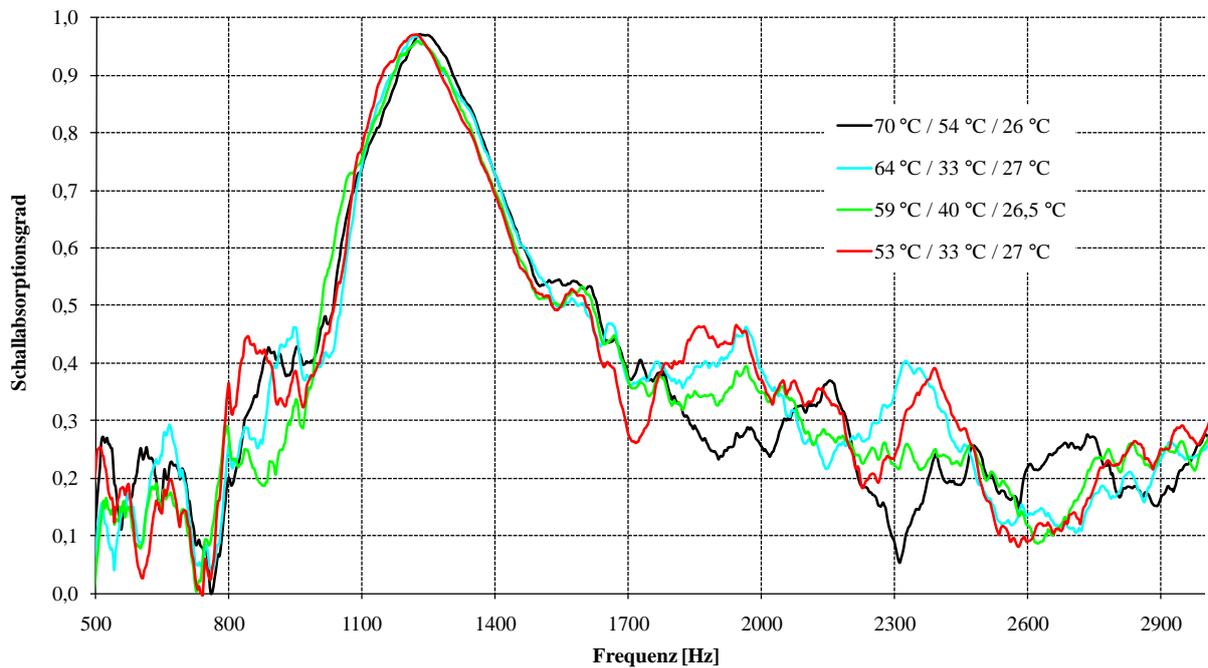


Abbildung 37: Schallabsorptionsgrad einer Fläche von neun wiedererwärmten offenporigen Asphaltplatten (0,8 m<sup>2</sup>) der Variante B bei unterschiedlichen Temperaturen (innerhalb der Platte / an der Plattenoberfläche / in 2 cm Abstand über der Asphaltplatte)

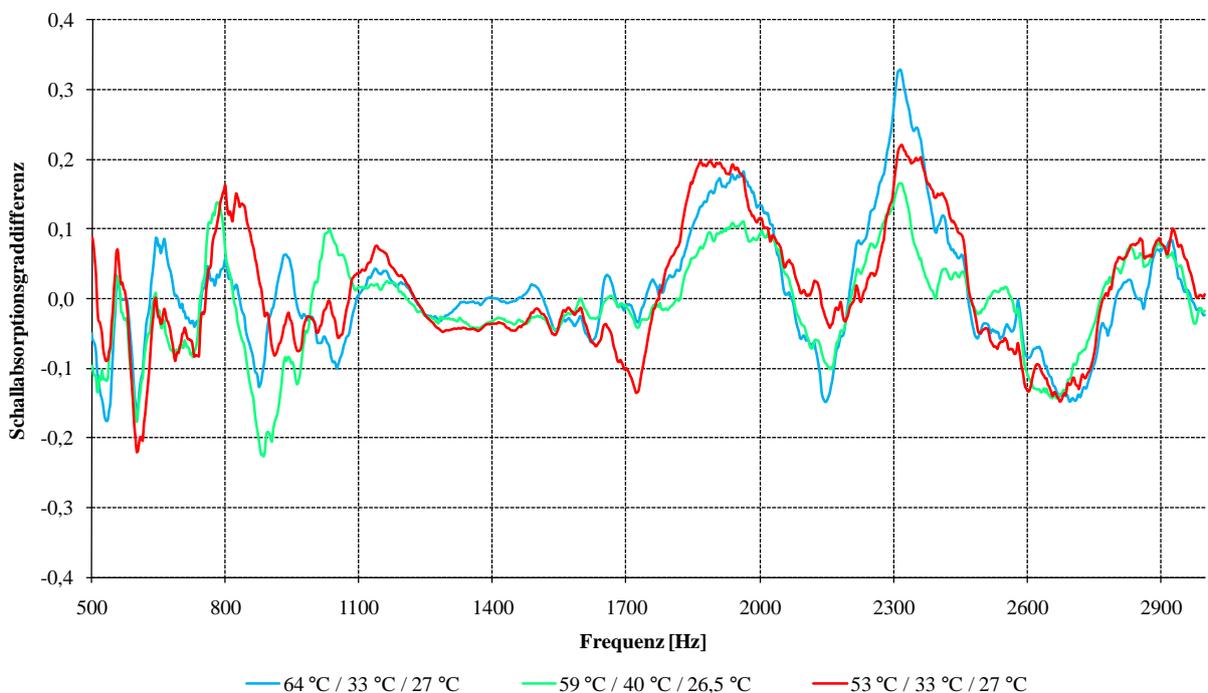


Abbildung 38: Schallabsorptionsgraddifferenz aus messtechnischen Untersuchungen einer 0,8 m<sup>2</sup> großen Fläche aus offenporigem Asphalt (Variante B) bei unterschiedlichen Temperaturen innerhalb der Platte / an der Plattenoberfläche / in 2 cm Abstand über der Asphaltplatte; Bezugswerte sind die Messwerte bei einer Temperatur innerhalb des Asphalts von 70 °C

Mischgutvariante A/B entspricht dem für die Herstellung der Marshall-Probekörper verwendeten Mischgut (vgl. Abschnitt 2.1.1) Für die 2 Variante stand ein vergleichbares Gemisch (Mischgutvariante C) zur Verfügung (PA 8 mit PmB 40/100-65 A). Die Asphaltplatten wurden nach Fertigstellung zunächst im für die Herstellung erforderlichen Rahmen belassen, um deren Formkonstanz zu gewährleisten (vgl. Abbildung 39).



Abbildung 39: Asphaltplatte mit für die Herstellung notwendigem Stahlrahmen

Während des Abkühlens wurden die Platten mit dem in Abschnitt 2.2.1.2 vorgestellten Messsystem vermessen (vgl. Abbildung 40). Die so gewonnen Messungen ergänzen qualitativ die großflächigen Messungen an der Plattenvariante B sind aber aufgrund der Reflexionen am Rahmen und der zu kleinen Probenfläche von einer Asphaltplatte nicht quantitativ nutzbar. Für eine quantitative Auswertung ist es notwendig, die Reflexionen am Rahmen heraus zurechnen. Dies könnte ebenfalls Bestandteil weiterer Untersuchungen sein. Um innerhalb der Projektbearbeitung den Einfluss der Reflexionen am herstellungsbedingten Rahmen auf die akustischen Messwerte abschätzen zu können, wurden im Vorfeld Testmessungen an kalten Asphaltplatten (Variante A und B) durchgeführt. Hierbei wurden einzelne Platten unter verschiedenen Bedingungen (mit und ohne Rahmen) mehrmals akustisch vermessen. Die im Anschluss gegenüber gestellten Ergebnisse zeigten zwar wie schon erwähnt einen deutlichen Einfluss des Rahmens, doch war dieser bei allen untersuchten Platten vergleichbar.

Während des Abkühlens der einzelnen frisch hergestellten Platten und wiedererwärmten Plattenfläche wurden stets kontinuierlich die Temperatur in Höhe des Sen-

sors, auf der Oberfläche der sich abkühlenden Platte und, soweit möglich, innerhalb der jeweiligen Platte gemessen.



Abbildung 40: akustische Messungen während des Abkühlprozesses einer Asphaltplatte mit für die Herstellung notwendigem Stahlrahmen; Temperaturüberprüfung in Höhe der Sonde, auf der Asphalt-oberfläche, im Asphalt

### Untersuchungen des Einflusses von Feuchtigkeit auf der Asphaltoberfläche

Da bei Einbau von Asphalt Wasser zur Befeuchtung der Walzoberflächen zum Einsatz kommt, wurden im Labor Untersuchungen zum Einfluss von auf den Asphalt aufgebracht Feuchtigkeit auf die akustischen Eigenschaften durchgeführt. Hierfür erfolgte abermals die Herstellung einzelner Platte aus offenporigem Asphalt (Mischgutvariante A/B und C) mittels Walzsektorverdichter.

Der zur Gewährleistung der Formstabilität einer frisch hergestellten Asphaltplatte notwendige Stahlrahmen wurde ebenfalls für die Messungen belassen (vgl. Abbildung 39), so dass auch hier wieder die Absolutwerte der akustischen Eigenschaften nicht fehlerfrei bestimmt werden können, da eine größere Untersuchungsfläche ohne gestörte Randbereiche notwendig ist (vgl. Abschnitt 2.2.1.4).

In Abbildung 41 sind ergänzend die Ergebnisse des Schallabsorptionsgrads dargestellt. Zur Untersuchung des Feuchtigkeitseinflusses wurde im Rahmen der Untersuchung systematisch Wasser auf die Asphaltplatte gebracht. Die Ergebnisse zeigen,

dass auch in diesem Fall nur geringe Abweichungen des Schallabsorptionsgrades im Bereich des Maximums auftreten. Weitere Darstellungen befinden sich in Anhang E.

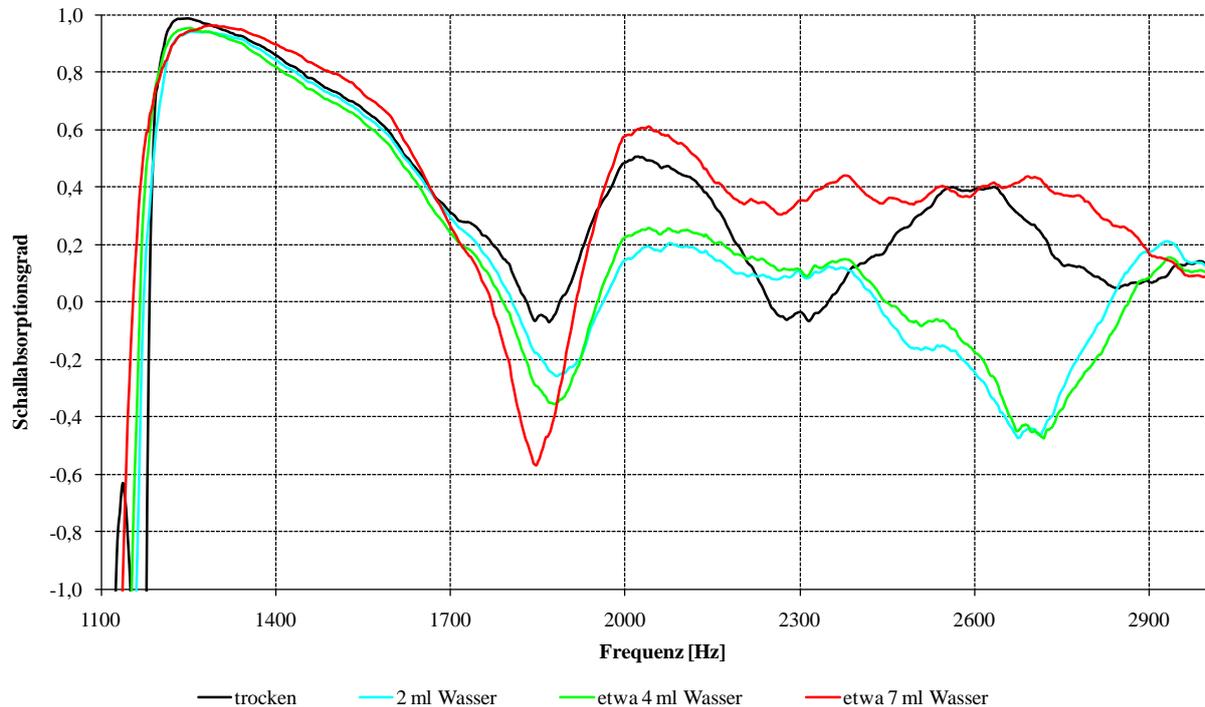


Abbildung 41: Schallabsorptionsgrad der Asphaltplatte C 6 bei unterschiedlichen Mengen an auf die Platte aufgebrachtem Wasser, Metallrahmen um die Platte herum herstellungsbedingt erforderlich

### 2.3.2 Direkte volumetrische Messung des zugänglichen Hohlraumgehalts

Aus den für die Flächenreduktionsmessungen vorgesehenen Asphaltplatten (Variante A und B) wurden Bohrkerns dort entnommen, wo sich vorher im Rahmen der akustischen Messungen der Schnelle-Sensor befand. Nach längerer Trockenzeit (vgl. Abschnitt 2.3.2) der herausgebohrten Probekörper wurden an diese abermals mittels des in Kapitel 2.1.5 beschriebenen Verfahrens der zugängliche Hohlraumgehalt ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 aufgeführt.

### 2.3.3 Vergleich der gewonnenen Daten des zugänglichen Hohlraumgehalts

Die direkt gemessenen und mittels akustischer Parameter bestimmten zugänglichen Hohlraumgehalte der untersuchten Probekörper sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Gegenüberstellung Gesamthohlraumgehalt und zugänglicher Hohlraumgehalt bestimmt mit dem Verfahren gemäß Abschnitt 2.1.4.4 sowie direkt gemessen gemäß dem Verfahren aus Abschnitt 2.1.5 für Bohrkern aus Asphaltplatten (Variante A und B)

Bez. Bohrkern	HRG (Ausmessverfahren) [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (gemessen) [Vol.-%]	Differenz HRG <sub>A</sub> -H <sub>zu,gem.</sub> [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	Differenz H <sub>zu,gem.</sub> -H <sub>zu,gem.</sub> [Vol.-%]
A6-1	31,30	25,70	5,60	23,50	2,20
A6-2	32,70	27,90	4,80	23,90	4,00
A7-1	32,10	28,60	3,50	23,50	5,10
A7-2	33,20	30,30	2,90	23,60	6,70
A10-1	30,30	29,30	1,00	23,80	5,50
A10-2	30,90	29,90	1,00	22,80	7,10
A11-1	29,80	29,40	0,40	23,60	5,80
A11-2	31,90	31,90	0,00	23,50	8,40
B6-1	28,40	27,60	0,80	22,70	4,90
B6-2	28,90	28,50	0,40	23,20	5,30
B7-1	29,50	27,90	1,60	22,80	5,10
B7-2	27,90	26,20	1,70	22,80	3,40
B10-1	29,20	25,90	3,30	22,80	3,10
B10-2	27,00	25,50	1,50	21,80	3,70
B11-1	27,40	24,20	3,20	22,20	2,00
B11-2	28,90	26,10	2,80	22,40	3,70

Zur Bestimmung der akustischen Parameter wurden die Probekörper abermals im Kundtschen Rohr vermessen. Die resultierenden Abweichungen sind hier deutlich größer als diejenigen, die bei der Validierung des Verfahrens an Marshall-Probekörpern gefunden wurden (vgl. Kapitel 2.1.6). Wie aus Abbildung 42 deutlich hervorgeht, geben die Schätzparameter jedoch relativ gut die gefundene Messkurve wieder. Blau dargestellt sind die Messkurven A6-1 bzw. A11-2 (d.h. Messung Nr. 1 für Platte A6 und Messung Nr. 2 für Platte A11). Die rot dargestellten Verläufe stellen die berechneten Werte des Absorptionsgrads dar, wobei als Materialparameter jene Werte eingesetzt wurden, die mit Hilfe des Verfahrens nach Abschnitt 2.1.4 berechnet wurden. Für beide Asphaltplatten der Variante A sind die resultierenden Messkurven sehr ähnlich, was sich auch im berechneten zugänglichen Hohlraumgehalt (Tabelle 5) widerspiegelt. Auffällig ist, dass die mit Wasser bestimmten zugängli-

chen Hohlraumgehalte untereinander stärker variieren als die theoretisch berechneten, wobei die berechneten Werte stets deutlich unterhalb der gemessenen Werte liegen. Auch hier ist die sich ergebende Differenz größer als die angestrebte Genauigkeit von 1 Vol.-%. Bis zum aktuellen Zeitpunkt konnte noch nicht geklärt werden, worauf die beschriebenen Unterschiede zurückzuführen sind. Es besteht auf diesem Gebiet unbedingt weiterer Forschungsbedarf.

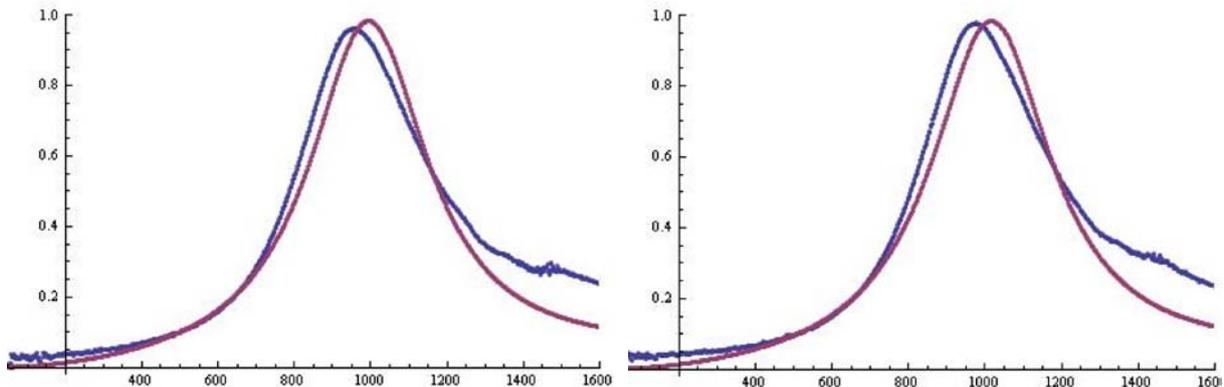


Abbildung 42: Messwertverläufe (blau) und Graphen erstellt aus berechneten Parametern (rot) für Bohrkerne aus den Platten A6 (Messung A6-1, links) und A11 (Messung A11-2, rechts)

### 2.3.4 Weiterentwicklung des Modells

Die Temperatur hat sowohl Einfluss auf die Eigenschaften einer Asphaltsschicht als auch auf das Messsystem (vgl. Abbildung 43):

- Temperaturerhöhung bewirkt eine Volumenausvergrößerung des Bindemittels und dadurch eine Verringerung des (zugänglichen) Hohlraumgehalts
- Temperaturgradient innerhalb und oberhalb einer Asphaltsschicht führt zu nichtkonstantem Schallgeschwindigkeitsprofil
- Temperatur innerhalb einer Asphaltsschicht beeinflusst E-Modul des Materials

Während der erste Punkt „Volumenänderung“ relativ leicht korrigiert werden könnte, erfordern die Punkte zwei und drei eine sehr aufwändige Modellmodifikation. Wie Abbildung 37 bzw. Abbildung 38 jedoch aufzeigen, ist das Modell bereits in der vorhandenen Fassung auf Messungen bei höherer Temperatur (wie bei den durchgeführten Untersuchungen aufgetreten) anwendbar. Bereits im Rahmen theoretischer Vorbetrachtungen konnte dies gezeigt werden (vgl. Abbildung 44).

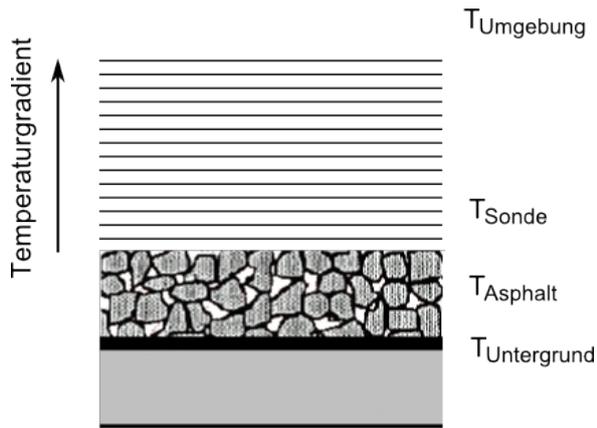


Abbildung 43: Einfluss der Temperatur auf Fahrbahn und Messsystem

Sinnvoll wäre, wenn überhaupt, eine weitere Präzisierung des Modells für den höheren Temperaturbereich, der für den Verdichtungsprozess relevant ist. Dafür sind jedoch die zum Teil unter sehr schwierigen Bedingungen gewonnenen Daten noch nicht ausreichend, so dass hier ebenfalls weiterer Forschungsbedarf besteht.

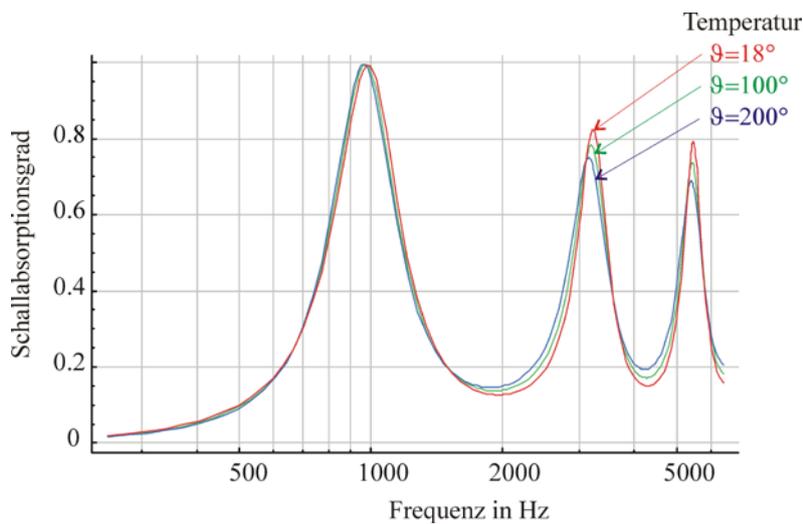


Abbildung 44: Einfluss der Temperatur auf Fahrbahn und Messsystem

## 2.4 Ergebnisse Arbeitspaket D: Bestätigung der Genauigkeit des Verfahrens an realen Probestrecken

### 2.4.1 Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts



Abbildung 45: Einbau von offenporigem Asphalt auf der Autobahn A24 im Rahmen des Forschungsprojektes „Leiser Verkehr II“ ([BRANDENBURG 2009])

Zwischen den Abfahrten Neuruppin und Fehrbellin auf der Autobahn A24 (vgl. Abbildung 45) entstanden im Rahmen des Forschungsprojekts „Leiser Verkehr II“ Fahrbahnabschnitte (im Weiteren Felder genannt) mit unterschiedlichen Fahrbahnaufbauten, u. a. mit ein- und zweischichtigem offenporigem Asphalt im Deckschichtbereich. Letztere Varianten konnten für einen ersten Einsatz des in-situ-Messsystems während des Asphalteinbaus auf realen Probestrecken genutzt werden.

Folgende Felder bzw. Bauabschnitte wurden für in-situ Messungen gewählt:

Tabelle 6: ausgewählte Felder für in-situ Messungen

Feld Nr.	Schicht(en)	Bindemittel	Datum der Messung	Messstationen
3	PA 8+PA 16	PmB 40/100-65 A	07.03.09	209+150
4	PA 8+PA 11	PmB 40/100-65 A	07.03.09	209+800
11	PA 8	70/100, tecRoad Premium	12.09.09	209+550
12	PA 8	PmB 40/100-65 A	12.09.09	209+000

Auf den Feldern 11 und 12 wurde einschichtiger und auf den Feldern 3 und 4 zweischichtiger offenporiger Asphalt eingebaut. Auf den Feldern mit zweischichtigem offenporigem Asphalt konnte die untere grobkörnige Schicht lediglich im ausgekühlten Zustand akustisch vermessen werden. Alle weiteren Messungen erfolgten direkt während des Asphalteinbaus. Es wurde versucht, zwischen den einzelnen Walzvorgängen bzw. Verdichtungsstufen bis zu drei Messungen an einer Stelle zu erreichen. Um einen genügend großen Signal-Rausch-Abstand zu gewährleisten, mussten die Walzen während der Messung weit genug entfernt sein. Dies konnte jedoch nicht

immer eingehalten werden, so dass nicht bei allen Verdichtungsstufen akustische Messungen möglich waren.

Während der durchgeführten Untersuchungen wurden stets die Asphalttemperatur sowie die Lufttemperatur in Höhe des Messensors überprüft. Letztere Temperatur betrug bei allen Messpunkten maximal 46 °C. Die Messungen wurden zudem so durchgeführt, dass der Abstand  $h$  zwischen Asphaltoberfläche und Sensor ca. 2 cm betrug. Da die Sonde während jeder Messung handgehalten werden musste unterlag der Abstand  $h$  zwangsläufig Schwankungen unbekannter Größenordnung.

Die Messungen der einschichtigen und zweischichtigen offenporigen Beläge erfolgten zu unterschiedlichen Terminen. Am ersten Messtag konnte während der gesamten Messungen mittels speziell ausgerüstetem Messfahrzeug (Abbildung 46) die vorherrschende Windgeschwindigkeit überprüft werden, um gegebenenfalls unplausible Ergebnisse der akustischen Messungen erklären zu können. In Anhang F befindet sich eine Zusammenstellung der ausgewerteten Messergebnisse. Es kann davon ausgegangen werden, dass die durchgeführten in-situ Messungen unter günstigen Windbedingungen erfolgten.



Abbildung 46: Messfahrzeug zur Überwachung der Windgeschwindigkeiten während der in-situ Messungen

Der für die akustischen Messungen verwendete Messaufbau ist in Abbildung 47 zu sehen.

Aus den mit Hilfe des Druck-Schnelle-Sensor gewonnen akustischen Messdaten, insbesondere aus dem Wert des Absorptionsgrads, wurden mit dem in Abschnitt 2.1.4 entwickelten Verfahren die Porosität und Schichtdicke des jeweiligen Messpunktes bestimmt.



Abbildung 47: Messaufbau zur Bestimmung der Oberflächenimpedanz einer Asphaltsschicht mithilfe des Druck-Schnelle-Sensors

Zur Kontrolle der theoretisch ermittelten Parameter wurden im Bereich der Messpunkte zu einem späteren Zeitpunkt Bohrkern aus der Fahrbahnoberfläche entnommen. Mittels des in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Verfahrens wurde an den Bohrkernen der zugängliche Hohlraumgehalt volumetrisch bestimmt und mit den Werten verglichen, die aus den in-situ-Messdaten berechnet wurden.

#### 2.4.1.1 Feld 3 – zweischichtiger offenporiger Asphalt

Die akustischen Messungen auf den Feldern mit zweischichtigem offenporigem Asphalt (Feld 3 und 4) erfolgten in zwei Schritten: Zunächst wurde der zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Dicke der bereits gefertigten und erkalteten unteren offenporigen Asphaltsschicht (PA 16 bzw. PA 11) mit Hilfe des in Abschnitt 2.1.4 entwickelten Verfahrens bestimmt. Anschließend erfolgten die Messungen der oberen Schicht (PA 8) während des Verdichtungsprozesses des Asphaltmischgutes.

Für die untere offenporige Schicht von Feld 3 wurden ein zugänglicher Hohlraumgehalt von 17,7 Vol.-% sowie eine Schichtdicke von 2,3 cm, jeweils gemittelt aus vier Einzelmessungen, berechnet. Sowohl Schichtdicke wie auch Hohlraumgehalt sind deutlich zu gering ermittelt

Anhang H und I zeigt für jede Einzelmessung die berechneten Parameter sowie den gemessenen und theoretischen Verlauf der Einzelmessungen des Absorptionsgra-

des. Als mittlere Korngröße in Gleichung (22) wurde der Wert  $\bar{D} = 15,05$  mm, resultierend aus der tatsächlichen Korngrößenverteilung, angenommen. Die Umgebungstemperatur während den Messungen betrug ca. 28 °C bei sonnigem Wetter.

Die gemessenen Schallabsorptionsgrade für die verschiedenen Verdichtungsstufen der oberen Schicht (PA 8) sind in Abbildung 48 dargestellt<sup>2</sup>. Eine Verdichtungsstufe entspricht dabei einer Walzenvorbeifahrt. Verdichtungsstufe v0 ist somit die Messung unmittelbar nach Aufbringen des Asphaltgemischs durch den Fertiger, Stufe v1 die Messung nach einem Walzvorgang usw. Da die Messungen teilweise nahe an den Walzen erfolgten und diese einen relativ hohen Hintergrundpegel abstrahlen, waren für einige Messungen die Signal-Rausch-Abstände zu gering. In diesen Fällen konnten die Messungen nicht verwendet werden. Folglich können nicht für alle Verdichtungsstufen Messwerte dargestellt werden.

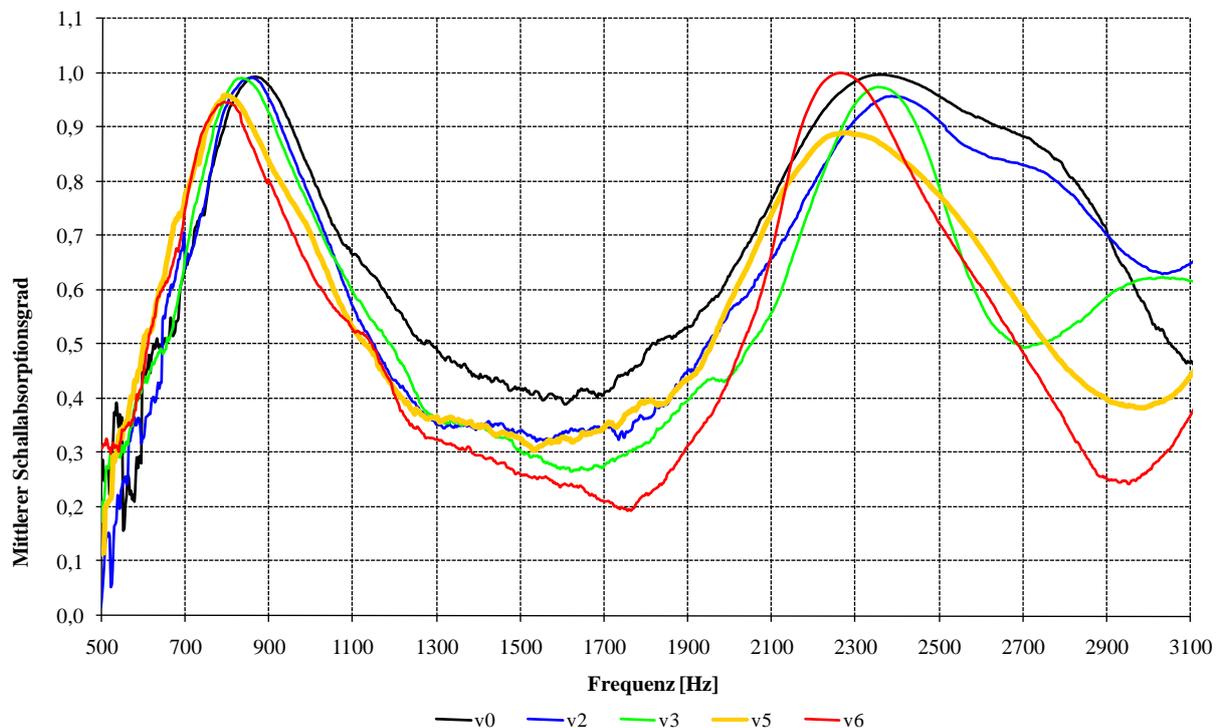


Abbildung 48: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 A) während der Verdichtung; (Feld 3; Verdichtungsstufen v0 bis v6 entsprechen der Anzahl der Walzübergänge)

Es zeigt sich, dass das Hauptmaximum des Schallabsorptionsgrads mit zunehmender Verdichtungsstufe in einen tieferen Frequenzbereich (auf etwa 800 Hz) verschoben wird. Zusätzlich kommt es dabei zu einer Verringerung des Maximums des Schallabsorptionsgrads.

<sup>2</sup> Wurden für eine Verdichtungsstufe mehrere Einzelmessungen durchgeführt, so ist in der Abbildung der Mittelwert über diese Einzelmessungen dargestellt.

In Abbildung 49 sind die gemessenen Absorptionsgrade im Vergleich zu den theoretisch ermittelten Werten dargestellt. Letztere wurden mit den zugänglichen Hohlraumgehalten bzw. Schichtdicken aus Tabelle 7 berechnet.

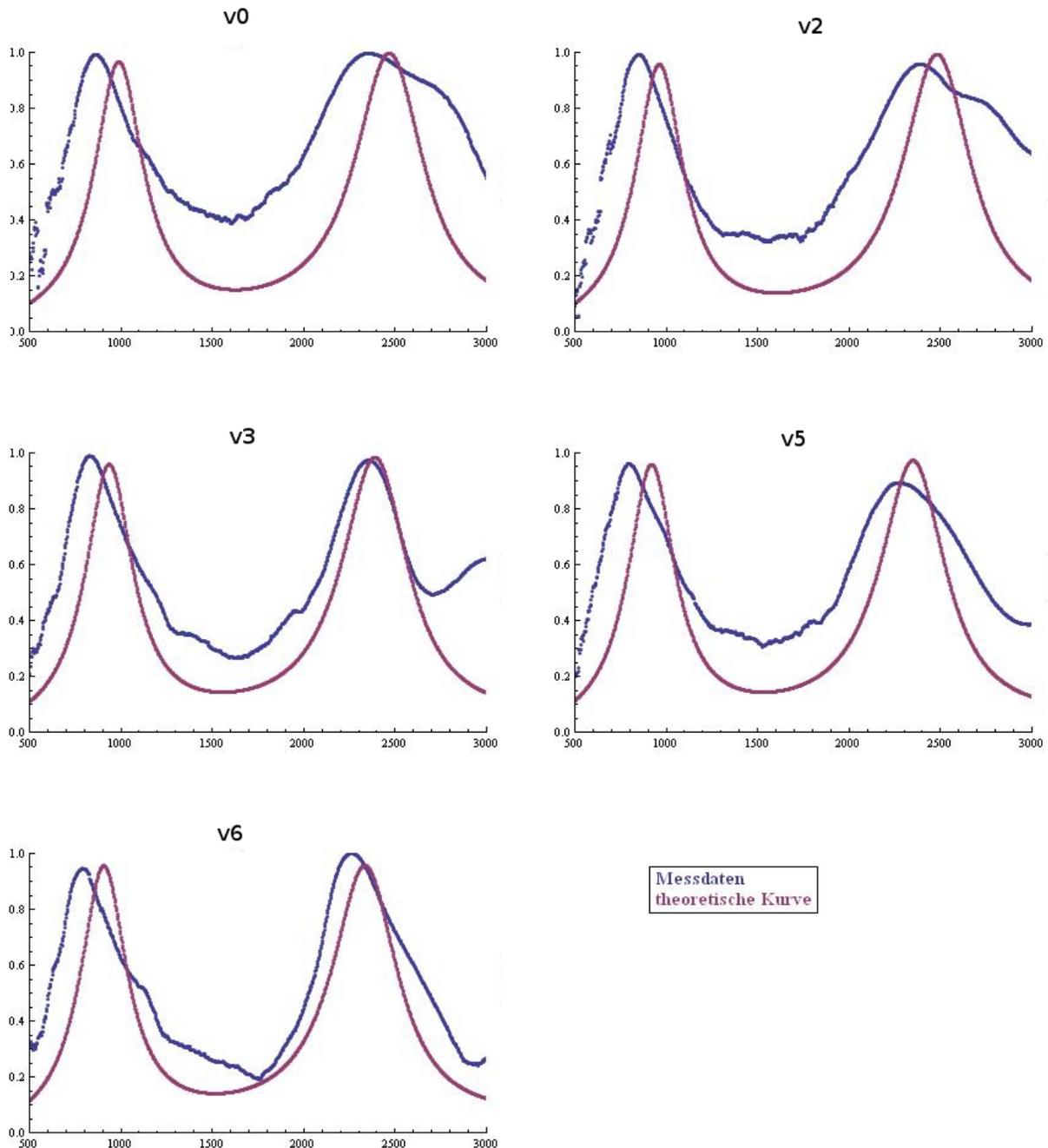


Abbildung 49: Messdaten und theoretische Verläufe für die verschiedenen Verdichtungsstufen von Feld 3. Die theoretischen Absorptionsgrade wurden mit den Werten aus Tabelle 7 berechnet. v0 bis v6 kennzeichnen die einzelnen Verdichtungsstufen.

Tabelle 7 zeigt die berechneten Werte von Porosität und Schichtdicke, wobei die Messdaten aus dem Frequenzbereich von 500 Hz - 3.000 Hz verwendet wurden. Als

mittlere Korngröße in Gleichung (22) wurde dabei der Wert  $\bar{D} = 7,6\text{mm}$  angenommen.

Tabelle 7: Zugängliche Hohlraumgehalte für die einzelnen Verdichtungsstufen auf Feld 3, berechnet aus den Messungen des Absorptionsgrades im Frequenzbereich von 500 Hz - 3.000 Hz. Die Temperatur bezieht sich dabei auf den Ort der PU-Sonde, d.h. in 2cm Höhe über der Asphaltsschicht.

Verdichtungs- stufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	46	28,30	2,0
v2	46	26,40	1,9
v3	42	26,20	2,0
v5	42	25,80	2,0
v6	38	25,30	2,0

Die Berechnung der Parameter erfolgte auf Basis des Absorptionsgrads im Frequenzbereich 500 Hz - 3.000 Hz. Wie in Kapitel 2.3.1 festgestellt wurde, hat die Temperatur auf die Messwerte im Bereich ab ca. 1.500 Hz einen deutlich höheren Einfluss als auf die Werte bis 1.500 Hz (vgl. Abbildung 37). Werden die Porosität und Schichtdicke also aufgrund von Messwerten im Bereich von 500 Hz - 1.500 Hz berechnet, so sollte der Temperatureinfluss vernachlässigt werden können. Aufgrund dieser Vermutung wurden die Berechnungen nochmal für diesen Frequenzbereich durchgeführt. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 8 zusammengefasst, die zugehörigen Diagramme befinden sich in Anhang I.

Tabelle 8: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der oberen offporigen Schicht in Feld 3. Die Temperatur wurde in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2cm über der Asphaltoberfläche), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 500 Hz -1.500 Hz herangezogen.

Verdichtungs- stufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	46	39,40	4,3
v2	46	36,40	4,0
v3	42	36,30	4,1
v5	42	35,40	4,2
v6	38	34,00	4,0

Sowohl die Schichtdicken als auch die Porositätswerte sind größer als bei Verwendung der Messwerte im Bereich von 500 Hz - 3.000 Hz.

Für Feld 3 wurden zwei Bohrkerne entnommen und die Porositäten volumetrisch bestimmt, die gefundenen Werte betragen 26,0 (14-3) und 23,1 (14-4) Vol.-%. Dies ist deutlich näher an den Porositäten, welche anhand der Messwerte im Bereich von

500 Hz - 3.000 Hz bestimmt wurden. Andererseits sind die theoretischen Verläufe für den Bereich 500 Hz - 1.500 Hz deutlich besser an die eigentlichen Messwerte angepasst. Dies gilt allerdings nur für den entsprechenden Ausschnitt des Frequenzbereiches. Der höherfrequente Teil mit dem zweiten Maximum ist dabei ausgespart.

Die abschließende Klärung, welcher Frequenzbereich am besten zur Bestimmung der Parameter herangezogen werden sollte, ist eine Aufgabe für weiterführende Untersuchungen. Hierbei wäre es empfehlenswert, eventuell vorhandene Erfahrungswerte über die bei einem Walzübergang erfolgende und angestrebte Verdichtung einzubeziehen.

#### 2.4.1.2 Feld 4 – zweischichtiger offenporiger Asphalt

Die akustischen Messungen auf Feld 4 erfolgten ähnlich denen auf Feld 3 in zwei Schritten: Zunächst wurde der zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Dicke der bereits gefertigten und erkalteten unteren offenporigen Asphaltenschicht (PA 11) mit Hilfe des in Abschnitt 2.1.4 entwickelten Verfahrens bestimmt. Anschließend erfolgten die Messungen der oberen Schicht (PA 8) während des Verdichtungsprozesses des Asphaltmischgutes.

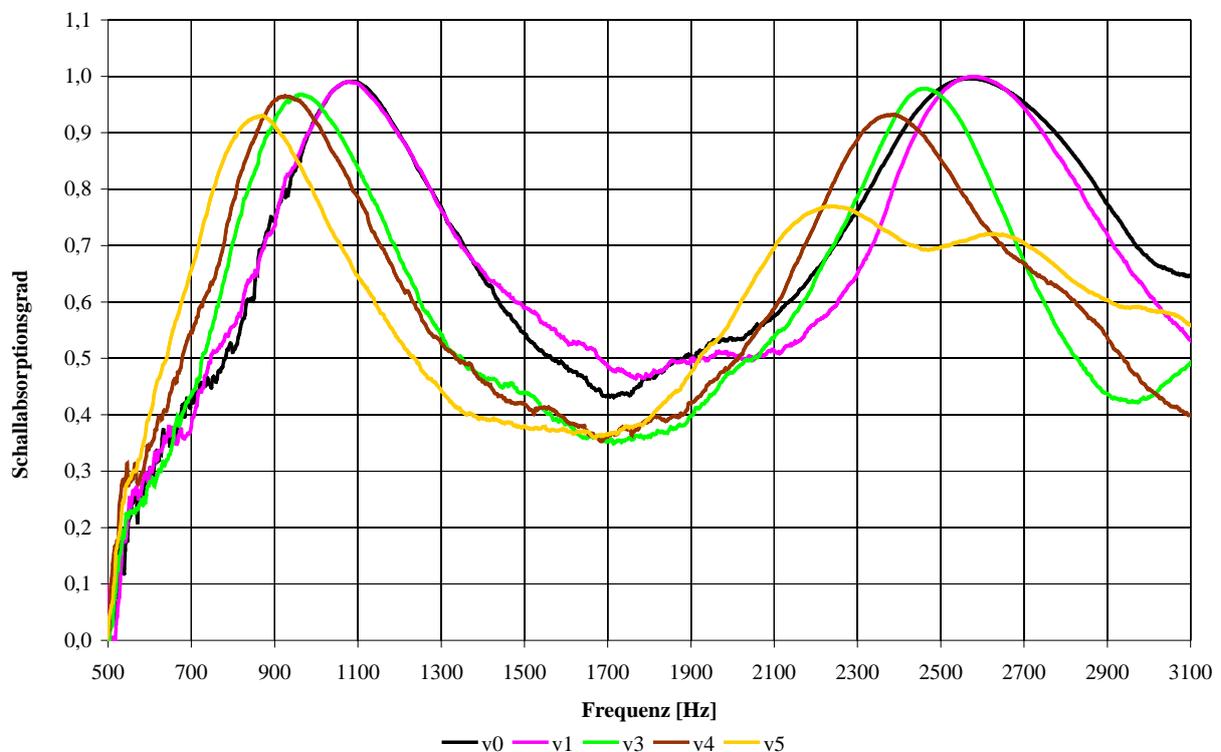


Abbildung 50: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 A) während der Verdichtung; (Feld 4; Verdichtungsstufen v0 bis v5 entsprechen der Anzahl der Walzübergänge)

Für die untere offenporige Schicht von Feld 4 wurden ein zugänglicher Hohlraumgehalt von 20,8 Vol.-% sowie eine Schichtdicke von 2,8 cm, jeweils gemittelt aus vier Einzelmessungen, berechnet. Als mittlere Korngröße in Gleichung (22) wurde der Wert  $\bar{D} = 10,59$  mm, resultierend aus der tatsächlichen Korngrößenverteilung, angenommen.

Anschließend erfolgten die Messungen des Absorptionsgrades der oberen Schicht (PA 8) während des Verdichtungsprozesses für verschiedene Verdichtungsstufen, siehe Abbildung 50.

Tabelle 9 zeigt die berechneten Werte von Porosität und Schichtdicke für die Einzelmessungen.

Tabelle 9: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der oberen offenporigen Schicht in Feld 4. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltoberfläche), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 500 Hz - 1.500 Hz herangezogen. (v0-1 bedeutet: Verdichtungsstufe 1 - 1. Messung)

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0-1	46	30,5	11
v0-2	46	38,5	2
v1-1	46	38,8	2
v3-1	43	38,1	2
v3-2	43	36,7	2,1
v3-3	43	37	2,1
v4-1	43	36,6	2,2
v5-1	45	36,7	2,2

Die berechneten Werte der Verdichtungsstufe v0-1 sind stark fehlerbehaftet. Besonders die deutlich zu hoch berechnete Schichtdicke ist unplausibel. Die anderen Resultate zeigen eine mit zunehmender Verdichtung geringfügig abnehmende Porosität. Die Schichtdicke steigt widererwarten jedoch leicht an. Die zugehörigen graphischen Darstellungen sind in Abbildung 51 und Abbildung 56 zu sehen.

Der Versuch, den zugänglichen Hohlraumgehalt und die Schichtdicke zusätzlich anhand der Messwerte im Bereich 500 Hz - 1.500 Hz zu bestimmen, brachte keine sinnvollen Ergebnisse (zu hohe Schichtdicken bzw. teilweise gar keine Resultate, d.h. Parameter konnte numerisch nicht ermittelt werden). Ein Ziel späterer Untersuchungen wäre die Klärung der Frage, wieso die Messungen bei Feld 3 relativ plausibel

le Werte liefern, während dies für Feld 4 nicht der Fall ist. Die Messbedingungen waren in beiden Fällen ähnlich, die Messungen erfolgten am selben Tag.

Die volumetrische Untersuchung der zugehörigen Bohrkerne (19-3 und 19-4) ergab Porositäten von 28,8 bzw. 28,0 Vol.-%. In Tabelle 10 sind für die Felder 3 und 4 die berechneten Werte für zugänglichen Hohlraumgehalt und Schichtdicke nochmals zusammengefasst gegenüber gestellt.

Tabelle 10: berechneter zugänglicher Hohlraumgehalt und Schichtdicke der während der akustischen Messungen bereits ausgekühlten unteren offenporigen Schicht auf Feld 3 und Feld 4

Feld Nr.	Schicht(en)	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
3	PA 16	17,7	2,3
4	PA 11	20,7	2,8

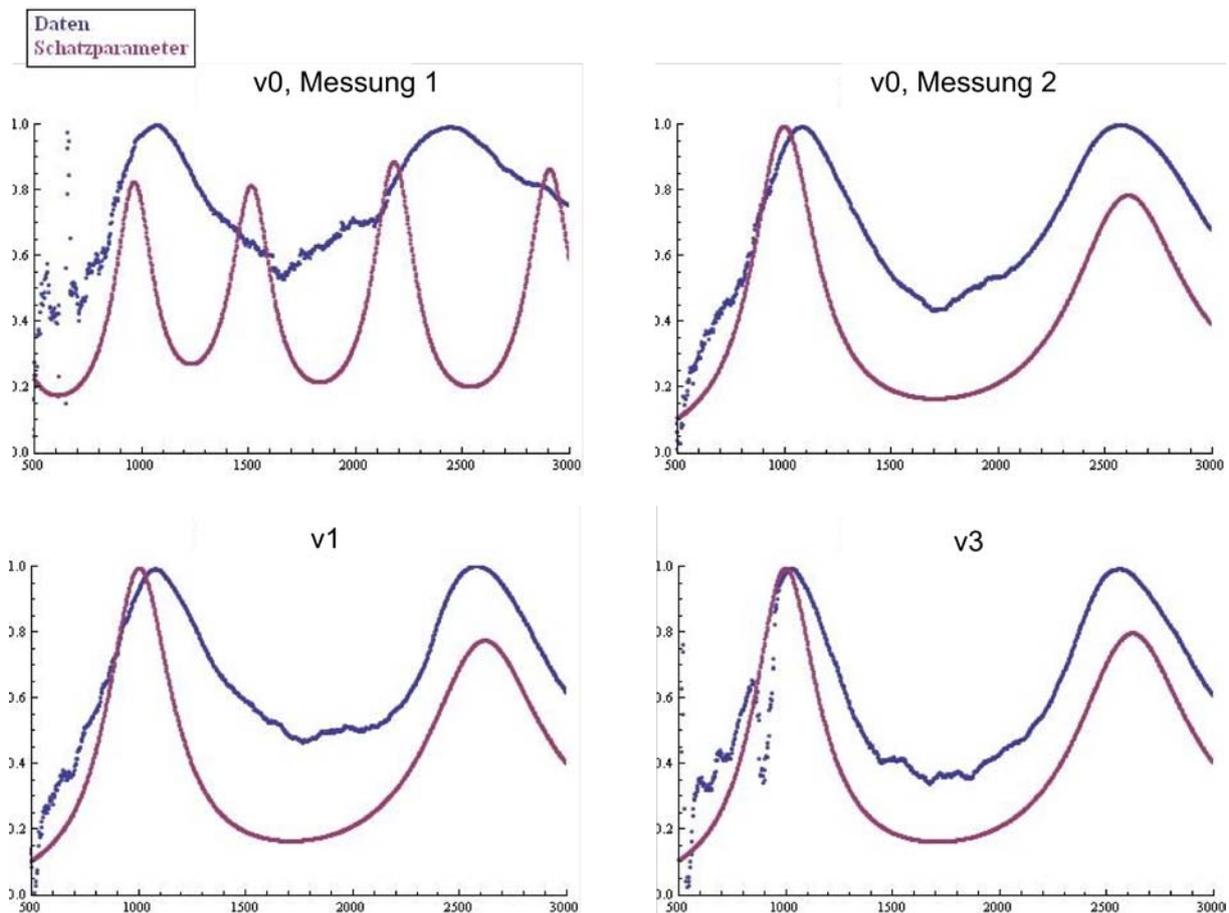


Abbildung 51: Messdaten und theoretische Verläufe für die einzelnen Verdichtungsstufen auf Feld 4. Die theoretischen Absorptionsgrade wurden mit den Werten aus Tabelle 9 berechnet. v0 bis v5 kennzeichnen die einzelnen Verdichtungsstufen. (Verdichtungsstufen v0-1 bis v3-1)

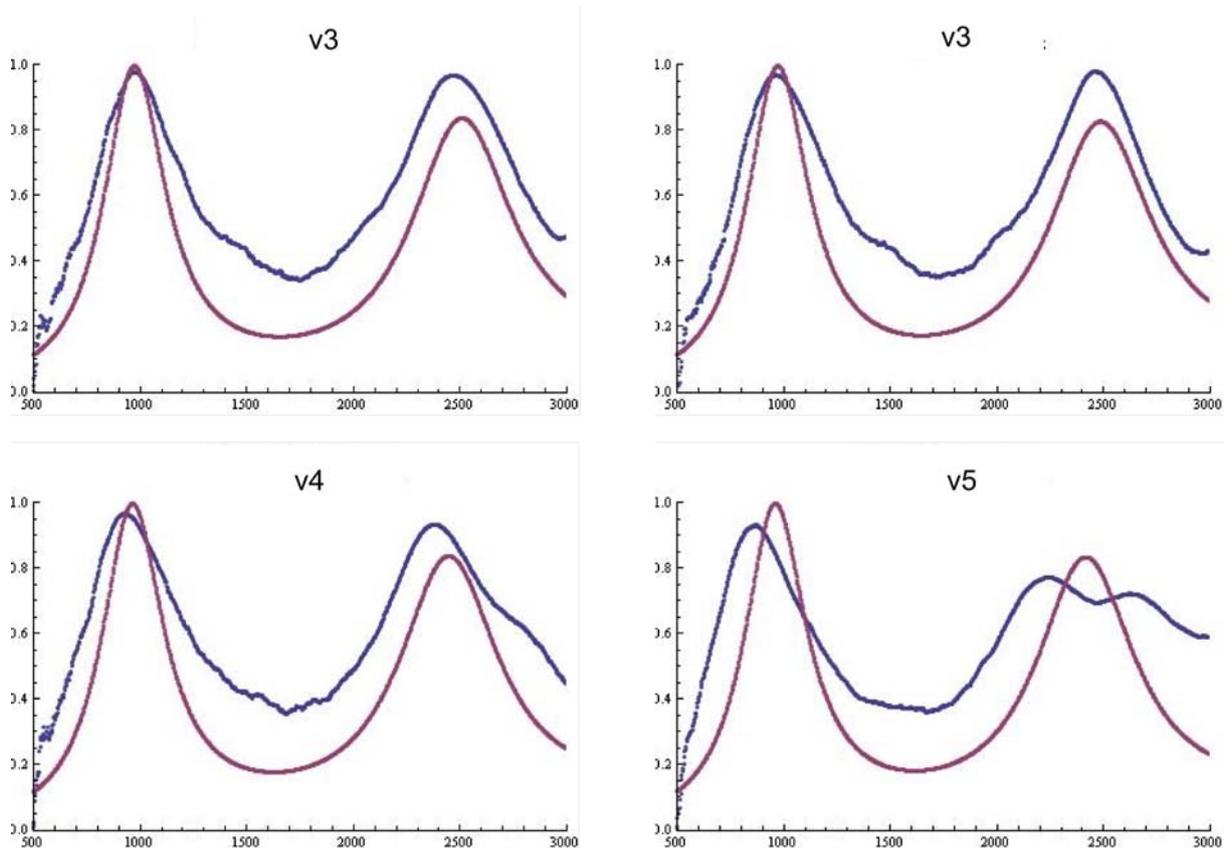


Abbildung 52: Messdaten und theoretische Verläufe für die einzelnen Verdichtungsstufen auf Feld 4. Die theoretischen Absorptionsgrade wurden mit den Werten aus Tabelle 9 berechnet. v0 bis v5 kennzeichnen die einzelnen Verdichtungsstufen. (Verdichtungsstufen v3-2 bis v5)

Zu erwarten wäre gewesen, dass der zugängliche Hohlraumgehalt der grobkörnigen Schicht (PA 16) größer der feineren Schicht (PA 11) ist, was jedoch nicht bestätigt werden konnte.

#### 2.4.1.3 Feld 11 – einschichtiger offenporiger Asphalt

Die akustischen Messungen auf den Feldern mit einschichtigem offenporigem Asphalt (Feld 11 und 12) erfolgten lediglich während des Einbaus der offenporigen Asphaltdeckschicht. Die darunter liegende Schicht (Gussasphalt) kann als schallhart angesehen werden. Die auf Feld 11 und 12 verwendeten Asphaltgemische (PA 8) unterscheiden sich lediglich im verwendeten Bindemittel, so dass für diese Felder ähnliche Messergebnisse erwartet werden können.

Abbildung 53 zeigt die aus Einzelmessungen gemittelten Schallabsorptionsgrade für Feld 11. Die Ergebnisse für einen zweiten Messpunkt auf Feld 11 befinden sich in Anhang G.

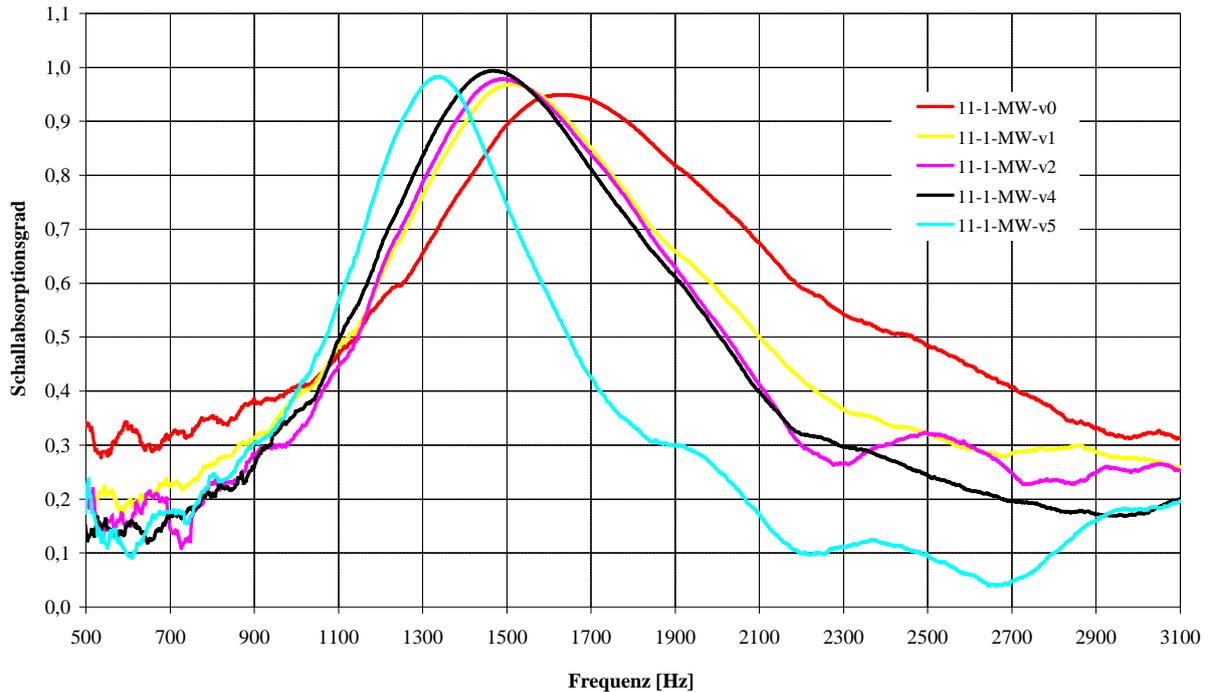


Abbildung 53: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 8 mit 70/100 tecRoad Premium) während der Verdichtung; (Feld 11, Messpunkt 1; Verdichtungsstufen v0 bis v5 entsprechen der Anzahl der Walzübergänge)

Tabelle 11 enthält die aus akustischen Messungen theoretisch ermittelten Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen von Feld 11.

Tabelle 11: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der offenporigen Asphaltdeckschicht in Feld 11. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltdeckschicht), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 500 Hz-3.000 Hz herangezogen.

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	35	22,6	2,1
v1	32	22,8	2,3
v2	28	22,8	2,3
v4	25	22,9	2,3
v5	24	23,6	2,7

Die Resultate für die einzelnen Verdichtungsstufen sind ebenfalls unbefriedigend, da die ermittelten Porositäten und Schichtdicken zum einen zu klein sind und zum anderen mit zunehmender Verdichtung wachsen. Zu erwarten wäre gewesen bei zunehmender Verdichtung eine Abnahme der Schichtdicken und der zugänglichen Hohlraumgehalte. Die zugehörigen Graphen sind in Abbildung 54 dargestellt.

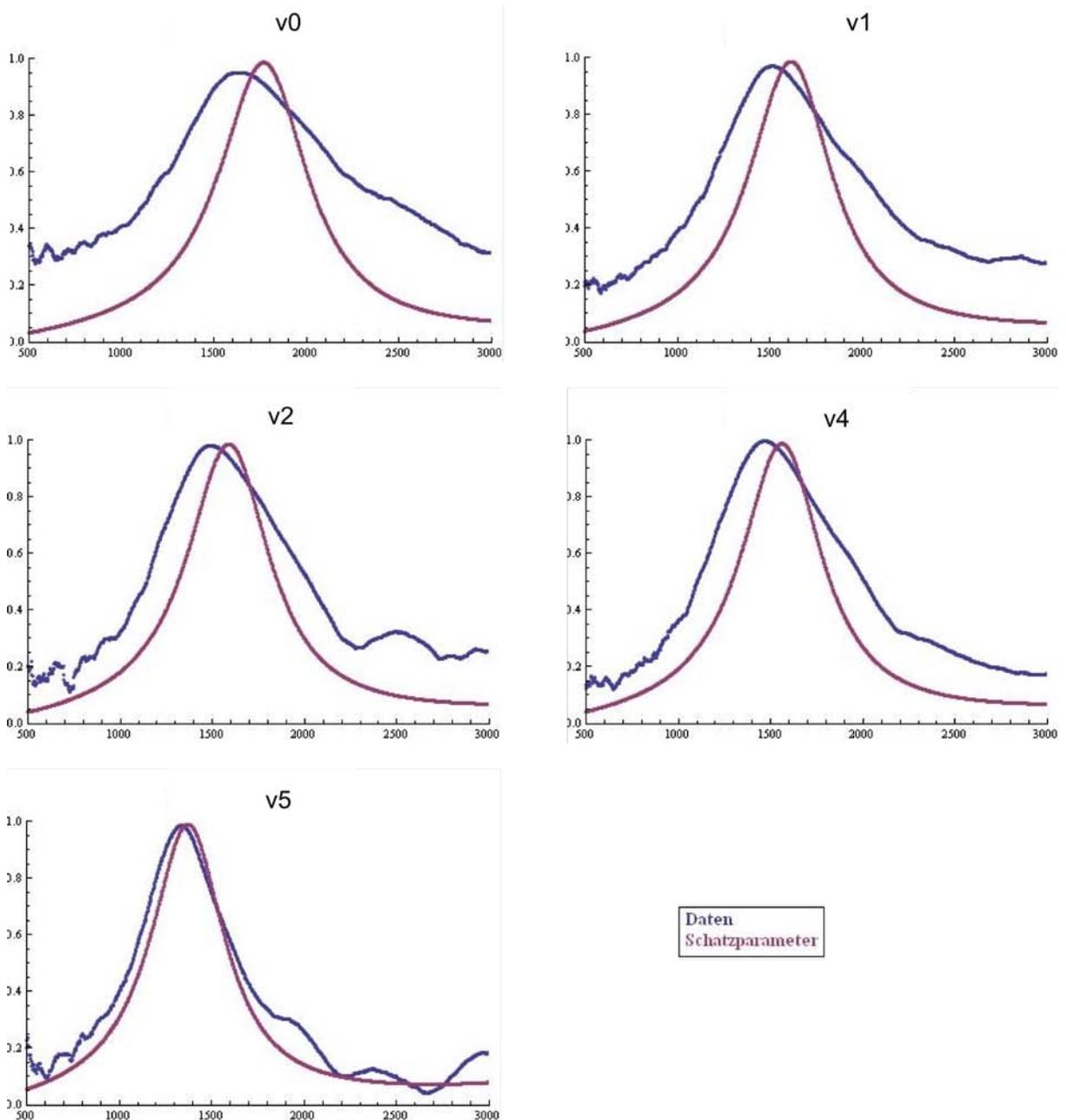


Abbildung 54: Messdaten und theoretische Verläufe für die einzelnen Verdichtungsstufen auf Feld 11. Die theoretischen Absorptionsgrade wurden mittels der Werte aus Tabelle 11 berechnet. v0 bis v5 kennzeichnen die einzelnen Verdichtungsstufen.

Zum Vergleich wurden die Parameter mit Hilfe der Messwerte aus dem Frequenzbereich von 1.000 Hz - 2.000 Hz berechnet, siehe Anhang J. Außer einer geringen Erhöhung ergab sich dabei keine wesentliche Änderung gegenüber den Werten aus Tabelle 11. Die volumetrische Untersuchung der zugehörigen Bohrkerne ergab einen zugänglichen Hohlraumgehalt von 31,0 Vol.-% (s. Tabelle 13), was zwar deutlich oberhalb des berechneten Wertes liegt aber dennoch den Anforderungen des verwendeten Mischgutes nahekommt.

#### 2.4.1.4 Feld 12 – einschichtiger offenporiger Asphalt

Äquivalent zu den Messungen auf Feld 11 erfolgten die Messungen auf Feld 12. In Abbildung 55 sind die gemittelten Messwerte des Absorptionsgrads für Feld 12 dargestellt.

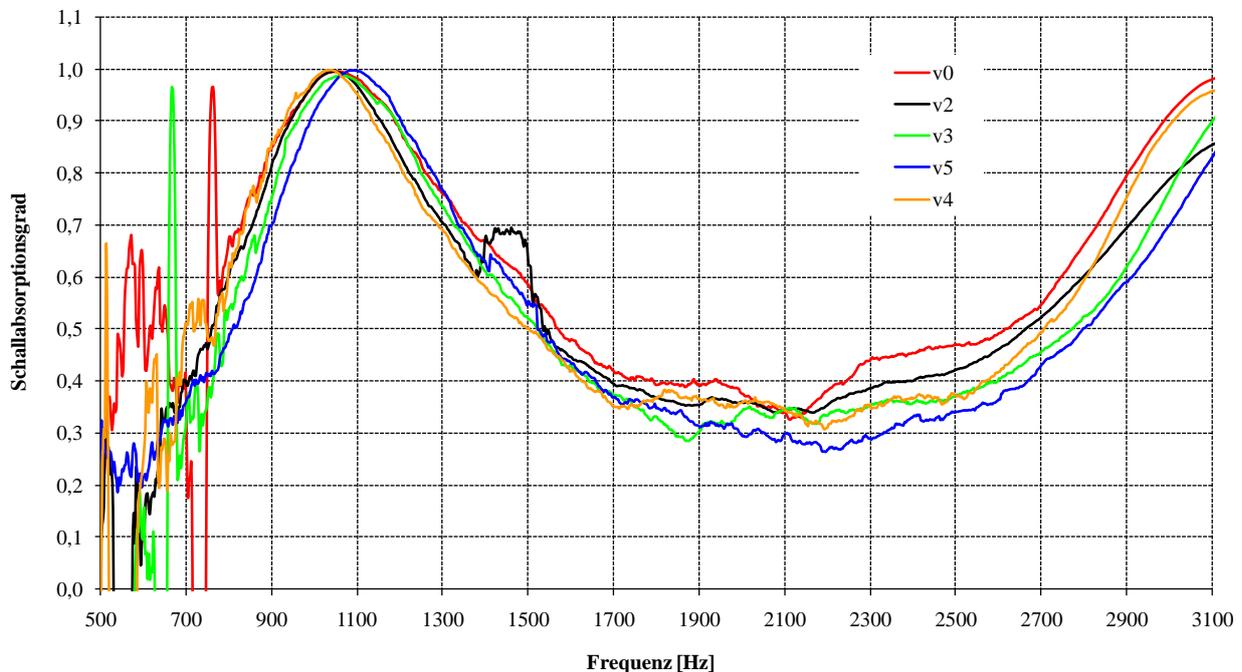


Abbildung 55: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 A) während der Verdichtung; (Feld 12; Verdichtungsstufen v0 bis v4 entsprechen der Anzahl der Walzübergänge)

Tabelle 12 zeigt die aus den akustischen Messungen bestimmten Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen von Feld 12.

Tabelle 12: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der offenporigen Asphaltdeckschicht in Feld 12. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltdeckschicht), für die Berechnungen wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 500 Hz – 3.000 Hz herangezogen.

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	44	23,3	9,4
v2	40	24,6	3,9
v3	40	21,4	3,0
v4	34	24,7	4,0
v5	34	24,0	3,5

Die Berechnung für Verdichtungsstufe v0 ergibt abermals einen unrealistisch großen Wert der Schichtdicke. Worin innerhalb der Berechnung eventuelle Probleme begründet sind gilt es noch genauer zu prüfen.

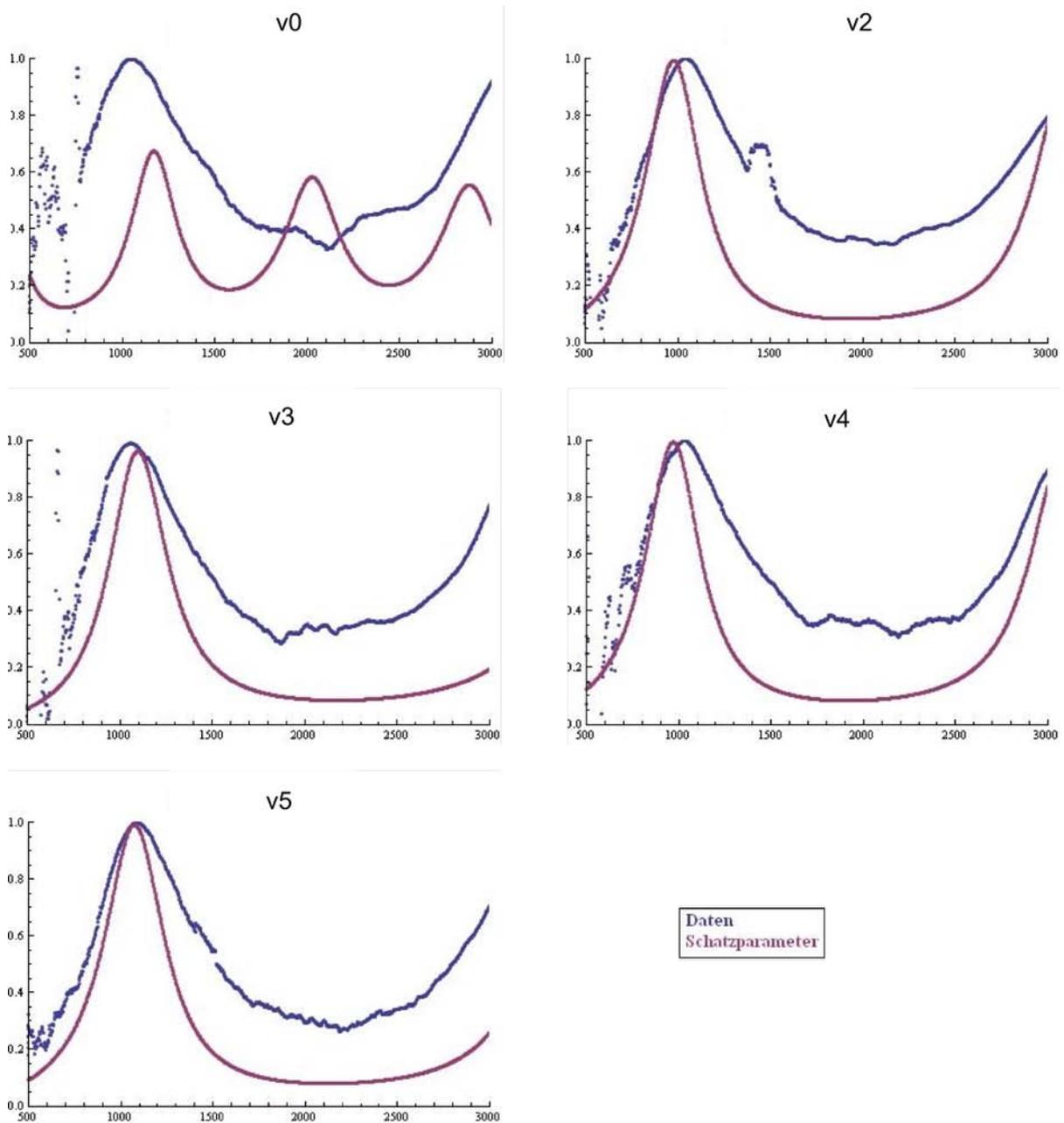


Abbildung 56: Messdaten und theoretische Verläufe für die einzelnen Verdichtungsstufen auf Feld 12. Die theoretischen Absorptionsgrade wurden mit den Werten aus Tabelle 12 berechnet. v0 bis v5 kennzeichnen die einzelnen Verdichtungsstufen.

Die Resultate der anderen Verdichtungsstufen sind ebenfalls unbefriedigend. Die ermittelten Porositäten und Schichtdicken sind ebenfalls zu gering und weisen über den Prozess der Verdichtung hin nur geringe und zudem schwankende Änderungen auf. Wieder zu erwarten wäre gewesen bei zunehmender Verdichtung eine Abnahme der Schichtdicken und der zugänglichen Hohlraumgehalte. Die zugehörigen Graphen sind in Abbildung 56 dargestellt.

Zum Vergleich wurden die Parameter wieder mit den Messwerten aus dem Frequenzbereich von 1.000 Hz – 2.000 Hz berechnet. Dies liefert ähnliche Ergebnisse, dargestellt in Anhang K.

Der aus dem Bohrkern volumetrisch bestimmte zugängliche Hohlraumgehalt beträgt demgegenüber 29,9 Vol.-%, siehe Tabelle 13 und liegt somit ebenfalls im Toleranzbereich der Anforderungen des verwendeten Mischgutes.

### 2.4.2 Entnahme von Bohrkernen, Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts durch direkte volumetrische Messung

Die theoretisch und volumetrisch bestimmten Hohlraumgehalte aller Bohrkern sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Der Gesamthohlraumgehalt wurde per Ausmessverfahren ermittelt. Die Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mittels Wasser erfolgte mit dem in Kapitel 2.1.5 beschriebenen Verfahren. Zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts mittels entwickeltem Berechnungsverfahren erfolgte gemäß dem in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Verfahren. Datengrundlage hierfür bildeten im Kundtschen Rohr gemessene Absorptionsgrade der Bohrkern.

Tabelle 13: Untersuchungsergebnisse der Bohrkern, die den Feldern der in-situ-Messungen entnommen wurden. Aufgeführt sind der am Bohrkern ermittelte Gesamthohlraumgehalt, der volumetrisch bestimmte zugängliche Hohlraumgehalt, der auf der Basis akustischer Messwerte berechnete zugängliche Hohlraumgehalt sowie der vor Einbau am Asphaltmischgut bestimmte Hohlraumgehalt.

Feld Nr.	Bez. Bohrkern	Schicht(en)	HRG* <sup>1</sup> [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (gem.) [Vol.-%]	Differenz HRG <sub>A</sub> - H <sub>zu,gem.</sub> [Vol.-%]	H <sub>zu</sub> (ber.) [Vol.-%]	Differenz H <sub>zu,gem.</sub> - H <sub>zu,ber.</sub> [Vol.-%]
3	14-3	PA 8+PA 16	27,9	26,0	1,90	26,7	-0,70
3	14-4	PA 8+PA 16	25,4	23,1	2,30	27,5	-4,40
4	19-3	PA 8+PA 11	29,0	28,8	0,20	26,0	2,80
4	19-4	PA 8+PA 11	28,8	28,0	0,80	28,2	-0,20
11	F11	PA 8	30,5	31,0	-0,50	23,8	7,20
12	F12	PA 8	32,8	29,9	2,90	24,1	5,80

\*<sup>1</sup> Hohlraumgehalt bestimmt mit Ausmessverfahren, für Bohrkern aus zweischichtigem offenporigem Asphalt gemittelter Wert

Die für die Bohrkern berechneten zugänglichen Hohlraumgehalte weisen hier teilweise sogar geringfügig größere Werte auf als die experimentell mit Wasser bestimmten zugänglichen Hohlraumgehalte. Besonders auffällig ist der an den Bohrkern F11 und F12 bestimmte zugängliche Hohlraumgehalt, der deutliche höhere Werte als die Modellberechnung liefert. Eine mögliche Ursache liegt darin begründet,

dass für die Messung der Porositäten die aus der Fahrbahn genommenen Bohrkernen nochmals gesägt werden mussten, um Probekörper mit definierten Schichtgrenzen zu erhalten. Dies bedingt, dass besonders die Probekörper aus den einschichtigen offenporigen Fahrbahnbelägen zu Versuchsbeginn nur geringe Dicken aufweisen. Je dünner ein Probekörper ist, desto größer wird der relative Anteil des gemäß Abschnitt 2.1.5 bestimmten zugänglichen Hohlraumgehalts und desto kleiner der Anteil nicht zugänglicher Poren. Das heißt, wird durch Sägen die Höhe eines Bohrkerns gegenüber der ursprünglichen Schichtdicke verringert, so kann vermutet werden, dass der zugängliche Hohlraumgehalt bestimmt am Probekörper höher ausfällt als jener basierend auf akustischen in-situ Messungen. In diesem Zusammenhang gilt außerdem, je geringer die Höhe eines Probekörpers ist, desto geringer ist die Differenz zwischen zugänglichem Hohlraumgehalt und Hohlraumgehalt bestimmt mit Ausmessverfahren.

In Tabelle 12 sind die im Rahmen der Erstprüfung (vor Asphalteinbau) ermittelten Hohlraumgehalte der akustisch vermessenen offenporigen Fahrbahnbelege zusammengefasst. Die im Labor per Ausmessverfahren bestimmten Hohlraumgehalte (vgl. Tabelle 12) sind ähnlich geartet. Lediglich Feld 11 weist in diesem Zusammenhang deutliche Differenzen auf. Es besteht die Möglichkeit, dass das auf diesem Feld verwendete Bindemittel (70/100, TecRoad Premium; vgl. Tabelle 6), sowie dessen Temperaturverhalten (vgl. Tabelle 11) einen merklichen Betrag hierzu geleistet haben.

Tabelle 14: Ist- und Sollhohlraumgehalt gem. Erstprüfung

Feld Nr.	Schicht(en)	Ist-HRG (gem. Erstprüfung) [Vol.-%]	Soll-HRG (gem. Erstprüfung) [Vol.-%]
3	PA 8	29,6	24,0 - 28,0
3	PA 16	30,3	24,0 - 28,0
4	PA 8	29,6	24,0 - 28,0
4	PA 11	28,9	24,0 - 28,0
11	PA 8	25,8	24,0 - 28,0
12	PA 8	29,6	24,0 - 28,0

### 2.4.3 Bewertung der Ergebnisse

Generell konnte bei den in-situ-Messungen eine Verschiebung des Hauptmaximums des Schallabsorptionsgrads in den Bereich tieferer Frequenzen bei steigender Ver-

dichtungsstufe beobachtet werden, teilweise gekoppelt mit einer Verringerung des Maximums.

## **2.5 Arbeitspaket E: Bewertung, Interpretation, Zusammenfassung**

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass an verschiedenen Stellen Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan notwendig und sinnvoll waren. Einige Arbeitspakete erforderten einen höheren Aufwand während andere sich einfacher bearbeiten ließen. Insgesamt ist das Projekt sehr positiv zu bewerten – die gestellten Ziele konnten soweit verwirklicht werden, dass die Ergebnisse der umfassenden Untersuchungen eine solide Grundlage für eine anschließende Produktentwicklung bilden. Im Folgenden sind die Ergebnisse für die einzelnen Arbeitspakete zusammenfassend dargestellt und bewertet.

### **2.5.1 Arbeitspaket A (vgl. Kapitel 2.1)**

Aufbauend auf dem Phänomenologischen Modell für poröse Absorber konnte ein Modell zur Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts aus dem gemessenen Absorptionsgrad erfolgreich erstellt und implementiert werden. Die mit der Parameterschätzung verbundenen Schwierigkeiten (Zielfunktion, Anfangswerte u. ä.) wurden erfolgreich gelöst.

Die Validierung anhand der hergestellten und vermessenen Marshall-Probekörper sowie zusätzlich anhand einer noch umfassenderen Datensammlung zeigte bereits eine gut, aber für den vorgesehenen Anwendungsfall noch zu verbessernde Genauigkeit. Da diese von mehreren Faktoren beeinflusst ist, welche nur zum Teil durch das Modell selbst bedingt sind, muss dieser Punkt vor einer Anwendung noch einmal besonders intensiv untersucht werden. Dabei sind insbesondere die einzelnen Einflussgrößen der Abweichungen voneinander zu isolieren, um sie anschließend wichten und beheben zu können.

### **2.5.2 Arbeitspaket B (vgl. Kapitel 2.2)**

Anhand äußerst umfangreicher Versuchsreihen konnte ein sehr detailliertes Bild für die Eignung und Anwendungsbedingungen des Druck-Schnelle-Sensors gewonnen werden. Dabei wurden alle für in-situ Messungen relevanten Bedingungen einbezogen und die Anforderungen an die Messbedingungen bzw. den Messaufbau sehr ge-

nau spezifiziert und in der entworfenen Messvorschrift entsprechend berücksichtigt. Die durchgeführten Untersuchungen sind wichtige Grundlagenuntersuchungen für ein zukünftiges Messgerät auf Basis des Schnelle-Sensors.

Der Vergleich des neuentwickelten Messverfahrens mit der bekannten Messapparatur nach [DIN ISO 13472-1 2004] wurde begrenzt, da sich schnell die bessere Eignung des Druck-Schnelle-Sensors herausstellte. Insbesondere ist die benötigte Messfläche für letzteren deutlich kleiner (ca. 60 cm Radius), was unter den Einsatzbedingungen (z.B. Breite eines Walzstreifens) entscheidend ist.

### **2.5.3 Arbeitspaket C (vgl. Kapitel 2.3)**

Aufgrund der im Arbeitspaket B gewonnenen Erkenntnisse über die benötigte Probenfläche war die Untersuchung der Temperaturabhängigkeit relativ schwierig durchzuführen. So konnten die benötigten neun Asphaltplatten nicht in genügend kurzen Zeitabständen hergestellt werden, um eine zusammengesetzte Asphaltfläche, bestehend aus Asphaltplatten gleicher Temperatur zu erhalten. Für einen Abkühlvorgang mit genügender Homogenität wäre dies jedoch erforderlich gewesen. Alternativ mussten die Untersuchungen an neun bereits abgekühlten und wiedererwärmten Asphaltplatten durchgeführt werden. Während des erneuten Abkühlens wurde die erwärmte Asphaltfläche akustisch mittels PU-Sensor vermessen.

Aufgrund dessen, dass im Wärmeschrank wiedererwärmte Platten im Gegensatz zu frisch hergestellten Platten eine Anfangstemperatur von nur ca. 70 °C statt 120 °C besitzen ist der untersuchte Temperaturbereich kleiner als ursprünglich geplant. Um diese Lücke zu schließen, wurden zum Vergleich Einzelplatten im Walzsektorverdichter hergestellt. Die Platten wurden nach Fertigstellung zunächst im für die Herstellung erforderlichen Rahmen belassen, um deren Formkonstanz zu gewährleisten. Während des Abkühlens wurden die Platten wie gehabt vermessen. Die so gewonnenen Messungen ergänzen qualitativ die großflächigen Messungen an der Plattenvariante B sind aber aufgrund der Reflexionen am Rahmen und der zu kleinen Probenfläche von einer Asphaltplatte nicht quantitativ nutzbar. Für eine quantitative Auswertung ist es notwendig, die Reflexionen am Kasten herauszurechnen. Dies könnte ebenfalls Bestandteil weiterer Untersuchungen sein.

Insgesamt erlauben die unter schwierigen Bedingungen gewonnenen Daten einen befriedigend guten Einblick in das Temperaturverhalten offenerporiger Asphalte. Die

Messdaten ermöglichen zwar keine quantitative Modellkorrektur, es zeigt sich jedoch, dass selbst höhere Temperaturen im betrachteten Frequenzbereich keinen allzu großen Einfluss besitzen. Mithin ist das in Arbeitspaket A entwickelte Modell in guter Näherung auch bei höheren Temperaturen anwendbar.

Eine weitere Präzisierung des Modells vor allem für den hohen Temperaturbereich, wie er für den Verdichtungsprozess relevant ist, erscheint sinnvoll. Hierfür ist jedoch eine umfangreichere Datengrundlage erforderlich.

#### **2.5.4 Arbeitspaket D (vgl. Kapitel 2.4)**

Die gute Zusammenarbeit im und Unterstützung durch den projektbegleitenden Ausschuss ermöglichte es, in-situ-Messungen während der Projektlaufzeit an realen Streckenabschnitten direkt während des Einbaus offenporiger Asphalte durchzuführen. Diese praxisnahen Messungen zeigen einerseits die Eignung des verwendeten Messgeräts und bestätigten in vollem Umfang die in Arbeitspaket B gewonnenen Erkenntnisse. Andererseits erweist sich das Berechnungsverfahren durchaus als vielversprechend, wobei dessen Genauigkeit noch verbessert werden muss. Allerdings sind hierbei die Bedingungen oft schwieriger als bei Labormessungen unter definierten Randbedingungen. Die getrennte Untersuchung möglicher Fehlerursachen stellt sich auch hier als wichtiges Ziel für Folgeuntersuchungen heraus.

### **3 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der Ergebnisse**

Mit der Bearbeitung des vorliegenden Forschungsantrags wird die Messung des zugänglichen Hohlraumgehalts offenporiger Asphalte flächendeckend, bereits während des Einbaus (während der Verdichtung) möglich. Zusätzlich können akustische Eigenschaften, insbesondere der Absorptionsgrad, direkt abgeleitet werden. Somit wird ein wesentlicher Beitrag zur Überleitung bisher bearbeiteter Forschungsprojekte zur Lärmreduzierung in die Praxis und zur Ergänzung laufender Forschungsprojekte geleistet, wodurch die ausführenden Unternehmen in die Lage versetzt werden, unmittelbar nach der Bauausführung den zugänglichen Hohlraumgehalt zu bestimmen und somit die Qualität der eingebauten Schicht zu überwachen und zu gewährleisten. Diese Form der Qualitätssicherung im Rahmen der Herstellung und des Einbaus von Asphaltsschichten ist für kleinere und mittlere Unternehmen (KMU) von großer Bedeutung, da eine ungenügende bzw. zu hohe Verdichtung des Asphaltmischgutes zu unzureichenden mechanischen und akustischen Eigenschaften führt und somit Minderungs- bzw. Regressansprüche und damit wirtschaftliche Schäden entstehen.

Es wird angestrebt, das verwendete Messsystem auf einem Messfahrzeug zu installieren. Auf diese Weise könnten künftig mobile flächendeckende Messungen auf größeren Fahrbahnabschnitten komfortabel und zeitsparend ermöglicht werden.

#### **4 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf diesem Gebiet bei anderen Stellen**

Während der Bearbeitung des hier vorgestellten Forschungsprojektes erfolgten ähnliche Überlegungen in Frankreich. Auf der Grundlage von Simulated Annealing zur Voraussage akustischer Eigenschaften von Fahrbahnen aus Messdaten (Impedanz) wurden numerische Simulationen durchgeführt. Als Referenz kann folgende Quelle angegeben werden:

Heinkelé, C.; Golay, F.; Dutilleux, G.:

Acoustical road parameters identification, Euronoise 2009

## **5 Beabsichtigte Umsetzung der Forschungsergebnisse; erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Die im Rahmen des durchgeführten Projekts gewonnenen Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit in regelmäßigen Abständen den Teilnehmern des Projektbegleitenden Ausschusses vorgestellt.

Ein Teil der Forschungsergebnisse wurde bereits wie folgt veröffentlicht:

[1] Hübelt, J.; Kühnert, Ch.; Figula, U.; Wellner, F.; Blasl, A:

Acoustical method for non-destructive determination of porosity of asphalts.  
Euronoise 2009, Action on Noise in Europe, Vortrag und Tagungsband,  
Edinburgh, 26.-28. Oktober 2009

[2] Wellner, F.; Blasl, A.; Hübelt, J.; Kühnert, Ch.; Figula, U.:

Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit akustischen Methoden  
20. Internationale Wissenschaftliche Konferenz Mittweida, IWKM 2009, Vortrag und Tagungsband,  
Mittweida, 28.-29. Oktober 2009

[3] Hübelt, J.; Kühnert, Ch.; Figula, U.; Wellner, F.; Blasl, A:

Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen Hohlraumgehalts mit akustischen Methoden.  
Dresdner Asphalttage 2009, Vortrag und Tagungsband S. 117-126,  
Dresden, 10.-11. Dezember 2009

Außerdem geplant sind folgende Veröffentlichungen und Präsentationen:

- Artikel in Fachzeitschriften (bspw. in Straße und Autobahn)
- 17. International Congress on Sound and Vibration ICSV, Kairo 2010

Es wird angestrebt, im Rahmen weiterführender Forschungsvorhaben, das verwendete Messsystem auf einem Messfahrzeug zu installieren. Auf diese Weise könnten künftig mobile flächendeckende Messungen auf größeren Fahrbahnabschnitten komfortabel und zeitsparend ermöglicht werden.

## 6 Literatur

[1] [ALP A-StB]

Arbeitsanleitung zur Prüfung von Asphalt, ALP A-StB, Teil 1 – Bestimmung der zugänglichen Hohlräume in Asphalt mit dem Hohlraummeßgerät, Ausgabe 1999, FGSV-Nr. 787/1

[2] [BERENGIER 2000]

Berengier, M.; Pichaud Y.; Le Fur, J.-F.; Effect of low-noise pavements on traffic noise propagation over large distances: Influence of grounds and atmospheric conditions, in Proc. of the International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 2000), Nice, 2000

[3] [BOULANGER 1997]

Boulangier, P.; Waters-Fuller, T.; Attenborough K.; LI, K. M.: Models and measurements of sound propagation from a point source over mixed impedance ground, JASA 102 (3), 1997

[4] [BRANDENBURG 2009]

[http://www.ls.brandenburg.de/media\\_fast/4058/IMG\\_0467.JPG](http://www.ls.brandenburg.de/media_fast/4058/IMG_0467.JPG), zugegriffen am 05. März 2009

[5] [CARMAN 1937]

Carman, P.: Fluid flow through a granular bed. In: Trans. Inst. Chem. Eng. London 15, pp. 150–156, 1937

[6] [DE BREE 1996]

De Bree, H. E. et al: The Microflown - A novel device measuring acoustical flows, Sensors and Actuators: A, Physical, volume SNA0 54/1-3, pp. 552-557, 1996

[7] [DE BREE 2003]

De Bree, H. E.: The Microflown - An acoustic particle velocity sensor: Acoustics Australia 31, pp. 91-94, 2003

[8] [DE BREE 2005]

De Bree, H. E.; Druyvesteyn, W. F.: A particle velocity sensor to measure the sound from a structure in the presence of background noise, Forum Acusticum, 2005

[9] [DE BREE 2008]

De Bree, H. E.; Nosko, M.; Tijs, E.: A handheld device to measure the acoustic absorption in situ, Poster Presentation SNVH, Graz, 2008

[10] [DE BREE 2009]

De Bree, H. E. et al.: The Microflown E-book.

<[http://www.microflown.com/r&d\\_books\\_Ebook\\_Microflown.htm](http://www.microflown.com/r&d_books_Ebook_Microflown.htm)>, Stand: 29.06.2009

[11] [DIN ISO 13472-1 2004]

Akustik – Messung der Schallabsorptionseigenschaften von Straßenoberflächen vor Ort – Teil 1: Freifeldverfahren (ISO 13472-1:2002), April 2004

[12] [DIN EN ISO 10534-2]

Akustik – Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren – Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion (ISO 10534-2:1998), Oktober 2001

[13] [DIN 1996 Teil 7]

DIN 1996 Teil 7: Prüfung von Asphalt – Bestimmung von Rohdichte, Raumdichte, Hohlraumgehalt, und Verdichtungsgrad. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Dezember 1992

[14] [EN 12697-30]

Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 30: Probenvorbereitung, Marshall-Verdichtungsgerät; November 2007

[15] [EN 29053]

Akustik – Materialien für akustische Anwendungen – Bestimmung des Strömungswiderstandes (ISO 9053: 1991), März 1993

[16] [GERRETSEN 1997]

Gerretsen, E.: Model geluidemissie band-wegdek, Deel B, Fase1: Relaties wegdekeigenschappen met materiaalgegevens / TNO. 1997 (TPDHAG-RPT-970118). – Forschungsbericht

[17] [HAMET 1992]

Hamet, J.: Modelisation acoustique d'un enrobe drainant, INRETS, 1992

[18] [HAMET 1993]

Hamet J.; Berengier M.: Acoustical Characteristics of Porous Pavements: A new Phenomenological Model, Proceeding of the International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering (Inter-Noise 1993), Leuven, 1993, pp. 641-646

[19] [HUEBELT u. a. 2001]

Hübelt, J.; Lerch, T.; Sarradj, E.: Porous road surfaces: Acoustical characteristics, models and measurements. In: Proc. of the 17th International Congress on Acoustics (ICA 2001), Rom (Italy), 2001

[20] [HUEBELT 2002]

Hübelt, J.: About the determination of the acoustical properties of surfaces in situ using the Auto-Power-Density-Spectra, in Proc. of the Forum Acusticum 2002, Sevilla (Spain), 2002

[21] [HUEBELT 2003]

Hübelt, J.; Sarradj, E.; Lerch, T.: Einfluss der Fahrbahneigenschaften auf das Rollgeräusch von Kraftfahrzeugen, DFG Abschlussbericht, Geschäftszeichen: KO 1242/9-1,-2. TU Dresden, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, 2003

[22] [HUEBELT 2005]

Hübelt, J., Böhm, M., Hoffmann, R.: Using an extended impedance measurement method für the estimation of porosity a flow resistance, in Proceedings of the International Congress on Sound and Vibration Lisbon (ICSV), 2005

[23] [HUEBELT 2006]

Hübelt, J.: Schallfelder über offenporigen Fahrbahnen, Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006

[24] [MAVKO AND NUR 1997]

Mavko, G.; Nur, A.: The effect of a percolation threshold in the Kozeny-Carman relation. In: Geophysics 62 (1997), Nr. 5, S. 1480–1482

[25] [MECHEL 1995]

Schallabsorber, Band 1-3, Hirzel Verlag, Stuttgart, 2006

[26] [INGOLSTADT 2006]

Stadt Ingolstadt: Stadt Ingolstadt – Westliche Ringstraße, Pilotprojekt zweischichtiger offenporiger Asphalt; Projekt- und Monitoringdokumentation 2006 mit Hinweisen für weitere Anwendungen, Vortrag, Ingolstadt, 2006

[27] [LERCH 1997]

Lerch, T.: Möglichkeiten der messtechnischen Erfassung akustisch relevanter Parameter von Straßendeckschichten, Diplomarbeit, Technische Universität Dresden, 1997

[28] [SANDBERG 2002]

Sandberg, U.; Ejsmont, J. A.: Tyre/road noise reference book, INFORMEX, Harg, Kisa 2002

[29] [SARRADJ 2003]

Sarradj, E.: Multi-Domain Boundary Element Method for Sound Fields in and around Porous Absorbers, Acta Acustica united with Acustica 89 (1), pp. 21-27(7) (2003).

[30] [SARRADJ 2004]

Sarradj E., Lerch, T., Hübelt, J.: Input Parameters for the Prediction of Acoustical Properties of Open Porous Asphalt, ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA 92, pp. 85-96 (2006)

[31] [TAPPERT 1989]

Tappert, A.; Weiland N.: Verfahren zur Bestimmung der zugänglichen Hohlräume von Asphalt. In: Bitumen 51. Jg. (1989), Heft 4, S. 158-161

## 7 Danksagung

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) und das Deutsche Asphaltinstitut e.V. (DAI) unter der IGF-Vorhaben-Nr. 15700 BR gefördert.

Unser Dank gilt dem BMWi, der AiF sowie dem (DAI) für die Förderung und Unterstützung dieses Forschungsvorhabens.

Vielen Dank auch an die Firma Microflown Technologies B. V. (Niederlande), die den PU-Sensor zur Verfügung stellte, besonders an Alex Koers, Emiel Tijs und Rien Platenkamp.

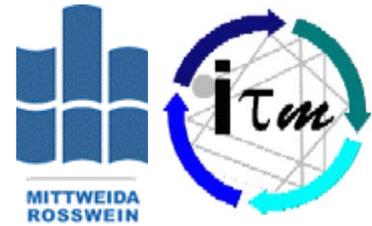
Detlef Schulz und Dietmar Pehlke sowie Ronald Utterodt und Andreas Rösch danken wir ebenfalls für Ihre Unterstützung und interessante Diskussionen.

## **Anhang**

### **A Messvorschrift**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**



---

# **Messvorschrift zur Bestimmung akustischer Eigenschaften offenporiger Asphalte**

Arbeitsanleitung für den Umgang mit dem Druck-Schnelle-Sensor der Firma Microflown Technologies zur Bestimmung akustischer Eigenschaften offenporiger Fahrbahnbefestigungen

## **MV – AKPA – MicFI 09**

---

**Ausgabe 2009**

*(Bearbeitungsstand 26.11.2009)*

**Vorbemerkung:**

Diese Messvorschrift beschreibt die Bestimmung akustischer Eigenschaften von offenporigen Fahrbahnbefestigungen mit Hilfe des Druck-Schnelle-Sensors von *Microflown Technologies*.

Die hier dargelegten Erkenntnisse resultieren aus Untersuchungen, die im Rahmen des von der AiF geförderten Forschungsvorhabens „Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigen Fahrbahnbelägen unmittelbar nach Einbau zum Erzielen von optimalen akustischen Eigenschaften“ (Nr. 15700 BR) durchgeführt wurden. Alle folgenden Angaben beziehen sich auf die im Projekt verwendete Messvorrichtung (Abb. 1).



Abb. 1: Messaufbau zur messtechnischen Bestimmung der Oberflächenimpedanz einer Asphalt-schicht mithilfe eines Druck-Schnelle-Sensors

## Inhaltsverzeichnis

1 Anwendungsbereich .....	88
2 Messprinzip .....	88
3 Messdurchführung .....	89
3.1. Geräte und Zubehör .....	89
4 Messaufbau .....	90
5 Messbedingungen .....	91
6 Software – Einstellungen .....	92
7 Kalibrierung .....	92
7.1. Messung der akustischen Eigenschaften einer Probenfläche .....	93
8 Datenverarbeitung .....	94

## 1 Anwendungsbereich

Die Messvorschrift beschreibt die Ermittlung der akustischen Eigenschaften von offenporigen Fahrbahnen auf der Basis des Druck-Schnelle-Sensors (PU-Sensor) von Microflown Technologies. Die akustischen Eigenschaften werden als Eingangsparameter für einen Rechenalgorithmus benötigt, der zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigem Asphalt (PA) während des Einbaus dient.

Im Falle zweischichtigen offenporigen Asphalts (ZWOPA) wird zunächst die untere Schicht (die erste Schicht) aus offenporigem (porösem) Asphalt im kalten Zustand messtechnisch untersucht. Die Untersuchungen der oberen Schicht (der zweiten Schicht) erfolgen während der Verdichtung des offenporigen Asphalts. Die dabei auftretenden speziellen Messbedingungen sind zu beachten. Es wird empfohlen, die im Folgenden beschriebenen Einstellungen und deren Reihenfolge einzuhalten.

## 2 Messprinzip

Zur Ermittlung der akustischen Eigenschaften wird eine Schallquelle über einer Prüfoberfläche angeordnet. Zusätzlich wird ein Druck-Schnelle-Sensor zwischen Schallquelle und Prüfoberfläche gebracht, der den erzeugten direkten und den von der Prüfoberfläche reflektierten Schalldruck aufnimmt. Der Schnelle-Sensor, der aus zwei dünnen heißen Platindrähten besteht, bestimmt die komplexe Schallschnelle. Die gemessenen komplexen akustischen Werte stellen die Grundlage für die Berechnung der komplexen Oberflächenimpedanz und in diesem Zusammenhang des Schallabsorptionsgrads dar. Der Schallabsorptionsgrad beschreibt den Anteil der einfallenden Schallenergie, der nicht reflektiert wird. Die Größe der Probenfläche hat einen Einfluss auf das Messergebnis. Für messtechnische Untersuchungen mit repräsentativen Ergebnissen sollte die Probenfläche einen Radius von mindestens 50 cm aufweisen. Der Einfluss der Größe der Probenfläche kann zudem abhängig vom zu untersuchenden Material sein. Abb. 2 zeigt den prinzipiellen Messaufbau für Messungen mit einem Druck-Schnelle-Sensor, wobei  $h_s$  den Abstand der Schallquelle von der Prüfoberfläche und  $h$  den Abstand des Druck- und Schnellesensors von der Prüfoberfläche darstellt.

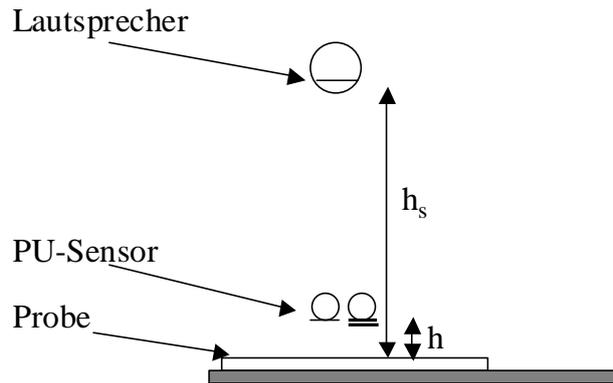


Abb. 2: Prinzipieller Messaufbau für Messungen mit dem Druck-Schnelle-Sensor von Microflow Technologies

### 3 Messdurchführung

#### 3.1 Geräte und Zubehör

Für die Ermittlung der akustischen Eigenschaften wird das Messsystem „Free field surface impedance setup“ der Firma Microflow Technologies verwendet. Folgende Bestandteile sollten für die Messung vorliegen:

- Druck-Schnelle-Sensor mit Lautsprecher, Signal Conditioner und Verstärker
- spezielle Halterung (Teleskopstange) – vgl. Abb. 3
- PC mit Soundkarte und Auswerte-Software
- Stromversorgung
- Temperatur-Sensor
- diverse weitere Ausrüstung



Abb. 3: Teleskopstange als spezielle Halterung des Druck-Schnelle-Sensors

## 4 Messaufbau

Zunächst erfolgt die Ausrichtung des Druck-Schnelle-Sensors zum Lautsprecher und zum Messobjekt hin. In Abb. 4 ist die Ausrichtung für eine Messung durch einen roten Pfeil gekennzeichnet. Weitere Darstellungen sind dem Microflown-Handbuch zu entnehmen (<http://www.microflown.com/library/manuals/>).



Abb. 4: Ausrichtung des Druck-Schnelle-Sensors entsprechend dessen richtungsabhängiger Empfindlichkeit

Anschließend sind alle benötigten Geräte mit Hilfe der entsprechenden Kabel miteinander zu verbinden. Abb. 5 zeigt den schematischen Messaufbau. Eine ausführliche Anleitung zum Messaufbau ist in Kapitel 2 des Microflown-Handbuchs (<http://www.microflown.com/library/manuals/>) zu finden. Am Signal Conditioner sind folgende Einstellungen vorzunehmen:

- Gain (Verstärkung): High
- Correction: On.

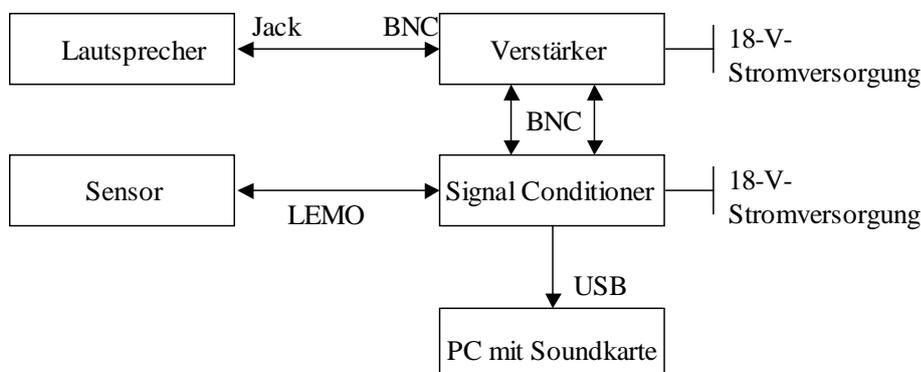


Abb. 5: Schematischer Messaufbau für Messungen mit dem Druck-Schnelle-Sensor von Microflown Technologies

## 5 Messbedingungen

Des Weiteren sind die Umgebungsbedingungen während der messtechnischen Untersuchungen zu beachten. Tab. 1 enthält Angaben, die für die Messdurchführung an realen Probestrecken zu berücksichtigen sind.

Tab. 1: Überblick der zu berücksichtigenden Messbedingungen bei Untersuchungen während des Einbaus von offenporigem Asphalt

Parameter	Wert	Zweck	Bemerkung
Abstand Sonde-Asphaltschicht (PA)	2 cm	Schutz des Druck-Schnelle-Sensors vor zu hoher Temperatur; Minimieren von Störeinflüssen aus der Umgebung	
Messzeit	10 s	Maximal zulässige Temperatur wird nicht überschritten; i. d. R. ausreichende Mittelung, um Störeinflüsse zu mindern	
Temperatur am Ort der Sonde	< 60 °C	Zerstörung der Sonde bei Temperaturen > 60 °C	keine Messungen bei Temperaturen > 60 °C
Mindestabstand zu Störquellen (z. B. Baumaschinen)	je nach Lautstärke der Störquelle	ausreichend großer Signal-Rausch-Abstand (mind. 20 dB)	Der Signal-Rausch-Abstand kann durch eine Erhöhung der Verstärkung erreicht werden, wobei aber eine Übersteuerung der Kanäle vermieden werden muss
Messort	Schicht muss innerhalb eines Radius > 50 cm, besser > 1 m um den Messort homogen sein	Einhalten der minimalen Messfläche (ca. 50 cm x 50 cm); Verhinderung von störenden Reflexionen und somit auch Interferenzen	genügend große Entfernung Sonde Fahrbahnrand; genügend großer Abstand zu Hindernissen; einheitliche Verdichtungsstufe innerhalb der erfassten Fläche; Verfahren basiert auf Annahme homogener poröser Absorber
Lautstärke des Signalgebers	maximale Lautstärke, bei welcher nicht übersteuert wird	ausreichend großer Signal-Rausch-Abstand	

## 6 Software - Einstellungen

Vor dem Start der Surface Impedance-Software von Microflown Technologies ist die Soundkarte des Rechners folgendermaßen zu konfigurieren:

- Auswahl des USB Audio-Ausgangs
- Lautsprecherwiedergabe mit voller Lautstärke
- Aufnahme mit „Line“

In Kapitel 3 des Microflown-Handbuchs (vgl. Anlage 9.1) werden die notwendigen Einstellungen detailliert erläutert.

- Nach dem Starten der Software ist mit Hilfe des Buttons Measure in den Messmodus zu wechseln.
- Über den Menüpunkt Settings werden die FFT-Linien-Anzahl, die Abtastrate (in der Regel 44.100 Hz), die Umgebungstemperatur (60 °C) und die Messzeit in Sekunden festgelegt. In der Regel ist eine Messzeit zwischen 5 Sekunden und 10 Sekunden ausreichend.

## 7 Kalibrierung

- Zunächst wird der Button **Calibration** angewählt. Der Sensor wird dazu in einen Raum (kein reflexionsarmer Raum) oder ins Freifeld gerichtet. Dabei ist auf einen möglichst geringen Hintergrundgeräuschpegel (Signal-Rausch-Abstand 20 dB) und einen Mindestabstand von 0,5 m von Hindernissen zu achten.
- Eine Kalibrier-Messung beginnt nach dem Betätigen der Start-Schaltfläche und wird nach Ablauf der im Menüpunkt Settings definierten Messzeit automatisch beendet.
- Folgende Parameter werden angezeigt:
  - das Leistungsdichtespektrum
  - die Kohärenz
  - Betrag und Phase der Übertragungsfunktion

- Dabei sollte der Kohärenzverlauf, der die qualitative Beurteilung der Analyseergebnisse ermöglicht, stets überwacht werden (für repräsentative Messergebnisse ist eine **Kohärenz von nahezu 1** notwendig).
- Der vom Messsystem aufgenommene Schalldruck entspricht dem Kanal 1, die Schallschnelle dem Kanal 2. Bei auftretender Übersteuerung (Overload) wird diese am Bildschirm bzw. an den LED-Leuchten des Signal-Conditioners durch Aufblinker angezeigt. In diesem Fall ist die Verstärker-Einstellung zu ändern und die Messung wiederholt durchzuführen.
- Außerdem muss eine auftretende veränderte Umgebungstemperatur im Programm-Menü „Settings“ eingegeben werden. Eine Temperaturänderung erfordert daher auch eine erneute Kalibrierung.
- Nachdem eine gültige Kalibrier-Messung abgeschlossen wurde, können die Messdaten über den Button **Save** gespeichert werden. Der zu vergebende Dateiname darf **keinen Unterstrich, kein Komma oder Leerzeichen** enthalten.

## 7.1 Messung der akustischen Eigenschaften einer Probenfläche

Zur Messung der akustischen Eigenschaften wird der Druck-Schnelle-Sensor in die Messvorrichtung eingespannt (gemäß Abb. 6).



Abb. 6: Befestigung des Sensors mit Hilfe einer Klemme

- Vor jeder Messung ist die Temperatur zu bestimmen und im Programm-Menü „Settings“ einzutragen. Außerdem ist darauf zu achten, dass die Temperatur geringer als 60°C ist (siehe Tab. 1)
- Die Messung wird über die Schaltfläche Start ausgelöst.
- Die Kohärenz einer Messung sollte nahezu 1,0 betragen – anderenfalls ist eine Wiederholung der Messung empfehlenswert. In vielen Fällen führt eine höhere Messzeit oder eine Erhöhung der Verstärkung mit Hilfe der Verstärker-Regelung zu einer verbesserten Kohärenz.
- Bei auftretender Übersteuerung ist wiederum eine Änderung der Verstärker-Regelung nötig. Danach ist eine erneute Messung durchzuführen.
- Das Speichern der Messergebnisse erfolgt ebenfalls über den Button Save.

## 8 Datenverarbeitung

Zunächst erfolgt das Laden der Kalibrierung im Hauptfenster des Programms (vgl. Abschnitt 3.2 des Microflown-Handbuchs im Anhang 9.1). Danach schließt sich das Laden einer Messung an.

- Der verwendete Messabstand  $h$  und der Abstand Lautsprecher-Sensor  $h_s-h$  (vgl. Abb. 1) sind einzugeben.
- Nachdem die Darstellungen vom Programm aktualisiert wurden, ist eine gute Übereinstimmung der Original-Daten mit den geglätteten Daten zu überprüfen. Diese Übereinstimmung lässt sich durch Änderung des Wertes im Feld „# average measured sample“ beeinflussen. Die Eingabe des Wertes Null bedeutet keine Glättung. Für die meisten Probekörper (poröse Absorber wie Schäume und PA) ist ein Wert von 1 oder höher geeignet.
- Auf dem Bildschirm werden folgende Messergebnisse angezeigt:
  - Betrag und Phase der Übertragungsfunktion (Quotient aus Schallschnelle und Schalldruck) - sowohl die Werte aus der Kalibrierung als auch die Messwerte sind dargestellt
  - Betrag und Phase des spezifischen akustischen Impedanzverhältnisses
  - Betrag und Phase des Reflexionsfaktors
  - Schallabsorptionsgrad

Soll eine andere Messung geladen werden, ist es nicht notwendig, die Kalibrierung noch einmal zu laden.

Über das Programm-Menü **File** und die Schaltfläche **Export to .csv-file** wird das Speichern der Ergebnisse als Textdatei ermöglicht.

## B Ergänzung Abschnitt 2.1.3 – Strömungsresistenz Marshall-Probekörper

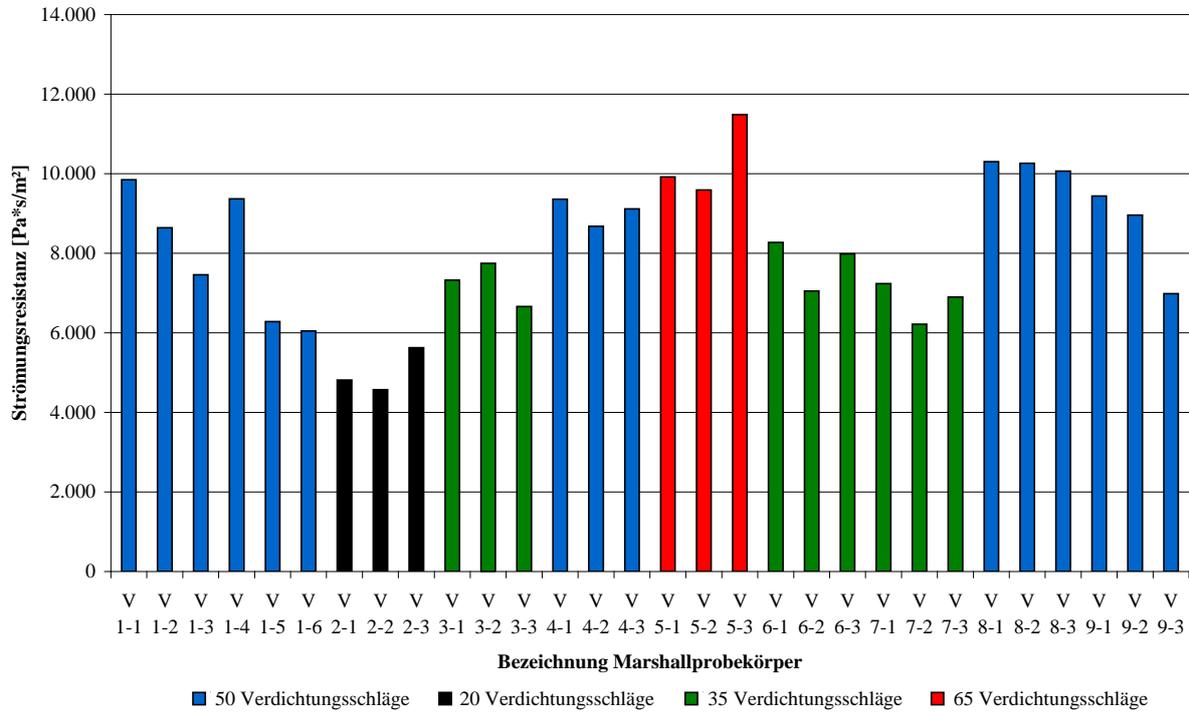


Abbildung 57: Strömungsresistenz der hergestellten 30 Marshallprobekörper in Abhängigkeit der Anzahl der Verdichtungsschläge

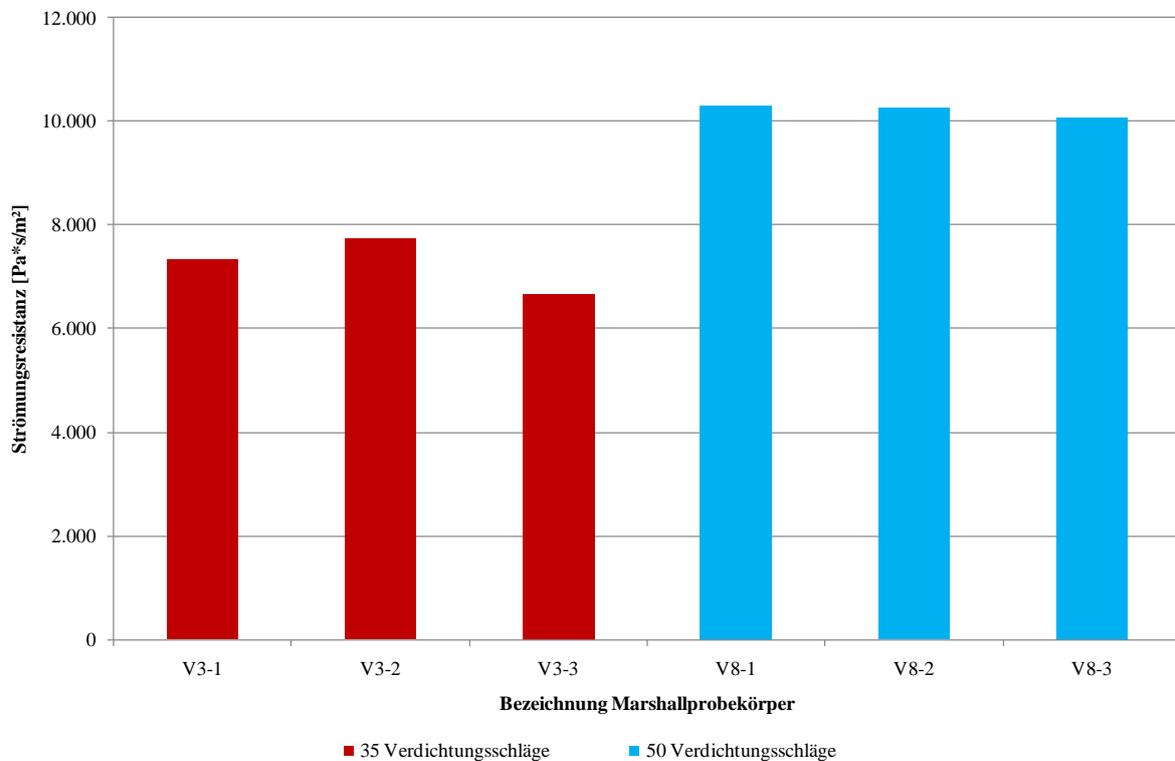


Abbildung 58: Strömungsresistenz der hergestellten Marshallprobekörper V3-1 bis V3-3 und V8-1 bis V8-3 (Solleinwaage 910 g)

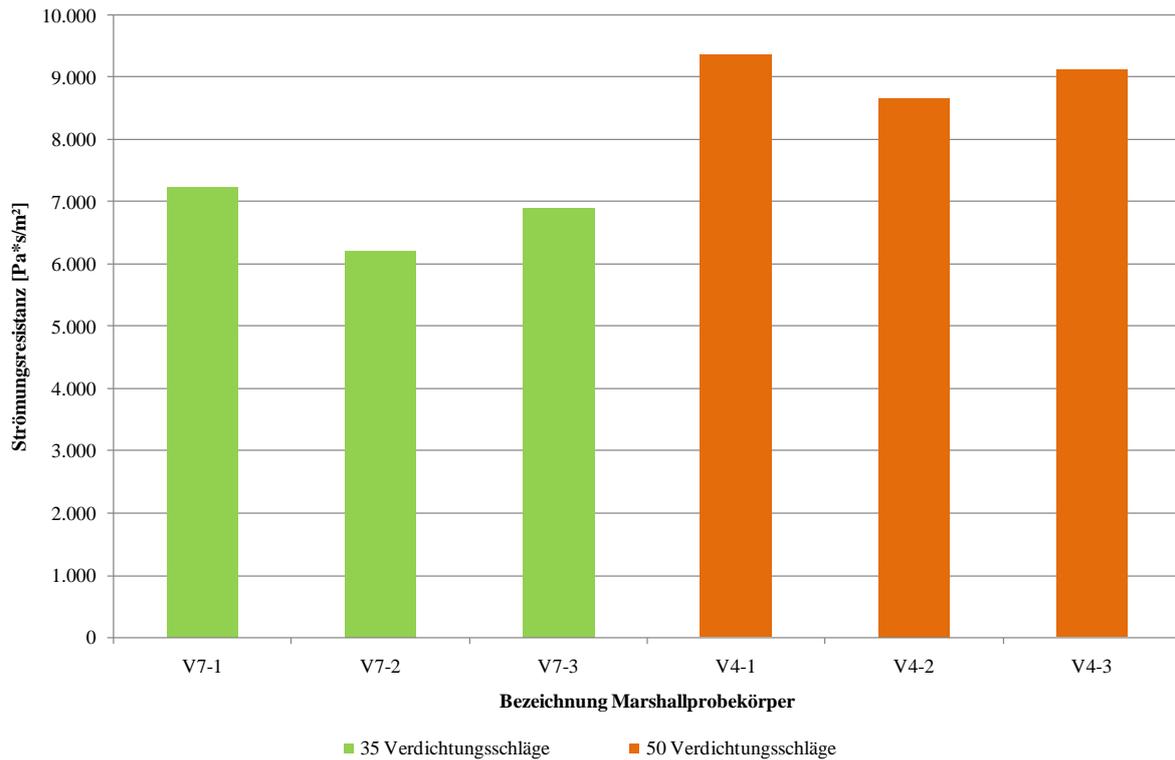


Abbildung 59: Strömungsresistenz der hergestellten Marshallprobekörper V7-1 bis V7-3 und V4-1 bis V4-3 (Sollleinwaage 935 g)

### C Ergänzung Kapitel 2.2.3 – Schallabsorptionsgrad Flächenreduktion, Variante B

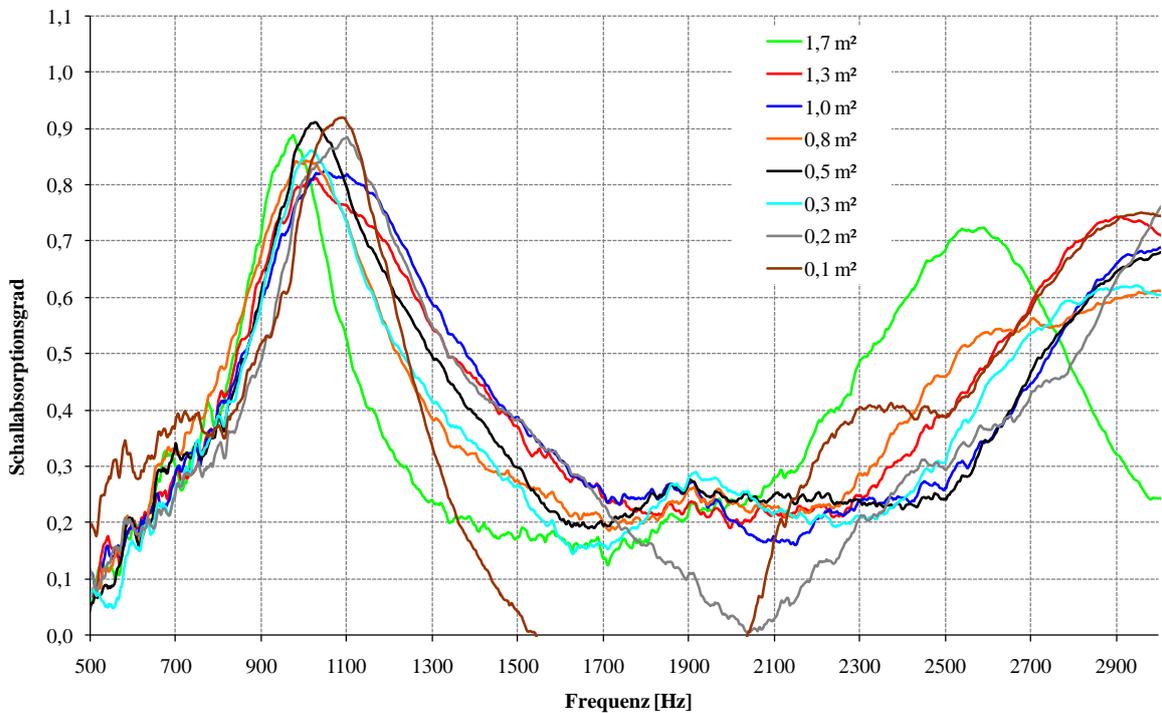


Abbildung 60: Schallabsorptionsgrad einer systematisch reduzierten Fläche offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 H, Variante B)

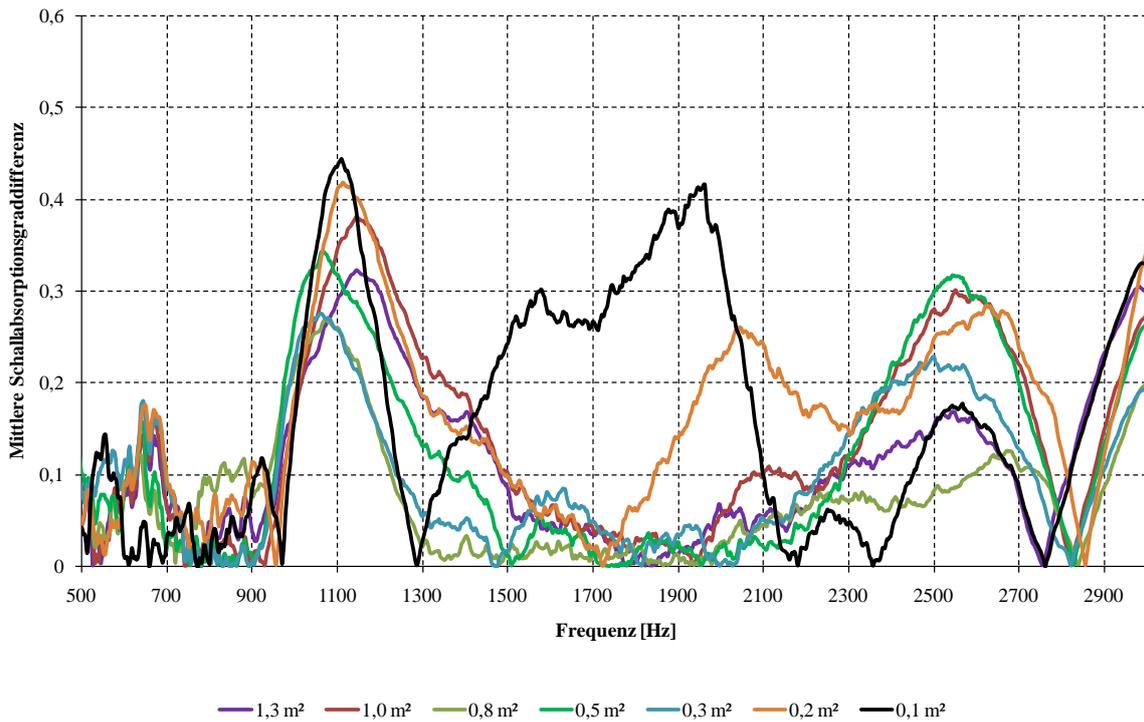


Abbildung 61: Mittlere Schallabsorptionsgraddifferenz einer systematisch reduzierten Fläche offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 H, Variante B)

## D Ergänzung Kapitel 2.2.4 – Schallabsorptionsgrad, Vergleich Messsysteme

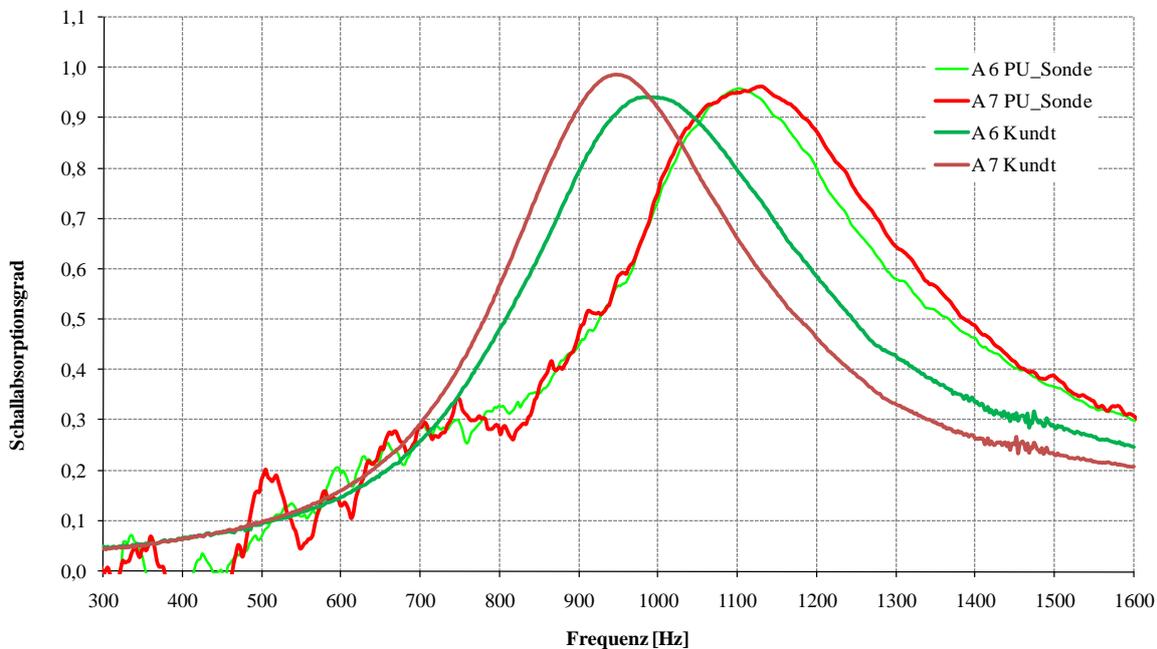


Abbildung 62: Schallabsorptionsgrad aus den messtechnischen Untersuchungen mit dem PU-Sensor an einer Versuchsfläche offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 H) sowie mit dem Kundtschen Rohr an Bohrkernen aus der jeweiligen Asphaltplatte über der der PU-Sensor angeordnet wurde; dargestellt sind die Ergebnisse der Platten mit der Bezeichnung A 6 und A 7

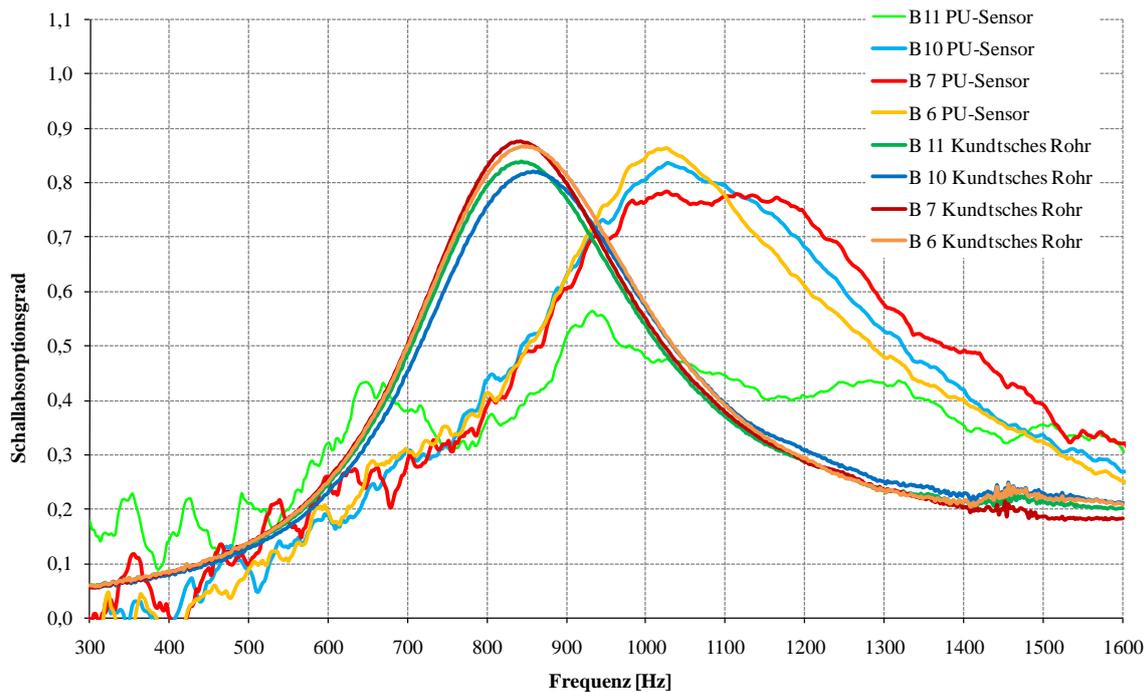


Abbildung 63: Schallabsorptionsgrad aus den messtechnischen Untersuchungen mit dem PU-Sensor an einer Versuchsfläche offenporigen Asphalts (PA 8 mit PmB 40/100-65 H) sowie mit dem Kundtschen Rohr an Bohrkernen aus der jeweiligen Asphaltplatte über der der PU-Sensor angeordnet wurde; dargestellt sind die Ergebnisse der Platten mit der Bezeichnung B6, B7, B10 und B 11

## E Ergänzung Kapitel 2.3.1 – Schallabsorptionsgrad, Einfluss Feuchtigkeit

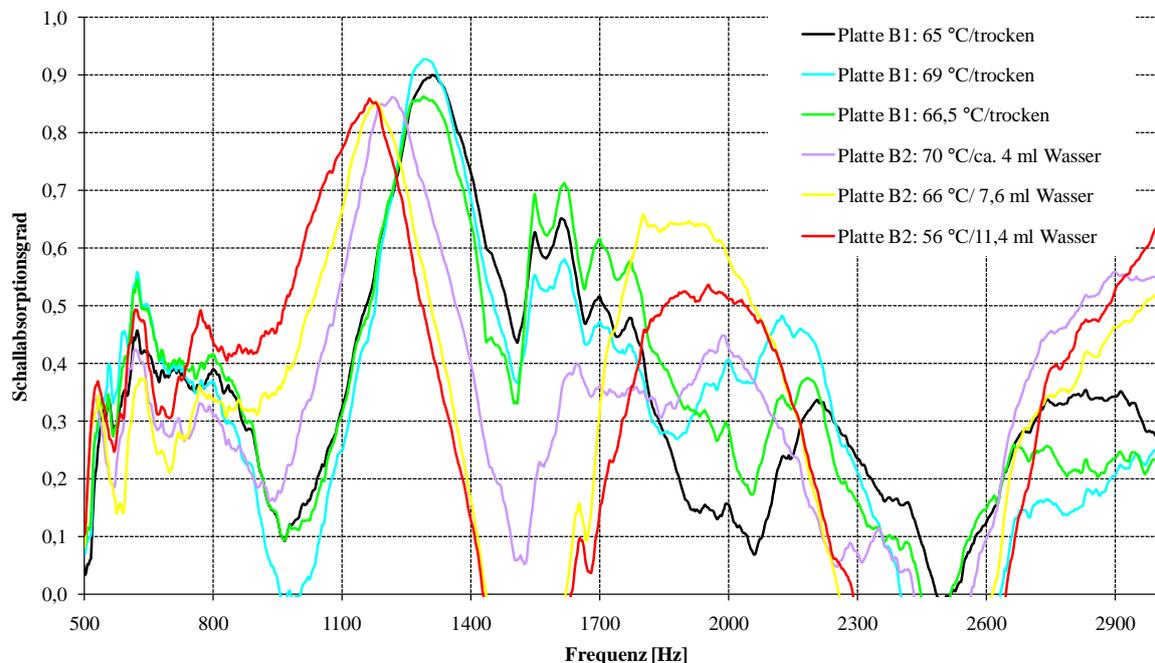


Abbildung 64: Schallabsorptionsgrad aus messtechnischen Untersuchungen einer Platte B1 aus offenporigem Asphalt und einer mit Wasser befeuchteten Platte B2 bei unterschiedlichen Temperaturen innerhalb des Mischguts

## F Ergänzung Kapitel 2.4.1 – Wetterdaten

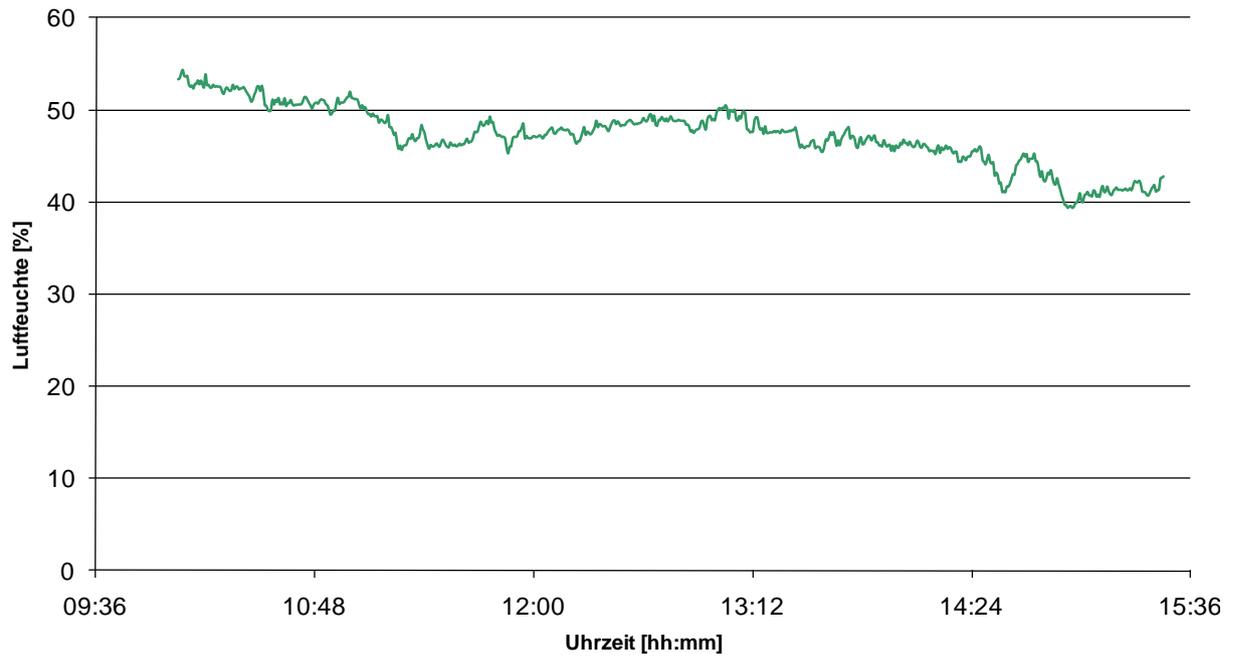


Abbildung 65: Luftfeuchte während den akustischen Messungen auf Feld 3 und 4

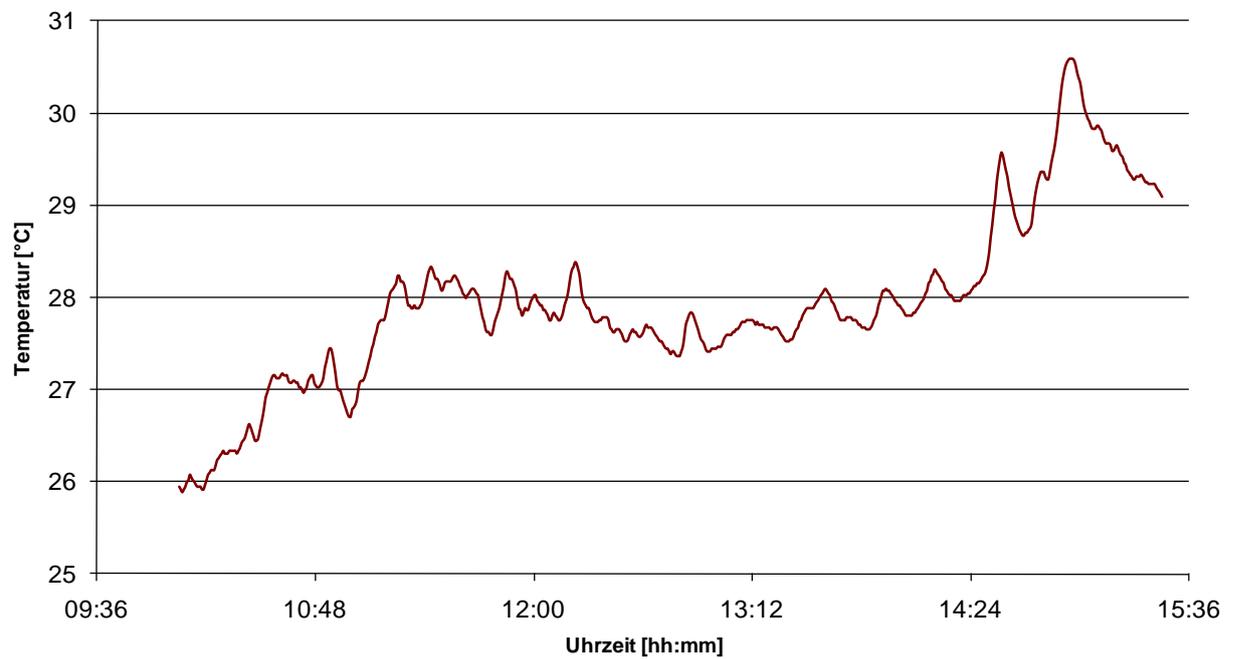


Abbildung 66: Lufttemperatur während den akustischen Messungen auf Feld 3 und 4

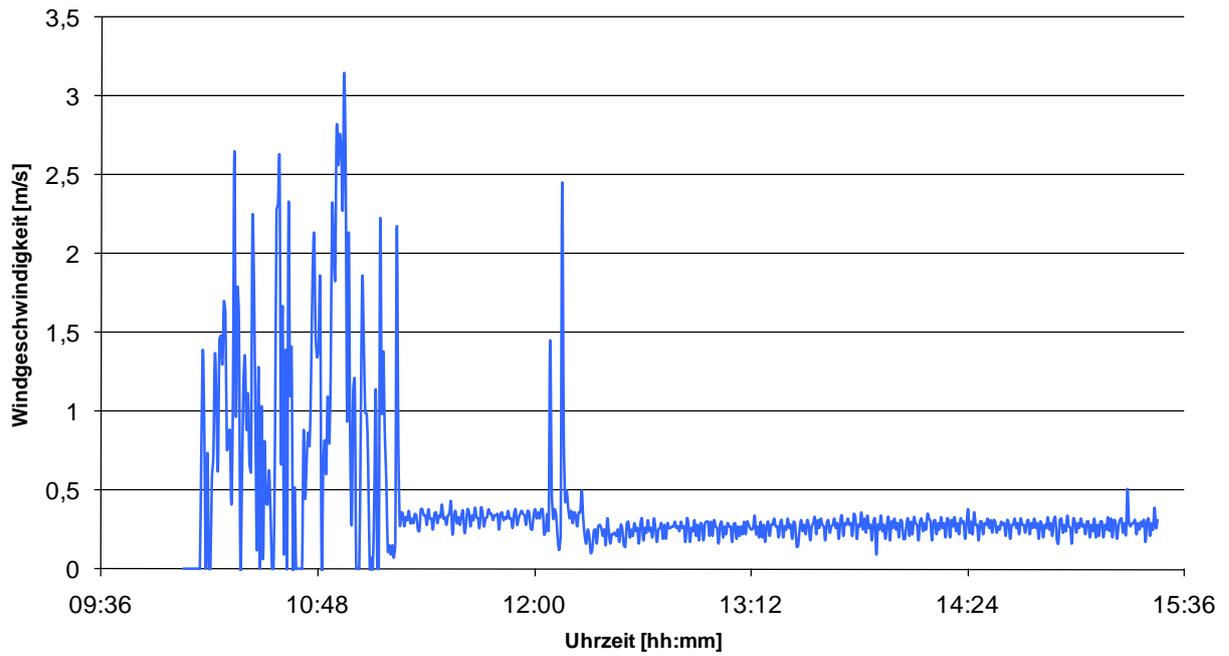


Abbildung 67: Windgeschwindigkeit während den akustischen Messungen auf Feld 3 und 4

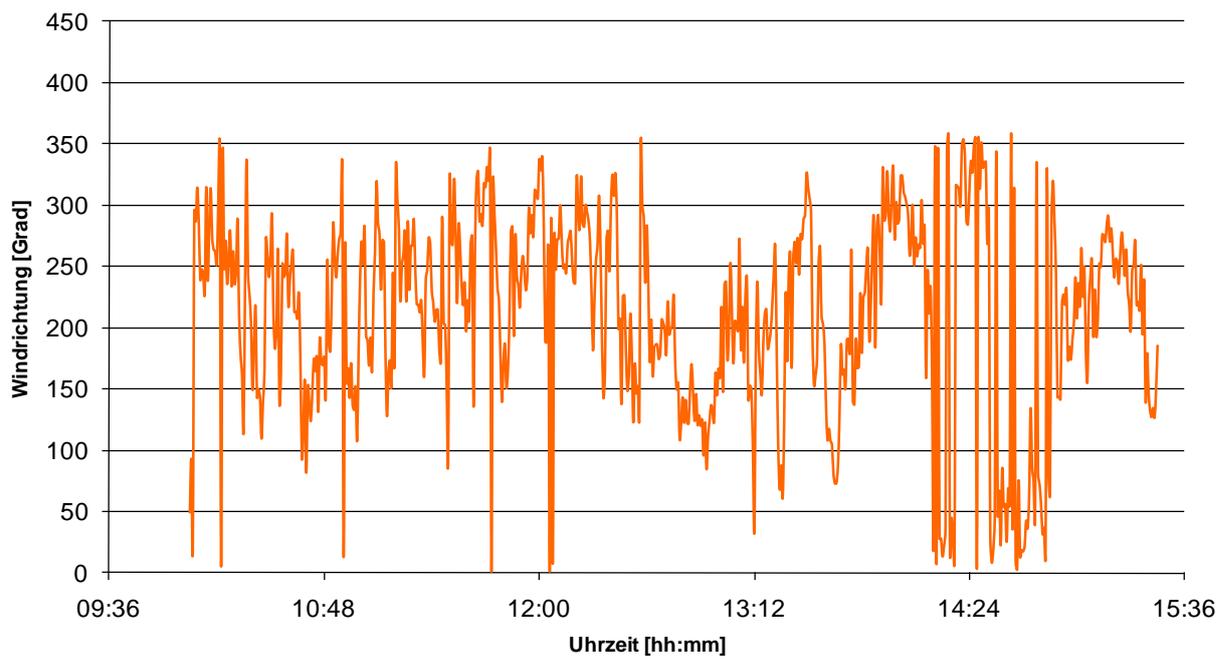


Abbildung 68: Windrichtung während den akustischen Messungen auf Feld 3 und 4

## G Ergänzung Kapitel 2.4.1 – Schallabsorptionsgrad, in-situ Messung

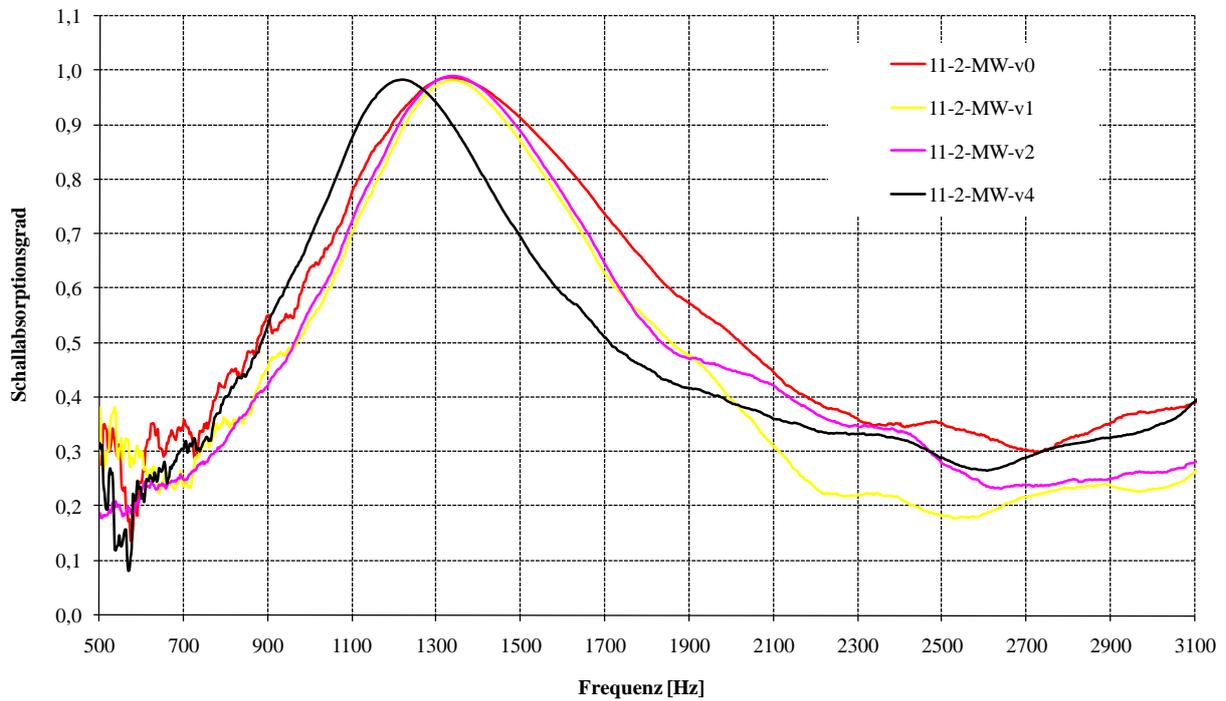


Abbildung 69: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 8 mit 70/100 tecRoad Premium) während der Verdichtung; (Feld 11, Messpunkt 2; Verdichtungsstufen v0 bis v4 entsprechen der Anzahl der Walzübergänge

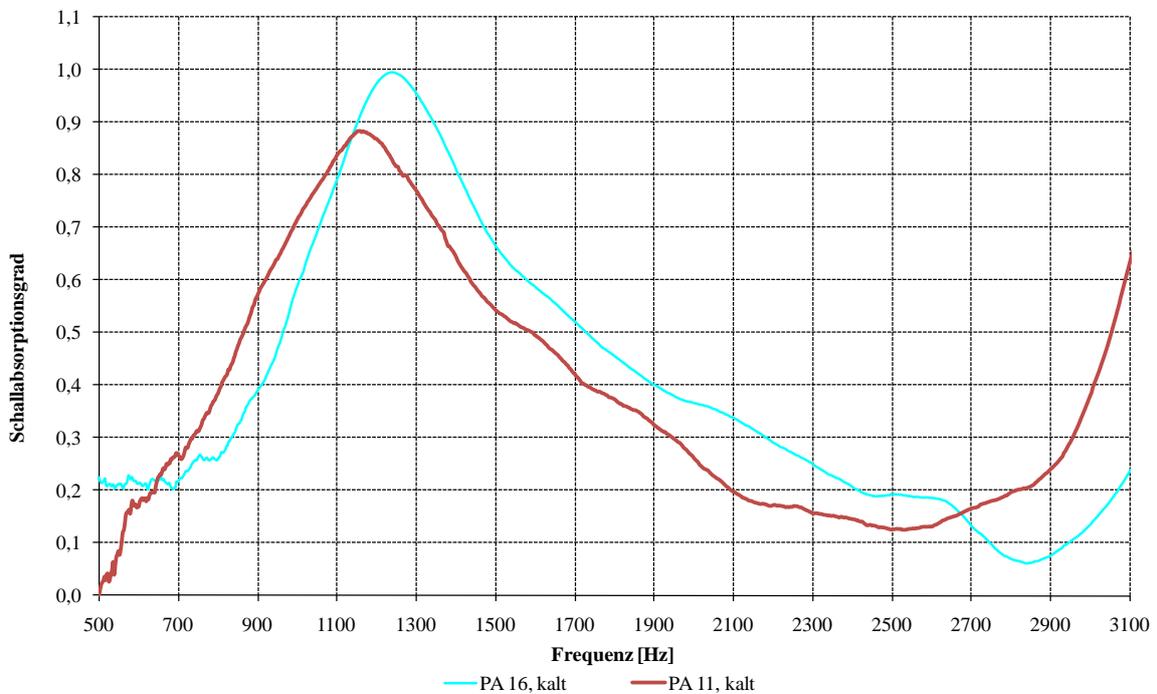


Abbildung 70: Mittlerer Schallabsorptionsgrad offenporigen Asphalts (PA 11 / PA 16 mit PmB 40/100-65 A) nach dem Einbau an unterer offenporiger Schicht

## H Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 3, untere Schicht

An der unteren, bereits ausgehärteten Schicht von Feld 3 (PA 16 mit PmB 40/100-65 A) wurden vier Messungen durchgeführt.

Tabelle 15: Aus den Einzelmessungen an der PA 8 – Schicht berechnete Porositäten und Schichtdicken. Verwendet wurden die Absorptionsgrade im Bereich von 500 Hz – 3.000Hz.

Messung	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
1	17,77	2,29
2	17,64	2,27
3	17,62	2,27
4	17,71	2,28
Mittelwert	17,70	2,30

Die zugehörigen graphischen Darstellungen zeigt Abbildung 71.

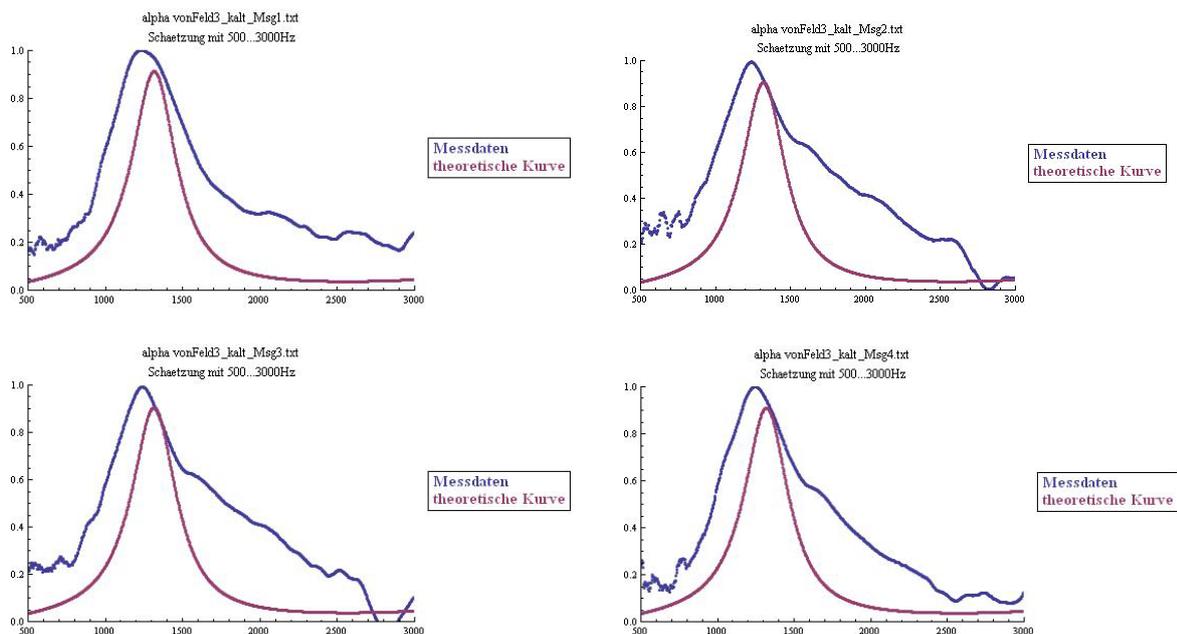


Abbildung 71: Messdaten und mit Hilfe des Modells berechnete Werte des Absorptionsgrades für die untere Schicht von Feld 3. Die im Modell eingesetzten Werte sind die aus Tabelle 15.

## I Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 3, obere Schicht

Die berechneten Werte der Porosität sowie der Schichtdicke der oberen Schicht von Feld 3 für verschiedene Verdichtungsstufen sind in Tabelle 16 angegeben. Für die

Parameterberechnung wurde hierbei der Absorptionsgrad im Frequenzbereich von 500 Hz – 1.500 Hz verwendet. Als mittlerer Korndurchmesser wurde  $\bar{D} = 7,6\text{mm}$  eingesetzt.

Tabelle 16: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der oberen Schicht auf Feld 4. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltoberfläche), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 500 Hz - 1.500 Hz herangezogen.

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	46	39,40	4,3
v2	46	36,40	4,0
v3	42	36,30	4,1
v5	42	35,40	4,2
v6	38	34,00	4,0

Die graphischen Darstellungen zeigt Abbildung 72.

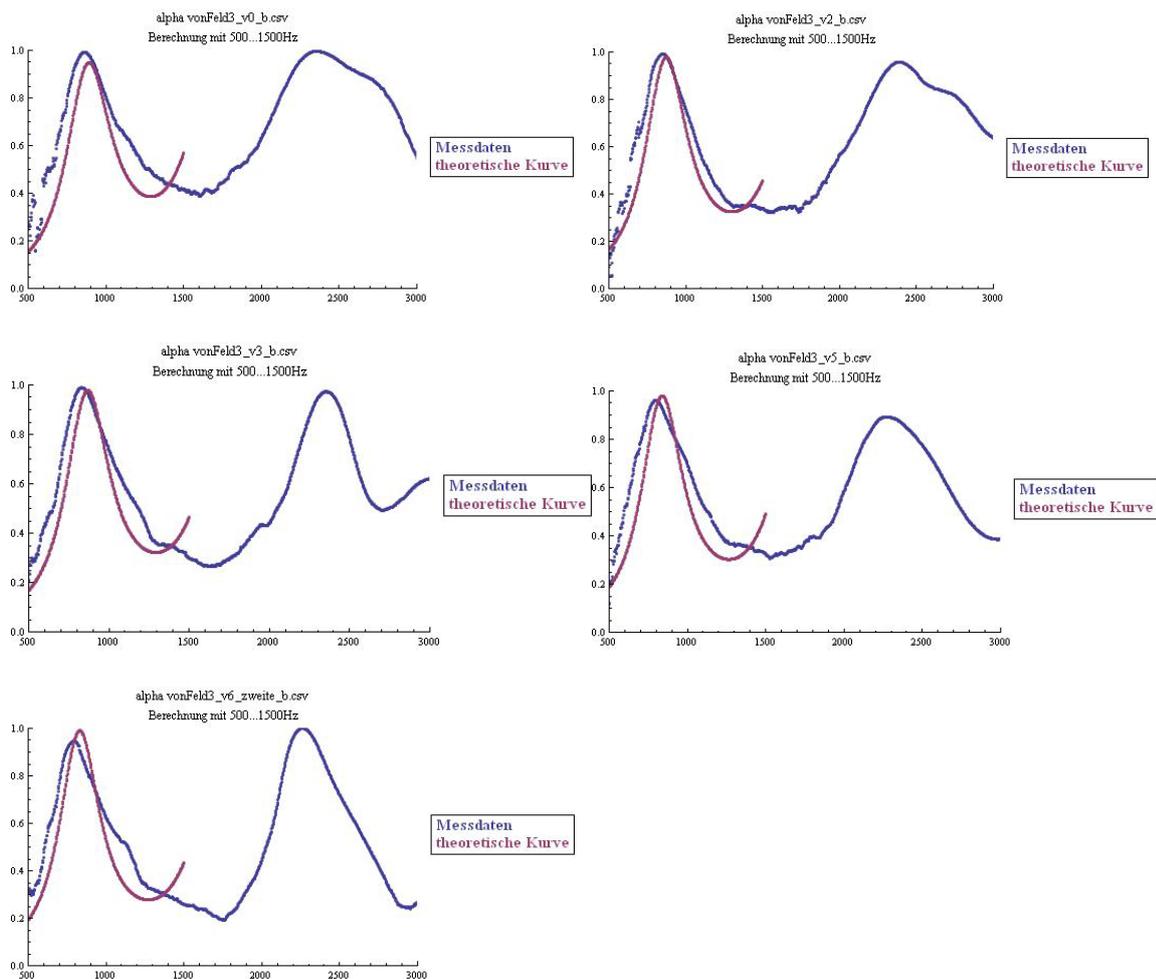


Abbildung 72: mit Hilfe des Modells berechnete Werte des Absorptionsgrades für die untere Schicht von Feld 3. Die im Modell eingesetzten Werte sind die aus Tabelle 16

## J Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 11

Die Berechnung der Porosität sowie der Schichtdicke der oberen Schicht von Feld 11 für verschiedene Verdichtungsstufen ist in Tabelle 17 angegeben. Für die Parameterberechnung wurde hierbei der Absorptionsgrad im Frequenzbereich von 1.000 Hz – 2.000 Hz verwendet. Als mittlerer Korndurchmesser  $\bar{D} = 7,6mm$  wurde eingesetzt.

Tabelle 17: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der offenporigen Schicht auf Feld 11. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltoberfläche), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 1.000 Hz - 2.000 Hz herangezogen.

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	35	23,2	2,2
v1	32	23,1	2,3
v2	28	23,1	2,4
v4	25	23,2	2,4
v5	24	23,2	2,7

## K Ergänzung Abschnitt 2.4.1 – Porositäten, Schichtdicken Feld 12

Die Berechnung der Porosität sowie der Schichtdicke der oberen Schicht von Feld 12 für verschiedene Verdichtungsstufen ist in Tabelle 17 angegeben. Für die Parameterberechnung wurde hierbei der Absorptionsgrad im Frequenzbereich von 1.000 Hz – 2.000 Hz verwendet. Als mittlerer Korndurchmesser  $\bar{D} = 7,6mm$  wurde eingesetzt.

Tabelle 18: Berechnete Parameter für die einzelnen Verdichtungsstufen beim Einbau der offenporigen Schicht auf Feld 12. Die Temperatur ist in Höhe der PU-Sonde gemessen (ca. 2 cm über der Asphaltoberfläche), für die Berechnung wurden die Messwerte des Absorptionsgrads im Bereich von 1.000 Hz - 2.000 Hz herangezogen.

Verdichtungsstufe	Temperatur [°C]	H <sub>zu</sub> (berechnet) [Vol.-%]	d (berechnet) [cm]
v0	44	23,1	2,9
v2	40	23,0	2,9
v3	40	23,1	3,0
v4	34	22,8	3,0
v5	34	23,2	3,0