

Veröffentlichungen des Institutes  
für Straßen- und Eisenbahnwesen

Band 58

# **Optimierung des Verformungs- widerstandes von Splittmastix- asphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke**

Leyla Chakar



Leyla Chakar

**Optimierung des Verformungswiderstandes  
von Splittmastixasphalt durch Modifikation  
mit Elektroofenschlacke**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

**Veröffentlichungen  
des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen  
Band 58**

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos



# Optimierung des Verformungs- widerstandes von Splittmastix- asphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke

von  
Leyla Chakar

Dissertation, genehmigt von der  
Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften  
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)  
Tag der mündlichen Prüfung: 17. Dezember 2008  
Referenten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael P. Wistuba

## Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe  
www.uvka.de

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales  
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz  
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2009  
Print on Demand

ISSN: 0344-970X  
ISBN: 978-3-86644-447-8

## **Vorwort**

Die Bundesrepublik Deutschland verfügt über ein sehr gut ausgebautes Straßennetz, von dem ein Großteil in Asphaltbauweise hergestellt wurde. Asphalt ist aber aufgrund des thermoviskosen Verhaltens des Bindemittels Bitumen nicht starr, sondern kann sich infolge der Beanspruchungen durch Verkehr und vornehmlich bei höheren Temperaturen plastisch verformen. Die Folge sind z.B. Spurrinnen, die die Verkehrssicherheit beeinträchtigen und häufig aufwändige Sanierungsmaßnahmen erfordern. Die prognostizierten hohen Wachstumsraten im Straßengüterverkehr, die innerhalb der EU diskutierte Erhöhung der zulässigen Achslasten, der Einsatz von Super-Single-Reifen mit einer erhöhten Flächenpressung und nicht zuletzt die globale Erwärmung aufgrund des Klimawandels werden diese Problematik in den nächsten Jahren deutlich verschärfen und stellen erhöhte Anforderungen an die Asphalttechnologie. Es wird ein Asphalt, insbesondere für die Deckschicht benötigt, der vom Grundsatz her eine hohe Lebensdauer aufweist und unter den einwirkenden Beanspruchungen möglichst verformungsbeständig ist. Nur wenn der Asphalt diesen Anforderungen gerecht wird, können Schäden vermindert und damit Erhaltungsintervalle vergrößert werden, was durch die Reduktion von Unfall-, Erhaltungs- und Staukosten einen erheblichen volkswirtschaftlichen Effekt mit sich bringt.

Nun hat sich in den vergangenen Jahren der eigens für hohe Beanspruchungen konzipierte Splittmastixasphalt (SMA) mit polymermodifiziertem Bitumen, eingebaut als Deckschicht in Fahrbahnkonstruktionen aus Asphalt, in der Regel als recht widerstandsfähig gegen Verformungen erwiesen; allerdings wird dies für die in Zukunft erwarteten Belastungen kaum ausreichen. Andererseits zeigten Langzeitbeobachtungen, dass sich Asphaltdeckschichten unter Verwendung von gezielt aufbereiteten Elektroofenschlacken (EOS) in hochbelasteten Straßen verformungsstabiler verhalten als Asphalte, die mit konventionellen Gesteinskörnungen hergestellt wurden. Offenbar bewirkt speziell die EOS eine Erhöhung des Verformungswiderstandes; der wissenschaftliche Nachweis hierfür wurde aber noch nicht geführt.

Hier setzte Frau Dr. Chakar mit ihren Forschungsarbeiten an und prüfte die gewonnenen Erkenntnisse zunächst in umfangreichen verhaltensorientierten dynamischen Laborversuchen, die sie an unserem Institut durchführte. Nach deren Verifizierung entschied sie sich folgerichtig dazu, die positiven Eigenschaften von SMA und EOS zu verbinden, d.h. den ohnehin hohen Verformungswiderstand von SMA durch

Modifikation mit EOS weiter zu verbessern. Hierzu hat sie, ausgehend von naturwissenschaftlichen Grundlagen und physikalischen Eigenschaften der Mineralstoffe, ein in sich begründetes und vielversprechendes Versuchsprogramm mit unterschiedlichen Rezepturen des SMA gestartet. Nach Abschätzung des Verformungswiderstandes unter hohen Verkehrsbeanspruchungen und Temperaturen mit Hilfe des dynamischen einaxialen Druckschwellversuches als Laborprüfverfahren konnte sie schließlich den Einfluss von EOS-Anteilen gegenüber hellen konventionellen Gesteinskörnungen in einem SMA-Mischgut nachweisen, was zu einer Optimierung des thermischen Verhaltens und des Verformungswiderstandes von SMA führte.

Obwohl im Rahmen dieser Arbeit nicht sämtliche Fragestellungen quantitativ, sondern teilweise nur qualitativ beantwortet werden konnten, so ist das Ergebnis der Forschungsaktivitäten von Frau Dr. Chakar durchaus beeindruckend: Sie hat nicht nur einen Beitrag geleistet zum Bau stabiler Deckschichten für sehr hohe Beanspruchungen, sondern auch eine Methodik entwickelt zur Einschätzung des Verformungswiderstandes unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens, die realitätsnäher ist als bisherige Verfahren. Mit ihren Erkenntnissen zu den Wirkungszusammenhängen der Asphaltverformungen im Labor und in der Praxis sowie den Neuerungen und Ansätzen zur quantitativen Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphaltrezepturen hat sie die Asphalttechnologie insgesamt ein Stück weitergebracht. Grundsätzlich besteht nun die Möglichkeit, SMA für seinen künftigen Verwendungszweck besser einzuschätzen und hoch belastete Straßen anforderungsgerecht, d.h. möglichst verformungsbeständig zu realisieren.

Frau Dr. Chakar wurde mit der vorliegenden Arbeit an der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften der Universität Karlsruhe (TH) mit sehr gutem Erfolg promoviert. In diesem Zusammenhang ist Herrn Univ.-Prof. Dr. techn. Michael P. Wistuba von der Technischen Universität Braunschweig für die Übernahme des Korreferates zu danken. Darüber hinaus gilt besonderer Dank der Franz und Alexandra Kirchhoff-Stiftung, der BSW Stahl-Nebenprodukte GmbH, der SWA Südwest Asphalt GmbH & Co. KG, der Donau-Asphalt-Mischwerke GmbH & Co. KG und der AMK Asphalt-Mischwerke Kraichgau GmbH für die finanzielle Förderung dieser Forschungsarbeit und die wertvolle Unterstützung.

Karlsruhe, im März 2009

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Ralf Roos

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als akademische Mitarbeiterin am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH).

Zum Gelingen der Arbeit haben viele Menschen beigetragen, für deren Hilfe und tatkräftige Unterstützung ich herzlich danken möchte.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Roos, Leiter und Ordinarius des ISE, der mir an seinem Institut die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gab und mich dabei wohlwollend unterstützt hat. Ebenso dankbar bin ich Herrn Professor Wistuba für die freundliche und spontane Übernahme des Korreferates und für seine wertvollen Anregungen und Hinweise.

Danken möchte ich auch meinem ehemaligen Abteilungsleiter Herrn Dr. Freund für die konstruktive Unterstützung. Weiterhin bin ich Frau Klauke dankbar, die die erforderlichen Laborarbeiten stets sorgfältig ausführte.

Nicht zuletzt geht mein Dank an die Franz und Alexandra Kirchhoff Stiftung und ihr Kuratorium sowie den Firmen BSW Stahl-Nebenprodukte GmbH, SWA Südwest Asphalt GmbH & Co. KG, AMK Asphalt-Mischwerke Kraichgau GmbH und Donau-Asphalt-Mischwerke GmbH & Co. KG für die finanzielle Förderung der Arbeit.

Schließlich danke ich meinem Ehemann Thomas sowie meinen ehemaligen Kollegen Dr. Reichelt und Lars Lau für die stetige Hilfsbereitschaft bei der Diskussion der vorliegend beschriebenen Problematik.

Leyla Chakar



## **Kurzfassung**

### **Optimierung des Verformungswiderstandes von Splittmastixasphalt durch Modifikation mit Elektroofenschlacke**

Ziel dieser Arbeit war die Prüfung, ob und ggf. inwieweit durch Modifikation von Splittmastixasphalt (SMA) 0/11 S mit Elektroofenschlacke (EOS) in verschiedenen Kornklassen eine Optimierung des Verformungswiderstandes unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens möglich ist. Hierzu wurden helle Gesteinskörnungen aus Moräne in den Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm mit den gleichen Volumenanteilen aus EOS kombiniert, so dass sich insgesamt acht Varianten ergaben. Dabei wurden Empfehlungen für die Rezeptierung von SMA 0/11 S mit EOS gegeben.

Zur Erfassung des Verformungswiderstandes wurden die Dehnungsraten bei allen Asphaltvarianten mit dem einaxialen dynamischen Druckschwellversuch nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) bestimmt. Die Versuche wurden zum Einen bei der nach TP Asphalt-StB empfohlenen Prüftemperatur von 50 °C durchgeführt, mit dem Ergebnis, dass sich mit zunehmendem Anteil an EOS abnehmende - also günstigere - Dehnungsraten einstellten, zum anderen zur Erfassung der Temperaturabhängigkeit des Verformungswiderstandes zusätzlich bei den Prüftemperaturen 40 und 60 °C.

Anhand von künstlichen Wärmebestrahlungen an Probekörpern aus den genannten Asphalten wurden im Labor mit der Versuchseinrichtung nach ROSSBERG (2000) und einer hierfür zweckmäßigen Modifizierung das Erwärmungsverhalten an der Oberfläche und die Temperaturentwicklung innerhalb des Probekörpers erfasst. Die Temperaturzustände aller Asphaltvarianten bei festgelegten Zeitpunkten zeigten, dass die Zugabe von EOS in allen Kornklassen eine signifikante Erhöhung der Oberflächentemperatur bewirkt, jedoch zu einer Reduzierung der Temperaturen in der Tiefe führt.

Auf Basis der aus beiden Versuchen gewonnenen Ergebnisse - Temperaturzuständen aus der künstlichen Wärmebestrahlung und Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch - wurde für Vergleiche eine mittlere Dehnungsrate unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens theoretisch ermittelt. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich bei einer Variante ein Optimum einstellt. Alle Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm weisen im Vergleich mit den übrigen Varianten überdurchschnittliche bautechnische Eigenschaften hinsichtlich des Haftverhaltens

und Verformungswiderstandes auf. Danach können diese EOS-modifizierte Asphalte für eine Optimierung des Verformungswiderstandes eingesetzt werden.

Die hier entwickelte Methodik zur Einschätzung des Verformungswiderstandes ist durch die Berücksichtigung des thermischen Verhaltens näher an der Realität als die konventionelle Methode und für eine qualitative Einschätzung geeignet.



## **Abstract**

### **Optimization of the deformation resistance of stone mastic asphalt by modification with electric furnace slag**

The aim of this work was to examine whether and how far the rut resistance of stone mastic asphalt (SMA) 0/11 S can be optimized by modification with electric furnace slag (EOS) with consideration of its influence on the thermal behaviour of asphalt. For this purpose were bright coarse aggregates consisting of Moräne combined with the same percentages by volume from EOS in the aggregate size 2/5, 5/8 and 8/11 mm. This leads to 8 different aggregate combinations. In this process, recommendations were given, for the design of stone mastic asphalt (SMA 0/11 mm) with coarse aggregates of EOS.

For the evaluation of the deformation resistance of all asphalt variants, mono-axial pressure-swelling tests were conducted according to the TP A-StB technical testing guidelines for road construction of asphalt (Research Society for the Roads and Traffic, 1999) and the expansion rates were recorded. The investigations were carried out at the test temperature of 50 °C as it is recommended by the TP A-StB. The investigation results indicated that increasing percentages of EOS leads to decreasing expansion rates, which are indicators for a better rut resistance. The pressure-swelling tests were also conducted with test temperatures of 40 and 60 °C to determine the temperature dependency of the expansion rates.

On the basis of exposures to laboratory heat-light sources, test specimens of each asphalt variant were irradiated to evaluate the thermal behaviour on the surface and inside the test specimen. For this purpose a test facility of ROSSBERG was applied, after carrying out some appropriate modifications. The temperature levels of all asphalt variants showed that the addition of EOS causes increasing the surface temperature on the one hand, but decreasing the temperature in the depth on the other hand.

With the results of both investigations - temperature levels of the exposures to the laboratory heat-light sources and expansion rates of the mono-axial pressure-swelling tests - an "average expansion rate" has been calculated to enable the comparison of expansion rates taking the thermal behaviour into account. It was stated that an optimum is located within the examined asphalt variants. All asphalt variants with EOS in the aggregate size 8/11 mm possess superior characteristics regarding

the water sensitivity and the deformation resistance. The developed and demonstrated methodology for estimation of the deformation resistance is more realistic than the conventional method due to the consideration of the thermal behaviour and is suitable for qualitative valuations.

<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite
<b>1</b>	<b>Einführung in die Thematik</b>	<b>1</b>
1.1	Veranlassung und Zielsetzung	1
1.2	Vorgehensweise	2
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Elektroofenschlacke als Gesteinskörnung	5
2.1.1	Entstehung von Elektroofenschlacken	5
2.1.2	Chemische und mineralogische Zusammensetzung	9
2.2	Grundlagen zum Verformungsverhalten von Splittmastixasphalt	11
2.2.1	Beurteilung des Verformungsverhaltens mit dem Druckschwellversuch	14
2.2.2	Auswirkungen ausgewählter Gesteinseigenschaften auf das Verformungsverhalten	18
2.3	Weitere Eigenschaften des Splittmastixasphalts und ihre Bestimmung	23
2.3.1	Untersuchung der Wasserempfindlichkeit	24
2.3.2	Verdichtungswiderstand	28
2.4	Strahlungstechnische Grundlagen zum Erwärmungsverhalten	29
2.4.1	Solarstrahlung und Sonnenlicht	29
2.4.2	Künstliches Bestrahlen und Laborlichtquellen	30
2.4.3	Bestrahlungsanlagen zur thermischen Beanspruchung von Asphaltproben	33
<b>3</b>	<b>Auswahl und Eigenschaften der Referenz- und Variationsasphalte</b>	<b>35</b>
3.1	Beschreibung der Ausgangsmaterialien	35
3.1.1	Elektroofenschlacke	35

3.1.2	Eigenschaften der konventionellen Gesteinskörnungen, Bindemittel und des Zusatzes	38
3.2	Vorüberlegungen zur Auswahl der Korngrößenverteilung von EOS-modifiziertem Splittmastixasphalt	39
3.3	Durchführung einer Eignungsprüfung und Rezepturfestlegung	41
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Wasserempfindlichkeit</b>	<b>49</b>
4.1	Prüfbedingungen und Untersuchungsergebnisse	49
4.2	Ergebnisinterpretation	54
<b>5</b>	<b>Untersuchungen zum Verformungswiderstand</b>	<b>57</b>
5.1	Vorgehensweise	57
5.2	Vergleich verschiedener Auswerteverfahren und Festlegung	57
5.3	Einfluss der Modifikation auf den Verformungswiderstand	59
5.4	Temperaturempfindlichkeit der Asphaltvarianten	63
<b>6</b>	<b>Überprüfung der Konsistenz des Temperaturverhaltens von Asphaltproben bei künstlicher Wärmebestrahlung</b>	<b>67</b>
6.1	Modifizierte Sonnenlichtsimulationsanlage, Versuchsaufbau und Vorgehensweise	67
6.2	Versuchsergebnisse und Interpretation	73
6.2.1	Vergleich der Temperatureinzelwerte unter Wiederholbedingungen	73
6.2.2	Vergleich der Temperaturmittelwerte zweier Probekörper unter Wiederholbedingungen	75
6.2.3	Vergleich der Temperaturmittelwerte beider Lampenkonstellationen	76
6.3	Ergebnisse der Helligkeitsvariation	77
6.4	Temperaturzustände innerhalb der Probekörper	78
<b>7</b>	<b>Verhaltensorientierte Optimierung des Splittmastixasphalts unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse</b>	<b>81</b>

7.1	Zusammenwirken des Mineralstoffgerüsts und des thermischen Verhaltens auf den Verformungswiderstand	81
7.2	Einfluss der Kornklassen	84
<b>8</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>11</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
<b>12</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>Anlage 1: Kenngrößen der untersuchten Asphalte</b>		<b>115</b>
<b>Anlage 2: Ergebnisse zur Wasserempfindlichkeitsuntersuchung</b>		<b>125</b>
<b>Anlage 3: Ergebnisse der Druckschwellversuche</b>		<b>147</b>
<b>Anlage 4: Ergebnisse zu den Bestrahlungsuntersuchungen</b>		<b>175</b>
<b>Anlage 5: Statistische Auswertungen</b>		<b>185</b>



# **1 Einführung in die Thematik**

## **1.1 Veranlassung und Zielsetzung**

Aus steigender Verkehrsbelastung, globaler Erwärmung und hohem Anspruch an die Lebensdauer einer Straßenbefestigung ergibt sich die Forderung nach einer dauerhaften und verformungsresistenten Deckschicht.

Deckschichten aus Splittmastixasphalt (SMA) mit polymermodifiziertem Bitumen haben sich auf hochbelasteten Straßen in der Regel als widerstandsfähig gegen Verformung in Form von Spurrinnen erwiesen.

Langzeitbeobachtungen von unterschiedlichen Strecken unter Verwendung von gezielt hergestellten und aufbereiteten Elektroofenschlacken (EOS) zeigten, dass die EOS im Vergleich zu konventionellen Gesteinskörnungen in hochbelasteten Straßenbauweisen zu einer Steigerung des Verformungswiderstandes führten und deshalb als hochwertige Gesteinskörnung beurteilt wurden (MERKEL et al., 2000). Dies hat sich auch durch umfangreiche verhaltensorientierte dynamische Laborversuche, die am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) der Universität Karlsruhe (TH) durchgeführt wurden, bestätigt (KAPP, 2002).

Die EOS ist auch wegen ihrer vorteilhaften Resistenz gegen Polieren im Vergleich zu den herkömmlichen Gesteinskörnungen in hoch belasteten Asphaltdeckschichten, die dauerhaft gute Griffigkeit aufweisen müssen, sehr gefragt. Die Porosität von EOS trägt dazu bei, dass unter Einwirkung von Verkehr und Witterung eine ständige Regenerierung der Mikrotextur auf den Gesteinsoberflächen stattfindet (HINTSTEINER, 1987). Somit bleibt ihr PSV-Wert trotz Polierwirkung hoch. Im Hinblick auf die große Nachfrage und den begrenzten in der Stahlproduktion jährlich anfallenden Mengen an EOS muss ihr Einsatz gezielt ausgewählt werden. Die Elektroofenschlacken können nach den ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) bzw. ETV-StB-BW (2005) in Deckschichten im Splittbereich eingesetzt werden. Zum Beispiel kann beim offenporigen Asphalt der Sorte 0/11 nach dem Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten (FGSV, 1998) die EOS nur in den Lieferkörnungen 5/8 und 8/11 mm verwendet werden, da in dieser Asphaltart die Lieferkörnung 2/5 mm nicht enthalten ist. Im Gegensatz hierzu kann EOS im Splittmastixasphalt der Sorte 0/11 S in den Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 mm eingesetzt werden.

Vergleichsuntersuchungen des Temperaturverhaltens innerhalb von Asphaltbauweisen mit und ohne EOS ergaben, dass EOS einen homogeneren Erwärmungs- und Abkühlungsverlauf verursacht als konventionelle Gesteinskörnungen (FREUND und GROSSMANN, 2000). Die bei Asphaltdeckschichten mit EOS in situ nachgewiesenen günstigen Eigenschaften gegen Spurrinnenbildung sind vermutlich auch darauf zurückzuführen, dass sich solche Asphalte infolge ihrer wärmetechnischen Eigenschaften trotz höherer Oberflächentemperatur in der Tiefe nicht so stark erwärmen wie Asphalte mit konventionellen Gesteinskörnungen.

Aufhellungen von dunklen Asphaltdeckschichten mit hellen künstlichen oder konventionellen Gesteinskörnungen haben einen positiven Einfluss auf das Erwärmungspotenzial bzw. auf das Verformungsverhalten, da sie sich nicht so stark erwärmen bzw. verformen (VON STOSCH, 1968; KLUGE und RANGE, 1986; SCHÄFER, 2000 und ROSSBERG, 2000). Somit ist zu erwarten, dass eine weitere Verbesserung des Temperaturverhaltens bzw. des Verformungsverhaltens bei Wärme von den dunklen Asphaltdeckschichten mit EOS durch eine Aufhellung mit hellen konventionellen Gesteinskörnungen erzielt werden kann.

Ziel dieser Arbeit ist somit die Prüfung, ob und ggf. inwieweit durch die Kombination von EOS mit hellen konventionellen Gesteinskörnungen in SMA 0/11 S eine Optimierung des Verformungswiderstandes unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens möglich ist. Daneben ist die Frage zu klären, welche Korngrößen im Splittbereich den größten Einfluss bei der Verbesserung des thermischen Verhaltens und des Verformungswiderstandes der Asphaltvarianten aufweisen. Hierzu sind die Besonderheiten bei der Rezeptierung von SMA 0/11 S mit EOS kritisch zu hinterfragen und zusammenzufassen.

Weitere Effekte der Zugabe aufhellender Gesteinskörnungen zu SMA mit EOS sind eine Erhöhung der Verkehrssicherheit (KLUGE und RANGE, 1986) und eine Verringerung der Einbaukosten infolge reduzierter mittlerer Dichte. Sie wurden an dieser Stelle nicht untersucht.

## **1.2 Vorgehensweise**

Zunächst sollen die wichtigsten Etappen bei der Erzeugung und Aufbereitung der EOS als industriell hergestellte Gesteinskörnung beschrieben werden, da diese ihre Eigenschaften maßgebend bestimmen. Parallel dazu soll die Entstehung von



natürlichen Gesteinskörnungen beschrieben werden, um Unterschiede zwischen ihren chemischen und mineralogischen Komponenten zu erfassen. Anschließend sollen das Verformungsverhalten von SMA und seine Beurteilung mithilfe des einaxialen Druckschwellversuches sowie die Gesteinseigenschaften, die das Verformungsverhalten bestimmen, erörtert werden. Neben dem Verformungswiderstand von SMA sollen weitere Eigenschaften, wie die Wasserempfindlichkeit, der Verdichtungswiderstand und das Erwärmungsverhalten erläutert sowie die Grundlagen für ihre Bestimmung und Beurteilung angegeben werden (Kapitel 2).

Die Zusammenstellung der bautechnischen Eigenschaften der EOS soll Optimierungspotenziale aufzeigen, welche durch ihren Einsatz in Asphalt erzielt sowie eventuelle Nachteile, welche durch eine Kombination mit hellen konventionellen Gesteinskörnungen minimiert werden können. Für die labortechnische Ansprache dieser Eigenschaften soll eine helle konventionelle Gesteinsart für die Kombination mit EOS ausgewählt werden. Die diesbezüglichen Gesteinskörnungen sind in den Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm präparativ aufzubereiten, um eine einheitliche volumetrische Zusammensetzung bei allen Asphaltvarianten zu gewährleisten. Mit den aufbereiteten konventionellen Gesteinskörnungen soll ein Splittmastixasphalt mit einer SMA-typischen Korngrößenverteilung hergestellt werden. Durch eine erweiterte Eignungsprüfung soll der optimale Bindemittelgehalt festgelegt werden (erster Referenzasphalt). Die Volumenanteile der Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm sind in dieser Zusammensetzung zu ermitteln und durch die gleichen Volumenanteile an EOS zu ersetzen (zweiter Referenzasphalt). Die hier angesprochenen Kornklassen sind zu kombinieren (Kapitel 3). Bei den so entstehenden Asphaltvarianten werden die gleichen volumetrischen Anteile wie bei den beiden Referenzasphalten beibehalten, um möglichst gleiche räumliche Verhältnisse und damit vergleichbare Messergebnisse zu erhalten. Aus diesem Grund sind auch gleiche Volumenanteile Bitumen anzusetzen. Diese Vorgehensweise soll gewährleisten, dass sich ausschließlich die Variation der Gesteinsart dieser drei Kornklassen auf das Erwärmungsverhalten bzw. Verformungsverhalten auswirkt. Durch die einheitliche volumetrische Dimensionierung können sich höhere Hohlraumgehalte der EOS-modifizierten Splittmastixasphalte im Vergleich zum Referenzasphalt ohne EOS ergeben. Deshalb werden zur erweiterten Beurteilung der Praxistauglichkeit sämtlicher Asphalte und zur Charakterisierung ihrer Wasserempfindlichkeit als wesentliches Merkmal des Gebrauchverhaltens

statische Spaltzugversuche an Probekörpern mit und ohne Wasserlagerung vorgesehen (Kapitel 4).

Weiterhin ist der Verformungswiderstand von den Referenzasphalten und o.g. Asphaltvarianten bei 3 festgelegten Prüftemperaturen (40, 50 und 60 °C) mit dem einaxialen dynamischen Druckschwellversuch nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) zu untersuchen. Ziel dieser Versuchsreihen ist es, zum Einen die Auswirkung der Modifikation (konventionell bei 50 °C) unabhängig ihres jeweiligen thermischen Verhaltens abzuschätzen und zum Anderen den Temperatureinfluss auf den Verformungswiderstand zu ermitteln (Kapitel 5).

Anhand von künstlichen Wärmebestrahlungen an Probekörpern aus den genannten Asphalten soll im Labor aufbauend auf die Versuchseinrichtung nach ROSSBERG (2000), mit einer hierfür zielführenden Modifizierung, das Erwärmungsverhalten erfasst werden. Ergebnisse dieser Versuche sind Temperaturniveaus bzw. -zustände, welche sich innerhalb der Probekörper unter definierten Bedingungen einstellen (Kapitel 6). Diese Temperaturniveaus sollen bei der Bestimmung des Verformungswiderstandes Berücksichtigung finden: Auf Basis der aus beiden Versuchen gewonnenen Ergebnisse - Temperaturzustände aus der Wärmebestrahlung und Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch - soll dann ein theoretischer mittlerer Verformungswiderstand unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens für jede Asphaltvariante berechnet werden (Kapitel 7). Basierend auf diesen Ergebnissen sollen für die Optimierung Asphaltvarianten ausgewählt werden, welche durch die Kombination von günstigen mechanischen und thermischen Eigenschaften ein gegenüber konventionellen Asphaltvarianten verbessertes Verformungsverhalten aufzeigen. Zum Schluss wird der Einfluss der Korngrößen auf die bisher in dieser Arbeit ermittelten Gebrauchseigenschaften durch multiple Varianzanalyse überprüft.

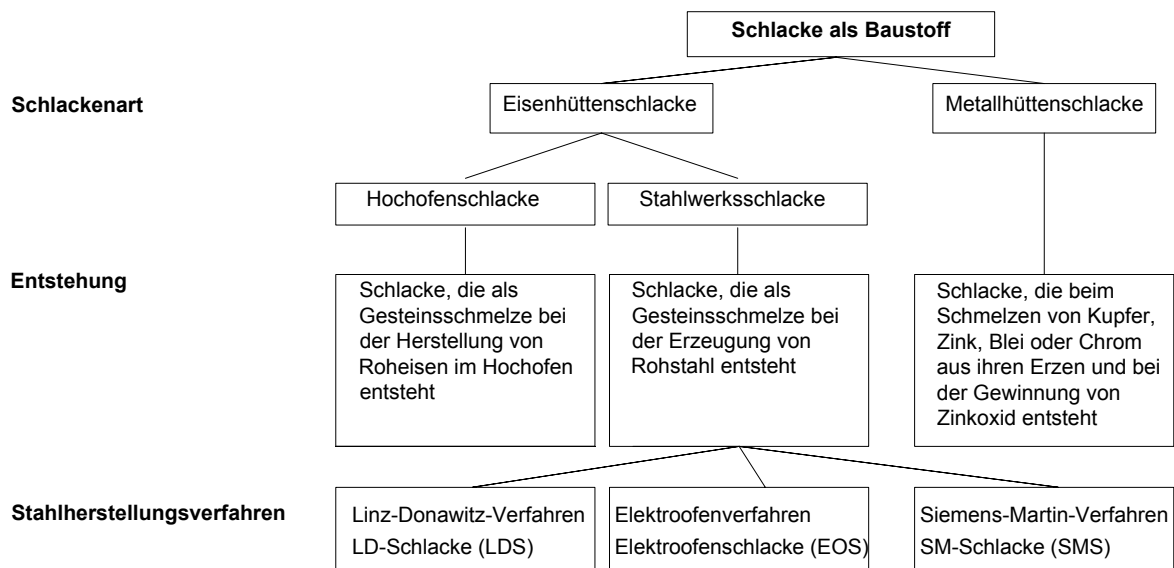
## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Elektroofenschlacke als Gesteinskörnung

Zuerst wird auf die Entstehung und die chemische und mineralogische Zusammensetzung der Elektroofenschlacke (EOS) eingegangen sowie die diesbezüglichen Bandbreiten angegeben. Grundsätzlich können zwischen den EOS unterschiedlicher Hersteller erhebliche Qualitätsunterschiede bestehen, welche sich auf die Eigenschaften des damit hergestellten Asphalts auswirken können.

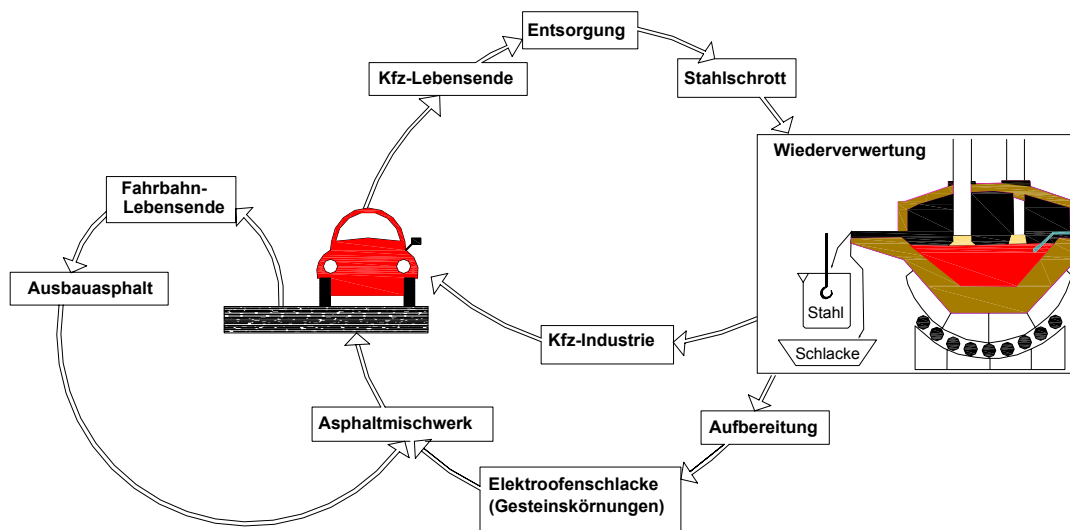
#### 2.1.1 Entstehung von Elektroofenschlacken

Die Elektroofenschlacke (EOS) entsteht als Gesteinsschmelze bei der Erzeugung von Rohstahl im Elektro-Lichtbogenofen und gehört somit zu den Stahlwerksschlacken. Sie zählt nicht zu den Hochofenschlacken oder Metallhüttenschlacken (Bild 1).



**Bild 1: Gruppierung der im Bauwesen tauglichen Schlacken gemäß DIN 4301 (1981) nach ihrer Entstehungsart**

Das Elektroofenverfahren, welches sehr hohe Temperaturen durch einen Lichtbogen zwischen Grafitelektroden über der Oberfläche des Materials erzeugt, ermöglicht die Stahlherstellung aus meist zu 100 % Schrott und stellt somit das wichtigste Recycling-Verfahren dar (Bild 2). Die Verwendung von Schrott als Rohstoffbasis macht das Elektroofenverfahren ökonomischer und ökologischer im Vergleich zu den Verfahren, die Roheisen benötigen.



**Bild 2: Recycling-Kreislauf von Stahl und EOS**

Der Lieferant, der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten EOS, das Kehler Elektrostaahlwerk der Badischen Stahlwerke (BSW), schmelzt für die Stahlgewinnung den Schrott mit Drehstrom-Elektro-Lichtbogenöfen (E-Öfen) mit Lichtbögen unterstützt durch Gas-Sauerstoffbrenner ein.

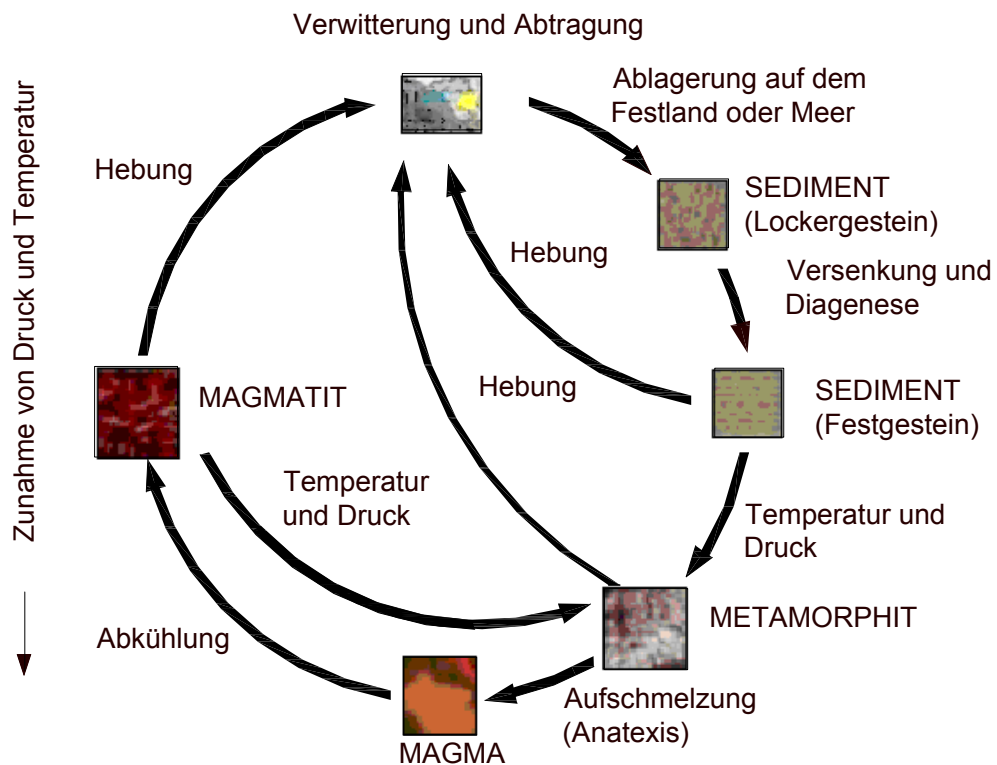
Für die Stahlgewinnung kommen im Wesentlichen vier verschiedene, sorgfältig ausgewählte Stahlschrottsorten sowie Kalk als Schlackenbildner zum Einsatz. Während des Einschmelzens werden der Stahlschrott und der Schlacken bildende Kalk verflüssigt.

Die leichtere flüssige Schlacke schwimmt auf der Oberfläche des flüssigen ca. 1.650 °C heißen Stahls. Nach der Zufuhr von Sauerstoff in das flüssige Stahlbad entstehen Oxidverbindungen der im Stahlschrott enthaltenen Elemente, z.B. Silizium, Mangan, Chrom, Phosphor, Schwefel und Eisen, die vom flüssigen Schlackenbildner aufgenommen werden. Am Ende des Schmelzprozesses läuft die flüssige Schlacke durch die Ofentür in ein vorbereitetes Schlackenbett. Die flüssige Schlacke erstarrt in dünnen Schichten und wird durch das Übergießen mit der nächsten Schlackenschmelze getempert. Nach Erstarrung der Schlacke wird sie mit Fahrzeugen zur Aufbereitungsanlage transportiert, wo sie gebrochen, gesiebt und in Korngruppen klassiert wird (Bild 3). Auf diese Weise werden Baustoffgemische oder Gesteinskörnungen aus dem künstlichen Gestein (EOS) gewonnen, deren Qualität dem jeweiligen Verwendungszweck entsprechen muss.



**Bild 3: Aufbereitung von EOS (BSN, 2007)**

Die natürlichen Gesteine befinden sich in einem ständigen Kreislauf (Bild 4). Gesteine der oberen Erdkruste unterliegen permanent einer physikalischen bzw. chemischen Verwitterung und lagern sich als Sedimente ab. Diese werden wiederum von neuen Sedimenten überdeckt und verfestigt. Die in die Tiefe gesunkenen Gesteine setzen sich mit steigendem Druck und steigender Temperatur weiter ab. In diesem Prozess erfolgt eine Metamorphose bzw. bei höheren Temperaturen eine Aufschmelzung (Magmabildung) der Gesteine. Nach Abkühlung der Gesteinsschmelze entstehen die Magmatite (BICHER, 2004).



**Bild 4: Kreislauf der Gesteine (BICHER, 2004)**

Der Chemismus der Magmen hängt von der Temperatur ab und variiert entsprechend stark. Magmen enthalten unterschiedliche chemische Elemente, die sich zu Oxiden verbinden. Der Gehalt an Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) erlaubt eine Klassifizierung

der Magmatite: Gehalte von < 52 % SiO<sub>2</sub> charakterisieren basische Gesteine; Gehalte von 52 - 65 % SiO<sub>2</sub> ergeben intermediäre Gesteine und Gesteine mit über 65 % SiO<sub>2</sub> bezeichnet man als sauer (FECKER und MUTSCHLER, 2006).

In basischen Gesteinen sind häufig Gasblasenhohlräume zu finden. Die Aufgliederung in 2 Hauptgruppen geschieht nach der Reihenfolge ihrer Ausscheidung aus dem sich abkühlenden Magma (Bild 5): **kieselsäurearme** (basische), dunkel gefärbte Minerale, die in der Schmelze eine Tendenz zum Absinken haben und **kieselsäurereiche** (saure), helle Minerale, die spezifisch leichter als die Schmelze sind. Mit der Abkühlung und der Magmendifferentiation wird die anfangs relativ basische Schmelze immer reicher an Kieselsäure (FECKER und MUTSCHLER, 2006).



**Bild 5: Einteilung der Magmatite (FECKER und MUTSCHLER, 2006)**

Auch die EOS ist nach ihrer Entstehung den Magmatiten ähnlich, speziell den Vulkaniten, die aus Schmelzen auskristallisieren.

## 2.1.2 Chemische und mineralogische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung von EOS besteht im Mittel aus 15 % Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), 30 % Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) (< 2 %  $\text{CaO}_{\text{frei}}$ ) und 35 % Eisenoxide (Fe-Oxide) als Hauptbestandteile und weiteren oxidischen Nebenbestandteilen in deutlich geringeren Konzentrationen, u.a. etwa je 5 % Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ) und Manganoxid ( $\text{MnO}$ ) (GEISLER, 1994).

Im Gegensatz zu den sehr  $\text{SiO}_2$ -reichen natürlichen Gesteinen zeichnen sich damit allgemein die EOS durch vergleichsweise niedrige  $\text{SiO}_2$ -, aber hohe  $\text{CaO}$ -Gehalte aus. Der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt ist vergleichbar mit dem Gehalt in natürlichen Gesteinen (DRISSEN, 2004). Aufgrund der variierenden chemischen Zusammensetzungen (Tab. 1) der unterschiedlich erzeugten Eisenhüttenschlacken (Hochofenschlacke (HOS), LD-Schlacke (LDS) und Sekundärmetallurgische Schlacke (SEKS)) weisen sie auch unterschiedliche mineralische Zusammensetzungen auf.

	HOS/HS	LDS	EOS <sup>1)</sup>	EOS <sup>2)</sup>	SEKS <sup>3)</sup>
<b>CaO</b>	39 - 41	46 - 53	26 - 38	37 - 40	33 - 61
<b>SiO<sub>2</sub></b>	34 - 37	13 - 16	11 - 16	14 - 28	9 - 24
<b>MgO</b>	7 - 12	1 - 4	3 - 10	7 - 13	6 - 13
<b>Mn<sub>ges.</sub></b>	0,2 - 0,6	1,8 - 4,8	3,5 - 5,5	2,6 - 4,1	0,2 - 4,9
<b>Fe<sub>ges.</sub></b>	0,2 - 0,6	14 - 19	24 - 40	6 - 7	0,6 - 9,4
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	10 - 12	1 - 4	3 - 6	5 - 13	3 - 27
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	< 0,01	0,2 - 0,4	0,7 - 2,7	5 - 19	< 0,3
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	< 0,01	1,2 - 1,8	0,5 - 0,8	< 0,1	< 0,03
<b>Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O</b>	0,5 - 1,2	< 0,07	< 0,08	< 0,08	k. A.
<b>S<sub>ges.</sub></b>	1,0 - 1,7	< 0,2	k. A.	< 0,4	0,5 - 2,0
<b>CaO/SiO<sub>2</sub></b>	0,9 - 1,2	2,8 - 5,0	1,9 - 2,6	1,3 - 2,3	1,3 - 6,2
<b>(CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub></b>	1,2 - 1,4	3,0 - 5,2	2,2 - 3,1	1,6 - 2,9	1,7 - 7,8

<sup>1)</sup> aus Erzeugung nicht/niedrig legiert; <sup>2)</sup> aus Erzeugung hoch legiert; <sup>3)</sup> aus Sekundärmetallurgie; k. A. = keine Angaben

**Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Eisenhüttenschlacken in M.-% (DRISSEN, 2004)**

In Tab. 1 sind nach ihrer Erzeugung zwischen nicht/niedrig und hoch legierten EOS zu unterscheiden. EOS wird hochlegiert bezeichnet, wenn bei deren Erzeugung mindestens ein Legierungselement einen mittleren Gehalt von 5 Massenprozent überschreitet.

Die EOS ist wie jedes natürliche Gestein ein Aggregat aus Mineralen. Die Minerale, die EOS bilden (Tab. 2), sind innerhalb der mineralogischen Zusammensetzung von natürlichen Gesteinsarten bekannt (z.B. Spinelle), andere hingegen kommen in natürlichen Gesteinen sehr selten vor oder treten bevorzugt in industriell hergestellten Aggregaten auf (z.B. Tricalciumaluminat in SEKS, DRISSEN, 2004).

Mineral:	Formel:	HOS	LDS	EOS <sup>1)</sup>	EOS <sup>2)</sup>	SEKS <sup>3)</sup>
Gehlenit	2CaO * Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> * SiO <sub>2</sub>	X		X	X	
Akermanit	2CaO * MgO * 2SiO <sub>2</sub>	X		X	X	
Merwinit	3CaO * MgO * 2SiO <sub>2</sub>	X			X	
Tricalciumsilikat	3CaO * SiO <sub>2</sub>		(X)			
β-Dicalciumsilikat	2CaO * SiO <sub>2</sub>		X	X		X
γ-Dicalciumsilikat	2CaO * SiO <sub>2</sub>					X
Bredigit	2 (Ca,Mg)O * SiO <sub>2</sub>			X		
Brownmillerit	2CaO * (Al,Fe) <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			X		
Dicalciumferrit	2CaO * Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		X			
Spinelle	Me <sup>2+</sup> O * Me <sup>3+</sup> <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			X	X	
Wüsttit	FeO <sub>x</sub>		X	X		
Freikalk	CaO		X			
Periklas/MgO <sub>frei</sub>	MgO			X	X	
Mayenit	12CaO * 7Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			X		X
Tricalciumaluminat	3CaO * Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					X
Fluorit	CaF <sub>2</sub>					X
Cuspidin	CaF <sub>2</sub> * 4CaO * 2SiO <sub>2</sub>					X
Oldhamit	CaS					X
Jasmundit	10CaO * CaS * 4SiO <sub>2</sub>					X

<sup>1)</sup> aus Erzeugung nicht/niedrig legiert; <sup>2)</sup> aus Erzeugung hoch legiert; <sup>3)</sup> aus Sekundärmetallurgie; k. A. = keine Angabe

**Tab. 2: Typische mineralogische Zusammensetzung von Eisenhüttenschlacken (DRISSEN, 2004)**

Wie bereits erwähnt sind die EOS zu den Vulkaniten ähnlich. Durch ihre andere chemische Zusammensetzung und Bildungsbedingungen, Abkühlung in kürzerer Zeit, wird jedoch die mineralogische Zusammensetzung so beeinflusst, dass sie nicht mit Vulkaniten identisch ist. Aufgrund dieser Ähnlichkeiten erscheint es daher angemessen, Eisenhüttenschlacken als Gesteine zu bezeichnen (DRISSEN, 2004).



Im Sinne einer klaren Begriffsabgrenzung sollte jedoch von industriellen Gesteinen im Gegensatz zu den natürlichen Gesteinen gesprochen werden. Natürliche Gesteine, die aus den gleichen Mineralen und Verhältnissen wie in der EOS zusammengesetzt sind, existieren jedoch nicht (DRISSEN, 2004).

Der Stahlgewinnungsprozess und die Ausgangsstoffe werden streng kontrolliert, um die Qualität des Stahls möglichst konstant zu halten. Dies führt zwangsläufig auch zu einer Kontinuität der mineralogischen Phasenzusammensetzung.

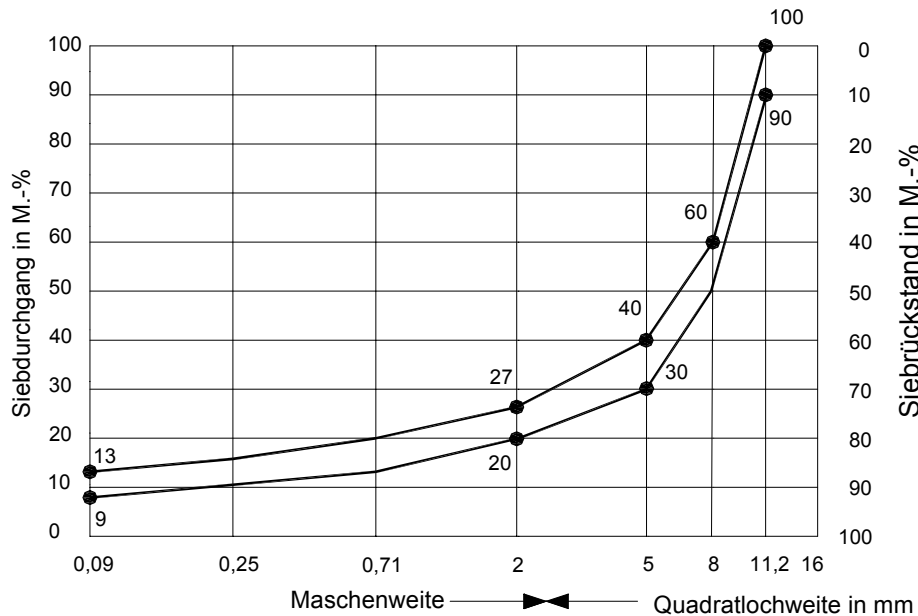
Je nach Herstellungsbedingungen bilden sich variierende mineralogische Zusammensetzungen aus. So entstehen z.B. bei hohen Sintertemperaturen EOS, die reich an Wüstit (FeO) sind und zusammen mit den stabilen Silikaten einen kompakten, homogenen Aufbau gewährleisten. Bei niedrigeren Sintertemperaturen weist die entstehende EOS eine bräunliche Farbe auf und setzt sich ebenfalls aus Silikaten und Oxiden zusammen, jedoch mit einem deutlich geringeren Anteil an Wüstit (FeO), dafür treten zusätzlich Periklas (MgO) und Calciumoxid (CaO) auf, welche in Verbindung mit Luft-CO<sub>2</sub> und Wasser Calcit (CaCO<sub>3</sub>) bildet und zu Volumenänderungen und Festigkeitsdefiziten führen kann.

## **2.2 Grundlagen zum Verformungsverhalten von Splittmastixasphalt**

Der Splittmastixasphalt wurde Ende der 60er Jahre von Zichner im Zentrallaboratorium der Strabag-Bau-AG als Anti-Spike-Belag entwickelt (SCHRÖDER und KLUGE, 1992). Die "Spikeszeit" endete im Frühjahr 1975, aber der Splittmastixasphalt blieb und hat sich längst als eine der Regelbauweisen für Asphaltdeckschichten bewährt und durchgesetzt, insbesondere auf Straßen mit hoher Verkehrsbeanspruchung. Seit 1984 ist er als standardisierte Bauweise in den ZTV Asphalt-StB aufgenommen (REINBOTH, 1999).

Splittmastixasphalt besteht aus einem Gesteinskörnungsgemisch mit Ausfallkörnung und sehr hohem Splittgehalt, einem großen Anteil der jeweils größten Körnung (Korngrößenverteilungen siehe Bild 6), aus Bindemittel und aus stabilisierenden Zusätzen, die als Bindemittelträger wirken sollen, um eine Entmischung durch hohen Bindemittelgehalt bei Herstellung, Transport, Einbau und Verdichtung zu verhindern. Das Mischgut wird heiß eingebaut und verdichtet (FGSV, 2001).

Der Name Splittmastixasphalt (Stone Mastic Asphalt) gibt einen Hinweis auf dessen Struktur. Der hohe Splittgehalt (Gesteinskörnungen > 2 mm) ergibt ein in sich abgestütztes Splittgerüst. Der Asphaltmastix (Bitumen und Gesteinskörnungen < 2 mm) füllt weitgehend die Hohlräume in dem Splittgerüst aus und soll eine hohe Steifigkeit und Klebefähigkeit besitzen, um Verschiebungen innerhalb des Gerüsts zu verhindern.



**Bild 6: Bereich der zulässigen Korngrößenverteilungen von SMA 0/11 S nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001)**

Die Dauerhaftigkeit solcher Asphaltdeckschichten erklärt sich durch den hohen Bindemittelgehalt im Vergleich zu Asphaltbeton, den ausschließlichen Einsatz polymermodifizierter Bindemittel mit nachgewiesener Qualität sowie durch einen großen Anteil an groben Gesteinskörnungen (> 5 mm) und reduzierten Anteil an Gesteinskörnungen mit mittlerer Größe (2/5 mm).

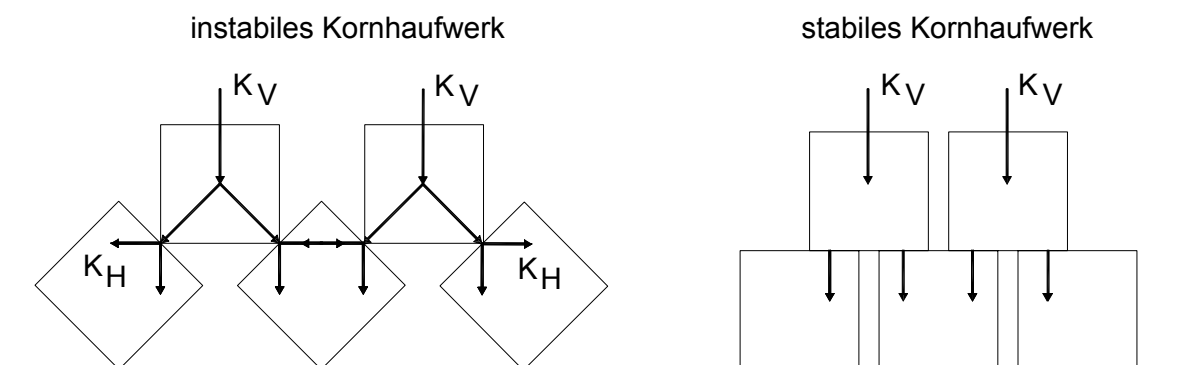
Verformungen in Form von Spurrinnen treten vorrangig auf, wenn die eingebauten Asphaltdeckschichten bei hohen Temperaturen und hohen Verkehrsbelastungen einen unzureichenden Verformungswiderstand aufweisen. Das Verformungsverhalten von Splittmastixasphalt ist von dem dreiphasigen Aufbau des Asphalts abhängig. Asphalte bestehen im Allgemeinen aus der festen Phase (dem Gesteinskörnungsgemisch), dem viskosen Asphaltmastix (einem Zweiphasengemisch aus Bitumen und feinen Gesteinskörnungen) und der gasförmigen Phase (Porenvolumen). Die Verteilung der einzelnen Phasen und insbesondere die Qualität des Asphaltmastix und die

Korngrößenverteilung sowie die Kornrauigkeit und Kornform der Gesteinskörnungen bestimmen neben dem Ausmaß der Verdichtung die innere Struktur des Walzasphalts und somit den Verformungswiderstand (MICHALSKI, 1998).

Zum Verständnis des Verformungsverhaltens von Splittmastixasphalt wird nachfolgend seine innere Struktur im Detail nach MICHALSKI (1998) erläutert.

Das Kornhaufwerk des Splittmastixasphalts ist als Matrix aus großen Körnern (Splitt) mit eingelagerten kleinen Teilchen (Füller und Sand) in den Hohlräumen aufzufassen. Die mittleren Teilchen fehlen oder sind nur in geringem Maße vertreten. Während des Mischprozesses werden die Teilchen mit einem Bitumenfilm umhüllt. Bei kleinen Teilchen ist der Bindemittelfilm im Verhältnis zur Korngröße dick. Treffen kleine bindemittelumhüllte Teilchen aufeinander, so verlaufen die Bindemittelfilme infolge der Oberflächenspannung zu größeren Gebilden in "Blöcke". In das Volumen der Asphaltmastixblöcke können größere Teilchen eingebettet werden. Das Gesamtvolumen der Asphaltmastixblöcke ist infolge des geringen Anteils an kleinen Teilchen niedrig. Sie werden auf die Hohlräume der großen Matrix aus großen Teilchen (Splitt) verteilt und sorgen für einen dauerhaften Zusammenhalt des Splittgerüsts. Solange die Hohlräume der Matrix mit Asphaltmastix nicht überfüllt sind, üben Veränderungen im Bindemittelgehalt und in der Bindemittelviskosität - temperaturbedingt - nur einen geringen Einfluss auf die Verformungsbeständigkeit der Matrix aus.

Durch Umlagerung der Teilchen im Korngerüst in stabile Lagen tritt eine Konsolidierung ein. In Splittmastixasphalten dürften die Konsolidierungsprozesse vorwiegend auf dem Ausbilden stabiler Korngerüststrukturen beruhen. In Bild 7 sind idealisiert ein instabiles und ein stabiles Kornhaufwerk dargestellt.



**Bild 7: Schematische Darstellung nach MICHALSKI (1998) eines instabilen und eines stabilen Kornhaufwerks**

Bei dem instabilen Kornhaufwerk (links im Bild) werden die Kanten der Splittkörner in besonderem Maße durch Vertikalkräfte ( $K_V$ ) beansprucht, welche Horizontalkräfte ( $K_H$ ) erzeugen. Im stabilen Kornhaufwerk werden durch geschichtete Teilchenanordnung hingegen keine Horizontalkräfte erzeugt.

Das praktische mechanische Verhalten von Splittmastixasphalt wird durch die Zusammensetzung - Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches, Bindemittelgehalt, Art und Menge der stabilisierenden Zusätze - diktiert. Da die Splitte die Hauptkomponente des Korngerüsts bilden und von deren Qualität die Stabilität der gesamten Matrix maßgeblich abhängt, sollte bei ihrer Auswahl auf ihre wichtigsten Eigenschaften geachtet werden, damit Verformungen in Form von Spurrinnen vermieden oder zumindest vermindert werden. Der Widerstand des Splittmastixasphalts gegen mechanische Verformung kann mit dem im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Druckschwellversuch ohne seitliche Behinderung untersucht werden, für welchen in Deutschland ein Bewertungshintergrund vorliegt.

### **2.2.1 Beurteilung des Verformungsverhaltens mit dem Druckschwellversuch**

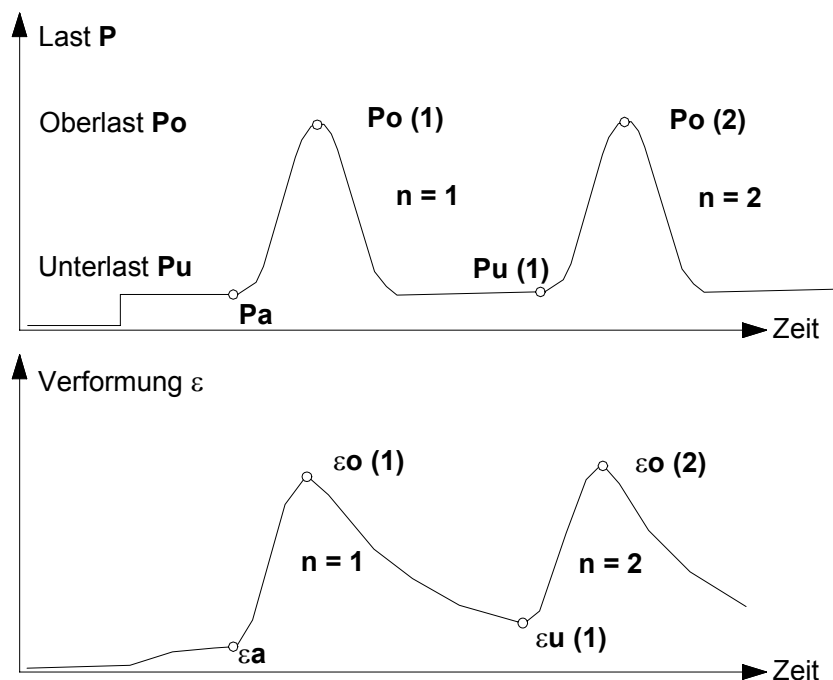
Für die Beurteilung des Verformungswiderstandes von Splittmastixasphalt werden in Deutschland im Wesentlichen der Spurbildungsversuch, der dynamische Stempel-eindringversuch und der einaxiale dynamische Druckschwellversuch mit und ohne seitliche Behinderung angewendet.

Die Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphaltprobekörpern aus Splittmastixasphalt bei hohen Gebrauchstemperaturen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mithilfe des einaxialen dynamischen Druckschwellversuches ohne seitliche Behinderung (DSV), da zum Einen für dieses Prüfverfahren ein Bewertungshintergrund für Deutschland existiert (ROOS et al., 2003), zum Anderen dieses Verfahren als erweiterte Eignungsprüfung geeignet ist. Nicht nur bei übermäßigem Bindemittelgehalt zeigt das Verfahren eine Verschlechterung an, sondern auch bei einem mager eingestellten Asphalt, da die dünneren Mörtelfilmdicken eine geringere Dehnbarkeit in Querrichtung zulassen (SCHELLENBERG, 1991).

Ziel der Untersuchungen zum Verformungswiderstand ist es, den Einfluss der Modifikation von Zuschlagstoffen sowie den Einfluss der Temperatur auf das Verformungsverhalten von Asphaltvarianten zu ermitteln.

Die Druckschwellversuche sollen nach der Technischen Prüfvorschrift für Asphalt im Straßenbau TP A-StB, Teil: Einaxialer Druckschwellversuch - Bestimmung des Verformungswiderstandes von Walzasphalten bei Wärme (FGSV, 1999) durchgeführt werden, wie sie nachfolgend kurzgefasst mit Angabe der wesentlichen Versuchsparmeter beschrieben wird.

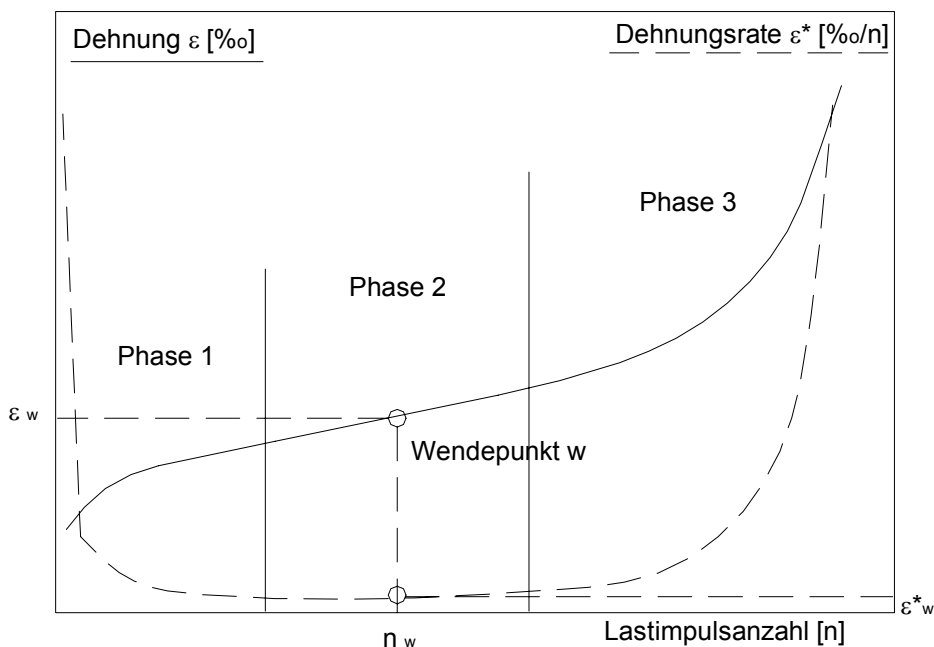
Die genannte Prüfvorschrift beschränkt sich auf die Prüfung von Marshall-Probekörpern (MPK) oder Bohrkernen, die mit den gleichen Abmessungen aus der Straße oder aus im Labor hergestellten Platten gebohrt werden. In der Regel wird ein Marshall-Probekörper bei konstanter Temperatur von 50 °C einer haversinimpulsförmigen zyklischen Druckbelastung unterworfen. Die sich hierdurch einstellenden bleibenden Verformungen in Belastungsrichtung werden registriert und aufgezeichnet (Bild 8). Der zeitliche Ablauf der Belastung ist ein ständiger Wechsel von Lastimpulsen und Lastpausen und ist durch eine Unterlast  $P_u$  und eine Oberlast  $P_o$  gekennzeichnet. Die Übertragung der Kraft auf die Grundfläche des Probekörpers erfolgt mithilfe eines Lasteinleitungsstempels, der eine gleichmäßige Lastverteilung ermöglicht. Die Oberlast gemäß Technischer Prüfvorschrift beträgt 2,8 kN, die Unterlast 0,2 kN.



**Bild 8: Belastungszyklus und Messwernerfassung der Verformung ab Versuchsbeginn (FGSV, 1999)**

Der Probekörper wird für den Versuch vorbereitet, indem seine Grundflächen mit einer Schleifmaschine orthogonal planparallel nass geschliffen werden. Unmittelbar vor der Versuchsdurchführung wird der vorbereitete Probekörper mindestens 2,5 Stunden im Wärmeschrank bei einer Temperatur von 50 °C temperiert und anschließend zentrisch in die Belastungsvorrichtung eingebaut.

Das Ergebnis des Druckschwellversuches ist eine Impulskriechkurve, die den Verlauf der bleibenden Verformung des Probekörpers - Verhältnis von gemessener Verformung zur ursprünglichen Probekörperhöhe - wiedergibt (Bild 9). Abbruchkriterium bei dem Versuch ist das Erreichen einer Lastimpulsanzahl  $n$  von 10.000 oder einer Dehnung  $\epsilon$  von 40 %.



**Bild 9: Impulskriechkurve mit der zugehörigen Kurve der Dehnungsrate (FGSV, 1999)**

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens ist der Kurvenverlauf in der Phase 2 (siehe Bild 9) von besonderer Bedeutung. Als Bewertungskriterium gilt die Dehnungsrate bzw. Verformungsgeschwindigkeit in Phase 2.

Nach einer Konsolidierung in Phase 1 nimmt die Verformungsgeschwindigkeit ein Minimum an, die Impulskriechkurve weist einen Wendepunkt auf. Als maßgebende Parameter sind deshalb die folgenden Merkmalsgrößen festgelegt:

- $n_w$  = Lastimpulsanzahl im Wendepunkt [ - ]
- $\epsilon_w$  = Dehnung im Wendepunkt [%]
- $\epsilon_w^*$  = Dehnungsrate im Wendepunkt [%/10.000n]

Für die Bestimmung dieser Merkmalsgrößen wird in der Regel die sog. "simultane Auswertung" angewendet, bei welcher aus dem Verlauf der Impulskriechkurve die Kurve der Dehnungsrate abgeleitet wird. Dies erfolgt simultan nach Gleichung (1), so dass in jedem Messpunkt die lokale Tangente durch Bildung des Differenzenquotienten aus zwei in gleichem Abstand davor und danach liegenden Messpunkten bestimmt wird. Beispielsweise sind die Messpunkte mit einem Abstand von 100 Lastimpulsen zu berechnen.

$$\varepsilon_w^* = \frac{\varepsilon_{(i+100)} - \varepsilon_{(i-100)}}{n_{(i+100)} - n_{(i-100)}} \quad [\%/10.000n] \quad (1)$$

Wird im Versuchsablauf der Wendepunkt nicht erreicht, so gilt ersatzweise die Steigung der Kurve im quasi linearen Bereich als Dehnungsrate. Dies wird nach Gleichung (2) berechnet:

$$\varepsilon_w^* = \frac{\varepsilon_{10.000} - \varepsilon_{9.000}}{n_{10.000} - n_{9.000}} \quad [\%/10.000n] \quad (2)$$

Die Auswertung kann nach TP A-StB (FGSV, 1999) auch mathematisch mit dem Approximationsansatz (3) erfolgen (nachfolgend als "mathematische Auswertung" bezeichnet). Mit diesem Ansatz lässt sich die Impulskriechkurve quasi kontinuierlich beschreiben. Die Koeffizienten  $\varepsilon_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $k$  lassen sich iterativ durch Regressionsrechnung bestimmen. Damit können die gesuchten Merkmalsgrößen  $n_w$ ,  $\varepsilon_w$ , und  $\varepsilon_w^*$  (Bild 9) mathematisch ermittelt werden.

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_0 + a \cdot n^k + b \cdot (e^{c \cdot n} - 1) \quad (3)$$

Durch die Ermittlung der ersten Ableitung mit dem Ansatz (4) und den Regressionsparametern der Gleichung (3) können die Dehnungsraten  $\varepsilon_n^*$  berechnet und deren Kurvenverlauf dargestellt werden. Der maßgebliche Wert der Dehnungsrate ist der Wert beim Wendepunkt  $n_w$  der Impulskriechkurve (Minimum) oder - sofern sich kein Wendepunkt einstellt - zu Versuchsende bei  $n = 10.000$ .

$$\dot{\varepsilon}(n) = a \cdot k \cdot n^{(k-1)} + b \cdot c \cdot (e^{c \cdot n}) \quad (4)$$

Die grafischen Auswertungen können nach TP A-StB bei beiden Auswerteverfahren zusätzlich zur Plausibilitätsprüfung herangezogen werden.

Das Ergebnis ist das arithmetische Mittel der Dehnungsraten aus mindestens drei Versuchen. Für die Beurteilung des Splittmastixasphalts 0/11 S anhand des Druck-

schwellversuches existiert ein Bewertungshintergrund von ROOS et al. (2003). Darin werden für Splittmastixasphalte für besondere Beanspruchungen durch Schwerverkehr und hohe Temperaturen für eine Nutzungsdauer von 10 bis 15 Jahre mit Dehnungsraten kleiner 9 bis maximal 13 ‰/10.000n empfohlen. Für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren werden nach diesem Bewertungshintergrund Dehnungsraten kleiner 5 bis maximal 6 ‰/10.000n gefordert.

## **2.2.2 Auswirkungen ausgewählter Gesteinseigenschaften auf das Verformungsverhalten**

### **- Bruchflächigkeit**

Eine tendenzielle Verbesserung des Verformungswiderstandes von SMA 0/11 S mit steigender Bruchflächigkeit der Körner konnte von WÖRNER et al. (2002) festgestellt werden. Allerdings war dieser Zusammenhang statistisch nicht signifikant.

### **- Kornfestigkeit (Schlagzertrümmerung)**

Aus der Fachliteratur und der Straßenbauforschung kann eine zunehmend kritische Positionierung gegenüber bestimmten Beurteilungskriterien für Gesteinskörnungen bezüglich des Verformungswiderstandes von Asphaltsschichten festgestellt werden. Insbesondere als praxisfremd erweist sich danach die einseitige Orientierung an gesteinsunabhängigen Grenzwerten für die Widerstandsfähigkeit eines Kornes gegenüber Schlag. Das Verformungsverhalten eines Asphalts wird erheblich stärker von der Kornform, der Oberflächenrauigkeit sowie der Kornabstufung als von der Kornfestigkeit beeinflusst (BORCHARD, 1985). Die Kornfestigkeit ist wohl vielmehr hinsichtlich des Einbaus (Vibrationsverdichtung) relevant.

### **- Kornform**

Das Verformungsverhalten des Splittmastixasphalts wird stark von der Kornform der Splitte, die ein in sich abgestütztes Gerüst bilden, beeinflusst. Die Kanten der Splittkörner werden in besonderem Maße durch die Stützfunktion beansprucht. Deswegen sollen plattig geformte Körner mit instabilen Kanten vermieden werden. Kubisch geformte Körner gewährleisten im Splittgerüst ein stabiles Kornhaufwerk, ähnlich wie bei dem von MICHALSKI (1998) dargestellten Aufbau (Bild 7).

Kantig geformte Gesteinskörnungen mit rauen Oberflächen verbessern den Verformungswiderstand gegen Spurrinnenbildung, indem sie sich verkanten und die Rei-



bung innerhalb des Materials erhöhen (PAN et al., 2006). Diese erhöhte Reibung führt zu einer Erhöhung der Verdichtungsarbeit von Asphaltmischgut und der Scherfestigkeit der fertigen Schicht.

- **Affinität** zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen - Haftverhalten

Der Zusammenhalt des Gesteinskörnungsgemisches in einer Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt, welche für hohe Beanspruchungen durch Verkehr und Witterung ausgelegt ist, wird durch die Klebkraft des bituminösen Bindemittels, der die Gesteinskörnungen umhüllt, gesichert.

Die Gesteinsart kann einen großen Einfluss auf das Haftverhalten des Asphalts haben. Die Oberflächenrauigkeit, Porosität der Gesteinskörnungen sowie mineralogische Zusammensetzung beeinflussen die Adhäsion zwischen Gestein und Mörtel (RENKEN, 2003). Bei Gesteinskörnungen mit einer rauen Oberfläche ist - durch eine vergrößerte Kontaktfläche - die Adhäsion mit Bitumen begünstigt. Wegen der physikalischen Verzahnung wird der Porosität von Gesteinen in der Regel ein haftbegünstigendes Potenzial zugemessen. Saure Gesteine sind hydrophil, also wasseraffin, und erweisen sich oft als haftkritisch. Basische bitumenaffine Gesteinsoberflächen sind hydrophob und besitzen oft gute Hafteigenschaften zum Bitumen (RENKEN, 2003).

Die Affinität bzw. das Haftvermögen von Bindemittel an verschiedenen Gesteinskörnungen wird i. Allg. indirekt durch das Flaschen-Rollverfahren nach DIN EN 12697, Teill 11, Verfahren A bestimmt. Die Affinität wird dabei durch visuelle Beurteilung des Umhüllungsgrades unverdichteter bitumenumhüllter Gesteinskörner nach Beanspruchung durch mechanisches Rühren in Anwesenheit von Wasser bestimmt. Diese Prüfung ist nach DIN EN 12697, Teil11 eine einfache, aber subjektive Prüfung, die für Routineüberprüfungen geeignet ist. Sie ist jedoch nicht bei den versuchsbedingt abriebanfälligen EOS anwendbar. Alternativ kann dann die statische Prüfung nach DIN EN 12697, Teill 11, Verfahren B angewendet werden. Diese Prüfung ist jedoch nach DIN EN 12697, Teill 11 weniger genau.

Das Haftverhalten zwischen Bitumen und Gestein unter Einwirkung von Wasser in Asphaltprobekörpern - die Wasserempfindlichkeit - wird aus den genannten Gründen mit dem Abfall der indirekten Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit) unter Einwirkung von Wasserlagerung nach DIN EN 12697, Teil 12 (2004) beurteilt (siehe Kapitel 2.3.1).

### - Helligkeit und thermische Eigenschaften

Die Spurrinnenbildung bei Asphaltbefestigungen ist vorrangig auf hohe Asphalttemperaturen in der Asphaltkonstruktion sowie auf hohe Verkehrsbelastung zurückzuführen. Hohe Asphalttemperaturen werden in der Regel durch lang anhaltende Sonneneinstrahlung verursacht. Die Temperatur in der obersten Asphaltsschicht kann in einer Tiefe von 2 cm auf über 70 °C und in einer Tiefe von 22 cm auf über 30 °C steigen. Die Temperaturentwicklung innerhalb der Asphaltkonstruktion wird durch die eingesetzten Gesteinskörnungen beeinflusst (VOSKUILEN, 1991).

Die Oberflächentemperatur von Asphaltdeckschichten hängt in erster Linie von der Helligkeit der Schicht bzw. der verwendeten Gesteinskörnungen und ihrem Reflexionsvermögen ab. Neben der Gesteinsart spielen die Gesteinskorngrößen eine Rolle bei der Aufhellung von Asphalten. Der Aufhellungseffekt durch Zugabe von hellen feinen Gesteinskörnungen im Splittbereich ist nach LEINS et al. (1980) wegen der höheren spezifischen Oberfläche größer als von groben Gesteinskörnungen. LEINS konnte feststellen, dass die Struktur der Straßenoberfläche durch unterschiedliches Verschleißverhalten der verschiedenen in der Oberfläche eingebetteten Gesteinskörnungen das Reflexionsvermögen der Asphaltdeckschicht beeinflusst und damit auch deren Oberflächentemperatur.

Der Zusammenhang zwischen Wärmeeinstrahlung und Aufhellungsgrad sowie die Wirksamkeit der feinen hellen Gesteinskörnung bei der Aufhellung wurden labor-technisch von VON STOSCH (1968) nachgewiesen. Durch eine Versuchsanordnung (beschrieben in Kap. 2.4.3), welche er als pragmatisch bezeichnete, konnte eine tendenzielle Verbesserung des Verformungswiderstandes durch Aufhellung festgestellt werden.

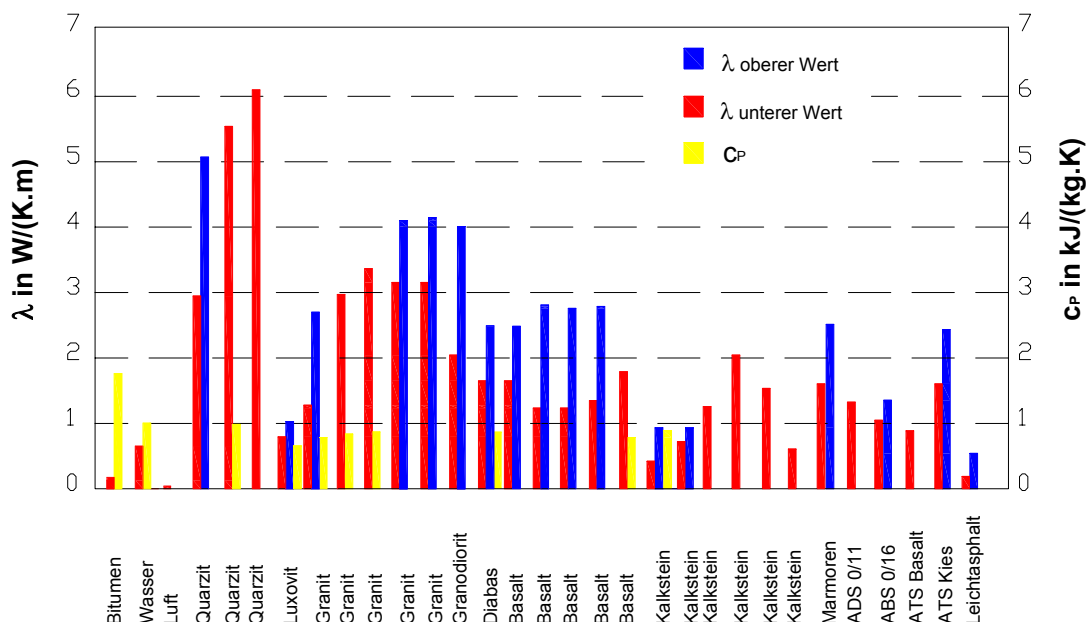
Entscheidend für den Temperaturzustand der Asphaltdeckschicht ist nicht nur die thermische Energie, die durch Absorption aufgenommen wurde, sondern ihre Übertragung innerhalb der Schicht. Für den Wärmetransport sind die thermischen Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität der Gesteinskörnungen in erster Linie maßgebend.

Die spezifische Wärmekapazität ( $c_p$ ) ist laut Literatur ein Maß für die Wärmeenergie, die erforderlich ist, um die Temperatur 1 kg eines Stoffes um 1 K zu verändern. Je größer diese Wärmekapazität ist, desto mehr Strahlungsenergie muss der Körper

absorbieren, um eine definierte Temperaturerhöhung zu erreichen. Diese unterscheidet sich nur wenig im Temperaturbereich von 0...100 °C bei den natürlichen Gesteinskörnungen, die im Straßenbau in Deutschland Verwendung finden (Bild 10, gelb). Bitumen hat im Vergleich dazu einen 2 bis 4fach größeren Wert (ROSSBERG, 2000). Die spezifische Wärme für Asphalte kann mit den Wärmeeigenschaften der Einzelkomponenten sowie deren Aufteilung in Massenprozenten errechnet werden.

Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda$ ) ist eine Stoffeigenschaft, die angibt, wie groß in einem vorgegebenen Temperaturfeld der Wärmestrom ist. Der Rechenwert der Wärmeleitfähigkeit gibt die Wärmemenge in Wattsekunden (Ws) an, die im Beharrungszustand (= Dauerbeheizung) in einer Sekunde durch einen Quadratmeter einer 1 m dicken Schicht eines Stoffes hindurchgeht, wenn die Temperaturdifferenz beider Bauteiloberflächen 1 Kelvin beträgt. Eine Zusammenstellung, der in der Literatur angegebenen Wärmeleitfähigkeiten ist in Bild 10 in rot und blau für eine Auswahl von Gesteinen und Asphalten angegeben.

Hohe Wärmeleitfähigkeit führt zu einem schnelleren Wärmeenergieabfluss in die darunter liegenden Schichten und geringerer Erwärmung der oberen Schicht. Dies nur unter der Voraussetzung, dass die darunter liegenden Schichten gut wärmeleitend sind, da andernfalls ein Wärmestau entstehen kann (ROSSBERG, 2000).



**Bild 10: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität einiger Gesteine und Asphalte nach ROSSBERG (2000)**

Als weitere Kenngröße zur Beschreibung des thermischen Verhaltens eines Materials ist die Temperaturleitzahl  $a$  zu nennen. Diese ist eine Proportionalitätskonstante, die angibt, wie schnell sich eine räumliche Temperaturdifferenz ausgleicht (STÖCKER et al., 2000).

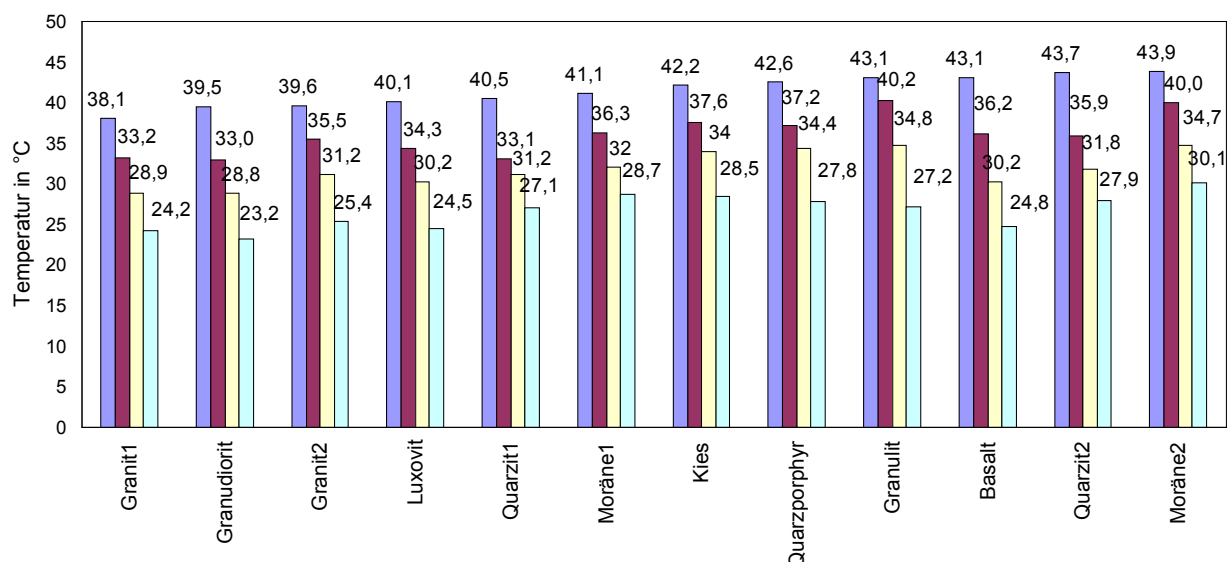
$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (5)$$

Sie nimmt mit der Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  zu, wird aber kleiner, wenn ein großes Speichervermögen (hohe Dichte  $\rho$  und spezifische Wärmekapazität  $c_p$ ) vorhanden ist.

Durch die Verwendung von verschiedenen Gesteinsarten in Splittmastixasphalten mit den damit einhergehenden Aufhellungen konnte ROSSBERG (2000) bei einer künstlichen Bestrahlung Temperaturunterschiede labortechnisch erfassen, die auf die unterschiedlichen thermischen Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungen und die Helligkeit der jeweiligen Asphalte zurückgeführt werden können. Die Bestrahlungsanlage und das Prinzip sind in Kapitel 2.4.3 beschrieben.

In Bild 11 sind die Temperaturen an der Oberfläche und in Tiefen von 1, 4 und 8 cm angegeben (Bestrahlungsdauer 2 h; Bestrahlungsstärke  $380 \text{ W/m}^2$ ).

Temperaturvergleiche für Splittmastixasphalte mit verschiedenen Gesteinen



Tiefen: blau: Oberfläche, lila: 1 cm, gelb: 4 cm, hellblau: 8 cm

**Bild 11: Temperaturunterschiede nach künstlicher Bestrahlung (ROSSBERG, 2000)**

Die Splittmastixasphalte sind nach ihrer Oberflächentemperatur von links nach rechts aufsteigend angeordnet. Die Asphalte mit Aufhellungsgesteinen (Granit, Granodiorit und Luxovit) weisen aufgrund Ihrer Helligkeit niedrige Oberflächentemperaturen auf.

Die Oberflächentemperaturen der Moräne und Quarzit variieren in Abhängigkeit von der Gewinnungsstätte, da sie sich in ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Farbe: hell oder dunkel) und mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden. Die von ROSSBERG im Labor ermittelten Oberflächentemperaturen hängen bei der sonnenähnlichen Bestrahlung neben dem Helligkeitsgrad auch vom Reflexionsgrad ab. Auswirkungen auf die gemessenen Temperaturen innerhalb des Asphalts haben nach Bild 10 hingegen lediglich die Wärmeleitfähigkeiten, da die Wärmekapazitäten in der Regel in etwa auf gleichem Niveau liegen. Im Rahmen seiner Untersuchungen haben sich Gesteine mit hohem Quarzgehalt zur Verringerung der Asphalttemperatur in 8 cm Tiefe als günstig erwiesen. Da die EOS im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen quarzarm ist, wird bei der Auswahl einer natürlichen Gesteinsart für die Kombination mit EOS (Kap. 3) darauf geachtet, dass die Gesteine neben einer hellen Farbe auch quarzreich sind, damit dieser günstige Effekt der Temperaturverringerung in der Tiefe genutzt wird.

### **2.3 Weitere Eigenschaften des Splittmastixasphalts und ihre Bestimmung**

Schäden in Form von Rissen können u. a. durch tiefe Temperaturen, durch Ermüdung des Asphalts oder im Zusammenwirken beider Faktoren verursacht werden. Diese Eigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, da sie zu einem großen Teil durch das Bindemittel und dessen Veränderungen über die Zeit und weniger durch die Gesteinsart der verwendeten Splitte - welche in dieser Arbeit zur Optimierung variiert wurden – beeinflusst werden.

Risse können auch unter Einwirkung von Wasser (Feuchtigkeit) und Verkehr auftreten. Der Zusammenhalt des Gesteinskörnungsgemisches in Splittmastixasphalt wird durch die Klebkraft des Asphaltmastix, der die groben Gesteinskörnungen (Splitte) umhüllt, gesichert. Der Asphaltmastix haftet an der Oberfläche der Gesteinskörnungen durch Adhäsionskräfte, deren Größe im Wesentlichen von den Eigenschaften beider Haftpartner abhängt (s. auch Kapitel 2.2.2).

Die Wasserempfindlichkeit des Asphalts kann durch den Rückgang der adhäsiven Bindung zwischen den groben Gesteinskörnungen und der Asphaltmastix oder des Erweichens der kohäsiven Bindung innerhalb des Asphaltmastix, beide unter Einwirkung der Verkehrsbelastung in Anwesenheit von Wasser, erklärt werden. Das Wasser in der Asphaltschicht kommt von der Regeninfiltration oder von den darunter liegenden Flächen.

Bei Wasserempfindlichkeitsproblemen wird zwischen Kohäsionsbrüchen, deren Bruchfläche innerhalb des Asphaltmastix sowie der groben Gesteinskörnungen (Splitte) liegt, und Adhäsionsbrüchen, deren Bruchfläche sich in der Grenzfläche zwischen Mastix und Splitt befindet, unterschieden. Ursachen hierfür sind Bindemittelablösung, -verdrängung und -unterwanderung durch eine unzureichende Verdichtung oder einen zu niedrigen Bindemittelgehalt.

### **2.3.1 Untersuchung der Wasserempfindlichkeit**

Unter Wasserempfindlichkeit wird der Verhältniswert der indirekten Zugfestigkeiten (Indirect Tensile Strength) nach DIN EN 12697, Teil 23 (2003) von wasser- und trockengelagerten Probekörpern ( $ITS_w$  bzw.  $ITS_d$ ) verstanden.

Der Kennwert der Wasserempfindlichkeit ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio) nach DIN EN 12697-12 wird nach folgender Gleichung berechnet und in Prozent angegeben:

$$ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} [\%] \quad (6)$$

Dabei sind:

$ITS_w$  durchschnittliche indirekte Zugfestigkeit der wassergelagerten Teilgruppe, kPa;

$ITS_d$  durchschnittliche indirekte Zugfestigkeit der trockengelagerten Teilgruppe, kPa.

Für die Prüfung der Wasserempfindlichkeit nach DIN EN 12697-12 werden 6 Probekörper benötigt. Bei Marshall-Probekörpern wird die Verdichtungsarbeit auf 2 x 25 Verdichtungsschläge reduziert, damit ein Hohlraumgehalt erreicht wird, der dem Hohlraumgehalt für die Einsatzbedingungen in der Praxis ähnlich ist.

Die Probekörper müssen gemäß DIN EN 12697-12 in zwei gleich große Teilgruppen mit etwa der gleichen durchschnittlichen Länge und Raumdichte aufgeteilt werden. Die Unterschiede in der durchschnittlichen Länge dürfen nicht mehr als 5 mm bzw.

bei der Raumdichte nicht mehr als  $0,03 \text{ g/cm}^3$  betragen. Die Probekörper (beider Teilgruppen) müssen das gleiche Alter haben (Herstellung innerhalb einer Woche, damit Unterschiede durch alterungsbedingte Veränderungen ausgeschlossen werden). Vor Beginn des Klimatisierungsverfahrens sind die Probekörper mindestens 16 h lang härten zu lassen.

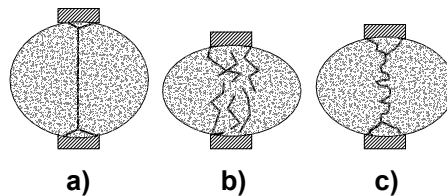
Die Probekörper der trockenen Teilgruppe sind auf eine ebene Unterlage zu legen und bei Umgebungstemperatur im Laboratorium innerhalb von  $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  zu lagern. Die Probekörper der wassergelagerten Teilgruppe sind auf den Zwischenboden der Vakuumkammer zu legen, die so mit destilliertem und auf  $(20 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  temperiertem Wasser gefüllt ist, dass sich die Oberseiten der Probekörper mindestens 20 mm unterhalb der Wasseroberfläche befinden. Die Proben werden evakuiert, um sämtliche zugängliche Hohlräume mit Wasser zu füllen. Die Maße der Probekörper werden vor und nach Evakuierung nach DIN EN 12697-29 gemessen. Das Volumen der Probekörper ist zu berechnen. Alle Probekörper, deren Volumen um mehr als 2 % zugenommen hat, sind zu verwerfen.

Die Probekörper der wassergesättigten Teilgruppe sind für eine Dauer von 68 bis 72 h im Wasserbad bei  $(40 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$  zu lagern. Parallel dazu wird die Teilgruppe der trockenen Probekörper bei Raumtemperatur gelagert.

Die Probekörper beider Teilgruppen sind auf die Prüftemperatur von  $(25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$  für mindestens 2 h bei Marshall-Probekörpern und 4 h bei Bohrkernen mit einem Durchmesser von 150 mm im Wasserbad bzw. in der Luftkammer vor der Beprobung zu temperieren. Die Oberflächen der wassergesättigten Probekörper sind mit einem Tuch abzutrocknen. Unmittelbar im Anschluss daran ist mit der Prüfung der Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12697-23 fortzufahren. Die Prüfung der Spaltzugfestigkeit erfolgt, indem jeder einzelne Probekörper innerhalb einer Minute nach der Entnahme aus der Luftkammer in der Druckprüfmaschine zwischen den Belastungsstreifen befestigt und diametral zur Zylinderachse mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet wird. Anhand der Bruchform kann der Probekörper einer der folgenden Kategorien zugeordnet werden:

- a) „Eindeutig Zugbruch“: Der Probekörper bricht entlang einer diametral verlaufenden Geraden, gegebenenfalls mit Ausnahme kleiner dreieckiger Abschnitte in der Nähe der Druckstreifen (Bild 12, links);

- b) „Verformungsbruch“: Der Probekörper ist ohne klar erkennbare Bruchlinie (Bild 12, Mitte);
- c) „Kombinationsbruch“: Der Probekörper ist mit einer begrenzten Bruchlinie und größerem verformten Bereich in der Nähe der Druckstreifen (Bild 12, rechts).



**Bild 12: Bruchartkategorien nach DIN EN 12697, Teil 23 (2003)**

Die indirekte Zugfestigkeit ITS ist die aus der beim Bruch erreichten Höchstlast und den Maßen des Probekörpers berechnete maximale Zugfestigkeit. Sie wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot L} \text{ [kPa]} \quad (7)$$

Dabei sind:

- P die Höchstlast, ausgedrückt in N,  
 D der Durchmesser des Probekörpers, ausgedrückt in mm,  
 L die Länge des Probekörpers, ausgedrückt in mm.

Für dieses Verfahren gemäß DIN EN 12697-23 wurde von ARAND (2000) ein Bewertungshintergrund erarbeitet. Die Prüfbedingungen der dem Bewertungshintergrund zugrunde liegenden Prüfungen weichen jedoch von der Norm DIN EN 12697-12 in den in Tab. 3 angegebenen Punkten ab.

Prüfbedingung	Nach Arand (2000)	Nach DIN EN 12697-12
MPK-Herstellung	Die Verdichtungsschläge wurden variiert	2 x 25
Wasserlagerung	Bei 50 °C für 24 h	Bei 40 °C für 68 bis 72 h
Prüftemperatur	10 °C	25 °C
Ergebnis	Spaltzugfestigkeitsabfall: $\Delta\beta_{SZ} = 100 \cdot \frac{\beta_{SZ,tr.} - \beta_{SZ,wa.}}{\beta_{SZ,tr.}} \text{ [%]}$	Verbleibende Spaltzugfestigkeit: $ITSR = 100 \cdot \frac{ITS_w}{ITS_d} \text{ [%]}$
Dabei sind: $\Delta\beta_{SZ} = 100 - ITSR$ , $\beta_{SZ,tr} = ITS_d$ und $\beta_{SZ,wa.} = ITS_w$		

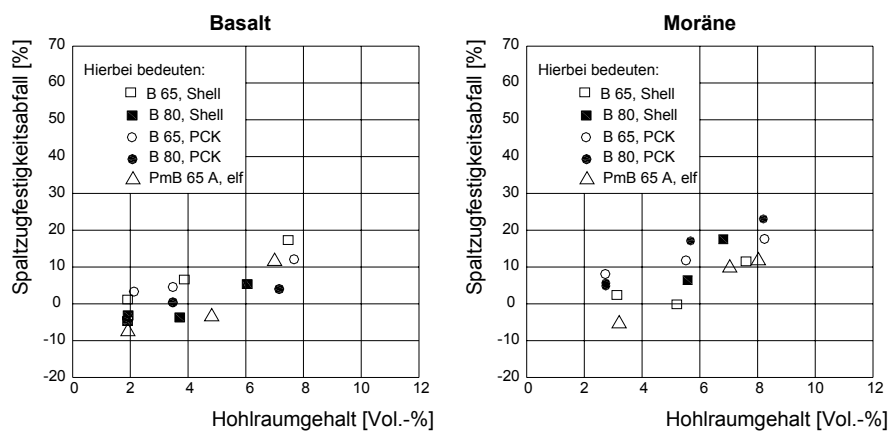
**Tab. 3: Gegenüberstellung der Prüfbedingungen nach Arand und den Bedingungen nach Norm**



Zur Ansprache des Haftverhaltens unter Wassereinwirkung mit dem Spaltzugversuch empfiehlt RENKEN (1992) eine Prüftemperatur von 10 °C, da er nach einer systematischen Variation der Prüftemperatur feststellte, dass diese am Vorteilhaftesten für eine differenzierende Prüfung der Wasserempfindlichkeit ist. Aus diesem Grund und vor dem Hintergrund, dass ein Bewertungshintergrund bei der in der aktuellen Norm (DIN EN 12697-12) empfohlenen Temperatur von 25 °C bislang fehlt, wurde für die Durchführung der Spaltzugversuche eine Prüftemperatur von 10 °C gewählt. Des Weiteren ist die in DIN EN 12697-23 angegebene Präzision für Spaltzugversuche bei 10 °C ermittelt worden.

Zur prüftechnischen Ansprache des Haftverhaltens von Splittmastixasphaltprobekörpern bei den Prüfbedingungen nach Arand und einem maximalen Hohlraumgehalt von 4 V.-% ist ein Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung von maximal 20 % zulässig (ARAND, 2000; RENKEN, 2003). Dies entspricht einer verbleibenden Spaltzugfestigkeit ITSr von 80 % unter Berücksichtigung der Prüfbedingungen. Als Grundlage zur Festlegung dieser Grenze wurden mehrere Gesteinsarten untersucht, darunter auch haftkritische wie z.B. Quarzit und Oolith. Dabei wurde durch eine Varianzanalyse festgestellt, dass die Gesteinsart den größten Einfluss auf die Wasserempfindlichkeit hat, an zweiter Stelle - jedoch in deutlich geringerem Maß - steht der Hohlraumgehalt.

In Bild 13 sind zwei Gesteinsarten angegeben, die - in Abhängigkeit von den verwendeten Bindemitteln und Hohlraumgehalten - Spaltzugfestigkeitsabfälle bis ca. 20 % aufweisen.



**Bild 13: Spaltzugfestigkeitsabfall in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt für 2 unterschiedliche Gesteinsarten und 5 Bitumenarten und -sorten für den Splittmastixasphalt 0/11 S (ARAND, 2000)**

Bei geringen Hohlraumgehalten können Fälle auftreten, bei denen in den wassergesättigten Probekörpern zusätzliche Kräfte mobilisiert werden müssen, um das in den Hohlräumen eingedrungene Wasser entgegen dem Fließwiderstand aus diesen auszutreiben, so dass sogar negative Werte (vermeintliche Spaltzugfestigkeitszunahme) vorkommen (ARAND, 2000).

### 2.3.2 Verdichtungswiderstand

Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Verdichtungswiderstand und dem Verformungswiderstand von Walzasphalten (ARAND, 1984). Durch die Verdichtung findet eine Volumenverringering infolge äußerer Krafteinwirkung statt, indem der Hohlraumgehalt auch verringert wird. Der Verformungswiderstand hängt im Wesentlichen von der aktivierbaren inneren Reibung zwischen den einzelnen Körnern und in bestimmtem Maße von der Festigkeit der Körner selbst sowie der Viskosität des Asphaltmastix ab. Die Verzahnung im Korngerüst wird durch die Art der Reibungsflächen, Anzahl der Berührungspunkte zwischen den Körnern und ihre Verspannung bestimmt (MILBRADT, 1988).

Experimentell lässt sich der Verdichtungswiderstand eines Walzasphalts nach der Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mithilfe des Marshall-Verfahrens (FGSV, 1987) über die Dichte- oder Dickenänderung von Marshall-Probekörpern in Abhängigkeit von der aufgebrauchten Verdichtungsarbeit ermitteln. In dieser Arbeit wird der Verdichtungswiderstand  $D$  über die Dickenänderung - als Exponentialfunktion (Gleichung 8) der Annäherung der Probekörperdicke während des Verdichtungs Vorganges - bestimmt.

$$\frac{1}{d}(S) = a - b \cdot e^{-\frac{S}{D}} [\text{mm}^{-1}] \quad (8)$$

Dabei sind:

$d$ : Probekörperdicke [mm]

$S$ : Anzahl der Schläge

$a, b$ : Regressionsparameter

$D$ : Verdichtungswiderstand [21 Nm]

## 2.4 Strahlungstechnische Grundlagen zum Erwärmungsverhalten

### 2.4.1 Solarstrahlung und Sonnenlicht

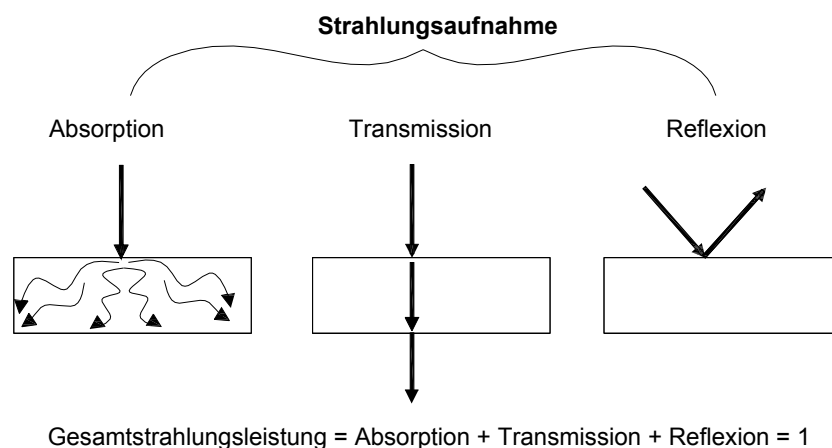
Die Einstrahlung der Sonne auf die Erde stellt einen Energietransport durch Strahlung dar. Die Strahlung kann unter anderem in Wärme umgewandelt werden. Bei einem Wärmetransport kann keine Strahlungsenergie verloren gehen. Wenn die Strahlung auf einen Stoff trifft, dann sind folgende Prozesse möglich (Stöcker et al., 2000):

**Absorption:** Die Strahlung wird aufgenommen und in eine andere Energieform umgewandelt.

**Transmission:** Die Strahlung passiert den Stoff ungehindert.

**Reflexion:** Die Strahlung wird zurückgeworfen.

Die drei Effekte treten nicht alternativ zueinander, sondern im Allgemeinen gleichzeitig auf. Die Gesamtstrahlungsleistung ergibt sich dabei durch Addition dieser Faktoren (Bild 14).

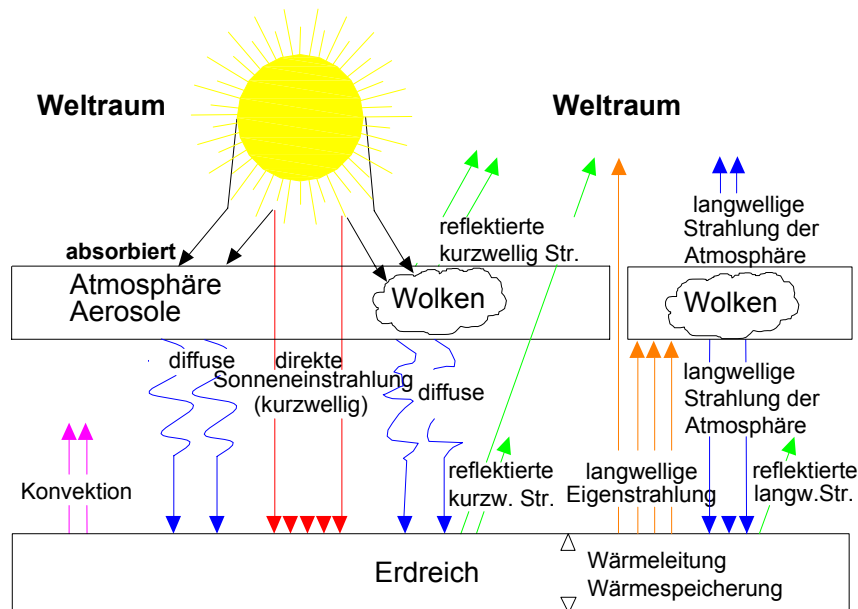


**Bild 14: Strahlungsaufnahme (Stöcker et al., 2000)**

Die ungefähre spektrale Verteilung der Sonnenstrahlung teilt sich in Abhängigkeit der Wellenlänge in 7 % UV, 46 % sichtbare Strahlung und 47 % infrarote Strahlung auf.

Für die Sonnenstrahlung an der Erdoberfläche und in dem Teil der Atmosphäre, der für die Meteorologie das größte Interesse aufweist, gibt es eine scharfe untere Grenze bei der Wellenlänge  $0,29 \mu\text{m}$  und eine obere Grenze bei ungefähr  $4 \mu\text{m}$ . Die Strahlung, die von der Atmosphäre und von der Erdoberfläche ausgestrahlt wird, die terrestrische Strahlung, umfasst Wellenlängen zwischen ca.  $4$  und  $100 \mu\text{m}$ . Die Son-

nenstrahlung und die terrestrische Strahlung umfassen somit zwei voneinander getrennte Wellenlängenbereiche (Bild 15). In der Meteorologie pflegt man daher die Sonnenstrahlung auch die kurzwellige Strahlung zu nennen, die terrestrische Strahlung die Langwellige (GÖSTA, 1994).



**Bild 15: Schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge an der Fahrbahnoberfläche (MÜLLER et al., 2007)**

### 2.4.2 Künstliches Bestrahlen und Laborlichtquellen

Keine künstliche Bestrahlung kann als vollständige Simulation der realen Bedingungen bezeichnet werden. Die bei der künstlichen Besonnung erhaltenen Ergebnisse können nur dann als repräsentativ für ähnliche Bestrahlung beim praktischen Gebrauch angesehen werden, wenn die Korrelation zwischen natürlicher und künstlicher Bestrahlung für die jeweiligen geprüften Materialien ermittelt wurde und wenn Art und Verlauf der Temperaturlinien danach gleich sind (DIN EN ISO 4892-1, 2001). Die relative Aufwärmung von Materialien kann unter Praxisbedingungen an verschiedenen Orten aufgrund der Abweichungen von UV-Strahlung, Benässungsdauer, relativer Luftfeuchte, Temperatur und anderer Faktoren sehr unterschiedlich sein. Für Materialvergleiche sind insofern diese Gegebenheiten als ungünstig anzusehen. Im Gegensatz hierzu kann davon ausgegangen werden, dass die künstliche Bestrahlung für die Bestimmung der relativen Temperaturentwicklung innerhalb der vergleichbaren Materialien bei einer definierten Umgebung geeignet ist.

Obwohl es - pragmatisch betrachtet - sinnvoll erscheint, eine definierte Bestrahlungsdauer mit einer definierten Strahlungsstärke (in  $W/m^2$ ) bei der künstlichen Bestrahlung festzulegen, um eine vergleichende Bewertung von unterschiedlichen Materialien zu ermöglichen, wurde aus nachfolgenden Gründen nicht diese Vorgehensweise gewählt, sondern mit Referenzmaterialien gearbeitet (siehe Kapitel 6.1):

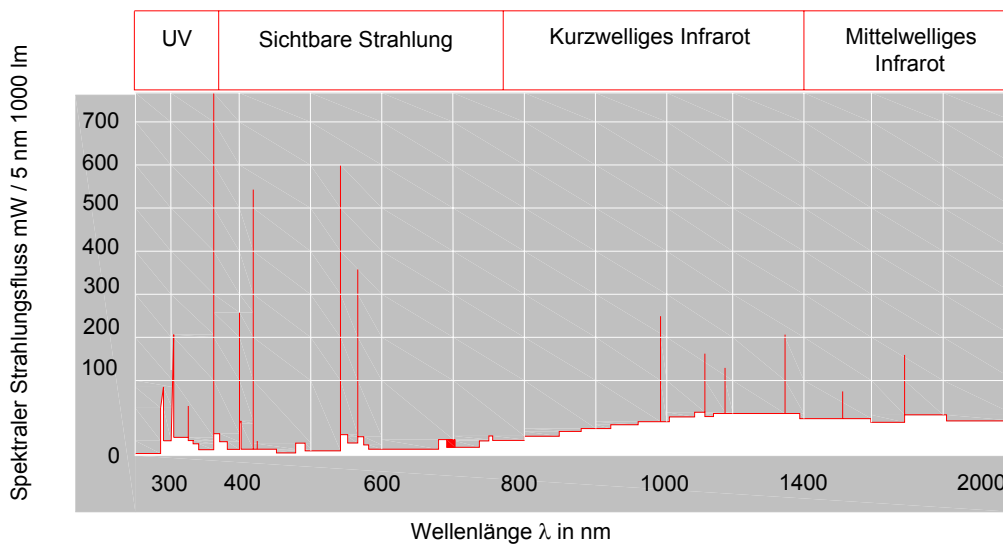
- Um mit dieser Vorgehensweise reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen, müssten die Anfangsbedingungen definierten Zuständen entsprechen (Temperatur der Probekörper, Temperatur der Umgebung, Luftfeuchtigkeit etc.). Dies kann jedoch nicht mit verhältnismäßigem Aufwand gewährleistet werden.
- Bestrahlungsversuche, die auf der Grundlage des Verhältnisses der Bestrahlung bei einer Laborlichtquelle und dem Tageslicht (im gleichen Spektralbereich) berechnet werden, berücksichtigen nicht die nachfolgend angegebenen Faktoren. Insofern können auch mit definierten Bestrahlungsdauern keine unmittelbaren Bezüge zur Praxis hergestellt werden.

Laut Literatur sind nachfolgende Faktoren, die den Grad der Korrelation zwischen der Aufwärmung durch künstliche Bestrahlung und Sonnenlicht im Freien verschlechtern können, relevant:

- Unterschiede zwischen den Spektralverteilungen der Strahlung von Laborlichtquelle und dem Tageslicht;
- Bestrahlungsstärken, die von den natürlichen Beanspruchungsbedingungen abweichen;
- Beanspruchungszyklen durch kontinuierliche Bestrahlung einer Laborlichtquelle ohne Dunkelperioden;
- Beanspruchungsbedingungen, die zu unrealistischen Temperaturunterschieden zwischen hellen und dunklen Probekörpern führen;
- unrealistisch hohe oder niedrige Feuchtegehalte.

Zusammenfassend ist eine künstliche Bestrahlung zumindest für einen relativen Vergleich der erzeugten Temperaturniveaus von bestrahlten Probekörpern - wie dies vorliegender Zielsetzung entspricht - unter Beachtung der bereits geschilderten Defizite möglich und sinnvoll.

Für die künstliche Bestrahlung können sogenannte Ultra-Vitalux Strahler eingesetzt werden. Diese bestehen aus einem Quarzbrenner und einer Wolframdraht-Glühwendel, die so aufeinander abgestimmt sind, dass in Verbindung mit pilzförmigen Spezialglaskolben mit Innenreflektor eine laut Hersteller (OSRAM, 2007) in der Wirkung der natürlichen Sonne weitgehend ähnliche Strahlung nach außen abgegeben wird. Gegenüber den in der normalen Beleuchtung eingesetzten Lampen unterscheiden sich Spezialstrahler durch ihre spezielle Strahlungsverteilung, deren Schwerpunkt meist im Infrarot- oder im UV-Bereich liegt (Bild 16). Die Leistungsaufnahme liegt bei 300 W.



**Bild 16: Spektraler Strahlungsfluss der Ultra-Vitalux Strahler [OSRAM, 2007]**

Wegen seiner sonnenähnlichen Strahlungseigenschaften wird der Ultra-Vitalux Strahler in der industriellen Werkstoffprüfung genutzt, insbesondere zur Erprobung von Werkstoffen und Geräten auf Klimabeanspruchungen nach DIN 50010:

- Tropentauglichkeit und Bewitterung
- Künstliche Alterung
- Feststellung der Veränderung von Stoffeigenschaften, Funktionssicherheit bzw. Lebensdauer unter besonderen klimatischen Bedingungen usw.

Zu beachten ist allerdings, dass die Ultra-Vitalux Strahler einen im Vergleich zur Sonnenstrahlung hohen Anteil Infrarot-Strahlung emittieren. Deswegen können

Temperaturunterschiede zwischen hell und dunkel gefärbten Probekörpern größer sein, als dies unter realen Bedingungen der Fall wäre.

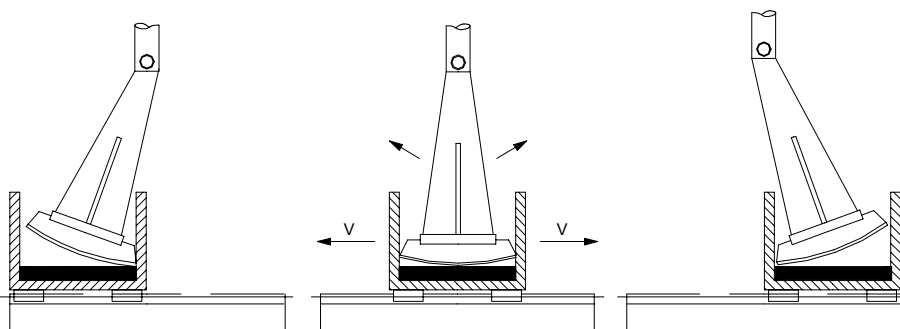
Die Gesamtbestrahlungsstärke der natürlichen Mittagssonne auf der Erdoberfläche beträgt an einem sonnigen Junitag ca.  $1.000 \text{ W/m}^2$  (Jahresmittelwert der Sonnenstrahlung in  $50^\circ$  N-Breite:  $200 \text{ W/m}^2$ ). Bei Anordnung von 16 Strahlern/ $\text{m}^2$  zu einem Bestrahlungsfeld wird im Abstand von ca. 50 cm zwischen Kolbenkuppe und Bestrahlungsgut laut Hersteller eine gleichförmige, diesen Verhältnissen entsprechende Bestrahlungsstärke erzielt.

### 2.4.3 Bestrahlungsanlagen zur thermischen Beanspruchung von Asphaltproben

Um den Einfluss des Aufhellungsgrades auf den Verformungswiderstand bei Wärmeeinstrahlung zu untersuchen, müssen die zu untersuchenden Asphalte Beanspruchungen ausgesetzt werden, die extremen sommerlichen Bedingungen entsprechen.

#### (a) Verfahren nach VON STOSCH (1968)

Hierfür entwickelte VON STOSCH (1968) eine Versuchsanordnung, um Verhältniswerte für den im Kapitel 2.2.2 angesprochenen Zusammenhang zwischen Verformungswiderstand und Aufhellungsgrad zu erhalten. Als Proben dienten Asphaltplatten, welche mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (Bild 17) hergestellt worden waren, deren Bindemittelfilm an der Oberfläche abgerieben war.



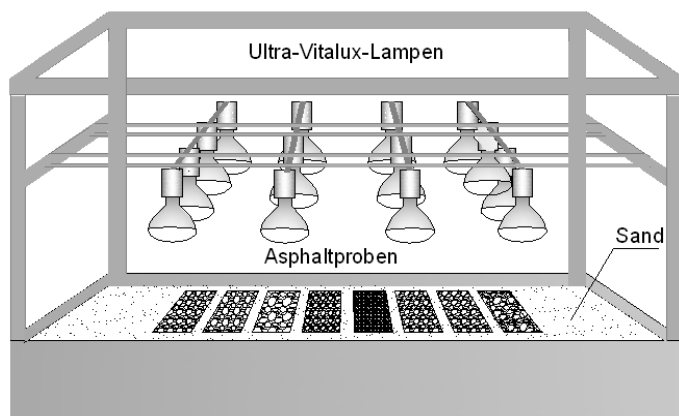
**Bild 17: Schematische Darstellung des Walzsektor-Verdichtungsgerätes und Funktionsweise**

Der Abrieb des Bindemittelfilms erfolgte durch ein im Nordlabor GmbH entwickeltes Verfahren, so dass der Abrieb an der Oberfläche der Asphaltplatte etwa dem Abrieb entspricht, der unter Verkehr eintritt. Die Asphaltplatten wurden mit Thermoelementen in drei Tiefen (Oberfläche, 1 und 2 cm unterhalb der Oberfläche) bestückt, so

dass der Temperaturverlauf registriert werden konnte. Für einen Versuch wurde die vorbereitete Platte in die Form des Walzsektor-Verdichtungsgerätes eingebracht und mit einer Wärmequelle (250-Watt-Rotlicht Lampe) im Abstand von 23 cm und einer Bestrahlungsdauer von 90 Minuten thermisch beansprucht. Das Walz-Segment wurde im Vorfeld mit einem 15 mm breiten Hartgummistreifen mittig ausgerüstet. Nach Abschluss der Bestrahlung wurde die Rotlicht-Lampe auf die Seite bewegt und die Asphaltplatte durch das Walz-Segment mit 10 Übergängen beansprucht.

### **(b) Verfahren nach ROSSBERG (2000)**

Bei den Untersuchungen nach ROSSBERG (2000) wurden die Versuche im Labor in einem geschlossenen dunklen Raum mit Betonfußboden durchgeführt, um eine Unabhängigkeit der Messergebnisse von weiteren meteorologischen Bedingungen wie Lufttemperatur und Feuchtigkeit zu gewährleisten. Die Versuchseinrichtung bestand aus einem Rahmen als Halterung für 14 Ultra-Vitalux Lampen (Bild 18). Die Beleuchtungshöhe war verstellbar, um die erwünschte Bestrahlungsstärke zu erreichen. Die Temperaturen wurden in den Probekörpern durch eingesetzte kalibrierte Temperatursensoren in unterschiedlichen Tiefen unterhalb der Oberfläche ermittelt. Die Pro-



**Bild 18: Versuchseinrichtung nach ROSSBERG (2000)**

ben wurden auf eine 50 mm dicke Brechsandschüttung in einen unter der Beleuchtungseinrichtung positionierten Kasten gestellt und bis zur Oberfläche in Brechsand eingebettet. Die Brechsandschüttung hatte direkten Kontakt zum Betonfußboden des Labors, was die Stauung von Wärme am Boden verhindern sollte. Die Bestrahlungsversuche wurden bei zwei unterschiedlichen Höhen der Lampen durchgeführt. Durch Interpolation wurden die Temperaturniveaus für eine Bestrahlungsstärke von  $380 \text{ W/m}^2$  bestimmt, wie in Kapitel 2.2.2, Bild 11 dargestellt.

Bereits an dieser Stelle sei angemerkt, dass die Versuchseinrichtung nach ROSSBERG als Grundlage für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum thermischen Verhalten (Kapitel 6) diene.



### 3 Auswahl und Eigenschaften der Referenz- und Variationsasphalte

#### 3.1 Beschreibung der Ausgangsmaterialien

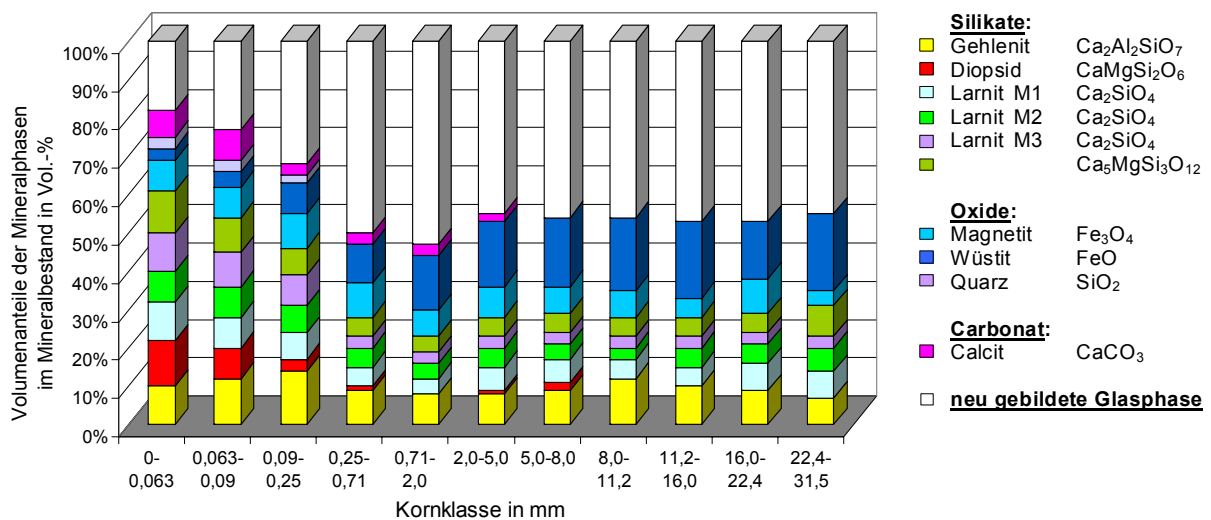
##### 3.1.1 Elektroofenschlacke

##### - Mineralogische Phasenzusammensetzung der verwendeten EOS

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der hier verwendeten EOS wurde nach Kornklassen differenziert im Rahmen dieser Arbeit untersucht, um die Kombinationsvarianten, die sich durch die Modifikation mit EOS ergeben, im Vorfeld ggf. einzuschränken.

Die mineralogische Phasenzusammensetzung der EOS wurde mithilfe eines Röntgendiffraktometers (Typ D 500 der Fa. Siemens) qualitativ sowie halb quantitativ bestimmt. Die in Bild 19 angegebene mineralogische Phasenzusammensetzung zeigt, dass die untersuchten Kornklassen aus dem EOS-Baustoffgemisch 0/32 mm Mineralphasen aus den Gruppen der Oxide, Silikate, Carbonate und eine neu gebildete Glasphase beinhalten. Zu den Oxiden gehören Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), Wüstit ( $\text{FeO}$ ) und Quarz ( $\text{SiO}_2$ ). Von den Silikaten sind Gehlenit ( $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ ), Diopsid ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ), Larnit ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) in drei Modifikationen sowie  $\text{Ca}_5\text{MgSi}_3\text{O}_{12}$  vertreten. Von den Carbonaten ist lediglich Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) vorhanden.

Die Volumenverhältnisse der Mineralphasen in den Kornklassen größer 2 mm sind annähernd konstant (Bild 19).



**Bild 19:** Mineralogische Phasenzusammensetzung der untersuchten EOS

Die in dieser Arbeit verwendeten Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm unterscheiden sich somit unwesentlich. Das bedeutet, dass anhand der mineralogischen Phasenzusammensetzung keine der drei Kornklassen als vorteilhafter gegenüber den anderen Kornklassen in Bezug auf die Hafteigenschaften oder anderen Gebrauchseigenschaften, die von der mineralogischen Phasenzusammensetzung abhängig sind, angesehen werden kann.

#### - **Bauphysikalische Eigenschaften der verwendeten Elektroofenschlacken**

Bekanntermaßen können zwischen Elektroofen unterschiedlicher Hersteller deutliche Unterschiede und damit auch in den Eigenschaften ihrer Schlacken bestehen. Die hier wiedergegebenen Ergebnisse sind solange, bis ein ausreichendes Vergleichsmaterial vorliegt, als exemplarisch für die hier verwendete EOS der Badischen Stahlwerke anzusehen. Verallgemeinerungen auf die Gesteinskörnungen anderer Lieferanten sind nicht zulässig.

Die verwendete EOS hat eine dunkelgraue Farbe, welche zu dunklen Straßenoberflächen führt, die sich stärker als helle erwärmen und besseren Kontrast zur Markierung haben.

Die an den EOS der Badischen Stahlwerke im Rahmen der Fremdüberwachung nach RG Min-StB (FGSV, 1993) bzw. TL Min-StB (FGSV, 2000) ermittelten bautechnischen Kennwerten sind für den Zeitraum 2003 bis 2005 als Mittelwerte in Tab. 4 zusammengestellt.

Eigenschaft	Prüfverfahren	Ist*	Soll
Kornform	DIN EN 933-4	5,0 M.-%	≤ 20,0 M.-%
Raubeständigkeit (Prüfzellenversuch)	TL SWS, Anlage 3	0,1 Vol.-%	≤ 1,0 Vol.-%
Raubeständigkeit (Dampfversuch)	TP Min-StB, Teil 4.7.1.3	1,2 Vol.-%	≤ 5,0 Vol.-%
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN 52 104, Teil 1	0,5 M.-%	≤ 1,0 M.-%
Widerstand gegen Schlag ( $SZ_{8/12}$ )	DIN EN 1097-2	17,6 M.-%	≤ 18,0 M.-%
Affinität zu Bitumen	DIN 1996, Teil 10	100 %	> 80 %
Rohdichte	DIN 52 102	3,959 bis 4,034 g/cm <sup>3</sup>	
Polierresistenz (PSV-Wert)	TP Min-StB, Teil 5.51	60	≥ 52
Bruchflächigkeit	Nach Augenschein	> 95%	

\* Mittelwert der am Institut für Straßen- u. Eisenbahnwesen (ISE) ermittelten Ergebnisse im Rahmen der Fremdüberwachung

**Tab. 4: Bautechnische Kennwerte (BSN, 2003 bis 2005) und Anforderungen nach RG Min-StB (FGSV, 1993)**

Um einen Vergleich zu den in den TL Gestein-StB (FGSV, 2007) gestellten Anforderungen zu ermöglichen, sind die ermittelten Kenngrößen, die im Rahmen der freiwilligen Fremdüberwachung der BSN im Zeitraum 2006 bis 2008 ermittelt wurden, in Tab. 5 angegeben. Die Kennwerte der EOS liegen trotz kleiner Unterschiede in den Prüfverfahren auf dem gleichen Niveau.

Die Kornform < 5 M.-% (Tab. 4 und 5) und die raue Oberfläche führen zu einer Verzahnung der Gesteinskörnungen aus EOS und bilden ein stabiles Gesteinskörnungsgerüst im Asphalt, welches den Verdichtungs- und Verformungswiderstand erhöht.

Eigenschaft	Prüfverfahren	Ist*	Soll
Kornform	DIN EN 933-4	2 M.-%	≤ 15 M.-%
Raumbeständigkeit (Dampfversuch)	DIN EN 1744-1, Abs. 19.3	0,6 Vol.-%	≤ 3,5 Vol.-%
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	DIN EN 1367-1	0,5 M.-%	≤ 1,0 M.-%
Widerstand gegen Frost-Tau-Salz	DIN EN 1367-1	0,6 M.-%	≤ 5,0 M.-%
Los Angeles-Koeffizient ( $LA_{10/14}$ )	DIN EN 1097-2	18	≤ 20
Widerstand gegen Schlag ( $SZ_{8/12}$ )	DIN EN 1097-2	15,6 M.-%	≤ 18,0 M.-%
Widerstand gegen Hitzebeanspruchung	DIN EN 1367-5	0,1 M.-%	-
Affinität zu Bitumen mittlerer Grad der Umhüllung nach 6 Std.	DIN EN 12697-11, A	85 %	-
Rohdichte auf ofentrockener Basis	DIN EN 1097-6	3,600 bis 3,708 g/cm <sup>3</sup>	
Polierresistenz (PSV-Wert)	DIN EN 1097-8	64	≥ 52
Bruchflächigkeit	Nach Augenschein	100 %	

\* Mittelwert der am Institut für Straßen- u. Eisenbahnwesen (ISE) ermittelten Ergebnisse im Rahmen der freiwilligen Fremdüberwachung

**Tab. 5: Bautechnische Kennwerte (BSN, 2006 bis 2008) und Anforderungen nach TL Gestein-StB (FGSV, 2007)**

Die verwendete EOS ist raumbeständig und benötigt keine Lagerung. Dies lässt sich mit dem Dampfversuch in ungebundenem Zustand und mit dem Prüfzellenversuch in gebundenem Zustand (Asphaltprobekörper) prüfen. Die ermittelten Werte liegen deutlich unter den Anforderungswerten (Tab. 4 und 5).

Die EOS leistet einen guten Widerstand gegen Frostbeanspruchung mit und ohne Einwirkung von NaCl als Tausalz. Der Widerstand gegen Zertrümmerung wurde mit beiden Verfahren (Schlagversuch und Los-Angeles) bestimmt. Es ergaben sich Werte im oberen Bereich, da der Abrieb der porösen Oberfläche in beiden Verfahren erhöht ist (Tab. 4 und 5).

Die Prüfung der Affinität zwischen Bitumen und groben Gesteinskörnungen mit dem Flaschen-Rollverfahren ist eingeschränkt geeignet, da bei der Beurteilung des Umhüllungsgrades der Gesteinskörnungen nach mechanischer Beanspruchung unter Einwirkung von Wasser die Kanten streng genommen nicht berücksichtigt werden dürfen. Die Einschränkung ergibt sich aufgrund der Vielzahl an Kanten und ihrer ungleichmäßigen Verteilung.

Die Rohdichte der EOS-Gesteinskörnungen liegt durchschnittlich 20 bis 40 % höher als bei den konventionellen Gesteinskörnungen. Dies führt zu höheren Einbaukosten, welche durch eine Kombination mit natürlichen Gesteinskörnungen vermindert werden kann.

Die Gesteinsoberfläche der EOS weist eine raue und poröse Struktur auf, welche für die vorteilhafte Resistenz gegen Polieren im Vergleich zu den herkömmlichen Gesteinskörnungen in hoch belasteten Asphaltdeckschichten verantwortlich ist, da unter Einwirkung von Verkehr und Witterung eine ständige Regenerierung der Mikrotextur auf den Gesteinsoberflächen stattfindet und zu dauerhaft hohem PSV-Wert führt (Tab. 4 und 5).

### **3.1.2 Eigenschaften der konventionellen Gesteinskörnungen, Bindemittel und des Zusatzes**

Neben der EOS der Badischen Stahlwerke wurde als konventionelle Gesteinskörnung für die Kombination mit EOS Moräne ausgewählt, da die vorgesehene Moräne lokal vorhanden ist, gute bautechnische Eigenschaften hinsichtlich Widerstand gegen Zertrümmerung und Affinität zu Bitumen aufweist und einen Aufhellungseffekt auf Asphalt hat. Die ausgewählte Moräne besteht aus Gesteinsanteilen wie Quarzit und Granit sowie sedimentären und metamorphen Komponenten. Entsprechend variieren die Farben (Bild 20): Sie sind gelblich, hell- bis dunkelgrau, bräunlich, rötlich und grünlich. Manche Komponenten haben eine glatte, andere eine raue Oberfläche und die meisten weisen scharfe Kanten auf. Die Lieferkörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 mm aus Moräne wurden auf ausgewählte Eigenschaften geprüft (s. Tab. 6).



**Bild 20: Moräne**

Eigenschaft	Prüfverfahren	Ergebnis
Widerstand gegen Schlag (SZ <sub>2/11,2</sub> )	TP Min-StB, Teil 5.2.1.3	11,7 M.-%
Affinität zu Bitumen	DIN 1996, Teil 10	90 %
Rohdichte	DIN 52 102	2,643 bis 2,651 g/cm <sup>3</sup>

**Tab. 6: Bautechnische Kennwerte der verwendeten Moräne**

Diese leisten einen guten Widerstand gegen Zertrümmerung und weisen eine gute Affinität zu Bitumen auf. Zur Gewährleistung einer einheitlichen Korngrößenverteilung bei allen zu untersuchenden Asphalten wurden die Lieferkörnungen aus Moräne und EOS in den Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm präparativ aufbereitet. Außerdem wurde der Edelbrechsand 0/2 mm in die Kornklassen 0,09/0,25; 0,25/0,71 und 0,71/2,0 mm aufgeteilt. Durch Waschen wurde sichergestellt, dass keine Feinanteile in den Kornklassen auftraten. Zur Gewinnung der Kornklasse 0/0,09 mm wurde Kalksteinmehl vom Überkornanteil befreit. Es kam ein polymermodifiziertes Bitumen (PmB 45 A) der Firma Shell zum Einsatz, da gemäß ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) bei Splittmastixasphalt 0/11 S für besondere Beanspruchung nur polymermodifizierte Bitumen vorgesehen sind. Am verwendeten PmB 45 A wurden die in Tab. 7 angegebenen Kennwerte ermittelt.

Eigenschaft	Prüfverfahren	Ergebnis
Erweichungspunkt Ring und Kugel	DIN EN 1427	60,5 °C
Elastische Rückstellung	DIN EN 13398	72,5 %
Dichte bei 25 °C	DIN 52004	1,044 g/cm <sup>3</sup>
Nadelpenetration	DIN EN 1426	38 x 0,1 mm

**Tab. 7: Kennwerte des verwendeten PmB 45 A**

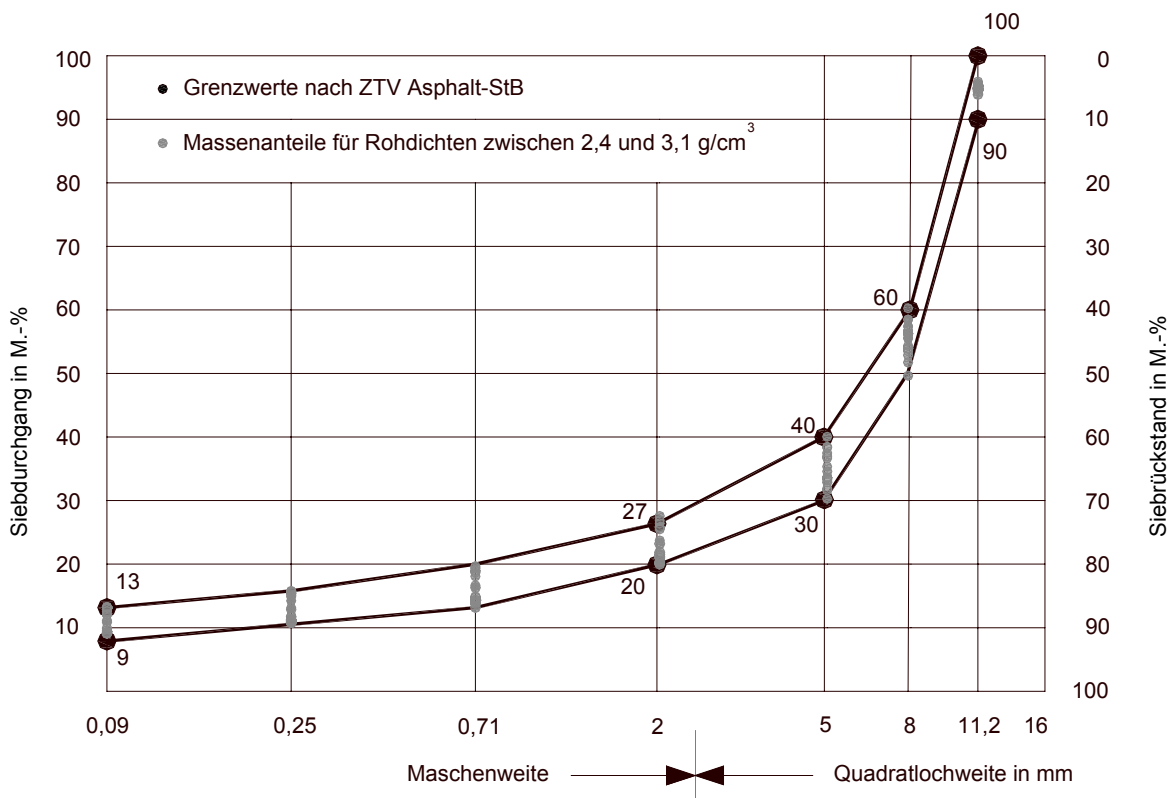
Als stabilisierender Zusatz wurde Viatop® 66 (Faseranteil 66 M.-% und Bitumen 34 M.-%) eingesetzt. In der Praxis hat sich dieser Zusatz zur Verhinderung einer Entmischung durch das Abfließen des Bindemittels von den Gesteinskörnungen während der Herstellung, des Transports, des Einbaus und der Verdichtung bewährt.

### **3.2 Vorüberlegungen zur Auswahl der Korngrößenverteilung von EOS-modifiziertem Splittmastixasphalt**

Die bautechnischen Eigenschaften wie z.B. Verdichtbarkeit, Verformungswiderstand und Griffigkeit werden neben der Kornform wesentlich von der Korngrößenverteilung bestimmt. Dabei ist die Volumenverteilung innerhalb des Gesteinskörnungs-

gemisches maßgeblich. Sofern die Rohdichte im Gesteinskörnungsgemisch als konstant anzusehen ist, kann die Volumenverteilung mit der Massenverteilung gleichgesetzt werden. Für den praktischen Gebrauch (Herstellung, Kontrollprüfungen) sind aufgrund der einfacheren Handhabung i. Allg. die Massenverteilungen maßgebend.

Für die anstehenden Untersuchungen wurde eine Korngrößenverteilung gewählt, welche in der Mitte des nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) angegebenen Bereiches liegt. Setzt man diese Sieblinie als Volumenanteile an und rechnet dann im Rahmen einer Parameterstudie mit den in der TL Gestein-StB (FGSV, 2007) für die natürlichen Gesteine angegebenen Grenzen der Rohdichten  $2,4$  und  $3,1 \text{ g/cm}^3$  in den einzelnen Kornklassen die zugehörige Massenverteilung um, zeigt sich, dass die Minimal- und Maximalwerte deckungsgleich mit den in den ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) angegebenen Grenzsieblinien sind (Bild 21).

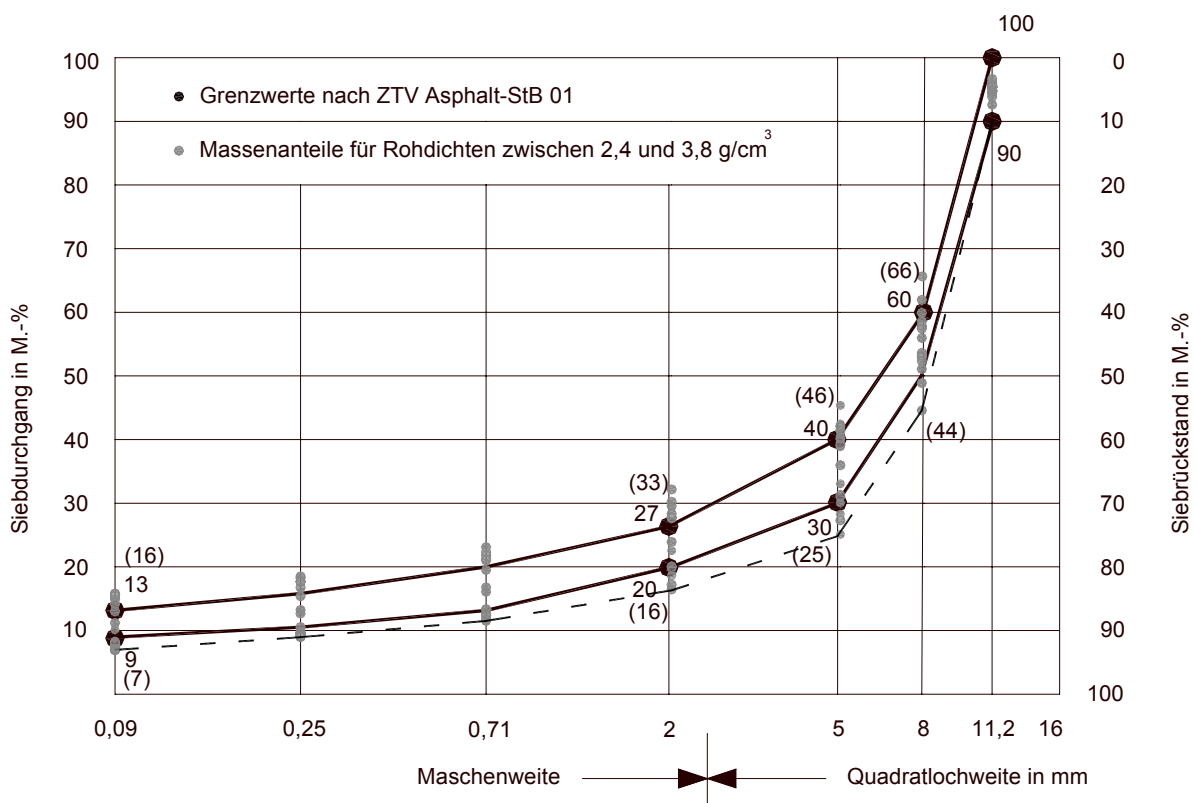


**Bild 21: Grenzsieblinien nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) und berechnete Massenanteile**

Die EOS weist nach TL Gestein-StB eine Rohdichte von  $3,8 \text{ g/cm}^3$  auf, liegt also deutlich über den Rohdichten der natürlichen Gesteine. Insofern sind die in den ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) angegebenen Sieblinienbereiche für den Einsatz dieser Gesteinskörnungen in Frage zu stellen. Variiert man analog zu o.a. Vorgehen

- anstatt mit  $3,1 \text{ g/cm}^3$  - nun mit  $3,8 \text{ g/cm}^3$ , ergeben sich die in Bild 22 angegebenen Bereiche. Dabei stellt sich die untere gestrichelte Sieblinie ein, wenn man im Splittbereich Gesteinskörnungen mit Rohdichten von bis zu  $3,8 \text{ g/cm}^3$  einsetzt. Die obere Grenzsieblinie kann demnach eine Verschiebung nach oben erfahren, wenn Gesteinskörnungen mit Rohdichten von  $3,8 \text{ g/cm}^3$  im Füller und Sandbereich eingesetzt werden.

Bei Einsatz der EOS im Splittbereich sollte somit die Korngrößenverteilung an der unteren korrigierten Sieblinie (gestrichelt) orientiert werden, wenn eine mittelgrobe Korngrößenverteilung angestrebt wird.



**Bild 22: Grenzsieblinien nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) und berechnete Massenanteile**

### 3.3 Durchführung einer Eignungsprüfung und Rezepturfestlegung

Der erste Referenzasphalt mit Gesteinskörnungen ausschließlich aus Moräne wurde auf Basis einer Eignungsprüfung, ergänzt mit Druckschwellversuchen, konzipiert (MMM). Anschließend wurden die Massenanteile in Volumenanteile umgerechnet, so dass die Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm aus Moräne mit den gleichen Volumenanteilen aus EOS ersetzt werden konnten: Dies war der zweite Referenzasphalt (EEE).

Analog ergaben sich durch die Kombination von Moräne mit EOS in diesen Kornklassen (s. Tab. 8) wiederum in den gleichen Volumenanteilen die Variationsasphalte (MME, MEM, EMM, MEE, EEM und EME).

Kornklasse	Kornklasse	Kornklasse 8 bis 11 mm	
2 bis 5 mm	5 bis 8 mm	Moräne	EOS
Moräne	Moräne	MMM (A,B,C)	MME
	EOS	MEM	MEE
EOS	Moräne	EMM	EME
	EOS	EEM	EEE

Legende:

M: Moräne  
EOS: Elektroofenschlacke (E)

Codierung:

Die Zusammensetzung ist durch die Schreibweise zu identifizieren:

1. Buchstabe: Gesteinskörnung in der Kornklasse 2 bis 5 mm
2. Buchstabe: Gesteinskörnung in der Kornklasse 5 bis 8 mm
3. Buchstabe: Gesteinskörnung in der Kornklasse 8 bis 11 mm

**Tab. 8: Die Nomenklatur der Asphaltvarianten**

Zur Gewährleistung einer einheitlichen Korngrößenverteilung bei allen zu untersuchenden Asphalten wurden die Lieferkörnungen aus Moräne und EOS in den Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm präparativ aufbereitet. Außerdem wurde der Edelbrechsand 0/2 mm in die Kornklassen 0,09/0,25; 0,25/0,71 und 0,71/2,0 mm aufgeteilt. Durch Waschen wurde sichergestellt, dass keine Feinanteile in den Kornklassen auftraten. Zur Gewinnung der Kornklasse 0/0,09 mm wurde Kalksteinmehl vom Überkornanteil befreit.

Die aufbereiteten Gesteinskörnungen aus Moräne wurden so zusammengestellt, dass die ermittelte Korngrößenverteilung in der Mitte des nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) angegebenen Bereiches liegt (Anlage 1, Bild 1). Mit dieser Kornzusammensetzung und drei Bindemittelgehalten (6,6; 6,9 und 7,2 M.- %) wurden drei Asphaltmischungen (A, B und C) hergestellt und auf ihre Eigenschaften im Rahmen einer Eignungsprüfung untersucht (Anlage 1, Tab. 1). Die Auswahl eines optimalen Bindemittelgehalts wurde mit den Ergebnissen von Druckschwellversuchen im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung unterstützt. Auf Grundlage dessen wurde die Mischung B mit einem Bindemittelgehalt von 6,9 M.-% als Basis für die anschließende volumetrische Umrechnung ausgewählt.



Die prozentualen Massenanteile (M.-%) der einzelnen Gesteinskornklassen aus der Eignungsprüfung können über die Rohdichten nach Gleichung 9 in prozentuale Volumenanteile (Vol.-%) umgerechnet werden (Anlage 1, Bild 1).

$$V_i = \frac{\frac{M_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{\rho_i}} \cdot 100 \quad (9)$$

Dabei sind:

$V_i$  - Volumenanteil der i Kornklasse in Vol.-%

$M_i$  - Massenanteil der Kornklasse i in M.-%

$\rho_i$  - Rohdichte der Kornklasse i in  $\text{g/cm}^3$

Von den Volumenanteilen der Kornklasse aus Moräne ausgehend sollten anschließend die Massen der Kornklassen (2/5, 5/8 und 8/11 mm) aus EOS über die Rohdichten berechnet werden. Diese Methode erwies sich bei EOS als ungeeignet, weil die mit dem Pyknometerverfahren nach DIN 52 102 ermittelten Rohdichten (Tab. 9) zu hoch liegen und demzufolge die Marshall-Probekörper viel höher würden (Bild 23). Das beruht auf der Tatsache, dass beim Pyknometerverfahren das Wasser in die poröse Struktur der EOS-Gesteine eindringt und die Oberflächengestalt der Probe mit einem geringeren Volumen eingeschätzt wird. Dadurch wird ein höherer Wert für die Dichte ermittelt. Deswegen wurden die Rohdichten der EOS-Kornklassen zusätzlich auf ofentrockener Basis nach DIN EN 1097, Teil 6 als Verhältnis der vorgetrockneten Masse einer Gesteinsprobe zu dem Volumen, das sie in Wasser einnimmt, einschließlich innerer geschlossener und wasserzugänglicher Hohlräume ermittelt. Diese sind Tab. 9 zu entnehmen.



**Bild 23: Probekörperhöhen EEE: 72,8 mm / MMM: 63,0 mm**

Kornklasse	Rohdichte nach DIN 52 102		Rohdichte nach DIN EN 1097, Teil 6
	Moräne in $\text{g/cm}^3$	EOS in $\text{g/cm}^3$	EOS in $\text{g/cm}^3$
2/5 mm	2,651	3,929	3,708
5/8 mm	2,645	3,940	3,632
8/11 mm	2,643	3,928	3,600

**Tab. 9: Rohdichten der Kornklassen aus Moräne und EOS**

Um den Einfluss unterschiedlicher Dicken auf die Untersuchungsergebnisse der zu untersuchenden Asphaltvarianten auszuschließen, wurden gleiche Dicken für alle Probekörper angestrebt. Dies dient auch zur Kontrolle der Einhaltung gleicher Volumenanteile.

Variante Ausgangsstoff	MMM DIN 52 102	EEE DIN 52 102	EEE DIN EN 1097-6	EEE "experimentell"
	1	2	3	4
Bindemittel in g	80,7	80,7	80,7	80,7
Faserstoff in g	3,9	3,9	3,9	3,9
Füller < 0,09 mm in g	124,4	124,4	124,4	124,4
Sand (0,09/0,25 mm) in g	21,8	21,8	21,8	21,8
Sand (0,25/0,71 mm) in g	45,8	45,8	45,8	45,8
Sand (0,71/2 mm) in g	76,4	76,4	76,4	76,4
Splitt 2/ 5 mm in g ( <b>g/cm<sup>3</sup></b> )	113,5 ( <b>2,651</b> )	168,2 ( <b>3,929</b> )	158,8 ( <b>3,708</b> )	148,3
Splitt 5/8 mm in g ( <b>g/cm<sup>3</sup></b> )	218,1 ( <b>2,645</b> )	324,9 ( <b>3,940</b> )	299,5 ( <b>3,632</b> )	285,5
Splitt 8/11 mm in g ( <b>g/cm<sup>3</sup></b> )	491,0 ( <b>2,643</b> )	729,7 ( <b>3,928</b> )	668,8 ( <b>3,600</b> )	646,0
Gesteinskörnungsgemisch in g	1091,0	1491,2	1395,4	1348,2
Einwaage für ein MPK in g	1175,6	1575,8	1480,0	1432,8

**Tab. 10: Berechnung der Massen der EOS-Kornklassen**

In Spalte 1 der Tab. 10 sind die angesetzten Massen des Referenzasphalts MMM für die Herstellung eines Marshall-Probekörpers angegeben. Die Spalten 2 und 3 enthalten die berechneten Massen des zweiten Referenzasphalts EEE mit den nach den unterschiedlichen Verfahren (DIN 52102 und DIN EN 1097-6) ermittelten Rohdichten (Klammerwerte) der Kornklassen. Dies erfolgte nach Gleichung 10.

$$M_i^e = \frac{M_i^m \cdot \rho_i^e}{\rho_i^m} \quad (10)$$

Dabei sind:

$M_i^e$  Masse der Kornklasse i aus EOS in g

$M_i^m$  Masse der Kornklasse i aus Moräne in g

$\rho_i^e$  Rohdichte der Kornklasse i aus EOS in g/cm<sup>3</sup>

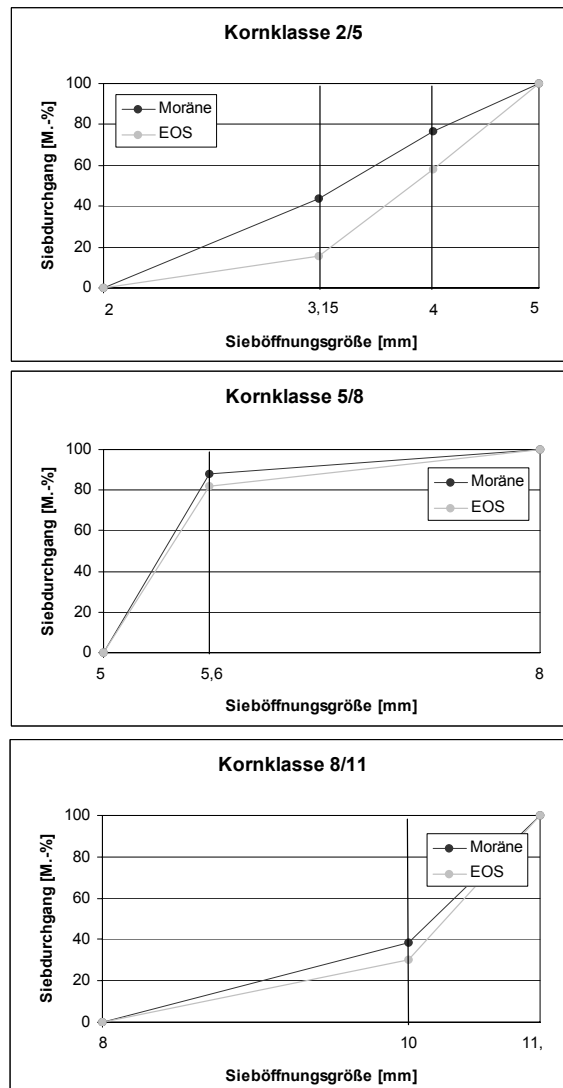
$\rho_i^m$  Rohdichte der Kornklasse i aus Moräne in g/cm<sup>3</sup>

Die berechneten Massen der Kornklassen aus EOS mit den Rohdichten auf ofentrockener Basis nach DIN EN 1097, Teil 6 (Tab. 10, Spalte 3) und die Massen der Kornklassen aus Moräne (Tab. 10, Spalte 1) wurden in zwei Messzylinder einge-

bracht und die Volumen verglichen. Es zeigte sich, dass diese Annäherung der Rohdichte besser als die der Rohdichte (Klammerwerte) nach DIN 52 102 (Tab. 10, Spalte 2) ist. Die Volumen der Kornklassen aus EOS waren immer noch größer. Auch diese Rohdichten sind somit für die Rezepturfestlegung der EEE ungeeignet.

Um trotzdem gleiche Volumina zu gewährleisten, wurden die höheren Volumina der EOS durch Massenreduzierung "experimentell" korrigiert, so dass sich die in Spalte 4 angegebenen Massen ergaben, welche für die Rezeptierung angesetzt wurden. Die mit diesen Massen hergestellten Marshall-Probekörper EEE (zweiter Referenzasphalt) haben nun ähnliche Dicken erreicht wie der erste Referenzasphalt MMM.

Erklärung, weshalb sich die Rohdichten nach DIN EN 1097-6 als ungeeignet erwiesen, liefert eine Betrachtung der Korngrößenverteilung im Bereich der Kornklassen 2 bis 11 mm (Bild 24).



**Bild 24: Kornverteilung der Kornklasse 2/5, 5/8 und 8/11 mm aus Moräne und EOS**

Daraus sind folgende kornklassenspezifischen Tendenzen ersichtlich:

- Die Kornklasse 2/5 mm aus Moräne weist beim Sieb mit Öffnung 4 mm einen Siebdurchgang von 76,6 M.-% und beim Sieb 3,15 mm von 43,5 M.-% auf. Die Siebdurchgänge bei EOS liegen im Gegensatz zur Moräne viel niedriger (58,1 und 15,3 M.-%). Dies deutet darauf hin, dass die Kornklasse 2/5 mm aus Moräne feiner als die aus EOS ist.
- Zwischen den Prüfsieben der Kornklasse 5/8 mm wurde ein zusätzliches Sieb eingelegt, dessen Nennweite 5,6 mm sehr nah zum Sieb 5,0 mm liegt. Trotzdem war bei der Moräne der Durchgang durch das Zwischensieb 5,6 mm ca. 6 M.-% höher als bei der EOS. Das heißt, dass die Kornklasse 5/8 aus EOS gröber als bei der Moräne ist.
- Zwischen den Prüfsieben der Kornklasse 8/11 mm wurde ein zusätzliches Sieb eingelegt, dessen Nennweite 10 mm sehr nah zum Sieb 11 mm liegt. Auch hier liegt der Siebdurchgang der Moräne mit über 8 M.-% höher als bei EOS.

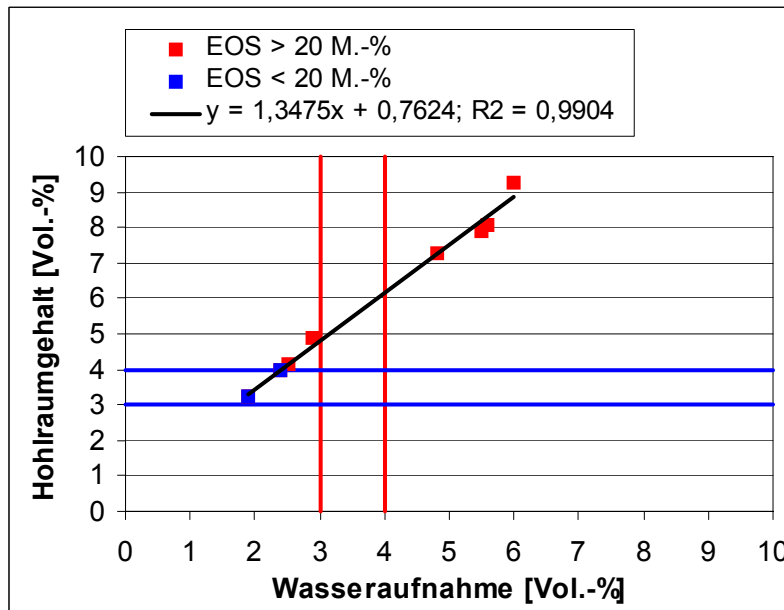
Der tendenziell gröbere Aufbau der Kornklassen aus EOS sowie die Kornform selbst liefert die Erklärung, weshalb sich mit den oben berechneten Massen trotz Korrektur der Rohdichten immer noch größere Volumen ergeben haben.

Durch die Kombination der „experimentell“ ermittelten Massen der Kornklassen aus EOS mit denen aus Moräne im Splittbereich ergaben sich die Rezepturen für die Variationsasphalte. Die Korngrößenverteilungen der Gesteinskörnungsgemische dieser Asphalte sind in Anlage 1, Bild 2 angegeben.

Die berechneten Hohlraumgehalte der Asphaltvarianten (MMM und EMM) liegen im zulässigen Bereich (3 und 4 Vol.-%) nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) für die Asphaltart SMA 0/11 S (Bild 25, blau, s. auch Tab. 8 in Anlage 1).

Die Hohlräume der restlichen Asphaltvarianten liegen außerhalb dieses Bereiches. Allerdings besitzen diese einen Anteil an EOS über 20 M.-%. Demzufolge müssen sie entsprechend ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) anhand ihrer Wasseraufnahme nach DIN 1996, Teil 8 (1977), anstatt des Hohlraumgehaltes  $H_{bit}$  beurteilt werden.

Die Wasseraufnahme muss - genauso wie der Hohlraumgehalt - zwischen 3 und 4 Vol.-% liegen (Bild 25, rot). Das ist jedoch bei keiner der Modifikationsvarianten der Fall.

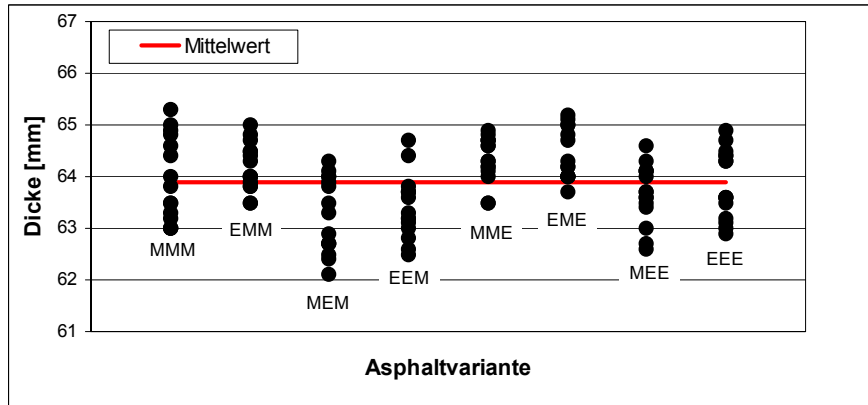


**Bild 25: Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Wasseraufnahme**

Die Asphaltvarianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm haben Wasseraufnahmen über 4 Vol.-% und die Varianten MEM und EEM weisen Werte unter 3 Vol.-% auf. Die Variante ausschließlich mit EOS weist eine dreifache Wasseraufnahme bzw. Hohlraumgehalt auf als die Variante ohne EOS. Es konnte ein Zusammenhang zwischen der ermittelten Wasseraufnahme und dem berechneten Hohlraumgehalt festgestellt werden (Bild 25). Dieser Zusammenhang zeigt, dass die Porosität und die Kornform der EOS die Wasseraufnahme sowie den berechneten Hohlraumgehalt stark beeinflussen. Danach sind - trotz der Zielsetzung, gleiche Volumenverteilungen bei allen Asphaltvarianten zu gewährleisten - vermeintliche Unterschiede insbesondere zwischen den Varianten mit bzw. ohne EOS in der Kornklasse 8/11 mm der Kornklasse 8/11 mm festzustellen (Anlage 1, Tab. 8). Dies führt zur Konsequenz, dass die Asphaltvarianten hinsichtlich der Hohlraumgehalte bzw. Wasseraufnahme und der damit verbundenen Gebrauchseigenschaften zu untersuchen sind, wie dies im Kapitel "Untersuchung der Wasserempfindlichkeit" (Kapitel 4) erfolgt.

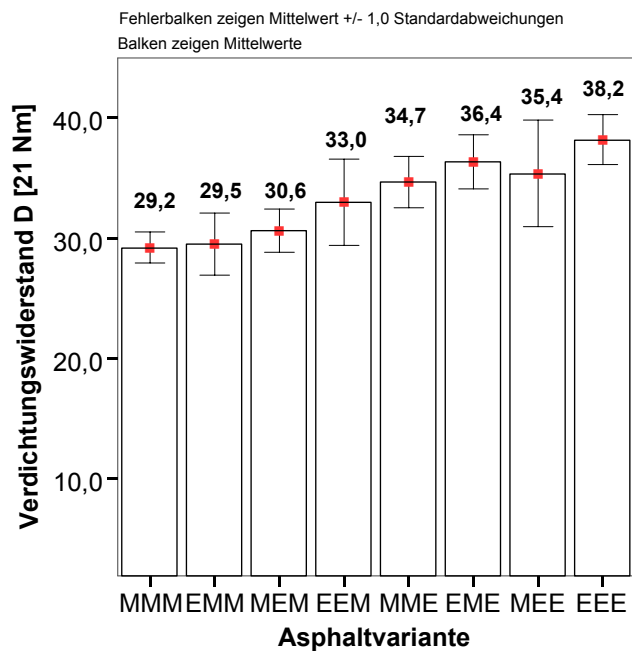
Nach den in Tab. 10 angegebenen Rezepturen wurden schließlich aus jeder Asphaltvariante 15 Marshall-Probekörper für die Ermittlung des Verformungswiderstandes und der Wasserempfindlichkeit hergestellt. Insgesamt haben alle Probekörper wie gewünscht ähnliche Dicken erreicht. Die ausgemessenen Dicken sind der Tab. 4 in Anlage 1 zu entnehmen. Es ergab sich im arithmetischen Mittel für alle 120 Probekörper eine Dicke von 63,9 mm (rote Linie in Bild 26) und eine Standardabweichung von  $\pm 0,712$  mm. Die maximale Abweichung lag um 1,4 mm über dem Mittelwert und

1,8 mm unter dem Mittelwert. Bemerkenswert ist, dass die Varianten mit EOS in der Kornklasse 5/8 mm unterdurchschnittliche Dicken im Mittel aufweisen (MEM; EEM; MEE), was auf einen geringfügig niedrigeren Volumenanteil dieser Kornklasse hindeutet.



**Bild 26: Dicken der MPK der untersuchten Asphaltvarianten**

Bei der Herstellung der Probekörper wurde die momentane Dickenänderung messtechnisch erfasst und mit der Software von EULITZ und HASE (1992) gleichzeitig der Verdichtungswiderstand D - wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben - berechnet. Abweichend von der Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mithilfe des Marshall-Verfahrens (FGSV, 1987) wurde vorliegend die Anzahl der Schläge nicht auf 2 x 100 Verdichtungs-



**Bild 27: Verdichtungswiderstand D**

schläge erhöht, sondern - wie üblich bei der Herstellung von Marshall-Probekörpern - 2 x 50 Verdichtungsschläge beibehalten. Die Einzelwerte sind in Anlage 1, Tab. 7 aufgelistet, ein Vergleich der Materialvarianten ist mit Bild 27 möglich. Danach ist mit Erhöhung des Anteils an EOS eine Erhöhung des Verdichtungswiderstandes um ca. 30 % festzustellen. Ob und inwieweit diese Ergebnisse Bezüge zum Verformungswiderstand aufweisen, wird in Kapitel 5 behandelt.

## **4 Untersuchung der Wasserempfindlichkeit**

Ziel dieser Versuchsreihe war es, die Wasserempfindlichkeit der Referenz- und Variationsasphalte durch den Abfall der Spaltzugfestigkeit nach Wasserlagerung zu beurteilen. Diese zusätzliche Untersuchung wurde vorgenommen, um das Haftverhalten bei Verwendung von EOS im Vergleich zu einer natürlichen Gesteinsart (Moräne) zu ermitteln, zu beurteilen und ggf. vor der Optimierung abzugrenzen. Dies vorrangig vor dem Hintergrund, dass sich bei den Asphalten mit EOS vergleichsweise größere Hohlraumgehalte zur Einhaltung einer vergleichbaren volumetrischen Zusammensetzung eingestellt haben (Kapitel 3.3).

### **4.1 Prüfbedingungen und Untersuchungsergebnisse**

Aus jeder Asphaltvariante wurden 6 Marshall-Probekörper (MPK) nach DIN 1996-4 (2 x 50 Verdichtungsschläge) hergestellt. In der DIN EN 12697-12 wird eine Verdichtung von 2 x 25 Schlägen mit der Begründung empfohlen, dass die sich dabei einstellenden Hohlraumgehalte zum Einen praxisnäher sind, zum Anderen bei niedrigen Hohlraumgehalten der Einfluss von Wasser auf die Hafteigenschaften gering ist und demzufolge eine differenzierende Beurteilung nicht möglich ist. Diese vorgenommene Abweichung zur Norm begründet sich jedoch in den höheren Hohlraumgehalten bzw. Wasseraufnahmen der Asphalte mit EOS, so dass sich bereits an dieser Stelle feststellen lässt, dass sich danach praxisnahe Hohlraumgehalte bzw. Wasseraufnahmen eingestellt haben (Anlage 1, Tab. 5 und 8). Demzufolge ist zu erwarten, dass die Asphaltvarianten mit einer Zunahme des Anteils an EOS (Hohlraumgehaltzuwachs) sich unter Einwirkung von Wasser haftkritischer verhalten als der Referenzasphalt MMM.

Die MPK jeder Asphaltvariante wurden an einem Tag hergestellt und nach mindestens 16 Stunden Abkühlzeit in zwei Teilgruppen von jeweils drei MPK geteilt, so dass die MPK innerhalb einer Gruppe in etwa die gleichen durchschnittlichen Längen bzw. Durchmesser und Raumdichten aufwiesen. Eine Teilgruppe wurde wassergesättigt, die andere trocken gelagert. Die Klimatisierung der wassergesättigten Teilgruppe erfolgte nach DIN EN 12697-12 im Wasserbad bei einer Temperatur von 40 °C für eine Dauer von 68 bis 72 h. Die Probekörper zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit im trockenen Zustand wurden nicht evakuiert, sondern bei einer Temperatur von

( $20 \pm 5$ ) °C auf einer ebenen Unterlage gelagert. Der Unterschied in der durchschnittlichen Länge L bzw. Durchmesser D der beiden Teilgruppen lag bei allen Asphaltvarianten deutlich unter dem maximal zulässigen Wert von 5 mm, der Unterschied in der durchschnittlichen Raumdichte lag ebenso unter dem maximal zulässigen Wert von  $0,03 \text{ g/cm}^3$ . Die in Tab. 1, Anlage 2 angegebenen Abmessungen L und D wurden bei den trockenen Proben nach Abkühlung nach DIN EN 12697-29, die von den wassergesättigten Proben nach der Evakuierung im Exsikkator bestimmt. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich keine Volumenzunahme der Probekörper durch das Evakuieren höher als die zulässige Volumenzunahme von 2 Vol.-% in den Proben einstellte.

Die zu prüfenden Probekörper beider Teilgruppen wurden in einer Luftkammer auf eine Temperatur von 10 °C (Kapitel 2.3.1) - die wassergesättigten Probekörper in Wasserbehältnissen - für die Dauer von mindestens 2 h temperiert. Die Prüfung der Spaltzugfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12697-23, indem jeder einzelne Probekörper innerhalb einer Minute nach der Entnahme aus der Luftkammer in der Druckprüfmaschine zwischen den Belastungsstreifen befestigt und diametral zur Zylinderachse mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet wurde. Der Verlauf der Spaltzugkraft über die Zeit ist für alle untersuchte Probekörper in Diagrammform in den Bildern 1 bis 8, Anlage 2 angegeben.

Die Probekörper aller Asphaltvarianten wurden nach oben beschriebenem und nachfolgend dargestelltem Schema (Tab. 11) vorbereitet und geprüft. Es wurden stets zwei Asphaltvarianten gleichzeitig vorbereitet und untersucht.

Entsprechend der Prüfnorm DIN EN 12697-23 erfolgte eine visuelle Beurteilung der Bruchlinien, welche in den Bildern 9 bis 16, der Anlage 2, dokumentiert sind. Bei den meisten Proben haben sich primäre „Zugbrüche“ („Brucharten“ s. Bild 12, Kapitel 2.3.1) eingestellt. Vereinzelt wurden auch Kombinations- und Verformungsbrüche (z.B. Variante MEM) festgestellt (Tab. 2, Anlage 2). Eine systematische Tendenz hat sich bezüglich der Bruchart nicht bestimmen lassen, da sich Kombinations- und Verformungsbrüche sowohl bei den Varianten mit Wasserlagerung wie auch ohne eingestellt haben.

Die Proben wurden nach der Beanspruchung durchgebrochen, um gemäß der Prüfnorm eine visuelle Beurteilung der Bruchflächen vornehmen zu können. Dabei wurden die Anteile der gebrochenen Gesteinskörnungen ermittelt, die der Tab. 2, Anla-



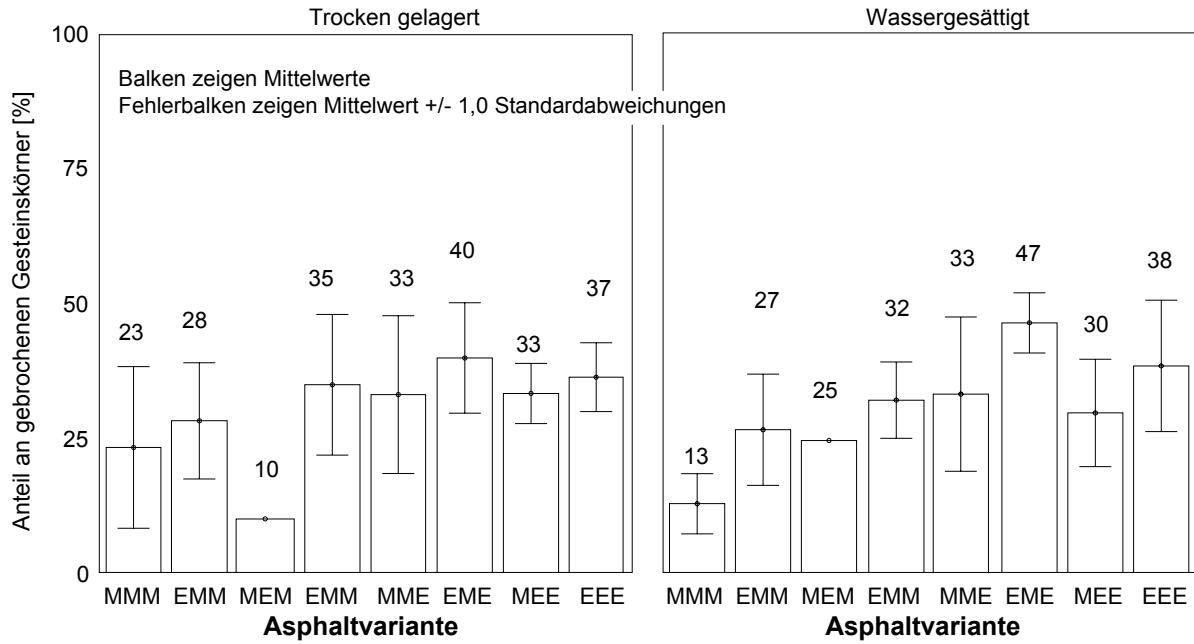
ge 2 zu entnehmen sind. Auch hier konnte kein systematischer Zusammenhang zwischen Bruchart und Kraftgröße erkannt werden.

Teilgruppe / Arbeitsschritte	Ablaufplan											
	1. Tag		2. Tag		3. Tag		4. Tag		5. Tag		6. Tag	
<b>Teilgruppe „wassergesättigt“</b>												
- Herstellung von 3 MPK	■											
- Abkühlung der MPK		■										
- Bestimmung der MPK-Abmessungen			■									
- Raumdichtebestimmung				■								
- Evakuierung					■							
- Bestimmung der MPK-Abmessungen						■						
- Wasserlagerung bei 40 °C für 68 bis 72 h							■	■	■	■	■	
- Wasserlagerung bei 10 °C für 2 h												■
- Spaltzugfestigkeitsprüfung												■
<b>Teilgruppe „trocken“</b>												
- Herstellung von 3 MPK	■											
- Abkühlung der MPK		■										
- Bestimmung der MPK-Abmessungen			■									
- Raumdichte Bestimmung				■								
- Lagerung bei ca. 20 °C						■	■	■	■	■	■	
- Kühlkammerlagerung bei 10 °C für 2 h												■
- Spaltzugfestigkeitsprüfung												■

**Tab. 11: Übersicht über den zeitlichen Ablauf der Vorbereitung und Prüfung der Wasserempfindlichkeit**

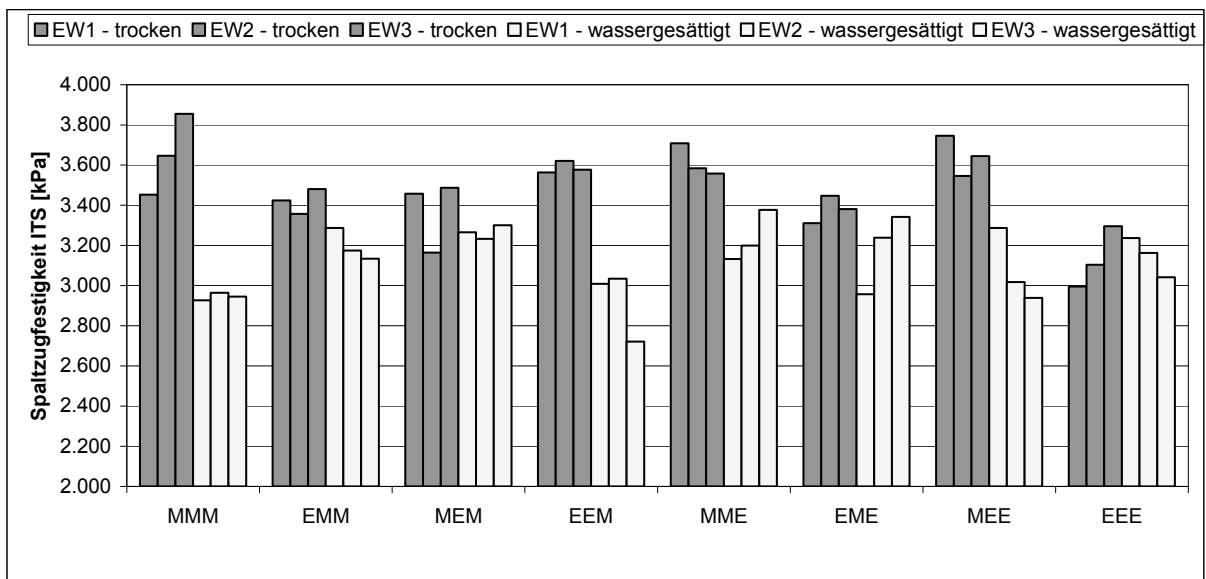
Eine tendenzielle Zunahme der Anteile der gebrochenen Gesteinskörnungen in den Bruchflächen mit Zunahme des Anteils an EOS kann jedoch gemäß Bild 28 insbesondere nach Wasserlagerung festgestellt werden. Gebrochene Gesteinskörnungen deuten auf eine gute Haftfestigkeit hin, die ein Ablösen der Gesteine verhindert. Es ist allerdings anzumerken, dass die Proben nach Versuchsende nicht vollständig in zwei Teilen getrennt vorlagen, so dass durch die nachträgliche mechanische Trennung die vorliegende Beurteilung beeinflusst sein könnte.

Die durchschnittlichen indirekten Zugfestigkeiten der beiden Probekörper-Teilgruppen ( $ITS_w$  und  $ITS_d$ ) sowie der Kennwert der Wasserempfindlichkeit  $ITSR$  für alle untersuchten Asphaltvarianten wurden berechnet und in Tabellenform zusammengestellt (Anlage 2, Tab. 3).



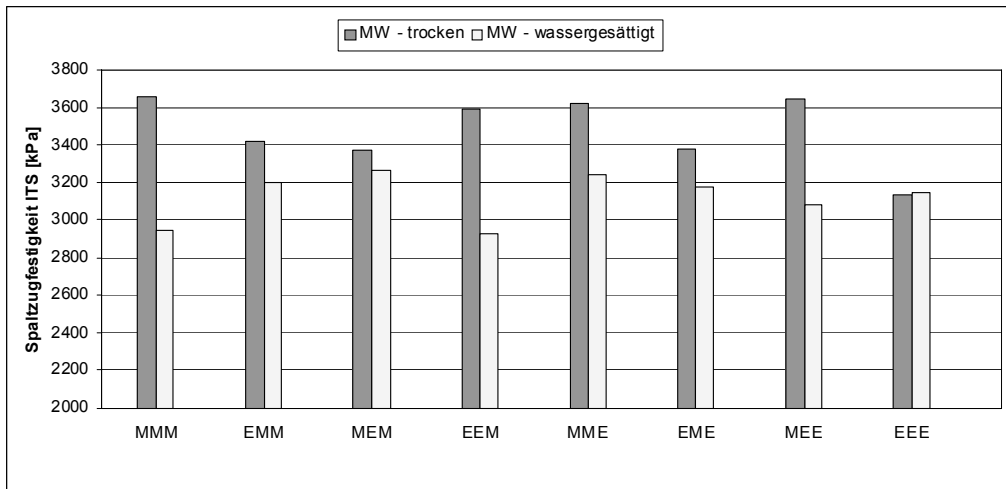
**Bild 28: Anteil gebrochener Gesteinskörner in Bezug zur Asphaltvariante**

Die Einzelwerte beider Teilgruppen  $ITS_w$  und  $ITS_d$  der untersuchten Asphaltvarianten (Bild 29 sowie Tab. 4, Anlage 2) erfüllen die in den DIN EN 12697-23 angegebene Regelung aus Schweden für Probekörper mit Durchmesser von 100 mm und einer Prüftemperatur von 10 °C, nach welcher die Einzelwerte als verträglich anzusehen sind, wenn die Differenz der indirekten Zugfestigkeit der einzelnen Probekörper ITS einer Teilgruppe um nicht mehr als 17 % vom Mittelwert abweicht und die Standardabweichung kleiner als 10 % vom Mittelwert ist.



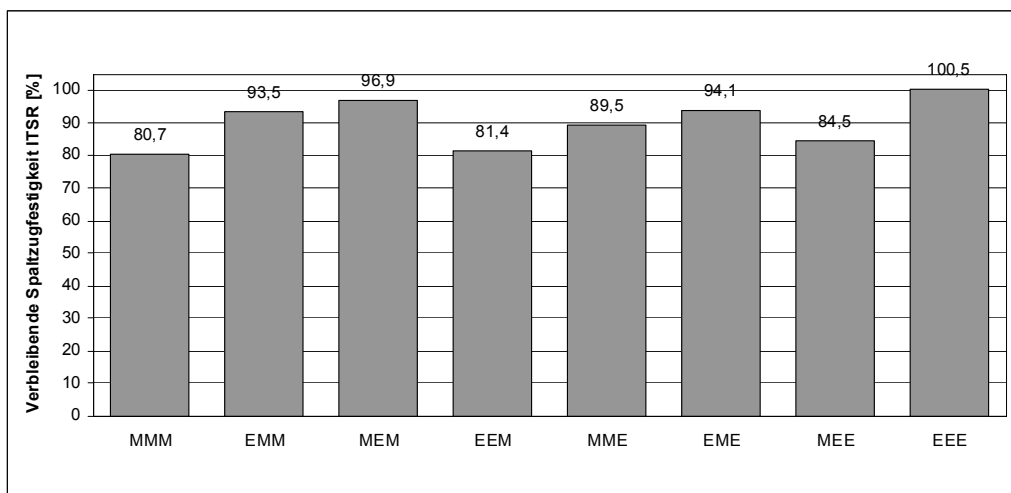
**Bild 29: ITS-Einzelwerte der untersuchten Asphaltvarianten**

Deutlich ist ein Unterschied zwischen den absoluten Größen der Einzel- und Mittelwerte der indirekten Zugfestigkeit der beiden Referenzasphalte EEE und MMM im trockenen Zustand zu erkennen (Bild 29 bzw. 30; zahlenmäßig in Tab. 3, Anlage 2).



**Bild 30: ITS-Mittelwerte der untersuchten Asphaltvarianten**

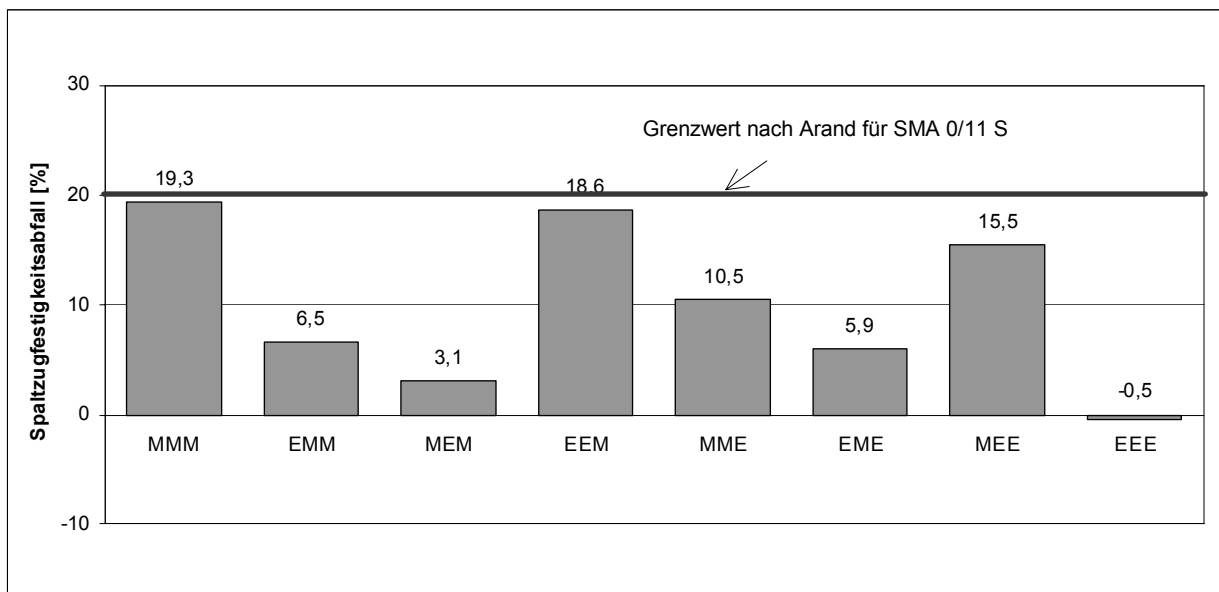
Die indirekte Zugfestigkeit der Asphaltvariante MMM ohne Wasserlagerung liegt höher als die der Asphaltvariante EEE. Nach Wasserlagerung liegt die indirekte Zugfestigkeit der Variante EEE demgegenüber höher als bei der Variante MMM. Die Modifikationsvarianten ordnen sich im Wesentlichen zwischen beiden Referenzasphalten ein. Die berechneten, verbleibenden Spaltzugfestigkeiten der wassergesättigten Proben im Verhältnis zu denen der trockenen Probekörper (ITSR) sind in Bild 31 zusammengefasst angegeben.



**Bild 31: Verbleibende Spaltzugfestigkeiten ITSR**

## 4.2 Ergebnisinterpretation

Um einen Vergleich mit dem maximal zulässigen Grenzwert des Spaltzugfestigkeitsabfalls nach dem Bewertungshintergrund von Arand zu ermöglichen, wurde der Spaltzugfestigkeitsabfall mit der in Kapitel 2.3.1 angegebenen Formel berechnet (Bild 32). Der Spaltzugfestigkeitsabfall aller untersuchten Asphaltvarianten liegt unter dem Grenzwert für Splittmastixasphalt von 20 % und ordnet sich unsystematisch zwischen beiden Referenzasphalten ein.

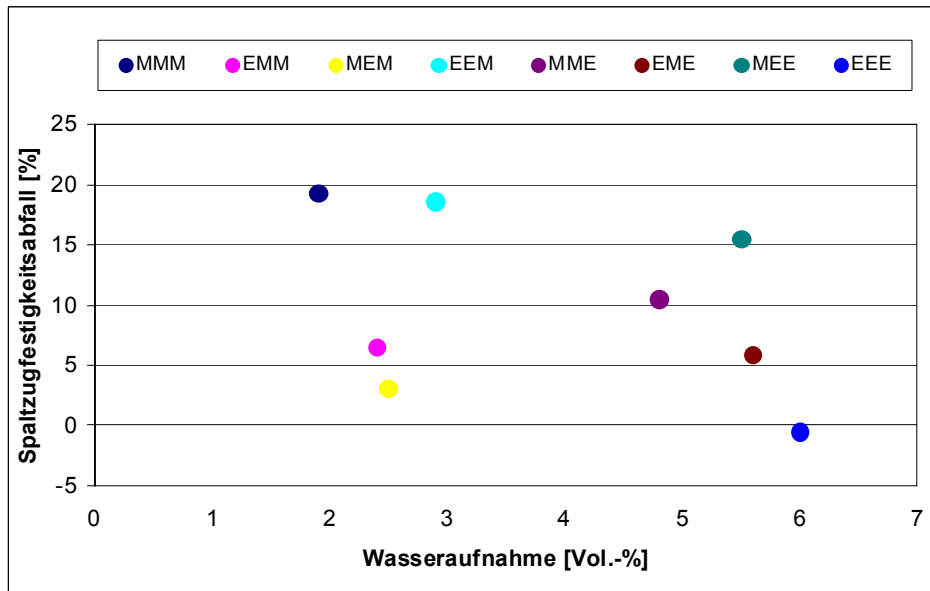


**Bild 32: Spaltzugfestigkeitsabfall der untersuchten Asphaltvarianten**

Die hier verwendete Asphaltvariante mit Splitten ausschließlich aus Moräne (1. Referenzasphalt) verhält sich im Vergleich zu denen von Arand ähnlich, wobei bei einem Hohlraumgehalt von < 4 Vol.-% die von Arand untersuchten Splittmastixasphalte mit Moräne lediglich einen Spaltzugfestigkeitsabfall von unter 10 % (Bild 13, Kapitel 2.3.1) aufweisen.

Bei der Variante EEE (2. Referenzasphalt) ist eine Spaltzugfestigkeitszunahme um 0,5 % festzustellen. Ein solches Phänomen erklärt Arand - wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben - durch die Mobilisation von zusätzlichen Kräften zu Verdrängung des in den kleinen Hohlräumen eingedrungenen Wassers aus den Hohlräumen. Tatsächlich weist die EOS eine poröse Struktur auf, die einen hohen absoluten Hohlraumgehalt bzw. eine hohe Wasseraufnahme von 6 Vol.-% (Bild 33) aufweist. Diese sind jedoch im Vergleich zu konventionellen Asphalten in eine Vielzahl von kleinen Hohlräumen

aufgeteilt. Die Gefahr, dass dadurch eine verfälschte Wasserunempfindlichkeit ermittelt wird, ist nicht gegeben, da die Spaltzugfestigkeit der trockenen Proben im Vergleich zu den wassergesättigten Proben nur geringfügig unterschritten wird. Ein Zusammenhang zwischen dem Spaltzugfestigkeitsabfall und der Wasseraufnahme konnte nicht festgestellt werden.



**Bild 33: Spaltzugfestigkeitsabfall in Abhängigkeit der Wasseraufnahme**

Die Spaltzugfestigkeit der Variante MMM im trockenen Zustand liegt zwar im Vergleich zu der Variante EEE deutlich höher, nach SCHELLENBERGER (2000) ist jedoch eine Beurteilung ausschließlich auf Basis der Spaltzugfestigkeit abzulehnen, da die EOS hohlraumreicher ist als die Moräne und Hohlräume selbstverständlich keine Spannungen übertragen können. Erheblich ist allerdings der größere Spaltzugfestigkeitsabfall der Variante MMM. Hier liefert die visuelle Beurteilung der Bruchflächen Erklärungsansätze (Bild 28, Kapitel 4.1): Während bei der Variante EEE der Anteil der gebrochenen Gesteinskörner - welcher höher als bei der Variante MMM liegt - mit und ohne Wasserlagerung in der gleichen Größenordnung liegt, ist der Anteil der gebrochenen Gesteinskörner bei der Variante MMM mit Wasserlagerung im Vergleich ohne Wasserlagerung geringer. Dies ist vermutlich auf die geringere Haftfestigkeit nach Wasserlagerung zurückzuführen, da das Verhältnis der abgelösten Gesteinskörner zu den Abgebrochenen größer ist.

Eine Abgrenzung von Asphaltvarianten im Vorfeld der Optimierung ist auf Basis der Wasserempfindlichkeit nicht erforderlich, da die Wasserunempfindlichkeit durch Zu-

gabe von EOS tendenziell, aber in unterschiedlichem Maße verbessert wird. Die Verbesserung der Wasserunempfindlichkeit kann auf die Eigenschaften der EOS - Oberflächenrauigkeit, Porosität sowie chemische und mineralogische Zusammensetzung - zurückgeführt werden. Die Haftfestigkeit wird durch die rauen und porösen EOS-Gesteinskörnungen, wie in Kapitel 2.2.2 detailliert beschrieben, positiv beeinflusst. Ein Chemismus zwischen den EOS-Gesteinskörnungen und der Asphaltmastix aufgrund der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der EOS ist möglich, wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht explizit untersucht.

## **5 Untersuchungen zum Verformungswiderstand**

### **5.1 Vorgehensweise**

Der Verformungswiderstand der Asphaltvarianten wurde anhand der Ergebnisse von Druckschwellversuchen, welche nach der in Kapitel 2.2.1 beschriebenen Vorgehensweise erfolgte, beurteilt. Die Versuche wurden einerseits bei der nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) vorgegebenen Prüftemperatur von 50 °C (Ergebnisse siehe Kapitel 5.3) sowie zur Beurteilung der Temperaturempfindlichkeit (Kapitel 5.4) zusätzlich bei 40 bzw. 60 °C durchgeführt. Die Auswertung erfolgte „simultan“ und „mathematisch“ (Kapitel 2.2.1).

Die aufgezeichneten Impulskriechkurven sind für jede Asphaltvariante und für sämtliche Prüftemperaturen in den Bildern 1 bis 15 der Anlage 3 dargestellt; die Ergebnisse der simultanen Auswertung sind jeweils nach Prüftemperaturen zusammengefasst, in den Tabellen 1 bis 3 der Anlage 3 angegeben.

### **5.2 Vergleich verschiedener Auswerteverfahren und Festlegung**

Die "mathematische" Auswertung erfolgte zusätzlich zur "simultanen" Auswertung, da die Messeinrichtung ca. 70 % der 10.000 Lastwechsel erfasst und dies zu Unschärfen bei der simultanen Auswertung führen kann. Die Anpassung der Regressionsfunktion wies in allen Fällen ein Bestimmtheitsmaß von über 98 % auf (Tab. 4 bis 11, Anlage 3). Mit den Bildern 1 bis 16 der Anlage 3 können die mit den jeweiligen Regressionen errechneten Impulskriechkurven mit den gemessenen Impulskriechkurven verglichen werden; damit bestätigt sich die gute Anpassung.

Durch den zahlenmäßigen Vergleich der in diesen Bildern ausgewiesenen Dehnungen wurden Unterschiede von maximal  $\pm 0,1$  % festgestellt. Dabei handelt es sich - hilfsweise für den Vergleich der beiden Auswertemethoden - um die Dehnung, die bei der Lastimpulsanzahl des Wendepunktes der simultanen Auswertung berechnet bzw. abgelesen wurde (bzw. sofern dort kein Wendepunkt ermittelt werden konnte, am Versuchsende  $n = 10.000$ ).

Im Rahmen der mathematischen Auswertungen wurden durch Ableitung der Regressionsfunktion die Wendepunkte berechnet, die sich prinzipiell von den Wendepunkten der simultanen unterscheiden können. Die diesbezüglichen Lastimpulsanzahlen

sowie die mathematisch berechneten Dehnungsraten sind in den Bildern 17 bis 24 der Anlage 3 grafisch dargestellt und zahlenmäßig angegeben. Für die durch die mathematische Auswertung ermittelten Lastimpulsanzahlen wurden die Dehnungen an diesen Stellen berechnet und in den Tabellen 12 bis 14 (Anlage 3) angegeben.

Die Zusammenstellung der Merkmalsgrößen der mathematischen Auswertung wurde analog zur Darstellung der Ergebnisse der simultanen Auswertung - unterteilt nach Prüftemperatur - vorgenommen, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Beim Vergleich der Mittelwerte beider Verfahren (Bild 34) wurde Folgendes festgestellt:

- Bei der Prüftemperatur von 40 °C sind die Unterschiede der Dehnungen beider Verfahren kleiner als 0,1 ‰, wobei die "mathematisch" berechneten Dehnungen im Allgemeinen niedriger liegen. Die Unterschiede bei den Mittelwerte der Dehnungsraten sind kleiner als 0,2 ‰/10.000n. Keine der Varianten weist einen Wendepunkt auf.
- Bei der Prüftemperatur von 50 °C bewegen sich die Unterschiede der Dehnungen mit beiden Verfahren nahezu in allen Fällen, außer bei Variante MMM, um  $\pm 0,3$  ‰. Die "mathematisch" berechnete Dehnung liegt bei MMM mit 1,1 ‰ niedriger. Die Unterschiede der Dehnungsraten sind jedoch in allen Fällen kleiner als 0,2 ‰/10.000n. Bei der simultanen Auswertung konnten keine Wendepunkte festgestellt werden. Im Gegensatz dazu waren mit der "mathematischen" Auswertung bei fast allen Varianten (außer EEE, EME und MEE) Wendepunkte feststellbar.
- Die Unterschiede in den Dehnungen sind bei der Prüftemperatur 60 °C - wie bei 50 °C - kleiner 0,3 ‰, mit einer Ausnahme bei der Variante MEE mit 1,0 ‰. Die Varianten EEE und EME weisen bei beiden Verfahren keine Wendepunkte auf (auch dies wie bei 50 °C). Die Variante MEE weist bei der simultanen Auswertung in einem Fall einen Wendepunkt aus, bei der mathematischen Auswertung in zwei Fällen. Die Unterschiede der Dehnungsraten mit beiden Verfahren liegen unter 0,3 ‰/10.000n.

Beim dynamischen Druckschwellversuch stellt ausschließlich die Dehnungsrate das Beurteilungskriterium dar. Die hier mit beiden Auswerteverfahren ermittelten Dehnungsraten unterscheiden sich nur geringfügig um 0,2 bis 0,3 ‰/10.000n und können beide für die Beurteilung herangezogen werden (Bild 34). Für die vergleichende Beurteilung des Verformungswiderstandes der untersuchten Asphaltvarianten in die-



ser Arbeit wurden die mathematisch ermittelten Merkmalsgrößen (Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl) ausgewählt, da bei 50 und 60 °C eine bessere Differenzierung anhand der damit ermittelten Wendepunkte möglich ist.

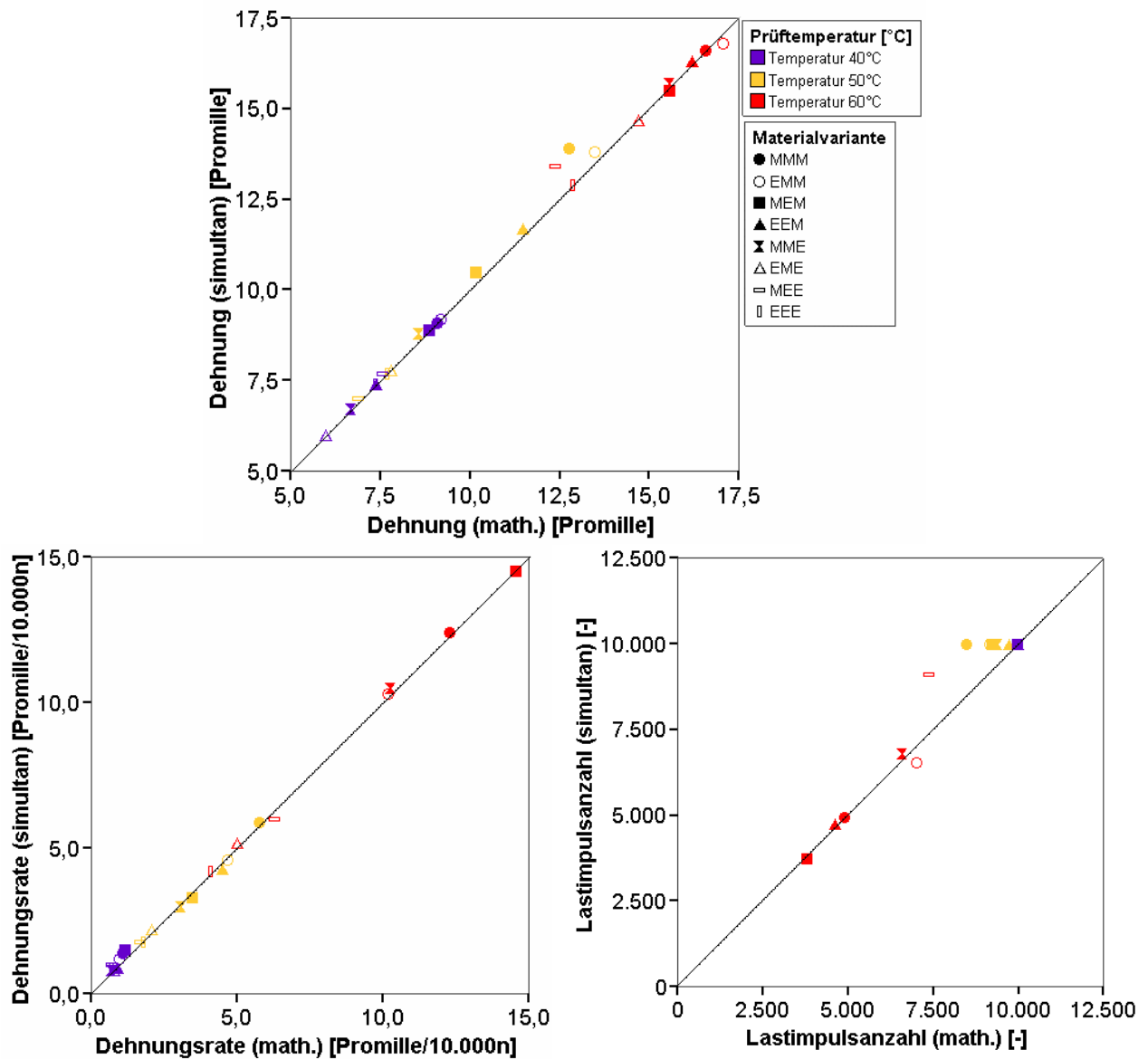


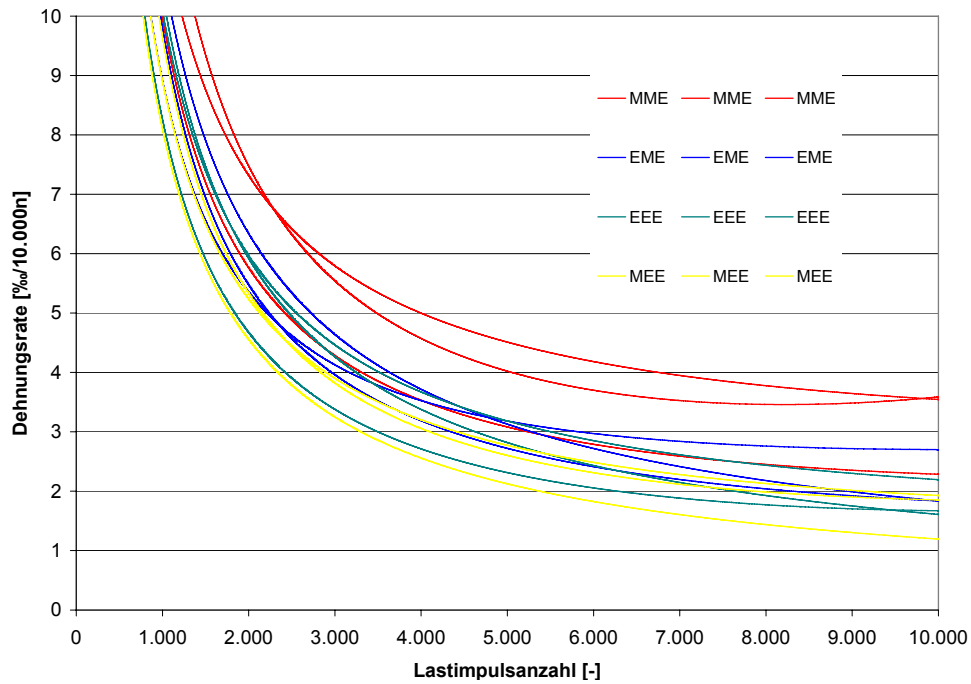
Bild 34: Gegenüberstellung der Ergebnisse der "simultanen" und "mathematischen" Auswertung der DSV

### 5.3 Einfluss der Modifikation auf den Verformungswiderstand

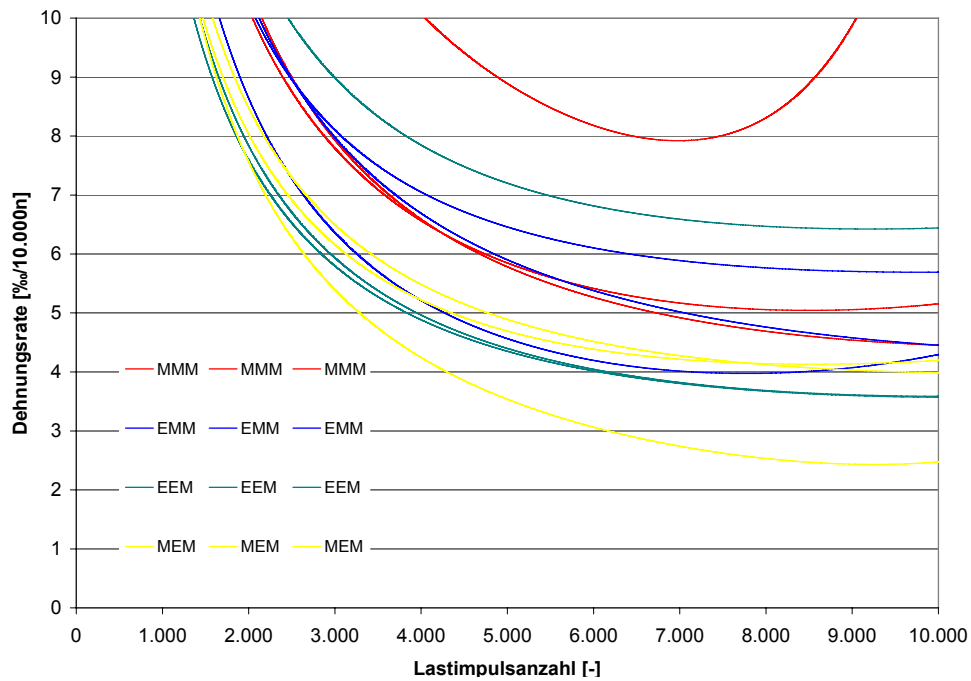
Bei den untersuchten Asphaltvarianten wurden gleiche Volumenanteile der einzelnen Komponenten angestrebt, um den Einfluss der Gesteinsart und -kornklasse auf den Verformungswiderstand herausarbeiten zu können. Hierfür wurden zunächst ausschließlich die Ergebnisse der Druckschwellversuche herangezogen, welche bei der

nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) empfohlenen Prüftemperatur von 50 °C gewonnen wurden.

Mit Bild 35 werden die Verläufe der Dehnungsraten sämtlicher Asphaltvarianten dargestellt, bereits klassiert nach der Gesteinsart in der Kornklasse 8/11 mm. Damit ist ersichtlich, dass sich unterschiedliche Charakteristiken ergeben:



(a)



(b)

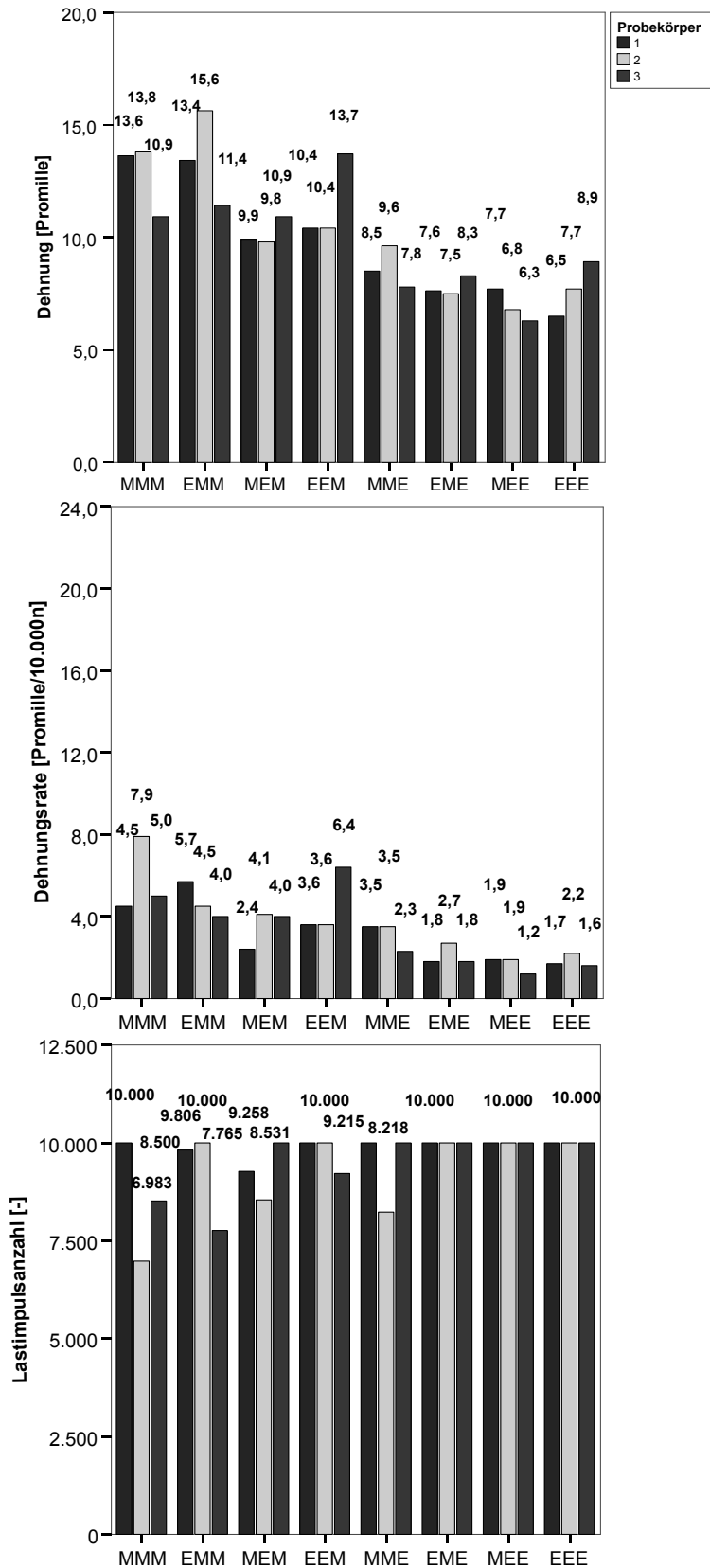
**Bild 35: Verläufe der Dehnungsraten beim DSV bei 50 °C - Gesteinskörnung in der Kornklasse 8/11 mm: (a) EOS, (b) Moräne**

Im Rahmen einer Überprüfung dieser Ergebnisse auf statistische Ausreißer nach FGSV (2003) mit der von KARCHER (2005) ausgewiesenen Standardabweichung  $\sigma_A$  bei drei Einzelwerten von 0,23 Promille/10.000n für logarithmisierte Dehnungsraten im Versuch bei 50 °C und einem Signifikanzniveau von 5 % konnten keine Ausreißer festgestellt werden. Die von ihm ausgewiesenen kritischen Spannweiten wurden ebenso eingehalten (siehe Tab. 15 der Anlage 3).

Bei den Varianten mit EOS (Bild 35a) in der Kornklasse 8/11 mm stellen sich i. Allg. keine Minima bis Versuchsende ein, bei den Varianten mit Moräne (Bild 35b) hingegen in der Mehrzahl schon. Diese Minima zeigen den Übergang von der Verfestigungs- in die Versagensphase an (Minimum der Verformungsgeschwindigkeit) und entsprechen den Wendepunkten bei den Verformungskurven. Sofern die Verformungskurve bis 10.000 Belastungen keinen Wendepunkt aufweist, bedeutet dies, dass die Kurve der Dehnungsrate theoretisch bei einem Versuch mit mehr als 10.000 Belastungen einen (noch) niedrigeren Wert erreichen kann als den dann ermittelten Wert bei 10.000 Belastungen. Der undifferenzierte Vergleich von Dehnungsraten, die bei Wendepunkten abgelesen werden, mit Dehnungsraten, welche am Versuchsende auftreten, ermöglicht somit nur qualitative Einstufungen, da sich die "Varianten ohne Wendepunkt" (hier mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm) ansonsten noch deutlicher abgrenzen würden.

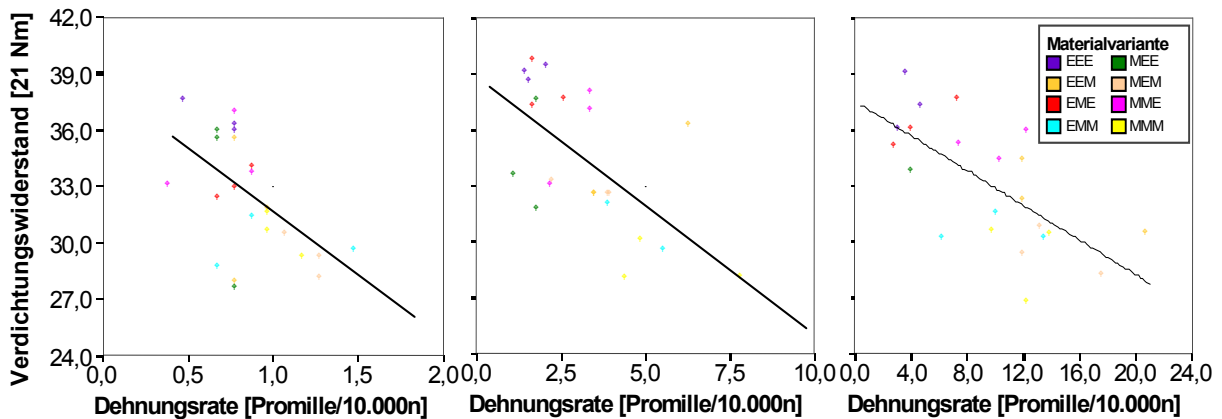
Alle Asphaltvarianten führen zu Dehnungsraten kleiner als 8 ‰/10.000n, so dass entsprechend dem Bewertungshintergrund von ROOS et al. (2003) alle der höchsten Kategorie 1 (Bauklasse SV/I; für besondere Beanspruchung geeignet) für Nutzungsdauern von mindestens 10 Jahren (< 9 ‰/10.000n) zuzuordnen sind. Die Asphaltvarianten mit Moräne in der Kornklasse 8/11 mm führen im Mittel allerdings zu vergleichsweise höheren Dehnungsraten (Bild 35b) als die Varianten mit EOS in dieser Kornklasse (Bild 35a). Im Mittel sind alle Varianten außer MMM nach ROOS et al. (2003) auch für Nutzungsdauern von mindestens 20 Jahren (< 5 ‰/10.000n) geeignet; bei den Variationen mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm sind alle für eine Nutzungsdauer von 20 Jahren geeignet.

Sämtliche Merkmalsgrößen (Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl) der Druckschwellversuche bei 50 °C deuten eine tendenzielle Verbesserung des Verformungswiderstandes mit einem zunehmenden Anteil EOS an (Bild 36).



**Bild 36: Dehnungen, Dehnungsraten und Lastimpulsanzahlen der DSV bei 50 °C in Bezug zur Asphaltvariante**

In Kapitel 3.3 wurde eine tendenzielle Erhöhung des Verdichtungswiderstandes  $D$  mit zunehmendem Anteil an EOS festgestellt (vgl. Bild 27). Laut Literatur lässt eine erschwerte Verdichtung auf einen erhöhten Verformungswiderstand schließen (Kapitel 2.3.2). In Bild 37 sind die ermittelten Verdichtungswiderstandswerte an den Probekörpern, an welchen die Druckschwellversuche durchgeführt wurden, den berechneten Dehnungsraten bei der jeweiligen Prüftemperatur gegenübergestellt.



links: Prüftemperatur 40 °C; Mitte: Prüftemperatur 50 °C; rechts: Prüftemperatur 60 °C

**Bild 37: Zusammenhänge zwischen Verdichtungswiderstand  $D$  und Dehnungsraten**

Es lässt sich ein (schwacher) Zusammenhang bei allen drei Prüftemperaturen des Verformungswiderstandes feststellen, der die oben angesprochene Hypothese prinzipiell bestätigt. Daraus lässt sich folgern, dass bei den Asphaltvarianten mit höherem EOS-Anteil beim Einbau eine höhere Verdichtungsarbeit zu leisten ist. Des Weiteren wird somit durch die Bestimmung des Verdichtungswiderstandes bei der Probekörperherstellung bereits im relativen Vergleich eine erste Einschätzung zum Verformungswiderstand ermöglicht.

#### 5.4 Temperaturempfindlichkeit der Asphaltvarianten

Im folgenden Kapitel werden die Mittelwerte der Dehnungsraten von "konventionellen" Druckschwellversuchen (Prüftemperaturen von 50 °C) mit denen, die bei Prüftemperaturen von 40 und 60 °C ermittelt wurden, verglichen, um die Temperaturabhängigkeit hinsichtlich des Verformungswiderstandes zu erfassen.

Bei einer detaillierten Betrachtung der einzelnen Impulskriechkurven dieser drei Temperaturen (Bilder 2 bis 16, Anlage 3) ist festzustellen, dass die Einzelkurven einer Temperatur vergleichsweise ähnlich verlaufen und sich zu den Einzelkurven der anderen zwei Temperaturen abgrenzen. Lediglich die Kurven der Varianten MEE und

EEE weichen davon ab, da sich die Einzelkurven bei 40 und 50 °C überschneiden. Die zugehörigen Kurven der Dehnungsraten bilden im Gegensatz hierzu (Bilder 17 bis 24, Anlage 3) bei allen Varianten temperaturabhängige Bereiche im Wesentlichen ohne Überschneidung.

	Dehnungsrate in ‰/10.000n, Mittelwert			Differenz der Dehnungsrate in ‰/10.000n		
	40 °C	50 °C	60 °C	(50-40) °C	(60-50) °C	(60-40) °C
<b>EEE</b>	0,7	1,8	4,1	1,1	2,3	3,4
<b>MEE</b>	0,7	1,7	6,3	1,0	4,6	5,6
<b>EME</b>	0,8	2,1	5,0	1,3	2,9	4,2
<b>MME</b>	0,7	3,1	10,3	2,4	7,2	9,6
<b>EEM</b>	0,9	4,5	15,1	3,6	10,6	14,2
<b>MEM</b>	1,2	3,5	14,6	2,3	11,1	13,4
<b>EMM</b>	1,0	4,7	10,2	3,7	5,5	9,2
<b>MMM</b>	1,1	5,8	12,3	4,7	6,5	11,2

**Tab. 12: Temperaturbedingter Zuwachs der Verformungsgeschwindigkeit**

Die beiden Asphaltvarianten EME und EEE weisen bei keiner der drei Prüftemperaturen Wendepunkte auf (Bilder 22 und 24, Anlage 3). Bei einem Anstieg der Temperatur um 10 K erhöht sich die Verformungsgeschwindigkeit um 1,1 bzw. 1,3 ‰/10.000n und bei einer Temperaturzunahme von 20 K erhöht sich die Verformungsrate um 3,4 bzw. 4,2 ‰/10.000n (Tab. 12).

Das Verhalten der beiden Varianten MME und MEE (Bilder 21 und 23 der Anlage 3) ist bei einem Anstieg von 10 K ähnlich wie bei den Varianten EME und EEE. Bei einem Anstieg um 20 K wird jedoch ein "Versagen" - Auftreten eines Wendepunktes - bei einer Lastimpulsanzahl von über 5.000 beobachtet.

Eine große Temperaturempfindlichkeit wurde bei den Varianten MEM und EEM (Bilder 19 und 20, Anlage 3) beobachtet, bei welchen die Verformungsgeschwindigkeiten bei einem Anstieg um 20 K mit Zunahmen von 13,4 bzw. 14,2 ‰/10.000n ihre höchsten Werte erreichen und vergleichsweise frühes "Versagen" (bei n im Bereich von 3.500 bis 5.500 Lastwechseln) aufzeigen.

Bei den Varianten MMM und EMM (Bilder 17 und 18, Anlage 3) wurden bei einer Temperaturerhöhung von 40 auf 50 °C die größte Steigerung der Dehnungsraten von 4,7 bzw. 3,7 mit Wendepunkten ab 6.900 festgestellt. Bei der Erhöhung von 50 auf 60 °C sind die Zuwächse der Verformungsgeschwindigkeiten geringer als bei den Varianten MEM und EEM. Die Wendepunkte liegen in Bereichen von  $n$  zwischen 4.000 und 9.700.

Kurzgefasst ergibt sich, dass die Varianten EEE, MEE und EME bei allen drei Temperatursteigerungen die geringste Temperaturempfindlichkeit zeigen. Die Varianten EEM und MEM führen bei einem Temperaturanstieg von 40 auf 60 °C zur vergleichsweise höchsten Temperaturempfindlichkeit. Das Verhalten der Varianten EMM, MME und MMM reiht sich bezüglich der Temperaturempfindlichkeit zwischen diesen Varianten ein.

In Bild 38 sind die arithmetischen Mittelwerte der Merkmalsgrößen Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl zahlenmäßig angegeben. Die oben beschriebenen Tendenzen bestätigen sich demnach auch im Mittel.

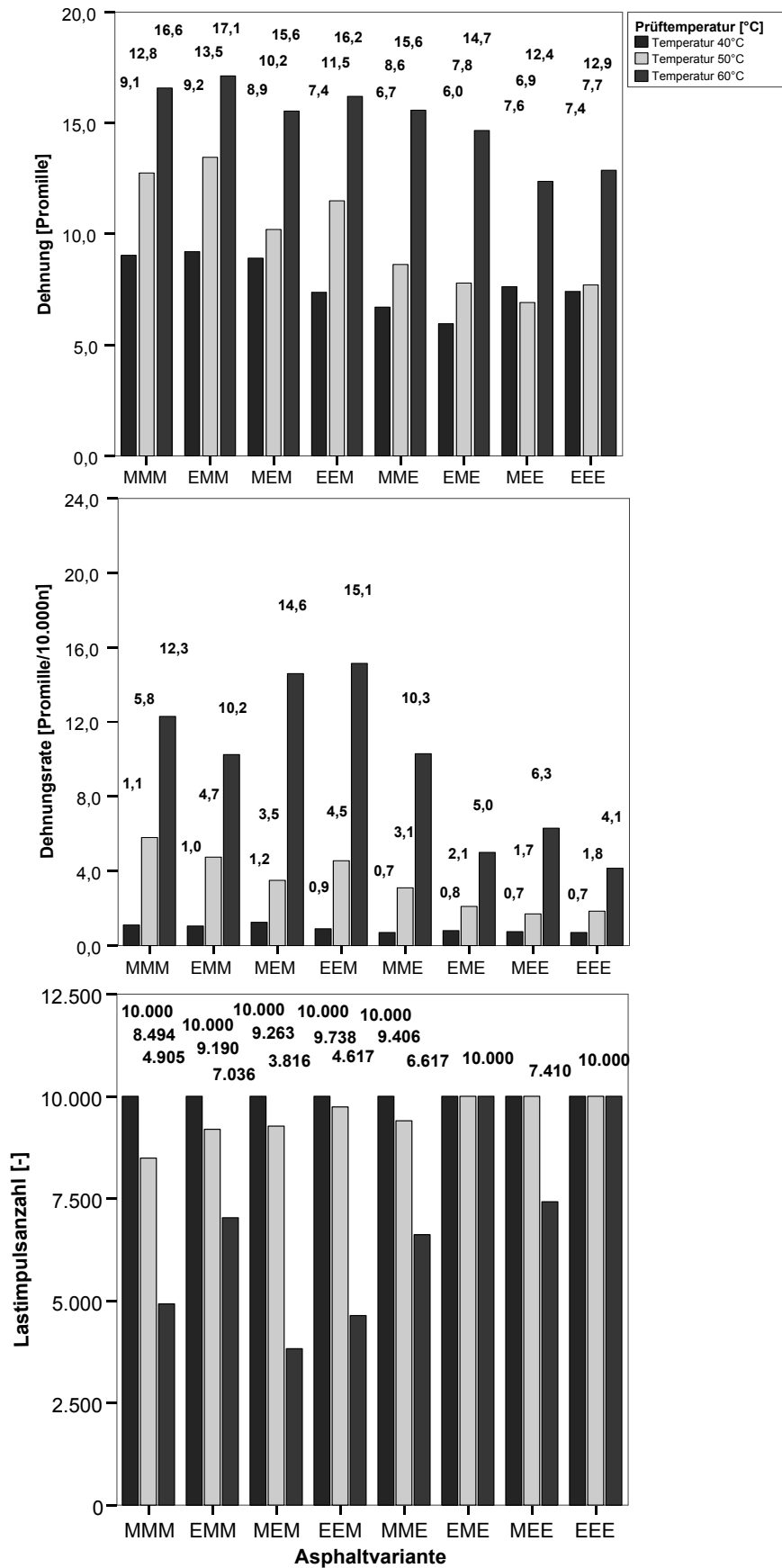


Bild 38: Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl (Mittelwert) beim DSV bei 40, 50 und 60 °C in Bezug zur Asphaltvariante



## 6 Überprüfung der Konsistenz des Temperaturverhaltens von Asphaltproben bei künstlicher Wärmebestrahlung

Ziel der künstlichen Wärmebestrahlung ist es, bei definierten Prüfbedingungen die Unterschiede im thermischen Verhalten (Wärmeabsorption und -leitung) der zu untersuchenden Asphaltvarianten durch die Erfassung ihrer Temperaturentwicklung während der Bestrahlung zu bestimmen, und diese für eine vergleichende Beurteilung des Verformungswiderstandes heranzuziehen. Dafür werden üblicherweise im Vergleich zu Praxisbedingungen höhere Bestrahlungsstärken über längere Bestrahlungsdauern angewendet, um das Erreichen bestimmter Temperaturniveaus zu beschleunigen.

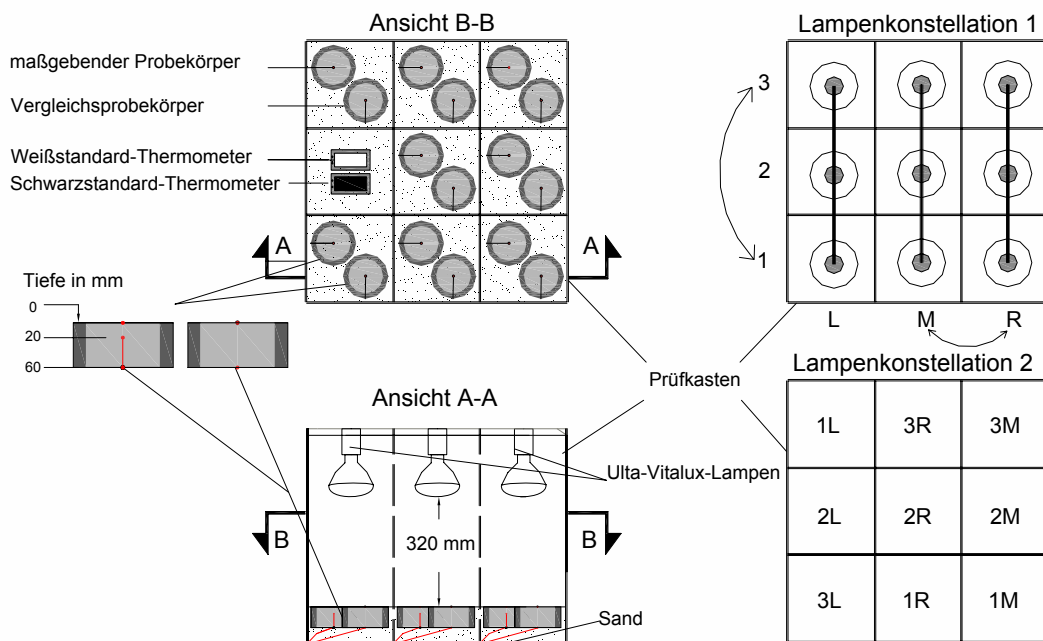
### 6.1 Modifizierte Sonnenlichtsimulationsanlage, Versuchsaufbau und Vorgehensweise

Das Prinzip der im Kapitel 2.4.3 beschriebenen Bestrahlungsanlage nach ROSSBERG (2000) wurde in Bezug auf die Lichtquellen und die Einbettung der Proben in Sand zur Lagerung auf einem Betonfußboden in einem dunklen Raum übernommen. In folgenden Punkten wurden aufgrund eigener Voruntersuchungen jedoch Änderungen vorgenommen und damit der Aufbau verbessert:

- Damit ein radialer Wärmeaustausch (Abkühlung oder Erwärmung) verhindert wird und um somit einen eindimensionalen Wärmefluss, wie dieser sich i. Allg. in der Fahrbahn einstellt, von der Oberfläche durch den Probekörper in den Sand bzw. Betonfußboden sicherzustellen, wurden statt rechteckiger Probekörper Marshall-Probekörper bestrahlt, welche mit Schaumstoff an den Mantelflächen isoliert waren. Dieser eindimensionale Wärmefluss wurde durch Bestrahlung der im Sand eingebetteten Probekörper mit drei Sensoren in der Tiefe von 20 mm (zwei diametral an der Mantelfläche und einer mittig im Probekörper) geprüft. Es zeigte sich, dass die gemessenen Temperaturen in der Tiefe von 20 mm erst nach **Isolierung der Mantelflächen** annähernd gleich waren.
- Die Probekörper wurden für die Bestrahlungsversuche auf der Oberseite bis auf eine einheitliche Höhe von 60 mm geschliffen, damit bei der Bestrahlung der Einfluss der Aufhellung durch die Kombination mit Moräne auf die Temperaturentwicklung ermittelt werden konnte (Bild 50). Das **Schleifen** erzeugt im Gegensatz

zur Praxis eine glatte Oberfläche, weshalb nur eingeschränkte Aussagen zur Auswirkung des Reflexionsgrades der Gesteinsoberflächen an der Straßenoberfläche nach Abrieb des Bitumenfilms unter Verkehr möglich sind. Die Probekörper wurden auf eine gut verdichtete Schicht aus Sand mit einer Dicke von 40 mm positioniert, so dass alle Proben in einer Ebene lagen und einen Abstand von 320 mm zu den Unterseiten der Lampen aufwiesen.

- Trotz der vom Hersteller der Ultra-Vitalux-Lampen garantierten Homogenität der Bestrahlungsstärke war in den "Überschneidungsbereichen" der Strahlung eine viel höhere Strahlungsstärke festzustellen. Die Homogenisierung der Bestrahlungsstärke durch eine kreisförmige Anordnung der Lampen war erschwert, da die Lampen bereits an drei Leisten mit je drei Lampen fixiert waren. Zur Sicherstellung nahezu **gleicher Bestrahlungsstärken** auf allen Probekörpern wurde ein Prüfkasten mit 9 Zellen angefertigt (Bild 39). In jeder Zelle befand sich danach eine Lampe, die zwei isolierte Probekörper gleicher Zusammensetzung - ein Probekörper mit drei Messfühlern als „maßgeblicher Probekörper“ und ein „Vergleichsprobekörper“ mit nur zwei Messfühlern aufgrund einer begrenzten Anzahl an verfügbaren Steckplätzen am Daten-Logger - bestrahlte.



**Bild 39: Modifizierte Versuchseinrichtung mit Ultra-Vitalux-Lampen und Asphaltproben in Sandbettung**

Die modifizierte Prüfeinrichtung und die Anordnung der Lampen sind schematisch in Bild 39 dargestellt. Im Einzelnen ist Folgendes anzumerken:

In dieser Arbeit wurden zur Erfassung der Temperaturen Temperaturmessfühler Pt 1.000 (Platin-Widerstandsthermometer) verwendet, deren elektrischer Widerstand eine Funktion der Temperatur ist. Der Messbereich der Messfühler erstreckt sich von -200 bis 850 °C.

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur wurden die Messfühler auf der geschliffenen Oberfläche der Probekörper mit wärmeleitender Paste und transparentem Klebeband mittig befestigt. Da die Widerstandsthermometer auf der künstlich besonnten Fläche lagen, wurde dieser Teil der bedeckten Oberfläche nicht bestrahlt. Dieser Anteil kann aber im Verhältnis zur gesamten Strahlung auf den Probekörper als vernachlässigbar angesehen werden. Durch die Strahlung bedingte Eigenerwärmung dieser Widerstandsthermometer wird möglicherweise der letztendlich ausgewiesene Wert der Oberflächentemperatur beeinflusst. Angesichts der Tatsache, dass alle Temperaturmessfühler an der Oberfläche der Probekörper der Strahlung einer Lampe ausgesetzt wurden, die erfasste Erwärmung vergleichend beurteilt und auch nicht unmittelbar in Bezug zur Praxis gesetzt wurde, kann dies als vernachlässigbar angesehen werden.

Die Probekörper wurden des Weiteren an der Unterseite mit Messfühlern bestückt (Tiefe 60 mm). In einem der beiden Probekörper wurde zusätzlich in 20 mm Tiefe durch eine Bohrung von der Unterseite ein weiterer Temperaturmessfühler eingebracht (Bild 39, links). In acht Zellen wurden die 8 Varianten bestrahlt, die 9. Zelle enthielt ein Schwarzstandard- und ein Weißstandard-Thermometer nach DIN EN ISO 4892-1 (2001) zur zeitgleichen Registrierung des Aufwärmungsunterschieds in Abhängigkeit der Farbe und zur vergleichenden Beurteilung des Einflusses der Helligkeit auf die Entwicklung der Oberflächentemperatur (Bild 39). Das Weißstandard-Thermometer wurde mit einer alterungsbeständigen Farbe lackiert. Nach einigen Bestrahlungsversuchen wurde diese trotzdem gelblich, was auf die - im Vergleich zum Tageslicht - intensivere ultraviolette Strahlung der Ultra-Vitalux-Lampen zurückgeführt werden kann. Dies mit der Konsequenz, dass das Weißstandard-Thermometer nicht mehr für einen Vergleich der Erwärmung von unterschiedlich hellen zu absolut weiß- bzw. schwarzgefärbten Oberflächen geeignet war. Weiterhin konnte Wärmestau in dem Weiß- und dem Schwarzstandard-Thermometer festgestellt werden, wo-

durch sich diese Thermometer für den oben genannten Vergleich als ungeeignet erwiesen. Für die Ermittlung des maximal möglichen Temperaturunterschieds bei einer definierte Strahlung zwischen Weiß- und Schwarzproben empfiehlt es sich zukünftig, schwarz- und weißgefärbte Asphaltprobekörper zu verwenden. Aus den genannten Gründen wurden die registrierten Temperaturen mit den Weiß-/Schwarzstandard Thermometern an dieser Stelle nicht weiter verfolgt.

Der Einfluss der Anfangstemperatur/(Luft-)Feuchtigkeit im Versuchsraum sowie im Probekörper wurde nicht berücksichtigt, da im Vorfeld der Bestrahlung und währenddessen die Probekörper aller untersuchten Asphaltvarianten zeitgleich in einem Versuchsstand gelagert bzw. geprüft wurden.

Bei den Bestrahlungsversuchen wurden die Temperaturen der Variationsasphalte und der Referenzasphalte ab Bestrahlungsbeginn im Sekundentakt über mehr als 3 Stunden registriert. Für die spätere vergleichende Beurteilung wurden stets die Temperaturzustände zu dem Zeitpunkt herangezogen, an dem die erste Variante an der Oberfläche das Temperaturniveau 60 bzw. 70 °C erreichte. Vorliegend war diese Variante generell der Referenzasphalt EEE. Die Temperaturentwicklung über die Zeit in den verschiedenen Tiefen der jeweiligen Asphaltvarianten ist exemplarisch in Bild 1, Anlage 4 dargestellt.

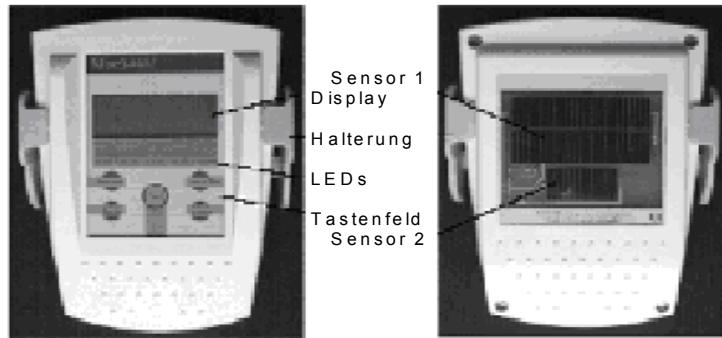
Bei der künstlichen Bestrahlung werden die Probekörper "zerstörungsfrei" thermisch beansprucht, ohne dass die Eigenschaften der Asphalte, die das thermische Verhalten bestimmen, sich ändern. Dies erlaubt eine mehrfache Bestimmung des thermischen Verhaltens unter Wiederholung der Bestrahlungsversuche an denselben Probekörpern. Somit wurde ein doppelter Satz Probekörper (maßgeblicher Probekörper und Vergleichsprobekörper) mehrfach bestrahlt, um eine Einschätzung zur Reproduzierbarkeit der Temperaturzustände vornehmen zu können.

Die Bestrahlung wurde mit zwei unterschiedlichen Lampenkonstellationen durchgeführt, d.h., dass die Anordnung der Lampen so gewechselt wurde, dass jeder Probekörper die Strahlung von zwei unterschiedlichen Lichtquellen erhielt, um mögliche Unterschiede durch etwaige unterschiedliche Bestrahlungsstärken der Lampen ggf. ermitteln zu können. Die Anordnung der Lampen ist ebenfalls in Bild 39 dargestellt.

Die Strahlung der Lampen wurde mit einem Bestrahlungsstärkemesser bei diesen zwei verschiedenen Lampenkonstellationen aufgenommen. Hierfür wurde ein Glo-

balstrahlungsmessgerät MacSolar SLM018c-3 verwendet, welches die Globalstrahlung über das Spektrum der Sonnenstrahlung innerhalb der Atmosphäre (AM 1,5) misst (Bild 40).

Die Messung der Lichtintensität erfolgt über monokristalline Siliziumsolarzellen, welche zusätzlich die Energieversorgung des Gerätes übernehmen. Das Gerät ermittelt bzw. berechnet mit einer hohen Genauigkeit neben der hier relevanten Lichtintensität



**Bild 40: Front- und Rückseite des MacSolar und Befestigungsbügel (Heindl Server GmbH)**

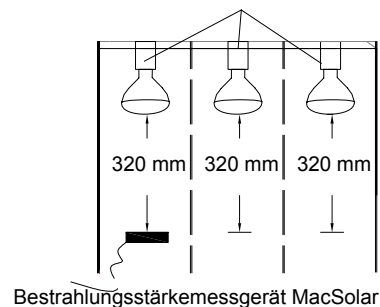
auch die Modultemperatur und Messdauer im Arbeitspunkt (Heindl Server GmbH). Die Lichtintensität ( $P_{tot}$ ) stellt die Lichtleistung in Watt pro  $m^2$  dar (ohne spektrale Bewertung). Die Siliziumsensoren sind auf ein bestimmtes Spektrum kalibriert und können demnach nur dieses korrekt messen. Entsprechend seinem Namen ist der MacSolar auf das Spektrum der Sonne kalibriert und eignet sich daher nur für Messungen von Tageslicht (natürlicher und künstlicher) Herkunft. Die Kalibrierung wird an einem Solarsimulator bei sogenannten "Standard Testbedingungen" durchgeführt: Die Kalibrierung erfolgt bei Solarspektrum in Luftmasse "AM 1,5" mit Bestrahlungsstärke =  $1.000 \text{ W/m}^2$  (bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), was in etwa direktem Sonnenlicht um die Mittagszeit von Frühling bis Herbst in Mitteleuropa entspricht (Heindl Server GmbH).

Um die Bestrahlungsstärke an der Oberfläche der untersuchten Probekörper zu ermitteln, musste gewährleistet werden, dass der Bestrahlungsstärkemesser den gleichen Abstand (320 mm) zur Unterseite der Lampen aufweist wie die Probekörper (Bild 41).

Anordnung der Asphaltvarianten in den Prüfszellen

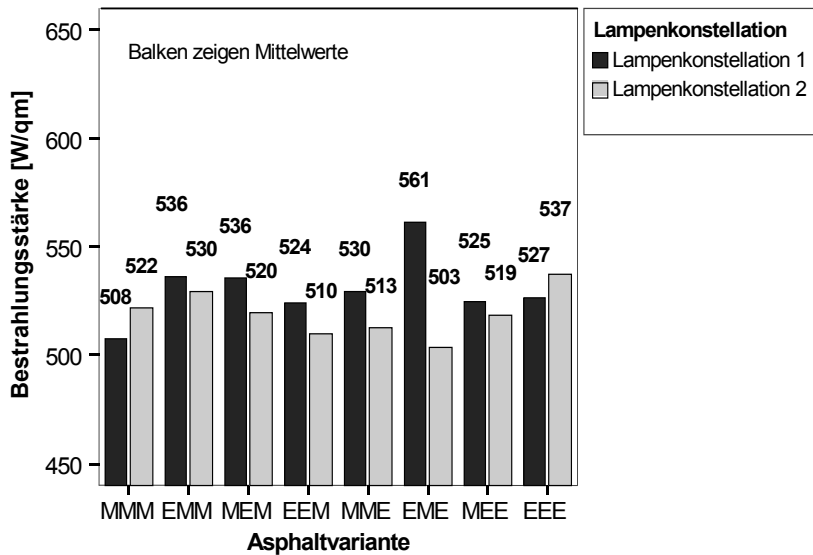
MMM	EME	EEE
	MEM	EMM
EEM	MEE	MME

Ultra-Vitalux-Lampen



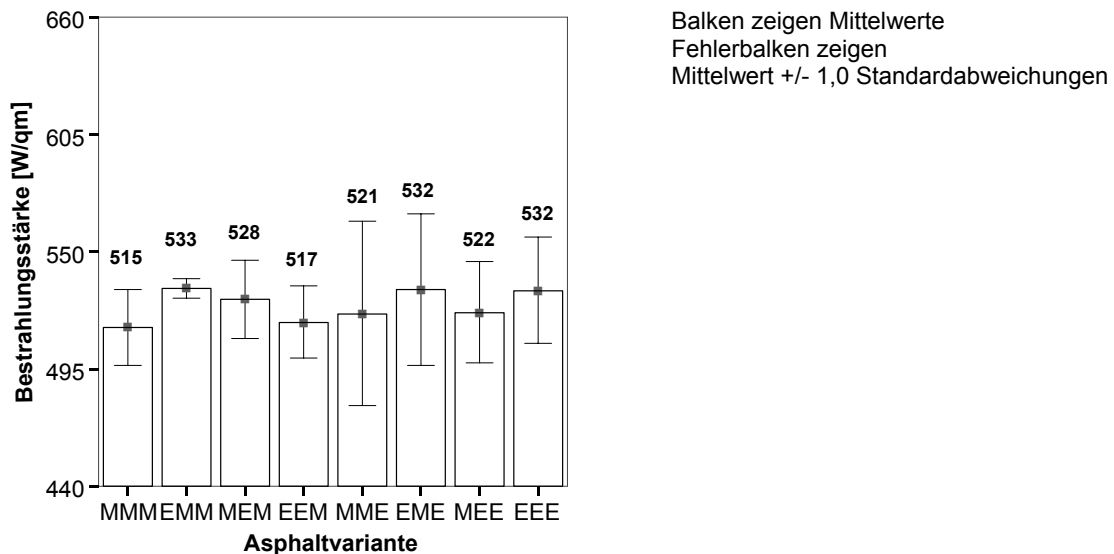
**Bild 41: Messung der Bestrahlungsstärken an den Positionen der jeweiligen Asphaltvarianten**

Auf diese Weise wurden die Bestrahlungsstärken in der Mitte von jeder Prüfzelle bei beiden Lampenkonstellationen dreifach gemessen. Ziel der wiederholten Messung war die Absicherung der Messwerte aufgrund der erschwerten Messung in der Mitte der Prüfzelle. Die diesbezüglichen arithmetischen Mittelwerte sind zahlenmäßig in Bild 42 sowie in Tabelle 1, Anlage 4 angegeben.



**Bild 42: Bestrahlungsstärken an den Positionen der jeweiligen Asphaltvarianten differenziert nach Lampenkonstellation**

Die Unterschiede in den Strahlungsintensitäten im Vergleich der Lampenkonstellationen 1 und 2 lagen bei nahezu allen Asphaltvarianten ausschließlich der Variante EME unter 20 W/m<sup>2</sup> (bezogen auf das Minimum von 503 W/m<sup>2</sup> ist dies weniger als 4 %). Bei der Variante EME ergab sich ein Unterschied von 58 W/m<sup>2</sup> (11,5 %).



**Bild 43: Mittlere Bestrahlungsstärken an den Positionen der Asphaltvarianten aus beiden Lampenkonstellationen**

Bild 43 zeigt die mittleren gemessenen Bestrahlungsstärken aus beiden Lampenkonstellationen an den Positionen der jeweiligen Asphaltvarianten sowie die Größe der jeweiligen Standardabweichung. Die arithmetischen Mittelwerte liegen in einer Bandbreite von  $20 \text{ W/m}^2$ . Demnach sind die Unterschiede als vernachlässigbar einzustufen. Die mittlere Bestrahlungsstärke aller Asphaltvarianten mit beiden Lampenkonstellationen liegt bei  $525 \text{ W/m}^2$ . Die Auswirkung der Bestrahlungsunterschiede auf die Temperaturentwicklung ist dem nachfolgenden Kapitel zu entnehmen.

## **6.2 Versuchsergebnisse und Interpretation**

Zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse wurden, wie detailliert in Kapitel 6.1 erläutert,

- gleichzeitig neben den maßgeblichen Probekörpern auch Vergleichsprobekörper bestrahlt, um eine Einschätzung zur Präzision der Messung vornehmen zu können, und
- die Bestrahlung mit zwei Lampenkonstellationen durchgeführt, damit die anschließende vergleichende Beurteilung der Asphaltvarianten von Unterschieden in den Bestrahlungsstärken unbeeinflusst blieb.

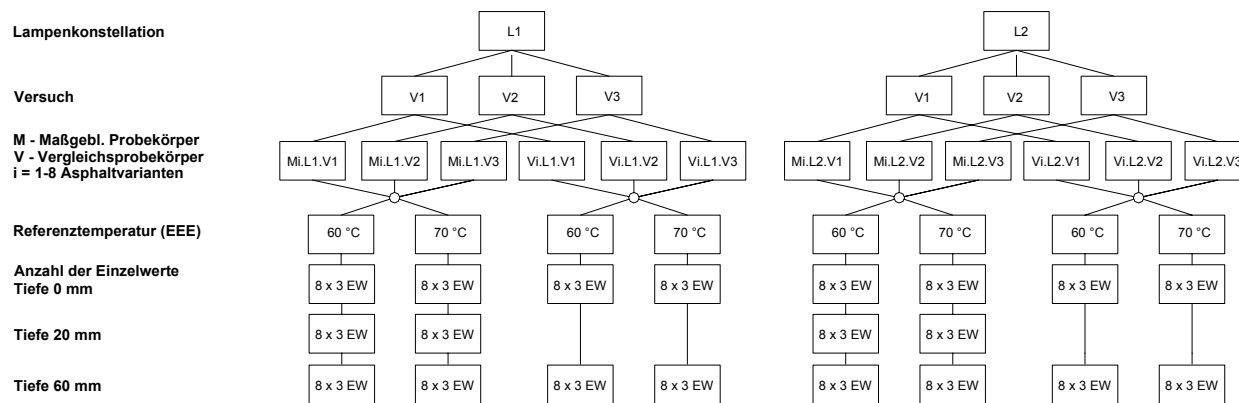
Die Asphaltvariante EEE stellt - wie bereits im vorherigen Kapitel 6.1 erläutert - bei dieser Untersuchung das Referenzmaterial dar, da das Erreichen bestimmter Temperaturen ( $60$  bzw.  $70 \text{ °C}$ ) an der Oberfläche der maßgeblichen Probekörper dieser Asphaltvariante als Kriterium für die Festlegung der Prüfdauer bei den Vergleichsvarianten während eines Versuches verwendet wird. Die Temperaturzustände sämtlicher Asphaltvarianten werden demnach bei dem Bestrahlungszeitpunkt angegeben, bei welchem die Oberflächentemperatur der Variante EEE ein festgelegtes Niveau ( $60$  bzw.  $70 \text{ °C}$ ) erreicht hat.

Die vollständigen Ergebnisse sind den Bildern 2 bis 4 der Anlage 4 und zahlenmäßig den Tabellen 2 bis 4 der Anlage 4 zu entnehmen.

### **6.2.1 Vergleich der Temperatureinzelwerte unter Wiederholbedingungen**

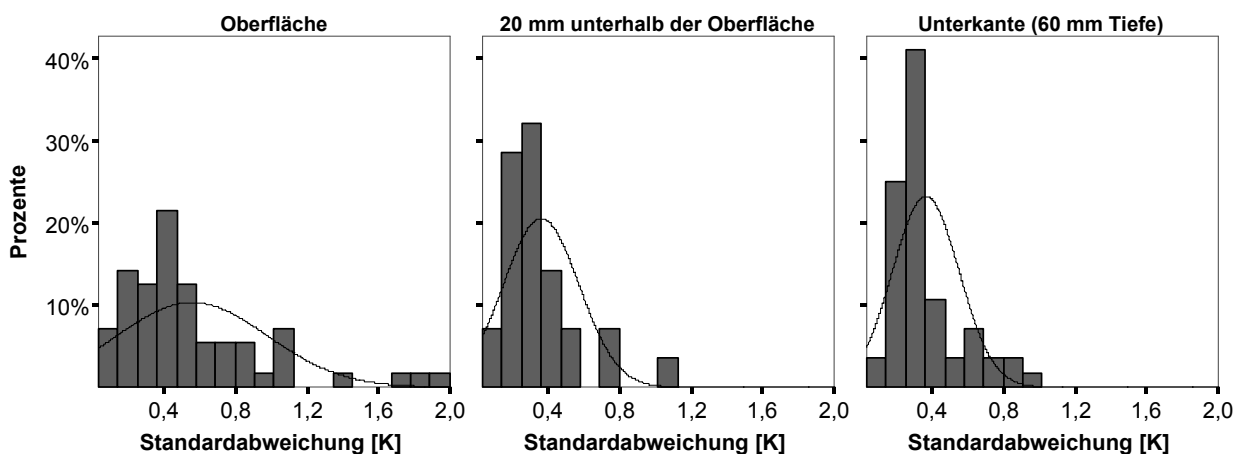
Die Einzelwerte ergeben sich durch die dreifache Wiederholung der Bestrahlung an drei unterschiedlichen Messterminen. Die sich einstellenden Temperaturniveaus wurden an denselben Proben mit jeweils konstanter Lampenkonstellation gewonnen.

In Bild 44 ist die Anzahl der Einzelwerte aller acht Asphaltvarianten für beide Lampenkonstellationen sowie für beide Referenztemperaturen angegeben. Diese Einzelwerte sind der Tab. 2 und 3 der Anlage 4 zu entnehmen.



EW: Einzelwerte

**Bild 44: Anzahl der erfassten Temperatur-Einzelwerte eines jeweiligen Probekörpers innerhalb einer Lampenkonstellation**



**Bild 45: Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen zu Bild 44**

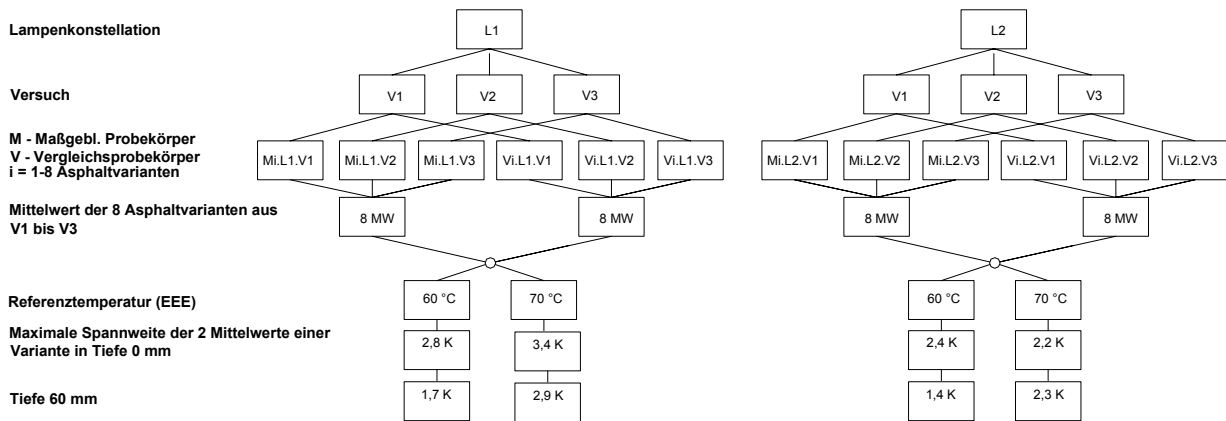
Die Standardabweichungen stellen sich normalverteilt dar (siehe Bild 45). Die Einzelwerte wurden auf Ausreißer nach FGSV (2003) bei einem Signifikanzniveau von 5 % und mit Standardabweichungen  $\sigma_A$  0,53 K (für die Oberflächentemperaturen), 0,33 K (für die Temperaturen in 20 Tiefe) und 0,37 K (in 60 mm Tiefe) geprüft. Die in den Tab. 2 und 3 der Anlage 4 ausgewiesenen Ausreißer wurden eliminiert, ebenso die Temperaturen an den übrigen Tiefen des jeweiligen Probekörpers und Versuchs. Diese wurden bei der Bestimmung der statistischen Basiskenngrößen (arith. Mittelwert, Standardabweichung) nicht berücksichtigt.



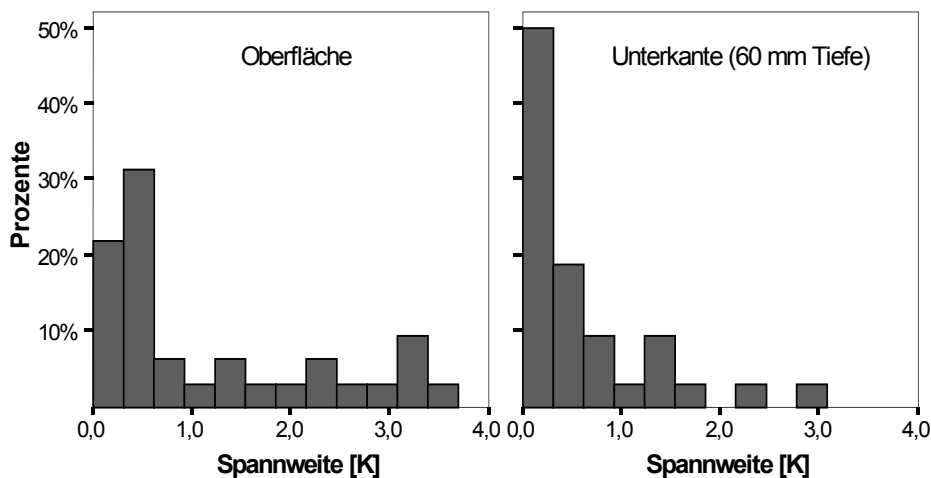
## 6.2.2 Vergleich der Temperaturmittelwerte zweier Probekörper unter Wiederholbedingungen

Mit den in Kapitel 6.2.1 gebildeten arithmetischen Mittelwerten wurden die maßgeblichen Probekörper mit denen des Vergleichsprobekörpers unter Wiederholbedingungen, wie in Bild 46 dargestellt, verglichen.

Die ermittelten maximalen Spannweiten aller Asphaltvarianten liegen bei beiden Lampenkonstellationen und Referenztemperaturen im Bereich bis zu 3,5 K (Bild 46). In Bild 47 sind die festgestellten Häufigkeiten der Spannweiten dargestellt. Die Unterschiede stellen sich unsystematisch ein, insofern sind eventuelle herstellungsbedingte Unterschiede der beiden Probekörper als vernachlässigbar anzusehen. Die Temperaturzustände der Vergleichsprobekörper wurden lediglich für Plausibilitätsprüfungen der Ergebnisse herangezogen und blieben bei den anstehenden Auswertungen des Kapitels 7 unberücksichtigt.



**Bild 46: Unterschiede zwischen den Temperatur-Mittelwerten des maßgeblichen Probekörpers mit denen des Vergleichsprobekörpers (Häufigkeitsverteilung der Spannweiten s. Bild 47)**

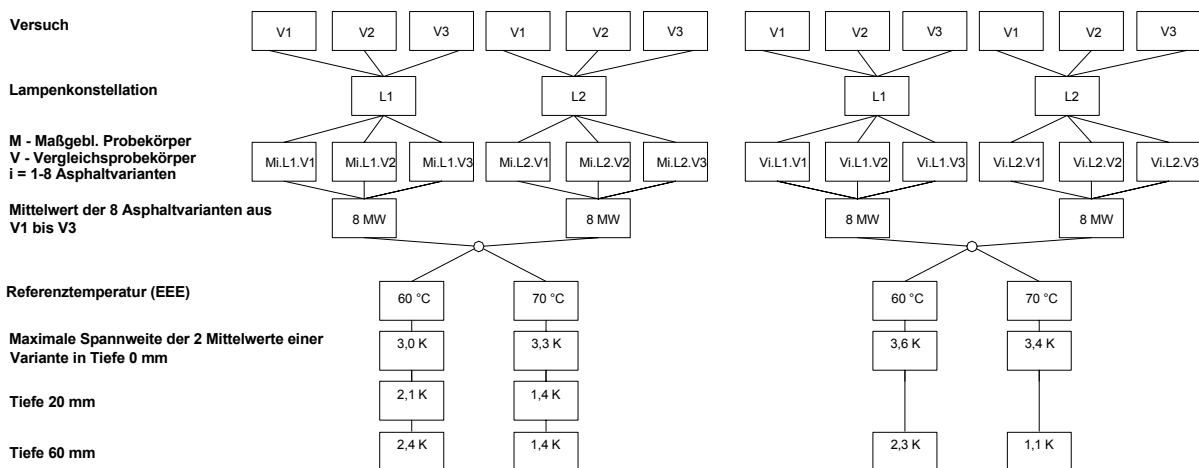


**Bild 47: Häufigkeitsverteilung der Spannweiten zu Bild 46**

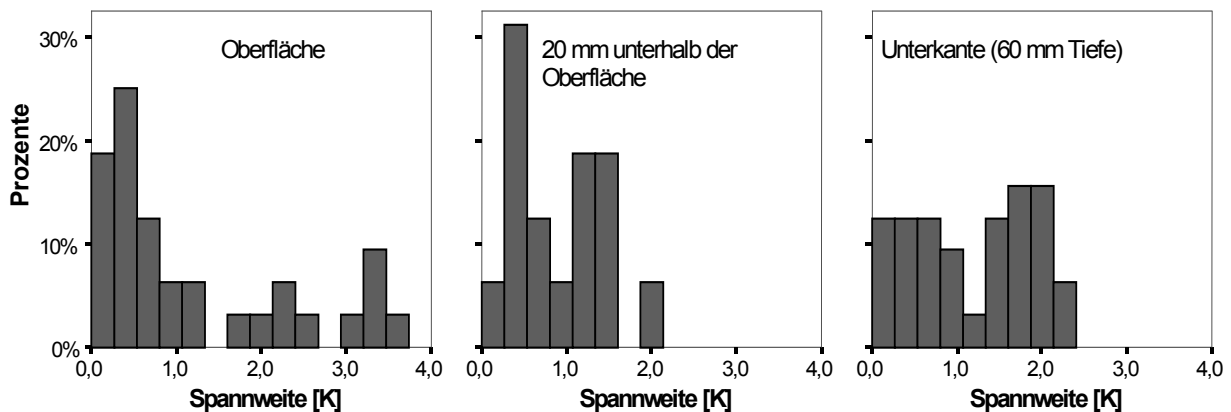
### 6.2.3 Vergleich der Temperaturmittelwerte beider Lampenkonstellationen

Bisher wurden die Unterschiede unter Voraussetzungen ermittelt, bei denen - zumindest für die Probekörper jeweils einer Asphaltvariante - konstante Strahlungsintensitäten angenommen werden konnten. Durch den Wechsel der Lampenanordnung (Lampenkonstellation 1 und 2) wurde zusätzlich der Einfluss eventuell variierender Strahlungsintensitäten bei gleichbleibendem Probekörper untersucht. In Bild 48 sind die für die Vergleiche herangezogenen Kombinationen angegeben. Die in Bild 49 angegebenen Spannweiten der Temperaturmesswerte erreichen Spannweiten bis zu 3,6 K, der Großteil der Spannweiten liegt unter 2 K.

Inwieweit sich die hier angesprochenen Unterschiede auf die abgeleitete Kenngröße "mittlere Dehnungsrate" unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens niederschlägt, kann dem Kapitel 7 entnommen werden.



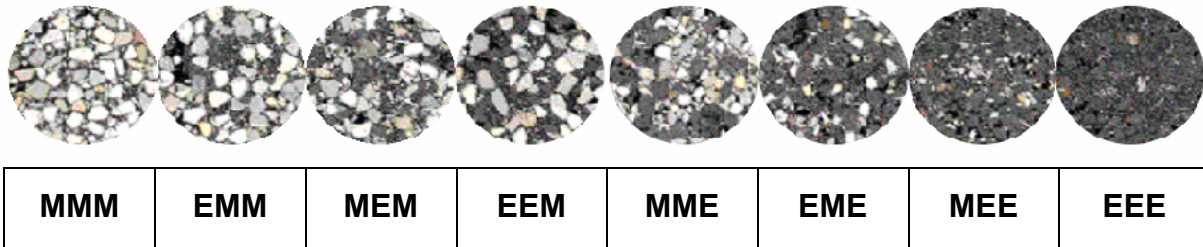
**Bild 48: Unterschiede zwischen den Temperatur-Mittelwerten beider Lampenkonstellationen (Häufigkeitsverteilung der Spannweiten s. Bild 49)**



**Bild 49: Häufigkeitsverteilung der Spannweiten zu Bild 48**

### 6.3 Ergebnisse der Helligkeitsvariation

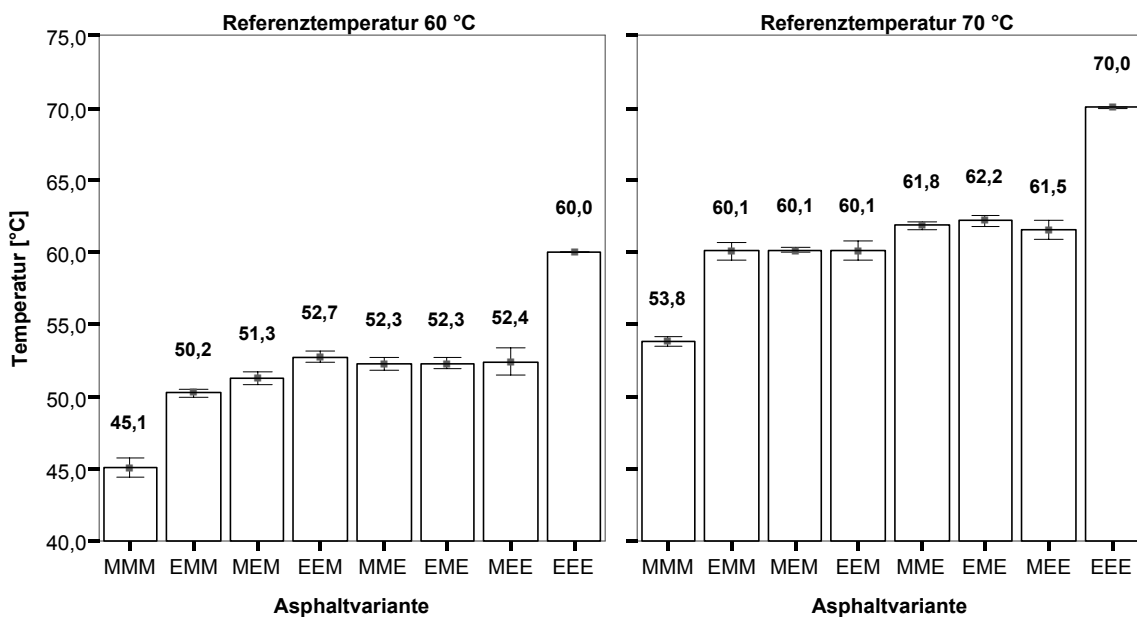
Die Oberflächentemperatur des Asphalts wird maßgeblich von der Helligkeit und damit dem Reflexionsgrad der (Sonnen-)Einstrahlung bestimmt. Mit Bild 50 kann die - entsprechend der Zielsetzung vorgesehene - Abstufung der Helligkeit der Asphaltvarianten nachvollzogen werden.



**Bild 50: Oberflächenbild der Asphaltvarianten**

In Bild 51 sind die Oberflächentemperaturen der acht Asphaltvarianten zum Zeitpunkt des Erreichens der Referenztemperaturen von 60 bzw. 70 °C des maßgeblichen Probekörpers EEE beispielhaft für die Lampenkonstellation 1 angegeben.

Die Zugabe von EOS bewirkt zwar in allen Kornklassen eine signifikante Erhöhung der Oberflächentemperatur (Tab. 6 und 7, Anlage 5), unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel angesprochenen Präzision liegen die Oberflächentemperaturen der Variationsasphalte aber auf einheitlichem Niveau, in Bezug zum Referenzasphalt MMM deutlich höher, zum Referenzasphalt EEE deutlich niedriger.



Balken zeigen Mittelwerte  
Fehlerbalken zeigen Mittelwert +/- 1,0 Standardabweichungen

**Bild 51: Oberflächentemperaturen der Asphaltvarianten bei Referenztemperaturen von 60 bzw. 70 °C (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1)**

Die Unterschiede in den Oberflächentemperaturen der Referenzasphalte entsprechen in etwa der von MÜLLER et al. (2007) mit Hilfe eines Rechenprogramms zur Simulierung von Wärmetransportvorgängen festgestellten Oberflächentemperaturabsenkung (15 K), die an einem extrem heißen Sommer durch Aufhellung der Deckschicht erreicht werden kann. Diese Ergebnisse resultierten aus einer Untersuchung des Einflusses heller Gesteine auf die Wärmebilanz an der Straßenoberfläche einer SMA-Deckschicht mittels einer Parametervariation.

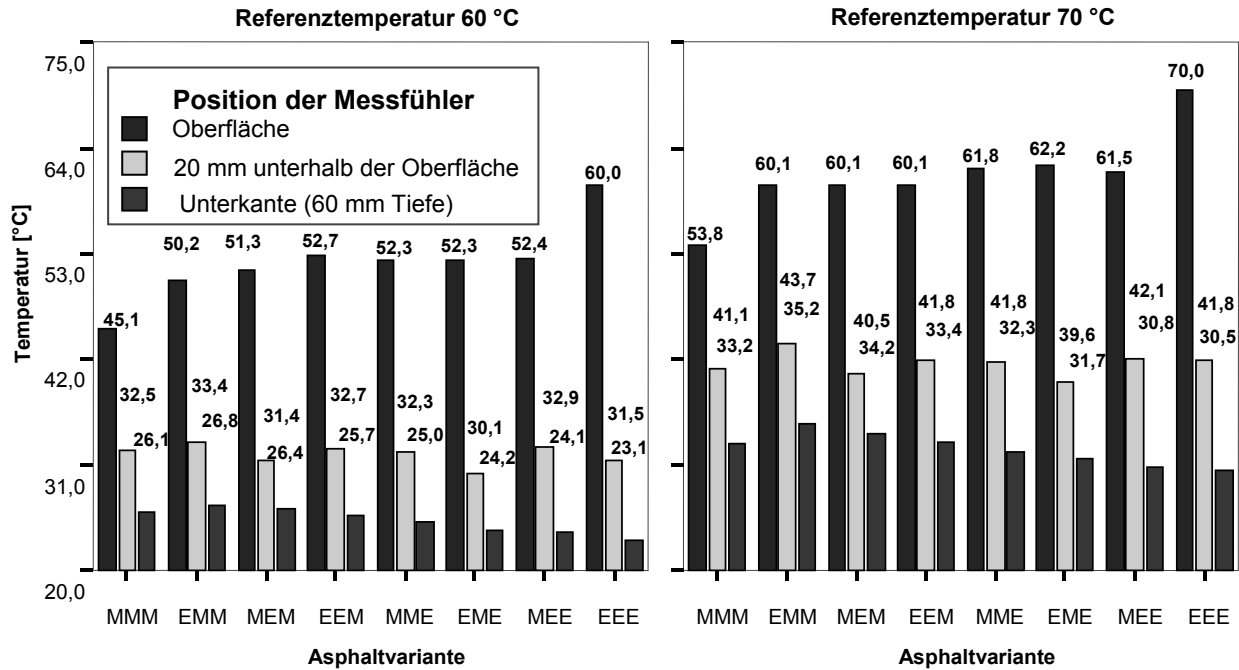
Dabei ist jedoch prinzipiell der bereits in Kapitel 2.4.2 angesprochene Unterschied der Ultra-Vitalux-Lampen zur Sonnenstrahlung im Infrarotbereich zu berücksichtigen, womit sich bei den Ultra-Vitalux-Lampen tendenziell größere Temperaturunterschiede zwischen hellen und dunklen Probekörpern ergeben können, als dies unter Praxisbedingungen der Fall wäre.

Die Wärmeleitfähigkeit der Asphaltdeckschicht hat einen geringeren, aber nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur als die Helligkeit. Von MÜLLER et al. (2007) konnte mit einer Verbesserung der Wärmeableitung in die darunter liegenden Schichten eine Absenkung der Oberflächentemperatur in einem Bereich von 0,6 bis 2,7 K festgestellt werden. Dies könnte vorliegend eine Erklärung dafür sein, dass bei den Variationsasphalten, trotz augenscheinlicher Unterschiede in den Helligkeiten (Bild 50), die Temperaturen an den Oberflächen auf einheitlichem Niveau liegen. Das Wärmespeichervermögen der Asphaltdeckschicht hat laut MÜLLER et al. (2007) keinen Einfluss auf die Oberflächentemperatur.

#### **6.4 Temperaturzustände innerhalb der Probekörper**

Durch den Reflexionsgrad an der Oberfläche bzw. der daraus resultierenden Energieabsorption wird die Oberflächentemperatur bestimmt, welche wiederum den Temperaturzustand innerhalb des Probekörpers beeinflusst. Hier spielen jedoch - entsprechend den Ausführungen des Kapitels 2.2.2 - die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität eine maßgebende Rolle.

Für die weitere Auswertung wurden zwei Temperaturzustände herangezogen. Kriterium war wiederum das Erreichen der Oberflächentemperaturen von 60 bzw. 70 °C des Referenzasphalts EEE. Die Temperaturzustände sind in Bild 52 (zahlenmäßig in Tab. 4, Anlage 4) vergleichend gegenübergestellt.



**Bild 52: Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei einer Referenztemperatur von 60 bzw. 70 °C (maßgeblicher Probekörper; Lampenkonstellation 1)**

Es zeigt sich, dass trotz der tendenziellen Erhöhung der Oberflächentemperaturen bei den Asphaltvarianten mit EOS bereits in 20 mm Tiefe keine Erhöhung und an der Unterseite der Probekörper sogar geringere Temperaturen festgestellt werden.

Anhand dieser Temperaturzustände hilfsweise durch Interpolationen - präziser mit der dazugehörigen zeitlichen Temperaturentwicklung - können die Temperaturleitfähigkeiten, ausgedrückt durch die Temperaturleitzahl, der einzelnen Asphaltvarianten mit dem Differenzenverfahren entsprechend Gleichung 11 (WISTUBA et al., 2003; KREBS und BÖLLINGER, 1981), ohne weitere Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_P$  (Gleichung 5, Kapitel 2.2.2), abgeschätzt werden.

$$T_{n,k+1} = a \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot (T_{n+1,k} - 2 \cdot T_{n,k} + T_{n-1,k}) + T_{n,k} \quad (11)$$

mit  $T_{n,k}$  = Temperatur in der Tiefe n zum Zeitpunkt k [K]

n = Tiefe [cm]

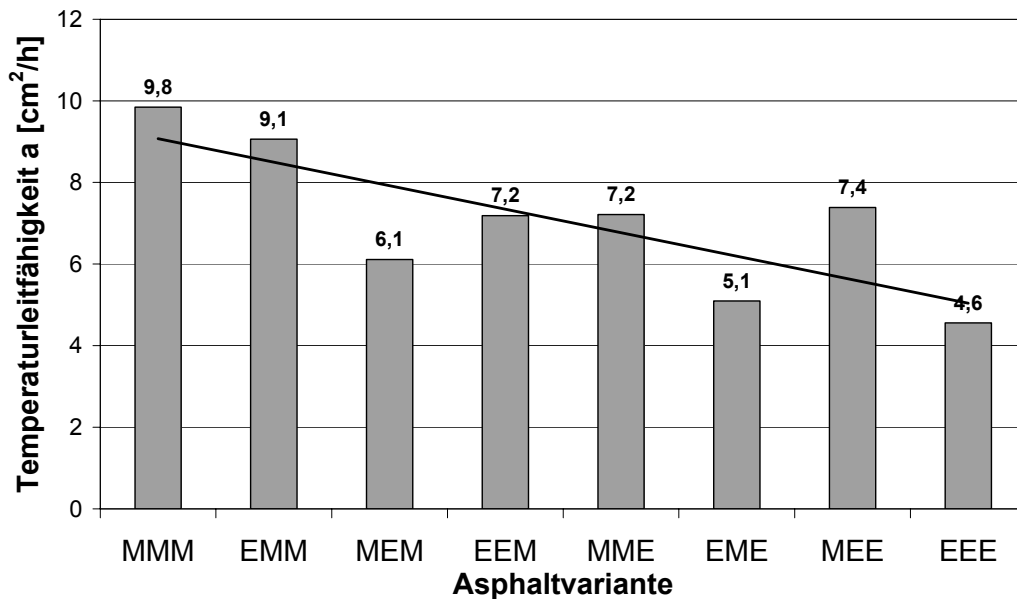
k = Zeitpunkt [h]

a = Temperaturleitzahl [cm<sup>2</sup>/h]

$\Delta t$  = Zeitintervall [h]

$\Delta x$  = Abstand der Tiefenpositionen [cm]

Mit Gleichung (11) ergeben sich bei einem Anstieg der Oberflächentemperatur bei allen Varianten von 25 auf 40 °C die in Bild 53 dargestellten Temperaturleitzahlen. Mit zunehmendem Anteil an EOS ist tendenziell eine Abnahme der Temperaturleitzahl zu verzeichnen. Diese Abnahme ist jedoch nicht stetig. In Einzelfällen (Variante MEE) widersprechen die Ergebnisse dieser Tendenz, ohne dass dies auf den Einfluss einzelner Kornklassen zurückgeführt werden kann.



**Bild 53: Temperaturleitzahl der Asphaltvarianten**

### **Bemerkung**

Ein Vergleich der Temperaturniveaus der künstlichen Bestrahlung mit denen bei Praxisbedingungen ist unzulässig, weil sich die beiden Beanspruchungen unterscheiden und in Labortests nicht alle Beanspruchungen simuliert werden, die eine Asphaltkonstruktion unter Praxisbedingungen erfährt. Keine künstliche Bewitterungsprüfung kann als eine vollständige Simulation der Praxisbedingungen bezeichnet werden. Insofern sind die vorliegend ermittelten Ergebnisse ausschließlich für die Zielsetzung eines relativen Vergleiches der Asphaltvarianten anwendbar.

## 7 Verhaltensorientierte Optimierung des Splittmastixasphalts unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse

### 7.1 Zusammenwirken des Mineralstoffgerüsts und des thermischen Verhaltens auf den Verformungswiderstand

Die allgemein bekannte und in Kapitel 5 konkret verdeutlichte Temperaturabhängigkeit des Verformungswiderstandes wird nachfolgend herangezogen, um mit den Ergebnissen der Bestrahlungsversuche den Verformungswiderstand unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens zu ermitteln. Hierzu wurde zuerst mit den in Kapitel 6 angegebenen Temperaturen als Stützstellen und folgender Regressionsfunktion (12) der Temperaturverlauf innerhalb der Probekörper berechnet. Exemplarisch sind diese Verläufe für die Referenzasphalte MMM und EEE bei der Referenztemperatur 70 °C in Bild 54 in blau dargestellt.

$$\text{temp}(h) = a_{\text{temp}} \cdot (h + b_{\text{temp}})^{c_{\text{temp}}} \quad (12)$$

mit:

temp (h): Temperatur in °C in Tiefe h

h: Tiefe von Probenoberfläche [mm]

$a_{\text{temp}}$ ;  $b_{\text{temp}}$ ;  $c_{\text{temp}}$ : Regressionsparameter

Mit diesen Temperaturverläufen können nun theoretisch die temperaturbedingten Verformungsgeschwindigkeiten über die Probekörperhöhen berechnet werden. Dazu wird die Temperaturabhängigkeit der Dehnungsrate mit folgender Funktion (13) beschrieben.

$$\varepsilon^*(\text{temp}) = a_{\text{eps}} \cdot \text{temp}^{b_{\text{eps}}} \quad (13)$$

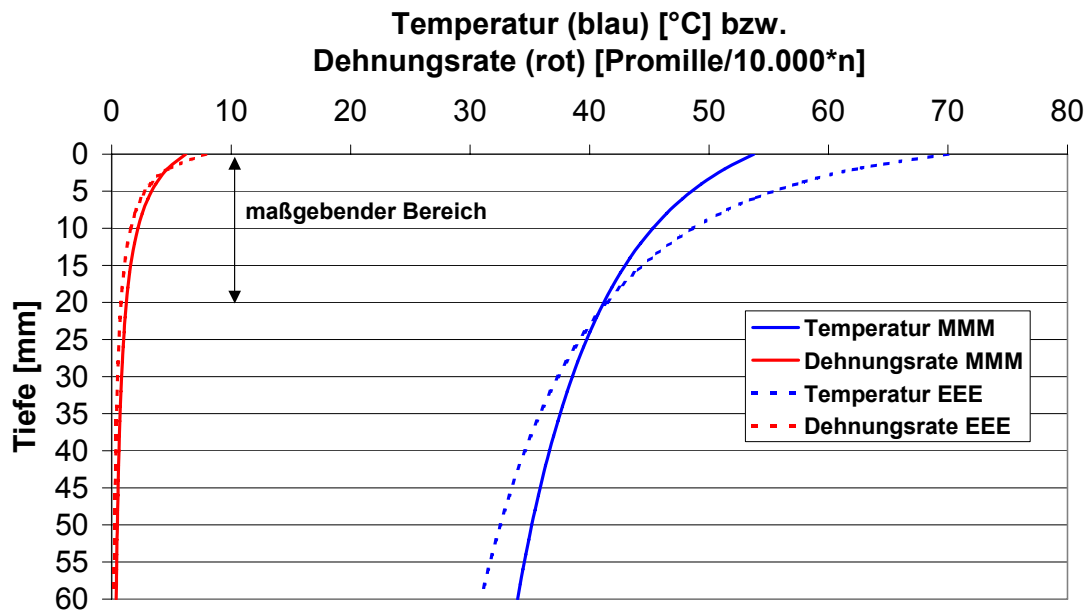
mit:

$\varepsilon^*$  (temp): Dehnungsrate in ‰/10.000n bei der Temperatur temp in °C

$a_{\text{eps}}$ ;  $b_{\text{eps}}$ : Regressionsparameter

Der theoretische Verlauf der Dehnungsrate über die Probekörperhöhe ist exemplarisch für die Variante MMM bzw. EEE wiederum in Bild 54 (rot) angegeben.

Für die Vergleiche der Asphaltvarianten wird die "mittlere Dehnungsrate" mit Gleichung (14) berechnet. Dabei werden ausschließlich die obersten 20 mm herangezo-



**Bild 54: Temperaturverlauf und der dementsprechende Verlauf der Dehnungsraten über die Dicke des Probekörpers der Varianten MMM und EEE**

gen, da in situ die Spurrinnen - welche auf die Asphalteigenschaften der Deckschicht zurückzuführen sind - vorrangig im oberen Teil der Deckschicht auftreten. Das führt des Weiteren dazu, dass Extrapolationen von Dehnungsraten bei Temperaturen < 40 °C und > 60 °C zwar nicht vermieden, jedoch minimiert werden.

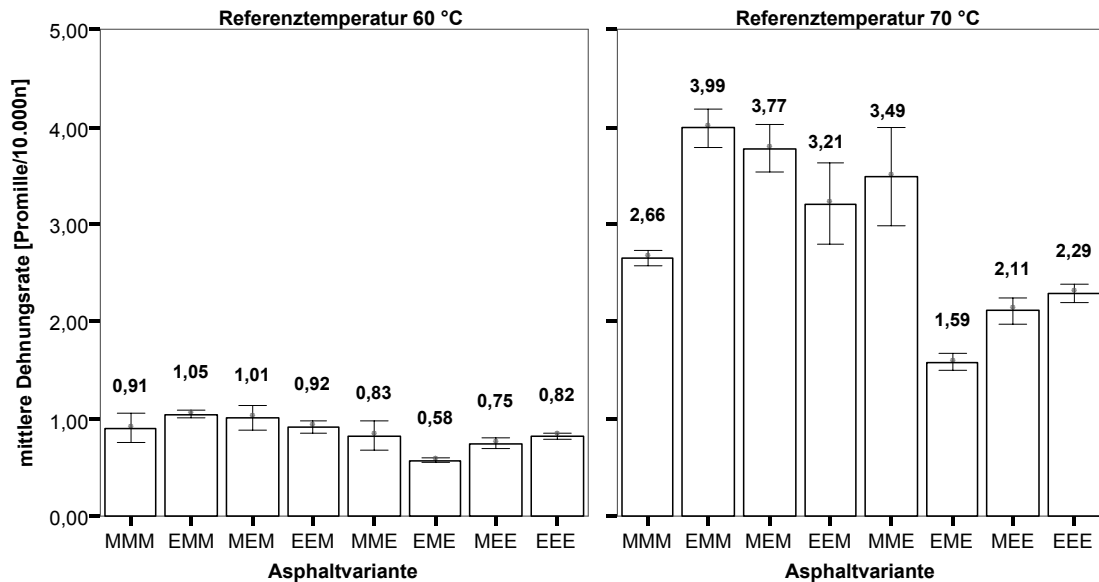
$$\text{Mittlere Dehnungsrate} = \frac{\int_{h=0}^{h=20} \varepsilon^*(\text{temp})dh}{20} \quad (14)$$

In Bild 55 sind die mittleren Dehnungsraten der einzelnen Asphaltvarianten unter Berücksichtigung des Temperaturverhaltens für die Referenztemperaturen 60 und 70 °C angegeben (Bilder 1 und 2, Anlage 5 differenziert für beide Lampenkonstellationen; zahlenmäßig in Tab. 1, Anlage 5). Die oben beschriebene Vorgehensweise wurde - aufgrund des Temperatursensors in 20 mm Tiefe - ausschließlich für den maßgeblichen Probekörper und für jeden Versuch, der in Kapitel 6 ausführlich beschrieben wurde, durchgeführt. Die in Bild 55 angegebenen mittleren Dehnungsraten sind Mittelwerte aus sechs Einzelwerten.

Danach ist zu erkennen, dass sich für beide Referenztemperaturen eine gleiche Reihung/Charakteristik ergibt, bei der Referenztemperatur 70 °C stellt sich erwartungsgemäß eine größere Spreizung aufgrund der größeren Temperaturspreizung dar.



Die Reihung, die sich aus Kapitel 5.3 anhand der Ergebnisse der Druckschwellversuche konventionell bei 50 °C ergeben hat (Bild 36), ändert sich unter Berücksichtigung der Temperatur folgendermaßen:



Balken zeigen Mittelwerte  
Fehlerbalken zeigen Mittelwert +/- 1,0 Standardabweichungen

**Bild 55: Mittlere Dehnungsraten der Asphaltvarianten bei den jeweiligen Temperaturzuständen, die bei der Referenztemperatur 60 bzw. 70 °C ermittelt wurden (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1 und 2)**

Die Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm liegen bei der Referenztemperatur 60 °C (Bild 55) anhand der mittleren Dehnungsraten günstiger als diese mit Moräne in dieser Kornklasse. Diese Reihung bleibt bei der Referenztemperatur 70 °C bis auf die Variante MME gleich. Bei einer Betrachtung der Dehnungsrate der Variante MME konventionell bei 50 bzw. 60 °C (Bild 38) und der benachbarten Varianten EEM und EME liegt diese dazwischen. Des Weiteren liegen die Oberflächentemperaturen (Bild 52) dieser Asphaltvarianten bei der Referenztemperatur von 60 °C bei 52,3 bzw. 52,7 °C. Dies erklärt die Beibehaltung der Tendenz bei den mittleren Dehnungsraten bei der Referenztemperatur 60 °C in Bild 55. Im Gegensatz dazu ist bei der Referenztemperatur 70 °C die Oberflächentemperatur der Variante MME höher als diese der Variante EEM und vergleichbar mit der Temperatur der Variante EME, was zu einer Erhöhung der mittleren Dehnungsrate der Variante MME im Vergleich zu den benachbarten Varianten führt. Die Variante EME hat die niedrigsten mittleren Dehnungsraten. Das liegt daran, dass einerseits durch die Aufhellung die Oberflächentemperaturen deutlich niedriger sind als der Referenzasphalt EEE und zusätz-

lich bei der Variante EME der niedrigere Temperaturleitwert (Bild 53) einen günstigeren Temperaturzustand in der Tiefe verursacht.

In der zweiten Gruppe mit Moräne in der Kornklasse 8/11 mm (MMM - EMM - MEM - EEM) stellt sich der Referenzasphalt MMM nach Kapitel 5.3 als die ungünstigste Variante in dieser Gruppe dar (Bild 36). Im Gegensatz dazu ist sie unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens nun die Günstigste in dieser Gruppe, was auf die deutlich niedrigeren Temperaturzustände an der Oberfläche zurückzuführen ist. Die Tendenz, dass - mit Ausnahme der Variante MMM - mit steigendem Anteil an EOS das Verformungsverhalten günstiger wird, trifft innerhalb dieser Gruppe weiterhin zu.

Insgesamt ist das Verformungsverhalten unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens der ersten Gruppe mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm - mit Ausnahme der Variante MME - günstiger als die zweite Gruppe. Offensichtlich ist entsprechend der Zielsetzung eine Optimierung möglich. Das "Optimum" stellt sich bei der Variante EME ein. Dieses Optimum stellt sich genauso ein, wenn die Lampenkonstellationen differenziert betrachtet werden (Bild 1 und 2 der Anlage 5).

Anzumerken ist, dass die hier vorgenommene Berechnung der mittleren Dehnungsraten für den Vergleich der Asphaltvarianten herangezogen wurden. Für weitergehende Aussagen ist neben der Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper auch der durch die Überrollung verursachte Beanspruchungszustand mit einzubeziehen. Dies war vorliegend jedoch nicht möglich, da für diesen Zweck Triaxialversuche oder Spurbildungsversuche erforderlich wären, bei welchen die erzeugte Verformung (Dehnung bzw. Spurrinntiefe) bei der entsprechenden Temperatur mit dem Temperaturzustand verknüpft werden kann. Durch die fehlende seitliche Behinderung im DSV darf die Dehnung nicht als einziges Beurteilungskriterium herangezogen werden.

## **7.2 Einfluss der Kornklassen**

Um zukünftig für den Einzelfall, unter Berücksichtigung der jeweiligen Randbedingungen (z.B. begrenzte Verfügbarkeit von Gesteinskörnungen), die günstigste Asphaltvariante auswählen zu können, wird an dieser Stelle - vorrangig qualitativ - der Einfluss der untersuchten Kornklassen auf die jeweilige Asphalteeigenschaft eingeschätzt. Hierfür wurden einerseits die Mittelwerte der Untersuchungsergebnisse differenziert nach Gesteinskörnung in der Kornklasse tabellarisch gegenübergestellt, wie

dies im Einzelnen der Anlage 5 zu entnehmen ist, sowie zusätzlich durch Varianzanalyse statistisch unterlegt.

In Tab. 13 sind zusammenfassend und qualitativ Art und Richtung des Einflusses der einzelnen Kornklasse auf die jeweiligen Untersuchungsergebnisse angegeben.

Unter Anwendung der multiplen Varianzanalyse sind folgende Tendenzen festgestellt worden (s. Anlage 5):

- Der Verdichtungswiderstand (D) wird durch die Verwendung von EOS in jeder der drei Kornklassen signifikant beeinflusst, d.h., dass jeweils der Verdichtungswiderstand unter Verwendung von EOS erhöht wird. Kombinationen haben keinen (gegenläufigen) Einfluss (Tab. 3, Anlage 5). Dies wird in der Praxis vermutlich durch höhere Verdichtungstemperaturen kompensiert, da Asphalte mit EOS aufgrund der höheren Wärmekapazität langsamer abkühlen.

Untersuchung	Kornklasse in mm						
	2/5	5/8	8/11	2/5 5/8	5/8 8/11	2/5 8/11	2/5 5/8 8/11
Verdichtungswiderstand	--	--	--	0	0	0	0
Wasserempfindlichkeit ITSr	0	0	0	0	0	0	0
Dehnungsrate	0	+	++	0	0	0	0
Oberflächentemperatur	-	-	--	0	0	0	-
Mittlere Dehnungsrate	0	0	++	0	0	0	++
<b>Legende:</b> 0 kein systematischer Einfluss erkennbar Werte sind mit EOS günstiger als mit Moräne: + geringer positiver Einfluss; ++ deutlicher positiver Einfluss; Werte sind mit EOS ungünstiger als mit Moräne: - geringer negativer Einfluss; -- deutlicher negativer Einfluss							

**Tab. 13: Qualitative Einschätzung des Einflusses der einzelnen Kornklassen im Splittbereich auf die Asphalteigenschaften bzw. die Werte der diese charakterisierenden Untersuchungen**

- Bei der Wasserunempfindlichkeit ist eine Verbesserung durch die Modifikation mit EOS, wie in Bild 32 dargestellt, zwar erkennbar, diese Verbesserung kann jedoch nicht auf einen systematischen Einfluss einzelner Kornklassen oder Kombinationen zurückgeführt werden. Die Durchführung einer Varianzanalyse war im Übrigen nicht möglich, da für jede Variante nur ein Einzelwert zur Verfügung stand.
- Die Untersuchung des Verformungswiderstandes mit der Dehnungsrate bei 50 °C (konventionell) zeigt, dass die Verwendung von EOS in der Kornklasse 8/11 mm zu einer deutlichen Verbesserung führt (Kapitel 5.3). Die Verwendung von EOS in

der Kornklasse 5/8 mm hat auch einen Einfluss, wenngleich dieser geringer ist. Dies wird durch die Varianzanalyse bestätigt (Tab. 5, Anlage 5)

- Der Einsatz von EOS bewirkt eine Erhöhung der Oberflächentemperatur (Kap. 6). Dies wird insbesondere bei der Variante EEE deutlich. Die Varianzanalyse weist alle Kornklassen als signifikant aus und zudem noch die Kombination 2/5\*5/8\*8/11 mm (Tab. 7, Anlage 5). Dies wird offensichtlich durch die deutlich abweichenden Oberflächentemperaturen der Referenzasphalte zu den Variationsasphalten.
- Signifikanten Einfluss auf den Verformungswiderstand unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens - ausgedrückt durch die mittlere Dehnungsrate - hat die Kornklasse 8/11 mm, wie dies bereits bei der Interpretation der Ergebnisse deutlich wurde. Auch die Kombination 2/5\*5/8\*8/11 mm hat aufgrund der Abhängigkeit von der Temperatur signifikanten Einfluss (Tab. 9, Anlage 5). Durch die z.T. gegenläufigen Tendenzen des Temperaturverhaltens und des Verformungswiderstandes stellt sich ein Optimum ein (Variante EME).

## 8 Schlussfolgerungen

Entsprechend der Zielsetzung konnte gezeigt werden, dass durch gezielte Modifikation von SMA 0/11 S mit EOS im Splittbereich die Gebrauchseigenschaften - vorrangig der Verformungswiderstand - des Asphalts verbessert werden können.

Bereits bei der **Konzeption** solcher Asphaltvarianten ist jedoch der deutlich höheren Rohdichte ( $3,7 \text{ g/cm}^3$ ) und auch der Kornform dieser industriellen Gesteinskörnung Rechnung zu tragen, indem die Korngrößenverteilung so auszuwählen ist, dass sich vergleichbare volumetrische Verhältnisse einstellen wie bei Splittmastixasphalt mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen (Kapitel 3.2). Mit zunehmendem Anteil an EOS erhöht sich zudem der Verdichtungswiderstand, so dass eine höhere Verdichtungsenergie erforderlich ist, um einen ausreichenden Verdichtungsgrad (in situ in der fertigen Deckschicht) zu erzielen. In der Praxis wird dieses Problem vermutlich durch die langsamere Abkühlung des Asphalts und der damit tendenziell höheren Verdichtungstemperatur kompensiert.

In der vorliegenden Arbeit wurde für die Herstellung der Marshall-Probekörper aller Asphaltvarianten eine einheitliche Verdichtungsenergie aufgebracht, mit der Konsequenz, dass sich insbesondere bei den Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm Hohlraumgehalte bzw. Wasseraufnahmen über den Anforderungswerten der ZTV Asphalt-StB ( $> 4 \text{ Vol.-%}$ ; FGSV, 2001) einstellten. Um daraus resultierende nachteilige Asphalteigenschaften ausschließen zu können, wurden zur Charakterisierung ihrer Gebrauchseigenschaften (**Wasserempfindlichkeit**) statische Spaltzugversuche an Marshall-Probekörpern mit und ohne Wasserlagerung durchgeführt (Kap. 4). Der Spaltzugfestigkeitsabfall aller untersuchten Asphaltvarianten lag unter dem Grenzwert (entsprechend dem Bewertungshintergrund von ARAND, 2000) für Splittmastixasphalt von 20 %. Er ordnete sich unsystematisch zwischen beiden Referenzasphalten ein. Festzuhalten ist, dass **das Haftverhalten unter Wassereinwirkung** durch die Zugabe **von EOS verbessert** wurde.

Neben der Erfassung der Bruchkräfte liefert die vorgenommene visuelle Beurteilung der Bruchflächen Erklärungen für die unterschiedlichen Spaltzugfestigkeitsabfälle. Die Variante MMM (Referenzasphalt ohne EOS) hat geringere Haftfestigkeiten nach Wasserlagerung, da der Anteil der abgelösten Gesteinskörner zu den Abgebroche-

nen mit Wasserlagerung größer ist. Allerdings ist diese Beurteilung sehr subjektiv, da die Probekörper nach Versuchsende nicht ganz durchgebrochen waren. Möglicherweise kann durch den Einsatz von Färbemittel die Beurteilung präzisiert werden, indem die Bruchflächen, welche infolge des Spaltzugversuches entstanden, von den Bruchflächen, die sich durch die nachträgliche Trennung ergaben, differenziert werden können.

Es stellt sich mit den Ergebnissen der Wasserempfindlichkeitsuntersuchungen die Frage, ob und inwieweit ein Hohlraumgehalt bzw. eine Wasseraufnahme entsprechend den Anforderungswerten der ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) erforderlich und sinnvoll ist. Für eine abschließende Klärung dieser Frage sind allerdings weitergehende Untersuchungen - außerhalb dieses Projektrahmens - wie bspw. Wasserdurchlässigkeit, Tieftemperaturverhalten und Ermüdungsverhalten durchzuführen.

Die nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) durchgeführten einaxialen Druckschwellversuche zur Erfassung des **Verformungswiderstandes** bei einer Prüftemperatur von 50 °C zeigen, dass wiederum insbesondere die Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm überdurchschnittlich günstige Werte aufweisen. Die zur Einschätzung der Temperaturabhängigkeit durchgeführten zusätzlichen Prüfungen bei 40 und 60 °C weisen auch diese als die temperaturunempfindlicheren Varianten aus.

Die Erfassung des **thermischen Verhaltens** bei künstlicher Bestrahlung ist - trotz der Kenntnis z.B. des Einflusses unterschiedlicher Aufhellungen - bisher in Deutschland nicht einheitlich geregelt. Aus diesem Grund wurde zur Umsetzung der Zielsetzung auf die Erkenntnisse und dem Verfahren von ROSSBERG (2000) aufgebaut. Aufgrund eigener Überlegungen und Voruntersuchungen wurden Modifizierungen vorgenommen und danach die Präzision des Verfahrens untersucht. Diese wurde für die vorliegende Zielsetzung als hinreichend angesehen, da auch die dadurch hervorgerufene Streuung der daraus abgeleiteten Kenngröße ("mittlere Dehnungsrate") sich in einem Maße bewegt, dass die Reihung der Varianten und die darauf basierende Beurteilung eindeutig ist.

Es wird empfohlen, die Prüfeinrichtung und das Prüfverfahren im Rahmen weiterer Untersuchungen zu präzisieren und festzuschreiben, um die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit verbessern zu können. Damit bestünde zukünftig die Möglichkeit, als erweiterte Prüfung Potenziale oder Defizite bestimmter Asphalte, die auf ihr thermisches Verhalten zurückgeführt werden (bspw. bezüglich des Winterdienstes), früh-

zeitig erkennen und ggfs. bei der Auswahl berücksichtigen zu können. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass die relative Erwärmung von Asphaltkonstruktionen bei der Beanspruchung in der Praxis abhängig vom Ort der Beanspruchung wegen Unterschieden bei der Bestrahlungsstärke, der Benässungsdauer, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und anderen Faktoren sehr unterschiedlich sein kann. Grundsätzlich darf aber, wenn sich die Proben einer bestimmten künstlichen Bewitterungsprüfung als geeignet erwiesen haben, angenommen werden, dass dies auch bei einer Freibewitterung oder anderen Praxisbedingung gilt. Es erscheint deshalb dringend angeraten, dass bei jeder Prüfung mindestens ein Kontrollprobekörper mitbeansprucht wird, um die Erwärmung des zu prüfenden Materials mit dem des Kontrollprobekörpers zu vergleichen. Das Kontrollmaterial sollte von ähnlicher Zusammensetzung und ähnlicher Form sein und so gewählt werden, dass sein thermisches Verhalten dem des als günstig bewiesenen Materials entspricht. Vorzugsweise sollten zwei Kontrollmaterialien verwendet werden, je eines mit relativ gutem und mit relativ schlechtem thermischen Verhalten. Die Kontrollprobekörper können aus einer existierenden Straße mit bekanntem thermischen Verhalten entnommen werden, um einen Bezug zur Praxis herstellen zu können.

Vorteile der künstlichen Bestrahlung gegenüber derartigen Messungen in situ ist der geringere Zeit- und Kostenaufwand, da unter Praxisbedingungen für vergleichende Beurteilungen Beobachtungen über längere Zeiträume und in verschiedenen Klimaregionen durchgeführt werden müssten. Alternativ zur künstlichen Bestrahlung kann das auftretende Temperaturspektrum meist mit Hilfe theoretischer Modelle abgeschätzt werden. Für die Modelle sind Kenngrößen wie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der Asphaltsschichten erforderlich. Diese werden an den betroffenen Asphaltsschichten meist aus Zeit- und Kostengründen nicht ermittelt, sondern aus Literaturquellen ausgewählt. Solche angenommenen Größen als Eingangsgrößen für die Temperaturberechnungen können mit Fehlern behaftet sein. Deshalb sind auch hier künstliche Bestrahlungen zu empfehlen, um im Labor bei definierten Bedingungen eine Kalibrierung der theoretischen Modelle anhand labortechnisch ermittelter Temperaturleitahlen vornehmen zu können.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten durch die künstliche Bestrahlung Unterschiede im thermischen Verhalten der jeweiligen Asphaltvarianten festgestellt und erfasst werden. Mit den dabei gemessenen Temperaturzuständen und den durch Druckschwell-

versuche ermittelten Verformungswiderständen, ausgedrückt durch die jeweilige Dehnungsrate, konnten für die vergleichende Beurteilung der Asphaltvarianten mittlere Dehnungsraten als **Verformungswiderstand unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens** theoretisch berechnet werden. Tatsächlich ergab sich danach eine Modifikation (EME), die sich unter den hier untersuchten Eigenschaften als optimal darstellt. Im Übrigen weisen alle Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm im Vergleich mit den übrigen Varianten überdurchschnittliche bautechnische Eigenschaften hinsichtlich des Haftverhaltens und Verformungswiderstandes auf. Die Frage, ob und inwieweit dies auch unter Praxisbedingungen mit Berücksichtigung weiterer Gebrauchseigenschaften wie Ermüdungs- und Tieftemperaturverhalten sowie Wasserdurchlässigkeit der Fall ist, kann zunächst nicht weiter beantwortet werden. Für einen erhöhten Verformungswiderstand bei extremen sommerlichen Bedingungen (hohe Temperaturen) können jedoch nach relativem Vergleich die Varianten EME, MEE und EEE empfohlen werden.

Die Absenkung der Oberflächentemperaturen durch Aufhellung führt im Sommer voraussichtlich zur Verminderung der Spurrinnenbildung, kann im Winter jedoch negative Auswirkungen auf die Verkehrssicherheit haben, da sich aufgrund einer langsameren Erwärmung der Straßenoberfläche die Gefahr der Glättebildung erhöht bzw. Glätte lokal langsamer abtaut. Hier kann eine "Verdunkelung" heller Schichten durch die Modifikation mit EOS die Verkehrssicherheit in diesem Sinne positiv beeinflussen. Ob und in welchem Maße dies zu berücksichtigen ist, ist im Einzelfall zu prüfen.

Grundsätzlich können mit der aufgezeigten Methodik mögliche Optimierungspotenziale bezüglich der Gebrauchseigenschaften ermittelt und eingestuft werden, durch welche ggfs. die Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung erhöht und damit verbunden Erhaltungskosten reduziert werden können. Bei den vorliegenden Asphaltvarianten können möglicherweise darüber hinaus durch den kombinierten Einsatz von Splitten aus Moräne und EOS in Splittmastixasphalt die Einbaukosten im Vergleich zu Splittmastixasphalt mit Splitten ausschließlich aus EOS durch die geringere Dichte des Asphalts vermindert werden.

Es wird empfohlen, im Rahmen von erweiterten Eignungsprüfungen, die Asphaltrezepturen auf ihren Verformungswiderstand unter besonderer Berücksichtigung ihres Temperaturverhaltens zu untersuchen. Damit können auch Asphaltrezepturen, die



sich anhand konventioneller Druckschwellversuche oder Spurbildungsversuche als ungünstiger darstellen, aufgrund günstiger thermischer Eigenschaften deutlich positiver hinsichtlich ihres Verformungswiderstandes – wie dies vorliegend am Beispiel der Variante MMM deutlich wird – eingestuft werden.

Abschließend muss noch einmal betont werden, dass die hier gewonnenen Ergebnisse solange als nicht repräsentativ für EOS und Moränen anzusehen sind, bis in ausreichendem Umfang Vergleichsmessungen an anderen Lieferkörnungen vorliegen. Die vorgestellten Ergebnisse beziehen sich nur auf die EOS der BSN und die Moräne der Fa. Götz, die in die Untersuchungen einbezogen waren.



## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Prüfung, ob und ggf. inwieweit durch Modifikation von Splittmastixasphalt 0/11 S mit EOS in verschiedenen Kornklassen eine Optimierung des Verformungswiderstandes unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens möglich ist.

Helle Gesteinskörnungen aus Moräne wurden hierzu in den Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm und die gleichen Kornklassen aus EOS zuerst präparativ aufbereitet. Durch Variation des Bindemittelgehaltes im Rahmen einer erweiterten Eignungsprüfung wurde dann der optimale Bindemittelgehalt festgelegt (erster Referenzasphalt - MMM; Kapitel 3). Die Volumenanteile der Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/11 mm in dieser Zusammensetzung wurden ermittelt und durch die gleichen Volumenanteile EOS ersetzt (zweiter Referenzasphalt - EEE). Die hier angesprochenen Kornklassen wurden in den sechs möglichen Variationen (EMM, MEM, EEM, MME, EME, MEE) kombiniert. Bei den so entstandenen Asphaltvarianten wurden die gleichen volumetrischen Verhältnisse wie bei beiden Referenzasphalten beibehalten, um möglichst gleiche räumliche Verhältnisse und damit vergleichbare Messergebnisse zu erhalten. Der bei der Herstellung dieser Probekörper beobachtete Verdichtungswiderstand wies mit Erhöhung des Anteils an EOS eine Erhöhung des Verdichtungswiderstandes von etwa 30 % auf.

Die an den Marshall-Probekörpern bestimmten Hohlraumgehalte bzw. Wasseraufnahmen für die Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm lagen deutlich über den Anforderungen nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001). Um daraus resultierende nachteilige Asphalteeigenschaften ausschließen oder ggf. vor der Optimierung des Verformungswiderstandes unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens eine Abgrenzung vornehmen zu können, wurde zur Charakterisierung ihrer Gebrauchseigenschaften die Wasserempfindlichkeit durch statische Spaltzugversuche an Probekörpern mit und ohne Wasserlagerung durchgeführt (Kapitel 4). Der Spaltzugfestigkeitsabfall aller untersuchten Asphaltvarianten lag unter dem Grenzwert für Splittmastixasphalt nach Arand von 20 % und ordneten sich unsystematisch zwischen beiden Referenzasphalten ein. Somit ist nicht mit einer schlechteren bautechnischen Eigenschaft diesbezüglich zu rechnen, so dass die nachfolgenden Untersuchungen an sämtlichen Varianten durchgeführt wurden.

Zur Erfassung des Verformungswiderstandes wurden die Dehnungen, Dehnungsraten und Lastimpulsanzahlen bei allen Asphaltvarianten mit dem einaxialen dynamischen Druckschwellversuch nach TP Asphalt-StB (Kapitel 5) ermittelt, und zwar

- zur Erfassung der Unterschiede der Gesteinskörnungsstrukturen bei der nach TP Asphalt-StB (FGSV, 1999) empfohlenen Prüftemperatur von 50 °C, mit dem Ergebnis, dass mit zunehmendem Anteil an EOS abnehmende - also günstigere - Dehnungsraten ermittelt wurden sowie
- zur Erfassung der Temperaturabhängigkeit des Verformungswiderstandes zusätzlich bei den Prüftemperaturen 40 und 60 °C.

Anhand von künstlichen Bestrahlungen an Probekörpern aus den genannten Asphalten wurde im Labor mit der Versuchseinrichtung nach ROSSBERG (2000) und einer hierfür zweckmäßigen Modifizierung, das Erwärmungsverhalten an der Oberfläche und die Temperaturentwicklung innerhalb des Probekörpers erfasst (Kapitel 6). Vorab wurden Untersuchungen zur Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse durchgeführt, mit deren Ergebnissen die zielführende Vorgehensweise bestätigt werden konnte.

Die Erfassung der Temperaturzustände aller Asphaltvarianten bei festgelegten Zeitpunkten zeigte, dass die Zugabe von EOS in allen Kornklassen eine signifikante Erhöhung der Oberflächentemperatur bewirkt. Die Oberflächentemperaturen der Variationsasphalte liegen auf einheitlichem Niveau, in Bezug zum Referenzasphalt MMM deutlich höher, zum Referenzasphalt EEE deutlicher niedriger. Erklärt werden kann dies damit, dass die Temperaturleitfähigkeit mit zunehmendem Anteil an EOS tendenziell abnimmt, so dass die Temperaturen innerhalb der Probekörper zur Variante EEE hin geringer sind als bei Variante MMM.

Auf Basis der aus beiden Versuchen gewonnenen Ergebnisse – Temperaturzuständen aus der künstlichen Bestrahlung und Dehnungsraten aus dem einaxialen Druckschwellversuch - wurde für Vergleiche eine mittlere Dehnungsrate unter Berücksichtigung des thermischen Verhaltens theoretisch ermittelt (Kapitel 7). Dabei konnte festgestellt werden, dass sich ein Optimum bei der Variante EME einstellt. Alle Varianten mit EOS in der Kornklasse 8/11 mm weisen im Vergleich mit den übrigen Varianten überdurchschnittliche bautechnische Eigenschaften hinsichtlich des Haftverhaltens und Verformungswiderstandes auf. Für einen erhöhten Verformungswider-

stand bei extremen sommerlichen Bedingungen (hohe Temperaturen) werden die Varianten EME, MEE und EEE empfohlen. Obwohl eine Verschlechterung des Verformungswiderstandes unter Einwirkung extremer sommerlicher Bedingungen bei den Varianten EEM und MEM festgestellt wurde, können diese für Strecken mit normalen thermischen Beanspruchungen eingesetzt werden, wo gute Verformungsresistenz gefordert wird.

Unter der Voraussetzung, dass die hier untersuchten EOS-modifizierten Asphalte ausreichende Tieftemperatur- und Ermüdungsbeständigkeit aufweisen, welche außerhalb dieses Projektrahmens zu prüfen sind, können die EOS für eine Optimierung des Verformungswiderstandes eingesetzt werden. Ein verbesserter Vorformungswiderstand führt zur Verlängerung der Nutzungsdauer einer Asphaltbefestigung sowie zur Reduzierung der damit verbundenen Erhaltungskosten und der Eingriffe in den Verkehrsraum. Somit können beachtliche betriebs- und volkswirtschaftliche Nutzen erzielt werden.

Die hier entwickelte Methodik ist zur Einschätzung des Verformungswiderstandes unter besonderer Berücksichtigung des thermischen Verhaltens näher an der Realität als die konventionelle Methode und ist für eine qualitative Einschätzung definitiv geeignet. Sie sollte durch zusätzliche Untersuchungen an Proben aus existierenden Asphaltkonstruktionen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft werden. Bei Verfahren, bei welchen die erzeugte Verformung unmittelbar mit dem Temperaturzustand verknüpft werden kann, wie z.B. bei Triaxialversuchen, Spurbildungsversuchen oder dynamischen Stempeleindringversuchen, sollte der Temperaturzustand, der sich bei den untersuchten Asphalten einstellt, mitberücksichtigt werden.



## 10 Literaturverzeichnis

- ARAND, W. (2000): Bewertungshintergrund zur Beurteilung des Haftverhaltens von Asphaltten – Teil 1 und 2, Straße und Autobahn 51, Nr. 10 und 11, 2000.
- ARAND, W. (1984): Der Verdichtungswiderstand als Merkmal zur Prognostizierung der Standfestigkeit von Walzasphalt, Straße und Autobahn 35, Nr. 12, 1984.
- BICHER, B. (2004): Geo und Umweltportal Freiburg. Texte aus [www.gupf.tu-freiburg.de](http://www.gupf.tu-freiburg.de), Stand Juli 2004.
- BORCHARD, F. (1985): Beurteilung von Mineralstoffen für standfeste Asphaltstraßen; Straßen- und Tiefbau 39, Nr. 5, 1985.
- BSN (2007): BSW Stahl-Nebenprodukte GmbH. Texte aus [www.bsn-kehl.de](http://www.bsn-kehl.de), Stand 14.10.2007.
- BSN (2003 bis 2005): Fremdüberwachungsberichte (1. und 2. Fremdüberwachung 2003 bis 2005) des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe (TH).
- BSN (2006 bis 2008): Berichte der Freiwilligen Güteüberwachung von Gesteinskörnungen (Fremdüberwachung 2006 bis 2008) des Instituts für Straßen- und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe (TH).
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 1996, Prüfung bituminöser Massen für den Straßenbau und verwandte Gebiete, Teil 8: Bestimmung der Wasseraufnahme. Fassung 1977, Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 52004, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Dichte der Bindemittel. Fassung 1999, Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13398, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen. Fassung 2003, Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 1426, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration. Fassung 1999, Beuth Verlag.
- Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 1427, Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. Fassung 1999, Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 11: Bestimmung der Affinität von Gesteinskörnungen. Fassung 2005, Beuth Verlag

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 12: Bestimmung der Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern. Fassung 2004, Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 23: Bestimmung der indirekten Zugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern. Fassung 2003, Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 29: Bestimmung der Maße von Asphalt-Probekörpern. Fassung 2002, Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 12697, Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät. Fassung 2007, Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 4301: Eisenhüttenschlacke und Metallhüttenschlacke im Bauwesen. Ausgabe April 1981.

Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN ISO 4892-1 (2001): Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten, Teil 1: Allgemeine Anleitung. Ausgabe 2001.

DRISSEN, P. (2004): Eisenhüttenschlacken – industrielle Gesteine, Report des FehS-Institutes 1/2004.

ETV-StB-BW (2005): Ergänzungen zu den Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau - Baden-Württemberg. Teil 3 Stand 19.12.2005.

EULITZ und HASE (1992): Softwareprogramm zur Bestimmung des Verdichtungswiderstandes D, geschrieben von Stephan Büchler, Version 1, 1992.

FECKER und MUTSCHLER (2006): Arbeitsblätter zum Kurs "GEOLOGIE IM BAUWESEN", Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH), Wintersemester 2006/07.

FGSV (1987): Arbeitsanleitung für die Bestimmung der Verdichtbarkeit von Walzasphalt mit Hilfe des Marshall-Verfahrens, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Nr. 746, Ausgabe 1987.

FGSV (1993): Richtlinien für die Güteüberwachung von Mineralstoffen im Straßenbau (RG Min-StB 93), Ausgabe 1993.



- FGSV (1998): Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1998.
- FGSV (1999): Bestimmung des Verformungsverhaltens von Asphalten bei Wärme. Technische Prüfvorschriften für Asphalt im Straßenbau (TP A-StB), Teil: Einaxialer Druckschwellversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV-Nr. 756/3, Ausgabe 1999.
- FGSV (2000): Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000), Ausgabe 2000.
- FGSV (2000b): Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren. Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen - Teil 1, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2000.
- FGSV (2000c): Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2000.
- FGSV (2001): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 2001
- FGSV (2003): Erkennen und Behandeln von Ausreißern. Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen - Teil 2, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2003.
- FGSV (2007): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04); Ausgabe 2007.
- FREUND, H.-J.; GROSSMANN, A. (2000): Erfahrungen mit Elektroofenschlacken im Straßenbau auf der A 5 bei Baden-Baden. Teilbericht 3, Karlsruhe 2000.
- GEISLER, J. (1994): Der Baustoff Elektroofenschlacke - Entstehung, Nutzung, Erfahrungen – Schriftreihe der Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken, Heft 3, Duisburg, 1994.
- GÖSTA; LILJEQUIST; CEHAK (1994): Allgemeine Meteorologie, 3. Auflage, Braunschweig, Ausgabe 1994.
- Heindl Server GmbH, Redaktion: Texte aus [www.solarserver.de](http://www.solarserver.de) Stand 29.07.2007.
- HINTSTEINER, E. (1987): Hochofen- und Stahlwerksschlacke im Asphaltbau, Asphaltstraße 21, Heft 3, Ausgabe 1987.

- KAPP, M. (2002): Asphalt für schwerste Beanspruchungen mit künstlichen Gesteinskörnungen aus Elektroofenschlacke. Diplomarbeit am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen, Universität Karlsruhe; September 2002.
- KARCHER, C. (2005): Prognose und Bewertung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphaltes. Dissertation, Universität Karlsruhe; 2005.
- KLUGE, G.; RANGE, D. (1986): Aufgehellte bituminöse Deckschichten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und Energieeinsparung. Bitumen, Heft 48, Nr. 1, S. 15-22, Ausgabe 1986.
- KREBS, H.; BÖLLINGER, G. (1981): Temperaturberechnungen am bituminösen Straßenkörper, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 347, Bonn Bad Godesberg 1981.
- LEINS et al. (1980): Untersuchung des Einflusses von Gesteinssplitten auf die Helligkeit von bituminösen Fahrbahndecken. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen – Nr. 2938, Ausgabe 1980.
- MERKEL et al. (2000): Praktische Erfahrungen mit Elektroofenschlacken im Straßenbau; Straße und Autobahn. Heft 51, Nr. 12, S. 760-765, Ausgabe 2000.
- MICHALSKI, C. (1998): Zusammenhang zwischen Morphologie und dem Verformungswiderstand von Asphalt. Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Straßenbau, Heft 7, 1998.
- MILBRADT, H.-R. (1988): Einfluss der Einsatzbedingungen von Vibrationswalzen auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltbetonen mit unterschiedlicher Verdichtbarkeit, Schriftenreihe Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Heft 8, Ausgabe 1988.
- MÜLLER, R.; PIRSKAWETZ, S.; WEISE, F. (2007): Einfluss der Wärmeabstrahlung, -leitfähigkeit und -kapazität von Mineralstoffen auf die Energiebilanz einer Fahrbahn, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (BMVBS, Bonn) H. 968, Bonn 2007.
- OSRAM, Gesellschaft mit beschränkter Haftung; Produktkatalog; Ultra-Vitalux Heimsonne. Texte aus [www.osram.de](http://www.osram.de), Stand 29.07.2007.
- PAN, T.; TUTUMLUER, E.; CARPENTER, S.: Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt; Journal of transportation engineering, 2006.

- REINBOTH, K. (1999): Auf hohem Stand das Gewonnene gesichert und neue Ziele gesetzt - Teil 2: Entwicklung im Asphaltstraßenbau zwischen 1965-1975 und auch danach. Straße und Autobahn 50 (1999) Nr. 11, S. 609-612, 1999.
- RENKEN, P. (1992): Untersuchungen zum Haftverhalten zwischen Bindemittel und Gestein. Straße und Autobahn 43 (1992) Nr.1, 1992.
- RENKEN, P. (2003): Haftung zwischen Bitumen und Gesteinskörnungen - ein Statusbericht. Bitumen, Heft 1, 2003.
- ROOS, R.; CHARIF, K.; KARCHER, C. (2003): Schaffung eines Bewertungshintergrundes zur Prognostizierung der Standfestigkeit von Asphalten mit dem Druckschwellversuch - Hauptphase; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (BMV, Bonn) H. 868, Bonn 2003.
- ROSSBERG, K. (2000): Einfluss des spektralen Absorptions- und Reflexionsgrades von Mineralstoffen auf die Wärmebilanz von Fahrbahnbefestigungen. Schlussbericht zu FE 04.178/1997/AGB, Dresden 2000.
- SCHÄFER, P. (2000): Temperaturverhalten von Fahrbahnbelägen aus Asphalt im Stadtgebiet bei Verwendung unterschiedlicher Gesteinsarten im Splittbereich. Bitumen, Heft 2, Ausgabe 2000.
- SHELLENBERG, K. (1991): Festlegung von einheitlichen Prüf- und Auswertekriterien im dynamischen Druck-Schwell-Versuch im Hinblick auf die Entwicklung einer standardisierten dynamischen Prüfgerätes, Teilbericht zum Forschungsvorhaben 07.142 G 88 E.
- SHELLENBERGER, W. (2000): Anwendung und Aussagemöglichkeiten der Spaltzugprüfung, Bitumen 62 Nr. 3.
- SCHRÖDER, I.; KLUGE, H.-J. (1992): Erfahrungen mit Splittmastixasphalt, Bitumen, Heft 4, 1992
- STÖCKER, H. et al. (2000): Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch AG, Auflage 2000.
- VON STOSCH, H.-J. (1968): Einfluss des Aufhellungsgrades auf den Verformungswiderstand von bituminösen Deckschichten bei Wärmeeinstrahlung. Bitumen, Heft 7, Ausgabe 1968.
- VOSKUILEN, J.L.M. (1991): Ursachenkomplex für die Spurrinnenbildung im Jahre 1989. Wegen 65, Nr. 7/8, Ausgabe 1991.

WISTUBA, M; LITZKA, J., BLAB, R. (2003): Ableitung von maßgebenden Temperaturverteilungen für die analytische Oberbaubemessung von Asphaltstraßen, Straße und Autobahn, 5/2003.

WÖRNER, T.; WESTINER, E.; LÖCHERER, L. (2002): Einfluss der Bruchflächigkeit von Edelsplitten auf die Standfestigkeit von Asphalt – ermittelt am Beispiel SMA 0/11 S. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (BMV, Bonn), H. 83, 2002.

## 11 Abbildungsverzeichnis

	Seite
Bild 1: Gruppierung der im Bauwesen tauglichen Schlacken gemäß DIN 4301 (1981) nach ihrer Entstehungsart	5
Bild 2: Recycling-Kreislauf von Stahl und EOS	6
Bild 3: Aufbereitung von EOS (BSN, 2007)	7
Bild 4: Kreislauf der Gesteine (BICHER, 2004)	7
Bild 5: Einteilung der Magmatite (FECKER und MUTSCHLER, 2006)	8
Bild 6: Bereich der zulässigen Korngrößenverteilungen von SMA 0/11 S nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001)	12
Bild 7: Schematische Darstellung nach MICHALSKI (1998) eines instabilen und eines stabilen Kornhaufwerks	13
Bild 8: Belastungszyklus und Messwerterfassung der Verformung ab Versuchsbeginn (FGSV, 1999)	15
Bild 9: Impulskriechkurve mit der zugehörigen Kurve der Dehnungsrate (FGSV, 1999)	16
Bild 10: Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität einiger Gesteine und Asphalte nach ROSSBERG (2000)	21
Bild 11: Temperaturunterschiede nach künstlicher Bestrahlung (ROSSBERG, 2000)	22
Bild 12: Bruchartkategorien nach DIN EN 12697, Teil 23 (2003)	26
Bild 13: Spaltzugfestigkeitsabfall in Abhängigkeit vom Hohlraumgehalt für 2 unterschiedliche Gesteinsarten und 5 Bitumenarten und -sorten für den Splittmastixasphalt 0/11 S (ARAND, 2000)	27
Bild 14: Strahlungsaufnahme (STÖCKER et al., 2000)	29
Bild 15: Schematische Darstellung der Wärmetransportvorgänge an der Fahrbahnoberfläche (MÜLLER et al., 2007)	30

Bild 16:	Spektraler Strahlungsfluss der Ultra-Vitalux Strahler [OSRAM, 2007]	32
Bild 17:	Schematische Darstellung des Walzsektor-Verdichtungsgerätes und Funktionsweise	33
Bild 18:	Versuchseinrichtung nach ROSSBERG (2000)	34
Bild 19:	Mineralogische Phasenzusammensetzung der untersuchten EOS	35
Bild 20:	Moräne	38
Bild 21:	Grenzsieblinien nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) und berech- nete Massenanteile	40
Bild 22:	Grenzsieblinien nach ZTV Asphalt-StB (FGSV, 2001) und berech- nete Massenanteile	41
Bild 23:	Probekörperhöhen EEE: 72,8 mm / MMM: 63,0 mm	43
Bild 24:	Kornverteilung der Kornklasse 2/5, 5/8 und 8/11 mm aus Moräne und EOS	45
Bild 25:	Zusammenhang zwischen Hohlraumgehalt und Wasseraufnahme	47
Bild 26:	Dicken der MPK der untersuchten Asphaltvarianten	48
Bild 27:	Verdichtungswiderstand D	48
Bild 28:	Anteil gebrochener Gesteinskörner in Bezug zur Asphaltvariante	52
Bild 29:	ITS-Einzelwerte der untersuchten Asphaltvarianten	52
Bild 30:	ITS-Mittelwerte der untersuchten Asphaltvarianten	53
Bild 31:	Verbleibende Spaltzugfestigkeiten ITSR	53
Bild 32:	Spaltzugfestigkeitsabfall der untersuchten Asphaltvarianten	54
Bild 33:	Spaltzugfestigkeitsabfall in Abhängigkeit der Wasseraufnahme	55
Bild 34:	Gegenüberstellung der Ergebnisse der "simultanen" und "mathe- matischen" Auswertung des DSV	59

Bild 35:	Verläufe der Dehnungsraten beim DSV bei 50 °C - Gesteinskörnung in der Kornklasse 8/11 mm: a) EOS, b) Moräne	60
Bild 36:	Dehnungen, Dehnungsraten und Lastimpulsanzahlen der DSV bei 50 °C in Bezug zur Asphaltvariante	62
Bild 37:	Zusammenhänge zwischen Verdichtungswiderstand D und Dehnungsraten	63
Bild 38:	Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl (Mittelwert) beim DSV bei 40, 50 und 60 °C in Bezug zur Asphaltvariante	66
Bild 39:	Modifizierte Versuchseinrichtung mit Ultra-Vitalux-Lampen und Asphaltproben in Sandbettung	68
Bild 40:	Front- und Rückseite des MacSolar und Befestigungsbügel (Heindl Server GmbH)	71
Bild 41:	Messung der Bestrahlungsstärken an den Positionen der jeweiligen Asphaltvarianten	71
Bild 42:	Bestrahlungsstärken an den Positionen der jeweiligen Asphaltvarianten differenziert nach Lampenkonstellation	72
Bild 43:	Mittlere Bestrahlungsstärken an den Positionen der Asphaltvarianten aus beiden Lampenkonstellationen	72
Bild 44:	Anzahl der erfassten Temperatur-Einzelwerte eines jeweiligen Probekörpers innerhalb einer Lampenkonstellation	74
Bild 45:	Häufigkeitsverteilung der Standardabweichungen zu Bild 44	74
Bild 46:	Unterschiede zwischen den Temperatur-Mittelwerten des maßgeblichen Probekörpers mit denen des Vergleichsprobekörpers (Häufigkeitsverteilung der Spannweiten s. Bild 47)	75
Bild 47:	Häufigkeitsverteilung der Spannweiten zu Bild 46	75

Bild 48:	Unterschiede zwischen den Temperatur-Mittelwerten beider Lampenkonstellationen (Häufigkeitsverteilung der Spannweiten s. Bild 49)	76
Bild 49:	Häufigkeitsverteilung der Spannweiten zu Bild 48	76
Bild 50:	Oberflächenbild der Asphaltvarianten	77
Bild 51:	Oberflächentemperaturen der Asphaltvarianten bei Referenztemperaturen von 60 bzw. 70 °C (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1)	77
Bild 52:	Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei einer Referenztemperatur von 60 bzw. 70 °C	79
Bild 53:	Temperaturleitfähigkeit der Asphaltvarianten	80
Bild 54:	Temperaturverlauf und der dementsprechende Verlauf der Dehnungsraten über die Dicke des Probekörpers der Varianten MMM und EEE	82
Bild 55:	Mittlere Dehnungsraten der Asphaltvarianten bei den jeweiligen Temperaturzuständen, die bei der Referenztemperatur 60 bzw. 70 °C ermittelt wurden (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1 und 2)	83
<u>Anlage 1</u>		
Bild 1:	Korngrößenverteilung des ersten Referenzasphalts (MMM)	116
Bild 2:	Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungsgemische	120
<u>Anlage 2</u>		
Bild 1-8:	Spaltzugkraft-Zeit Diagramm aller Varianten	127-134
Bild 9-16:	Bruchbilder und -arten beim Spaltzugversuch aller Varianten	135-142
<u>Anlage 3</u>		
Bild 1-16:	Impulskriechkurven aller Varianten (gemessen und mathematisch)	148-155



Bild 17-24: Dehnungsraten aller Varianten (mathematisch) 159-162

Anlage 4

- Bild 1: Temperaturentwicklung während der Bestrahlung  
(Lampenkonstellation 2, 2. Versuchsdurchlauf) 177
- Bild 2: Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen 60 bzw.  
70 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2 180
- Bild 3: Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei der Referenz-  
temperatur 60 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2 180
- Bild 4: Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei der Referenz-  
temperatur 70 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2 181

Anlage 5

- Bild 1: Mittlere Dehnungsraten bei den jeweiligen Temperaturzuständen  
der Referenztemperatur 60°C 187
- Bild 2: Mittlere Dehnungsraten bei den jeweiligen Temperaturzuständen  
der Referenztemperatur 70 °C 187



## 12 Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Chemische Zusammensetzung von Eisenhüttenschlacken in M.-% (DRISSEN, 2004)	9
Tab. 2: Typische mineralogische Zusammensetzung von Eisenhüttenschlacken (DRISSEN, 2004)	10
Tab. 3: Gegenüberstellung der Prüfbedingungen nach Arand und den Bedingungen nach Norm	26
Tab. 4: Bautechnische Kennwerte (BSN, 2003 bis 2005) und Anforderungen nach RG Min-StB (FGSV, 1993)	36
Tab. 5: Bautechnische Kennwerte (BSN, 2006 bis 2008) und Anforderungen nach TL Gestein-StB (FGSV, 2007)	37
Tab. 6: Bautechnische Kennwerte der verwendeten Moräne	39
Tab. 7: Kennwerte des verwendeten PmB 45 A	39
Tab. 8: Die Nomenklatur der Asphaltvarianten	42
Tab. 9: Rohdichten der Kornklassen aus Moräne und EOS	43
Tab. 10: Berechnung der Massen der EOS-Kornklassen	44
Tab. 11: Übersicht über den zeitlichen Ablauf der Vorbereitung und Prüfung der Wasserempfindlichkeit	51
Tab. 12: Temperaturbedingter Zuwachs der Verformungsgeschwindigkeit	64
Tab. 13: Qualitative Einschätzung des Einflusses der einzelnen Kornklassen im Splittbereich auf die Asphalteeigenschaften bzw. die Werte der diese charakterisierenden Untersuchungen	85
 <u>Anlage 1</u>	
Tab. 1: Ergebnisse der Eignungsprüfung - Zusammensetzung des 1. Referenzasphalts MMM (Mischung B)	117
Tab. 2: Massen der Ausgangsstoffe für die Herstellung von MPK	118

Tab. 3:	Zusammensetzung der untersuchten Asphalte	118
Tab. 4:	Dicke der Marshall-Probekörper von den Asphaltvarianten	119
Tab. 5:	Wasseraufnahme nach DIN 1996, Teil 8	121
Tab. 6:	Raumdicke der MPK	121
Tab. 7:	Verdichtungswiderstand des MPK bei 2 X 50 Verdichtungsschläge	122
Tab. 8:	Charakteristische Kennwerte der MPK	123

### Anlage 2

Tab. 1:	Probekörper-Raumdicke und Abmessungen	126
Tab. 2:	Zusammenstellung der Brucharten	143
Tab. 3:	Ergebnisse der Spatzugversuche ohne und mit Wasserlagerung	144
Tab. 4:	Untersuchung der Verträglichkeit der Einzelwerte (ITS) in Gruppen	145

### Anlage 3

Tab. 1:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 40 °C (simultane Auswertung)	156
Tab. 2:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 50 °C (simultane Auswertung)	157
Tab. 3:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 60 °C (simultane Auswertung)	158
Tab. 4-11:	Ergebnisse der Druckschwellversuche aller Varianten (mathematische Auswertung)	163-170
Tab. 12:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 40 °C (mathematische Auswertung)	171
Tab. 13:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 50 °C (mathematische Auswertung)	172
Tab. 14:	Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 60 °C (mathematische Auswertung)	173

Tab. 15:	Überprüfung auf Ausreißer innerhalb der Einzelwerte der mathematischen Dehnungsraten bei 50 °C	174
----------	--	-----

#### Anlage 4

Tab. 1:	Ergebnisse der Bestrahlungsstärkemessungen in W/qm	176
Tab. 2:	Ergebnisse der Bestrahlungsversuche bei Referenztemperatur 60 °C (Einzelwerte) in °C	178
Tab. 3:	Ergebnisse der Bestrahlungsversuche bei Referenztemperatur 70 °C (Einzelwerte) in °C	179
Tab. 4:	Ergebnisse der Bestrahlungsversuche (Mittelwerte) in °C	182
Tab. 5:	Ergebnisse der Bestrahlungsversuche, Standardabweichung in °C	183

#### Anlage 5

Tab. 1:	Mittlere Dehnungsraten in Promille/10.000n bei den Temperaturzustände der Referenztemperaturen 60 und 70 °C	186
Tab. 2:	Mittelwerte der Verdichtungswiderstände in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen	188
Tab. 3:	Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf den Verdichtungswiderstand	188
Tab. 4:	Mittelwerte der Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl bei der Prüftemperatur von 50 °C in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen	189
Tab. 5:	Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die Dehnungsrate (Prüftemperatur 50°C)	189
Tab. 6:	Mittelwerte der Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen von 60 und 70 °C in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1)	190
Tab. 7:	Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen von 60 und 70 °C	190

Tab. 8:	Mittelwerte der mittleren Dehnungsrate in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen	191
Tab. 9:	Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die mittlere Dehnungsrate	191

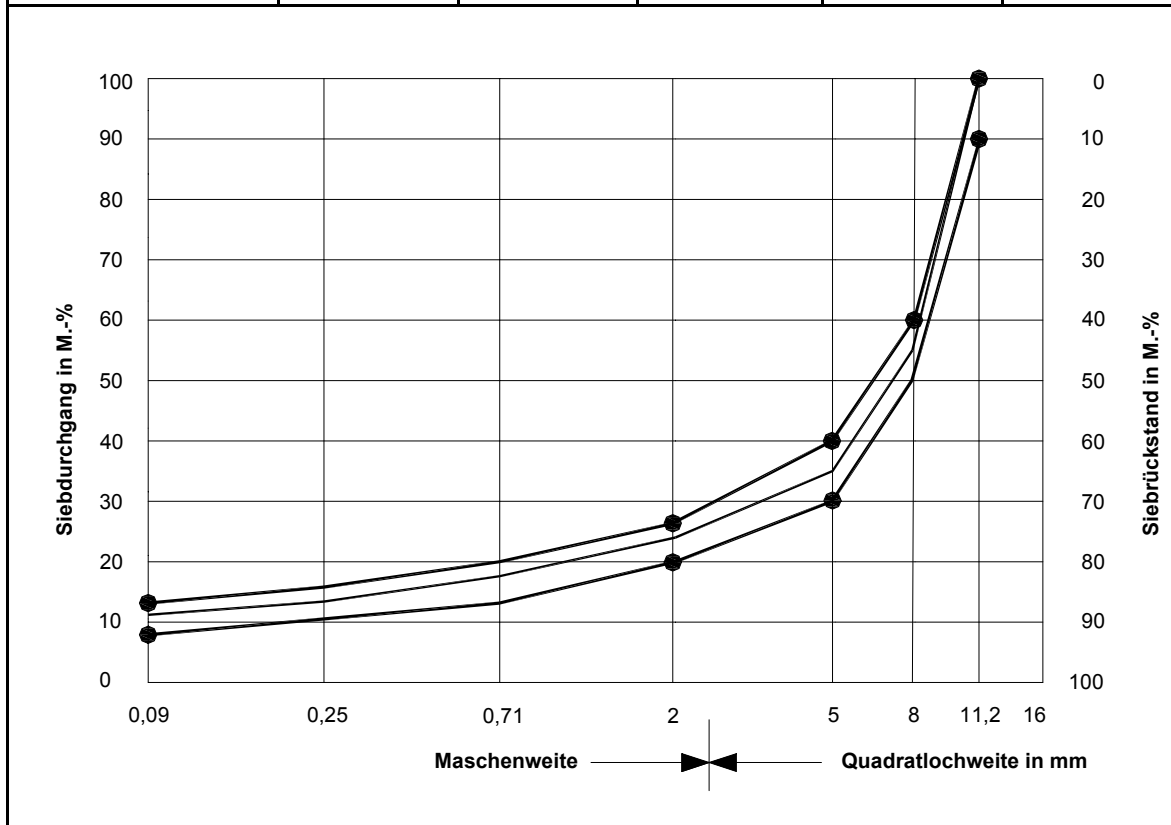
# **ANLAGEN**





# Anlage 1

Kornklasse	Kornanteil in M.-%		Rohdichte in g/cm <sup>3</sup>	Kornanteil in Vol.-%	
Gesteinsmehl < 0,09 mm	11,4	11,4	2,707	11,2	11,2
Sand 0,09 - 0,25 mm	2,0		2,648	2,0	
Sand 0,25 - 0,71 mm	4,2	13,2	2,653	4,2	13,2
Sand 0,71 - 2 mm	7,0		2,649	7,0	
Edelsplitt 2 - 5 mm	10,4		2,651	10,4	
Edelsplitt 5 - 8 mm	20,0	75,4	2,645	20,0	75,6
Edelsplitt 8 - 11 mm	45,0		2,643	45,2	
Summe	100,0	100,0		100,0	100,0



**Bild 1: Korngrößenverteilung des ersten Referenzasphalts (MMM)**

<b>Merkmal</b>	<b>Mischung A</b>			<b>Mischung B</b>			<b>Mischung C</b>		
Bindemittel (PmB 45) in M.-%	6,4			6,7			7,0		
Anteil des Bindemittels (Viatop 66) in M.-%	0,2								
Anteil des Faserstoffs (Viatop 66) in M.-%	0,3								
Bindemittelgehalt in M.-%	6,6			6,9			7,2		
Rohdichte des Bindemittels in g/cm <sup>3</sup>	1,044								
Rohdichte am Gesteinskörnungsgemisch in g/cm <sup>3</sup>	2,658								
Rohdichte des Asphaltmischgutes (berechnet) in g/cm <sup>3</sup>	2,412			2,402			2,392		
Raumdichte am MPK in g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,317	2,314	2,324	2,322	2,313	2,321	2,323	2,326
	2,318			2,320			2,323		
Hohlraumgehalt (berechnet) in Vol.-%	3,9			3,4			2,9		
Wasseraufnahme in Vol.-%	2,2			1,9			1,4		
Bindemittelanteil in Vol.-%	14,7			15,3			16		
Mineralstoffanteil in Vol.-%	81,4			81,3			81,1		
Fiktiver Hohlraumgehalt in Vol.-%	18,6			18,7			18,9		
Ausfüllungsgrad in %	79,0			81,8			84,7		
Verdichtungswiderstand D [21 Nm] (2 x 50 Verdichtungsschläge)	28,7			28,6			27,8		
Verformungswiderstand (Dehnungsrate in ‰/10.000n)	8,1	9,0	10,8	5,0	8,3	4,4	14,0	9,1	7,1
<b>Ergebnis</b>	<b>9,3</b>			<b>5,9</b>			<b>10,1</b>		

**Tab.1: Ergebnisse der Eignungsprüfung - Zusammensetzung des 1. Referenzasphalts MMM (Mischung B)**

Ausgangsstoff	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
Bindemittel	80,7	80,7	80,7	80,7	80,7	80,7	80,7	80,7
Faserstoff	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Gesteinsmehl < 0,09 mm	124,4	124,4	124,4	124,4	124,4	124,4	124,4	124,4
Sand 0,09 - 0,25 mm	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8
Sand 0,25 - 0,71 mm	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8	45,8
Sand 0,71 - 2 mm	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4	76,4
<b>Edelsplitt 2 - 5 mm</b>	<b>113,5</b>	<b>148,3</b>	<b>113,5</b>	<b>148,3</b>	<b>113,5</b>	<b>148,3</b>	<b>113,5</b>	<b>148,3</b>
<b>Edelsplitt 5 - 8 mm</b>	<b>218,1</b>	<b>218,1</b>	<b>285,5</b>	<b>285,5</b>	<b>218,1</b>	<b>218,1</b>	<b>285,5</b>	<b>285,5</b>
<b>Edelsplitt 8 - 11 mm</b>	<b>491,0</b>	<b>491,0</b>	<b>491,0</b>	<b>491,0</b>	<b>646,0</b>	<b>646,0</b>	<b>646,0</b>	<b>646,0</b>
Gesteinskörnungsgemisch	1091,0	1125,8	1158,4	1193,2	1246,0	1280,8	1313,4	1348,2
Einwaage für ein MPK	1175,6	1210,4	1243,0	1277,8	1330,6	1365,4	1398,0	1432,8

**Tab. 2: Massen der Ausgangsstoffe für die Herstellung von MPK**

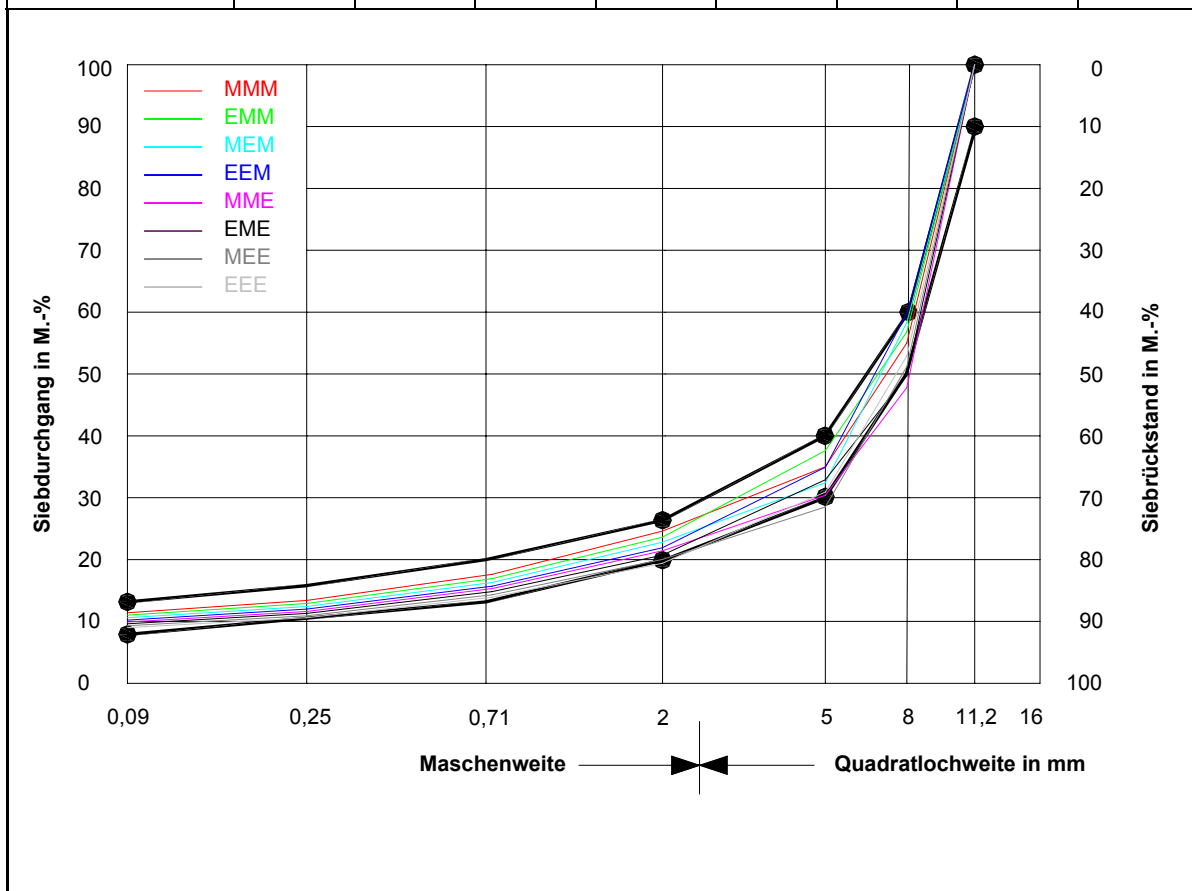
Anteil	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Bindemittel	6,9	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,8	5,6
Gesteinskörnungsgemisch	93,1	93,3	93,5	93,7	93,9	94,1	94,2	94,4
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

**Tab. 3: Zusammensetzung der untersuchten Asphalte**

Dicke MPK	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Einzelwert X1	64,0	63,5	63,3	62,6	64,7	64,3	63,6	63,6
Einzelwert X2	63,5	64,0	62,7	63,2	64,7	64,2	63,6	63,5
Einzelwert X3	63,8	63,8	63,5	63,7	64,6	64,8	63,7	64,3
Einzelwert X4	63,3	64,3	62,1	62,5	64,2	63,7	62,6	63,0
Einzelwert X5	63,0	64,0	62,7	62,8	64,3	64,2	63,7	63,1
Einzelwert X6	63,5	64,0	62,5	63,1	64,2	64,0	63,5	63,2
Einzelwert X7	63,0	63,8	62,4	63,8	63,5	64,0	62,7	62,9
Einzelwert X8	63,0	63,5	62,9	63,2	64,0	64,0	63,0	63,6
Einzelwert X9	63,2	63,9	62,7	63,0	63,5	65,0	63,4	63,6
Einzelwert X10	65,0	65,0	64,0	63,3	64,6	65,1	64,6	64,3
Einzelwert X11	65,3	64,4	64,1	63,7	64,3	64,7	64,3	64,4
Einzelwert X12	64,9	64,8	63,8	64,4	64,8	64,0	64,1	64,9
Einzelwert X13	64,8	64,5	64,0	63,6	64,1	65,0	64,0	64,5
Einzelwert X14	64,4	64,5	64,3	63,7	64,7	65,2	64,1	64,7
Einzelwert X15	64,6	64,7	63,9	64,7	64,9	64,0	64,1	64,4
<b>Mittelwert</b>	64,0	64,2	63,3	63,4	64,3	64,4	63,7	63,9
Standardabweichung	0,815	0,462	0,726	0,616	0,437	0,498	0,572	0,664

**Tab. 4: Dicke der Marshall-Probekörper von den Asphaltvarianten**

Sieböffnung	Siebdurchgang in M.-%							
	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
0,09 mm	11,4	11,0	10,7	10,4	10,0	9,7	9,5	9,2
0,25 mm	13,4	13,0	12,6	12,3	11,7	11,4	11,1	10,8
0,71 mm	17,6	17,1	16,6	16,1	15,4	15,0	14,6	14,2
2 mm	24,6	23,8	23,2	22,5	21,5	21,0	20,4	19,9
5 mm (M/E)	35,0	37,0	33,0	34,9	30,7	32,5	29,1	30,9
8 mm (M/E)	55,0	56,4	57,6	58,9	48,2	49,6	50,8	52,1
11 mm (M/E)	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0



**Bild 2: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungsgemische**

Wasseraufnahme	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
1. Einzelwert	1,9	2,4	2,5	2,6	5,0	5,8	5,2	5,7
2. Einzelwert	2,0	2,4	2,3	3,0	4,5	5,7	5,7	6,2
3. Einzelwert	1,9	2,5	2,6	3,0	5,0	5,3	5,5	6,1
<b>Ergebnis</b>	<b>1,9</b>	<b>2,4</b>	<b>2,5</b>	<b>2,9</b>	<b>4,8</b>	<b>5,6</b>	<b>5,5</b>	<b>6,0</b>

**Tab. 5: Wasseraufnahme nach DIN 1996, Teil 8**

Raumdichte	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
Einzelwert X1	2,316	2,401	2,468	2,573	2,613	2,700	2,787	2,860
Einzelwert X2	2,324	2,394	2,480	2,553	2,613	2,700	2,793	2,888
Einzelwert X3	2,322	2,400	2,473	2,554	2,616	2,689	2,799	2,853
Einzelwert X4	2,324	2,387	2,508	2,576	2,640	2,734	2,826	2,887
Einzelwert X5	2,322	2,399	2,486	2,574	2,637	2,707	2,797	2,869
Einzelwert X6	2,313	2,399	2,492	2,560	2,643	2,706	2,799	2,877
Einzelwert X7	2,330	2,413	2,487	2,554	2,641	2,727	2,819	2,888
Einzelwert X8	2,334	2,404	2,482	2,560	2,635	2,716	2,820	2,888
Einzelwert X9	2,322	2,404	2,488	2,571	2,650	2,710	2,807	2,874
Einzelwert X10	2,318	2,386	2,484	2,566	2,641	2,702	2,806	2,858
Einzelwert X11	2,303	2,388	2,477	2,557	2,638	2,686	2,801	2,867
Einzelwert X12	2,312	2,385	2,484	2,543	2,627	2,718	2,815	2,855
Einzelwert X13	2,312	2,388	2,478	2,563	2,638	2,733	2,809	2,858
Einzelwert X14	2,321	2,387	2,463	2,567	2,634	2,702	2,821	2,860
Einzelwert X15	2,311	2,381	2,485	2,538	2,615	2,687	2,804	2,868
<b>Mittelwert</b>	2,319	2,394	2,482	2,561	2,632	2,708	2,807	2,870
Standardabweichung	0,008	0,009	0,011	0,011	0,012	0,015	0,011	0,013

**Tab. 6: Raumdichte der MPK**

D	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]	[21 Nm]
Einzelwert X1	29,1	28,6	29,1	31,6	33,6	32,8	35,8	36,1
Einzelwert X2	30,5	29,5	28,0	27,7	33,0	32,2	35,4	37,4
Einzelwert X3	31,4	31,2	30,3	35,4	36,8	33,9	27,5	35,8
Einzelwert X4	27,9	29,4	33,1	32,4	37,0	39,6	37,5	38,5
Einzelwert X5	28,0	nicht erfasst	32,5	32,5	37,9	37,6	31,6	39,3
Einzelwert X6	29,9	31,9	32,4	36,1	32,9	37,2	33,5	39,0
Einzelwert X7	30,5	30,1	29,3	34,3	34,3	35,0	33,7	38,9
Einzelwert X8	26,7	30,1	30,7	30,4	35,8	36,0	nicht erfasst	37,2
Einzelwert X9	30,3	31,4	28,1	32,1	35,1	37,6	nicht erfasst	35,9
Einzelwert X10	29,7	29,7	31,2	31,6	34,8	37,3	33,8	40,7
Einzelwert X11	29,5	30,2	31,7	43,4	32,5	39,4	34,4	39,8
Einzelwert X12	27,1	29,6	33,2	32,8	30,5	34,7	38,2	38,4
Einzelwert X13	29,6	21,1	29,2	30,9	35,7	38,9	36,3	43,0
Einzelwert X14	29,2	31,0	31,6	34,3	37,4	36,4	47,1	38,3
Einzelwert X15	29,2	29,8	29,1	29,8	32,9	36,7	35,3	34,8
<b>Mittelwert</b>	29,2	29,5	30,6	33	34,7	36,4	35,4	38,2
Standardabweichung	1,315	2,590	1,766	3,603	2,118	2,264	4,444	2,121

**Tab. 7: Verdichtungswiderstand des MPK bei 2 X 50 Verdichtungsschläge**



<b>Merkmal</b>	<b>MMM</b>	<b>EMM</b>	<b>MEM</b>	<b>EEM</b>	<b>MME</b>	<b>EME</b>	<b>MEE</b>	<b>EEE</b>
Bindemittelgehalt in M.-%	6,9	6,7	6,5	6,3	6,1	5,9	5,8	5,6
Rohdichte des Gesteinskörnungsgemisches in g/cm <sup>3</sup> (berechnet)	2,652	2,771	2,886	3,012	3,194	3,326	3,456	3,596
Rohdichte des Asphaltmischgutes in g/cm <sup>3</sup> (berechnet)	2,397	2,495	2,589	2,692	2,838	2,946	3,047	3,163
Raumdichte am MPK in g/cm <sup>3</sup>	2,319	2,396	2,482	2,561	2,632	2,708	2,807	2,870
Hohlraumgehalt in Vol.-% (berechnet)	3,3	4,0	4,1	4,9	7,2	8,1	7,9	9,3
Wasseraufnahme in Vol.-%	1,9	2,4	2,5	2,9	4,8	5,6	5,5	6,0
Bindemittelanteil in Vol.-%	15,3	15,4	15,5	15,5	15,4	15,3	15,6	15,4
Mineralstoffanteil in Vol.-%	81,4	80,7	80,4	79,7	77,4	76,6	76,5	75,3
Fiktiver Hohlraumgehalt in Vol.-%	18,6	19,3	19,6	20,3	22,6	23,4	23,5	24,7
Ausfüllungsgrad in %	82,4	79,5	78,9	76,1	68,0	65,5	66,4	62,4
Verdichtungswiderstand D [21 Nm] (2 X 50 Verdichtungsschläge)	29,2	29,5	30,6	33,0	34,7	36,4	35,4	38,2

**Tab. 8: Charakteristische Kennwerte der MPK**



## **Anlage 2**

Variante	Zustand	Probe	Raumdicthe (Einzelwert)	Raumdicthe (Mittelwert)	a < 0,03	Länge L (Einzelwert)	Länge L (Mittelwert)	a <sub>L</sub> < 5	Durchmesser (Einzelwert)	Durchmesser (Mittelwert)	a <sub>D</sub> < 5
-	-	-	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
EEE	Wasser- gesättigt	2	2,858	2,860	0,002	64,7	64,8	0,3	101,5	101,5	0,1
		3	2,867			64,7			101,5		
		6	2,855			65,1			101,4		
	Trocken	1	2,858	2,862		64,5	64,5		101,7		
		4	2,860			64,7			101,6		
		5	2,868			64,4			101,6		
MEE	Wasser- gesättigt	1	2,806	2,807	0,004	65,0	64,5	0,4	101,5	101,5	0,0
		2	2,801			64,5			101,5		
		3	2,815			64,1			101,5		
	Trocken	4	2,809	2,811		64,0	64,1		101,5		
		5	2,821			64,1			101,4		
		6	2,804			64,1			101,5		
EME	Wasser- gesättigt	2	2,702	2,702	0,005	65,1	65,1	0,4	101,6	101,5	0,0
		4	2,686			65,5			101,6		
		6	2,718			64,8			101,4		
	Trocken	1	2,733	2,707		64,0	64,7		101,6		
		3	2,702			65,0			101,4		
		5	2,687			65,2			101,5		
MME	Wasser- gesättigt	2	2,641	2,635	0,006	64,0	64,5	0,1	101,4	101,5	0,0
		3	2,638			64,9			101,5		
		5	2,627			64,7			101,5		
	Trocken	1	2,638	2,629		64,1	64,6		101,6		
		4	2,634			64,7			101,5		
		6	2,615			64,9			101,4		
EEM	Wasser- gesättigt	1	2,566	2,555	0,001	63,8	64,2	0,2	101,4	101,5	0,1
		3	2,557			64,1			101,6		
		6	2,543			64,7			101,5		
	Trocken	2	2,563	2,556		63,6	64,0		101,5		
		4	2,567			63,7			101,4		
		5	2,538			64,7			101,4		
MEM	Wasser- gesättigt	2	2,484	2,482	0,007	64,1	64,1	0,0	101,5	101,5	0,1
		3	2,477			64,2			101,5		
		4	2,484			64,0			101,6		
	Trocken	1	2,478	2,475		64,0	64,1		101,5		
		5	2,463			64,3			101,4		
		6	2,485			63,9			101,4		
EMM	Wasser- gesättigt	3	2,386	2,386	0,001	65,3	65,1	0,5	101,5	101,5	0,1
		4	2,388			65,1			101,6		
		6	2,385			65,0			101,5		
	Trocken	1	2,388	2,385		64,5	64,6		101,4		
		2	2,387			64,5			101,4		
		5	2,381			64,7			101,4		
MMM	Wasser- gesättigt	1	2,318	2,311	0,004	65,0	65,1	0,5	101,5	101,4	0,2
		2	2,303			65,3			101,5		
		5	2,312			64,9			101,3		
	Trocken	3	2,312	2,315		64,8	64,6		101,6		
		4	2,321			64,4			101,5		
		6	2,311			64,6			101,6		

a - Unterschied in der durchschnittlichen Raumdicthe der beiden Gruppen

a<sub>L</sub> - Unterschied in der durchschnittlichen Länge der beiden Gruppen

a<sub>D</sub> - Unterschied in dem durchschnittlichen Durchmesser der beiden Gruppen

**Tab. 1: Probekörper-Raumdicthe und Abmessungen**

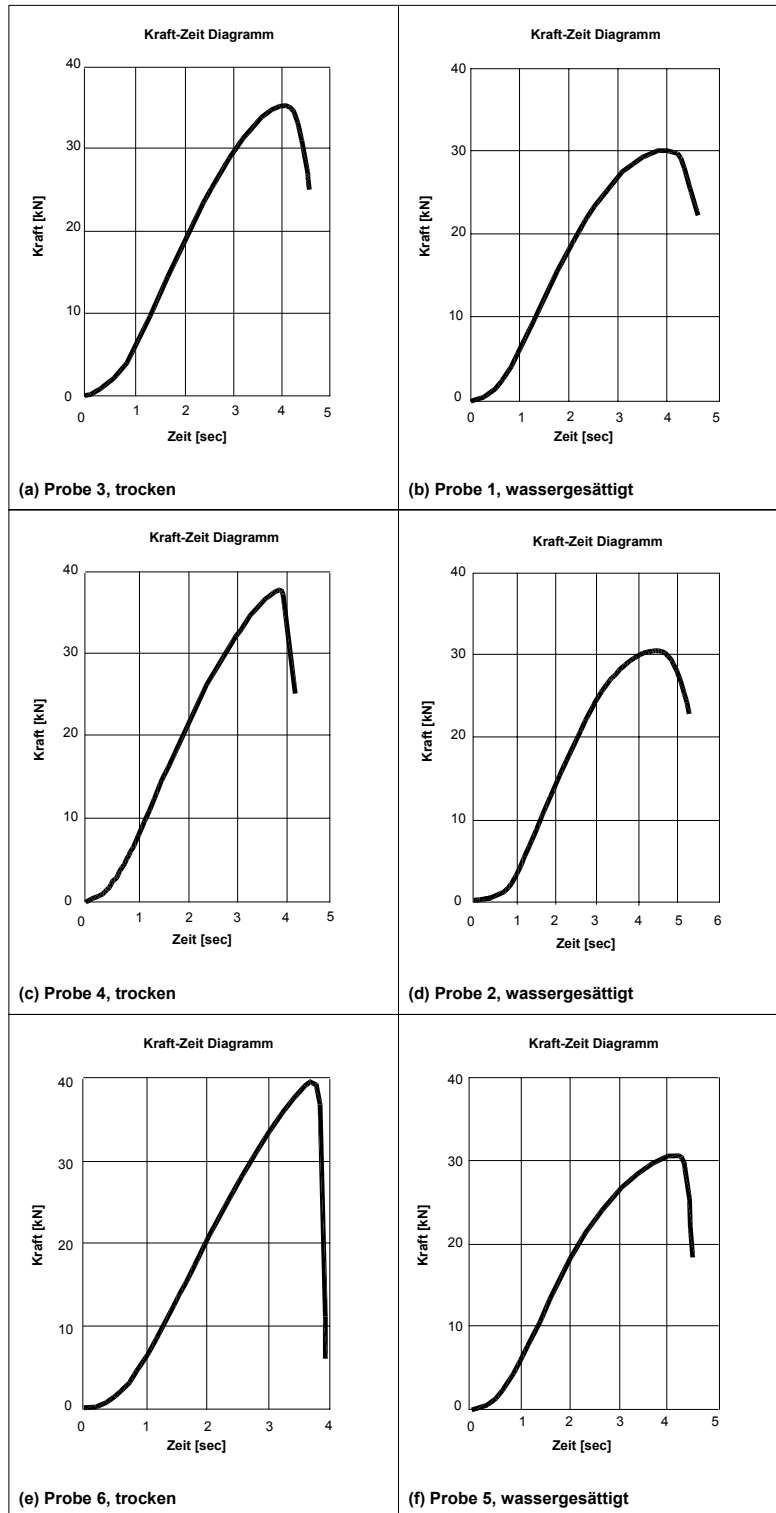


Bild 1: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm MMM

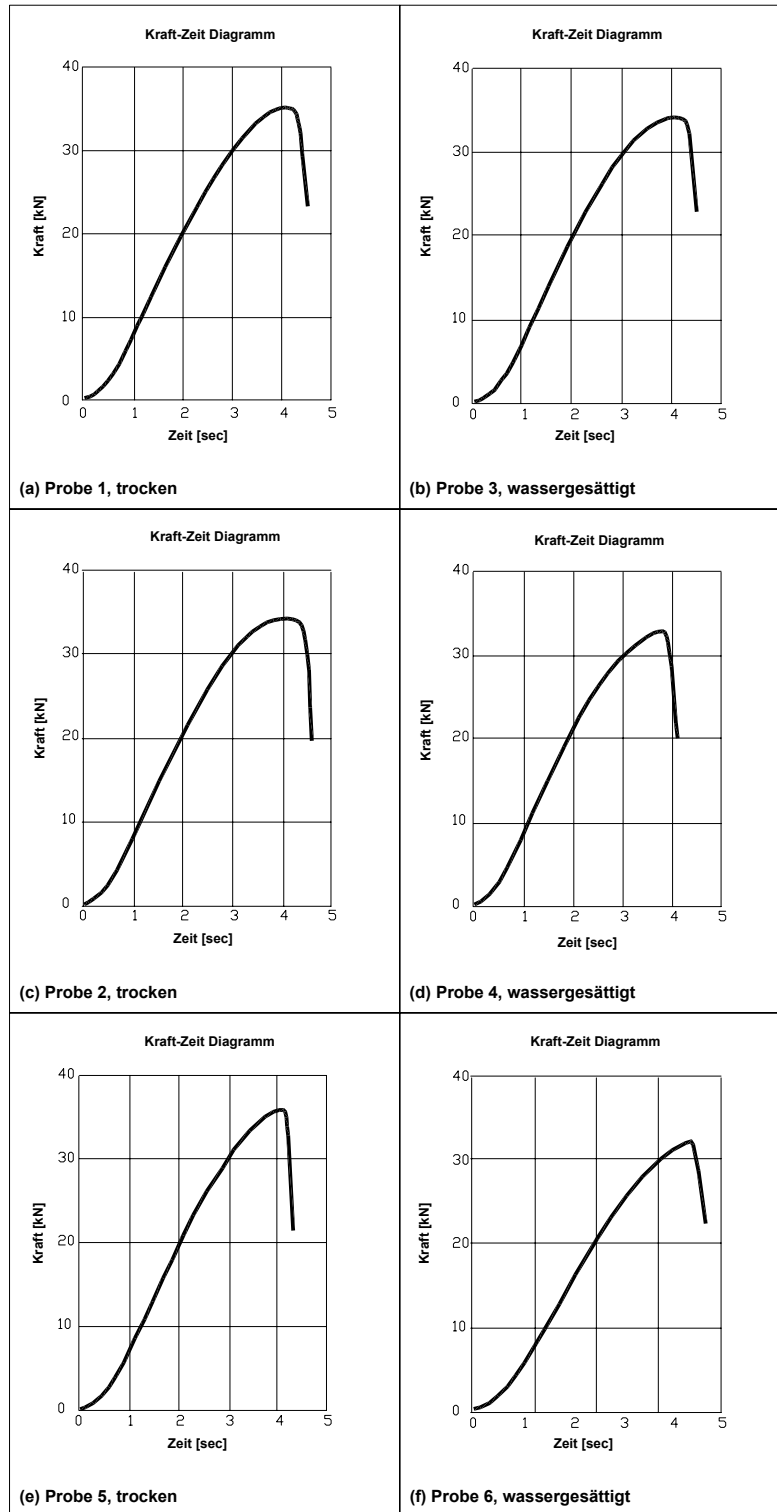
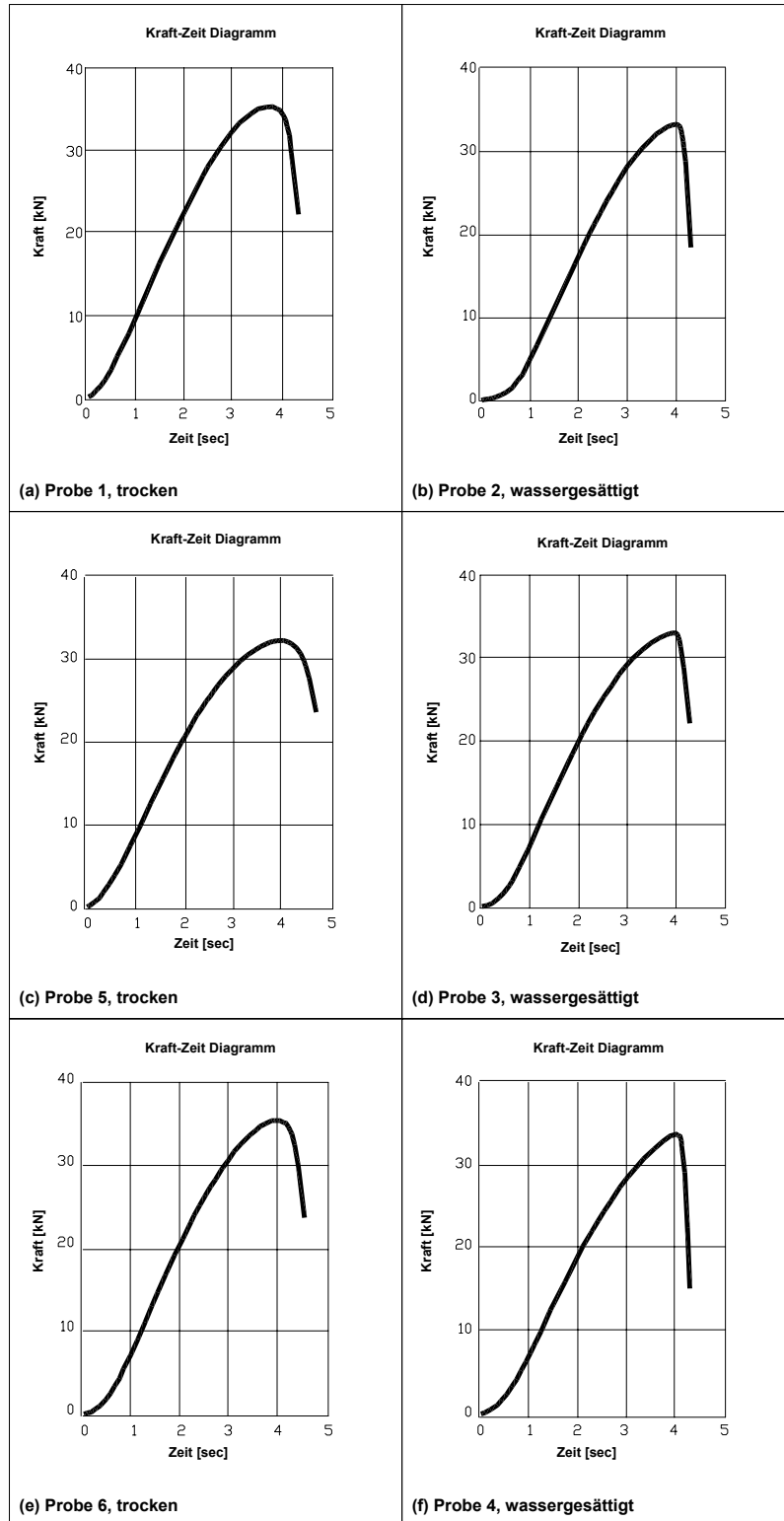
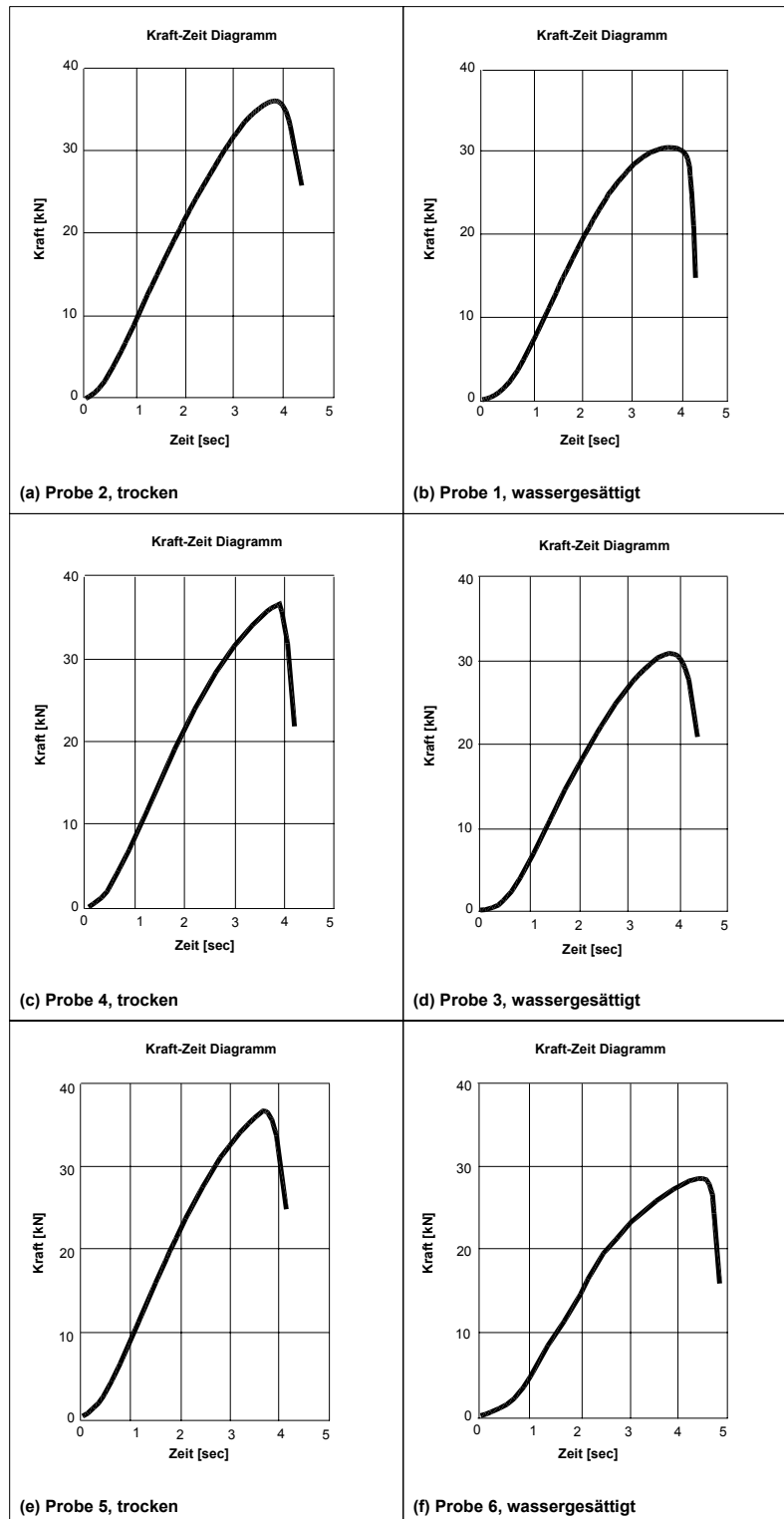


Bild 2: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm EMM

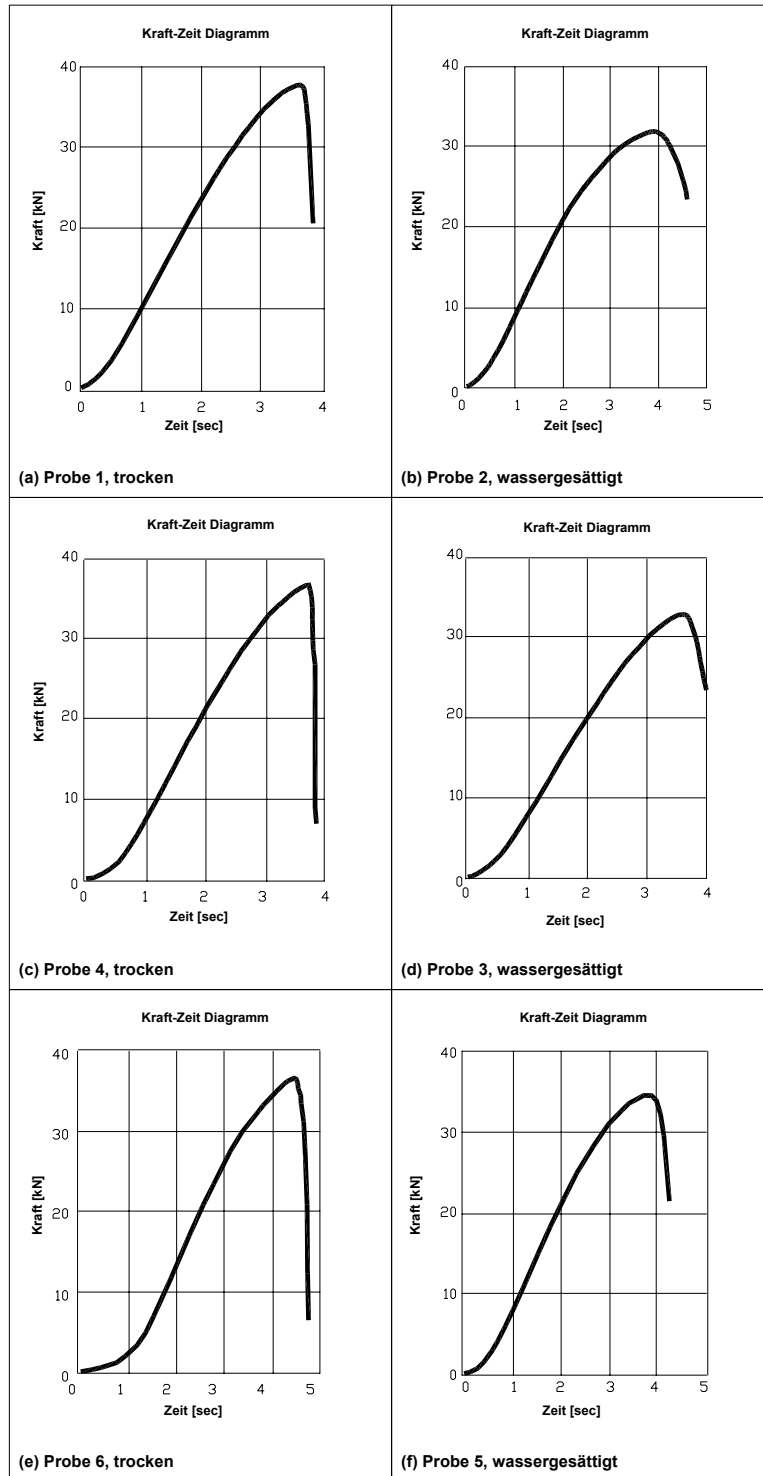


**Bild 3: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm MEM**

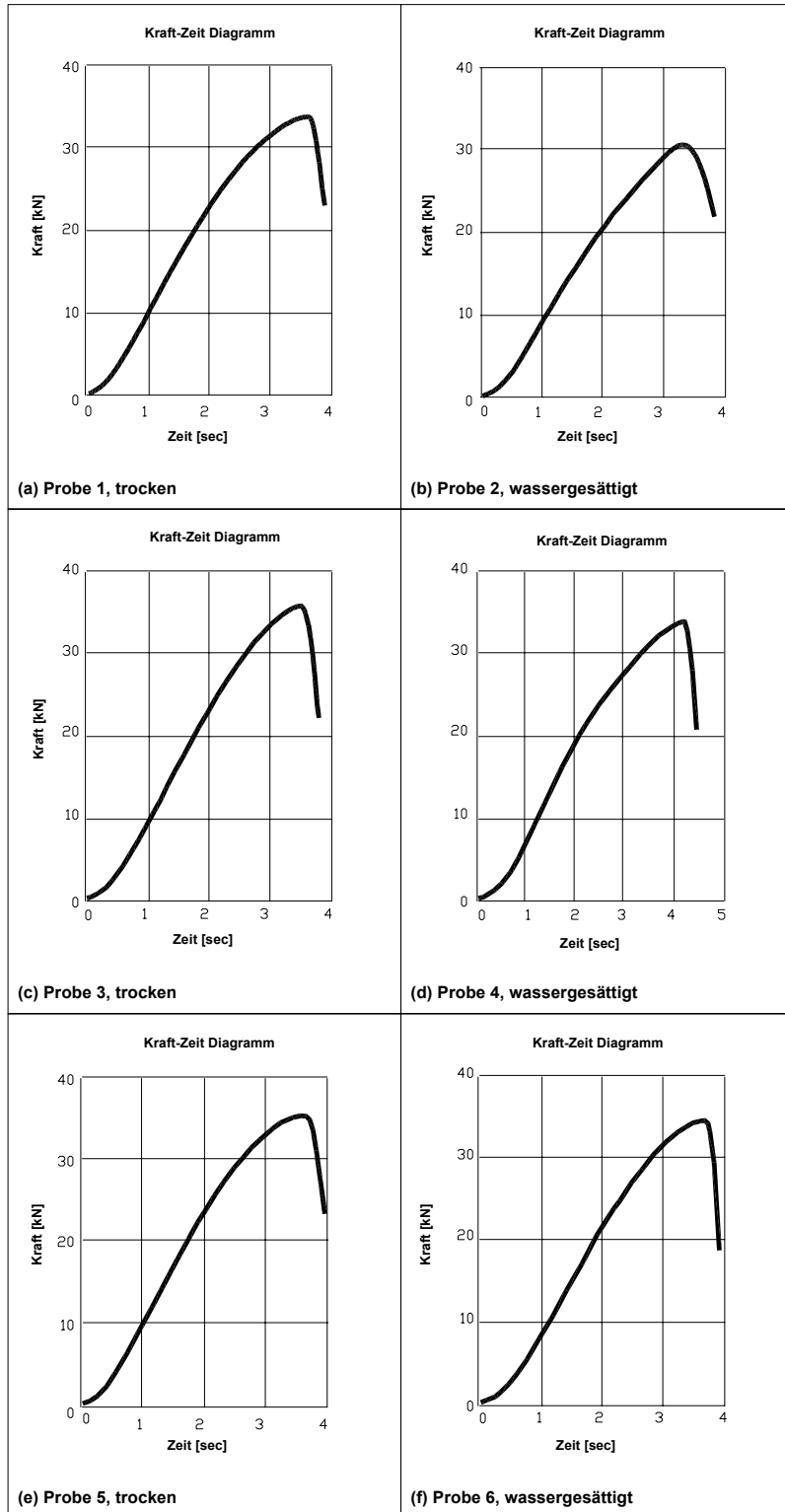


**Bild 4: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm EEM**

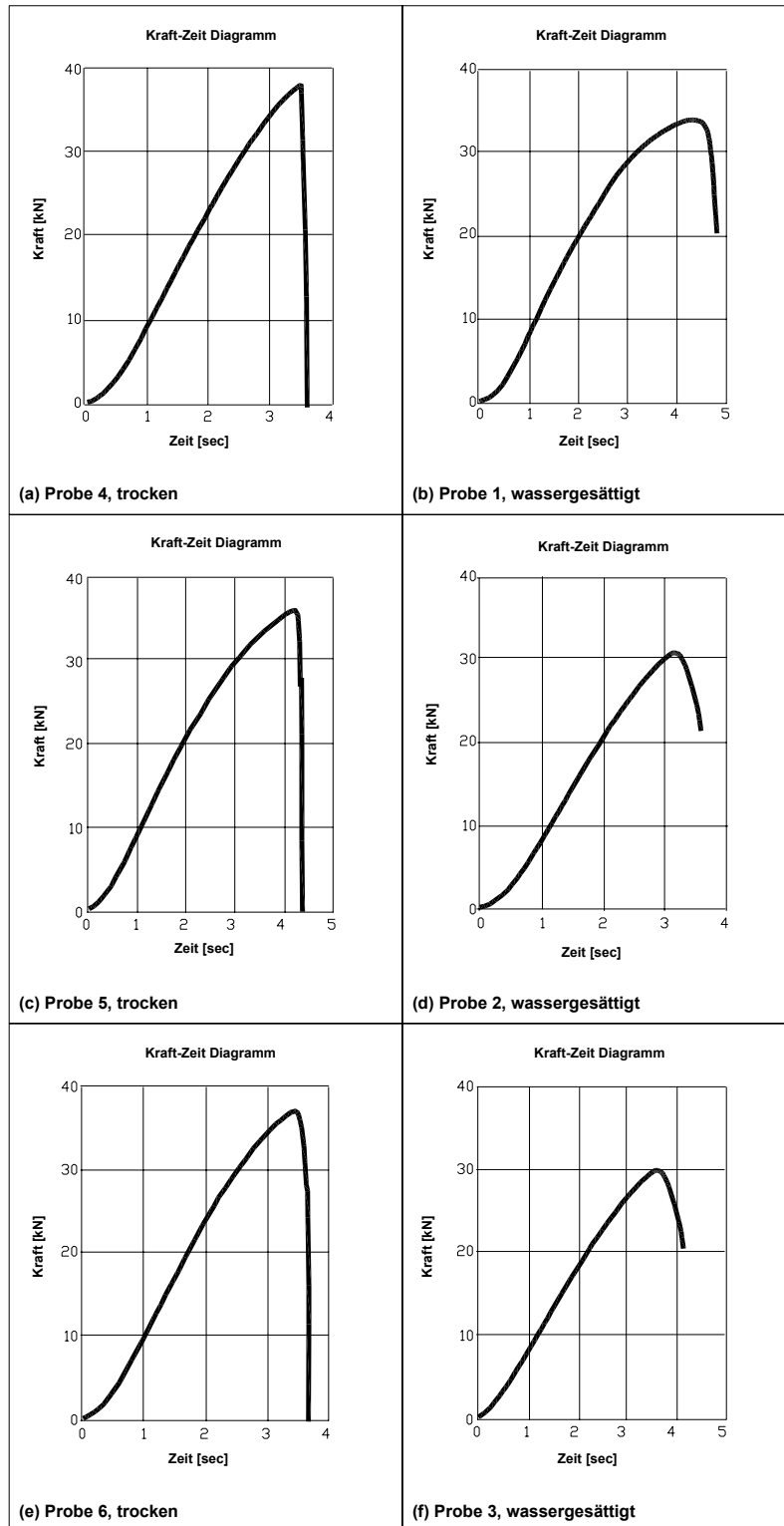




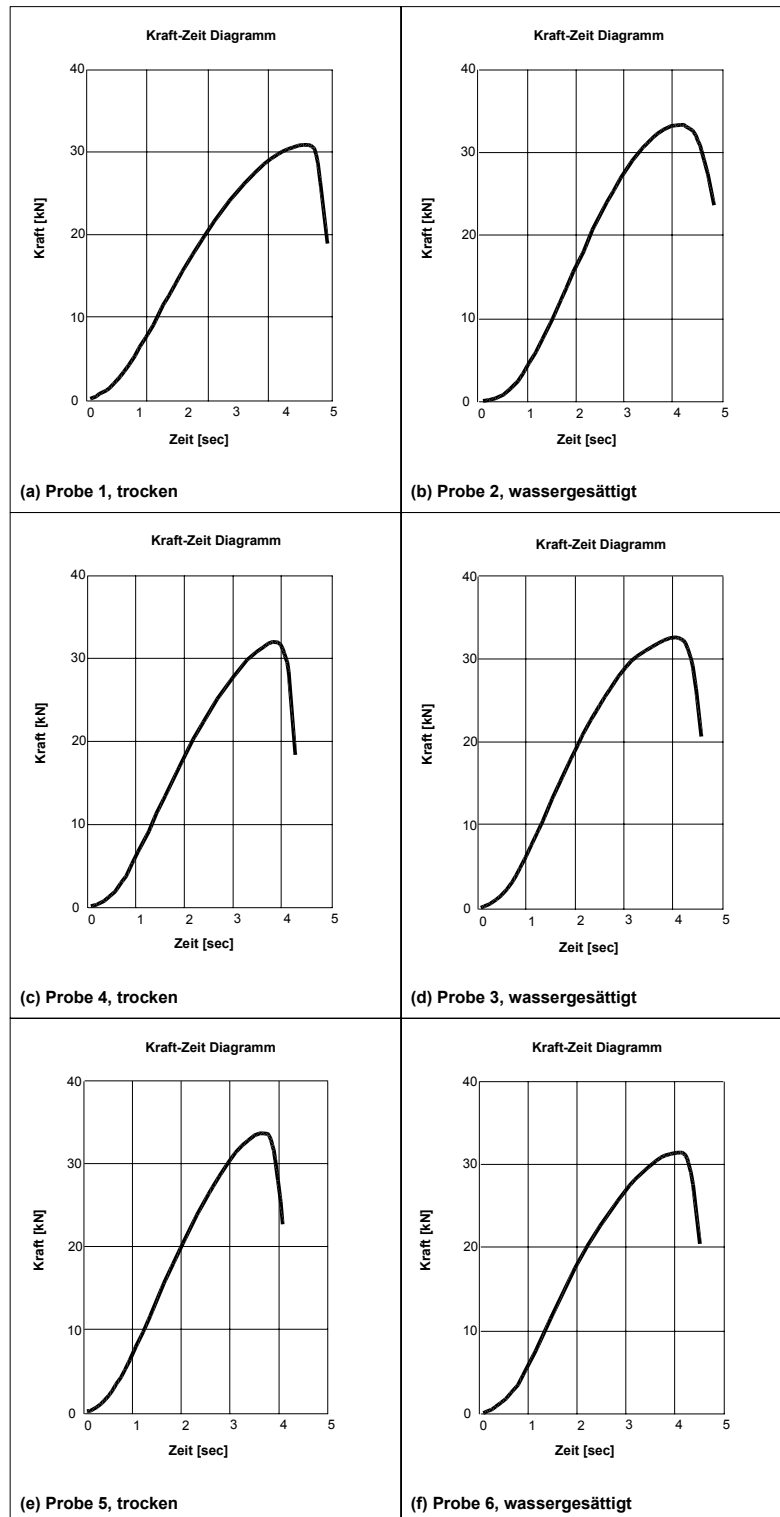
**Bild 5: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm MME**









**Bild 6: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm EME**



**Bild 7: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm MEE**












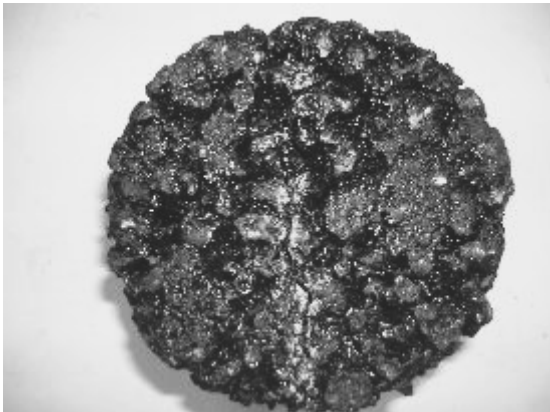


**Bild 8: Spaltzugkraft-Zeit Diagramm EEE**

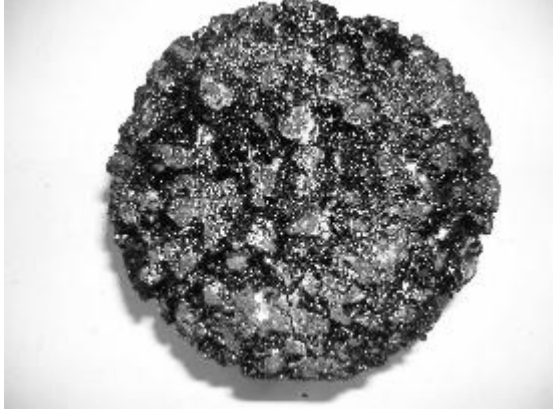





	
Bruchart: Zugbruch (a) Probe 3, trocken	Bruchart: Zugbruch (b) Probe 1, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (c) Probe 4, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 2, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 6, trocken	Bruchart: Zugbruch (f) Probe 5, wassergesättigt

**Bild 9: Bruchbilder\* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante MMM**



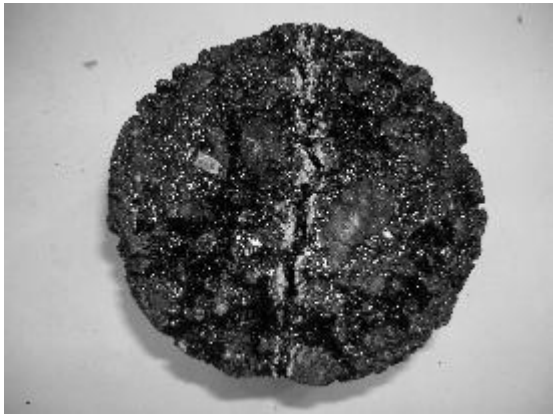



\* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.







	
Bruchart: Kombinationsbruch (a) Probe 1, trocken	Bruchart: Kombinationsbruch (b) Probe 3, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (c) Probe 2, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 4, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 5, trocken	Bruchart: Kombinationsbruch (f) Probe 6, wassergesättigt
<b>Bild 10: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante EMM</b>	
* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.	

	
Bruchart: Verformungsbruch (a) Probe 1, trocken	Bruchart: Zugbruch (b) Probe 2, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (c) Probe 5, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 3, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 6, trocken	Bruchart: Verformungsbruch (f) Probe 4, wassergesättigt
<b>Bild 11: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante MEM</b>	
* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.	

	
Bruchart: Kombinationsbruch (a) Probe 2, trocken	Bruchart: Zugbruch (b) Probe 1, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (c) Probe 4, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 3, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 5, trocken	Bruchart: Zugbruch (f) Probe 6, wassergesättigt
<b>Bild 12: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante EEM</b>	
* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.	



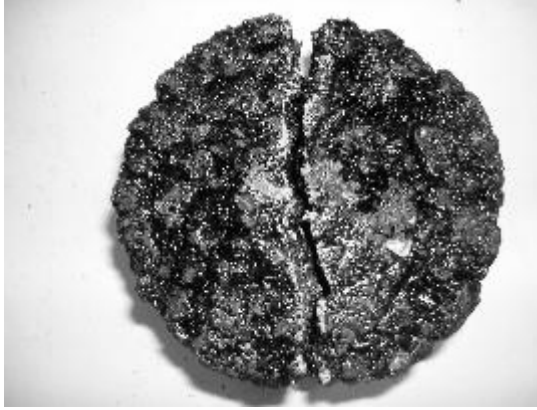
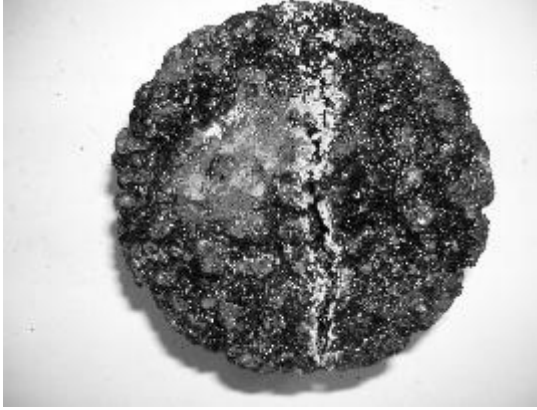




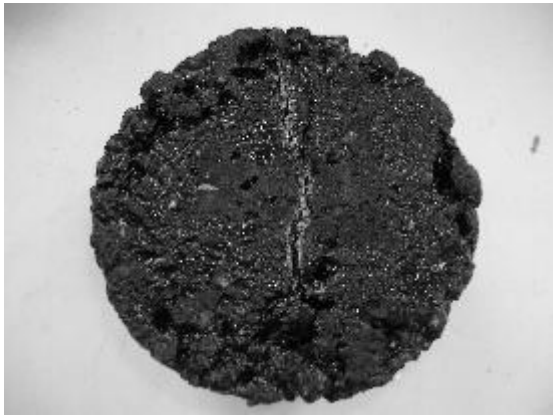
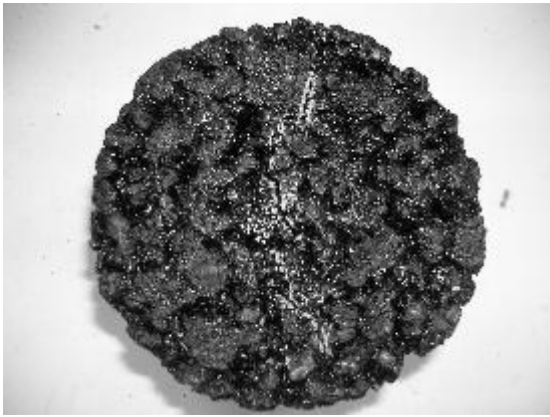




	
Bruchart: Zugbruch (a) Probe 1, trocken	Bruchart: Zugbruch (b) Probe 2, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (c) Probe 4, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 3, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 6, trocken	Bruchart: Zugbruch (f) Probe 5, wassergesättigt
<b>Bild 13: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante MME</b>	
* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.	

	
Bruchart: Zugbruch (a) Probe 1, trocken	Bruchart: Zugbruch (b) Probe 2, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (c) Probe 3, trocken	Bruchart: Verformungsbruch (d) Probe 4, wassergesättigt
	
Bruchart: Zugbruch (e) Probe 5, trocken	Bruchart: Kombinationsbruch (f) Probe 6, wassergesättigt

**Bild 14: Bruchbilder\* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante EME**

\* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.

	
<p>Bruchart: Zugbruch (a) Probe 4, trocken</p>	<p>Bruchart: Zugbruch (b) Probe 1, wassergesättigt</p>
	
<p>Bruchart: Zugbruch (c) Probe 5, trocken</p>	<p>Bruchart: Zugbruch (d) Probe 2, wassergesättigt</p>
	
<p>Bruchart: Zugbruch (e) Probe 6, trocken</p>	<p>Bruchart: Zugbruch (f) Probe 3, wassergesättigt</p>
<p><b>Bild 15: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante MEE</b> * Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.</p>	

	
Bruchart: Zugbruch (a) Probe 1, trocken	Bruchart: Kombinationsbruch (b) Probe 2, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (c) Probe 4, trocken	Bruchart: Zugbruch (d) Probe 3, wassergesättigt
	
Bruchart: Kombinationsbruch (e) Probe 5, trocken	Bruchart: Zugbruch (f) Probe 6, wassergesättigt
<b>Bild 16: Bruchbilder* und -arten beim Spaltzugversuch der Variante EEE</b>	
* Die Bruchlinien wurden für einen besseren Kontrast weiß gekennzeichnet.	

Variante	Zustand	Probe	Raumdichte (Einzelwert)	P	Bruchart	Bruchflächen- beschaffenheit	
						Anteil gebrochene Gesteinskörner	Anteil unversehrte Gesteinskörner
-	-	-	[g/cm <sup>3</sup> ]	[N]	-	[%]	[%]
EEE	Wasser- gesättigt	2	2,858	33.388	Kombinationsbruch	25	75
		3	2,867	32.633	Zugbruch	40	60
		6	2,855	31.539	Zugbruch	50	50
	Trocken	1	2,858	30.862	Zugbruch	30	70
		4	2,860	32.053	Kombinationsbruch	40	60
		5	2,868	33.876	Kombinationsbruch	40	60
MEE	Wasser- gesättigt	1	2,806	34.068	Zugbruch	30	70
		2	2,801	31.039	Zugbruch	40	60
		3	2,815	30.053	Zugbruch	20	80
	Trocken	4	2,809	38.227	Zugbruch	40	60
		5	2,821	36.199	Zugbruch	30	70
		6	2,804	37.252	Zugbruch	30	70
EME	Wasser- gesättigt	2	2,702	30.718	Zugbruch	50	50
		4	2,686	33.848	Zugbruch	40	60
		6	2,718	34.490	Kombinationsbruch	50	50
	Trocken	1	2,733	33.822	Zugbruch	50	50
		3	2,702	35.687	Kombinationsbruch	30	70
		5	2,687	35.146	Zugbruch	40	60
MME	Wasser- gesättigt	2	2,641	31.937	Zugbruch	25	75
		3	2,638	33.105	Zugbruch	25	75
		5	2,627	34.840	Zugbruch	50	50
	Trocken	1	2,638	37.945	Zugbruch	25	75
		4	2,634	36.969	Zugbruch	50	50
		6	2,615	36.777	Zugbruch	25	75
EEM	Wasser- gesättigt	1	2,566	30.577	Zugbruch	25	75
		3	2,557	31.041	Zugbruch	30	70
		6	2,543	28.073	Zugbruch	40	60
	Trocken	2	2,563	36.135	Kombinationsbruch	50	50
		4	2,567	36.744	Kombinationsbruch	25	75
		5	2,538	36.865	Zugbruch	30	70
MEM	Wasser- gesättigt	2	2,484	33.364	Zugbruch	25	75
		3	2,477	33.092	Zugbruch	25	75
		4	2,484	33.710	Verformungsbruch	25	75
	Trocken	1	2,478	35.286	Verformungsbruch	10	90
		5	2,463	32.402	Kombinationsbruch	10	90
		6	2,485	35.494	Zugbruch	10	90
EMM	Wasser- gesättigt	3	2,386	34.222	Kombinationsbruch	20	80
		4	2,388	32.990	Zugbruch	40	60
		6	2,385	32.476	Kombinationsbruch	20	80
	Trocken	1	2,388	35.173	Kombinationsbruch	25	75
		2	2,387	34.493	Zugbruch	40	60
		5	2,381	35.878	Zugbruch	20	80
MMM	Wasser- gesättigt	1	2,318	30.333	Zugbruch	20	80
		2	2,303	30.862	Zugbruch	10	90
		5	2,312	30.410	Zugbruch	10	90
	Trocken	3	2,312	35.711	Zugbruch	20	80
		4	2,321	37.444	Kombinationsbruch	10	90
		6	2,311	39.742	Zugbruch	40	60

Tab. 2: Zusammenstellung der Brucharten

Variante	Zustand	Pro- be	Herstellungs- datum	L	D	Prüfungs- datum	P	ITS		ITSR
								Einzelwert	Mittelwert	
-	-	-	-	[mm]	[mm]	-	[N]	[kPa]		[%]
EEE	Wasser- gesättigt	2	6.7.06	64,7	101,5	11.7.06	33.388	3.237	3.147	100,5
		3	6.7.06	64,7	101,5	11.7.06	32.633	3.163		
		6	6.7.06	65,1	101,4	11.7.06	31.539	3.042		
	Trocken	1	6.7.06	64,5	101,7	11.7.06	30.862	2.995	3.132	
		4	6.7.06	64,7	101,6	11.7.06	32.053	3.104		
		5	6.7.06	64,4	101,6	11.7.06	33.876	3.296		
MEE	Wasser- gesättigt	1	4.7.06	65,0	101,5	9.7.06	34.068	3.287	3.081	84,5
		2	4.7.06	64,5	101,5	9.7.06	31.039	3.018		
		3	4.7.06	64,1	101,5	9.7.06	30.053	2.939		
	Trocken	4	4.7.06	64,0	101,5	9.7.06	38.227	3.746	3.646	
		5	4.7.06	64,1	101,4	9.7.06	36.199	3.546		
		6	4.7.06	64,1	101,5	9.7.06	37.252	3.645		
EME	Wasser- gesättigt	2	3.7.06	65,1	101,6	8.7.06	30.718	2.957	3.179	94,1
		4	3.7.06	65,5	101,6	8.7.06	33.848	3.238		
		6	3.7.06	64,8	101,4	8.7.06	34.490	3.342		
	Trocken	1	3.7.06	64,0	101,6	8.7.06	33.822	3.311	3.380	
		3	3.7.06	65,0	101,4	8.7.06	35.687	3.447		
		5	3.7.06	65,2	101,5	8.7.06	35.146	3.381		
MME	Wasser- gesättigt	2	5.7.06	64,0	101,4	10.7.06	31.937	3.133	3.236	89,5
		3	5.7.06	64,9	101,5	10.7.06	33.105	3.199		
		5	5.7.06	64,7	101,5	10.7.06	34.840	3.377		
	Trocken	1	5.7.06	64,1	101,6	10.7.06	37.945	3.709	3.617	
		4	5.7.06	64,7	101,5	10.7.06	36.969	3.584		
		6	5.7.06	64,9	101,4	10.7.06	36.777	3.558		
EEM	Wasser- gesättigt	1	4.7.06	63,8	101,4	9.7.06	30.577	3.009	2.921	81,4
		3	4.7.06	64,1	101,6	9.7.06	31.041	3.034		
		6	4.7.06	64,7	101,5	9.7.06	28.073	2.721		
	Trocken	2	4.7.06	63,6	101,5	9.7.06	36.135	3.564	3.587	
		4	4.7.06	63,7	101,4	9.7.06	36.744	3.621		
		5	4.7.06	64,7	101,4	9.7.06	36.865	3.577		
MEM	Wasser- gesättigt	2	3.7.06	64,1	101,5	8.7.06	33.364	3.265	3.266	96,9
		3	3.7.06	64,2	101,5	8.7.06	33.092	3.233		
		4	3.7.06	64,0	101,6	8.7.06	33.710	3.300		
	Trocken	1	3.7.06	64,0	101,5	8.7.06	35.286	3.458	3.370	
		5	3.7.06	64,3	101,4	8.7.06	32.402	3.164		
		6	3.7.06	63,9	101,4	8.7.06	35.494	3.487		
EMM	Wasser- gesättigt	3	5.7.06	65,3	101,5	10.7.06	34.222	3.287	3.199	93,5
		4	5.7.06	65,1	101,6	10.7.06	32.990	3.175		
		6	5.7.06	65,0	101,5	10.7.06	32.476	3.134		
	Trocken	1	5.7.06	64,5	101,4	10.7.06	35.173	3.424	3.421	
		2	5.7.06	64,5	101,4	10.7.06	34.493	3.357		
		5	5.7.06	64,7	101,4	10.7.06	35.878	3.481		
MMM	Wasser- gesättigt	1	6.7.06	65,0	101,5	11.7.06	30.333	2.927	2.945	80,6
		2	6.7.06	65,3	101,5	11.7.06	30.862	2.964		
		5	6.7.06	64,9	101,3	11.7.06	30.410	2.945		
	Trocken	3	6.7.06	64,8	101,6	11.7.06	35.711	3.453	3.652	
		4	6.7.06	64,4	101,5	11.7.06	37.444	3.647		
		6	6.7.06	64,6	101,6	11.7.06	39.742	3.855		

Tab. 3: Ergebnisse der Spatzugversuche ohne und mit Wasserlagerung

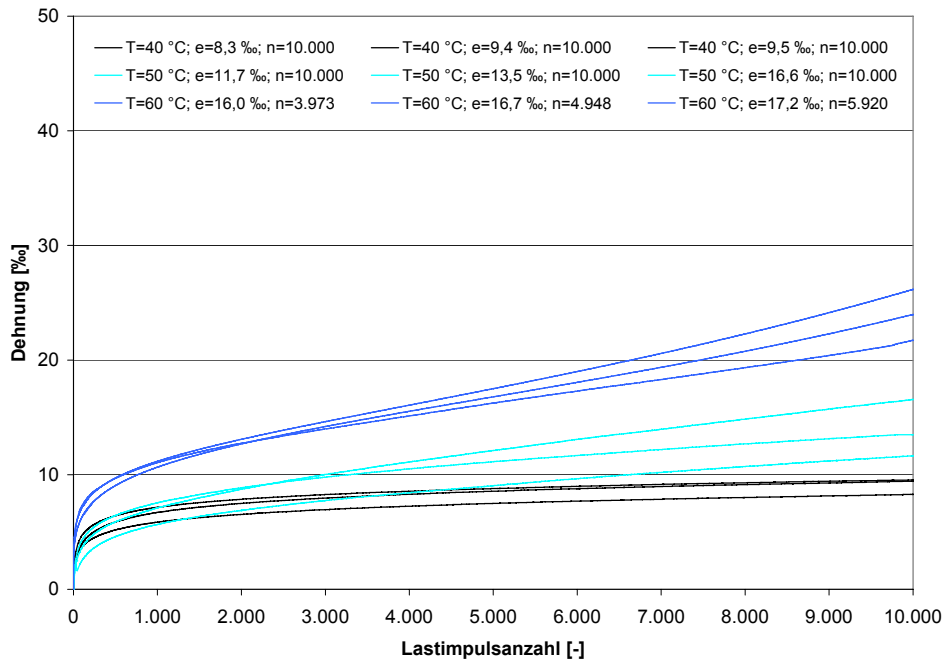
Variante	Zustand	Probe	ITS						
			Einzelwert (EW)	Mittelwert (MW)	Differenz EW a	a < 17 % MW	Standard- abweichung +/- s	S < 10% MW	
-	-	-							
EEE	Wasser- gesättigt	2	3.237	3.147	195	535	98	315	
		3	3.163						
		6	3.042						
	Trocken	1	2.995	3.132	301	532	152	313	
		4	3.104						
		5	3.296						
MEE	Wasser- gesättigt	1	3.287	3.081	348	524	182	308	
		2	3.018						
		3	2.939						
	Trocken	4	3.746	3.646	200	620	100	365	
		5	3.546						
		6	3.645						
EME	Wasser- gesättigt	2	2.957	3.179	385	540	199	318	
		4	3.238						
		6	3.342						
	Trocken	1	3.311	3.380	136	575	68	338	
		3	3.447						
		5	3.381						
MME	Wasser- gesättigt	2	3.133	3.236	244	550	126	324	
		3	3.199						
		5	3.377						
	trocken	1	3.709	3.617	151	615	81	362	
		4	3.584						
		6	3.558						
EEM	Wasser- gesättigt	1	3.009	2.921	313	497	174	292	
		3	3.034						
		6	2.721						
	Trocken	2	3.564	3.587	57	610	30	359	
		4	3.621						
		5	3.577						
MEM	Wasser- gesättigt	2	3.265	3.266	67	555	34	327	
		3	3.233						
		4	3.300						
	Trocken	1	3.458	3.370	323	573	179	337	
		5	3.164						
		6	3.487						
EMM	Wasser- gesättigt	3	3.287	3.199	153	544	79	320	
		4	3.175						
		6	3.134						
	Trocken	1	3.424	3.421	124	582	62	342	
		2	3.357						
		5	3.481						
MMM	Wasser- gesättigt	1	2.927	2.945	37	501	19	295	
		2	2.964						
		5	2.945						
	Trocken	3	3.453	3.652	402	621	201	365	
		4	3.647						
		6	3.855						

Tab. 4: Untersuchung der Verträglichkeit der Einzelwerte (ITS) in Gruppen

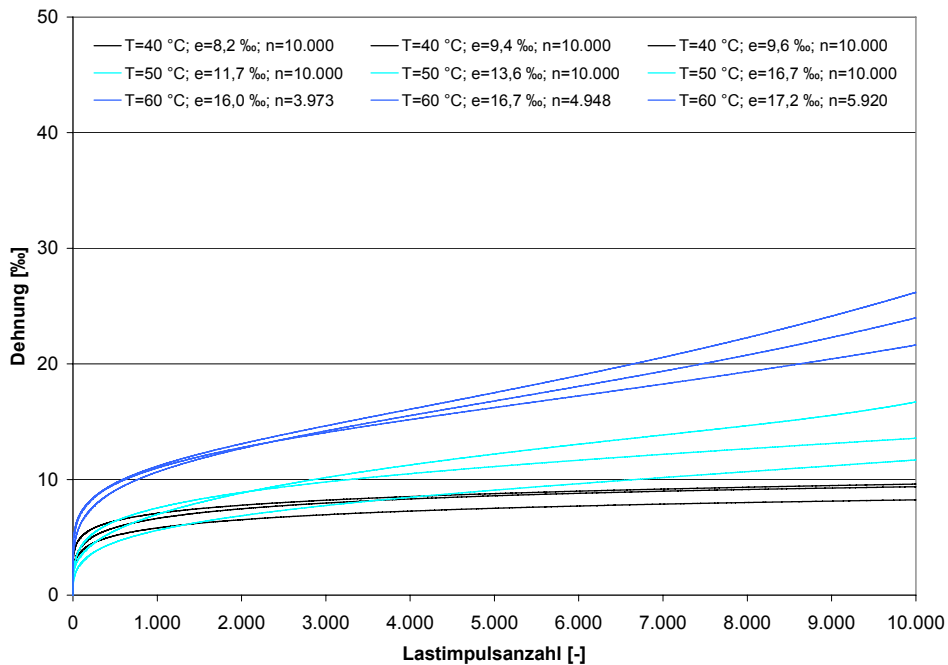




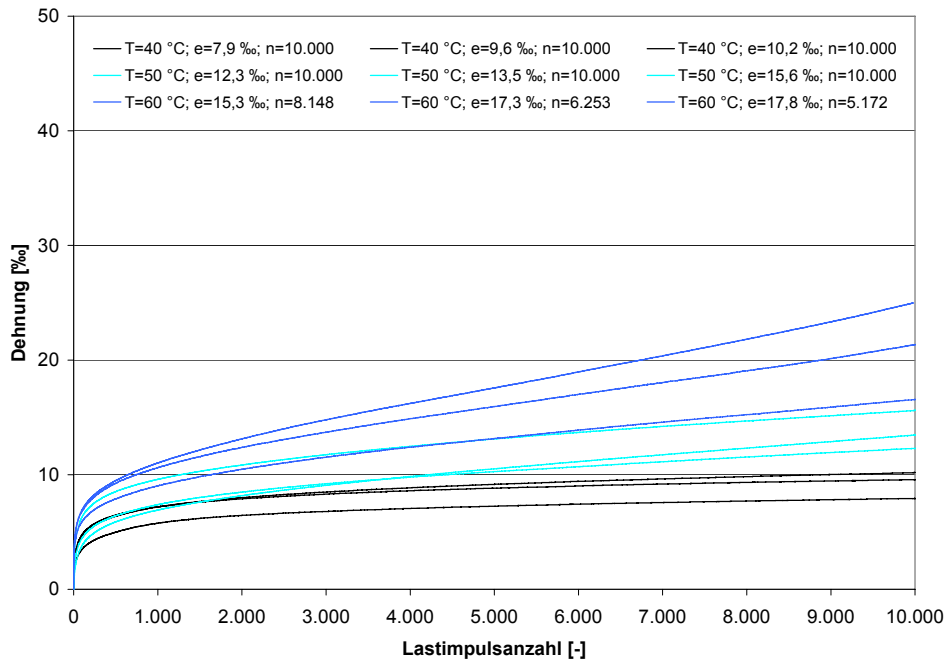
## **Anlage 3**



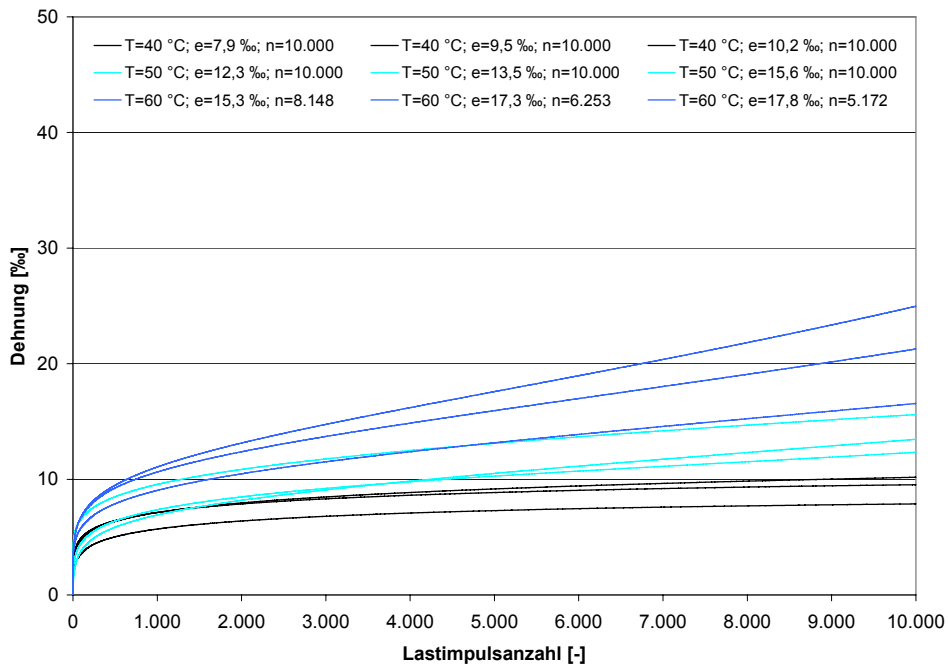
**Bild 1: Impulskriechkurven der Variante MMM (gemessen)**



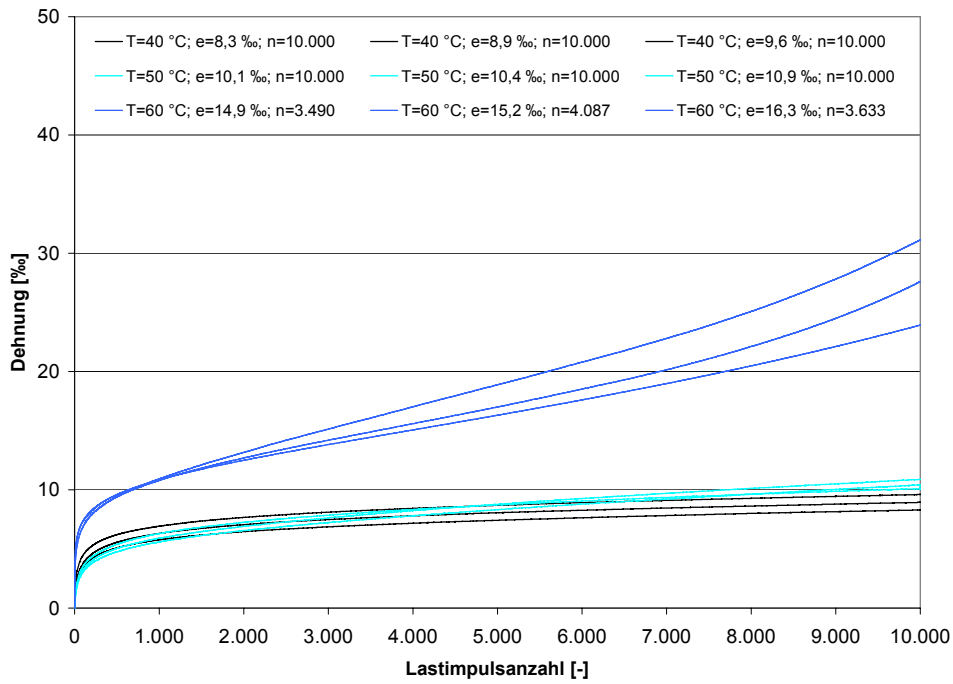
**Bild 2: Impulskriechkurven der Variante MMM (mathematisch)**



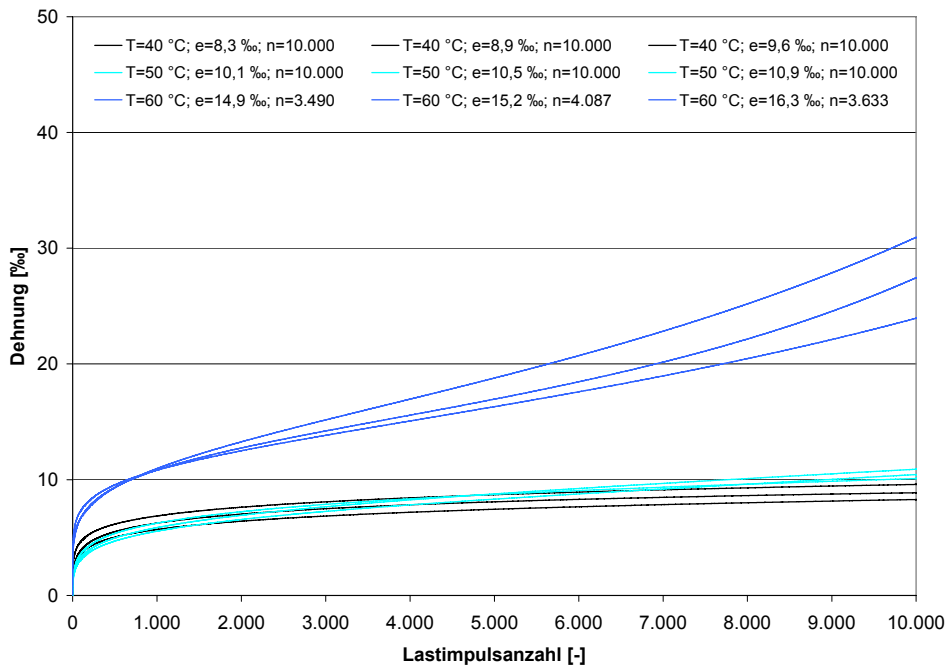
**Bild 3: Impulskriechkurven der Variante EMM (gemessen)**



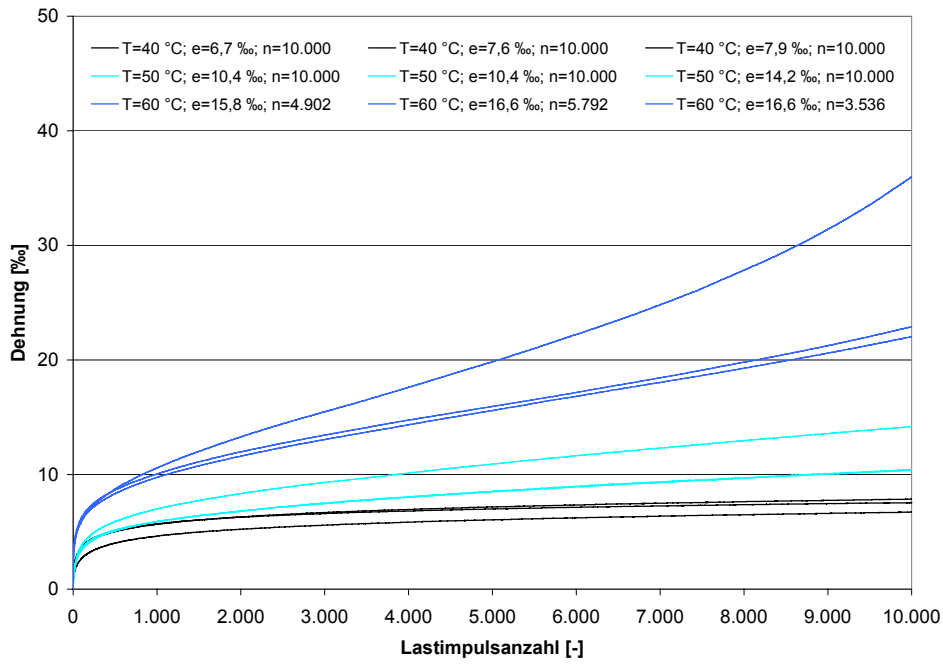
**Bild 4: Impulskriechkurven der Variante EMM (mathematisch)**



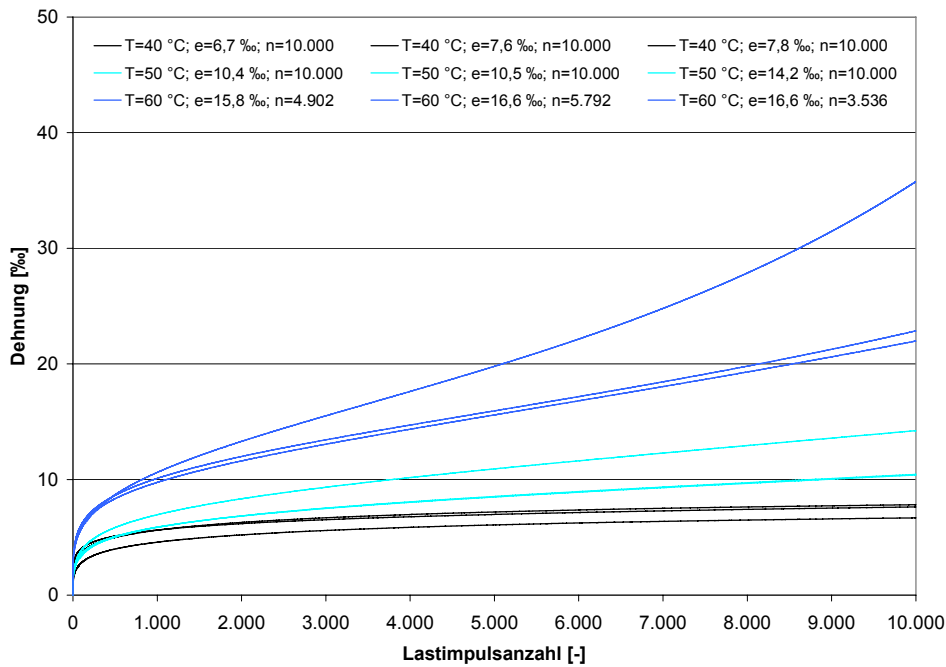
**Bild 5: Impulskriechkurven der Variante MEM (gemessen)**



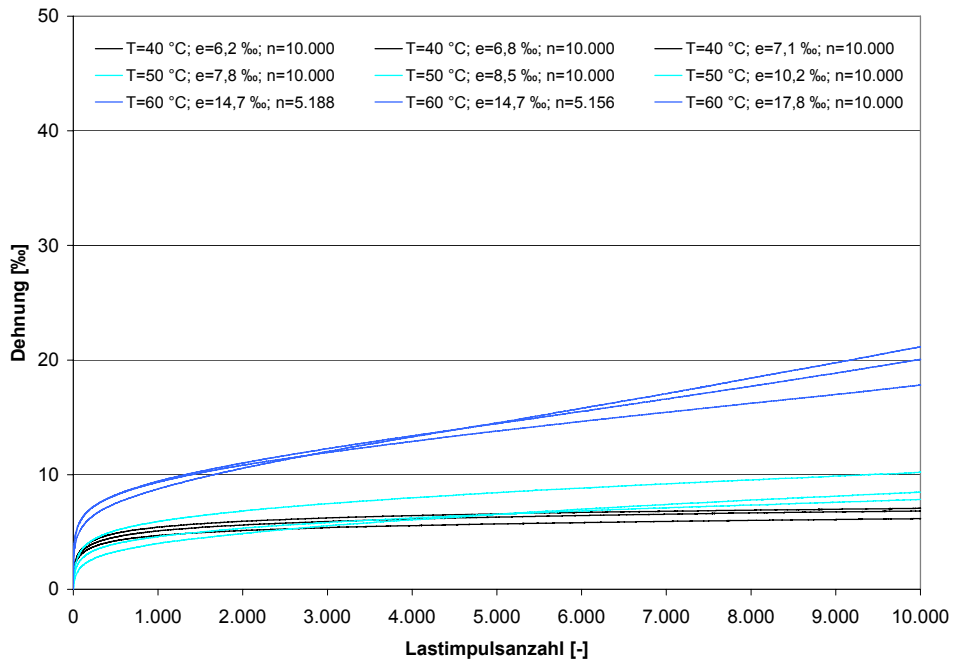
**Bild 6: Impulskriechkurven der Variante MEM (mathematisch)**



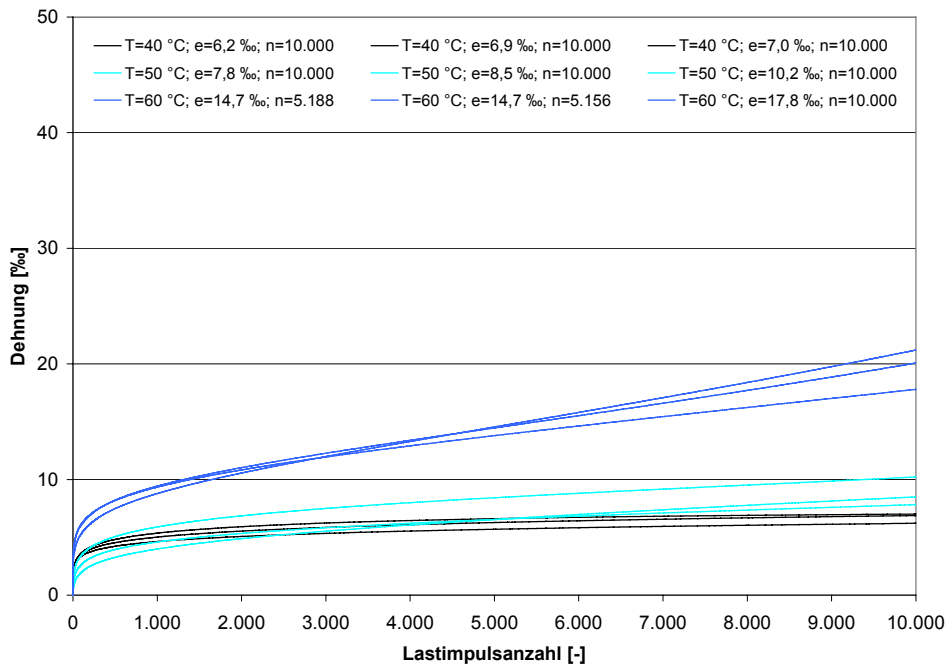
**Bild 7: Impulskriechkurven der Variante EEM (gemessen)**



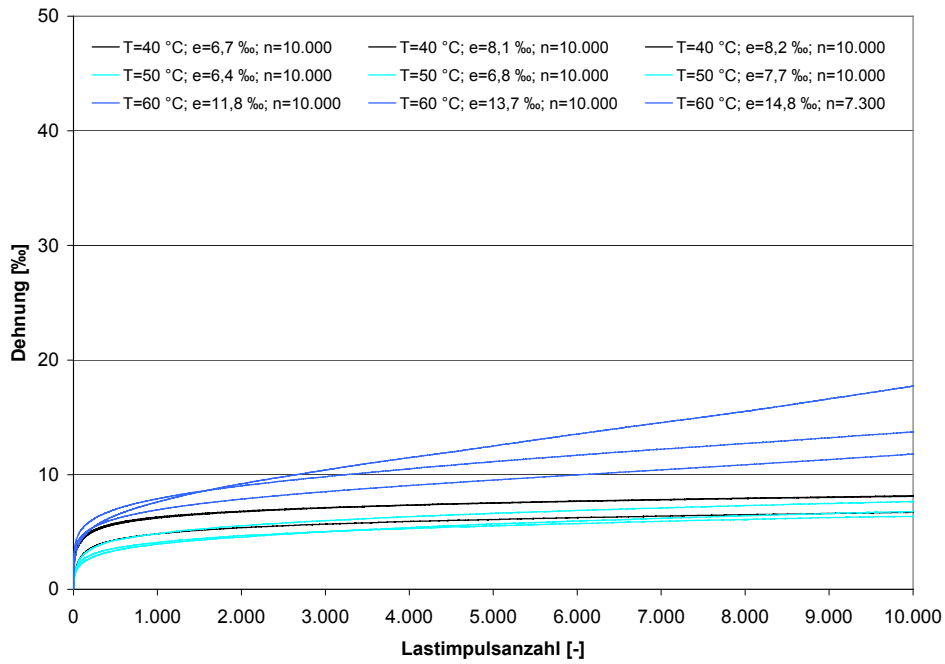
**Bild 8: Impulskriechkurven der Variante EEM (mathematisch)**



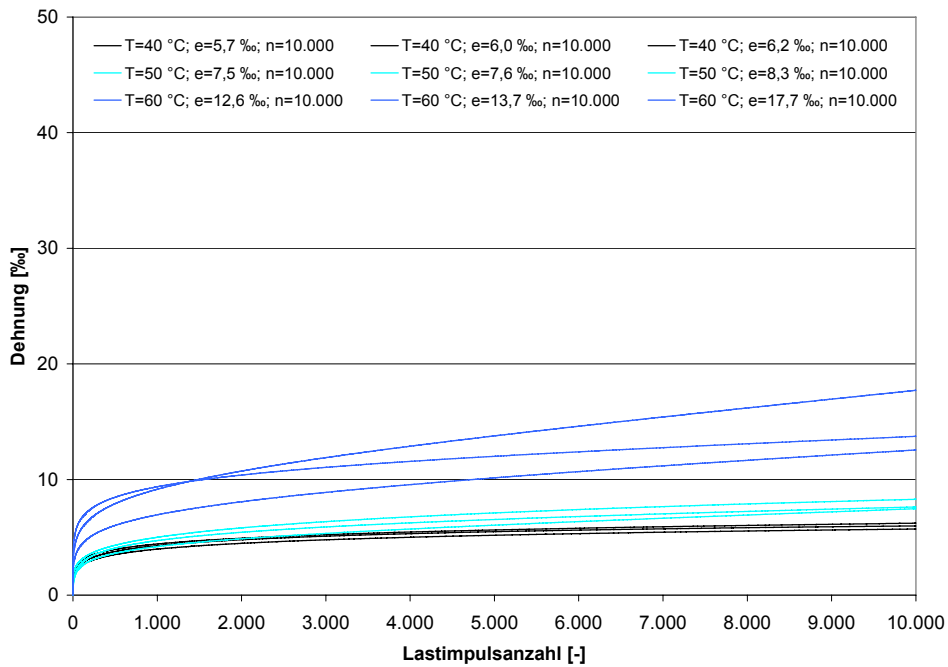
**Bild 9: Impulskriechkurven der Variante MME (gemessen)**



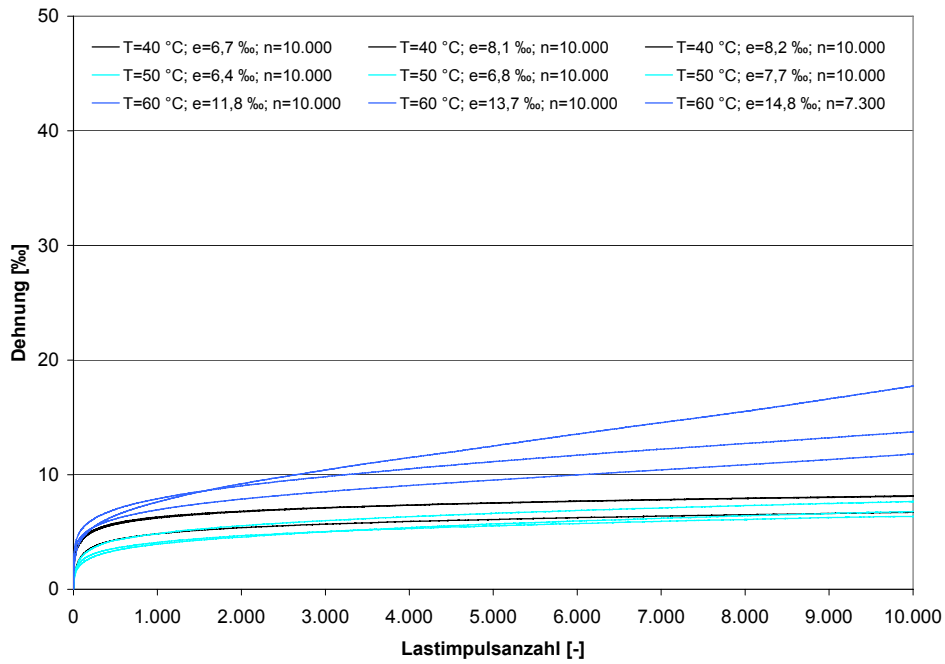
**Bild 10: Impulskriechkurven der Variante MME (mathematisch)**



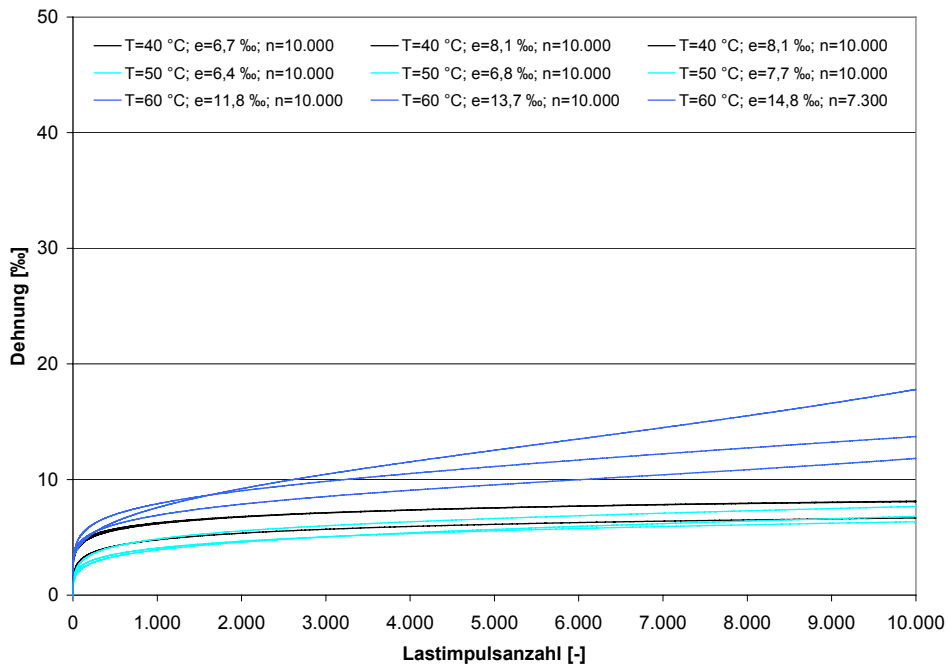
**Bild 11: Impulskriechkurven der Variante EME (gemessen)**



**Bild 12: Impulskriechkurven der Variante EME (mathematisch)**

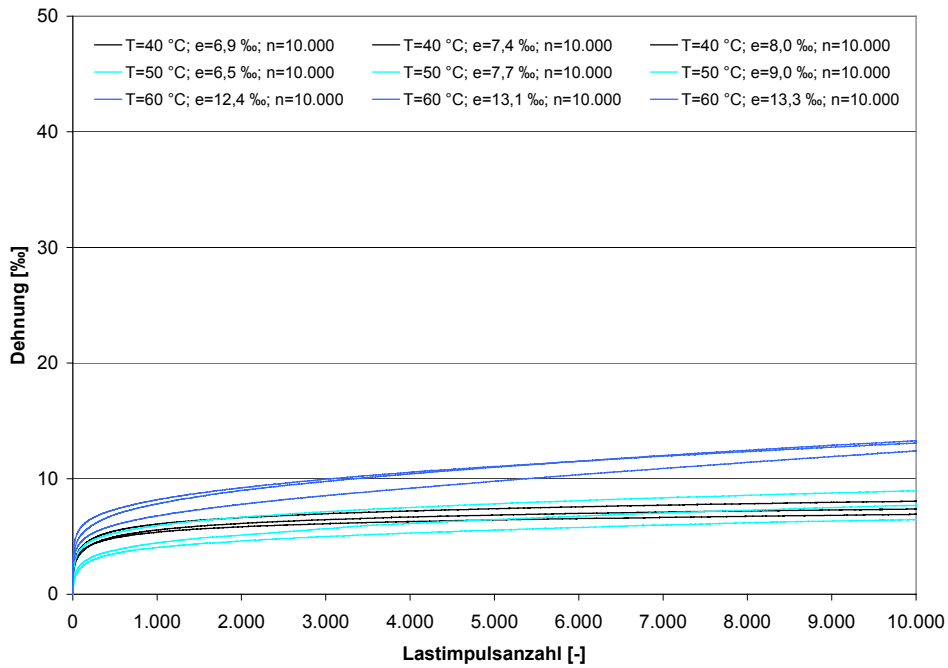


**Bild 13: Impulskriechkurven der Variante MEE (gemessen)**

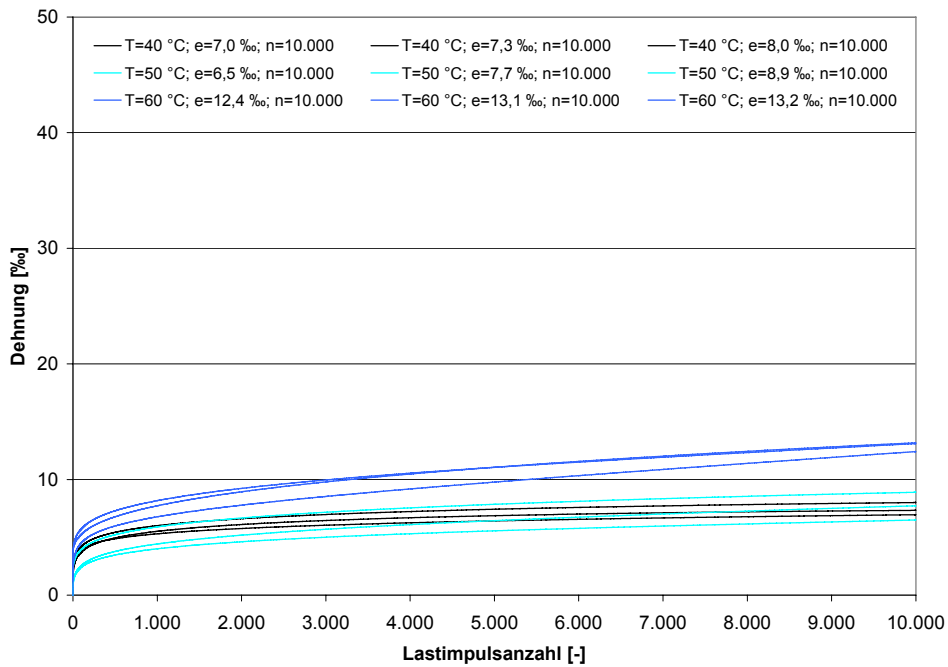


**Bild 14: Impulskriechkurven der Variante MEE (mathematisch)**





**Bild 15: Impulskriechkurven der Variante EEE (gemessen)**



**Bild 16: Impulskriechkurven der Variante EEE (mathematisch)**

	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdichte X1	g/cm <sup>3</sup>	2,316	2,401	2,468	2,573	2,613	2,700	2,787	2,860
Raumdichte X2	g/cm <sup>3</sup>	2,324	2,394	2,480	2,553	2,613	2,700	2,793	2,888
Raumdichte X3	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,400	2,473	2,554	2,616	2,689	2,799	2,853
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,321</b>	<b>2,398</b>	<b>2,474</b>	<b>2,560</b>	<b>2,614</b>	<b>2,696</b>	<b>2,793</b>	<b>2,867</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,008</b>	<b>0,007</b>	<b>0,012</b>	<b>0,020</b>	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,035</b>
Dehnung X1	‰	9,5	7,9	9,6	7,6	6,8	5,7	8,2	6,9
Dehnung X2	‰	8,3	10,2	8,3	6,7	7,1	6,0	6,7	7,4
Dehnung X3	‰	9,4	9,6	8,9	7,9	6,2	6,2	8,1	8,0
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>9,1</b>	<b>9,2</b>	<b>8,9</b>	<b>7,4</b>	<b>6,7</b>	<b>6,0</b>	<b>7,7</b>	<b>7,4</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>1,2</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,5</b>	<b>1,5</b>	<b>1,1</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,3	1,0	1,5	0,6	0,8	0,8	1,0	0,8
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,3	1,7	1,5	1,0	0,8	0,8	1,0	0,8
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,5	1,0	1,5	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>1,4</b>	<b>1,2</b>	<b>1,5</b>	<b>0,9</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>1,0</b>	<b>0,9</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>0,2</b>	<b>0,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,4</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>0,2</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

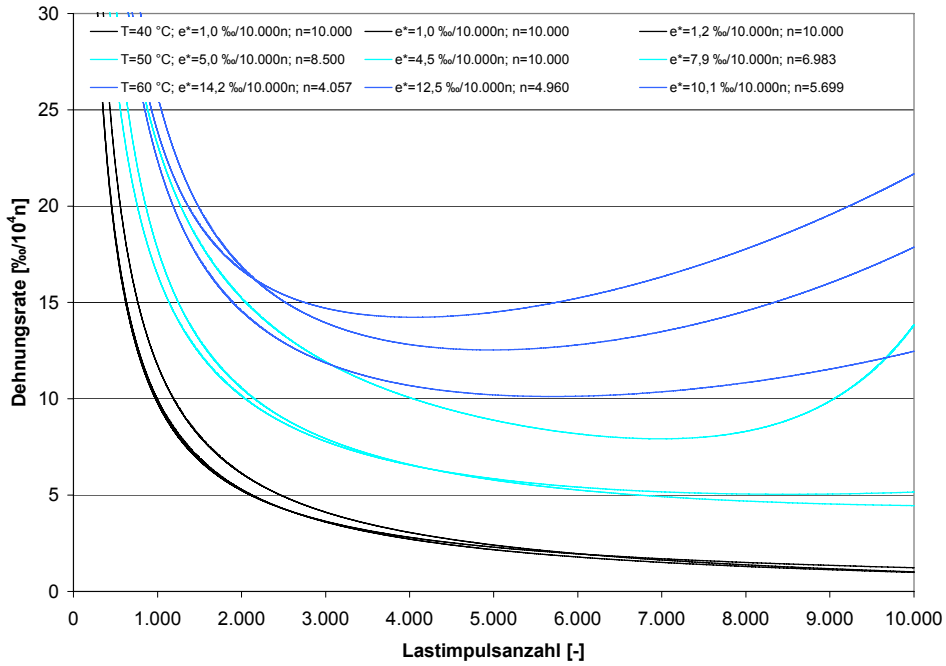
Tab. 1: **Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 40 °C (simultane Auswertung)**

	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdichte X1	g/cm <sup>3</sup>	2,324	2,387	2,508	2,576	2,640	2,734	2,826	2,887
Raumdichte X2	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,399	2,486	2,574	2,637	2,707	2,797	2,869
Raumdichte X3	g/cm <sup>3</sup>	2,313	2,399	2,492	2,560	2,643	2,706	2,799	2,877
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,320</b>	<b>2,395</b>	<b>2,495</b>	<b>2,570</b>	<b>2,640</b>	<b>2,716</b>	<b>2,807</b>	<b>2,878</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,022</b>	<b>0,016</b>	<b>0,006</b>	<b>0,028</b>	<b>0,029</b>	<b>0,018</b>
Dehnung X1	‰	13,5	13,5	10,1	10,4	8,5	7,6	7,7	6,5
Dehnung X2	‰	16,6	15,6	10,4	10,4	10,2	7,4	6,8	7,7
Dehnung X3	‰	11,7	12,3	10,9	14,2	7,8	8,4	6,4	9,0
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>13,9</b>	<b>13,8</b>	<b>10,5</b>	<b>11,7</b>	<b>8,8</b>	<b>7,8</b>	<b>7,0</b>	<b>7,7</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>4,9</b>	<b>3,3</b>	<b>0,8</b>	<b>3,8</b>	<b>2,4</b>	<b>1,0</b>	<b>1,3</b>	<b>2,5</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	5,0	5,6	2,1	3,5	3,3	1,9	1,9	1,3
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	8,3	4,6	4,0	3,5	3,3	2,5	1,9	1,9
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	4,4	3,5	3,8	6,0	2,5	2,1	1,5	2,1
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>5,9</b>	<b>4,6</b>	<b>3,3</b>	<b>4,3</b>	<b>3,0</b>	<b>2,2</b>	<b>1,8</b>	<b>1,8</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>3,9</b>	<b>2,1</b>	<b>1,9</b>	<b>2,5</b>	<b>0,8</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>0,8</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

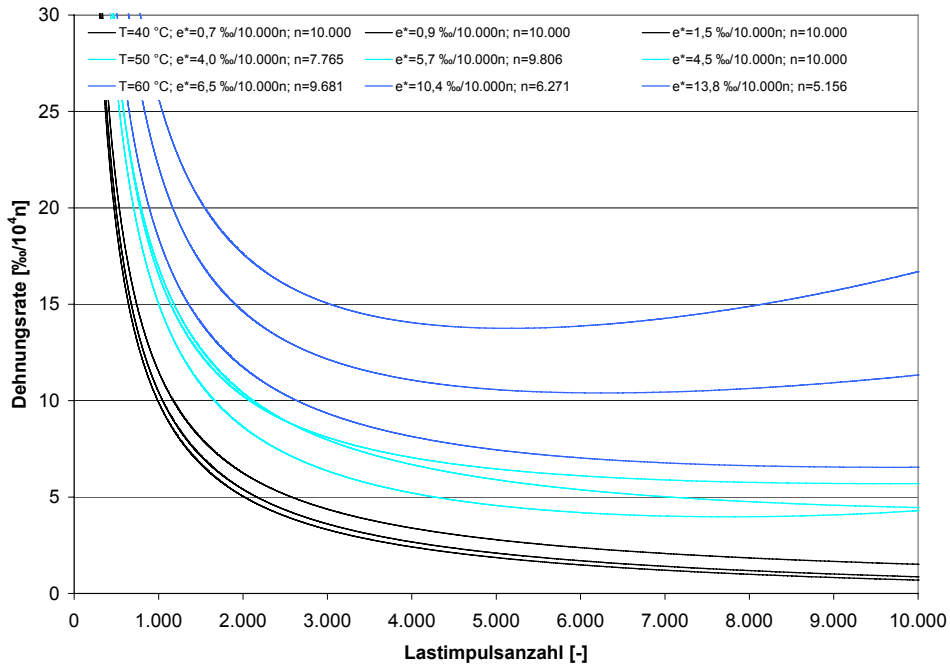
**Tab. 2: Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 50 °C (simultane Auswertung)**

	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdichte X1	g/cm <sup>3</sup>	2,330	2,413	2,487	2,554	2,641	2,727	2,819	2,888
Raumdichte X2	g/cm <sup>3</sup>	2,334	2,404	2,482	2,560	2,635	2,716	2,820	2,888
Raumdichte X3	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,404	2,488	2,571	2,650	2,701	2,807	2,874
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,329</b>	<b>2,407</b>	<b>2,486</b>	<b>2,562</b>	<b>2,642</b>	<b>2,715</b>	<b>2,815</b>	<b>2,883</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,012</b>	<b>0,009</b>	<b>0,006</b>	<b>0,017</b>	<b>0,015</b>	<b>0,026</b>	<b>0,013</b>	<b>0,014</b>
Dehnung X1	‰	17,2	15,3	15,2	16,6	14,7	13,7	11,8	13,1
Dehnung X2	‰	16,7	17,8	14,9	16,6	14,7	12,5	13,7	12,4
Dehnung X3	‰	16,0	17,3	16,3	15,8	17,8	17,8	14,8	13,3
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>16,6</b>	<b>16,8</b>	<b>15,5</b>	<b>16,3</b>	<b>15,7</b>	<b>14,7</b>	<b>13,4</b>	<b>12,9</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>1,2</b>	<b>2,5</b>	<b>1,4</b>	<b>0,8</b>	<b>3,1</b>	<b>5,3</b>	<b>3,0</b>	<b>0,9</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	10,3	6,7	12,3	12,3	10,6	3,1	4,8	3,5
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	12,6	13,7	13,4	21,0	12,7	4,4	5,0	5,0
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	14,3	10,4	17,9	12,6	8,2	8,2	8,3	4,0
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>12,4</b>	<b>10,3</b>	<b>14,5</b>	<b>15,3</b>	<b>10,5</b>	<b>5,2</b>	<b>6,0</b>	<b>4,2</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>4,0</b>	<b>7,0</b>	<b>5,6</b>	<b>8,7</b>	<b>4,5</b>	<b>5,1</b>	<b>3,5</b>	<b>1,5</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	5.920	8.148	4.087	5.792	5.188	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	4.948	5.172	3.490	3.536	5.156	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	3.973	6.253	3.633	4.902	10.000	10.000	7.300	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>4.947</b>	<b>6.524</b>	<b>3.737</b>	<b>4.743</b>	<b>6.781</b>	<b>10.000</b>	<b>9.100</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>1.947</b>	<b>2.976</b>	<b>597</b>	<b>2.256</b>	<b>4.844</b>	<b>0</b>	<b>2.700</b>	<b>0</b>

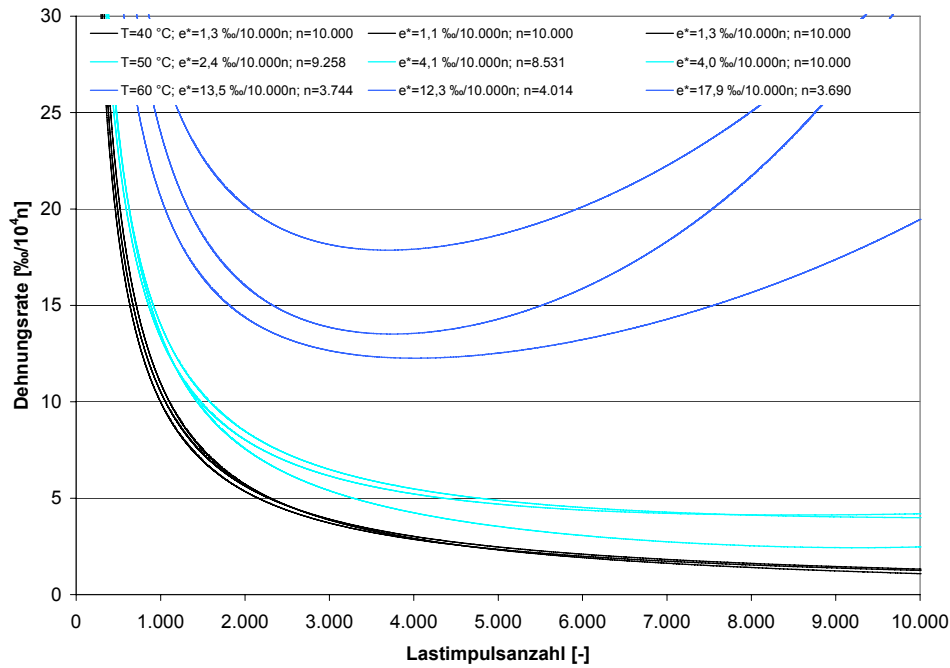
Tab. 3: Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 60 °C (simultane Auswertung)



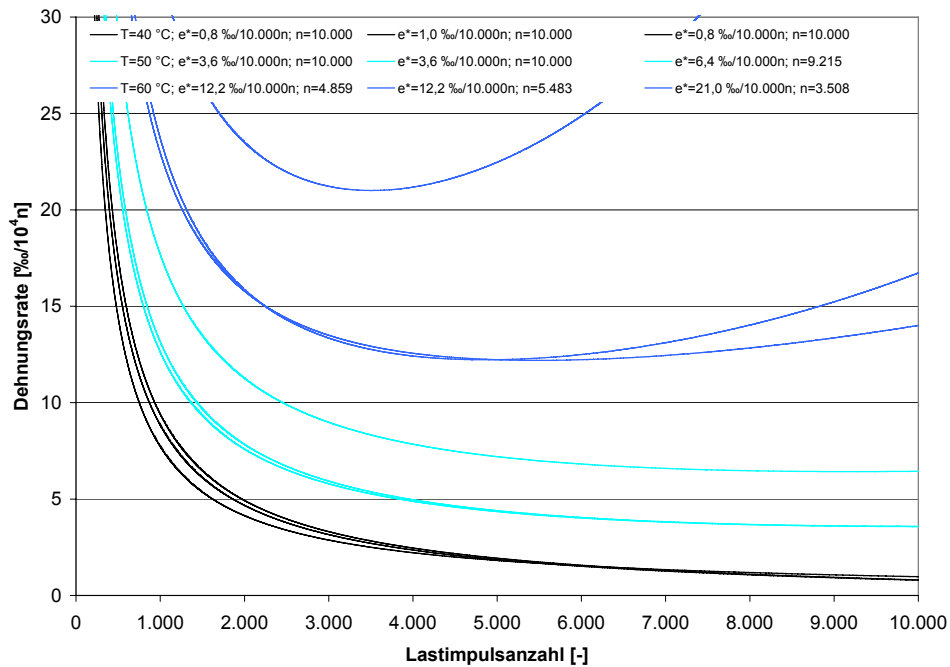
**Bild 17: Dehnungsraten der Variante MMM (mathematisch)**



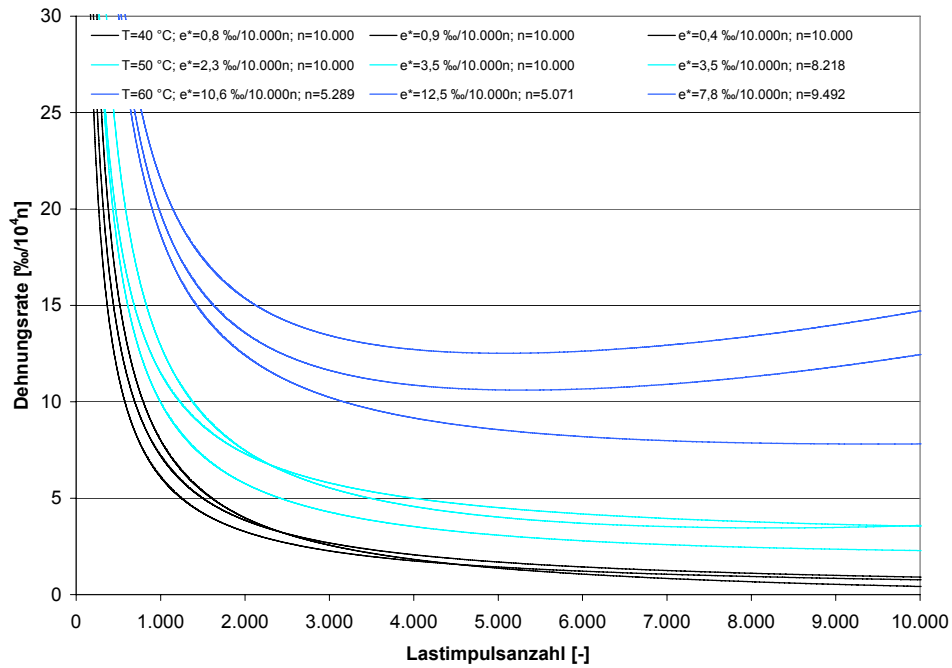
**Bild 18: Dehnungsraten der Variante EMM (mathematisch)**



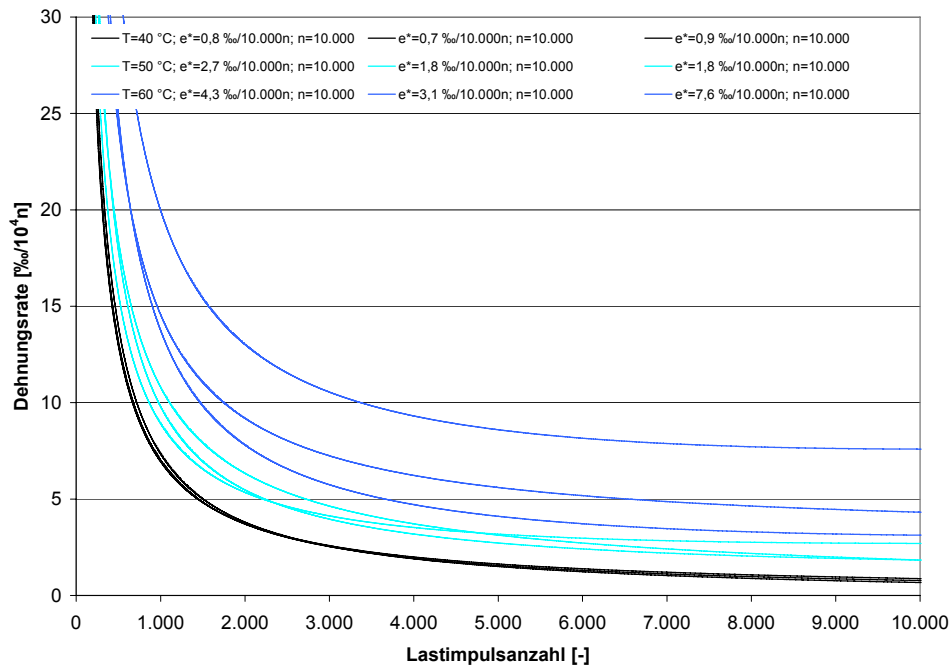
**Bild 19: Dehnungsraten der Variante MEM (mathematisch)**



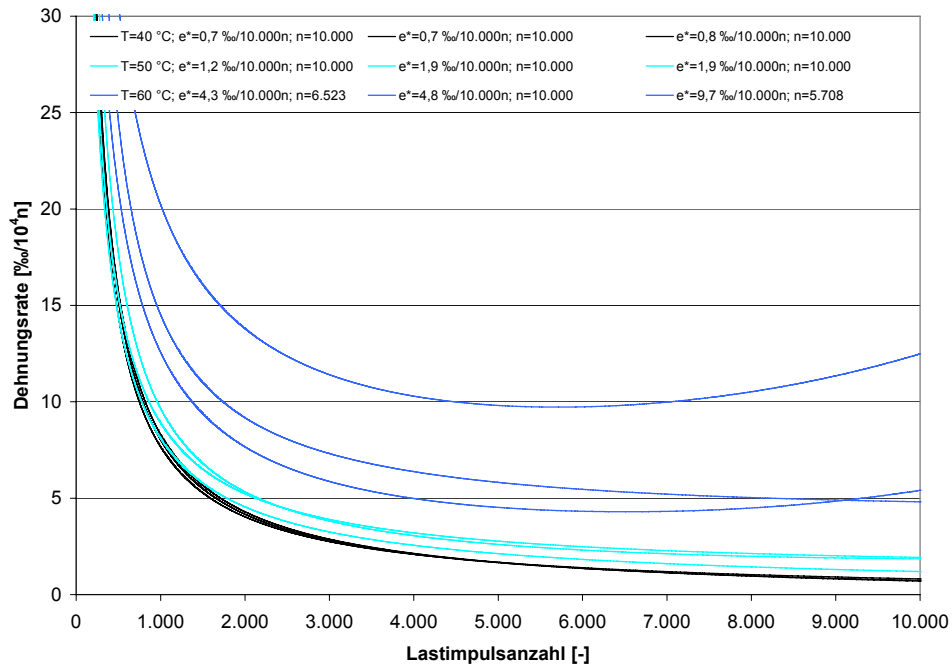
**Bild 20: Dehnungsraten der Variante EEM (mathematisch)**



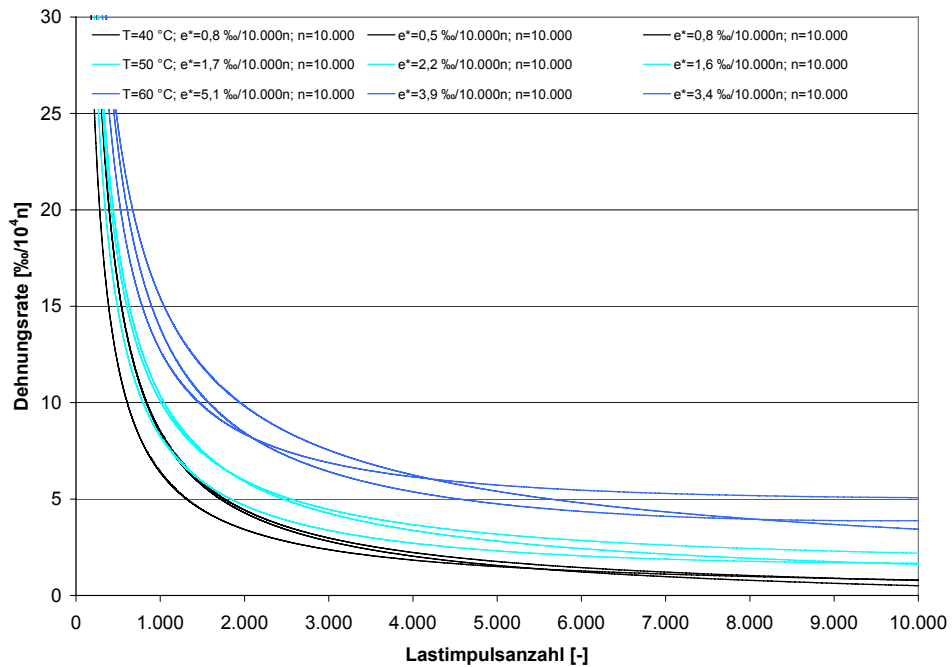
**Bild 21: Dehnungsraten der Variante MME (mathematisch)**



**Bild 22: Dehnungsraten der Variante EME (mathematisch)**



**Bild 23: Dehnungsraten der Variante MEE (mathematisch)**



**Bild 24: Dehnungsraten der Variante EEE (mathematisch)**



MMM												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\varepsilon_0$	-	-1,46962828	-3,45027081	-0,00124321	-0,59968421	-2,20702612	1,0687935	-1,24376663	-0,07204966	2,11888796		
a	-	2,74498953	4,38223147	4,90067182	1,033339048	2,89849294	0,39413447	4,13256353	2,33723532	1,76722504		
k	-	0,1420858	0,1214446	0,1	0,25825963	0,17410328	0,39203666	0,15244233	0,21660427	0,22981724		
b	-	-65,464775	-6,72656497	2,70286759	0,29731173	1,22835998	0,00051008	3,87092053	1,58880485	1,52523507		
c	-	6,8687E-07	8,3656E-06	-16485454,2	0,00015786	7,4882E-05	0,00076424	0,00013195	0,00016723	0,00014286		
Bestimmtheitsmaß	%	99,86	99,69	99,35	99,96	99,96	99,77	99,99	99,99	99,96		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	8.500	10.000	6.983	4.057	4.960	5.699		
Mittelwert	-	10.000			8.494			4.905				
Spannweite	-	0			3.017			1.642				
Dehnung	‰	8,2	9,4	9,6	10,9	13,6	13,8	16,2	16,7	16,9		
Mittelwert	‰	9,1			12,8			16,6				
Spannweite	‰	1,4			2,9			0,7				
Dehnungsrate	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,0	1,0	1,2	5,0	4,5	7,9	14,2	12,5	10,1		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,1			5,8			12,3				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,2			3,4			4,1				

Tab. 4: Ergebnisse der Druckschwellversuche MMM (mathematische Auswertung)

EMM												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\epsilon_0$	-	-4,2483221	-2,87530057	-2,51112994	-1,45438766	-7,16726368	2,51016772	0,27800935	-2,18607883	-0,53231815		
a	-	4,83879934	4,7449635	4,22381334	2,76352261	6,92365635	1,43332713	2,35208727	4,65160783	3,16981826		
k	-	0,10522502	0,10877577	0,11941511	0,16757639	0,1	0,2284801	0,18617923	0,14162444	0,1808122		
b	-	-12,2712739	-4,68595332	-1,1635E-06	0,10607059	6,30733698	1,6702251	4,72361088	5,84834205	5,33593192		
c	-	5,0391E-06	1,0395E-05	0,0004981	0,00022072	4,1422E-05	5,8783E-05	5,1868E-05	7,3209E-05	9,7029E-05		
Bestimmtheitsmaß	%	99,77	99,81	99,84	99,97	99,99	99,85	99,98	99,99	99,99		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	7.765	9.806	10.000	9.681	6.271	5.156		
Mittelwert	-	10.000			9.190			7.036				
Spannweite	-	0			2.235			4.525				
Dehnung	‰	7,9	9,5	10,2	11,4	13,4	15,6	16,3	17,3	17,8		
Mittelwert	‰	9,2			13,5			17,1				
Spannweite	‰	2,3			4,2			1,5				
Dehnungsrate	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,7	0,9	1,5	4,0	5,7	4,5	6,5	10,4	13,8		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,0			4,7			10,2				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,8			1,7			7,3				

Tab. 5: Ergebnisse der Druckschwellversuche EMM (mathematische Auswertung)

MEM												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\epsilon_0$	-	-4,28469757	-5,01662343	-3,65026208	-2,1140751	-1,68266922	-1,75542112	0,02355866	0,93721718	2,53650108		
a	-	5,00474672	5,66260754	5,27156367	2,73514171	2,15698626	2,29723896	2,69978056	2,94461976	1,16355479		
k	-	0,1	0,1	0,1	0,16169706	0,1733578	0,17135381	0,1969059	0,16877048	0,27730442		
b	-	-1,1258E-07	-21,6561723	-2,7427E-07	0,00035878	0,85280051	1,66845778	1,05315444	2,83140542	2,6985869		
c	-	0,0007643	1,5232E-06	-8,2974E-05	0,00055542	0,00010067	6,5086E-05	0,00024269	0,00014365	0,00017886		
Bestimmtheitsmaß	%	99,69	99,86	99,79	99,90	99,93	99,92	99,99	99,99	99,97		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	9.258	8.531	10.000	3.744	4.014	3.690		
Mittelwert	-	10.000			9.263			3.816				
Spannweite	-	0			1.469			324				
Dehnung	‰	8,3	8,9	9,6	9,9	9,8	10,9	15,2	15,1	16,4		
Mittelwert	‰	8,9			10,2			15,6				
Spannweite	‰	1,3			1,1			1,3				
Dehnungsrate	‰·10 <sup>-4</sup> /h	1,3	1,1	1,3	2,4	4,1	4,0	13,5	12,3	17,9		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /h	1,2			3,5			14,6				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /h	0,2			1,7			5,6				

ab. 6: Ergebnisse der Druckschwellversuche MEM (mathematische Auswertung)

EEM												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\varepsilon_0$	-	-1,51799472	-0,00464198	-1,45259377	-1,2141432	-1,52708794	-1,65269605	-0,07719112	-1,41556101	1,34286586		
a	-	2,14567901	3,87182606	2,71266053	2,21973481	2,27694116	2,38904088	2,42555752	3,44424009	1,07918111		
k	-	0,1524118	0,1	0,13984096	0,16631924	0,16875896	0,18139812	0,20244252	0,16310659	0,30315112		
b	-	-66,14788	2,09087364	-67,4044692	1,29485212	0,91620485	4,3101758	2,37215444	6,53866127	2,06004598		
c	-	8,0705E-07	-10796,1679	8,34E-07	7,085E-05	8,366E-05	5,5242E-05	0,0001404	7,9386E-05	0,00022157		
Bestimmtheitsmaß	%	99,87	98,89	99,88	99,92	99,93	99,97	99,99	99,99	99,99		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	9.215	4.859	5.483	3.508		
Mittelwert	-	10.000			9.738			4.617				
Spannweite	-	0			785			1.975				
Dehnung	%	6,7	7,6	7,8	10,4	10,4	13,7	15,8	16,2	16,6		
Mittelwert	%	7,4			11,5			16,2				
Spannweite	%	1,1			3,3			0,8				
Dehnungsrate	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,8	1,0	0,8	3,6	3,6	6,4	12,2	12,2	21,0		
Mittelwert	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,9			4,5			15,1				
Spannweite	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,2			2,8			8,8				

Tab. 7: Ergebnisse der Druckschwellversuche EEM (mathematische Auswertung)

MME												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\epsilon_0$	-	-1,71569655	-2,39389761	-3,2343068	-3,25877493	-1,86390804	-1,870665158	-0,74298952	-0,59748183	-0,58822558		
a	-	3,05438869	3,60767267	4,3411794	3,41547959	1,754242	2,52524511	3,3609448	2,63014974	3,33995918		
k	-	0,1	0,1	0,1	0,11927172	0,16976948	0,16197891	0,15349647	0,17458707	0,1515013		
b	-	-0,25604103	-0,21560095	-32,5073652	1,32413148	13,5024023	0,20254163	5,36535054	7,48799415	12,265729		
c	-	-2,90368522	-8,9750902	2,0156E-06	4,9151E-05	1,3707E-05	0,00016604	8,3519E-05	7,6878E-05	3,3626E-05		
Bestimmtheitsmaß	%	99,18	99,42	99,74	99,98	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99		
<b>Lastimpulsanzahl</b>	-	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>8.218</b>	<b>5.289</b>	<b>5.071</b>	<b>9.492</b>		
Mittelwert	-	10.000			9.406			6.617				
Spannweite	-	0			1.782			4.421				
<b>Dehnung</b>	‰	<b>6,2</b>	<b>6,9</b>	<b>7,0</b>	<b>7,8</b>	<b>8,5</b>	<b>9,6</b>	<b>14,8</b>	<b>14,6</b>	<b>17,4</b>		
Mittelwert	‰	6,7			8,6			15,6				
Spannweite	‰	0,8			1,8			2,8				
<b>Dehnungsrate</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>0,8</b>	<b>0,9</b>	<b>0,4</b>	<b>2,3</b>	<b>3,5</b>	<b>3,5</b>	<b>10,6</b>	<b>12,5</b>	<b>7,8</b>		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,7			3,1			10,3				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,5			1,2			4,7				

Tab. 8: Ergebnisse der Druckschwellversuche MME (mathematische Auswertung)

EME												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\varepsilon_0$	-	-3,02419448	-3,32952508	-2,69878953	-3,71587372	-4,68902092	-0,23016788	-1,32710806	-3,64391476	-0,66473911		
a	-	3,47565381	3,8235876	3,48109856	3,91269084	4,69299458	0,95600622	2,82934375	6,48492552	2,88377122		
k	-	0,10168443	0,1	0,1	0,1	0,1	0,23027826	0,15103884	0,1	0,17189997		
b	-	-1,78176228	-17,8693772	-0,17645348	2,17987285	0,90597878	-0,54463982	33,0429539	1,1255934	9,80966178		
c	-	6,7206E-06	1,6069E-06	-4,4319299	4,8519E-05	4,5845E-05	-56,7387057	7,3182E-06	6,7607E-05	3,6594E-05		
Bestimmtheitsmaß	%	99,97	99,86	99,66	99,94	99,97	99,79	99,99	99,98	99,99		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000		
Mittelwert	-	10.000			10.000			10.000				
Spannweite	-	0			0			0				
Dehnung	‰	5,7	6,0	6,2	7,5	7,6	8,3	12,6	13,7	17,7		
Mittelwert	‰	6,0			7,8			14,7				
Spannweite	‰	0,5			0,8			5,1				
Dehnungsrate	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,8	0,7	0,9	2,7	1,8	1,8	4,3	3,1	7,6		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,8			2,1			5,0				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,2			0,9			4,5				

Tab. 9: Ergebnisse der Druckschwellversuche EME (mathematische Auswertung)

MEE												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\varepsilon_0$	-	-3,30080044	-1,39237759	-2,09723119	-1,16988169	-1,11611488	-4,07469204	1,83339416	-4,00787549	2,20357839		
a	-	3,99566807	3,78023037	4,04587007	1,49560293	1,55400628	4,28947689	0,94202015	5,82270511	0,43880358		
k	-	0,10266669	0,1022584	0,10405115	0,16877018	0,16880562	0,10572578	0,24284456	0,10000000	0,35891292		
b	-	-5,79161826	-3,80354806	-1,8385442	-0,43774465	1,19034145	0,18717624	0,09749873	17,7741808	0,61255071		
c	-	5,2336E-06	4,4337E-06	1,8133E-05	-9,99849144	3,9017E-05	0,00011284	0,00025686	1,6058E-05	0,0001934		
Bestimmtheitsmaß	%	99,60	99,44	99,64	99,84	99,96	99,95	99,97	99,99	99,95		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	6.523	10.000	5.708		
Mittelwert	-	10.000			10.000			7.410				
Spannweite	-	0			0			4.292				
Dehnung	%	6,7	8,1	8,1	6,3	6,8	7,7	10,2	13,7	13,2		
Mittelwert	%	7,6			6,9			12,4				
Spannweite	%	1,4			1,4			3,5				
Dehnungsrate	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,7	0,8	0,7	1,2	1,9	1,9	4,3	4,8	9,7		
Mittelwert	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,7			1,7			6,3				
Spannweite	$\% \cdot 10^{-4}/n$	0,1			0,7			5,4				

Tab. 10: Ergebnisse der Druckschwellversuche MEE (mathematische Auswertung)

EEE												
Kenngrößen	Einheit	40 °C			50 °C			60 °C				
$\epsilon_0$	-	-0,00060597	-2,57475883	-2,25896942	-1,31675922	-1,07067399	1,21007503	-2,79463492	2,43758897	1,21714243		
a	-	3,2022811	3,80840546	3,97451402	1,84329146	1,63024248	1,45520465	4,55130904	1,12549067	0,40299135		
k	-	0,1	0,11005366	0,10657616	0,15324668	0,17440031	0,19078156	0,10272236	0,23444842	0,3475028		
b	-	1,08395781	-2,42263752	-3,67623686	0,06401795	1,97180583	0,74499366	14,9682634	0,38710456	-2,06597754		
c	-	-31,1069364	2,1634E-05	8,7805E-06	0,00016072	2,9399E-05	-121,835706	2,0962E-05	0,00012167	-499,369		
Bestimmtheitsmaß	%	98,92	99,66	99,64	99,85	99,89	99,85	99,96	99,92	99,83		
Lastimpulsanzahl	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000		
Mittelwert	-	10.000			10.000			10.000				
Spannweite	-	0			0			0				
Dehnung	‰	7,0	7,3	8,0	6,5	7,7	8,9	12,4	13,1	13,2		
Mittelwert	‰	7,4			7,7			12,9				
Spannweite	‰	1,0			2,4			0,8				
Dehnungsrate	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,8	0,5	0,8	1,7	2,2	1,6	5,1	3,9	3,4		
Mittelwert	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,7			1,8			4,1				
Spannweite	‰·10 <sup>-4</sup> /n	0,3			0,6			1,7				

Tab. 11: Ergebnisse der Druckschwellversuche EEE (mathematische Auswertung)



	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdicke X1	g/cm <sup>3</sup>	2,316	2,401	2,468	2,573	2,613	2,700	2,787	2,860
Raumdicke X2	g/cm <sup>3</sup>	2,324	2,394	2,480	2,553	2,613	2,700	2,793	2,888
Raumdicke X3	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,400	2,473	2,554	2,616	2,689	2,799	2,853
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,321</b>	<b>2,398</b>	<b>2,474</b>	<b>2,560</b>	<b>2,614</b>	<b>2,696</b>	<b>2,793</b>	<b>2,867</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,008</b>	<b>0,007</b>	<b>0,012</b>	<b>0,020</b>	<b>0,003</b>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,035</b>
Dehnung X1	‰	9,6	7,9	9,6	7,6	6,9	5,7	8,1	7,0
Dehnung X2	‰	8,2	10,2	8,3	6,7	7,0	6,0	6,7	7,3
Dehnung X3	‰	9,4	9,5	8,9	7,8	6,2	6,2	8,1	8,0
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>9,1</b>	<b>9,2</b>	<b>8,9</b>	<b>7,4</b>	<b>6,7</b>	<b>6,0</b>	<b>7,6</b>	<b>7,4</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>1,4</b>	<b>2,3</b>	<b>1,3</b>	<b>1,1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,2	0,7	1,3	1,0	0,9	0,8	0,7	0,8
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,0	1,5	1,3	0,8	0,4	0,7	0,7	0,5
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	1,0	0,9	1,1	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>1,1</b>	<b>1,0</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,8</b>	<b>0,7</b>	<b>0,7</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>0,2</b>	<b>0,8</b>	<b>0,2</b>	<b>0,2</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,3</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tab. 12: Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 40 °C (mathematische Auswertung)

	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdicke X1	g/cm <sup>3</sup>	2,324	2,387	2,508	2,576	2,640	2,734	2,826	2,887
Raumdicke X2	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,399	2,486	2,574	2,637	2,707	2,797	2,869
Raumdicke X3	g/cm <sup>3</sup>	2,313	2,399	2,492	2,560	2,643	2,706	2,799	2,877
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,320</b>	<b>2,395</b>	<b>2,495</b>	<b>2,570</b>	<b>2,640</b>	<b>2,716</b>	<b>2,807</b>	<b>2,878</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,011</b>	<b>0,012</b>	<b>0,022</b>	<b>0,016</b>	<b>0,006</b>	<b>0,028</b>	<b>0,029</b>	<b>0,018</b>
Dehnung X1	‰	13,6	13,4	9,9	10,4	8,5	7,6	7,7	6,5
Dehnung X2	‰	13,8	15,6	9,8	10,4	9,6	7,5	6,8	7,7
Dehnung X3	‰	10,9	11,4	10,9	13,7	7,8	8,3	6,3	8,9
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>12,8</b>	<b>13,5</b>	<b>10,2</b>	<b>11,5</b>	<b>8,6</b>	<b>7,8</b>	<b>6,9</b>	<b>7,7</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>2,9</b>	<b>4,2</b>	<b>1,1</b>	<b>3,3</b>	<b>1,8</b>	<b>0,8</b>	<b>1,4</b>	<b>2,4</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	4,5	5,7	2,4	3,6	3,5	1,8	1,9	1,7
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	7,9	4,5	4,1	3,6	3,5	2,7	1,9	2,2
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	5,0	4,0	4,0	6,4	2,3	1,8	1,2	1,6
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>5,8</b>	<b>4,7</b>	<b>3,5</b>	<b>4,5</b>	<b>3,1</b>	<b>2,1</b>	<b>1,7</b>	<b>1,8</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>3,4</b>	<b>1,7</b>	<b>1,7</b>	<b>2,8</b>	<b>1,2</b>	<b>0,9</b>	<b>0,7</b>	<b>0,6</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	10.000	9.806	9.258	10.000	10.000	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	6.983	10.000	8.531	10.000	8.218	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	8.500	7.765	10.000	9.215	10.000	10.000	10.000	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>8.494</b>	<b>9.190</b>	<b>9.263</b>	<b>9.738</b>	<b>9.406</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>3.017</b>	<b>2.235</b>	<b>1.469</b>	<b>785</b>	<b>1.782</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Tab. 13: Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 50 °C (mathematische Auswertung)

	Einheit	MMM	EMM	MEM	EEM	MME	EME	MEE	EEE
Raumdichte X1	g/cm <sup>3</sup>	2,330	2,413	2,487	2,554	2,641	2,727	2,819	2,888
Raumdichte X2	g/cm <sup>3</sup>	2,334	2,404	2,482	2,560	2,635	2,716	2,820	2,888
Raumdichte X3	g/cm <sup>3</sup>	2,322	2,404	2,488	2,571	2,650	2,701	2,807	2,874
<b>Mittelwert</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>2,329</b>	<b>2,407</b>	<b>2,486</b>	<b>2,562</b>	<b>2,642</b>	<b>2,715</b>	<b>2,815</b>	<b>2,883</b>
<b>Spannweite</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>0,012</b>	<b>0,009</b>	<b>0,006</b>	<b>0,017</b>	<b>0,015</b>	<b>0,026</b>	<b>0,013</b>	<b>0,014</b>
Dehnung X1	‰	16,9	16,3	15,1	16,2	14,8	13,7	10,2	13,1
Dehnung X2	‰	16,7	17,8	15,2	16,6	14,6	12,6	13,7	12,4
Dehnung X3	‰	16,2	17,3	16,4	15,8	17,4	17,7	13,2	13,2
<b>Mittelwert</b>	‰	<b>16,6</b>	<b>17,1</b>	<b>15,6</b>	<b>16,2</b>	<b>15,6</b>	<b>14,7</b>	<b>12,4</b>	<b>12,9</b>
<b>Spannweite</b>	‰	<b>0,7</b>	<b>1,5</b>	<b>1,3</b>	<b>0,8</b>	<b>2,8</b>	<b>5,1</b>	<b>3,5</b>	<b>0,8</b>
Dehnungsrate X1	‰·10 <sup>-4</sup> /n	10,1	6,5	12,3	12,2	10,6	3,1	4,3	3,9
Dehnungsrate X2	‰·10 <sup>-4</sup> /n	12,5	13,8	13,5	21,0	12,5	4,3	4,8	5,1
Dehnungsrate X3	‰·10 <sup>-4</sup> /n	14,2	10,4	17,9	12,2	7,8	7,6	9,7	3,4
<b>Mittelwert</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>12,3</b>	<b>10,2</b>	<b>14,6</b>	<b>15,1</b>	<b>10,3</b>	<b>5,0</b>	<b>6,3</b>	<b>4,1</b>
<b>Spannweite</b>	‰·10 <sup>-4</sup> /n	<b>4,1</b>	<b>7,3</b>	<b>5,6</b>	<b>8,8</b>	<b>4,7</b>	<b>4,5</b>	<b>5,4</b>	<b>1,7</b>
Lastimpulsanzahl X1	-	5.699	9.681	4.014	5.483	5.289	10.000	6.523	10.000
Lastimpulsanzahl X2	-	4.960	5.156	3.744	3.508	5.071	10.000	10.000	10.000
Lastimpulsanzahl X3	-	4.057	6.271	3.690	4.859	9.492	10.000	5.708	10.000
<b>Mittelwert</b>	-	<b>4.905</b>	<b>7.036</b>	<b>3.816</b>	<b>4.617</b>	<b>6.617</b>	<b>10.000</b>	<b>7.410</b>	<b>10.000</b>
<b>Spannweite</b>	-	<b>1.642</b>	<b>4.525</b>	<b>324</b>	<b>1.975</b>	<b>4.421</b>	<b>0</b>	<b>4.292</b>	<b>0</b>

Tab. 14: Ergebnisse der Druckschwellversuche bei 60 °C (mathematische Auswertung)

	Dehnungsrate	LN-Dehnungsrate	LN-Dehnungsrate (min)	LN-Dehnungsrate (max)	Spannweite < kritische Spannweite= 0,76 *	LN-Dehnungsrate (Mittelwert)	Linke kritische Grenze (LN-Dehnungsrate)	Rechte kritische Grenze (LN-Dehnungsrate)
Variante	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$	$\% \cdot 10^{-4}/n$
EEE	1,6	0,47	0,47	0,79	0,32	0,60	0,05	1,15
	2,2	0,79						
	1,7	0,53						
MEE	1,9	0,64	0,18	0,64	0,46	0,49	-0,06	1,04
	1,9	0,64						
	1,2	0,18						
EME	1,8	0,59	0,59	0,99	0,40	0,72	0,17	1,27
	1,8	0,59						
	2,7	0,99						
MME	3,5	1,25	0,83	1,25	0,42	1,11	0,56	1,66
	3,5	1,25						
	2,3	0,83						
EEM	6,4	1,86	1,28	1,86	0,58	1,47	0,92	2,02
	3,6	1,28						
	3,6	1,28						
MEM	4,0	1,39	0,88	1,41	0,53	1,23	0,68	1,78
	4,1	1,41						
	2,4	0,88						
EMM	4,5	1,50	1,39	1,74	0,35	1,54	0,99	2,09
	5,7	1,74						
	4,0	1,39						
MMM	7,9	2,07	1,50	2,07	0,57	1,73	1,18	2,28
	4,5	1,50						
	5,0	1,61						

**Tab. 15: Überprüfung auf Ausreißer innerhalb der Einzelwerte der mathematischen Dehnungsraten bei 50 °C**

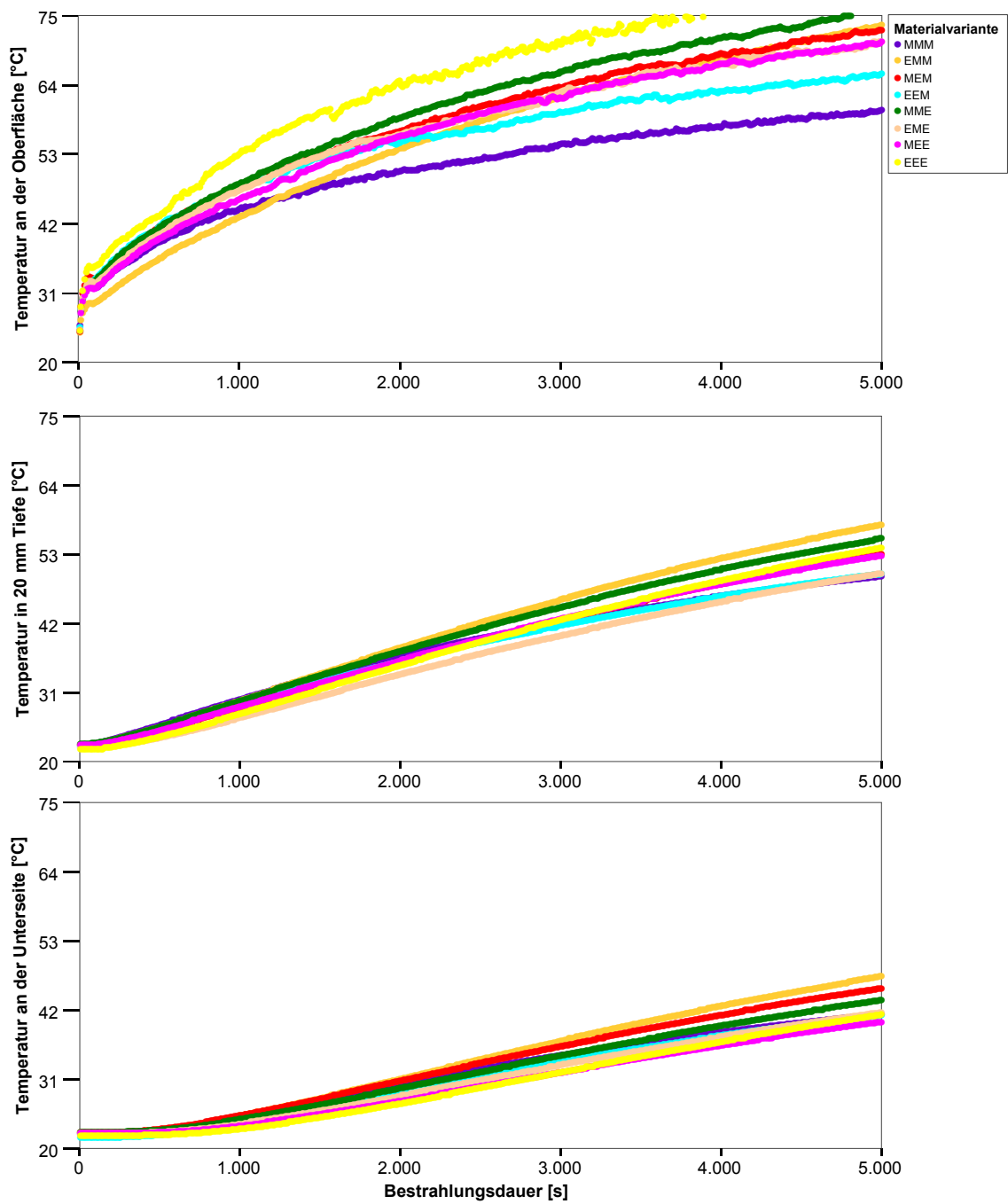
\* kritische Spannweite nach KARCHER (2005)

## **Anlage 4**

Bestrahlungsstärke [W/qm]

Materialvariante	Lampenkonstellation	N [-]	arith. Mittelwert [W/qm]	Standardabweichung +/- s [W/qm]
MMM	Lampenkonstellation 1	3	508	9
	Lampenkonstellation 2	3	522	24
	Insgesamt	6	515	18
EMM	Lampenkonstellation 1	3	536	0
	Lampenkonstellation 2	3	530	4
	Insgesamt	6	533	5
MEM	Lampenkonstellation 1	3	536	16
	Lampenkonstellation 2	3	520	19
	Insgesamt	6	528	18
EEM	Lampenkonstellation 1	3	524	15
	Lampenkonstellation 2	3	510	19
	Insgesamt	6	517	17
MME	Lampenkonstellation 1	3	530	3
	Lampenkonstellation 2	3	513	67
	Insgesamt	6	521	44
EME	Lampenkonstellation 1	3	561	18
	Lampenkonstellation 2	3	503	17
	Insgesamt	6	532	35
MEE	Lampenkonstellation 1	3	525	17
	Lampenkonstellation 2	3	519	33
	Insgesamt	6	522	24
EEE	Lampenkonstellation 1	3	527	37
	Lampenkonstellation 2	3	537	10
	Insgesamt	6	532	25
Insgesamt	Lampenkonstellation 1	24	531	21
	Lampenkonstellation 2	24	519	27
	Insgesamt	48	525	25

**Tab. 1: Ergebnisse der Bestrahlungsstärkemessungen in W/qm**



**Bild 1: Temperaturentwicklung während der Bestrahlung (Lampenkonstellation 2, 2. Versuchsdurchlauf)**

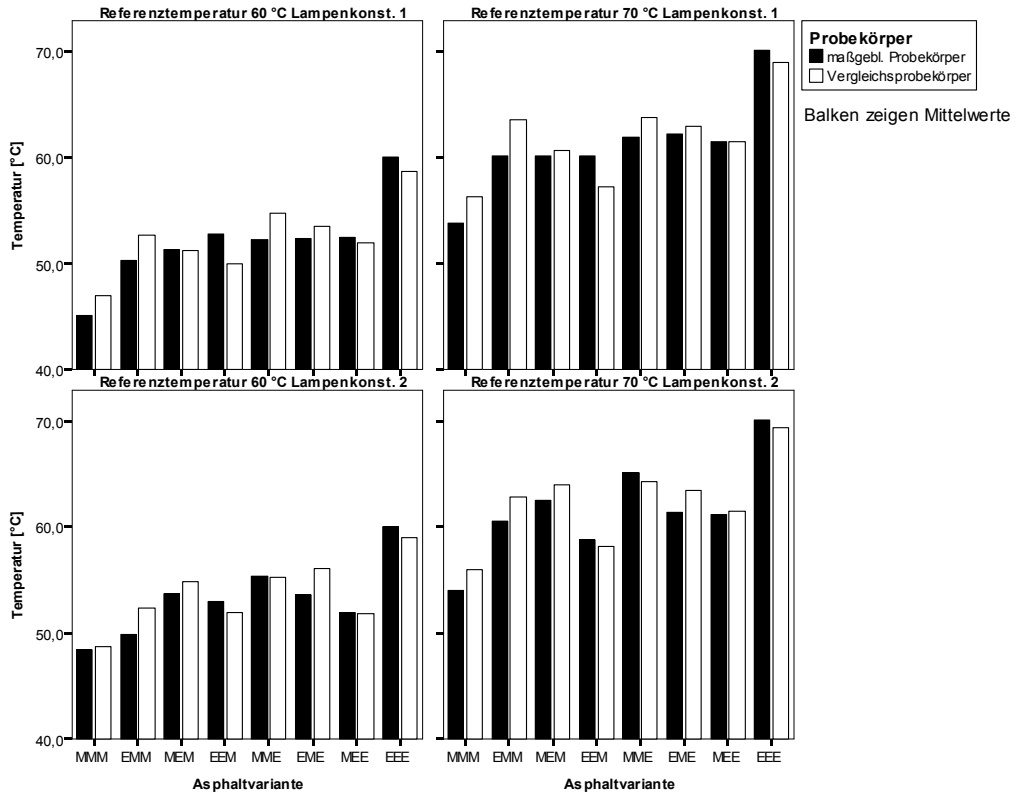
Position der Messfühler		Tiefe 0 mm			Tiefe 20 mm			Tiefe 60 mm				
Versuchsnummer		V01	V02	V03	V01	V02	V03	V01	V02	V03		
Temperaturzustände in °C (Einzelwerte) der Asphaltvarianten bei Referenztemperatur 60 °C	Lampenkonstellation 1	maßgeblicher Probekörper	MMM	45,6	<b>47,4</b>	44,6	32,7	33,2	32,4	26,1	26,6	26,2
			EMM	50,5	50,1	50,1	33,1	33,5	33,6	26,5	26,9	27,0
			MEM	50,8	51,4	51,7	31,1	31,6	31,5	26,1	26,6	26,5
			EEM	52,8	53,1	52,3	32,6	33,1	32,4	25,6	26,0	25,7
			MME	52,8	51,9	52,2	32,2	32,5	32,3	24,8	25,1	25,1
			EME	52,7	52,0	52,1	29,9	30,4	30,1	23,9	24,3	24,3
			MEE	51,3	52,9	53,0	32,4	33,3	32,9	23,7	24,3	24,2
			EEE	60,1	60,0	60,0	31,2	31,9	31,5	22,7	23,3	23,3
		Vergleichsprobekörper	MMM	47,2	47,9	45,8	-	-	-	27,8	28,3	27,8
			EMM	53,1	52,0	52,7	-	-	-	27,2	27,7	27,7
			MEM	50,5	51,3	51,7	-	-	-	26,0	26,5	26,6
			EEM	49,9	50,3	49,5	-	-	-	26,0	26,5	26,3
			MME	55,5	53,9	54,7	-	-	-	25,2	25,6	25,6
			EME	53,9	53,2	53,4	-	-	-	24,0	24,4	24,3
	Lampenkonstellation 2	maßgeblicher Probekörper	MEE	50,7	52,4	52,6	-	-	-	23,8	24,4	24,5
			EEE	58,9	58,8	58,4	-	-	-	22,8	23,5	23,6
			MMM	48,3	48,5	48,4	34,3	34,2	33,9	28,2	28,2	27,8
			EMM	49,9	50,3	49,4	34,7	34,7	34,1	28,7	28,8	28,1
			MEM	54,0	53,6	53,4	33,2	33,1	32,6	28,5	28,5	27,9
			EEM	53,0	53,2	52,6	33,3	33,2	32,8	27,3	27,3	26,7
			MME	55,3	55,4	55,3	34,6	34,5	34,1	27,5	27,6	27,0
			EME	53,7	53,6	53,4	31,6	31,5	31,0	26,3	26,4	25,8
		Vergleichsprobekörper	MEE	52,7	52,0	51,1	33,5	33,4	33,0	26,0	26,1	25,6
			EEE	60,0	60,0	60,0	32,6	32,5	31,9	25,1	25,3	24,6
			MMM	48,8	48,9	48,6	-	-	-	29,6	29,5	29,1
			EMM	52,4	52,7	51,8	-	-	-	28,6	28,7	28,0
			MEM	55,3	54,5	54,7	-	-	-	28,6	28,6	28,0
			EEM	52,1	52,3	51,5	-	-	-	28,0	28,1	27,5
Vergleichsprobekörper	MME	54,9	55,3	55,5	-	-	-	27,2	27,4	26,8		
	EME	56,1	56,0	55,9	-	-	-	26,6	26,7	26,1		
	MEE	52,8	52,0	50,7	-	-	-	26,3	26,4	25,8		
	EEE	59,1	59,2	58,7	-	-	-	25,3	25,5	24,7		

**Tab. 2: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche bei Referenztemperatur 60 °C (Einzelwerte) in °C**

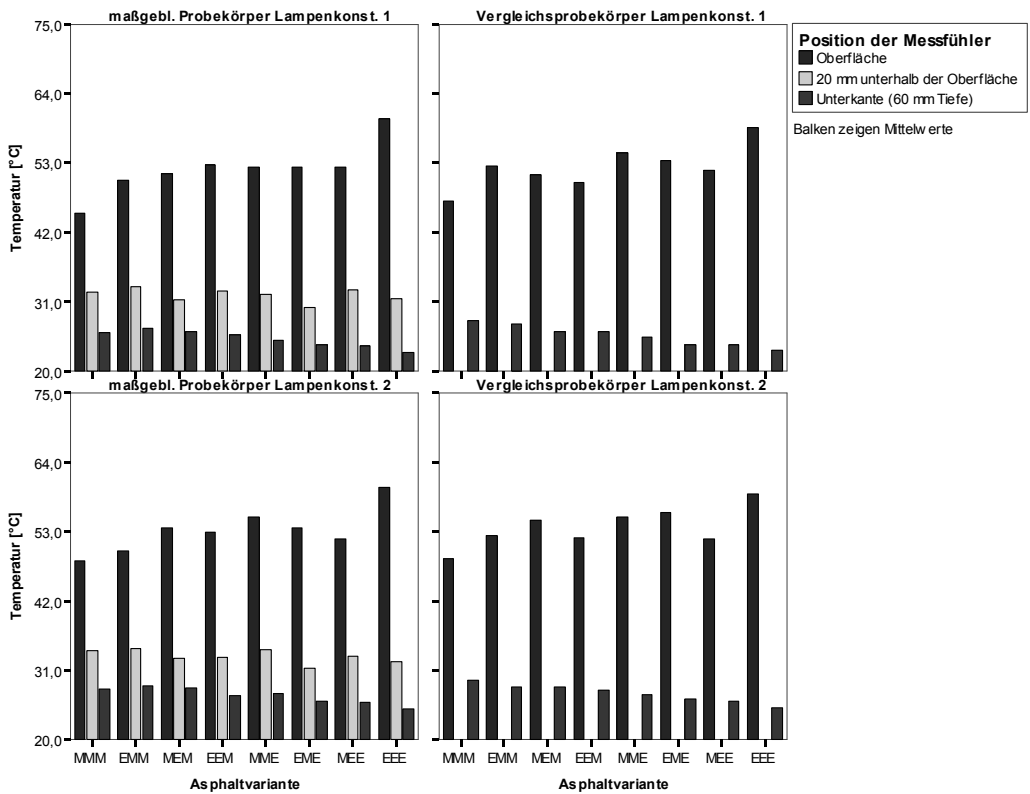


Position der Messfühler		Tiefe 0 mm			Tiefe 20 mm			Tiefe 60 mm				
Versuchsnummer		V01	V02	V03	V01	V02	V03	V01	V02	V03		
Temperaturzustände in °C (Einzelwerte) der Asphaltvarianten bei Referenztemperatur 70 °C	Lampenkonstellation 1	maßgeblicher Probekörper	MMM	54,0	53,6	<b>50,5</b>	40,7	41,5	<b>39,4</b>	32,7	33,6	32,2
			EMM	60,2	60,7	59,4	43,3	44,2	43,5	34,9	35,8	35,1
			MEM	60,0	60,2	60,3	40,2	41,0	40,4	33,8	34,7	34,1
			EEM	60,6	59,6	59,0	41,4	42,2	<b>40,6</b>	33,0	33,9	32,6
			MME	62,0	61,5	62,0	41,6	42,2	41,6	32,0	32,7	32,1
			EME	62,6	61,8	62,1	39,5	40,2	39,2	31,4	32,2	31,4
			MEE	61,0	62,6	62,0	41,8	<b>43,4</b>	42,3	30,6	31,8	31,0
			EEE	70,0	70,0	70,1	41,4	42,6	41,4	30,0	31,2	30,3
		Vergleichsprobekörper	MMM	56,2	56,3	<b>53,2</b>	-	-	-	35,6	36,8	<b>34,9</b>
			EMM	63,6	63,7	63,3	-	-	-	36,2	37,3	36,3
			MEM	60,1	60,9	60,8	-	-	-	33,8	35,1	34,2
			EEM	58,1	58,2	56,3	-	-	-	33,8	<b>35,0</b>	33,5
			MME	64,1	63,2	64,0	-	-	-	32,9	33,9	33,1
			EME	63,1	62,7	62,9	-	-	-	31,3	32,4	31,3
	Lampenkonstellation 2	maßgeblicher Probekörper	MEE	60,6	62,3	61,4	-	-	-	30,9	32,5	31,5
			EEE	68,9	69,2	68,7	-	-	-	30,3	31,9	30,7
			MMM	53,7	53,8	54,6	41,1	41,2	41,3	33,8	34,0	33,8
			EMM	60,7	61,0	60,0	44,2	44,4	43,8	36,0	36,2	35,6
			MEM	62,7	62,4	62,3	41,4	41,2	40,9	35,2	35,1	34,7
			EEM	58,4	59,1	58,9	40,6	40,8	40,3	33,2	33,4	32,9
			MME	65,2	65,3	64,8	43,3	43,4	43,0	33,8	33,9	33,5
			EME	60,6	62,0	61,3	39,3	39,3	39,1	32,2	32,3	31,9
		Vergleichsprobekörper	MEE	61,5	61,0	60,9	41,7	41,3	41,1	31,5	31,4	31,0
			EEE	70,0	70,0	70,0	41,5	41,6	41,1	30,9	31,1	30,5
			MMM	55,8	55,8	56,4	-	-	-	36,2	36,3	36,1
			EMM	62,8	63,3	62,4	-	-	-	36,0	36,2	35,6
			MEM	64,1	63,9	63,9	-	-	-	35,6	35,6	35,2
			EEM	57,6	58,7	58,3	-	-	-	34,5	34,8	34,2
Vergleichsprobekörper	MME	64,1	64,5	64,3	-	-	-	33,4	33,6	33,2		
	EME	<b>60,4</b>	63,8	63,1	-	-	-	32,6	32,6	32,3		
	MEE	62,0	61,4	61,0	-	-	-	31,9	32,0	31,4		
	EEE	69,4	69,5	69,2	-	-	-	31,1	31,4	30,7		

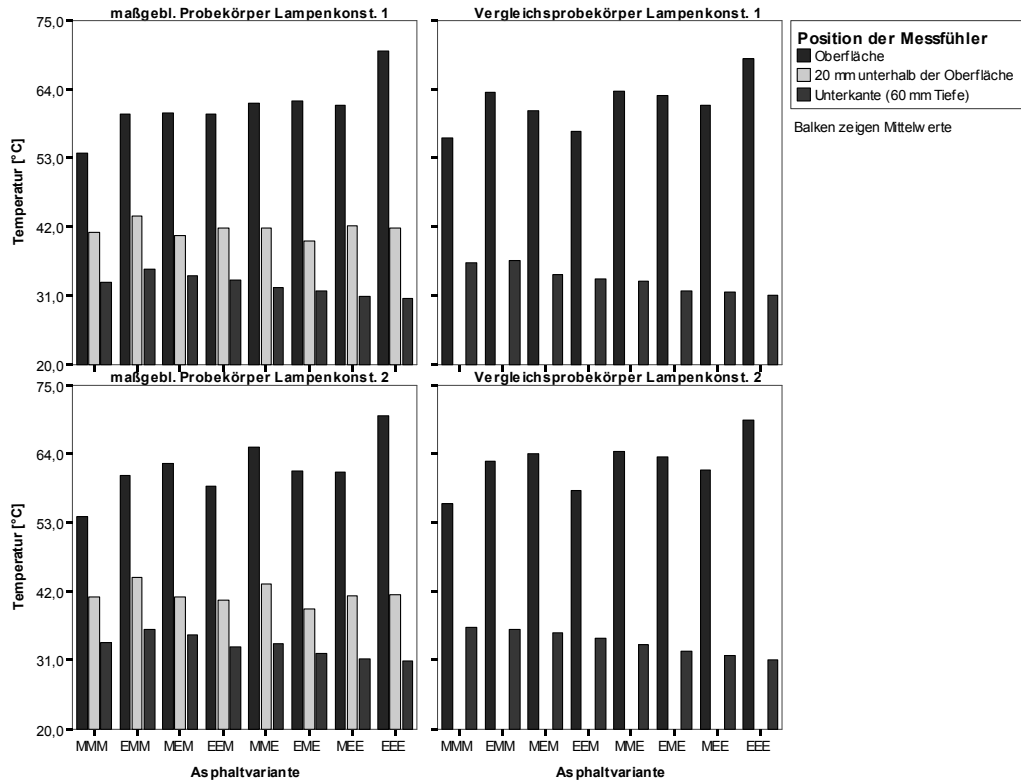
**Tab. 3: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche bei Referenztemperatur 70 °C (Einzelwerte) in °C**



**Bild 2: Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen 60 bzw. 70 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2**



**Bild 3: Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei der Referenztemperatur 60 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2**



**Bild 4: Temperaturzustände innerhalb der Probekörper bei der Referenztemperatur 70 °C mit Lampenkonstellation 1 und 2**

Temperatur [°C]  
Mittelwert

			Position der Messfühler				
			Oberfläche		20 mm Tiefe	Unterkante (60 mm Tiefe)	
			Probekörper		Probekörper	Probekörper	
			maßgebl. Probekörper	Vergleichsprobekörper	maßgebl. Probekörper	maßgebl. Probekörper	Vergleichsprobekörper
Referenztemperatur 60 °C	Lampenkonst. 1	MMM	45,1	47,0	32,5	26,1	28,0
		EMM	50,2	52,6	33,4	26,8	27,5
		MEM	51,3	51,2	31,4	26,4	26,4
		EEM	52,7	49,9	32,7	25,7	26,3
		MME	52,3	54,7	32,3	25,0	25,4
		EME	52,3	53,5	30,1	24,2	24,2
		MEE	52,4	51,9	32,9	24,1	24,3
	EEE	60,0	58,7	31,5	23,1	23,3	
	Lampenkonst. 2	MMM	48,4	48,7	34,1	28,0	29,4
		EMM	49,9	52,3	34,5	28,5	28,4
		MEM	53,7	54,8	33,0	28,3	28,4
		EEM	52,9	52,0	33,1	27,1	27,8
		MME	55,3	55,3	34,4	27,4	27,1
		EME	53,5	56,0	31,3	26,2	26,5
MEE		51,9	51,8	33,3	25,9	26,1	
EEE	60,0	59,0	32,3	25,0	25,2		
Referenztemperatur 70 °C	Lampenkonst. 1	MMM	53,8	56,3	41,1	33,2	36,2
		EMM	60,1	63,5	43,7	35,2	36,6
		MEM	60,1	60,6	40,5	34,2	34,4
		EEM	60,1	57,2	41,8	33,4	33,6
		MME	61,8	63,7	41,8	32,3	33,3
		EME	62,2	62,9	39,6	31,7	31,7
		MEE	61,5	61,4	42,1	30,8	31,6
	EEE	70,0	68,9	41,8	30,5	31,0	
	Lampenkonst. 2	MMM	54,0	56,0	41,2	33,9	36,2
		EMM	60,6	62,8	44,2	35,9	35,9
		MEM	62,5	64,0	41,2	35,0	35,5
		EEM	58,8	58,2	40,6	33,1	34,5
		MME	65,1	64,3	43,2	33,7	33,4
		EME	61,3	63,5	39,2	32,1	32,5
MEE		61,1	61,5	41,4	31,3	31,8	
EEE	70,0	69,4	41,4	30,8	31,0		

Tab. 4: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche (Mittelwerte) in °C

Temperatur [°C]  
Standardabweichung

Referenz- temperatur [°C]	Lampen- konstellation	Asphalt- variante	Position der Messfühler				
			Oberfläche		20 mm Tiefe	Unterkannte (60 mm Tiefe)	
			Probekörper		Probekörper	Probekörper	
			maßgebl. Probekörper	Vergleichs- probekörper	maßgebl. Probekörper	maßgebl. Probekörper	Vergleichs- probekörper
Referenz- temperatur 60 °C	Lampenkonst. 1	MMM	,70	1,06	,26	,08	,29
		EMM	,24	,59	,24	,25	,26
		MEM	,42	,65	,22	,23	,30
		EEM	,40	,41	,36	,25	,27
		MME	,47	,77	,14	,19	,24
		EME	,38	,36	,24	,22	,23
		MEE	,93	1,06	,42	,28	,37
	EEE	,03	,27	,36	,34	,42	
	Lampenkonst. 2	MMM	,13	,17	,19	,24	,25
		EMM	,46	,47	,34	,36	,37
		MEM	,33	,41	,33	,34	,36
		EEM	,34	,38	,30	,31	,33
		MME	,03	,29	,28	,31	,32
		EME	,12	,11	,32	,35	,34
MEE		,78	1,10	,28	,30	,34	
EEE	,01	,29	,35	,38	,41		
Referenz- temperatur 70 °C	Lampenkonst. 1	MMM	,35	,11	,61	,66	,88
		EMM	,63	,18	,49	,46	,64
		MEM	,17	,42	,45	,45	,69
		EEM	,67	1,24	,50	,62	,15
		MME	,27	,48	,36	,37	,55
		EME	,39	,21	,52	,48	,63
		MEE	,67	,84	,36	,28	,84
	EEE	,03	,24	,68	,60	,80	
	Lampenkonst. 2	MMM	,52	,33	,10	,10	,10
		EMM	,51	,47	,32	,31	,32
		MEM	,20	,16	,24	,24	,26
		EEM	,36	,57	,24	,24	,29
		MME	,25	,17	,17	,21	,22
		EME	,72	,49	,13	,21	,22
MEE		,34	,48	,34	,26	,30	
EEE	,02	,15	,25	,31	,33		

Tab. 5: Ergebnisse der Bestrahlungsversuche, Standardabweichung in °C



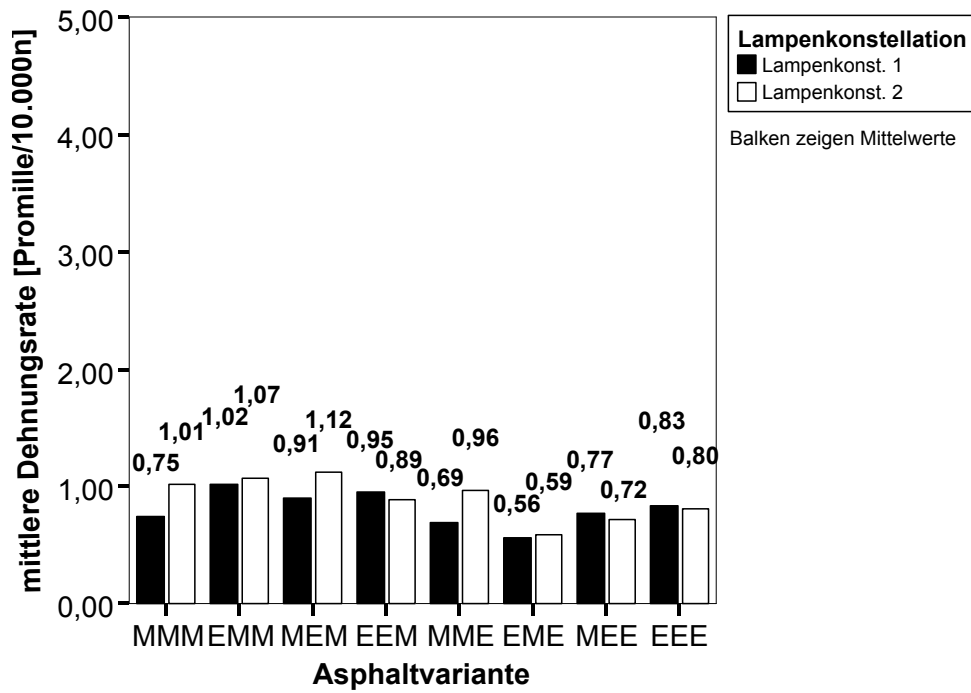
# **Anlage 5**

mittlere Dehnungsrate [Promille/10.000n]

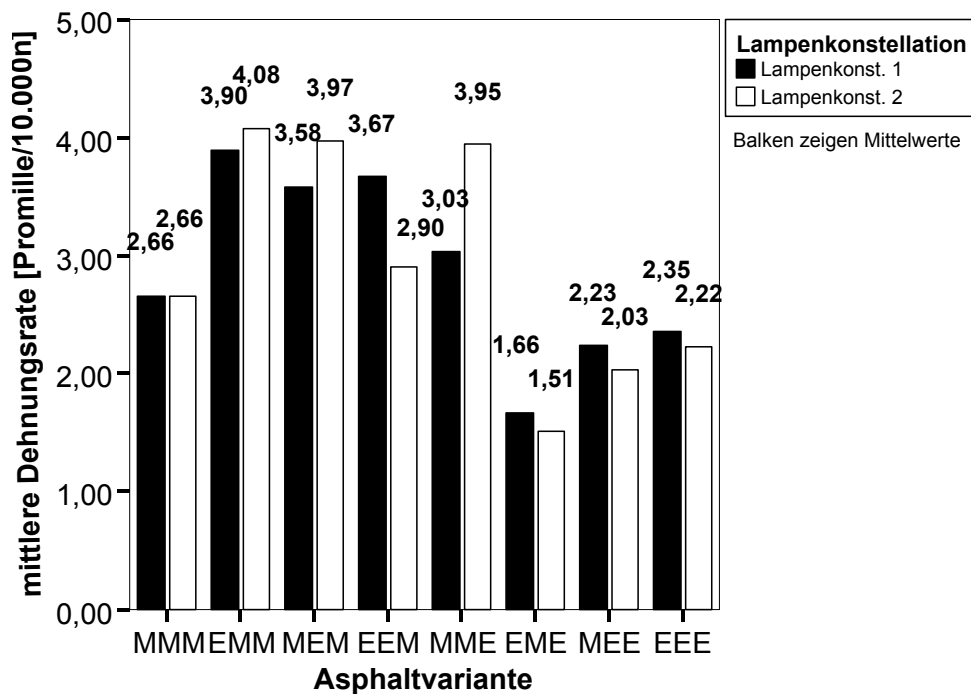
Referenz-temperatur [°C]	Asphalt-variante	Lampen-konstellation	N [-]	arith. Mittelwert [Promille/10.000n]	Standard-abweichung +/- s [Promille/10.000n]
Referenz-temperatur 60 °C	MMM	Lampenkonst. 1	2	,75	,06
		Lampenkonst. 2	3	1,01	,02
		Insgesamt	5	,91	,15
	EMM	Lampenkonst. 1	3	1,02	,01
		Lampenkonst. 2	3	1,07	,05
		Insgesamt	6	1,05	,04
	MEM	Lampenkonst. 1	3	,91	,03
		Lampenkonst. 2	3	1,12	,05
		Insgesamt	6	1,01	,12
	EEM	Lampenkonst. 1	3	,95	,07
		Lampenkonst. 2	3	,89	,04
		Insgesamt	6	,92	,06
	MME	Lampenkonst. 1	3	,69	,02
		Lampenkonst. 2	3	,96	,03
		Insgesamt	6	,83	,15
	EME	Lampenkonst. 1	3	,56	,02
		Lampenkonst. 2	3	,59	,02
		Insgesamt	6	,58	,02
	MEE	Lampenkonst. 1	3	,77	,06
		Lampenkonst. 2	3	,72	,04
		Insgesamt	6	,75	,05
	EEE	Lampenkonst. 1	3	,83	,03
		Lampenkonst. 2	3	,80	,02
		Insgesamt	6	,82	,03
Referenz-temperatur 70 °C	MMM	Lampenkonst. 1	2	2,66	,08
		Lampenkonst. 2	3	2,66	,09
		Insgesamt	5	2,66	,08
	EMM	Lampenkonst. 1	3	3,90	,22
		Lampenkonst. 2	3	4,08	,17
		Insgesamt	6	3,99	,20
	MEM	Lampenkonst. 1	3	3,58	,16
		Lampenkonst. 2	3	3,97	,12
		Insgesamt	6	3,77	,24
	EEM	Lampenkonst. 1	2	3,67	,02
		Lampenkonst. 2	3	2,90	,10
		Insgesamt	5	3,21	,42
	MME	Lampenkonst. 1	3	3,03	,05
		Lampenkonst. 2	3	3,95	,09
		Insgesamt	6	3,49	,51
	EME	Lampenkonst. 1	3	1,66	,06
		Lampenkonst. 2	3	1,51	,02
		Insgesamt	6	1,59	,09
	MEE	Lampenkonst. 1	2	2,23	,11
		Lampenkonst. 2	3	2,03	,08
		Insgesamt	5	2,11	,14
	EEE	Lampenkonst. 1	3	2,35	,10
		Lampenkonst. 2	3	2,22	,02
		Insgesamt	6	2,29	,10

**Tab. 1: Mittlere Dehnungsraten in Promille/10.000n bei den Temperaturzustände der Referenztemperaturen 60 und 70 °C**





**Bild 1: Mittlere Dehnungsraten bei den jeweiligen Temperaturzuständen der Referenztemperatur 60°C**



**Bild 2: Mittlere Dehnungsraten bei den jeweiligen Temperaturzuständen der Referenztemperatur 70 °C**

Kornklasse 2 bis 5 mm	Kornklasse 5 bis 8 mm	Kornklasse 8 bis 11 mm	
		Moräne	EOS
Moräne	Moräne	29,2	34,7
	EOS	30,6	35,4
EOS	Moräne	29,5	36,4
	EOS	33,0	38,2

**Tab. 2: Mittelwerte der Verdichtungswiderstände in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen**

**Zwischensubjektfaktoren**

		Wertelabel	N
Kornklasse 2 bis 5 mm	1	Moräne	58
	2	EOS	59
Kornklasse 5 bis 8 mm	1	Moräne	59
	2	EOS	58
Kornklasse 8 bis 11 mm	1	Moräne	59
	2	EOS	58

**Tests der Zwischensubjekteffekte**

Abhängige Variable: Verdichtungswiderstand [21 Nm]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	1138,385 <sup>a</sup>	7	162,626	22,978	,000
Konstanter Term	130072,706	1	130072,71	18378,340	,000
k2_5	93,941	1	93,941	13,273	,000
k5_8	100,840	1	100,840	14,248	,000
k8_11	898,452	1	898,452	126,945	,000
k2_5 * k5_8	18,965	1	18,965	2,680	,105
k2_5 * k8_11	5,897	1	5,897	,833	,363
k5_8 * k8_11	9,688	1	9,688	1,369	,245
k2_5 * k5_8 * k8_11	1,621	1	1,621	,229	,633
Fehler	771,448	109	7,078		
Gesamt	132290,110	117			
Korrigierte Gesamtvariation	1909,832	116			

a. R-Quadrat = ,596 (korrigiertes R-Quadrat = ,570)

**Tab. 3: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf den Verdichtungswiderstand**

	Kornklasse 2 bis 5 mm	Kornklasse 5 bis 8 mm	Kornklasse 8 bis 11 mm	
			Moräne	EOS
Dehnung [Promille]	Moräne	Moräne	12,77	8,63
		EOS	10,20	6,93
	EOS	Moräne	13,47	7,80
		EOS	11,50	7,70
Dehnungsrate [Promille/n*10000]	Moräne	Moräne	5,80	3,10
		EOS	3,50	1,67
	EOS	Moräne	4,73	2,10
		EOS	4,53	1,83
Lastimpulsanzahl [-]	Moräne	Moräne	8494	9406
		EOS	9263	10000
	EOS	Moräne	9190	10000
		EOS	9738	10000

**Tab. 4: Mittelwerte der Dehnung, Dehnungsrate und Lastimpulsanzahl bei der Prüftemperatur von 50 °C in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen**

**Zwischensubjektfaktoren**

	Wertelabel	N
Kornklasse 2 bis 5 mm	1 Moräne	12
	2 EOS	12
Kornklasse 5 bis 8 mm	1 Moräne	12
	2 EOS	12
Kornklasse 8 bis 11 mm	1 Moräne	12
	2 EOS	12

**Tests der Zwischensubjekteffekte**

Abhängige Variable: Dehnungsrate [Promille/10.000n]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	48,212 <sup>a</sup>	7	6,887	6,353	,001
Konstanter Term	278,802	1	278,802	257,158	,000
k2_5	,282	1	,282	,260	,617
k5_8	6,615	1	6,615	6,101	,025
k8_11	36,507	1	36,507	33,673	,000
k2_5 * k5_8	4,002	1	4,002	3,691	,073
k2_5 * k8_11	,240	1	,240	,221	,644
k5_8 * k8_11	,240	1	,240	,221	,644
k2_5 * k5_8 * k8_11	,327	1	,327	,301	,591
Fehler	17,347	16	1,084		
Gesamt	344,360	24			
Korrigierte Gesamtvariation	65,558	23			

a. R-Quadrat = ,735 (korrigiertes R-Quadrat = ,620)

**Tab. 5: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die Dehnungsrate (Prüftemperatur 50°C)**

Referenztemperatur [°C]	Kornklasse 2 bis 5 mm	Kornklasse 5 bis 8 mm	Kornklasse 8 bis 11 mm	
			Moräne	EOS
Referenztemperatur 60 °C	Moräne	Moräne	45,1	52,3
		EOS	51,3	52,4
	EOS	Moräne	50,2	52,3
		EOS	52,7	60,0
Referenztemperatur 70 °C	Moräne	Moräne	53,8	61,8
		EOS	60,1	61,5
	EOS	Moräne	60,1	62,2
		EOS	60,1	70,0

**Tab. 6: Mittelwerte der Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen von 60 und 70 °C in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen (maßgeblicher Probekörper, Lampenkonstellation 1)**

**Zwischensubjektfaktoren**

		Wertelabel	N
Kornklasse 2 bis 5 mm	1,00	Moräne	21
	2,00	EOS	23
Kornklasse 5 bis 8 mm	1,00	Moräne	22
	2,00	EOS	22
Kornklasse 8 bis 11 mm	1,00	Moräne	21
	2,00	EOS	23
Referenztemperatur [°C]	60	Referenztemperatur 60 °C	23
	70	Referenztemperatur 70 °C	21

**Tests der Zwischensubjekteffekte**

Abhängige Variable: Temperatur [°C]

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	655,684 <sup>a</sup>	7	93,669	3,579	,005
Konstanter Term	137345,501	1	137345,50	5248,331	,000
k2_5	148,327	1	148,327	5,668	,023
k5_8	124,515	1	124,515	4,758	,036
k8_11	252,602	1	252,602	9,653	,004
k2_5 * k5_8	6,311	1	6,311	,241	,626
k2_5 * k8_11	8,069	1	8,069	,308	,582
k5_8 * k8_11	,000	1	,000	,000	,998
k2_5 * k5_8 * k8_11	142,257	1	142,257	5,436	,025
Fehler	942,097	36	26,169		
Gesamt	143364,963	44			
Korrigierte Gesamtvariation	1597,782	43			

a. R-Quadrat = ,410 (korrigiertes R-Quadrat = ,296)

**Tab. 7: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die Oberflächentemperaturen bei den Referenztemperaturen von 60 und 70 °C**

Referenztemperatur [C]	Kornklasse bis 5m	Kornklasse bis 8m	Kornklasse bis 1m	
			Mäne	ES
Referenztemperatur 0C	Mäne	Mäne	9	8
		ES	0	5
	ES	Mäne	0	8
Referenztemperatur 0C	Mäne	ES	2	2
		Mäne	2	9
	ES	Mäne	9	9
Referenztemperatur 0C	Mäne	ES	2	2
		ES	2	2

Tab. 8: Mittelwerte der mittleren Dehnungsrate in Bezug zur Gesteinskörnung in den Splittbereichen

Zwischensubjektfaktoren

	Wert	Label	N
Kornklasse 2 bis 5 m	0	Mäne	5
	2	ES	7
Kornklasse 5 bis 8 m	0	Mäne	6
	2	ES	6
Kornklasse 8 bis 1 m	0	Mäne	5
	2	ES	7
Referenztemperatur [C]	0	Referenztemperatur 0C	7
	2	Referenztemperatur 0C	5

Tests der Zwischensubjekteffekte

Abhängige Variable: mittlere Dehnungsrate [Prozent]

Quelle	Quadratsumme	df	Mittelwert	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell <sup>a</sup>	2,1	7	0,3	2,1	0,05
Konstanter Term	6,5	1	2,5	17,5	0,000
k2	0,9	1	0,3	2,1	0,16
k5	0,0	1	0,0	0,0	1,000
k8	0,9	1	0,3	2,1	0,16
k2 k5	0,2	1	0,0	0,7	0,41
k2 k8	0,2	1	0,0	0,7	0,41
k5 k8	0,9	1	0,3	2,1	0,16
k2 k5 k8	0,5	1	0,1	0,7	0,41
Fehler	6,5	8	0,8		
Gesamt	12,6	15			
Korrigierte Gesamtvariation	8,6	14			

a. R-Quadrat = 0,24; korrigiertes R-Quadrat = 0,24

Tab. 9: Ergebnisse der Varianzanalyse zum Einfluss der Kornklasse auf die mittlere Dehnungsrate



# VERÖFFENTLICHUNGEN

des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos

---

- \* **Band 1: Rüdiger Lamm**  
**Die Gefährdungswahrscheinlichkeit –**  
**Ein Beitrag zur Untersuchung von Straßenknoten**  
**ohne Lichtsignalregelung. 1968**
  
- \* **Band 2: Hans Günter Krebs, Rüdiger Lamm, Rolf Heinemann**  
**Verschleiß und temperaturabhängige Verformungen von Tragschichten**  
**mit Oberflächenschutz unter der Straßenprüfanlage. 1969**
  
- Band 3: Wolfgang Arand**  
**Dichte im Asphaltstraßenbau. 1969**
  
- Band 4: Manfred Pilger**  
**Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit zweigleisiger Eisenbahn-**  
**strecken mit Mischbetrieb zwischen S-Bahnen und Fernbahnen. 1970**
  
- \* **Band 5: Klaus Kraß**  
**Kriechuntersuchungen an zylindrischen Asphaltprobekörpern. 1971**
  
- \* **Band 6: Rolf Heinemann, Heinrich E. Herring, Jürgen H. Klöckner,**  
**Rüdiger Lamm, Rolf Leutner, Hans Gg. Schlichter**  
**Geschwindigkeit, Fahrdynamik, Sicherheit. 1971**
  
- Band 7: Wolfgang Arand**  
**Der bituminöse Mörtel. 1971**
  
- Band 8: Ernst Joachim Vater**  
**Viskoelastisches Verhalten von Destillationsbitumen. 1972**
  
- Band 9: Rolf Heinemann**  
**Schleppkurven – Funktionale Erfassung und Anwendung auf die**  
**Fahrbahngeometrie. 1972**
  
- Band 10: Hans Günter Krebs, Wolfgang Arand**  
**Forschung zwischen Fahrdynamik und Asphaltstraßenbau. 1973**
  
- Band 11: Rüdiger Lamm**  
**Fahrdynamik und Streckencharakteristik**  
**Ein Beitrag zum Entwurf von Straßen unter besonderer**  
**Berücksichtigung der Geschwindigkeit. 1973**

- Band 12: Rolf Leutner**  
Fahrraum und Fahrverhalten. 1974
- Band 13: Hanns Cronen**  
Nutzen aus der Steigerung der Reisegeschwindigkeit  
im Personenfernverkehr auf der Schiene. 1975
- Band 14: Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen**  
1965 – 1975  
Wissenschaftliche Beiträge und Tätigkeitsbericht. 1975
- Band 15: Jürgen Heinz Klöckner**  
Sachschäden von Straßenverkehrsunfällen als Bewertungsgröße  
in der Unfallstatistik. 1976
- Band 16: Peter Kupke**  
Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten  
und Überprüfen der Linienführung. 1977
- Band 17: Helmut Naumann**  
Entwicklung eines Programmsystems zur Herstellung von  
computererzeugten Perspektivfilmen. 1977
- Band 18: Seminar für Verkehrswegebau, Sommersemester 1978**  
Gemeinsame Nutzung des Wolfacher Eisenbahntunnels  
für Schienen- und Straßenverkehr. 1979
- Band 19: Alpay Dengiz**  
Relaxationsverhalten von Asphaltprobekörpern im  
einaxialen Zugversuch. 1980
- Band 20: Wolfgang Jäger**  
Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern. 1980
- Band 21: Ulrich Weißleder**  
Simulation eines neuartigen Betriebssystems für  
hochbelastete Eisenbahnstrecken. 1980
- Band 22: Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen**  
1965 – 1980  
Wissenschaftliche Beiträge und Tätigkeitsberichte. 1980
- Band 23: Ulrich Oser**  
Stochastisches Modell zur Analyse und Simulation des  
rechnergesteuerten Ablaufbetriebes in Rangierbahnhöfen. 1981
- Band 24: Hans Günter Krebs, Gerhard Bernstein, Harald Timm**  
Der Bau neuer Eisenbahnstrecken aus der Sicht der Bevölkerung. 1981
- Band 25: Nicola Damianoff**  
Beeinflussung und Schätzung von Fahrgeschwindigkeiten  
in Kurven. 1981



- \* **Band 26: Klaus Dieterle**  
Fahrzeugverhalten auf nasser Fahrbahn. 1982
- \* **Band 27: Jürgen Schneider**  
Unfallanalytische und fahrdynamische Beurteilung der negativen Querneigung. 1982
- Band 28: Ernst-Ulrich Hiersche**  
Straße und Denkmal. 1983
- Band 29: Willy Pastorini**  
Nachfrageorientierte Produktionskonzepte für den kombinierten Ladungsverkehr. 1985
- Band 30: Hans Gg. Schlichter**  
Räumliche Linienführung von Verkehrswegen. 1985
- Band 31: Alex Stefan Schilcher**  
Laufverhalten von Abläufen bei der Laufzielbremsung. 1985
- Band 32: Norbert Weiland**  
Verformungsverhalten von Asphaltprobekörpern unter dynamischer Belastung. 1986
- Band 33: Festschrift Krebs**  
Beiträge zum Umweltschutz und zur Verkehrssicherheit. 1986
- Band 34: Achim Taubmann**  
Unfallgeschehen innerhalb bebauter Gebiete in Abhängigkeit von Straßen- und Verkehrsbedingungen. 1987
- \* **Band 35: Thomas Wörner**  
Umweltverträglichkeit alternativer Baustoffe für den Straßenbau. 1988
- Band 36: Bernhard Tenzinger**  
Einflußfaktoren auf das Unfallgeschehen unter besonderer Berücksichtigung der Fahrbahn. 1989
- \* **Band 37: Kyriakos Vassiliou**  
Bautechnische Eigenschaften von ungebundenen Tragschichten aus wiederverwendbaren Baustoffen. 1989
- Band 38: Reinhard Bickelhaupt**  
Beurteilung des dreistreifigen Querschnittstyps b2+1 unter besonderer Berücksichtigung des Schwerverkehrs. 1991
- Band 39: Walter Gerstner**  
Einsatzstrategien für Beidrücklokomotiven. 1991
- \* **Band 40: ISE-Festschrift (1981 – 1991).** 1992
- Band 41: Schi-Juehn Lin**  
Steuerung des Hohlraumgehaltes von Dränasphalt im Hinblick auf die Optimierung seiner bautechnischen Eigenschaften. 1993

\* vergriffen

- Band 42: Markus Stöckner**  
Möglichkeiten der Errichtung eines integrierten und zertifizierbaren Qualitätsmanagementsystems für Asphaltmischanlagen. 1994
- Band 43: Honoré Codjia**  
Erarbeitung eines Bewertungshintergrundes für das Prüfverfahren „Schichtenverbund nach LEUTNER“ und Bestimmung der Präzision. 1994
- Band 44: Delia Brocke**  
Eisenbahnbedingter Straßenpersonenverkehr in Einzugsbereichen von Bahnhöfen. 1995
- Band 45: Shafik Jendia**  
Bewertung der Tragfähigkeit von bituminösen Straßenbefestigungen. 1995
- Band 46: Martin Kiuntke**  
Bewährung von Asphaltbefestigungen mit hohen Anteilen von Ausbauasphalt. 1996
- Band 47: Jürgen Reichelt**  
Mineralogische Aspekte bautechnischer und umweltrelevanter Eigenschaften von Müllverbrennungsschlacken. 1996
- Band 48: Bernd Bühler**  
Realisierung eines geräuschabsorbierenden Asphaltüberbaus unter Einführung der Kennwertsynthese als multikriteriale Entscheidungshilfe. 1996
- Band 49: ISE-Festschrift (1992 –1996).** 1996
- Band 50: Wolfgang Lackner**  
Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Ebenheitsmerkmalen und Tragfähigkeitseigenschaften von Straßen im Hinblick auf die Minimierung des Aufwandes bei der Zustandserfassung. 1999
- Band 51: Matthias Zimmermann**  
Quantitative Methoden zur Beurteilung räumlicher Linienführung von Straßen. 2001
- Band 52: Andreas Großmann**  
Bewertung des Tragverhaltens von Betonfahrbahnen basierend auf Messungen mit dem Falling Weight Deflectometer. 2003
- Band 53: Axel Norkauer**  
Beurteilung von Maßnahmen zur Staureduktion bei Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Bundesautobahnen. 2004
- Band 54: Carsten Karcher**  
Prognose und Bewertung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit dem Druckschwellversuch am Beispiel des Splittmastixasphalt. 2005

**Band 55: Rainer Hess**  
**Optimierte Planung von Arbeitsstellen an Autobahnen auf der Grundlage**  
**verkehrlicher Überlastungswahrscheinlichkeiten. 2006**

**Band 56: Thorsten Cypra**  
**Entwicklung einer Entscheidungsmethode für Maßnahmen im Winterdienst**  
**auf hochbelasteten Bundesautobahnen. 2007**

**Band 57: v. Loeben Wolf-Henrik**  
**Überprüfung eines funktionalen Zusammenhanges zwischen der**  
**Fahrbahntextur und dem erzielbaren Bremsweg. 2007**

**Ab Band 58 erscheint die Reihe bei KIT Scientific Publishing, ISSN 1860-093X.**

Die Bände sind unter [www.uvka.de](http://www.uvka.de) als PDF frei verfügbar oder als Druckausgabe bestellbar.

**Band 58: Leyla Chakar**  
**Optimierung des Verformungswiderstandes von Splittmastixasphalt durch**  
**Modifikation mit Elektroofenschlacke. 2009**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Ralf Roos

ISSN 0344-970X

ISBN 978-3-86644-447-8

