

# Schlussbericht vom 31.10.23

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21769 N

## Thema

Verfahrenstechnische, bautechnische und energetische Eignung der Schaumbitumentechologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat

## Berichtszeitraum

01.05.2021 bis 30.04.2023

## Forschungsvereinigung

Deutsches Asphaltinstitut e.V. – DAI e.V.

Ennemoserstraße 10

53119 Bonn

## Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1

Ruhr-Universität Bochum

Lehrstuhl für Verkehrswegebau

Universitätsstraße 150

44780 Bochum

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



# AiF-Forschungsvorhaben-Nr. 21769 N

## Schlussbericht

### **Verfahrenstechnische, bautechnische und energetische Eignung der Schaumbitumentechologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat**

AiF-Forschungsvereinigung: Deutsches Asphaltinstitut (DAI) e.V.

Forschungsstelle: Ruhr-Universität Bochum  
Lehrstuhl für Verkehrswegebau  
Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. M. Radenberg

Bearbeiter: Georg Bus, M.Sc.

Projektpartner: Dipl.-Ing. (FH) Thomas Behle  
Dr. Hermann Heppenheimer  
Dipl.-Ing. Sven Gohl

---

**Das IGF-Vorhaben 21769 N des Deutschen Asphaltinstituts (DAI e.V.) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.**

---

Bochum, den 31. Oktober 2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemstellung</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Temperaturabgesenkter Asphalt</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Schaumbitumenverfahren</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3</b>	<b>Wirkprinzip von Schaumbitumen</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4</b>	<b>Schaumbitumenkenngößen</b> .....	<b>11</b>
2.4.1	Expansion und Halbwertzeit .....	11
2.4.2	Schaumzerfall .....	14
2.4.3	Schaumindex.....	15
<b>3</b>	<b>Untersuchungsmethodik</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Auswahl und Beschaffung der zu untersuchenden Materialien</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2</b>	<b>Untersuchungen zur Optimierung im Labormaßstab</b> .....	<b>17</b>
3.2.1	Charakterisierung der Baustoffkomponenten.....	17
3.2.2	Erstellung der Erstprüfungen .....	17
3.2.3	Herstellung und Optimierung des Schaumbitumens.....	18
3.2.4	Herstellung des Asphaltmischgutes.....	20
3.2.5	Untersuchung der Verdichtbarkeit .....	21
3.2.6	Asphalt-Performance .....	24
<b>3.3</b>	<b>Großtechnische Erprobung an Asphaltmischanlagen</b> .....	<b>25</b>
3.3.1	Schaumbitumenherstellung .....	26
3.3.2	Asphaltmischgutherstellung und Untersuchung.....	27
<b>3.4</b>	<b>Großtechnische Validierung in Untersuchungsstrecken</b> .....	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Energie- und Emissionsbilanzierung der Asphaltmischanlage</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Untersuchungen zur Optimierung im Labormaßstab</b> .....	<b>30</b>
4.1.1	Gesteinskörnung.....	30
4.1.2	Asphaltgranulat.....	31
4.1.3	Eigenschaften der frischen und rückgewonnenen Bindemittel.....	31
4.1.4	Asphaltmischgutzusammensetzung .....	32
4.1.5	Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften .....	35
4.1.6	Verdichtbarkeit.....	42

4.1.7	Nachgelagerte Steifigkeitsuntersuchungen.....	52
4.1.8	Asphalt-Performance .....	57
<b>4.2</b>	<b>Großtechnische Erprobung an Asphaltmischanlagen.....</b>	<b>66</b>
4.2.1	Asphaltmischwerk C .....	66
4.2.2	Asphaltmischwerk A .....	67
4.2.3	Asphaltmischwerk A – Schaumbitumenherstellung .....	67
4.2.4	Asphaltmischwerk A – Asphaltmischgutherstellung.....	69
4.2.5	Asphaltmischwerk A – Asphaltuntersuchungen an der RUB .....	72
4.2.6	Asphaltmischwerk B .....	86
4.2.7	Asphaltmischwerk B – Schaumbitumenherstellung .....	86
4.2.8	Asphaltmischwerk B – Asphaltmischgutherstellung.....	87
4.2.9	Asphaltmischwerk B – Asphaltuntersuchungen an der RUB .....	87
<b>4.3</b>	<b>Großtechnische Validierung in Untersuchungsstrecken.....</b>	<b>98</b>
4.3.1	L 1141 Löchgau – Kleinsachsenheim (Baden-Württemberg) .....	98
4.3.2	L 1141 – Asphaltmischgutherstellung .....	98
4.3.3	L 1141 – Schaumbitumenherstellung und -untersuchung.....	99
4.3.4	L 1141 – Asphalteinbau und baubegleitende Untersuchungen.....	100
4.3.5	L 1141 – Kontrollprüfungen und Performanceuntersuchungen .....	104
4.3.6	L 1141 – Expositionsmessungen .....	112
4.3.7	L 1141 – Visuelle Begutachtung nach ca. einem Jahr .....	113
4.3.8	L 548 Kandel – Minderslachen (Rheinland-Pfalz).....	114
4.3.9	L 548 – Asphaltmischgutherstellung .....	115
4.3.10	L 548 – Asphalteinbau und baubegleitende Untersuchungen .....	115
4.3.11	L 548 – Kontrollprüfungen und Performanceuntersuchungen .....	116
4.3.12	L 548 – Expositionsmessungen .....	129
4.3.13	L 548 – Visuelle Begutachtung nach neun Monaten.....	132
4.3.14	Zwischenfazit – Untersuchungsstrecken .....	132
<b>4.4</b>	<b>Energie- und Emissionsbilanzierung der Asphaltmischanlage .....</b>	<b>134</b>
4.4.1	Berechnungsmodell .....	134
4.4.2	Referenzgemische (Heißasphalt) .....	136
4.4.3	Vergleich zwischen Heiß- und Warmasphalt (Asphaltmischwerk A)....	137
4.4.4	Vergleich zwischen Heiß- und Warmasphalt (Asphaltmischwerk B)....	140
4.4.5	Verwendung von Zusätzen .....	142
<b>4.5</b>	<b>Verfahrenstechnische Optimierung und Parametrierkonzept.....</b>	<b>143</b>
4.5.1	Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt.....	143
4.5.2	Einbau von Schaumbitumen-Warmasphalt.....	145
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>146</b>

---

<b>6</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>152</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>157</b>

## 0 Kurzfassung

Für die Herstellung von temperaturabgesenktem Asphalt (Warmasphalt) können organische Zusätze, mineralische Zusätze, chemische / oberflächenaktive Zusätze oder Schaumbitumentechnologien eingesetzt werden. Je nach eingesetztem Zusatz wird die Rheologie des Bindemittels dauerhaft verändert. In Deutschland existieren bereits seit einigen Jahren Erfahrungen mit der Herstellung von Warmasphalt unter Verwendung von organischen und mineralischen viskositätsverändernden Zusätzen. Der Einsatz von Schaumbitumen zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat ist in Deutschland bisher noch nicht erforscht worden. Das Ziel dieses Forschungsprojektes war daher der Nachweis, dass ein hinreichender Absenkungseffekt der Misch- und Verdichtungstemperatur von Asphalt durch den Einsatz von Schaumbitumen auch bei Zugabe von Asphaltgranulat in zulässigem und praxisüblichem Umfang wirksam ist.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht und die verfahrenstechnische, bautechnische und energetische Eignung der Schaumbitumentechnologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat nachgewiesen. Es konnte demonstriert werden, dass eine Asphaltdeckschicht, eine Asphaltbinderschicht und eine Asphalttragschicht mit Asphaltgranulat-Anteilen von 30 bis 80 M.-% temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen produziert werden kann. Der positive Effekt auf das Verdichtungsverhalten durch Schaumbitumen wurde im Labormaßstab auch noch bei einem aufgeschäumten Frischbindemittelanteil von 1,0 M.-% (AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat) nachgewiesen. Weiterhin zeigten die Verdichtungsversuche, dass der Einsatz von Bitumen mit guten Schaumeigenschaften sowie schaumstabilisierenden Additiven (hohe Expansionsrate und lange Halbwertzeit) das Verdichtungsverhalten von Schaumbitumen-Warmasphalt noch weiter begünstigen kann. Das Potenzial zur Temperaturabsenkung bei Verwendung von Schaumbitumen bei den hier untersuchten Asphalten liegt zwischen 10 und 30 K.

Anhand von zwei Untersuchungsstrecken konnte zudem demonstriert werden, dass eine Asphaltdeckschicht und eine Asphaltbinderschicht mit Asphaltgranulat-Anteilen von 30 bis 50 M.-% und 40 bis 60 M.-% unter Einsatz von Schaumbitumen temperaturabgesenkt hergestellt und eingebaut werden kann. Durch die Absenkung der Asphaltmischguttemperatur ist das Zeitfenster für die Verdichtung durch die Walzen insgesamt kürzer, was beim Einbau von Warmasphalt mit Schaumbitumen und prinzipiell auch bei anderen Technologien / Zusätzen zur Temperaturabsenkung berücksichtigt werden sollte. Nach einem anforderungsgerechten Einbau weist der Schaumbitumen-Warmasphalt vergleichbare Gebrauchseigenschaften wie konventioneller Heißasphalt auf. Um dennoch das Verformungsrisiko von Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichten aus Schaumbitumen-Warmasphalt zu minimieren, sollte bei der Herstellung von Schaumbitumen auf Wassergehalte  $\leq 2\%$  zurückgegriffen werden.

Durch die Absenkung der Asphaltmischguttemperatur um 20 bis 30 K konnten die Dämpfe und Aerosole beim Einbau zum Teil deutlich reduziert werden. Der positive Effekt der Temperaturabsenkung macht sich auch an der Asphaltmischanlage bemerkbar. Durch Berechnungen mit einem thermischen Modell der Asphaltmischgutherstellung konnte gezeigt werden, dass durch die Absenkung der Produktionstemperatur um 30 K zwischen 11,8 und 12,5 % Energie und ebenso viele CO<sub>2</sub>-Emissionen an der Asphaltmischanlage eingespart werden können. Der

---

Einsatz von Zusätzen kann den positiven Effekt der Temperaturabsenkung wieder ausgleichen oder sogar zu einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen führen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Im Jahr 2018 hat die MAK-Kommission als Resultat einer erneuten toxikologischen Betrachtung einen Orientierungswert von  $1,5 \text{ mg/m}^3$  für Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Bitumen vorgeschlagen. Dieser Orientierungswert wurde vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) aufgenommen und als verbindlicher Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) verabschiedet. Seit 2020 findet sich der Arbeitsplatzgrenzwert für Dämpfe und Aerosole bei der Heißverarbeitung von Destillations- und Air-Rectified-Bitumen in den Technischen Regeln für Gefahrstoffe [TRGS 900, 2020] wieder. Als Zugeständnis für die Asphaltindustrie wurde der Grenzwert zunächst für die dann folgenden 5 Jahre ausgesetzt, mit der Forderung, dass bis zum Ablauf der Frist technologische Lösungen zur sicheren Einhaltung gefunden werden. Eine wesentliche Komponente wird hierbei der Absenkung der Verarbeitungstemperatur zugemessen.

Der europäische Asphaltverband EAPA definiert in seinem Positionspapier [EAPA, 2014] den temperaturabgesenkten Asphalt als Warmasphalt (WA) oder Warmasphaltnischgut (WAM), der bei Temperaturen zwischen 100 und 150 °C hergestellt wird. Dagegen wird konventioneller Asphalt (Heißasphalt) bei Temperaturen zwischen 150 und 190 °C hergestellt. Der Temperaturbereich für den Heißasphalt findet sich annähernd mit gleichen Werten auch im aktuellen deutschen Regelwerk, den [TL Asphalt-StB, 07/13] wieder, wobei die Temperaturgrenzbereiche dort je nach Bitumensorte variieren. Für die Herstellung von Warmasphalt können laut [EAPA, 2014] organische Zusätze, chemische Zusätze oder Schaumbitumenverfahren eingesetzt werden.

In Deutschland werden aktuell überwiegend organische und mineralische viskositätsverändernde Zusätze zur Herstellung von temperaturabgesenkten Asphalten verwendet. Während diese Zusätze seit 2006 ihren Eingang in das Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt [M TA, 2006] gefunden haben, findet Schaumbitumen als Verfahren zur Temperaturabsenkung dort nur am Rande Erwähnung. Dieser Umstand hat sich auch mit den aktualisierten Fassungen [M TA, 2011] und [M TA, 2021] nicht geändert. Die Ursache hierfür ist die mangelnde nationale Erfahrung mit Schaumbitumen.

Im Forschungsprojekt [Wirth et al., 2008] wurde die grundsätzliche Einsatzmöglichkeit von Schaumbitumen zur Herstellung von temperaturabgesenktem Asphalt bzw. Warmasphalt in Deutschland nachgewiesen. Die Frage nach einem möglichen negativen Einfluss von Restwasser im Bindemittel auf das Verformungsverhalten konnte in diesem Projekt jedoch nicht abschließend beantwortet werden. Darüber hinaus war bei der Verwendung von Schaumbitumen noch nicht hinreichend wissenschaftlich nachgewiesen, ob ein ausreichender Temperaturabsenkungseffekt auch noch bei Zugabe von Asphaltgranulat vorhanden ist.

Die Verwendung von Asphaltgranulat ist im technischen Regelwerk für den Straßenbau in Deutschland unter anderem zur Ressourcenschonung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes durchgängig verankert und findet in den Bauverträgen regelmäßig und auf hohem technischem Niveau breite Anwendung. Die Mitverwendung von Asphaltgranulat ist aus diesen Gründen unumgänglich und muss auch bei abgesenkten Produktionstemperaturen verfahrenstechnisch umsetzbar sein.

## 1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieses Forschungsprojektes ist der Nachweis, dass ein hinreichender Absenkungseffekt der Misch- und Verdichtungstemperatur durch den Einsatz von Schaumbitumen auch bei Zugabe von Asphaltgranulat in zulässigem und praxisüblichem Umfang wirksam ist. Das vorliegende Forschungsprojekt knüpft somit direkt an das Forschungsprojekt [Wirth et al., 2008] an.

Der Nachweis erfolgt zunächst im Labormaßstab. Hierzu werden Heiß- und Warmasphaltemischungen mit unterschiedlichen Anteilen an Asphaltgranulat unter Verwendung einer Labor-Schaumbitumenanlage hergestellt und performanceorientiert geprüft. Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Laborprogramm werden Heiß- und Warmasphaltemischungen an drei Asphaltmischanlagen, die jeweils mit einer Schaumbitumenanlage ausgestattet sind, unter Variation der Mischtemperatur und Mischzeit großtechnisch hergestellt und anschließend ebenfalls hinsichtlich der Performanceeigenschaften untersucht. Ausgewählte Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtvarianten werden in Heißbauweise (Referenzmischungen ohne Schaumbitumen) und Warmbauweise (Schaumbitumen-Warmasphalt) in Untersuchungsstrecken validiert. Ergänzend zur material- und bautechnischen Betrachtung, wird eine Energie- und Emissionsbilanzierung für die Produktion einer Tonne Heiß- und Warmasphalt an einer Asphaltmischanlage durchgeführt. Abschließend werden aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen für die Praxis formuliert.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Temperaturabgesenkter Asphalt

Der europäische Asphaltverband [EAPA, 2014] klassifiziert Asphaltmischgut in Abhängigkeit von der Produktionstemperatur in Kaltasphalt, halbwarmer Asphalt, Warmasphalt und Heißasphalt. Kaltasphalt wird ohne Erwärmung der Gesteinskörnung und unter Einsatz einer Bitumenemulsion oder Schaumbitumen hergestellt. Für halbwarmen Asphalt wird die Gesteinskörnung auf Temperaturen zwischen 70 und 100 °C erwärmt. Die Produktion von Warmasphalt – in Deutschland auch als Niedrigtemperaturasphalt oder temperaturabgesenkter Asphalt (TA) bezeichnet – erfolgt bei Temperaturen von 100 bis 150 °C. Konventioneller Heißasphalt wird oberhalb von 150 °C hergestellt. In diesem Forschungsbericht ist mit den Begriffen Niedrigtemperaturasphalt und temperaturabgesenkter Asphalt ausschließlich Warmasphalt unter Einsatz konventioneller Bindemittel nach [TL Bitumen-StB, 07/13] gemeint. Kaltasphalt und halbwarmer Asphalt werden im Folgenden nicht weiter thematisiert. In Abbildung 2-1 sind die Temperaturbereiche für die Herstellung der genannten Asphalte dargestellt.

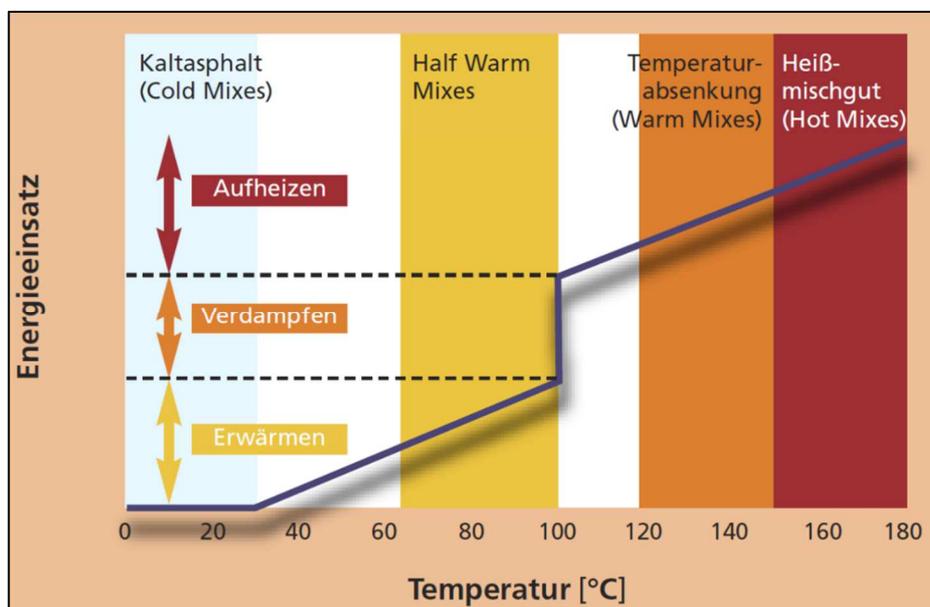


Abbildung 2-1: Klassifikation der Temperaturbereiche von Asphalt aus [DAV, 2021] in Anlehnung an [EAPA, 2014]

Um Warmasphalt herzustellen, kommen entweder Zusätze (Additive) oder spezielle Verfahren zum Einsatz, die eine bessere Verarbeitung des Mischgutes bei reduzierten Temperaturen ermöglichen. Dies sind:

- Organische viskositätsverändernde Zusätze
- Mineralische viskositätsverändernde Zusätze
- Chemische / oberflächenaktive Zusätze
- Schaumbitumenverfahren

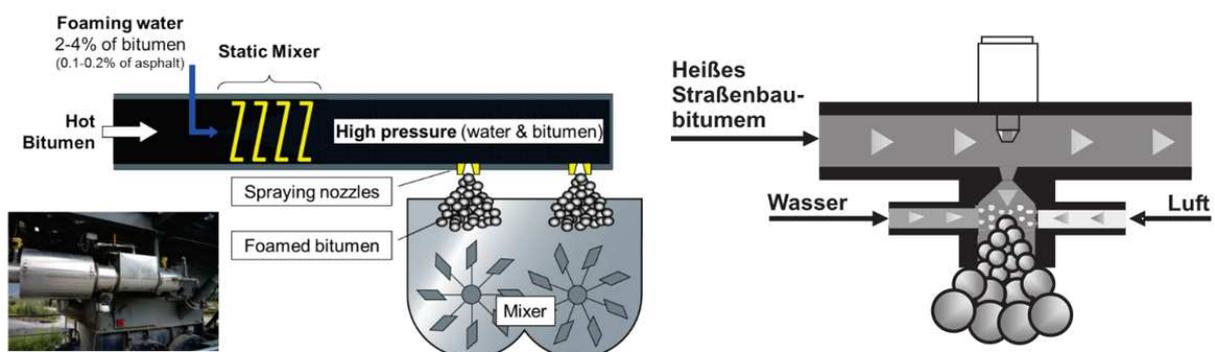
In Deutschland werden überwiegend organische und vereinzelt mineralische viskositätsverändernde Zusätze zur Herstellung von temperaturabgesenkten Asphalten verwendet. Mit der aktuellen Grenzwertdiskussion und vor dem Hintergrund der erforderlichen Reduktion von Treibhausgasemissionen ist nun auch Schaumbitumen zunehmend in den Vordergrund gerückt, was unter anderem an dessen Berücksichtigung im Technischen Informationspapier des Deutschen Asphaltverbandes (DAV) für Niedrigtemperaturasphalt [DAV, 2021] deutlich wird.

## 2.2 Schaumbitumenverfahren

Unter Schaumbitumenverfahren werden Verfahren zusammengefasst, mit welchen disperse Systeme bestehend aus Bitumen und Wasser bzw. Wasserdampf (Schaumbitumen) erzeugt werden können. Die Erfindung von Schaumbitumen geht zurück auf die 1950er Jahre [Jenkins, 2000]. Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde Schaumbitumen hauptsächlich für die Herstellung von Kaltasphalt verwendet. In den letzten Jahrzehnten ist der Fokus jedoch zunehmend in Richtung Warmasphalt gerückt. Anders als in Deutschland existieren im Ausland (z. B. USA oder Niederlande) jahrelange Erfahrungen bezüglich der Produktion von Warmasphalt unter Verwendung von Schaumbitumen.

Nach [EAPA, 2014] kann für die Herstellung von Schaumbitumen grundsätzlich zwischen direkten, indirekten und kombinierten Verfahren unterschieden werden. Eine Möglichkeit Schaumbitumen indirekt zu erzeugen, ist durch Zugabe von mineralischen Zusätzen (z. B. Zeolithen) möglich. Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von Bitumen sowie feuchten und trockenen (heißen) Gesteinen und Asphaltgranulat. Die dritte Möglichkeit ist die Verwendung einer Bitumenemulsion und heißen Gesteinen sowie Asphaltgranulat. In den drei genannten Fällen wird das Bitumen (indirekt) durch Verdampfen von Wasser oder Feuchtigkeit während dem Mischvorgang aufgeschäumt. Der Prozess der indirekten Schaumbitumenherstellung kann wie im Fall von Zeolithen mehrere Minuten bis Stunden andauern.

Bei der direkten Schaumbitumenherstellung werden üblicherweise 2 bis 4 M.-% Wasser (bezogen auf die Menge des eingesetzten Bindemittels) und heißes Bitumen (unter Druck) miteinander vermengt. Anders als bei den zuvor genannten Methoden wird das Schaumbitumen hier bereits vor dem Mischvorgang und nicht erst im Mischer erzeugt. Die Vermengung von Bitumen und Wasser erfolgt entweder in einem statischen Mischer oder in einer Expansionskammer. Im ersten Fall werden Bitumen und Wasser durch ein metallisches Rohr (statischer Mischer), welches strömungsbeeinflussende Elemente beinhaltet, befördert (vgl. Abbildung 2-2, links). Das durch die Vermengung entstandene Dispersoid (Wasser und Bitumen) wird über Düsen in den Asphaltmischer übergeben. Je nach Anlagentechnologie entsteht das Schaumbitumen bereits im statischen Mischer oder erst beim Austritt aus dem statischen Mischer. Bei der zweiten Methode werden Wasser und Luft in einer Expansionskammer miteinander vermengt (siehe Abbildung 2-2, rechts).



**Abbildung 2-2:** links: Schaumbitumenherstellung durch statischen Mischer [EAPA, 2014], rechts: Schaumbitumenherstellung in einer Expansionskammer [M KRC, 2005]

Bei der kombinierten Schaumbitumenherstellung werden direkte und indirekte Herstellungsprozesse vereint. Tabelle 2-1 beinhaltet eine Auswahl weltweit eingesetzter Schaumbitumenverfahren.

**Tabelle 2-1: Möglichkeiten zur Herstellung von Warmasphalt unter Verwendung von Schaumbitumen in Anlehnung an [D'Angelo et al., 2008] und [Bonaquist, 2011]**

Herstellungsprozess	Herstellungstemperatur Asphalt	Prinzip	Länder
<b>Indirekte Schaumbitumenherstellung</b>			
Zeolithe	130 bis 170 °C	Viskositätsverändernder mineralischer Zusatz	Frankreich, Deutschland, USA
LEA (Low Energy Asphalt)	< 100 °C	Nutzung der Restfeuchte aus der groben Gesteinskörnung	Frankreich, Spanien, Italien, USA
LEAB (Low Energy Asphalt Concrete)	90 °C	Nutzung der Restfeuchte aus allen Gesteinskomponenten	Niederlande
Evotherm	85 bis 115 °C	Wasser aus Bitumenemulsion wird durch Kontakt mit heißer Gesteinskörnung verdampft und das Bitumen aufgeschäumt.	Frankreich, Kanada, China, Südafrika, USA
<b>Direkte Schaumbitumenherstellung</b>			
Double-Barrel Green	116 bis 135 °C	Schaumbitumenherstellung durch Vermengen von Wasser und heißem Bitumen. Anschließend Übergabe des Schaumbitumens über Düsen in den Asphaltmischer.	USA
Ultrafoam GX	120 bis 160 °C		
Aquablack	n. b.		
Warm Asphalt Mixture (WAM)	100 bis 120 °C	Weiches und hartes Bitumen werden eingesetzt. Das harte Bitumen wird aufgeschäumt zugegeben.	Norwegen, USA
<b>Kombinierte Schaumbitumenherstellung</b>			
LT-Asphalt (Low Temperature Asphalt)	90 °C	Kombination aus Schaumbitumen und Zeolithen	Niederlande, Italien

Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist die (direkte) Schaumbitumenherstellung durch Vermengen von Bitumen und Wasser mit anschließender Übergabe des Schaumbitumens über Düsen in den Asphaltmischer. Andere Schaumbitumenverfahren sind nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes und werden nicht weiter thematisiert.

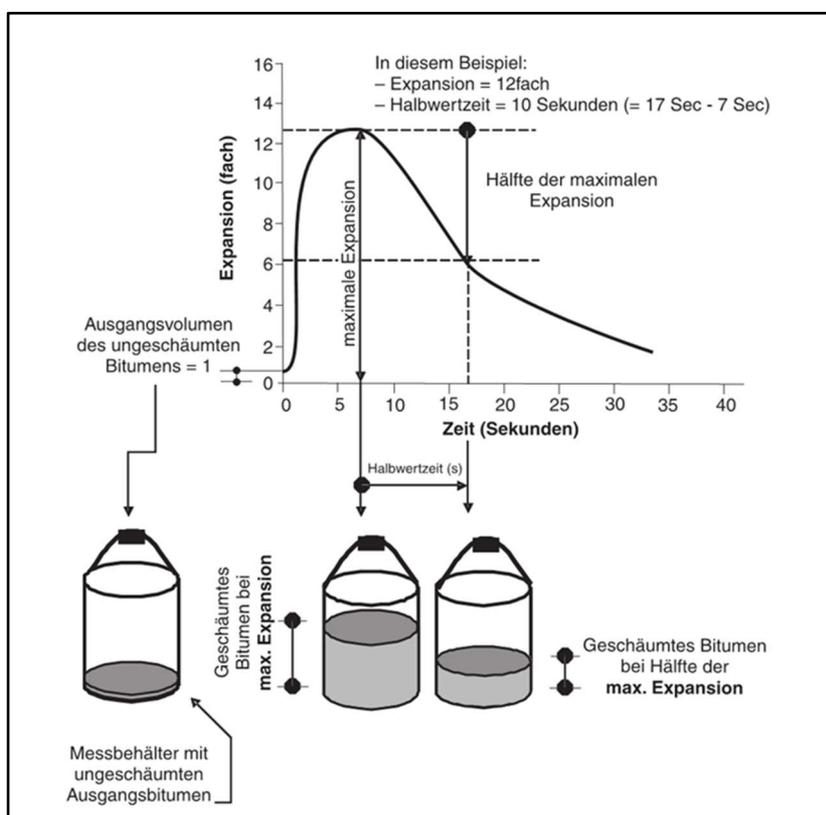
### 2.3 Wirkprinzip von Schaumbitumen

Beim Kontakt mit dem heißen Bitumen wird Wasser schlagartig in Wasserdampf umgewandelt, welcher wiederum das Bitumenvolumen temporär um ein Vielfaches vergrößert. Das so erhaltenen Schaumbitumen weist eine gegenüber dem ursprünglichen Bitumen reduzierte Viskosität auf. Durch das vergrößerte Bitumenvolumen können die Gesteinskörnungen während des Mischprozesses besser umhüllt werden, wodurch geringere Produktionstemperaturen als bei Verwendung konventioneller Bitumen zur Erhaltung einer gleichmäßigen und homogenen Asphaltmischung notwendig sind [DAV, 2021]. Durch die bessere Homogenisierung wird die Verdichtbarkeit des Asphaltmischgutes positiv beeinflusst.

## 2.4 Schaumbitumenkenngößen

### 2.4.1 Expansion und Halbwertzeit

Die Beurteilung der Eigenschaften von Schaumbitumen erfolgt seit vielen Jahren durch die Kenngrößen Expansion – auch Expansionsrate genannt – und Halbwertzeit. Nach [M KRC, 2005] ist die Expansion das Verhältnis zwischen dem maximalen Schaumbitumenvolumen ( $V_{\max}$ ) und dem Volumen des nicht aufgeschäumten Bitumens ( $V_{\min}$ ). Die Halbwertzeit entspricht der Zeit in Sekunden, die das Schaumbitumen benötigt, um wieder auf die Hälfte seines maximalen Volumens abzusinken. Die Expansion drückt somit die Fähigkeit eines Bitumens aus, um ein bestimmtes Vielfaches aufzuschäumen. Die Halbwertzeit beschreibt hingegen die Stabilität der Schaumbitumenbläschen. In Abbildung 2-3 ist die Expansion und Halbwertzeit eines Schaumbitumens schematisch veranschaulicht.



**Abbildung 2-3: Schematische Veranschaulichung von Expansion und Halbwertzeit [M KRC, 2005]**

Der Grund weshalb sich die Expansion und die Halbwertzeit für die Beschreibung der Schaumbitumeneigenschaften etabliert haben, ist deren vergleichsweise einfache und schnelle Bestimmung. Für die Bestimmung werden lediglich ein Probenbehälter (z. B. Eimer), ein Messstab und eine Stoppuhr benötigt. Die maximal erreichte Höhe des Schaumbitumens wird am Messstab abgelesen und die Halbwertzeit unter Zuhilfenahme der Stoppuhr bestimmt. Der wesentliche Kritikpunkt dieser Methode ist die subjektive Wahrnehmung des agierenden Operators. Bei sehr unstabilen Bitumenschäumen besteht zusätzlich die Problematik, dass das Zeitfenster zwischen der Erfassung der maximalen Schaumhöhe und der Ermittlung der Halbwertzeit relativ kurz ist. Darüber hinaus können geringe Veränderungen der Schaumhöhe visuell nur schwer differenziert und identifiziert werden. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren neue Methoden und Messtechniken zur Ermittlung dieser beiden Kenngrößen erschlossen.

[He et al., 2006], [Namutebi, 2011] und [Ozturk, 2013] nutzten Videoaufnahmen, um die Expansion und Halbwertzeit der aufgezeichneten Schaumbitumen zielsicherer ermitteln zu können. In den Studien von [Newcomb et al., 2015] und [Iwanski et al., 2021] wurde hingegen auf Laser- und Ultraschallmesstechnik zur Ermittlung dieser beiden Kenngrößen zurückgegriffen.

### **Einflussfaktoren auf die Eigenschaften von Schaumbitumen**

Die Eigenschaften von Schaumbitumen und somit auch die Kenngrößen Expansion und Halbwertzeit werden durch zahlreiche Faktoren beeinflusst (siehe Tabelle 2-2).

**Tabelle 2-2: Einflussfaktoren auf die Schaumbitumeneigenschaften**

	<b>Einflussfaktoren</b>
Anlagen- und Prozessparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zugabewassergehalt</li> <li>• Bitumen-, Luft- und Wasserdruck</li> <li>• Bitumentemperatur</li> <li>• Geometrie und Größe der Düse</li> <li>• Art der Schaumbitumenanlage</li> </ul>
Bitumen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bitumensorte</li> <li>• Viskosität</li> <li>• Chemische Zusammensetzung / Provenienz</li> <li>• Additive (Antischaummittel / Schaumstabilisatoren)</li> </ul>
Versuchsbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatur des Auffangbehälters</li> <li>• Größe des Auffangbehälters</li> <li>• Menge des aufgeschäumten Bitumens</li> <li>• Aussprühzeit bei der Schaumbitumenherstellung</li> </ul>

Die Expansion und Halbwertzeit eines Schaumbitumens kann, sofern keine Antischaummittel im Bitumen enthalten sind, durch die Menge des zugegebenen Wassers, die Bitumentemperatur und den Druck beeinflusst werden. Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die Expansion zu und die Halbwertzeit ab. Mit zunehmendem Wassergehalt wird demnach ein größeres Wasserdampfvolumen produziert, welches dann überwiegend große Schaumbitumenbläschen hervorbringt. Große Schaumbitumenbläschen zerfallen wegen der geringeren Oberflächenspannung deutlich schneller als kleine Schaumbitumenbläschen, was wiederum eine Verringerung der Halbwertzeit zufolge hat. Expansion und Halbwertzeit verhalten sich somit meist umgekehrt zueinander. Nach [M KRC, 2005] führt die Erhöhung der Bitumentemperatur bei den meisten Bitumen zu einer Verbesserung der Schaumeigenschaften. In [Martinez et al., 2014] führte die Erhöhung der Bitumentemperatur bei allen untersuchten Bitumen hingegen zu einer Abnahme der Expansion. Auch der Druck, mit welchem Luft- und Wasser in das Bitumen eingedüst werden, spielt eine wichtige Rolle. Bei Labor-Schaumbitumenanlagen hat sich ein Luftdruck von 5 bis 5,5 bar und ein Wasserdruck von 6 bar als zuverlässig für die Herstellung von Schaumbitumen erwiesen. [Wirth et al., 2008] untersuchten auch andere Kombinationen von Luft- und Wasserdruck, jedoch ohne merkliche Verbesserung der Schaumbitumeneigenschaften. Auch die Art der Schaumbitumenanlage sowie die Größe und Geometrie der Düsen haben einen Einfluss auf die Eigenschaften des produzierten Schaums, wie die Untersuchungen von [Newcomb et al., 2015] gezeigt haben.

Bitumen gleicher Sorte aber unterschiedlicher Provenienz können unterschiedliche Schaumeigenschaften aufweisen, wie in [Martinez et al., 2014] und [Newcomb et al., 2015] festgestellt wurde. [Namutebi, 2011] kam zu dem Ergebnis, dass die Schaumbitumeneigenschaften von der Bindemittelviskosität und -sorte abhängig sind. [Kar et al., 2018] fanden heraus, dass Bitumen mit hohen Sulfoxid- und Carbonylanteilen Schaumbitumen mit niedrigen Expansionen aber längeren Halbwertzeiten hervorbringen. Weiterhin können schlechte Schaumeigenschaften ein Hinweis für in Bitumen enthaltene Antischaummittel sein [M KRC, 2005]. Geeignete Additive können wiederum zur Verbesserung der Schaumbitumeneigenschaften eingesetzt werden, wie in [Martinez et al., 2014], [Newcomb et al., 2015] und [Kowalska et al., 2017] demonstriert wurde.

Die Temperatur des Auffangbehälters sowie dessen Volumen Auswirkungen auf die Expansion und Halbwertzeit haben [Lesueur et al., 2004]. Auch die Menge des aufgeschäumten Bitumens und dessen Aussprühzeit haben einen Einfluss auf die Schaumbitumeneigenschaften [Jenkins, 2000].

### Mindestanforderungen an Expansion und Halbwertzeit

Je nach Verwendungszweck werden unterschiedliche Mindestwerte für die Expansion und die Halbwertzeit von Schaumbitumen empfohlen. Laut [M KRC, 2005] zeichnet sich ein für Kaltrecycling geeignetes Schaumbitumen durch eine mindestens 10fache Expansion und eine Halbwertzeit von mindestens 10 Sekunden aus. Nach [Wirtgen, 2005] sollte Schaumbitumen im Zusammenhang mit Gesteinstemperaturen oberhalb von 15 °C eine mindestens 8fache Expansion und eine Halbwertzeit von mindestens 6 Sekunden aufweisen. Die Empfehlungen für die Mindestwerte der Expansion und Halbwertzeit variieren je nach Literaturquelle (siehe Tabelle 2-3).

Hierbei ist zu beachten, dass sich diese Empfehlungen rein auf die labortechnisch ermittelten Kennwerte mit der Schaumbitumenanlage der Firma Wirtgen (Modell: WLB 10 S) beziehen und dort als Bewertungsmaßstab herangezogen werden können. Eine direkte Übertragung der absoluten Größenordnung der Kennwerte auf großtechnisch hergestelltes Schaumbitumen ist wegen der verfahrenstechnischen Unterschiede vermutlich nicht möglich. Die hier aufgeführten Kennwerte und Anforderungen beziehen sich ausschließlich auf im Labor hergestelltes Schaumbitumen des o. g. Anlagentyps.

**Tabelle 2-3: Empfehlungen für  $ER_{\min}$  und  $HWZ_{\min}$  in Anlehnung an [Hailesilassie et al., 2015]**

$ER_{\min}$ [-]	$HWZ_{\min}$ [s]	Literaturquelle
10	12	[Muthen et al., 1999]
10	10	[Milton et al., 1999]
8	8	[Chiu et al., 2002]
8	6	[Wirtgen, 2005]
10	10	[M KRC, 2005]
10	6	[Sabita, 2009]
10	20	[Ramanujam et al., 2009]
15	30-45	[Leek et al., 2011]

### Ermittlung eines optimalen Wassergehaltes

Für die Ermittlung eines optimalen Wassergehaltes  $w_{\text{opt}}$  bei der Herstellung von Schaumbitumen hat Wirtgen eine Methode entwickelt. Hierzu wird die Expansion und Halbwertzeit in Abhängigkeit

des Wassergehaltes bei einer gewählten Bitumentemperatur in einem Diagramm dargestellt. Im Diagramm werden die Wassergehalte ermittelt, bei welchen die Expansion und die Halbwertzeit die benötigten Mindestwerte ( $ER_{\min}$  und  $HWZ_{\min}$ ) erreichen. Der optimale Wassergehalt entspricht dem Median dieser beiden Wassergehalte. Die Vorgehensweise zur Ermittlung von  $w_{\text{opt}}$  ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

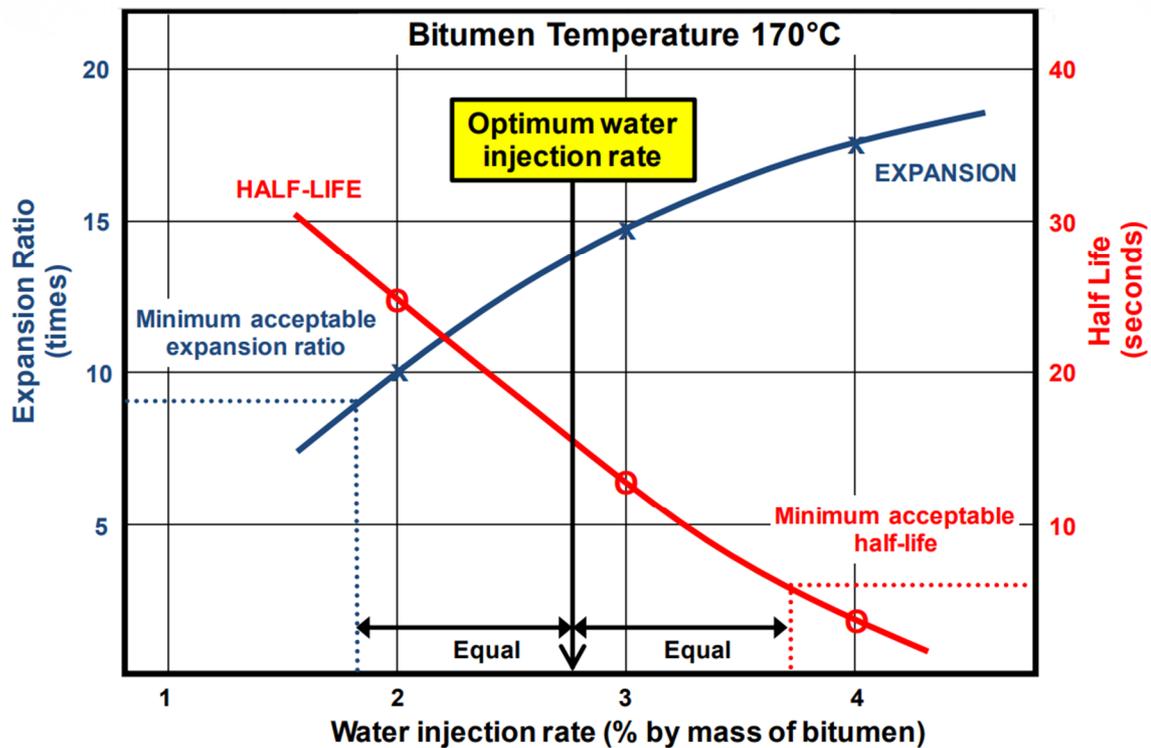


Abbildung 2-4: Ermittlung eines optimalen Wassergehaltes nach Wirtgen [Sabita, 2020]

#### 2.4.2 Schaumzerfall

Als Schaumzerfall wird die zeitliche Entwicklung der Expansion bezeichnet. Durch experimentelle Untersuchungen stellte [Jenkins, 2000] fest, dass der Schaumzerfall der meisten von ihm untersuchten Schaumbitumen zuverlässig durch den Isotopenzerfall beschrieben werden kann. Hierzu entwickelte er eine exponentielle Funktion (siehe Formel 2-1), mit welcher die Expansion zu einem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden kann.

$$ER(t) = ER_m \cdot e^{\frac{-\ln 2}{T_{1/2}} \cdot t} \quad \text{Formel 2-1}$$

mit:

- |           |     |   |
|-----------|-----|---|
| $ER(t)$   | [-] | Expansion nach Ausprühen des Schaumbitumens aus der Düse in Abhängigkeit der Zeit   |
| $ER_m$    | [-] | Maximale Expansion des Schaumbitumens, die nach Ende der Ausprühzeit gemessen wurde |
| $T_{1/2}$ | [s] | Halbwertzeit  |
| $t$       | [s] | Zeit  |

Mit der von Jenkins aufgestellten Funktion lassen sich allerdings nicht alle Schaumbitumen gleich gut beschreiben. So wurde in [Lesueur et al., 2004] beispielsweise festgestellt, dass Schaumbitumen mit hohen Expansionen und kurzen Halbwertzeiten besser durch eine Potenzfunktion beschrieben werden können.

### 2.4.3 Schaumindex

Eine weitere Kenngröße, die zur Beschreibung der Schaumbitumeneigenschaften herangezogen werden kann, ist der Schaumindex (SI) nach [Jenkins, 2000]. Der Schaumindex ist ein dimensionsloser Kennwert, welcher die Fläche unter einer Schaumzerfallkurve beschreibt. Die Berechnung erfolgt nach Formel 2-2 in Abhängigkeit der maximalen Expansion, der Halbwertzeit und der Aussprühzeit. Da der Zerfall der Schaumbläschen bereits während der Aussprühphase des Schaumbitumens stattfindet, ist die ermittelte max. Expansion nicht die tatsächliche max. Expansion ( $ER_m \neq ER_a$ ). Dieser Sachverhalt wird bei der Berechnung des Schaumindex durch den Korrekturfaktor  $c$  berücksichtigt, welcher von der Aussprühzeit und der Halbwertzeit des Schaumbitumens abhängig ist (siehe Abbildung 2-5).

$$SI = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} \left( 4 - ER_m - 4 \cdot \ln \left( \frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left( \frac{1+c}{2c} \right) \cdot ER_m \cdot t_s \quad \text{Formel 2-2}$$

mit:

$ER_m$  [-] Max. ER des Schaumbitumens, die nach Ende der Aussprühzeit gemessen wurde

$\tau_{1/2}$  [s] Halbwertzeit

$c$  [-]  $ER_m/ER_a$ , mit  $ER_a$  als potenziell mögliche Expansion ( $ER_a > ER_m$ )

$t_s$  [s] Aussprühzeit des Schaumbitumens in den Auffangsbehälter

Der Schaumindex kann beispielsweise herangezogen werden, um eine optimale Bitumentemperatur und/oder einen optimalen Wassergehalt für die Herstellung eines Schaumbitumens zu ermitteln. Hierzu wird der Schaumindex in Abhängigkeit der Bitumentemperatur oder des Wassergehaltes grafisch dargestellt. Ein eindeutiges Optimum ist jedoch nicht immer gegeben, wie in [Saleh, 2006] oder [Sunarjono, 2008] festgestellt wurde. In der Regel gilt: Je größer SI, desto besser sind die Schaumbitumeneigenschaften.

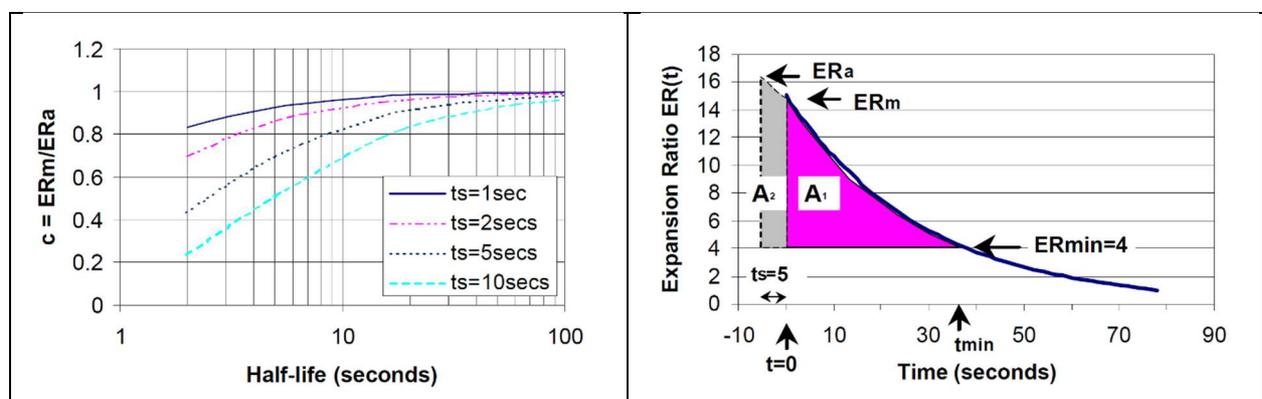
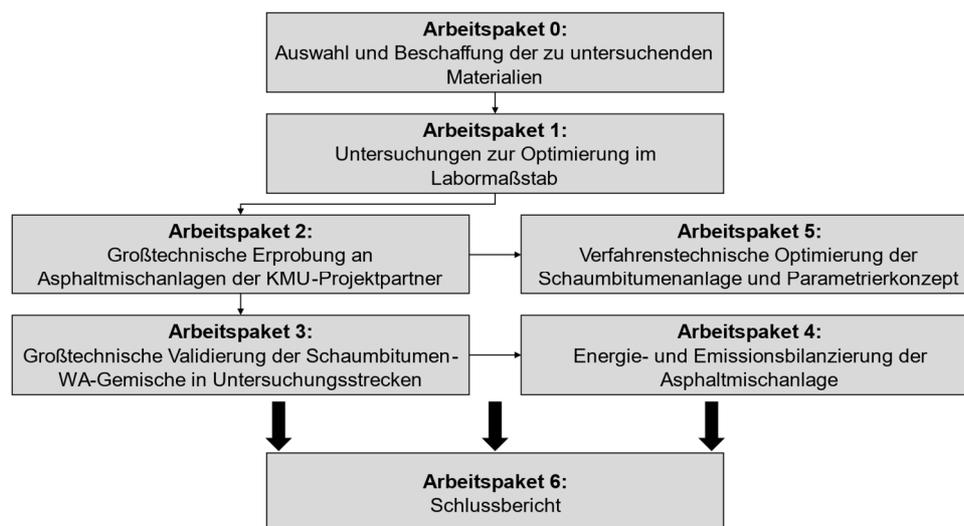


Abbildung 2-5: Korrekturfaktor  $c$  in Abhängigkeit von der Aussprühzeit und Halbwertzeit (links), Schaumindex als Fläche unter der Schaumzerfallkurve (rechts) [Jenkins, 2000]

### 3 Untersuchungsmethodik

Die Bearbeitung des Forschungsprojektes erfolgte gemäß dem in Abbildung 3-1 dargestellten Ablaufdiagramm. Nach Auswahl und Beschaffung der zu untersuchenden Materialien wurden Heiß- und Warmasphaltemischungen mit unterschiedlichen Anteilen an Asphaltgranulat im Labormaßstab unter Verwendung einer Labor-Schaumbitumenanlage hergestellt und performanceorientiert geprüft. Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Laborprogramm wurden Heiß- und Warmasphaltemischungen an drei Asphaltmischanlagen, die jeweils mit einer Schaumbitumenanlage ausgestattet sind, unter Variation der Mischtemperatur und Mischzeit großtechnisch hergestellt und ebenfalls hinsichtlich der Performanceeigenschaften untersucht. Des Weiteren wurden ausgewählte Binder- und Deckschichtvarianten mit Asphaltgranulat in Heißbauweise (Referenzmischungen ohne Schaumbitumen) und Warmbauweise (Schaumbitumen-Warmasphalt) in zwei Untersuchungsstrecken validiert. Ergänzend zur material- und bautechnischen Betrachtung, wurde eine vergleichende Energie- und Emissionsbilanzierung für die Produktion einer Tonne Heiß- bzw. Warmasphalt an den beteiligten Asphaltmischwerken der Projektpartner durchgeführt. Abschließend wurde eine Einschätzung hinsichtlich der verfahrenstechnischen, bautechnischen und energetischen Eignung der Schaumbitumentechologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat getroffen sowie Empfehlungen für die Praxis formuliert.



**Abbildung 3-1: Ablaufschema des Forschungsprojektes**

Nachfolgend werden das Untersuchungsprogramm und die Untersuchungsmethodik näher erläutert.

#### 3.1 Auswahl und Beschaffung der zu untersuchenden Materialien

Die Auswahl der Materialien für das Laborprogramm erfolgte in Abstimmung mit den Projektpartnern der Industrie. In diesem Zusammenhang wurden drei Asphaltmischgüter zur Verwendung für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung ausgewählt. Die Wahl fiel auf eine Asphaltbetondeckschicht AC 11 D S, einen Splittmastixasphaltbinder SMA 16 B S und eine Asphalttragschicht AC 22 T S. Eine Splittmastixasphaltdeckschicht wurde nicht ausgewählt, da für diese Mischgutsorte üblicherweise kein Asphaltgranulat verwendet werden darf, die Asphaltgranulatzugabe in diesem Projekt aber von zentraler Bedeutung war. Die Auswahl der Gesteine, Bindemittel und Asphaltgranulate wurde auf Grundlage typischer Erstprüfungen der beiden Mischanlagen getroffen.

Für jede Mischgutsorte wurde ein Asphaltgranulat (insgesamt drei verschiedene Asphaltgranulate) ausgewählt. Projektpartner A stellte das Asphaltgranulat sowie die Gesteine für die Asphalttragschicht und Projektpartner B die Asphaltgranulate und die Gesteine für die Asphaltbetondeckschicht sowie den Splittmastixasphaltbinder.

Vier verschiedene Bindemittel wurden für das Prüfprogramm im Labor ausgewählt. Ein polymermodifiziertes Bitumen 25/55-55 A (RC) als Zugabebindemittel für die Asphaltdeckschicht und den Splittmastixasphaltbinder, ein Straßenbaubitumen 70/100 für die Asphalttragschicht mit 60 M.-% Asphaltgranulat und ein Straßenbaubitumen 160/220 für die Asphalttragschicht mit 80 M.-% Asphaltgranulat. Im Laufe des Forschungsprojektes wurden ein weiteres Straßenbaubitumen der Sorte 160/220 in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Die beiden Bitumen werden nachfolgend als 160/220 A und 160/220 B bezeichnet.

## 3.2 Untersuchungen zur Optimierung im Labormaßstab

### 3.2.1 Charakterisierung der Baustoffkomponenten

Die für das Laborprogramm beschafften Materialien (Gesteine, Asphaltgranulate und Bitumen) wurden durch die Bestimmung folgender Kennwerte charakterisiert:

- Korngrößenverteilung nach [DIN EN 933-1, 2012] und [DIN EN 933-10, 2009]
- Rohdichte nach [DIN EN 1097-6, 2022]
- Bindemittelgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2023]
- Nadelpenetration nach [DIN EN 1426, 2015]
- Erweichungspunkt Ring und Kugel nach [DIN EN 1427, 2015]
- Komplexer Schermodul und Phasenwinkel in einem Temperaturbereich von -10 °C bis 150 °C bei sieben Frequenzen (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 1,59 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz) analog zur [AL DSR T-Sweep, 2014]

Die Bindemitteluntersuchungen wurden an frischen Bindemitteln und an rückgewonnenen Bindemitteln (Bindemittel aus den Asphaltgranulaten) durchgeführt.

### 3.2.2 Erstellung der Erstprüfungen

Für jede Mischgutsorte wurden zwei konventionelle Erstprüfungen mit zwei unterschiedlichen Zugabemengen an Asphaltgranulat erstellt. Hierzu wurden folgende Kennwerte am Marshall-Probekörper bestimmt:

- Rohdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 5, 2013]
- Raumdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 6, 2023]
- Hohlraumgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012]
- Fiktiver Hohlraumgehalt nach [TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012]
- Hohlraumausfüllungsgrad nach [TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012]

Trotz unterschiedlicher Anteile an Asphaltgranulat wurde versucht die Kenngrößen Sieblinie, Bindemittelgehalt und Hohlraumgehalt innerhalb einer Mischgutsorte möglichst identisch zu halten, um vergleichbare Rahmenbedingungen für die später durchzuführende Bewertung der Raumdichteunterschiede zu schaffen. Tabelle 3-1 beinhaltet eine Übersicht der im Labormaßstab hergestellten Mischgutvarianten.

Tabelle 3-1: Mischgutvarianten für das Laborprogramm

Mischgut	Asphaltgranulat		Gesteine	Bindemittel	Bezeichnung
AC 11 D S	30 M.-%	11 RA 0/8	Andesit, Moräne, Quarzit	25/55-55 A (RC)	DS30
	50 M.-%				DS50
SMA 16 B S	40 M.-%	22 RA 0/16	Andesit, Moräne		BS40
	60 M.-%				BS60
AC 22 T S	60 M.-%	22 RA 0/16	Moräne, Muschelkalk	70/100	TS60
	80 M.-%			160/220 B	TS80

### 3.2.3 Herstellung und Optimierung des Schaumbitumens

Die Herstellung des Schaumbitumens im Labormaßstab erfolgte mit einer Schaumbitumenanlage der Firma Wirtgen (Modell: WLB 10 S). Die Schaumbitumenanlage (siehe Abbildung 3-2) wurde hierfür zunächst auf die Bitumentemperatur temperiert und das heiße Bitumen anschließend in den Bitumentank der Schaumbitumenanlage überführt. Vor der Schaumbitumenherstellung wurden Luftdruck, Wasserdruck, Bitumentemperatur, Bitumenmenge und Zugabewassergehalt an der Anlage eingestellt. Luft- und Wasserdruck – die eingestellten Werte entsprechen Herstellerempfehlungen – wurden über alle Versuche hinweg nicht verändert. Die Bitumentemperatur und der Zugabewassergehalt wurden hingegen variiert. Geschäumt wurde bei drei unterschiedlichen Bitumentemperaturen und jeweils drei Wassergehalten. Tabelle 3-2 beinhaltet die Rahmenbedingungen für die Schaumbitumenherstellung.

Tabelle 3-2: Rahmenbedingungen für die Schaumbitumenherstellung

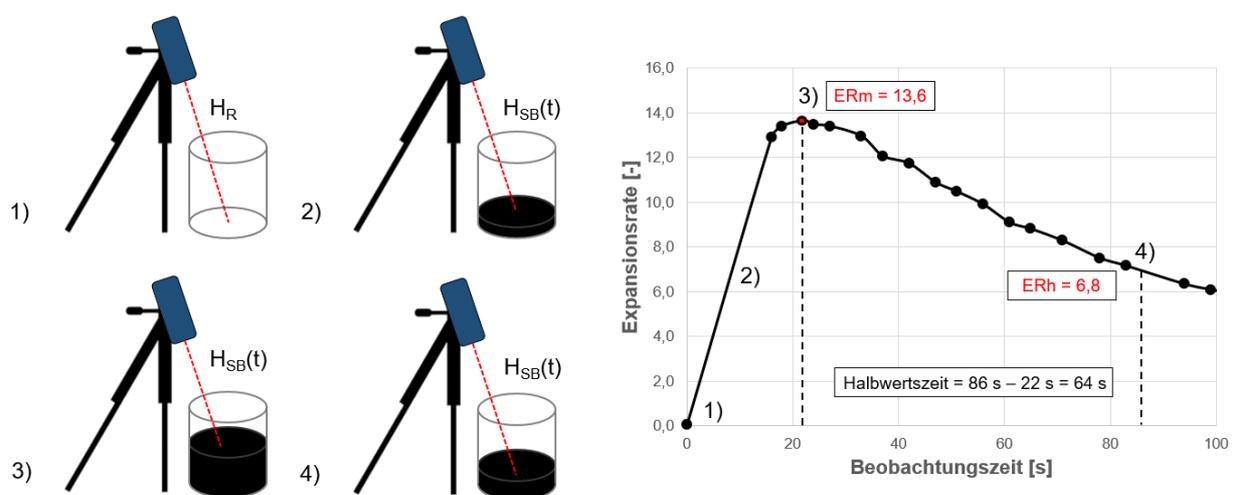
Luftdruck	5,0 bar		
Wasserdruck	6,0 bar		
Bitumenmenge je Schaumversuch	300 g		
Aussprühzeit	3 Sekunden (100 g/s)		
Bitumentemperatur	140 °C	160 °C	180 °C <sup>1)</sup>
Zugabewassergehalt	2,0 %	3,0 %	4,0 %

<sup>1)</sup>170 °C beim Bitumen 160/220



Abbildung 3-2: Schaumbitumenanlage WLB 10 S

Die Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften erfolgte anhand der beiden Kenngrößen *Expansionsrate (ER)* und *Halbwertszeit (HWZ)*. Die Ermittlung dieser beiden Kenngrößen wurde unter Zuhilfenahme eines Laser-Entfernungsmessgerätes durchgeführt. Hierfür wurde, wie in Abbildung 3-3 (links) schematisch dargestellt ist, ein Laser-Entfernungsmessgerät über dem Auffangbehälter (Blecheimer mit 10 l Volumen) positioniert und zunächst die Entfernung zum leeren Auffangbehälter bestimmt (Referenzabstand). Anschließend wurden 300 g Bitumen in den Auffangbehälter geschäumt und die sich über die Zeit verändernde Entfernung zwischen Schaumbitumen und Messgerät kontinuierlich aufgezeichnet. Die Berechnung der Expansionsrate in Abhängigkeit von Beobachtungszeit erfolgte nach Formel 3-1. Die Expansionsrate wurde über die Zeit aufgetragen und aus der so erhaltenen Schaumzerfallkurve die maximale Expansionsrate ( $ER_m$ ) und die Halbwertszeit gemäß Abbildung 3-3 (rechts) ermittelt.



**Abbildung 3-3: Ermittlung der Schaumhöhe durch ein Laser-Entfernungsmessgerät (links), Bestimmung der ER und HWZ anhand einer Schaumzerfallkurve (rechts)**

$$ER(t) = \frac{(H_R - H_{SB}(t))}{H_B} \quad \text{Formel 3-1}$$

mit:

$ER(t)$	[-]	Expansionsrate des Schaumbitumens in Abhängigkeit der Zeit
$H_R$	[cm]	Entfernung zum leeren Auffangbehälter (Referenzabstand)
$H_{SB}(t)$	[cm]	Entfernung zum mit Schaumbitumen befüllten Auffangbehälter
$H_B$	[cm]	Füllhöhe des Bitumens im nicht aufgeschäumten Zustand

Die Füllhöhe des Bitumens im nicht aufgeschäumten Zustand ( $H_B$ ) kann vereinfachend unter Berücksichtigung der Bitumenmasse, Bitumendichte sowie der geometrischen Abmessungen des Auffangbehälters berechnet werden (siehe Formel 3-2):

$$H_B = \frac{M_B}{\pi \cdot \rho \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2} \quad \text{Formel 3-2}$$

mit:

$H_B$	[cm]	Füllhöhe des Bitumens im nicht aufgeschäumten Zustand
$M_B$	[g]	Masse des zur Schaumbitumenherstellung verwendeten Bitumens
$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Bitumendichte
$D$	[cm]	Durchmesser des Auffangbehälters

Neben der Untersuchung der Ausgangsbindemittel, wurde die Wirksamkeit von drei unterschiedlichen chemischen Additiven zur Verbesserung der Schaumbitumeneigenschaften analysiert. Hierzu wurde das Additiv vor der Schaumbitumenherstellung dem jeweiligen Bitumen in entsprechender Dosiermenge zugesetzt. Tabelle 3-3 beinhaltet eine Übersicht der im Zuge der Schaumversuche untersuchten Varianten.

**Tabelle 3-3: Übersicht der Schaumversuche zur Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften**

Bitumentemperatur	140 °C			160 °C			180 °C bzw. 170 °C <sup>1)</sup>		
	2 %	3 %	4 %	2 %	3 %	4 %	2 %	3 %	4 %
25/55-55 A (RC)	X	X	X	X	X	X	X	X	X
70/100	X	X	X	X	X	X	X	X	X
160/220 A	X	X	X	X	X	X	X	X	X
160/220 B	X	X	X	X	X	X			
70/100 + Additiv 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X
70/100 + Additiv 2	X	X	X	X	X	X			
70/100 + Additiv 3	X	X	X	X	X	X			
25/55-55 A (RC) + Additiv 1	X	X	X	X	X	X	X	X	X

<sup>1)</sup> Nur beim Bitumen 160/220 A und 160/220 B

### 3.2.4 Herstellung des Asphaltmischgutes

Die Herstellung des konventionellen Asphaltmischgutes (Referenzmischgut ohne Schaumbitumen) und des Asphaltmischgutes mit Schaumbitumen (Heiß- bzw. Warmasphalt) erfolgte nach den Vorgaben der [TP Asphalt-StB, Teil 35 A, 2021] sowie unter Verwendung eines Gleichlauf-Labormischers. Zunächst wurden die frischen Gesteinskörnungen vorgemischt. Anschließend wurde das erwärmte und getrocknete Asphaltgranulat der vorgemischten Gesteinskörnung zugegeben und alle Komponenten bis zur visuellen Gleichmäßigkeit gemischt. Im letzten Schritt wurde das Bitumen bzw. der Schaumbitumen zugesetzt. Für die Herstellung des Asphaltmischgutes mit Schaumbitumen wurde die Labor-Schaumbitumenanlage verwendet (vgl. Abbildung 3-4). Diese wurden zunächst neben dem Labormischer positioniert. Anschließend wurde der Deckel des Mixers geöffnet, die entsprechende Menge des Schaumbitumens direkt in den Labormischer eingedüst und der Deckel wieder geschlossen. Die Wahl des für die Schaumbitumenherstellung verwendeten Wassergehaltes wurde auf Basis der durchgeführten Schaumversuche getroffen. Die Mischdauer betrug sowohl beim konventionellen Asphaltmischgut als auch beim Asphaltmischgut mit Schaumbitumen (Schaumbitumenmischgut) vier Minuten.



**Abbildung 3-4: Herstellung eines Asphaltmischgutes mit Schaumbitumen (Labormaßstab)**

### 3.2.5 Untersuchung der Verdichtbarkeit

Die Verdichtbarkeit der Heiß- und Warmasphaltmischungen wurde mit zwei unterschiedlichen Verdichtungsverfahren untersucht.

#### **Verdichtbarkeit mit dem Marshall-Verdichtungsgerät**

Die Verdichtungsversuche mit dem Marshall-Verdichtungsgerät erfolgten nach [TP Asphalt-StB, Teil 10 B, 2011] Hierzu wurden jeweils drei Marshall-Probekörper mit 100 Schlägen je Seite verdichtet und nach jedem Verdichtungsschlag die Dickenabnahme des Probekörpers aufgezeichnet. Die Ermittlung des Verdichtungswiderstandes T erfolgte mit der in Formel 3-3 dargestellten Beziehung über eine lineare Regression.

$$\frac{1}{t(E_2)} = \frac{1}{t_\infty} \left[ \frac{1}{t_\infty} - \frac{1}{t_0} \right] \cdot e^{-\frac{E_2}{T}} \quad \text{Formel 3-3}$$

mit:

$t(E_2)$	[mm]	Probekörperdicke in Abhängigkeit von der aufgewendeten Verdichtungsarbeit $E_2$
$E_2$	[21 Nm]	Verdichtungsarbeit, Anzahl der Verdichtungsschläge
$t_\infty$	[mm]	Rechnerisch minimal erreichbare Probekörperdicke
$t_0$	[mm]	Rechnerische Anfangsdicke zu Beginn des Verdichtungsprozesses
T	[21 Nm]	Verdichtungswiderstand, bestimmt über die Dickenänderung

#### **Verdichtbarkeit mit dem Gyrator-Verdichter**

Für die Verdichtungsuntersuchungen mit dem Gyrator wurden die Vorgaben der [DIN EN 12697, 2019] – Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator – berücksichtigt. Um sicherzustellen, dass Asphaltgemische mit einem Größtkorn von 22 mm das bautechnisch notwendige Materialvolumen aufweisen, wurde eine möglichst große Probekörpergeometrie ( $\varnothing$  150 mm, Höhe materialabhängig) gewählt. Die Gyratorverdichtung erfolgte grundsätzlich in zwei Stufen. Das Asphaltmischgut wurde zunächst auf eine definierte Höhe vorverdichtet. Anschließend erfolgte die Hauptverdichtung mit 500 Verdichtungsumdrehungen (Gyrationen). In Abbildung 3-5 sind der Gyrator-Verdichter und das Verdichtungsprinzip des Gyrators dargestellt. In Tabelle 3-4 sind die Geräterandbedingungen für die Verdichtungsversuche mit dem Gyrator zusammengefasst.

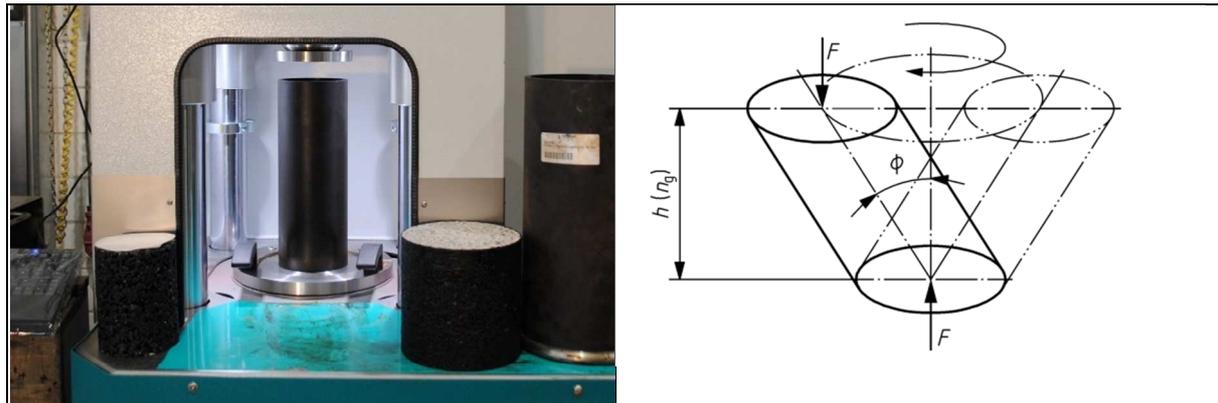


Abbildung 3-5: Gyrator-Verdichter und Verdichtungsprinzip nach [DIN EN 12697, 2019]

Tabelle 3-4: Geräterandbedingungen der Gyratorverdichtung

Probekörperdurchmesser	150 mm	
Zielhöhen	AC 11 D S	80 mm
	SMA 16 B S	100 mm
	AC 22 T S	120 mm
Last des Verdichtungsstempels	600 kPa	
Winkel	0,82 °	
Anzahl der Gyrationen	500	

Im Zuge der Gyratorverdichtung wird die Höhe des Mischgutes nach jeder Gyration vom Gerät erfasst und protokolliert. Unter Berücksichtigung der Probengeometrie (Höhe und Durchmesser) und Mischgutmenge kann die Raumdichte des Asphaltmischgutes nach jeder Gyration berechnet werden (siehe Formel 3-4):

$$\rho = \frac{m}{h_G \cdot d_G^2 \cdot \frac{\pi}{4}} \cdot 10^3 \quad \text{Formel 3-4}$$

mit:

$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]	rechnerische Raumdichte (Raumdichte durch Ausmessen)
$m$	[g]	Masse des in der Gyrator-Form vorhandenen Mischgutes
$d_G$	[cm]	Innendurchmesser der Gyrator-Form
$h_G$	[cm]	durch den Gyrator-Verdichter nach jeder Gyration gemessene Höhe des Probekörpers

Für die Beurteilung der Verdichtbarkeit mit dem Gyrator wurden zwei unterschiedliche Auswertemethoden herangezogen. Im Zuge der ersten Methode wurde der Verdichtungswiderstand in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B ermittelt. Für die zweite Methode wurde zunächst die Raumdichte nach dem in der TP Asphalt-StB, Teil 6 aufgeführten Verfahren B an den hergestellten Gyrator-Probekörpern bestimmt. Diese Raumdichte wurde mit der vom Gyrator berechneten Raumdichte (Raumdichte durch Ausmessen) ins Verhältnis gesetzt, um einen Umrechnungsfaktor zu erhalten. Dieser Umrechnungsfaktor wurde mit den vom Gyrator ermittelten Raumdichten multipliziert. Die Raumdichten wurden über die Anzahl der Gyrationen aufgetragen. Die so erhaltenen Raumdichtekurven wurden im weiteren Verlauf verwendet, um

die notwendige Anzahl an Gyrationen zum Erreichen der asphaltspezifischen Hohlraumbereiche ( $V_{max}$  und  $V_{min}$ ) nach [TL Asphalt-StB, 07/13] bzw. [H AI Abi, 2015] zu ermitteln.

### Untersuchte Mischgutvarianten

Für die Verdichtungsversuche wurden je untersuchte Mischgutvariante drei Marshall-Probekörper (MPK) und drei Gyrator-Probekörper (GPK) hergestellt. Um die Grenzen der Temperaturabsenkung durch den Einsatz von Schaumbitumen zu ermitteln, wurden die Asphaltmischgüter bei zwei verschiedenen Temperaturen gemischt und anschließend bei zwei verschiedenen Temperaturen verdichtet. Die Varianten mit Schaumbitumen wurden sowohl ohne als auch mit einem schaumstabilisierenden Additiv hergestellt. Für alle Schaumbitumenvarianten wurde derselbe Wassergehalt verwendet. In Tabelle 3-5 und Tabelle 3-6 sind die im Zuge der Verdichtungsversuche untersuchten Varianten zusammengefasst.

**Tabelle 3-5: Übersicht der ohne Einsatz von Schaumbitumen konventionell hergestellten Varianten (Referenzvarianten)**

Referenzmischgut					
AC 11 D S		SMA 16 B S		AC 22 T S	
DS30R	DS50R	BS40R	BS60R	TS60R	TS80R
Mischtemperatur [°C]		Mischtemperatur [°C]		Mischtemperatur [°C]	
150		150		160	
Verdichtungstemperatur [°C]		Verdichtungstemperatur [°C]		Verdichtungstemperatur [°C]	
145 ± 5		145 ± 5		135 ± 5	
Übersicht der hergestellten Probekörper					
3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK
3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK

**Tabelle 3-6: Übersicht der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten**

Asphaltmischgut mit Schaumbitumen							
AC 11 D S / SMA 16 B S				AC 22 T S			
DS30S / BS40S		DS50S / BS60S		TS60S		TS80S	
Mischtemperatur 1 [°C]		Mischtemperatur 2 [°C]		Mischtemperatur 1 [°C]		Mischtemperatur 2 [°C]	
150		130		150		130	
Verdichtungstemperatur [°C]				Verdichtungstemperatur [°C]			
1.1	1.2	2.1	2.2	1.1	1.2	2.1	2.2
145 ± 5	135 ± 5	125 ± 5	115 ± 5	135 ± 5	125 ± 5	115 ± 5	105 ± 5
Übersicht der hergestellten Probekörper (ohne Additiv)						160/220 B <sup>1)</sup>	
3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK
3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK
Übersicht der hergestellten Probekörper (mit Additiv)						160/220 A <sup>1)</sup>	
3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK	3 MPK
3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK	3 GPK

<sup>1)</sup> Hier wurde anstelle der Zugabe eines Additivs das Bitumen 160/220 A verwendet. Für die Variante ohne Additiv wurde das Bitumen 160/220 B herangezogen.

### 3.2.6 Asphalt-Performance

Für die Beurteilung der Gebrauchseigenschaften (Asphalt-Performance) wurden Asphalt-Probeplatten mit einem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV) hergestellt. An den daraus entnommenen Bohrkernen wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Einaxialer Druck-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, 2022] zur Bestimmung des Verformungsverhaltens bei Wärme
- Spaltzug-Schwellversuch nach [TP Asphalt-StB, Teil 26, 2018] zur Bestimmung der Steifigkeit bei -10 °C, 0 °C, 5 °C, 10 °C und 20 °C und sechs Frequenzen (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz)

Die Herstellung der Asphalt-Probeplatten der Referenzvarianten erfolgte bei den in der [TP Asphalt-StB, Teil 33, 2007] genannten Verdichtungstemperaturen. Die Varianten mit Schaumbitumen, sowohl mit als auch ohne ein schaumstabilisierendes Additiv hergestellt, wurden mit um 20 K reduzierten Temperaturen verdichtet. Die benötigte Mischgutmenge für die Herstellung der Asphalt-Probeplatten wurde auf der Grundlage der Ergebnisse der Erstprüfungen (volumetrische Kennwerte am MPK) der Referenzvarianten ermittelt. In Tabelle 3-7 sind die für die Untersuchung der Asphalt-Performance hergestellten Varianten zusammengefasst.

**Tabelle 3-7: Varianten für die Untersuchung der Asphalt-Performance**

	AG-Anteil [M.-%]	Schaumbitumen [-]	Schaumadditiv [-]	Mischtemperatur [°C]	Verdichtungstemperatur [°C]	Bitumen [-]	Bezeichnung [-]
AC 22 T S	60	nein	nein	160	135 ± 5	70/100	TS60R (Ref.)
	80	nein	nein	160	135 ± 5	160/220 B	TS80R (Ref.)
	60	ja	nein	130	115 ± 5	70/100	TS60S (Schaum)
	60	ja	ja	130	115 ± 5	70/100	TS60S (S. + A.)
	80	ja	nein	130	115 ± 5	160/220 B	TS60S (Schaum)
	80	ja	nein	130	115 ± 5	160/220 A	TS60S (Schaum)
SMA 16 B S	40	nein	nein	150	145 ± 5	25/55-55 A	BS40R (Ref.)
	60	nein	nein	150	145 ± 5	25/55-55 A	BS60R (Ref.)
	40	ja	nein	130	125 ± 5	25/55-55 A	BS40S (Schaum)
	40	ja	ja	130	125 ± 5	25/55-55 A	BS40S (S. + A.)
	60	ja	nein	130	125 ± 5	25/55-55 A	BS60S (Schaum)
	60	ja	ja	130	125 ± 5	25/55-55 A	BS60S (S. + A.)
AC 11 D S	30	nein	nein	150	145 ± 5	25/55-55 A	DS30R (Ref.)
	50	nein	nein	150	145 ± 5	25/55-55 A	DS50R (Ref.)
	30	ja	nein	130	125 ± 5	25/55-55 A	DS30S (Schaum)
	30	ja	ja	130	125 ± 5	25/55-55 A	DS30S (S. + A.)
	50	ja	nein	130	125 ± 5	25/55-55 A	DS50S (Schaum)
	50	ja	ja	130	125 ± 5	25/55-55 A	DS50S (S + A)

Für die Untersuchung einer möglichen zeitveränderlichen Festigkeits-/Steifigkeitsentwicklung durch Schaumbitumen wurden je Variante vier Gyrator-Probekörper hergestellt und nach drei unterschiedlichen Lagerungsdauern (1 Tag, 14 Tage und 28 Tage) mit dem Spaltzug-Schwellversuch zerstörungsfrei beansprucht. Die Gyrator-Probekörper wurden für die entsprechende Zeitdauer trocken im Labor gelagert. Um plastische Verformungen bei der dynamischen Prüfung zu vermeiden, erfolgte die Bestimmung der Steifigkeit nur bei einer Temperatur von 5 °C. Die Referenzvarianten ohne Schaumbitumen wurden in gleicher Weise untersucht, um einen direkten Vergleich zu den Varianten mit Schaumbitumen zu erhalten.

In Abbildung 3-6 ist das Untersuchungsprogramm des Arbeitspaketes 1 zusammengefasst.

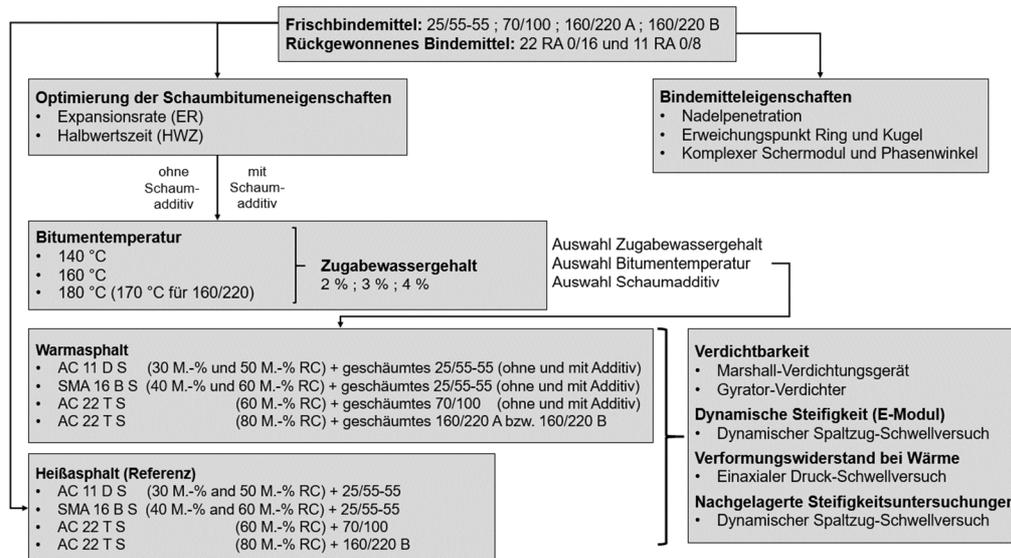


Abbildung 3-6: Untersuchungsprogramm – Optimierung im Labormaßstab (Arbeitspaket 1)

### 3.3 Großtechnische Erprobung an Asphaltmischanlagen

Für die Validierung der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse wurden Asphaltmischgüter großtechnisch unter Einsatz einer Schaumbitumenanlage hergestellt und anschließend an der Ruhr-Universität Bochum untersucht. Die Erprobung erfolgte an folgenden Asphaltmischanlagen:

- Asphaltmischwerk A (Anlage: Ammann)
- Asphaltmischwerk B (Anlage: Benninghoven)
- Asphaltmischwerk C (Anlage: Ammann)

Alle drei Asphaltmischanlagen sind mit einer Paralleltrommel ausgestattet, die einen hohen Zugabeanteil an Asphaltgranulat ermöglicht. Die Paralleltrommeln der Asphaltmischanlagen von Ammann werden mit einem Heißgaserzeuger im Gegenstromprinzip betrieben. Hierbei wird das Asphaltgranulat auf Temperaturen von ca. 160 °C erwärmt. Die Paralleltrommel der Asphaltmischanlage von Benninghoven funktioniert nach dem Gleichstromprinzip. Das Asphaltgranulat wird in dieser Paralleltrommel bei Temperaturen von 130 bis 140 °C getrocknet. Die Asphaltmischanlagen sind in Abbildung 3-7 dargestellt.



Abbildung 3-7: Asphaltmischwerke der beteiligten Projektpartner

### 3.3.1 Schaumbitumenherstellung

An den Asphaltmischwerken der Projektpartner A und C wurde die Schaumbitumenherstellung durch eine baugleiche Schaumbitumenanlage der Firma Ammann (Anlage A) realisiert. Am Asphaltmischwerk von Projektpartner B kam hingegen das Schaumbitumenmodul der Firma Benninghoven (Anlage B) zum Einsatz. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Schaumbitumenanlagen beider Hersteller in der Art und Weise wie der statische Mischer betrieben wird. Bei Anlage B steht der statische Mischer unter Druck (Druckkammer). Das Schaumbitumen entsteht erst bei Atmosphärendruck, d. h. unmittelbar nach der Übergabe des Bitumen-Wasser-Gemisches über Düsen in den Asphaltmischer. Der statische Mischer von Anlage A steht wiederum nicht unter Druck. Das Schaumbitumen entsteht (freiatmosphärisch) im statischen Mischer.

Abbildung 3-8 zeigt eine beispielhafte Ausführung einer Schaumbitumenanlage der Firma Ammann. In Abbildung 3-9 ist ein Schaumbitumenmodul der Firma Benninghoven dargestellt.

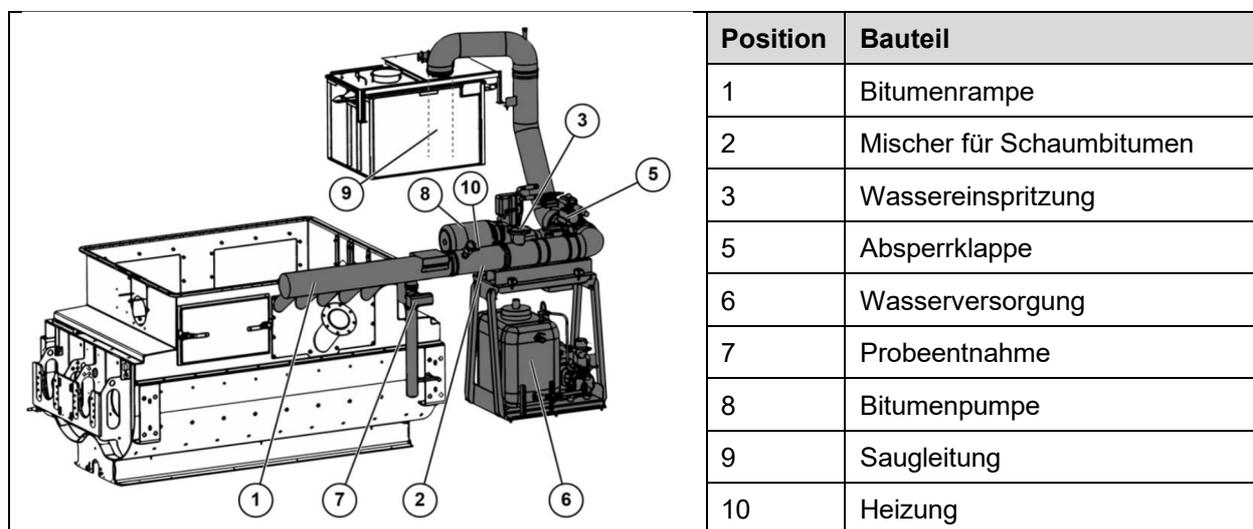


Abbildung 3-8: Schaumbitumenanlage der Firma Ammann [Ammann, 2018]

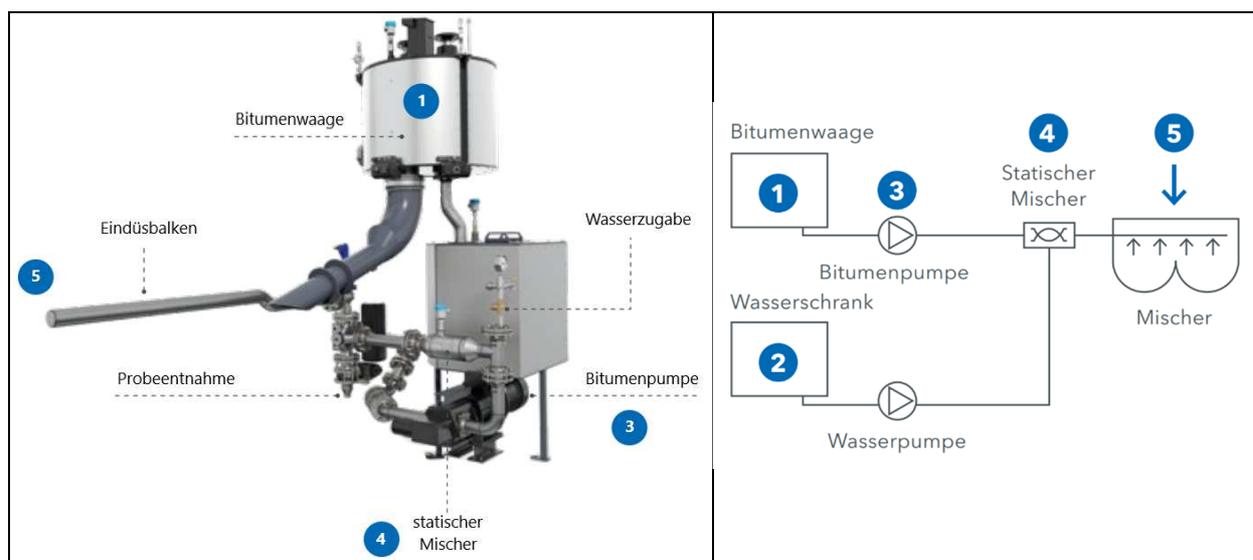


Abbildung 3-9: Schambitumenmodul der Firma Benninghoven [Benninghoven, 2021]

## 3.3.2 Asphaltmischgutherstellung und Untersuchung

Im Rahmen der großtechnischen Validierung wurden 36 Asphaltmischungen an zwei der drei Asphaltmischanlagen hergestellt. Die hergestellten Asphaltmischgüter gliedern sich entsprechend dem Laborprogramm in Asphalttragschichtvarianten AC 22 T S, Splittmastixasphaltbinder-Varianten SMA 16 B S und Asphaltdeckschichtvarianten AC 11 D S. Die Mischungen wurden sowohl bei konventionellen Temperaturen als auch bei abgesenkten Temperaturen unter Varianten der Trocken- und Nachmischzeit hergestellt. In Tabelle 3-8 sind die im Rahmen der großtechnischen Erprobung hergestellten Asphaltmischgüter zusammengefasst.

Tabelle 3-8: Im Rahmen der großtechnischen Erprobung hergestellte Asphaltmischgüter

AMA	Asphaltmischgut	AG-Anteil	Mischguttemperatur	Bindemittel	Trockenmischzeit	Nachmischzeit	Bezeichnung
		[M.-%]	[°C]		[s]	[s]	
Projektpartner A	AC 22 T S	60	160	70/100	5	20	TS60R
		80	160	70/100	5	20	TS80R
		60	160	70/100	5	20	TS60S (SCH 1)
		60	160	70/100	10	20	TS60S (SCH 2)
		80	160	70/100	5	20	TS80S (SCH 3)
		80	160	70/100	10	20	TS80S (SCH 4)
		60	140	70/100	5	20	TS60S (SCH 5)
		60	140	70/100	10	20	TS60S (SCH 6)
		80	140	70/100	5	20	TS80S (SCH 7)
	80	140	70/100	10	20	TS80S (SCH 8)	
	SMA 16 B S	40	160	25/55-55 A	5	20	BS40R
		60	160	25/55-55 A	5	20	BS60R
		40	160	25/55-55 A	5	20	BS40S (SCH 1)
		40	160	25/55-55 A	10	20	BS40S (SCH 2)
		60	160	25/55-55 A	5	20	BS60S (SCH 3)
		60	160	25/55-55 A	10	20	BS60S (SCH 4)
		40	140	25/55-55 A	5	20	BS40S (SCH 5)
		40	140	25/55-55 A	10	20	BS40S (SCH 6)
60		140	25/55-55 A	5	20	BS60S (SCH 7)	
60	140	25/55-55 A	10	20	BS60S (SCH 8)		
Projektpartner B	SMA 16 B S	30	170	10/40-65 A	5	25	BS30R (170 °C – 25 s)
		30	140	10/40-65 A	5	25	BS30S (140 °C – 25 s)
		60	170	10/40-65 A	5	25	BS60R (170 °C – 25 s)
		60	140	10/40-65 A	5	25	BS60S (140 °C – 25 s)
		40	170	25/55-55 A	5	25	BS40R (170 °C – 25 s)
		60	140	25/55-55 A	5	25	BS40S (140 °C – 25 s)
		40	170	25/55-55 A	5	25	BS60R (170 °C – 25 s)
		60	140	25/55-55 A	5	10	BS60S (140 °C – 10 s)
		60	140	25/55-55 A	5	25	BS60S (140 °C – 25 s)
	60	140	25/55-55 A	5	60	BS60S (140 °C – 60 s)	
	AC 11 D S	30	170	25/55-55 A	5	25	DS30R (170 °C – 25 s)
		30	140	25/55-55 A	5	25	DS30S (140 °C – 25 s)
		50	170	25/55-55 A	5	25	DS50R (170 °C – 25 s)
		50	140	25/55-55 A	5	10	DS50S (140 °C – 10 s)
		50	140	25/55-55 A	5	25	DS50S (140 °C – 25 s)
50		140	25/55-55 A	5	60	DS50S (140 °C – 60 s)	

### Asphalt-Performance

Für die Beurteilung der Performance der großtechnisch hergestellten Asphaltmischgüter wurden Asphalt-Probeplatten mit einem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. An den daraus entnommenen Bohrkernen wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Einaxialer Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 zur Bestimmung des Verformungsverhaltens bei Wärme
- Spaltzug-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 26 zur Bestimmung der Steifigkeit bei  $-10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $5\text{ °C}$ ,  $10\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$  und sechs Frequenzen (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz)

Die Herstellung der Asphalt-Probeplatten erfolgte unabhängig davon, ob mit Schaumbitumen gearbeitet wurde, bei den in der TP Asphalt-StB, Teil 33 genannten Verdichtungstemperaturen ( $145 \pm 5\text{ °C}$  für Mischgut mit PmB und  $135 \pm 5\text{ °C}$  für Mischgut mit Straßenbaubitumen). Die Herstellung der Asphalt-Probeplatten bei reduzierten Verdichtungstemperaturen (wie im Labormaßstab) wurde als nicht zielführend erachtet, da davon ausgegangen wurden, dass kein Schaumbitumeneffekt am wiedererwärmten Asphaltmischgut mehr vorhanden ist.

### 3.4 Großtechnische Validierung in Untersuchungsstrecken

Ausgewählte Binder- und Deckschichtvarianten wurden mit Asphaltgranulat in Heiß- und Warmbauweise in zwei Untersuchungsstrecken validiert. Während des Einbaus wurden begleitende Messungen zur Dokumentation aller relevanten Bedingungen durchgeführt. Diese beinhalteten die Erfassung der Asphaltmischguttemperatur bei Anlieferung an die Baustelle, Verdichtungskontrolle mit der Troxler-Sonde, Messungen mit dem leichten Fallgewichtsgerät (nur 1. Untersuchungsstrecke) und Messung der Dämpfe und Aerosole beim Einbau. Die Expositionsmessungen erfolgten nach der IFA-Methode und wurden durch zwei Messinstitute durchgeführt. Zusätzliche Expositionsmessungen erfolgten mit Photoionisationsdetektoren (PID) zur Erfahrungssammlung.

Am Asphaltmischgut und an den Ausbauproben (Bohrkerne aus Untersuchungsstrecke) wurden Kontrollprüfungen gemäß [ZTV Asphalt-StB, 2007] durchgeführt. Am rückgewonnenen Bindemittel erfolgten folgende Prüfungen:

- Temperatur- und Frequenz-Sweep mit dem DSR gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2014]
- BBR-Versuch bei mindestens zwei Temperaturen zur Ermittlung von  $T(S300)$  und  $T(m0,3)$  gemäß [AL BBR-Prüfung, 2017]

Die Untersuchung der Asphalt-Performance am Asphaltmischgut (Bohrkerne aus Asphalt-Probeplatten) und an Ausbauproben der Untersuchungsstrecken erfolgte unter Durchführung folgender Versuche:

- Einaxialer Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 zur Bestimmung des Verformungsverhaltens bei Wärme
- Spaltzug-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 26 zur Bestimmung der Steifigkeit bei  $-10\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$ ,  $5\text{ °C}$ ,  $10\text{ °C}$  und  $20\text{ °C}$  und sechs Frequenzen (0,1 Hz, 0,3 Hz, 1 Hz, 3 Hz, 5 Hz und 10 Hz)

Am Asphaltmischgut der ersten Untersuchungsstrecke wurden zusätzlich Abkühlversuche nach [TP Asphalt-StB, Teil 46 A, 2022] zur Erfahrungssammlung durchgeführt.

### 3.5 Energie- und Emissionsbilanzierung der Asphaltmischanlage

Aus den 36 großtechnisch untersuchten Asphaltmischgütern wurden 22 Varianten ausgewählt, für die eine Energie- und Emissionsbilanzierung durchgeführt wurde (siehe Tabelle 3-9). Die Energie- und Emissionsbilanzierung beschränkte sich ausschließlich auf den thermischen Energieanteil des Herstellungsprozesses. Dies beinhaltete die Ermittlung des Energiebedarfes zur Erwärmung und Trocknung der Gesteinskörnungsgemische und des Asphaltgranulates. Ebenfalls berücksichtigt wurde die aufwendete Energie für die Erhitzung des Bindemittels. Der Stromverbrauch beim Betrieb der Schaumbitumenanlage sowie weitere Energieaufwendungen (z. B. für Treibstoffe der benötigten Fördergeräte) wurden im Rahmen der Bilanzierung hingegen nicht berücksichtigt. Die Berechnung des Energiebedarfes erfolgte in kWh je Tonne Asphalt. Die Ermittlung der anfallenden Emissionen beschränkte sich ausschließlich auf die Komponente CO<sub>2</sub>. Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgte auf Grundlage der ermittelten Energiemengen für den Herstellungsprozess.

**Tabelle 3-9: Energie- und Emissionsbilanzierung**

AMA	Asphalt- mischgut	AG-Anteil	Mischgut- temperatur	Bindemittel	Bezeichnung
		[M.-%]	[°C]		
Projektpartner A	AC 22 T S	60	160	70/100	TS60R – 160 °C
		80	160	70/100	TS80R – 160 °C
		60	160	70/100	TS60S – 160 °C
		80	160	70/100	TS80S – 160 °C
		60	140	70/100	TS60S – 140 °C
		80	140	70/100	TS80S – 140 °C
	SMA 16 B S	40	160	25/55-55 A	BS40R – 160 °C
		60	160	25/55-55 A	BS60R – 160 °C
		40	160	25/55-55 A	BS40S – 160 °C
		60	160	25/55-55 A	BS60S – 160 °C
		40	140	25/55-55 A	BS40S – 140 °C
		60	140	25/55-55 A	BS60S – 140 °C
Projektpartner B	SMA 16 B S	30	170	10/40-65 A	BS30R – 170 °C
		30	140	10/40-65 A	BS30S – 140 °C
		40	170	25/55-55 A	BS40R – 170 °C
		60	170	25/55-55 A	BS60R – 170 °C
		40	140	25/55-55 A	BS40S – 140 °C
		60	140	25/55-55 A	BS60S – 140 °C
	AC 11 D S	30	170	25/55-55 A	DS30R – 170 °C
		50	170	25/55-55 A	DS50R – 170 °C
		30	140	25/55-55 A	DS30S – 140 °C
		50	140	25/55-55 A	DS50S – 140 °C

## 4 Untersuchungsergebnisse

### 4.1 Untersuchungen zur Optimierung im Labormaßstab

#### 4.1.1 Gesteinskörnung

Tabelle 4-1 beinhaltet die mittels Pyknometer-Verfahren ermittelten Rohdichten der vom Projektpartner B (Bezeichnung B) und Projektpartner A (Bezeichnung A) bereitgestellten Gesteine.

**Tabelle 4-1: Rohdichten der verwendeten Gesteinskörnungen**

Bezeichnung	Gesteinsart	Kornklasse [mm]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
B 1	Kalksteinmehl	< 0,063	2,750
B 2	Andesit	0/2	2,641
B 3	Moräne	0/2	2,617
B 4	Moräne	2/5	2,616
B 5	Moräne	5/8	2,625
B 6	Moräne	8/11	2,635
B 7	Andesit	8/11	2,628
B 8	Quarzit	8/11	2,641
B 9	Andesit	11/16	2,605
A 1	Kalksteinmehl	< 0,063	2,785
A 2	Moräne	0/2	2,633
A 3	Muschelkalk	2/16	2,738
A 4	Muschelkalk	16/22	2,736

Der Tabelle 4-2 sind die Kornzusammensetzungen der Gesteinskörnungen zu entnehmen, die für die Herstellung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht verwendet wurden. Tabelle 4-3 zeugt die Kornzusammensetzung der Gesteinskörnungen, die für die Herstellung der Asphalttragschicht zum Einsatz kamen. Die Korngrößenverteilung der Füller wurde durch Luftstrahl-siebung gemäß [TP Gestein-StB, Teil 4.1.4] in Verbindung mit [DIN EN 933-10] und die Korngrößenverteilung der feinen und groben Gesteinskörnungen gemäß [DIN EN 933-1] ermittelt.

**Tabelle 4-2: Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung (Projektpartner B) für AC 11 D S und SMA 16 B S**

Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung									
Siebrückstand [M.-%]									
	Kalksteinmehl	Andesit	Moräne				Andesit	Quarzit	Andesit
[mm]	Füller	0/2	0/2	2/5	5/8	8/11	8/11	8/11	11/16
16									9,5
11,2						25,6	2,5	10,9	71,3
8				0,1	6,0	59,5	82,5	76,4	18,6
5,6				10,8	81,8	14,5	14,8	11,5	0,6
2		4,4	16,6	87,2	11,9	0,3	0,2	0,5	
0,125	8,9	82,1	73,7	1,8				0,2	
0,063	14,2	8,5	6,4					0,1	
< 0,063	76,9	5,0	3,3	0,1	0,3	0,1		0,4	
Überkorn	23,1	4,4	16,6	10,9	6,0	25,6	2,5	10,9	9,5
Sollkorn	76,9	95,6	83,4	87,2	81,8	59,5	82,5	76,4	71,3
Unterkorn				1,9	12,2	14,9	15,0	12,7	19,2

Tabelle 4-3: Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung (Projektpartner A) für AC 22 T S

Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung				
Siebrückstand [M.-%]				
	Kalksteinmehl	Moräne	Muschelkalk	
[mm]	Füller	0/2	2/16	16/22
22,4				7,8
16			0,9	77,5
11,2			29,2	14,6
8			26,6	0,1
5,6			30,3	
2		9,8	11,3	
0,125	1,1	82,3	1,1	
0,063	4,4	5,6	0,1	
< 0,063	94,5	2,2	0,5	
Überkorn	5,5	9,8	0,9	7,8
Sollkorn	94,5	90,2	99,1	92,2
Unterkorn			1,7	14,7

#### 4.1.2 Asphaltgranulat

Die Asphaltgranulate wurden hinsichtlich der Kenngrößen Bindemittelgehalt gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 1], Korngrößenverteilung gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 2] und Rohdichte gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 5] klassifiziert. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4-4 zusammengetragen. Um möglichst hohe Zugabemengen zu erreichen, wurden die Asphaltgranulate mit der Stückgröße 22 mm jeweils in die Fraktionen 0/8 und 8/16 unterteilt. Die Zusammensetzung der einzelnen Fraktionen ist ebenfalls Tabelle 4-4 zu entnehmen.

Tabelle 4-4: Zusammensetzung der Asphaltgranulate

Zusammensetzung der Asphaltgranulate					
Siebrückstand [M.-%]					
	11 RA 0/8	22 RA 0/16		22 RA 0/16	
Mischanlage	Projektpartner B	Projektpartner B		Projektpartner A	
Korngröße	0/8	0/8	8/16	0/8	8/16
[mm]					
22,4					0,6
16			7,4		10,5
11,2	0,5		12,8		21,7
8	7,3		19,8		24,4
5,6	12,5	11,1	19,5	8,9	11,6
2	25,6	30,9	11,9	28,6	8,6
0,125	38,1	39,2	17,6	44,5	15,2
0,063	2,8	3,3	1,0	3,0	0,6
< 0,063	13,2	15,5	10,0	15,0	6,8
Bindemittelgehalt [M.-%]	6,1	7,4	4,8	5,7	3,1
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	2,649	2,741	2,621	2,735	2,617

#### 4.1.3 Eigenschaften der frischen und rückgewonnenen Bindemittel

Abbildung 4-1 beinhaltet die Komplexen Schermoduln und Phasenwinkel der frischen sowie der aus den Asphaltgranulaten rückgewonnenen Bindemittel bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 °C bis 150 °C.

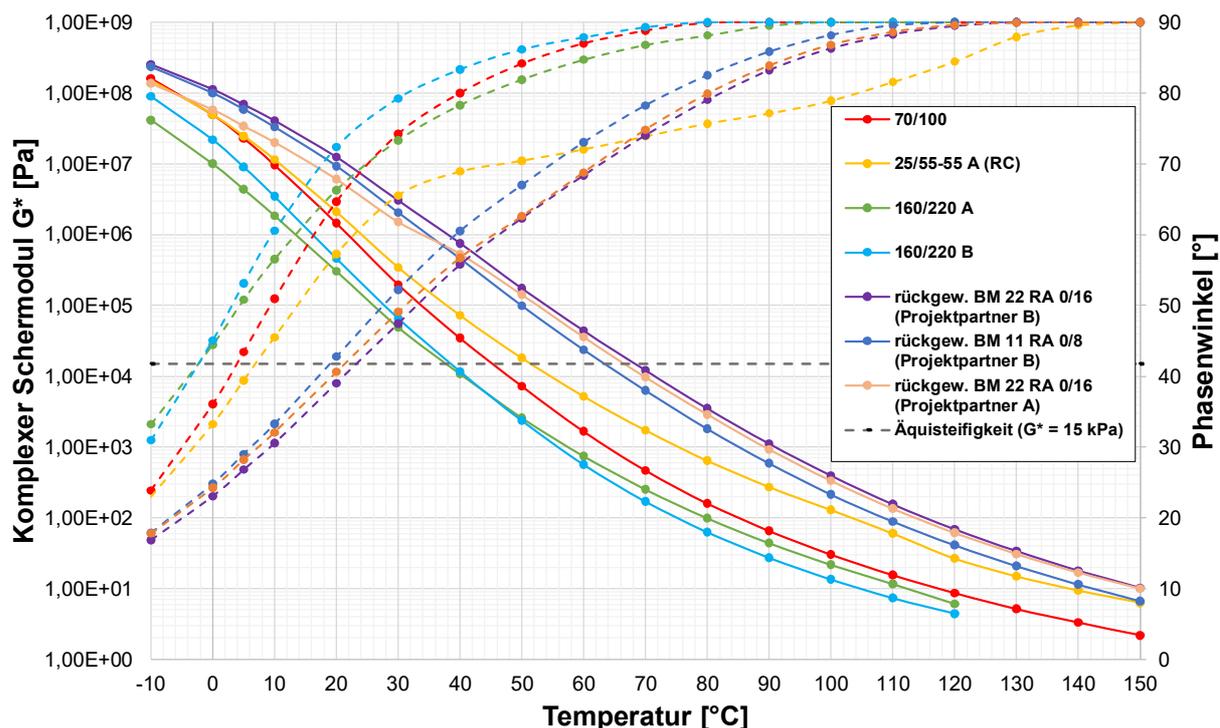


Abbildung 4-1: Temperaturabhängige Ergebnisse der frischen und der rückgewonnenen Bindemittel im Dynamischen Scherrheometer bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz

In Tabelle 4-5 sind die Eigenschaften der frischen Bindemittel und in Tabelle 4-6 die Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemittel zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 4-5: Eigenschaften der frischen Bindemittel

	Einheit	25/55-55 RC	70/100	160/220 A	160/220 B
Nadelpenetration	0,1 mm	53	86	189	174
Erweichungspunkt RuK	°C	57,0	46,6	41,6	40,8
Äquisteifigkeitstemperatur T (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°C	51,9	45,0	38,0	38,2
Phasenwinkel δ (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°	70,5	82,0	77,5	82,0

Tabelle 4-6: Eigenschaften der rückgewonnenen Bindemittel

	Einheit	11 RA 0/8 Projektpartner B	22 RA 0/16 Projektpartner B	22 RA 0/16 Projektpartner A
Nadelpenetration	0,1 mm	28	24	25
Erweichungspunkt RuK	°C	65,4	68,8	67,6
Äquisteifigkeitstemperatur T (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°C	63,5	68,4	66,7
Phasenwinkel δ (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	°	74,8	73,0	72,9

#### 4.1.4 Asphaltmischgutzusammensetzung

Tabelle 4-7 beinhaltet die Gesteinszusammensetzung sowie die Korngrößenverteilung der Asphaltdeckschicht AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat.

Tabelle 4-7: Gesteinszusammensetzung der beiden Asphaltdeckschichtvarianten

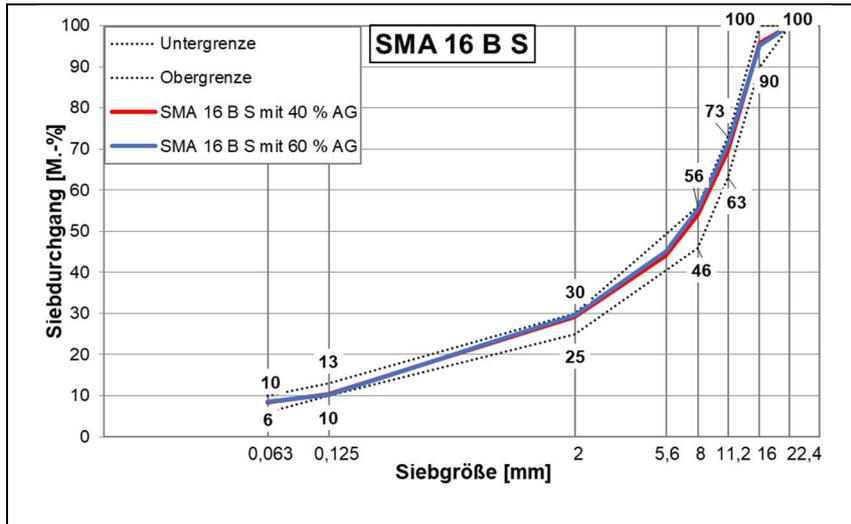
Zusammensetzung	AC 11 D S	
	DS30	DS50
	[M.-%]	[M.-%]
Kalksteinmehl	3,5	1,0
Andesit 0/2	9,0	11,0
Moräne 0/2	19,0	8,0
Moräne 2/5	10,0	7,0
Moräne 5/8	10,0	5,0
Moräne 8/11	-	18,0
Andesit 8/11	8,5	-
Quarzit 8/11	10,0	-
Andesit 11/16	-	-
11 RA 0/8	30,0	50,0
Rohdichte GK-Gemisch [g/cm <sup>3</sup> ]	2,637	2,641

Die Tabelle 4-8 zeigt die Gesteinszusammensetzung sowie die Korngrößenverteilung des Splittmastixasphaltbinders SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat.

Tabelle 4-8: Gesteinszusammensetzung der beiden Splittmastixasphaltbinder-Varianten

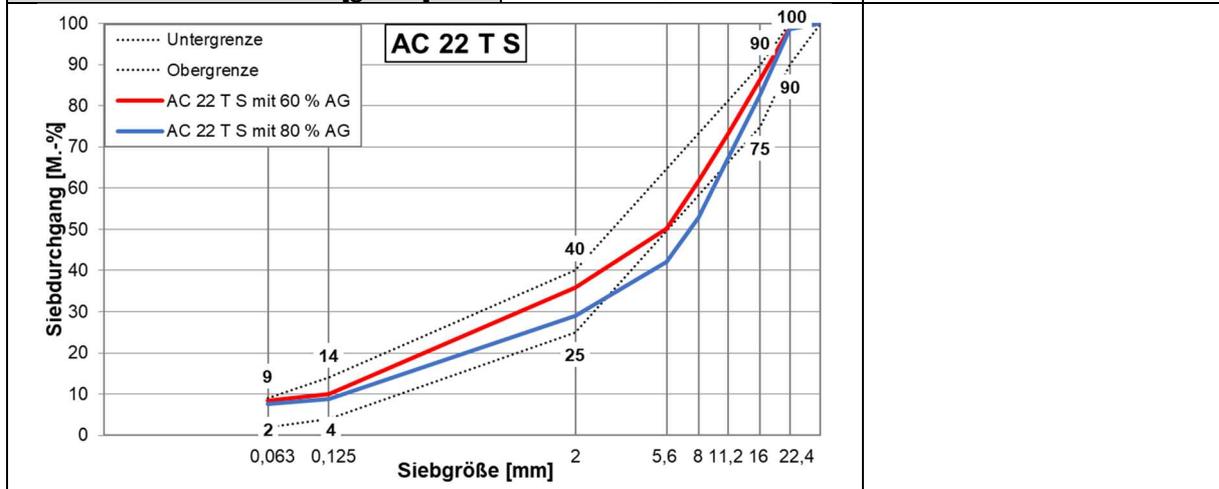
Zusammensetzung	SMA 16 B S	
	BS40	BS60
	[M.-%]	[M.-%]
Kalksteinmehl	3,5	1,0
Andesit 0/2	-	-
Moräne 0/2	7,0	3,0
Moräne 2/5	4,0	2,5
Moräne 5/8	3,0	-
Moräne 8/11	-	-
Andesit 8/11	8,0	5,5
Quarzit 8/11	-	-
Andesit 11/16	34,5	28,0
11 RA 0/8	-	-
22 RA 0/16, Fraktion 0/8	28,0	30,0
22 RA 0/16, Fraktion 8/16	12,0	30,0
Rohdichte GK-Gemisch [g/cm <sup>3</sup> ]	2,652	2,653



Der Tabelle 4-9 sind die Gesteinszusammensetzung sowie die Korngrößenverteilung der Asphalttragschicht AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat zu entnehmen. Um einen Zugabeanteil an frischem Bitumen von mindestens 1,0 M.-% sicherzustellen (geringere Zugabemengen wurden als nicht zielführend erachtet), musste die Sieblinie der Variante TS80 abweichend von der Sieblinie der Variante TS60 konzipiert werden. Eine Gleichschaltung der Sieblinien ähnlich wie bei den Varianten der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht war, aufgrund der hohen Menge an Asphaltgranulat, nicht möglich.

Tabelle 4-9: Gesteinszusammensetzung der Asphalttragschichtvarianten

Zusammensetzung	AC 22 T S	
	TS60	TS80
	[M.-%]	[M.-%]
Kalksteinmehl	1,5	-
Moräne 0/2	8,5	-
Muschelkalk 2/16	18,0	7,0
Muschelkalk 16/22	12,0	13,0
22 RA 0/16, Fraktion 0/8	32,0	27,0
22 RA 0/16, Fraktion 8/16	28,0	53,0
Rohdichte GK-Gemisch [g/cm <sup>3</sup> ]	2,694	2,672



Die Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 beinhalten die Asphaltmischgutzusammensetzungen sowie volumetrischen Kenngrößen für die Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht.

**Tabelle 4-10: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der Varianten AC 11 D S und SMA 16 B S**

AC 11 D S und SMA 16 B S	Einheit	DS30	DS50	BS40	BS60
Zugabe-Bindemittel 25/55-55 RC (EP RuK: 57,0 °C)	M.-%	4,5	3,2	2,6	1,5
Bindemittel aus Asphaltgranulat (EP RuK: 65,4 °C und 68,8 °C)	M.-%	1,8	3,1	2,6	3,7
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	6,3	6,3	5,2	5,2
Gesamtbindemittelgehalt	Vol.-%	14,5	14,6	12,1	12,1
Stabilisierende Zusätze	M.-%	-	-	0,20	0,20
Res. Erweichungspunkt RuK	°C	59,4	61,1	63,0	65,3
Rohdichte des Asphaltmischgutes	g/cm <sup>3</sup>	2,428	2,425	2,457	2,459
Raumdichte am MPK	g/cm <sup>3</sup>	2,355	2,356	2,374	2,378
Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,0	2,8	3,4	3,3
Hohlraumausfüllungsgrad	%	82,1	83,6	78,2	78,7
Mischtemperatur	°C	150	150	150	150
Verdichtungstemperatur	°C	145 ± 5	145 ± 5	145 ± 5	145 ± 5

**Tabelle 4-11: Asphaltmischgutzusammensetzung sowie volumetrischen Kenngrößen der Varianten AC 22 T S**

AC 22 T S	Einheit	TS60	TS80
Zugabe-Bindemittel 70/100 (EP RuK: 46,6 °C) 160/220 B (EP RuK: 40,8 °C)	M.-%	1,5	1,0
Bindemittel aus Asphaltgranulat (EP RuK: 67,6 °C)	M.-%	2,7	3,2
Gesamtbindemittelgehalt	M.-%	4,2	4,2
Gesamtbindemittelgehalt	Vol.-%	9,9	9,8
Res. Erweichungspunkt RuK	°C	60,1	61,4
Rohdichte des Asphaltmischgutes	g/cm <sup>3</sup>	2,549	2,544
Raumdichte am MPK	g/cm <sup>3</sup>	2,411	2,387
Hohlraumgehalt	Vol.-%	5,4	6,2
Hohlraumausfüllungsgrad	%	64,7	61,4
Mischtemperatur	°C	160	160
Verdichtungstemperatur	°C	135 ± 5	135 ± 5

#### 4.1.5 Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften

Für die Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften wurden die Bitumen 70/100, 160/220 A, 160/220 B und 25/55-55 A (RC) bei drei unterschiedlichen Temperaturen (140 °C, 160 °C und 180 °C bzw. 170 °C) sowie mit je drei unterschiedlichen Wassergehalten (2 %, 3 % und 4 %) aufgeschäumt. Die Schaumversuche wurden sowohl ohne als auch unter Einsatz von drei Additiven, welche dem Bitumen vorher zugesetzt wurden, durchgeführt. Die Dosiermenge der Additive entsprach den Herstellerempfehlungen. Die Wirkung der Additive wurden zunächst am 70/100 überprüft. Wirkte das jeweilige Additiv schaumstabilisierend, dann wurde dessen Wirksamkeit auch am 25/55-55 A (RC) validiert. Im Zuge der Schaumversuche wurde die zeitliche Entwicklung der Schaumbitumenhöhe kontinuierlich mit einem Laser-Entfernungsmessgerät erfasst. Aus den aufgezeichneten Daten wurden Schaumzerfallkurven erstellt. In Abbildung 4-2 bis Abbildung 4-4 sind die Zerfallkurven (1. Messung) der aufgeschäumten Bitumen 70/100 (mit/ohne Additiv 1), 25/55-55 A (RC) (mit/ohne Additiv 1) sowie 160/220 A und 160/220 B bei einem Zugabewassergehalt von 3 % exemplarisch dargestellt.

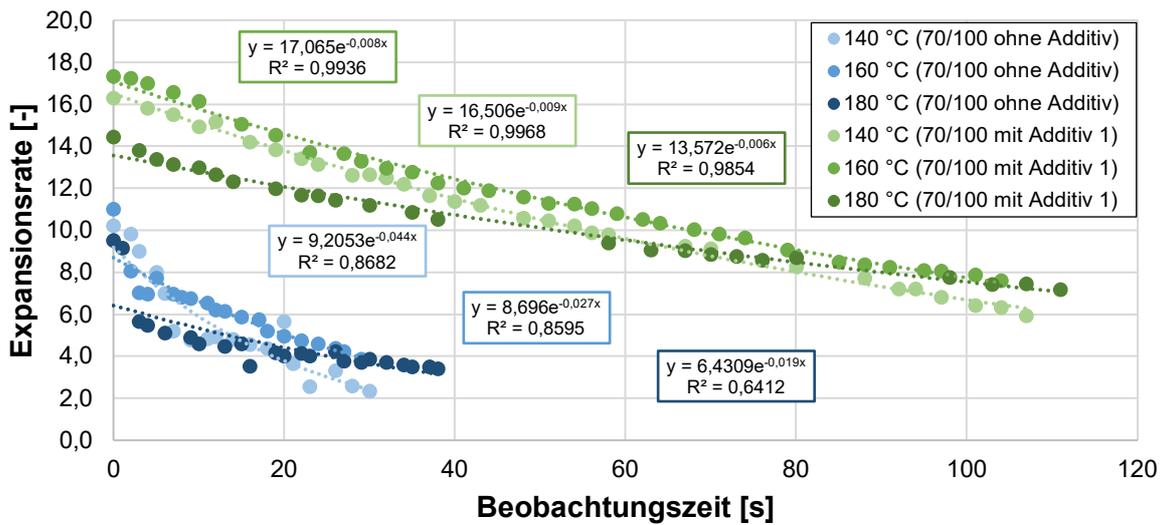


Abbildung 4-2: Schaumzerfallkurve: 70/100 mit/ohne Additiv 1 bei einem Wassergehalt von 3 %

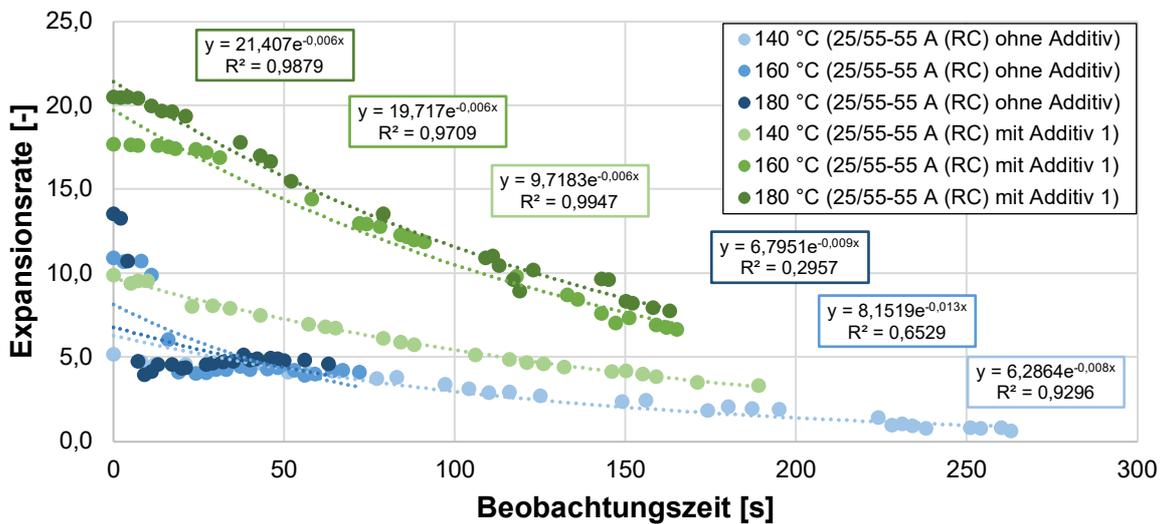


Abbildung 4-3: Schaumzerfallkurve: 25/55-55 A mit/ohne Additiv 1 bei einem Wassergehalt von 3 %

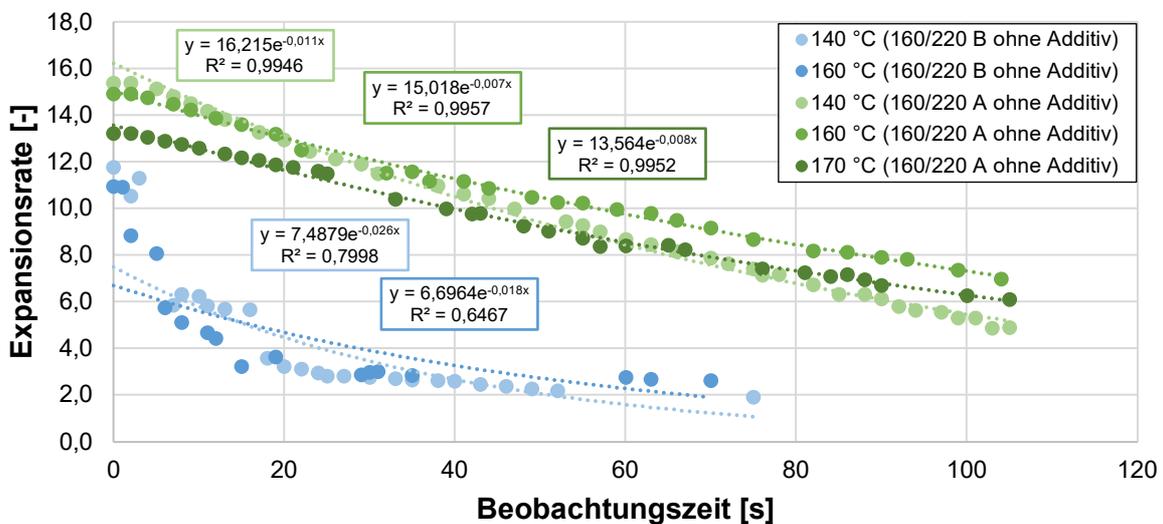


Abbildung 4-4: Schaumzerfallkurve: 160/220 A und 160/220 B bei einem Wassergehalt von 3 %

Für jeden durchgeführten Schaumversuch wurde die Expansionsrate und Halbwertzeit aus den Daten der Laserentfernungsmessung ermittelt. Abbildung 4-5 beinhaltet die aus jeweils drei Einzelwerten gemittelten Expansionsraten und Halbwertzeiten in Abhängigkeit von der Bitumentemperatur und vom Wassergehalt (die unterschiedliche Skalierung der y-Achse ist zu beachten).

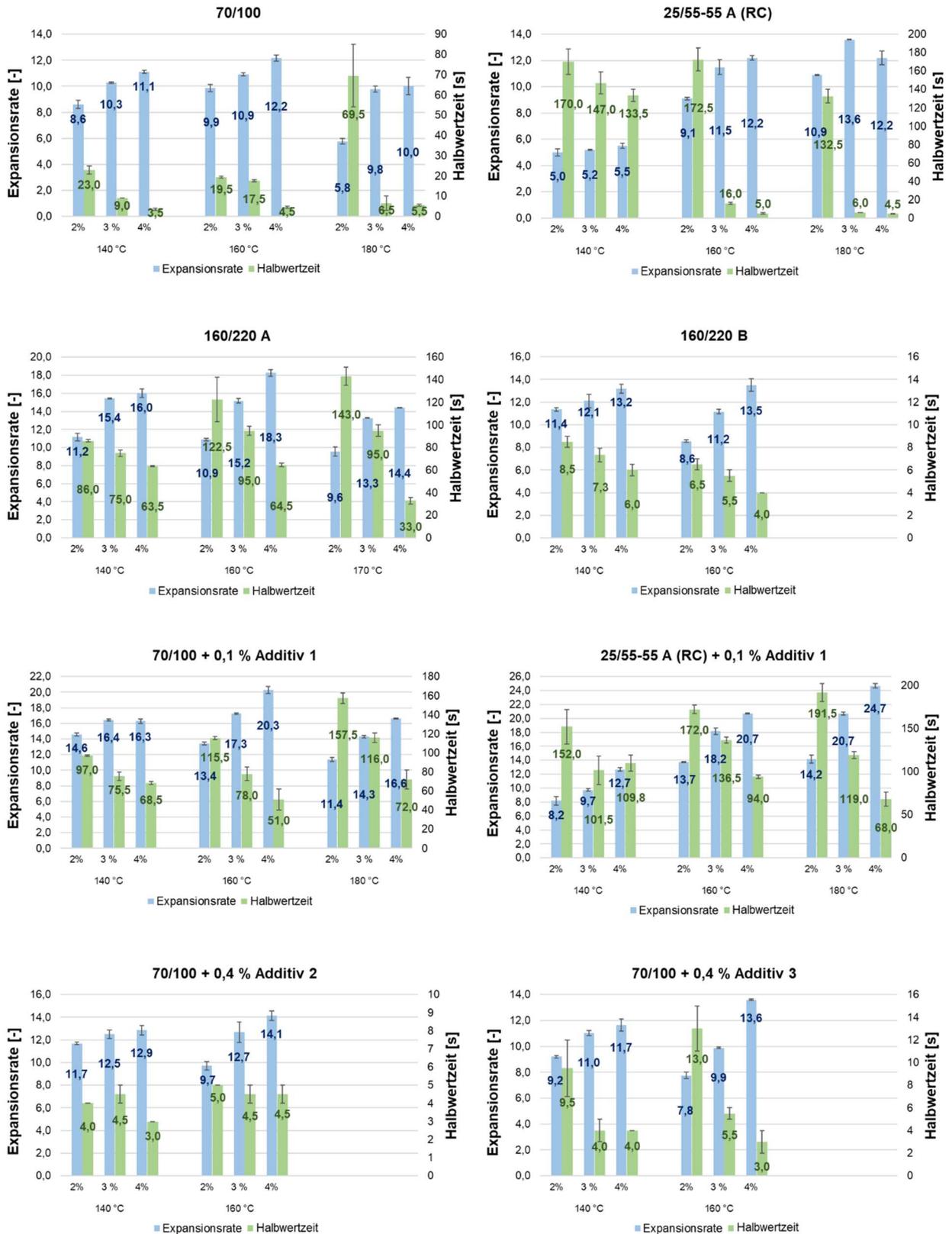


Abbildung 4-5: Ergebnisse der Schaumversuche

Eine lineare Abhängigkeit zwischen dem eingestellten Wassergehalt und der Expansionsrate sowie Halbwertzeit ist in den meisten Fällen zu erkennen (siehe Abbildung 4-5). Mit steigendem Wassergehalt kann eine Zunahme der Expansionsrate beobachtet werden. Die Halbwertzeit nimmt hingegen mit steigendem Wassergehalt ab. Der Einfluss der Bitumentemperatur zeigt sich insbesondere beim polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A (RC). Hier bedarf es einer Temperatur von mindestens 160 °C, um eine zu den anderen Bitumen vergleichbare Expansionsrate zu erhalten. Von den drei untersuchten Additiven führt lediglich Additiv 1 zu einer Verbesserung der Expansionsrate und Halbwertzeit (siehe Abbildung 4-5). Im Vergleich zu den Varianten ohne Additiv, führte der Einsatz von Additiv 1 sowohl beim 70/100 als auch beim 25/55-55 A (RC) zu einer im Durchschnitt 1,7fach höheren Expansionsrate und einer 7,5fach längeren Halbwertzeit. Wie anhand der Daten in Abbildung 4-5 zu erkennen ist, verbessern Additiv 2 und Additiv 3 zwar die Expansionsrate des 70/100 geringfügig, führen aber gleichzeitig zu einer Reduzierung der Halbwertzeit.

In Tabelle 4-12 sind die Ergebnisse der Schaumversuche zusammengefasst. Für die Beurteilung der im Labormaßstab hergestellten Schaumbitumen wurden die Anforderungen aus dem Anhang 8 des FGSV-Merkblattes „Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenbau“ [M KRC, 2005] herangezogen. Gemäß M KRC soll das Schaumbitumen nach der Optimierung der Randbedingungen (Wassergehalt und Temperatur) eine mind. 10fache Expansion und eine Halbwertzeit von mind. 10 Sekunden aufweisen. Für eine übersichtlichere Darstellung der Ergebnisse wurde die Expansionsrate und Halbwertzeit unter Berücksichtigung der zuvor genannten Mindestanforderungen farblich hervorgehoben. Die grün hinterlegten Ergebnisse erfüllen die Anforderungen an eine mindestens 10fache Expansion und eine Halbwertzeit von mindestens 10 Sekunden. Die gelb hinterlegten Ergebnisse erfüllen die Anforderungen knapp nicht und die in Rot hinterlegten Ergebnisse unterschreiten die Anforderungen deutlich.

**Tabelle 4-12: Ergebnisse der Schaumversuche als Mittelwerte einer Dreifachbestimmung**

Bitumentemperatur [°C]		140			160			180 bzw. 170 <sup>1)</sup>		
Wassergehalt [%]		2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0	2,0	3,0	4,0
70/100	ER [-]	8,6	10,3	11,1	9,9	10,9	12,2	5,8	9,8	10,0
	HWZ [s]	23,0	9,0	3,5	19,0	17,5	4,5	69,5	6,5	5,5
25/55-55 A (RC)	ER [-]	5,0	5,2	5,5	9,1	11,5	12,2	10,9	13,6	12,2
	HWZ [s]	170,0	147,0	133,5	172,5	16,0	5,0	132,5	6,0	4,5
160/220 A	ER [-]	11,2	15,4	16,0	10,9	15,2	18,3	9,6	13,3	14,4
	HWZ [s]	86,0	75,0	63,5	122,5	95,0	64,5	143,0	95,0	33,0
160/220 B	ER [-]	11,4	12,1	13,2	8,6	11,2	13,5	-	-	-
	HWZ [s]	8,5	7,3	6,0	6,5	5,5	4,0	-	-	-
70/100 + Additiv 1 (0,1 %)	ER [-]	14,6	16,4	16,3	13,4	17,3	20,3	11,4	14,3	16,6
	HWZ [s]	97,0	75,5	68,5	115,5	78,0	51,0	157,5	116,0	72,0
70/100 + Additiv 2 (0,4 %)	ER [-]	11,7	12,5	12,9	9,7	12,7	14,1	-	-	-
	HWZ [s]	4,0	4,5	3,0	5,0	4,5	4,5	-	-	-
70/100 + Additiv 3 (0,4 %)	ER [-]	9,2	11,0	11,7	7,8	9,9	13,6	-	-	-
	HWZ [s]	9,5	4,0	4,0	13,0	5,5	3,0	-	-	-
25/55-55 A + Additiv 1 (0,1 %)	ER [-]	8,2	9,7	12,7	13,7	18,2	20,7	14,2	20,7	24,7
	HWZ [s]	152,0	101,5	109,8	172,0	136,5	94,0	191,5	119,0	68,0

<sup>1)</sup> Um eine Schädigung des Bindemittels zu vermeiden, wurden die Bitumen 160/220 bei einer maximalen Temperatur von 170 °C aufgeschäumt

Bei einer Bitumentemperatur von 160 °C und einem Wassergehalt von 3 % konnte für die nicht additvierten Bitumen ein guter Kompromiss zwischen einer ausreichenden Expansionsrate und einer möglichst langen Halbwertzeit erzielt werden (siehe Tabelle 4-12). Lediglich das Bitumen 160/220 B konnte die Mindestanforderungen aus dem MKRC für keine der untersuchten Einstellungen erfüllen. Demgegenüber zeigte das Bitumen 160/220 A hervorragende Schaumeigenschaften für alle untersuchten Kombinationen. Beide Bindemittel stammen aus verschiedenen Provenienzen, was das unterschiedliche Schaumverhalten jedoch nur zu einem gewissen Grad erklärt. Vielmehr scheinen bestimmte chemische Bestandteile im Bitumen 160/220 A schaumstabilisierend zu wirken. Diese Wirkungsweise ähnelt stark der Wirkungsweise von Additiv 1, wie anhand der Ergebnisse in Tabelle 4-12 zu erkennen ist. Nahezu alle mit Additiv 1 versetzten Varianten überschreiten die Anforderungen aus dem MKRC, unabhängig vom eingestellten Wassergehalt oder der Bitumentemperatur, deutlich. Das mit Additiv 2 und Additiv 3 versetzte Bitumen 70/100 scheitert entweder an einer zu geringen Expansionsrate oder einer zu kurzen Halbwertzeit an der Erfüllung der Anforderungen aus dem MKRC.

Zur Ermittlung des optimalen Wassergehaltes wurde die „Wirtgen-Methode“ mit den Anforderungen aus dem MKRC ( $ER_{min} = 10$  und  $HWZ_{min} = 10$  s) angewandt. Abbildung 4-6 veranschaulicht beispielhaft die Ermittlung des optimalen Wassergehaltes der nicht additvierten Varianten für eine Temperatur von 160 °C. Der lineare Zusammenhang zwischen Wassergehalt, Expansionsrate und Halbwertzeit wird an den mathematischen Funktionen in Abbildung 4-6 deutlich.

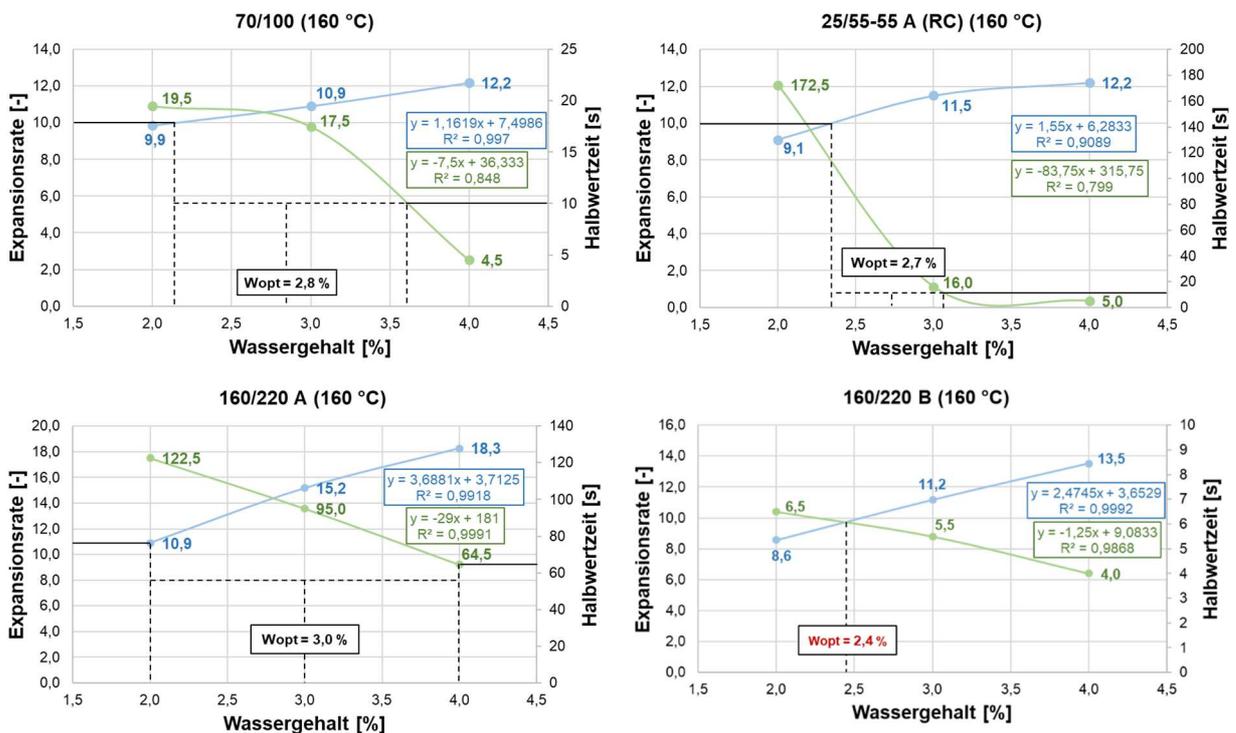


Abbildung 4-6: Ermittlung des optimalen Wassergehaltes nach der Wirtgen-Methode

Ergänzend zur „Wirtgen-Methode“ wurde der Schaumindex nach Jenkins berechnet. Laut Jenkins kann dieser Schaumindex hilfreich sein, um eine optimale Temperatur und/oder einen optimalen Wassergehalt für die Herstellung von Schaumbitumen zu ermitteln. Ein Optimum entspricht in diesem Zusammenhang dem Wert am Scheitelpunkt einer Schaumindexkurve. Jedoch weisen nicht alle Schaumindexkurven einen Scheitelpunkt auf, sodass ein Optimum nicht immer bestimmt werden kann.

Abbildung 4-7 beinhalten die Schaumindizes der nicht additivierten Varianten als Funktion des Wassergehaltes (links) und als Funktion der Temperatur (rechts). Die unterschiedliche Skalierung der y-Achse ist zu beachten.

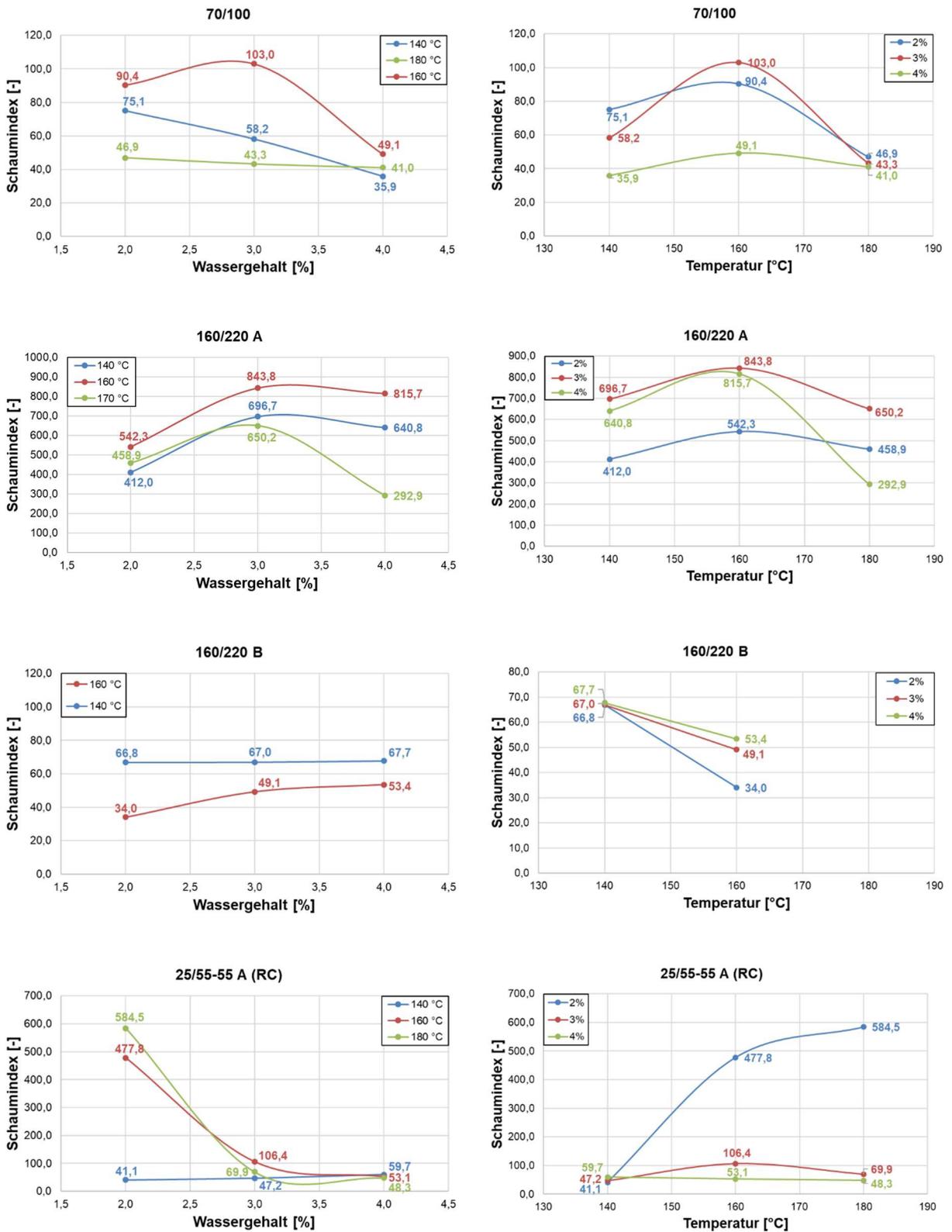


Abbildung 4-7: Schaumindex nach Jenkins

Wie anhand der Ergebnisse in Abbildung 4-7 zu erkennen ist, ergibt sich für die Bitumen 70/100 und 160/220 A ein Optimum bei einer Temperatur von 160 °C und einem Wassergehalt von 3 %. Beim Bitumen 160/220 B kann kein Optimum ermittelt werden. Beim Bitumen 25/55-55 A (RC) zeigt sich lediglich ein Optimum bei einer Bitumentemperatur von 160 °C und einem Wassergehalt von 3 %. Auffällig sind beim 25/55-55 A (RC) die hohen Schaumindizes bei 160 °C und 180 °C sowie dem Wassergehalt von 2 %. Diese hohen Schaumindizes kommen durch die langen Halbwertzeiten zustande. Insgesamt ist zu sagen, dass bei Berücksichtigung dieser Methode grundsätzlich vier oder mehr Werte zur Ermittlung eines Optimums zur Verfügung stehen sollten, da sich ein Optimum ansonsten stets für den mittleren von drei Werten ergibt und eine qualifizierte Aussage zu den Schaumeigenschaften so nicht getroffen werden kann.

Tabelle 4-13 beinhaltet die mit der „Wirtgen-Methode“ ermittelten optimalen Wassergehalte sowie die nach Jenkins berechneten Schaumindexe aller untersuchten Varianten.

**Tabelle 4-13: Ermittlung der optimalen Randbedingungen für die Mischgutherstellung**

Bitumen	Temperatur	„Wirtgen-Methode“ ER <sub>min</sub> = 10 und HWZ <sub>min</sub> = 10 s  Optimaler Wassergehalt W <sub>opt</sub> [%]	Schaumindex nach Jenkins		
			Wassergehalt [%]		
			2,0	3,0	4,0
70/100	140 °C	2,8	75,1	58,2	35,9
	160 °C	2,8	90,4	<b>103,0</b>	49,1
	180 °C	Anforderungen nicht erfüllt	46,9	43,3	41,0
25/55-55 A (RC)	140 °C	Anforderungen nicht erfüllt	41,1	47,2	59,7
	160 °C	2,7	477,8	106,4	53,1
	180 °C	2,4	<b>584,5</b>	69,9	48,3
160/220 A	140 °C	3,0	412,0	696,7	640,8
	160 °C	3,0	542,3	<b>843,8</b>	815,7
	170 °C	3,0	458,9	650,2	292,9
160/220 B	140 °C	Anforderungen nicht erfüllt	66,8	67,0	<b>67,7</b>
	160 °C	Anforderungen nicht erfüllt	34,0	49,1	53,4
70/100 + Additiv 1 (0,1 %)	140 °C	3,0	799,5	787,3	707,0
	160 °C	3,0	802,4	883,6	777,6
	180 °C	3,0	756,3	<b>913,2</b>	769,6
70/100 + Additiv 2 (0,4 %)	140 °C	Anforderungen nicht erfüllt	42,7	51,2	40,2
	160 °C	Anforderungen nicht erfüllt	36,7	52,3	<b>62,0</b>
	180 °C	-	-	-	-
70/100 + Additiv 3 (0,4 %)	140 °C	Anforderungen nicht erfüllt	<b>48,5</b>	38,9	42,4
	160 °C	Anforderungen nicht erfüllt	41,0	39,7	43,6
	180 °C	-	-	-	-
25/55-55 RC + Additiv 1 (0,1 %)	140 °C	3,0	312,7	347,7	681,2
	160 °C	3,0	1232,7	1646,2	1434,5
	180 °C	3,0	1451,7	<b>1800,7</b>	1385,1

Wie anhand der Ergebnisse in Tabelle 4-13 zu erkennen ist, liegen die mit der „Wirtgen-Methode“ ermittelten optimalen Wassergehalte im Bereich von 2,4 bis 3,0 %. Für einige Varianten konnte

kein optimaler Wassergehalt ermittelt werden, da die Mindestanforderungen an die Expansionsrate und Halbwertszeit aus dem M KRC nicht erfüllt wurden. Im Zusammenhang mit dem Schaumindex der nicht additvierten Varianten zeigt sich eine Bitumentemperatur von 160 °C und ein Wassergehalt von 3,0 % als vorteilhaft. Bei den mit Additiv 1 versetzten Varianten konnten die höchsten Schaumindizes bei einer Temperatur von 180 °C und einem Wassergehalt von 3,0 % erreicht werden. Um identische Rahmenbedingungen für die Mischgutherstellung zu schaffen, wurde entschieden für alle Bitumen denselben Wassergehalt sowie dieselbe Bitumentemperatur zu verwenden. Die Wahl fiel hierbei auf eine Bitumentemperatur von 160 °C und einen Wassergehalt von 3,0 %. Wegen der guten Wirkungsweise wurde Additiv 1 (fortan als Additiv bezeichnet) für am besten geeignet für die Varianten „mit Additiv“ befunden.

#### 4.1.6 Verdichtbarkeit

Die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens der Referenzgemische und der Schaumbitumengemische erfolgte mit dem Marshall-Verdichtungsgerät und dem Gyrator-Verdichter. Die Wahl der Herstell- und Verdichtungstemperatur der Referenzgemische erfolgte nach den [TP Asphalt-StB, Teil 35 A, 2021] und [TP Asphalt-StB, Teil 30, 2007]. Die Schaumbitumenvarianten wurden sowohl bei konventionellen als auch bei reduzierten Temperaturen hergestellt und verdichtet. Je untersuchte Variante wurde eine große Charge Asphaltmischgut im Labormischer (Masse: 30 kg) hergestellt, aus welcher sowohl Marshall-Probekörper als auch Gyrator-Probekörper angefertigt wurden. Die Verdichtungsversuche wurden möglichst zeitnah durchgeführt, um die zeitlich begrenzte Wirkung des Schaumbitumens durch langes Temperieren nicht zu beeinträchtigen.

#### Marshall-Verdichtungsgerät

Die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens mittels Marshall-Verdichtungsgerät erfolgte nach [TP-Asphalt-StB, Teil 10 B, 2011] mit 100 Schlägen je Seite. Aus derselben Asphaltcharge wurden zusätzlich Marshall-Probekörper mit 50 Schlägen je Seite (nur Asphaltdeck- und Asphalttragschicht) hergestellt, um das Verdichtungsverhalten von Schaumbitumenmischgut im Zuge einer Normverdichtungsbedingung zu simulieren. Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 beinhalten die Raumdichten der mit 50 Schlägen je Seite hergestellten Marshall-Probekörper.

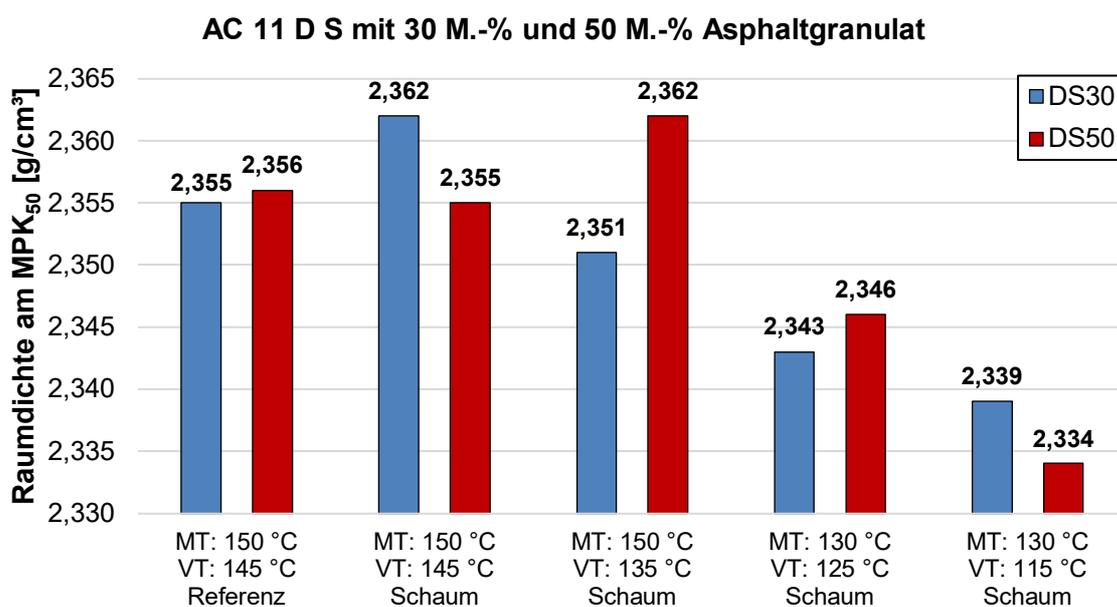


Abbildung 4-8: Raumdichten der mit 50 Schlägen je Seite hergestellten MPK (AC 11 D S)

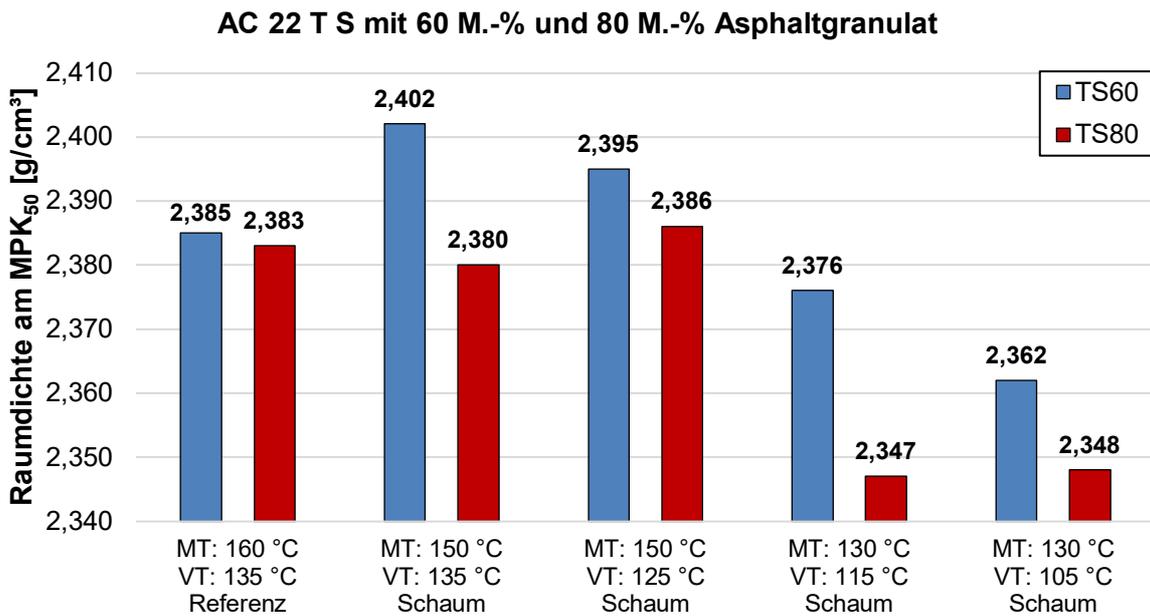


Abbildung 4-9: Raumdichten der mit 50 Schlägen je Seite hergestellten MPK (AC 22 T S)

Wie in Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 zu erkennen ist, werden die Raumdichten der MPK mit abnehmender Verdichtungstemperatur geringer. Bei gleicher Verdichtungstemperatur weisen die mit Schaumbitumen hergestellten Varianten DS30 und TS60 tendenziell höhere Raumdichten auf als die Referenzvarianten ohne Schaumbitumen.

Abbildung 4-10 bis Abbildung 4-12 beinhalten die nach TP Asphalt-StB, Teil 10 B ermittelten Verdichtungswiderstände.

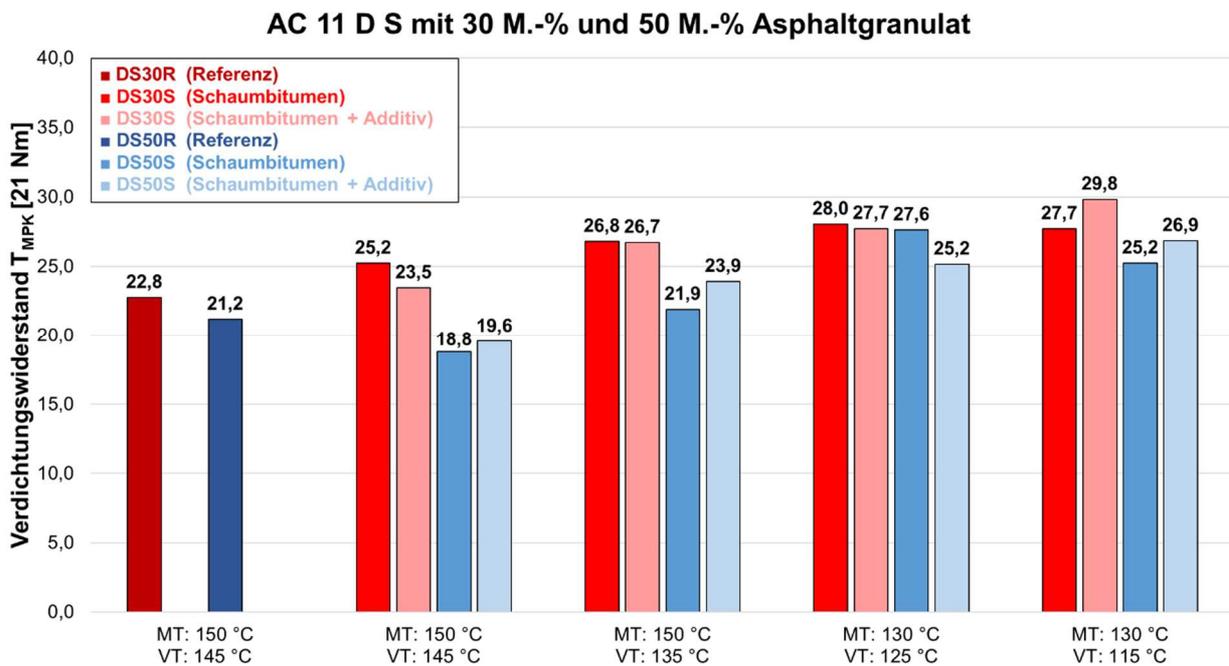


Abbildung 4-10: Verdichtungswiderstände MPK – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG

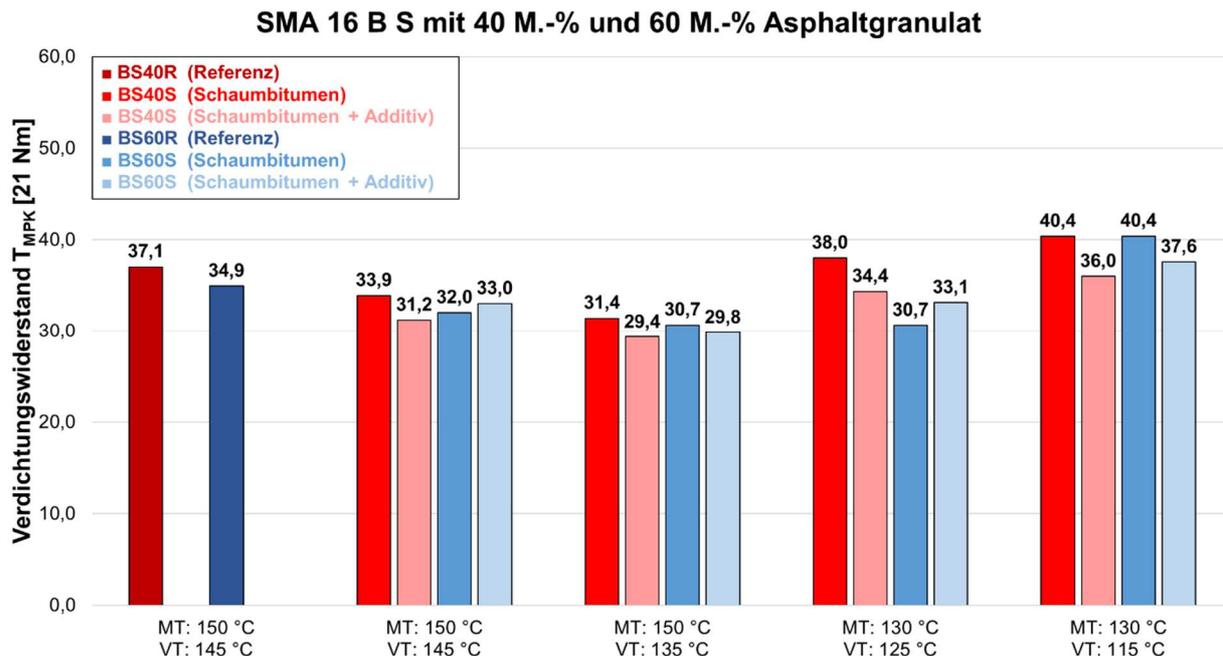


Abbildung 4-11: Verdichtungswiderstände MPK – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG

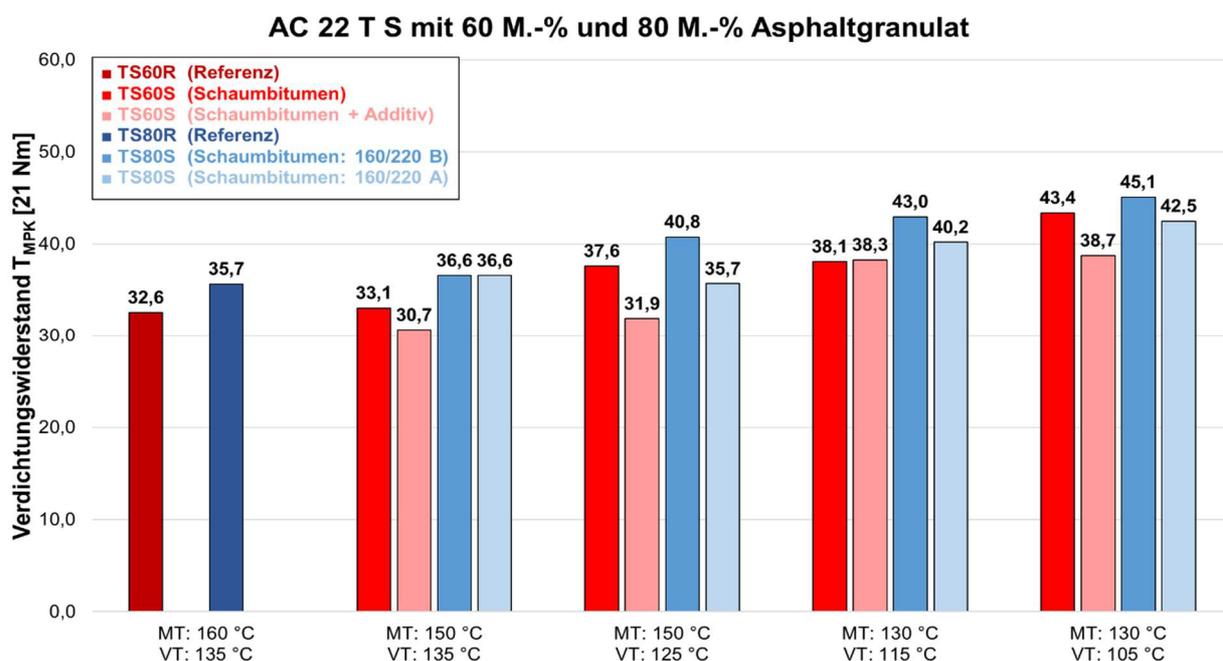


Abbildung 4-12: Verdichtungswiderstände MPK – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% AG

Sowohl bei der Asphaltdeckschicht als auch bei der Asphalttragschicht ist eine Zunahme des Verdichtungswiderstandes mit abnehmender Temperatur zu erkennen. Beim Splittmastixasphaltbinder nehmen die Verdichtungswiderstände bis zu einer Herstell- und Verdichtungstemperatur von 150 °C und 135 °C geringfügig ab, bevor diese mit abnehmender Temperatur wieder ansteigen. Die Verdichtungswiderstände der Varianten mit schaumstabilisierendem Additiv sind tendenziell etwas geringer als bei den Varianten ohne Additiv. Unter Berücksichtigung der Verfahrenspräzision ist dieser Unterschied als nicht signifikant einzuordnen (siehe Tabelle 4-14).

Tabelle 4-14: Verdichtungswiderstände nach TP Asphalt-StB Teil 10 B

Variante	Misch- temperatur	Verdich- tungs- temperatur	Verdich- tungs- widerstand	Verfahrens- präzision		Verdich- tungs- widerstand	Verfahrens- präzision	
	[°C]	[°C]	ohne Additiv	ohne Additiv		mit Additiv	mit Additiv	
DS30R	150	145 ± 5	<b>22,8</b>	20,5	25,0	-	-	-
DS30S Schaum	150	145 ± 5	<b>25,2</b>	22,7	27,8	<b>23,5</b>	21,1	25,8
	150	135 ± 5	<b>26,8</b>	24,1	29,5	<b>26,7</b>	24,1	29,4
	130	125 ± 5	<b>28,0</b>	25,2	30,8	<b>27,7</b>	25,0	30,5
	130	115 ± 5	<b>27,7</b>	24,9	30,5	<b>29,8</b>	26,8	32,8
DS50R	150	145 ± 5	<b>21,2</b>	19,1	23,3	-	-	-
DS50S Schaum	150	145 ± 5	<b>18,8</b>	16,9	20,7	<b>19,6</b>	17,6	21,5
	150	135 ± 5	<b>21,9</b>	19,7	24,1	<b>23,9</b>	21,5	26,3
	130	125 ± 5	<b>27,6</b>	24,9	30,4	<b>25,2</b>	22,6	27,7
	130	115 ± 5	<b>25,2</b>	22,7	27,8	<b>26,9</b>	24,2	29,5
BS40R	150	145 ± 5	<b>37,1</b>	33,3	40,8	-	-	-
BS40S Schaum	150	145 ± 5	<b>33,9</b>	30,5	37,3	<b>31,2</b>	28,1	34,3
	150	135 ± 5	<b>31,4</b>	28,3	34,6	<b>29,4</b>	26,4	32,3
	130	125 ± 5	<b>38,0</b>	34,2	41,8	<b>34,4</b>	30,9	37,8
	130	115 ± 5	<b>40,4</b>	36,3	44,4	<b>36,0</b>	32,4	39,6
BS60R	150	145 ± 5	<b>34,9</b>	31,4	38,4	-	-	-
BS60S Schaum	150	145 ± 5	<b>32,0</b>	28,8	35,2	<b>33,0</b>	29,7	36,3
	150	135 ± 5	<b>30,7</b>	27,6	33,8	<b>29,8</b>	26,9	32,8
	130	125 ± 5	<b>30,7</b>	27,6	33,7	<b>33,1</b>	29,8	36,4
	130	115 ± 5	<b>40,4</b>	36,4	44,4	<b>37,6</b>	33,8	41,3
TS60R	160	135 ± 5	<b>32,6</b>	29,3	35,8	-	-	-
TS60S Schaum	150	135 ± 5	<b>33,1</b>	29,7	36,4	<b>30,7</b>	27,6	33,7
	150	125 ± 5	<b>37,6</b>	33,8	41,4	<b>31,9</b>	28,7	35,1
	130	115 ± 5	<b>38,1</b>	34,3	41,9	<b>38,3</b>	34,5	42,1
	130	105 ± 5	<b>43,4</b>	39,0	47,7	<b>38,7</b>	34,9	42,6
TS80R	160	135 ± 5	<b>35,7</b>	32,1	39,2	-	-	-
TS80S <sup>1)</sup> Schaum	150	135 ± 5	<b>36,6</b>	32,9	40,2	<b>36,6</b>	32,9	40,2
	150	125 ± 5	<b>40,8</b>	36,7	44,9	<b>35,7</b>	32,1	39,3
	130	115 ± 5	<b>43,0</b>	38,7	47,3	<b>40,2</b>	36,2	44,2
	130	105 ± 5	<b>45,1</b>	40,6	49,6	<b>42,5</b>	38,2	46,7

<sup>1)</sup> Hier wurde anstelle der Zugabe des schaumstabilisierenden Additivs das besser schäumbare Bitumen 160/220 A verwendet. Für die Variante ohne Additiv wurde das schlechter schäumbare Bitumen 160/220 B herangezogen.

### Gyrator-Verdichter

Für die Untersuchung der Verdichtbarkeit im Gyrator wurde Asphaltmischgut aus derselben Charge wie für die Untersuchung der Verdichtbarkeit mit dem Marshall-Verdichtungsgerät verwendet. In diesem Zusammenhang wurden je Mischgutvariante drei Gyrator-Probekörper mit denselben Herstell- und Verdichtungstemperaturen wie bei den Marshall-Probekörpern hergestellt. Die Herstellung der Gyrator-Probekörper erfolgte möglichst zeitnah nach der Herstellung des Asphaltmischgutes, um eine lange Temperierdauer des Mischgutes zu vermeiden. Aus den aufgezeichneten Daten des Gyrotors wurden Verdichtungskurven erstellt. Für die Beurteilung der Verdichtbarkeit wurden zwei unterschiedliche Auswertemethoden herangezogen. Im Zuge der ersten Auswertemethode wurde der Verdichtungswiderstand in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B, d. h. unter Berücksichtigung der Probekörperhöhe und der Verdichtungsarbeit (Gyrationen), ermittelt. Für die zweite Auswertemethode wurde zunächst die Raumdichte nach dem in der [TP Asphalt-StB, Teil 6, 2023] aufgeführten Verfahren B (SSD – Saturated Surface Dry condition) an den hergestellten Gyrator-Probekörpern bestimmt. Diese Raumdichte wurde

mit der vom Gyrator berechneten Raumdichte (Raumdichte durch Ausmessen) ins Verhältnis gesetzt, um einen Umrechnungsfaktor zu erhalten. Dieser Umrechnungsfaktor wurde mit den vom Gyrator ermittelten Raumdichten multipliziert, um eine korrigierte Raumdichtekurve zu erhalten. Die so bestimmten Raumdichtekurven wurden im weiteren Verlauf verwendet, um die notwendige Anzahl an Gyrationen zum Erreichen der asphaltspezifischen Hohlraumbereiche ( $V_{max}$  und  $V_{min}$ ) nach [TL Asphalt-StB, 07/13] bzw. [H AI Abi, 2015] zu ermitteln. Zur Veranschaulichung dieser Auswertemethodik dienen die in Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 dargestellten Raumdichtekurven der Asphalttragschicht mit 60 M.-% Asphaltgranulat und der Asphaltdeckschicht mit 50 M.-% Asphaltgranulat.

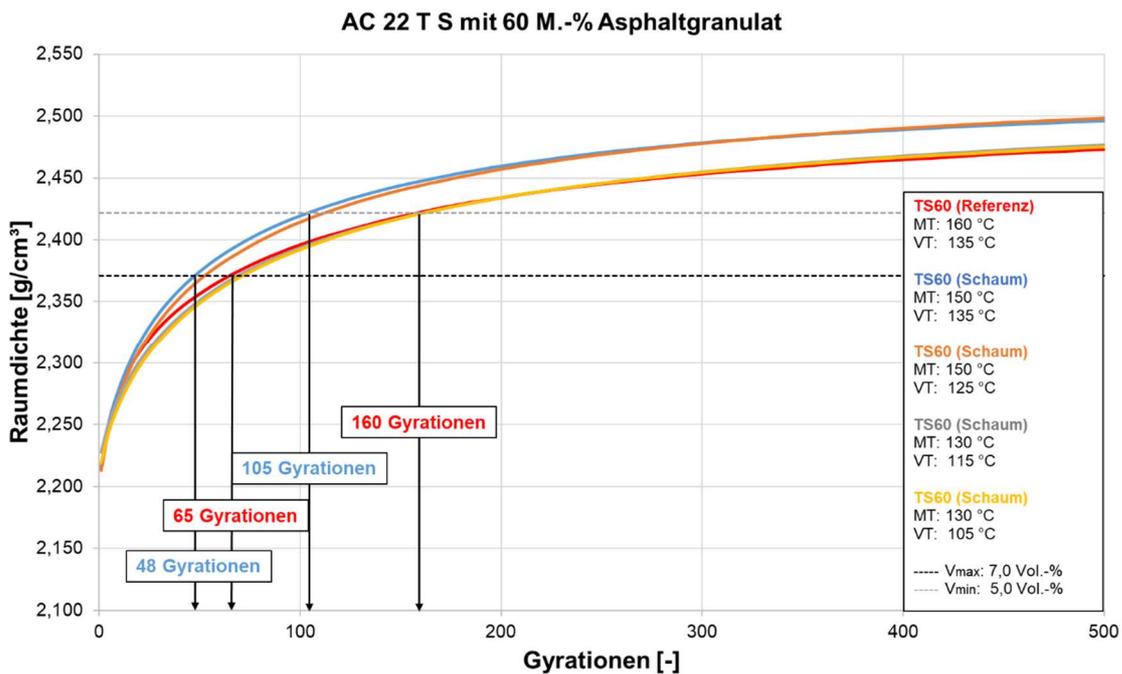


Abbildung 4-13: Verdichtungskurve – AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

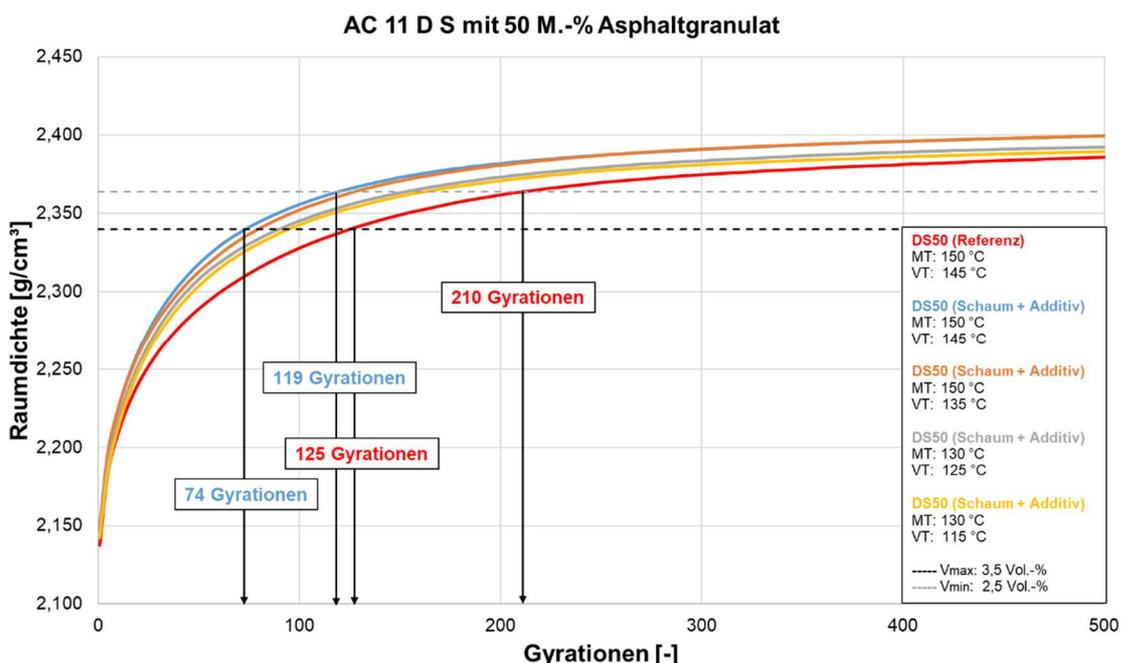


Abbildung 4-14: Verdichtungskurve – AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat

Tabelle 4-15 beinhaltet die unter Zuhilfenahme der Raumdichtekurven ermittelte Anzahl an Gyrationen zum Erreichen der Hohlräume ( $V_{\max}$  und  $V_{\min}$ ) nach TL Asphalt-StB bzw. H Al ABi. In Abbildung 4-15 und Abbildung 4-16 werden die Ergebnisse aus Tabelle 4-15 in Form von Balkendiagrammen visualisiert.

**Tabelle 4-15: Anzahl der Gyrationen zum Erreichen von  $V_{\max}$  und  $V_{\min}$**

Variante	Misch- temperatur [°C]	Verdichtungs- temperatur [°C]	Anzahl der notwendigen Gyrationen zum Erreichen der Raumdichte für $V_{\max}$		Anzahl der notwendigen Gyrationen zum Erreichen der Raumdichte für $V_{\min}$	
			ohne Additiv	mit Additiv	ohne Additiv	mit Additiv
DS30R	150	145 ± 5	145	-	235	-
DS30S Schaum	150	145 ± 5	130	95	215	155
	150	135 ± 5	160	120	252	200
	130	125 ± 5	170	120	278	200
	130	115 ± 5	160	130	275	225
DS50R	150	145 ± 5	125	-	210	-
DS50S Schaum	150	145 ± 5	111	74	205	119
	150	135 ± 5	110	80	180	128
	130	125 ± 5	111	90	185	152
	130	115 ± 5	125	95	245	164
BS40R	150	145 ± 5	175	-	303	-
BS40S Schaum	150	145 ± 5	168	136	280	200
	150	135 ± 5	170	150	281	220
	130	125 ± 5	190	168	305	255
	130	115 ± 5	237	152	392	255
BS60R	150	145 ± 5	248	-	395	-
BS60S Schaum	150	145 ± 5	141	120	230	181
	150	135 ± 5	138	108	210	175
	130	125 ± 5	200	164	345	240
	130	115 ± 5	208	175	360	265
TS60R	160	135 ± 5	65	-	160	-
TS60S Schaum	150	135 ± 5	48	55	105	120
	150	125 ± 5	52	58	112	130
	130	115 ± 5	70	55	161	130
	130	105 ± 5	72	70	161	170
TS80R	160	135 ± 5	82	-	187	-
TS80S <sup>1)</sup> Schaum	150	135 ± 5	75	68	168	155
	150	125 ± 5	82	75	178	170
	130	115 ± 5	122	77	310	180
	130	105 ± 5	135	83	340	200

<sup>1)</sup> Hier wurde anstelle der Zugabe des schaumstabilisierenden Additivs das besser schäumbare Bitumen 160/220 A verwendet. Für die Variante ohne Additiv wurde das schlechter schäumbare Bitumen 160/220 B herangezogen.

Wie anhand der Ergebnisse in Tabelle 4-15 zu erkennen ist, zeigt sich für die Verdichtungs-temperatur von 145 ± 5 °C grundsätzlich für alle Schaumbitumenvarianten ein positiver Effekt auf das Verdichtungsverhalten. Selbst an der Asphalttragschichtvariante mit 80 M.-% Asphaltgranulat ist noch ein, wenn auch geringer, positiver Effekt erkennbar, obwohl der Frischbindemittelanteil aus Schaumbitumen nur ca. 1 M.-% beträgt. Bei den meisten nicht additvierten Varianten zeigt sich ein Temperaturabsenkungspotential von 10 bis 20 K. Noch bedeutender wird der Effekt des Schaumbitumens bei Verwendung eines geeigneten schaumstabilisierenden Additivs oder eines Bitumens mit guten Schaumeigenschaften (160/220 A). Hier lässt sich für alle Varianten ein Potenzial zur Temperaturabsenkung von 30 K erkennen.

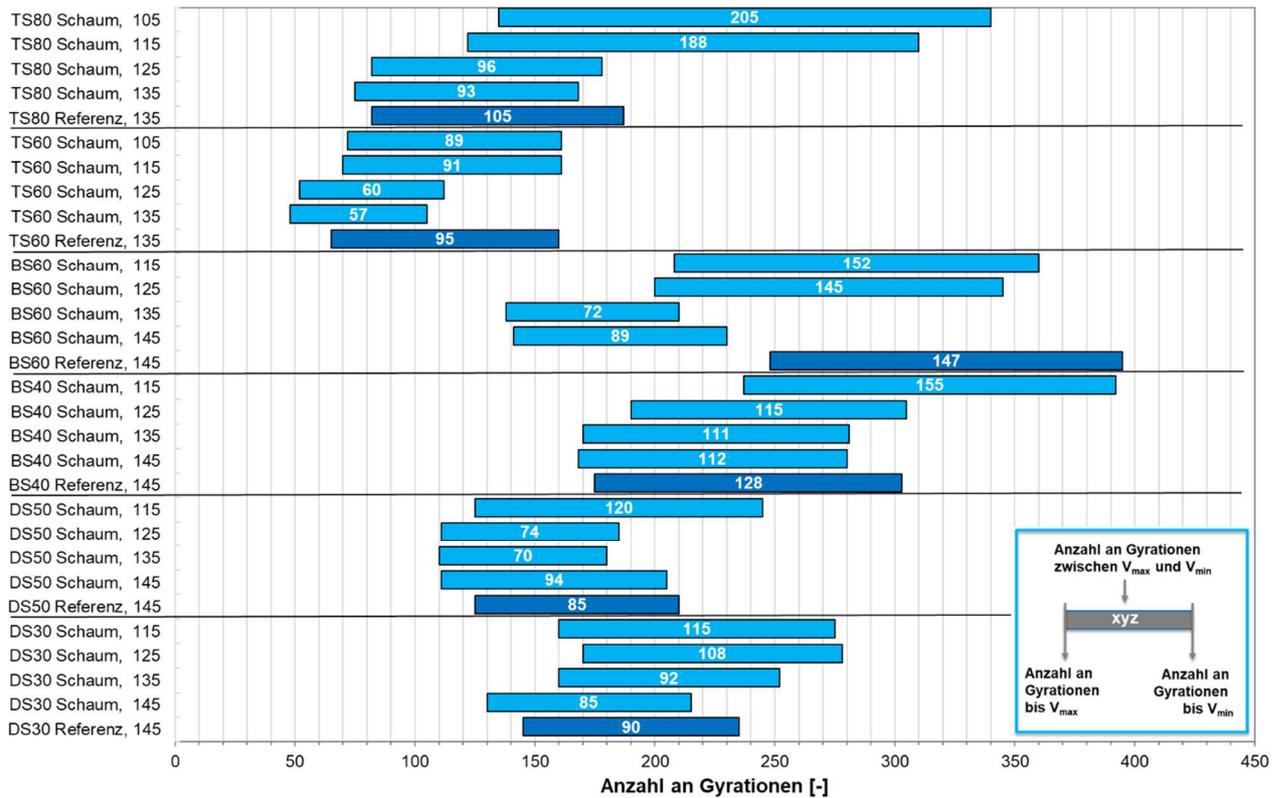


Abbildung 4-15: Anzahl der Gyrationen zum Erreichen von  $V_{max}$  und  $V_{min}$  (Varianten ohne Additiv)

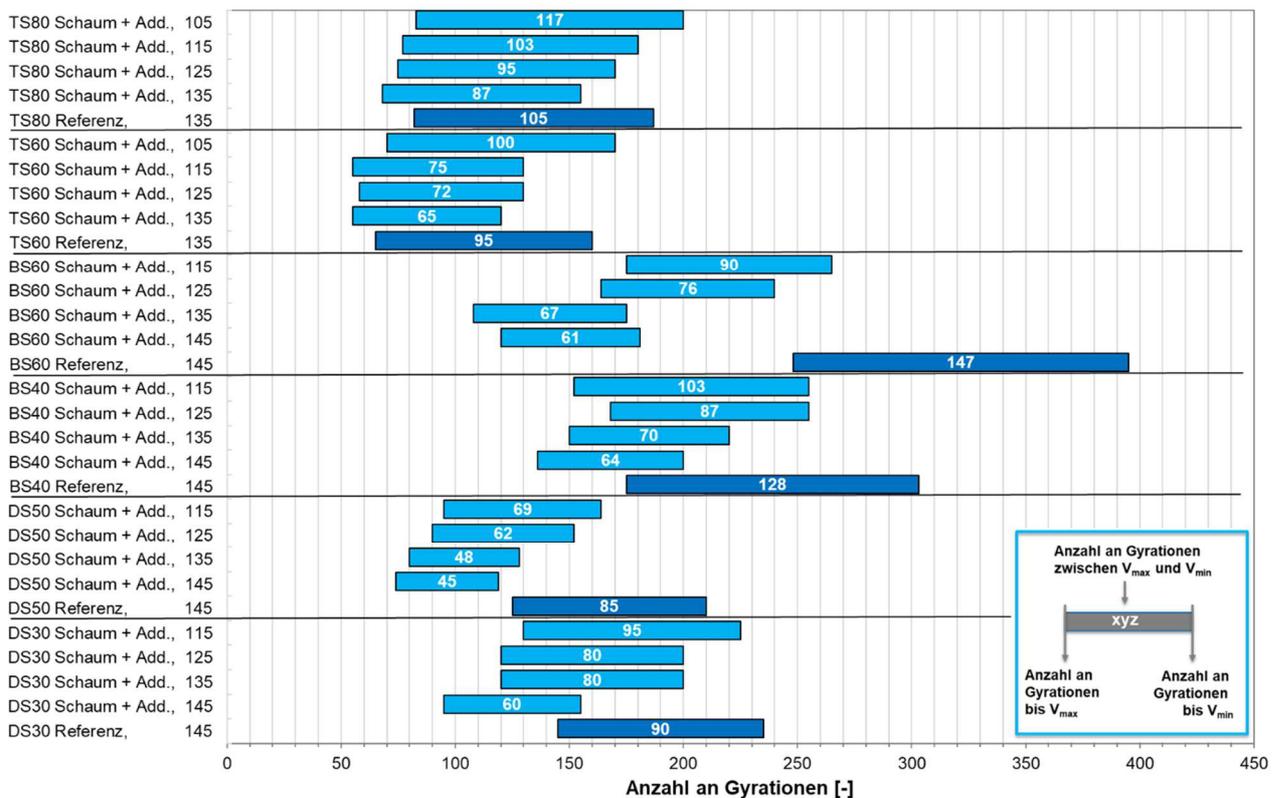


Abbildung 4-16: Anzahl der Gyrationen zum Erreichen von  $V_{max}$  und  $V_{min}$  (Varianten mit Additiv)

Zur Validierung der zuvor vorgestellten Auswertemethodik wurden Verdichtungswiderstände in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B mit den Daten aus der Gyrator-Verdichtung ermittelt.

Die Verdichtungswiderstände (nach 500 Gyrationen) sind in Abbildung 4-17 bis Abbildung 4-19 dargestellt. Abbildung 4-20 zeigt den mathematischen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Gyrationen zum Erreichen von  $V_{max}$  und dem Verdichtungswiderstand  $T_{Gyrator}$ . In Tabelle 4-16 sind alle Ergebnisse der Verdichtungsuntersuchungen gegenübergestellt.

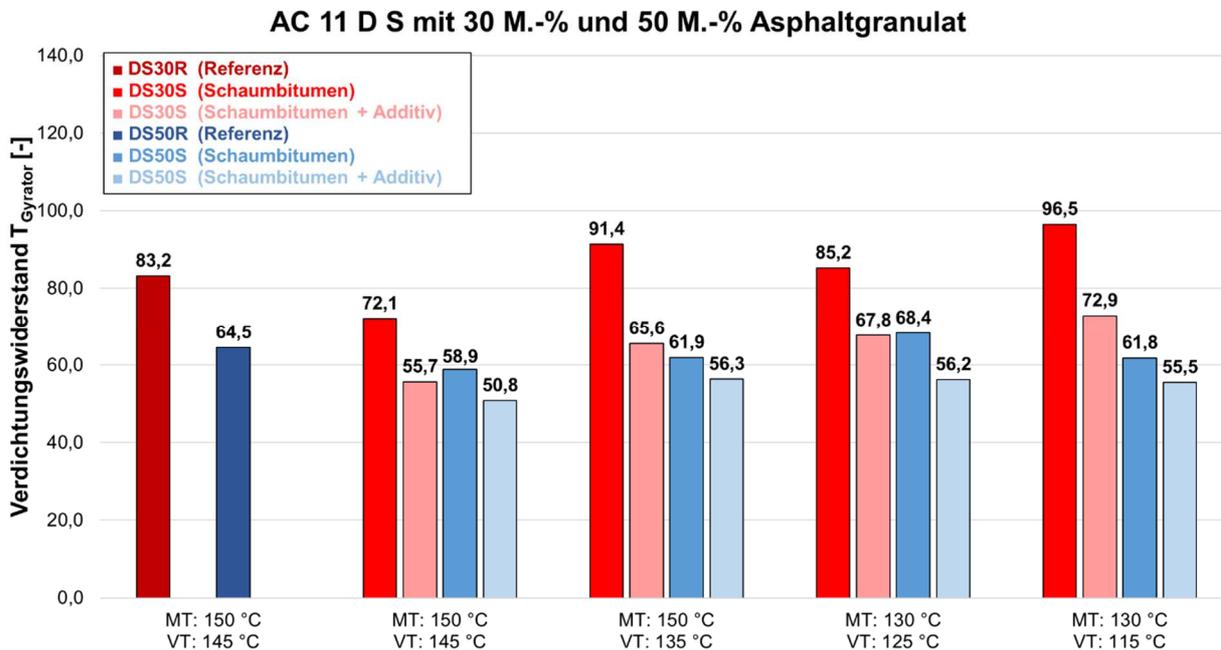


Abbildung 4-17: Verdichtungswiderstände Gyrator – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG

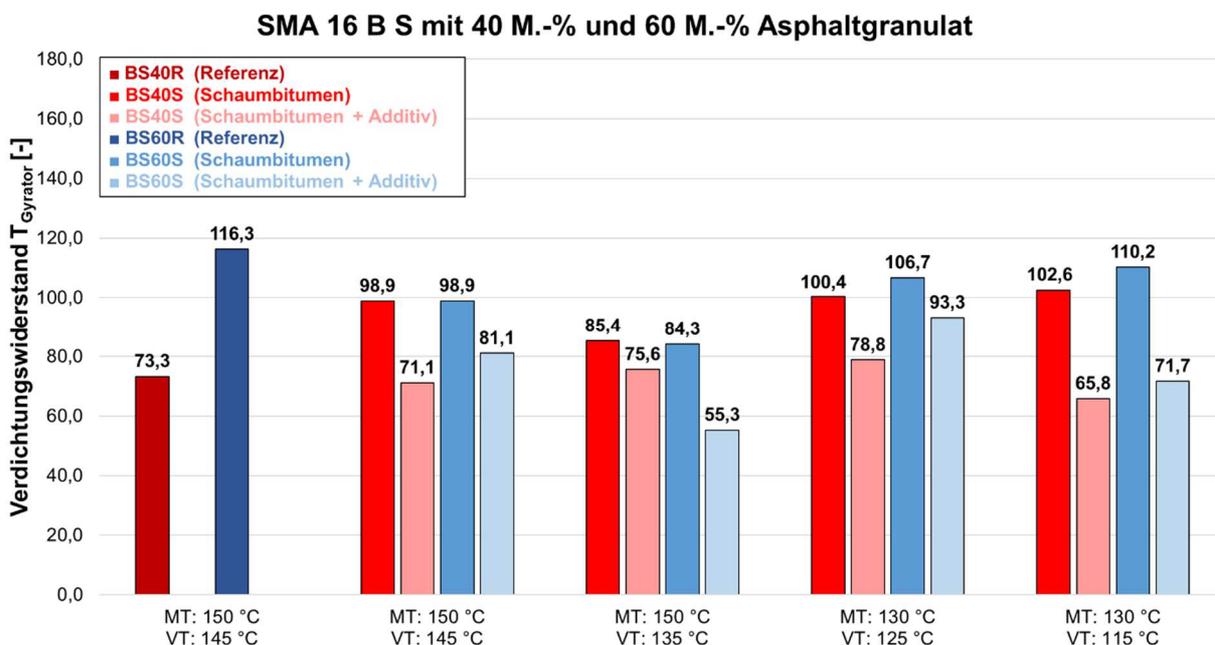


Abbildung 4-18: Verdichtungswiderstände Gyrator – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG

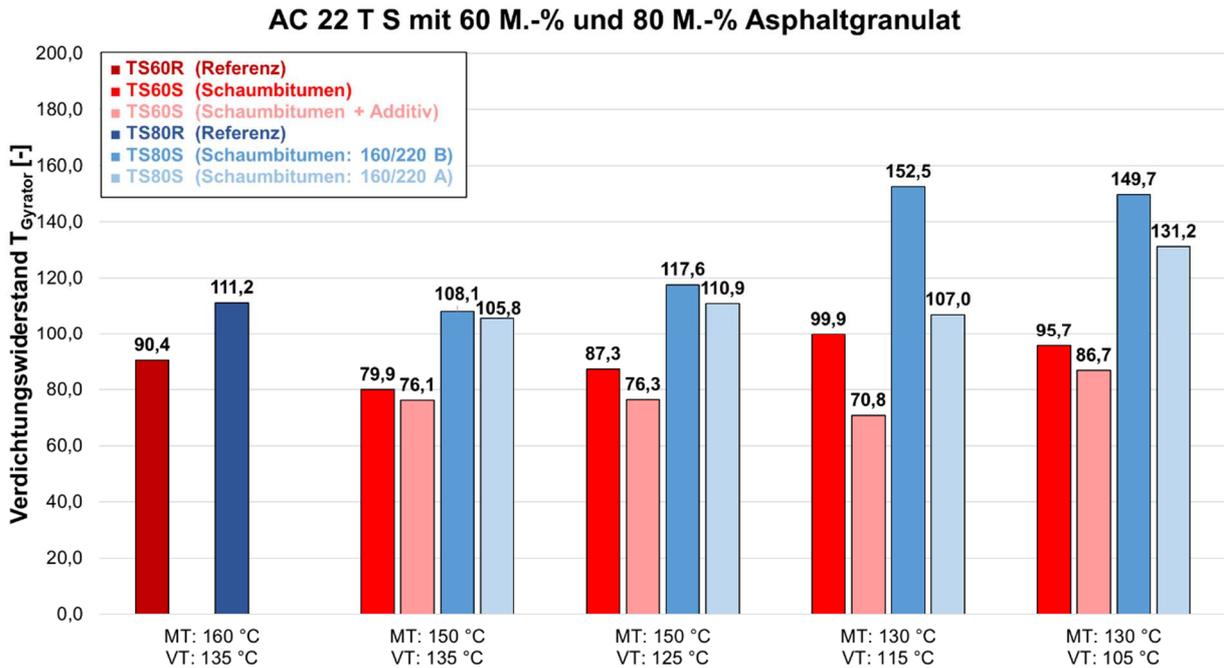


Abbildung 4-19: Verdichtungswiderstände Gyrator – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% AG

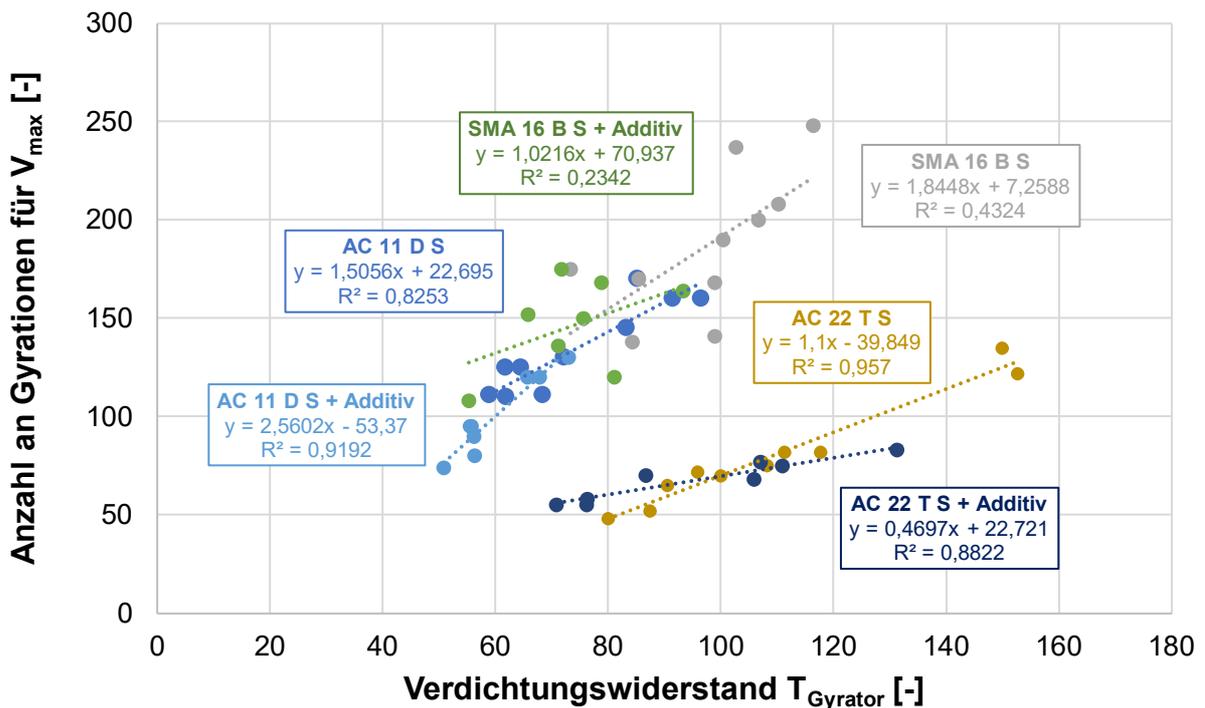


Abbildung 4-20: Zusammenhang – Verdichtungswiderstand T<sub>Gyrator</sub> und Anzahl der Gyrationen

Wie anhand der Ergebnisse in Abbildung 4-20 zu erkennen ist, zeigt sich mit Ausnahme des Mischgutes SMA 16 B S ein sehr guter linearer Zusammenhang zwischen der Gyrationenanzahl und dem Verdichtungswiderstand T<sub>Gyrator</sub>. Eine Analyse der Daten hat ergeben, dass die Bestimmtheitsmaße beim Splittmastixasphaltbinder im Wesentlichen von der Variante mit 40 M.-% Asphaltgranulat negativ beeinflusst werden. Die Bestimmtheitsmaße der Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat liegen auf Höhe der anderen Varianten.

Tabelle 4-16: Ergebnisse der Verdichtungsuntersuchungen

Variante	Misch- temperatur [°C]	Verdichtungs- temperatur [°C]	Verdichtungswiderstand T <sub>Gyrotor</sub>		Anzahl der notwendigen Gyrationen zum Erreichen der Raumdichte für V <sub>max</sub>		Anzahl der notwendigen Gyrationen zum Erreichen der Raumdichte für V <sub>min</sub>		Verdichtungswiderstand T <sub>MPK</sub>	
			ohne Additiv	ohne Additiv	ohne Additiv	mit Additiv	ohne Additiv	mit Additiv	ohne Additiv	mit Additiv
DS30R	150	145 ± 5	83,2	-	145	-	235	-	22,8	-
DS30S Schaum	150	145 ± 5	72,1	55,7	130	95	215	155	25,2	23,5
	150	135 ± 5	91,4	65,6	160	120	252	200	26,8	26,7
	130	125 ± 5	85,2	67,8	170	120	278	200	28,0	27,7
	130	115 ± 5	96,5	72,9	160	130	275	225	27,7	29,8
DS50R	150	145 ± 5	64,5	-	125	-	210	-	21,2	-
DS50S Schaum	150	145 ± 5	58,9	50,8	111	74	205	119	18,8	19,6
	150	135 ± 5	61,9	56,3	110	80	180	128	21,9	23,9
	130	125 ± 5	68,4	56,2	111	90	185	152	27,6	25,2
	130	115 ± 5	61,8	55,5	125	95	245	164	25,2	26,9
BS40R	150	145 ± 5	73,3	-	175	-	303	-	37,1	-
BS40S Schaum	150	145 ± 5	98,9	71,1	168	136	280	200	33,9	31,2
	150	135 ± 5	85,4	75,6	170	150	281	220	31,4	29,4
	130	125 ± 5	100,4	78,8	190	168	305	255	38,0	34,4
	130	115 ± 5	102,6	65,8	237	152	392	255	40,4	36,0
BS60R	150	145 ± 5	116,3	-	248	-	395	-	34,9	-
BS60S Schaum	150	145 ± 5	98,9	81,1	141	120	230	181	32,0	33,0
	150	135 ± 5	84,3	55,3	138	108	210	175	30,7	29,8
	130	125 ± 5	106,7	93,3	200	164	345	240	30,7	33,1
	130	115 ± 5	110,2	71,7	208	175	360	265	40,4	37,6
TS60R	160	135 ± 5	90,4	-	65	-	160	-	32,6	-
TS60S Schaum	150	135 ± 5	79,9	76,1	48	55	105	120	33,1	30,7
	150	125 ± 5	87,3	76,3	52	58	112	130	37,6	31,9
	130	115 ± 5	99,9	70,8	70	55	161	130	38,1	38,3
	130	105 ± 5	95,7	86,7	72	70	161	170	43,4	38,7
TS80R	160	135 ± 5	111,2	-	82	-	187	-	35,7	-
TS80S <sup>1)</sup> Schaum	150	135 ± 5	108,1	105,8	75	68	168	155	36,6	36,6
	150	125 ± 5	117,6	110,9	82	75	178	170	40,8	35,7
	130	115 ± 5	152,5	107,0	122	77	310	180	43,0	40,2
	130	105 ± 5	149,7	131,2	135	83	340	200	45,1	42,5

Abbildung 4-21 zeigt das Bestimmtheitsmaß zwischen dem Verdichtungswiderstand  $T_{MPK}$  und dem Verdichtungswiderstand  $T_{Gyrator}$ .

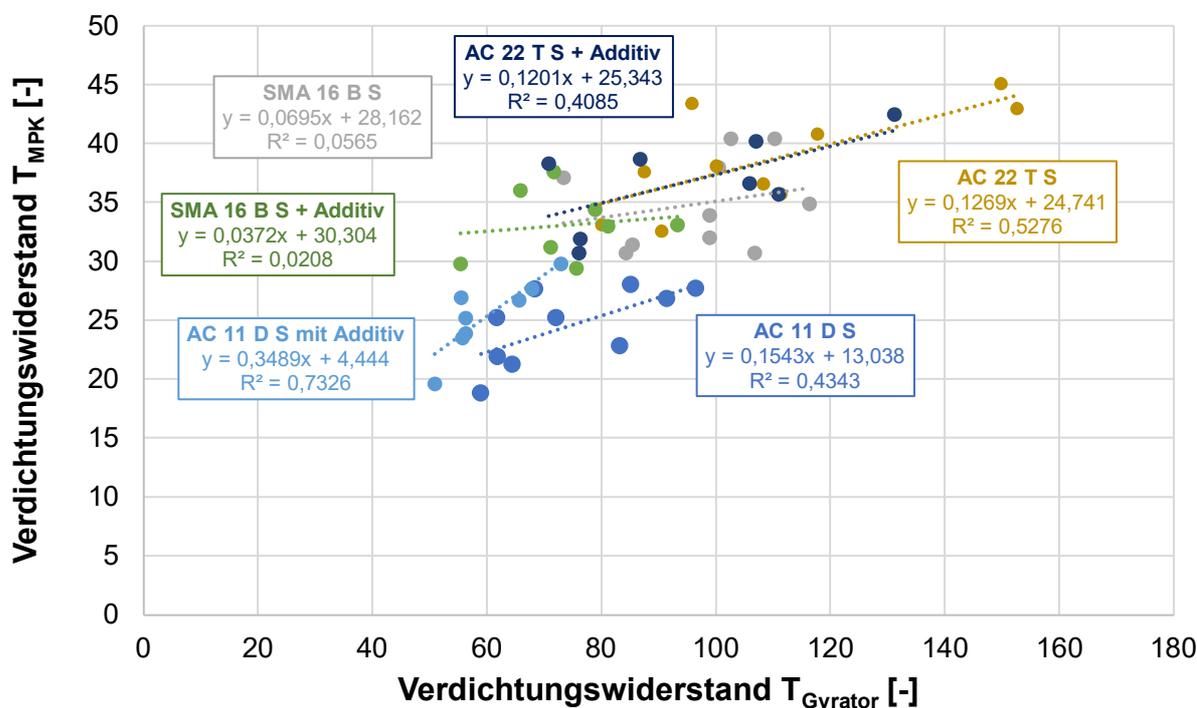


Abbildung 4-21: Zusammenhang – Verdichtungswiderstände  $T_{MPK}$  und  $T_{Gyrator}$

Bei den Asphalttragschicht- und Asphaltdeckschichtvarianten ist ein schwacher linearer Zusammenhang zwischen den Verdichtungswiderständen  $T_{MPK}$  und  $T_{Gyrator}$  zu erkennen (siehe Abbildung 4-21). Beim Splittmastixasphaltbinder zeigt sich hingegen kein Zusammenhang zwischen den Verdichtungswiderständen.

Die Daten aus den Verdichtungsuntersuchungen mit dem Gyrator deuten auf eine Verbesserung des Verdichtungsverhaltens durch Schaumbitumen hin. Das Potenzial zur Temperaturabsenkung liegt demnach im Labormaßstab zwischen 10 und 30 K, was sich durchaus mit den Beobachtungen auf der Baustelle deckt.

#### 4.1.7 Nachgelagerte Steifigkeitsuntersuchungen

Der Aspekt einer möglichen zeitverzögernden Steifigkeitsentwicklung durch Schaumbitumen, wurde mit dem Spaltzug-Schwellversuch untersucht. Basierend auf den Erkenntnissen der zuvor durchgeführten Verdichtungsuntersuchungen, wurden Gyrator-Probekörper mit einem möglichst identischen Hohlraumgehalt hergestellt. Dabei wurden die Referenzvarianten ohne Schaumbitumen bei konventionellen Temperaturen und die Varianten mit Schaumbitumen bei reduzierten Temperaturen hergestellt (siehe Tabelle 4-17). Die Steifigkeit dieser Gyrator-Probekörper wurde nach 1 Tag, 14 Tagen und nach 28 Tagen Trockenlagerung untersucht. Um plastische Verformungen und damit eine strukturelle Veränderung der Probekörper zu vermeiden, wurden die Proben nur bei einer Temperatur von 5 °C geprüft. Abbildung 4-22, Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 beinhalten die Ergebnisse der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen der Asphaltdeck-, Splittmastixasphaltbinder- und Asphalttragschicht für die Prüffrequenzen von 10 Hz, 5 Hz, 3 Hz, 1 Hz, 0,3 Hz und 0,1 Hz. Die Beurteilung der Steifigkeitsentwicklung erfolgt exemplarisch für die Prüffrequenz von 10 Hz.

Tabelle 4-17: Herstellungstemperaturen der Gyrator-PK für die nachgelagerten Untersuchungen

Varianten	Mischtemperatur	Verdichtungstemperatur
DS30R und DS50R (Referenz)	150 °C	145 °C
DS30S und DS50S (Schaum)	130 °C	125 °C
DS30S und DS50S (Schaum + Add.)	130 °C	125 °C
BS40R und BS60R (Referenz)	150 °C	145 °C
BS40S und BS60S (Schaum)	130 °C	125 °C
BS40S und BS60S (Schaum + Add.)	130 °C	125 °C
TS60R und TS80R (Referenz)	160 °C	135 °C
TS60S + Add. und TS80S mit 160/220 B	130 °C	115 °C
TS60S + Add. und TS80S mit 160/220 A	130 °C	115 °C

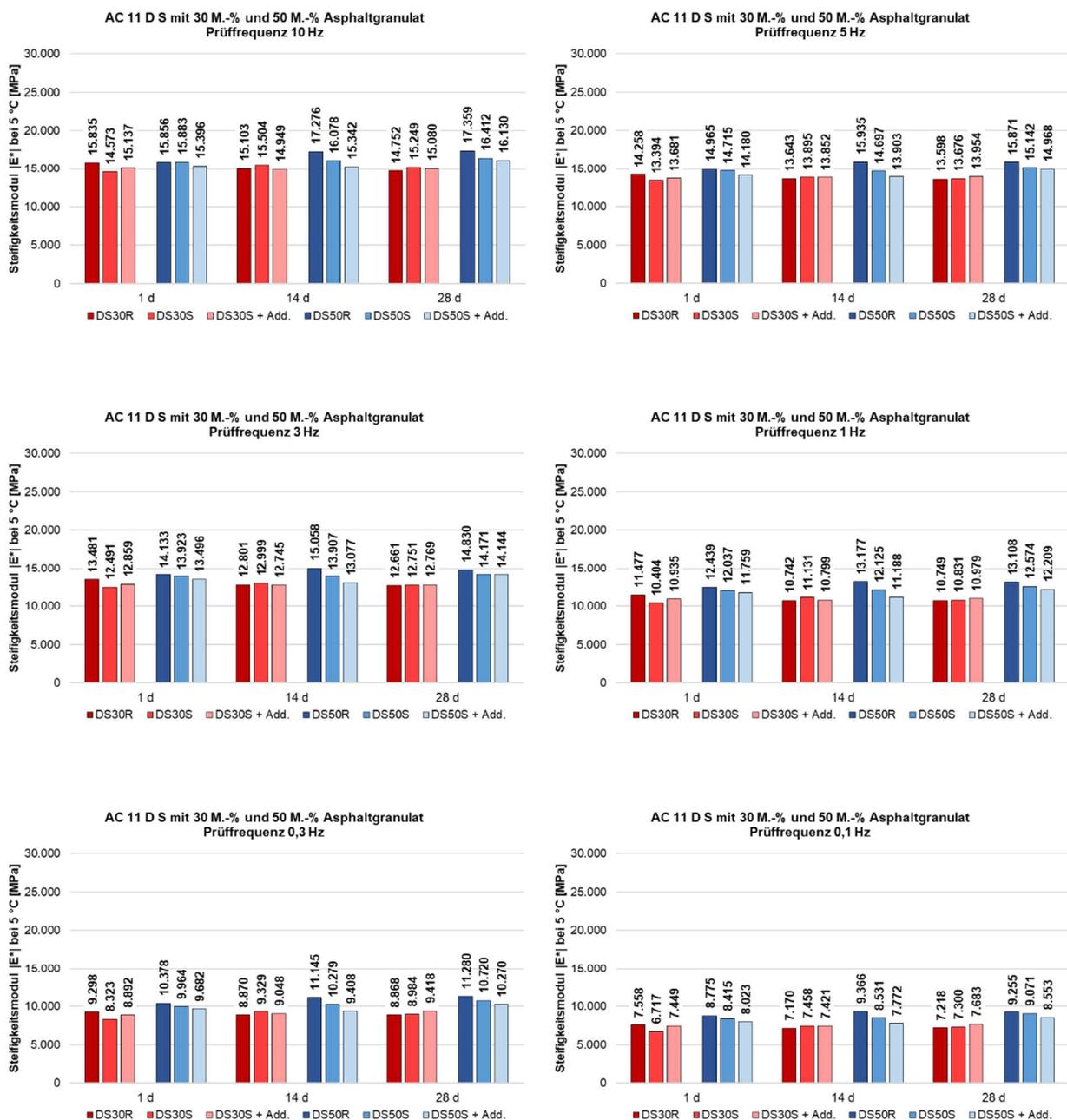


Abbildung 4-22: Ergebnisse der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S

Bei den Schaumbitumenvarianten DS30S und DS50S findet über den Lagerungszeitraum von 28 Tagen eine Zunahme des Steifigkeitsmoduls um 676 MPa und 530 MPa statt (Abbildung 4-22 – Prüffrequenz 10 Hz). Während das Steifigkeitsmodul der Variante DS30S + Add. über den gesamten Untersuchungszeitraum nahezu konstant bleibt ( $\Delta$  57 MPa), nimmt das Steifigkeitsmodul der Variante DS50S + Add. innerhalb von 28 Tagen um 734 MPa zu. Für die Referenzvariante DS30R kann eine Abnahme des Steifigkeitsmoduls um 1.083 MPa und für die Referenzvariante DS50R eine Zunahme des Steifigkeitsmoduls um 1.504 MPa nach 28 Tagen Lagerungszeit festgestellt werden (siehe Abbildung 4-22 – Prüffrequenz 10 Hz).

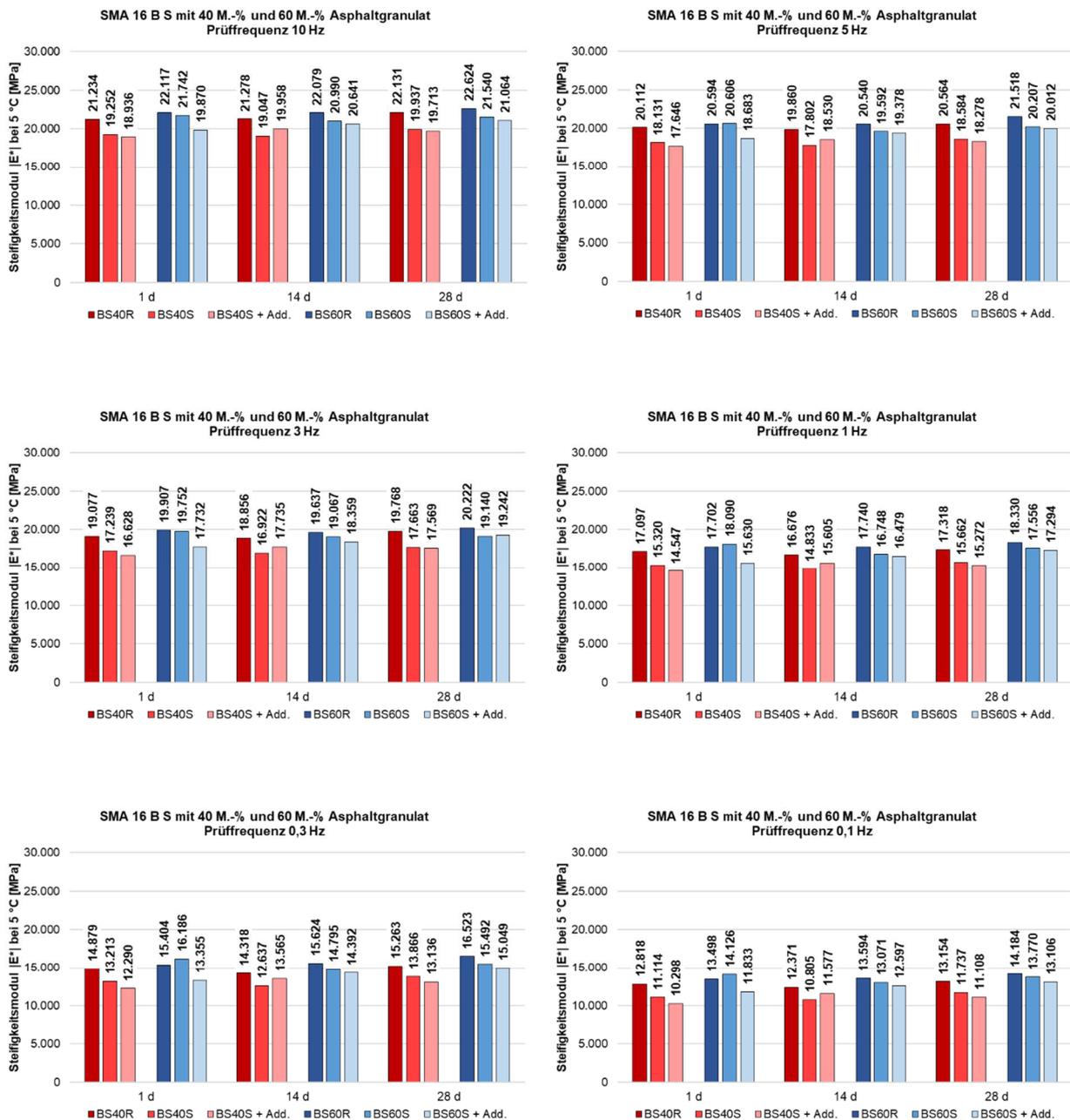


Abbildung 4-23: Ergebnisse der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S

An den Proben aus SMA 16 B S, nehmen die Steifigkeitsmodul der Varianten BS40R, BS40S, BS40S + Add. und BS60R nach 28 Tagen um 897 MPa, 686 MPa, 778 MPa und 506 MPa zu (siehe Abbildung 4-23 – Prüffrequenz 10 Hz). Das Steifigkeitsmodul der Variante BS60S ist nach

14 Tagen Trockenlagerung um 752 MPa geringer als zu Beginn der Untersuchung. Nach weiteren 14 Tagen Trockenlagerung erhöht sich das Steifigkeitsmodul um 550 MPa (Differenz zu Tag 1: -202 MPa). Das Steifigkeitsmodul der Variante mit Schaumbitumenadditiv BS60S + Add. nimmt über den gesamten Untersuchungszeitraum um 1.193 MPa zu.

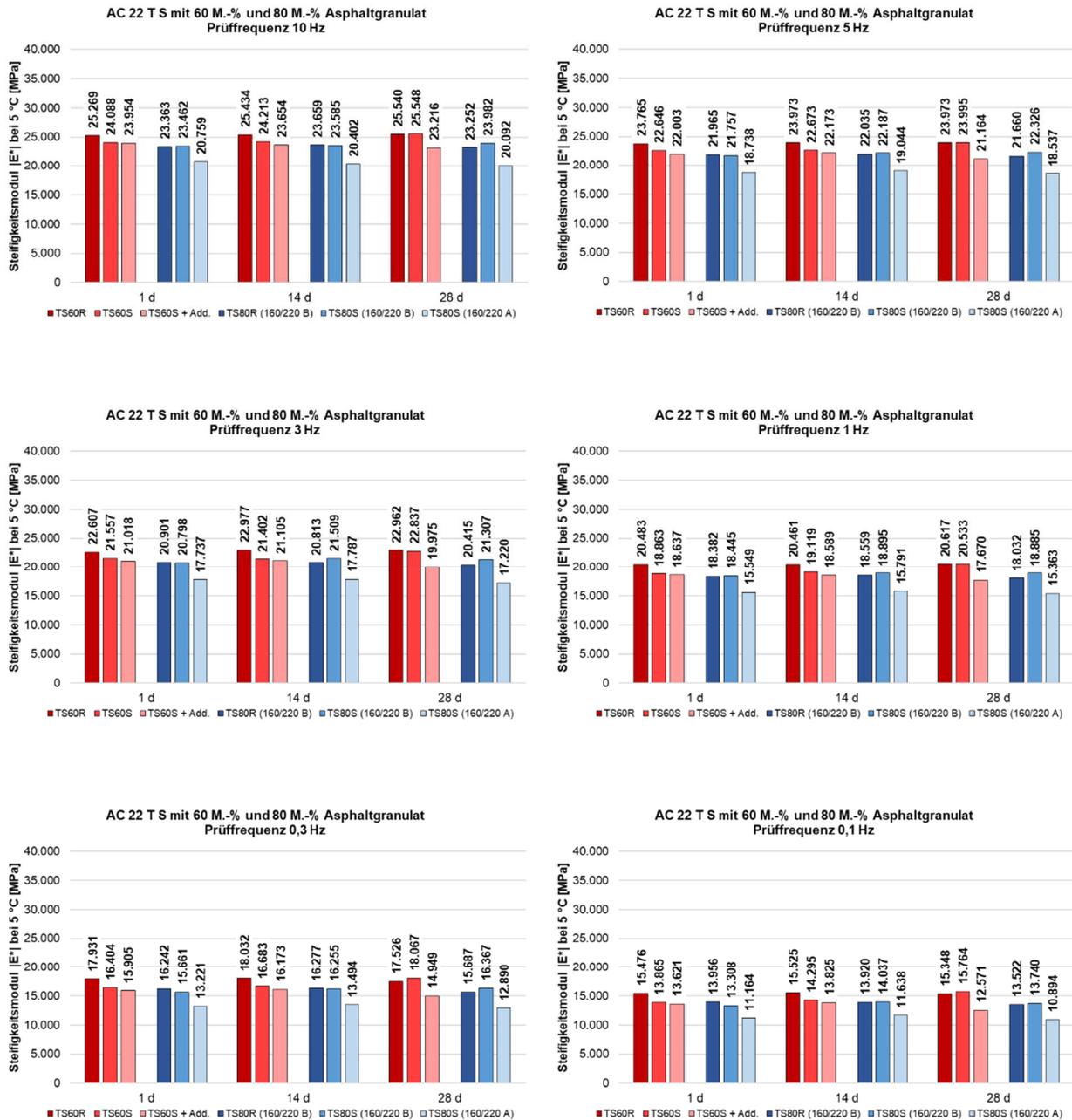
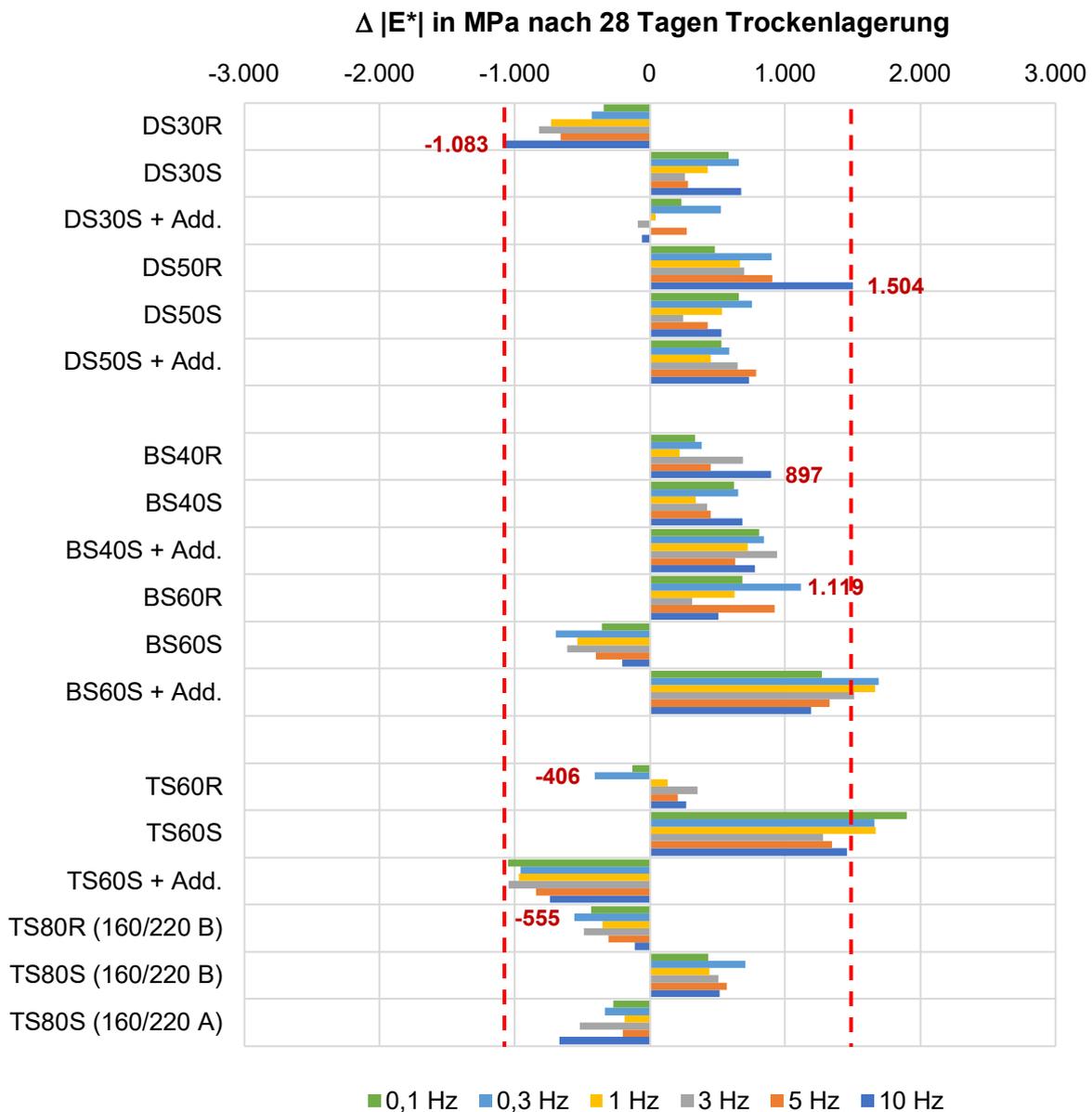


Abbildung 4-24: Ergebnisse der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen – AC 22 T S

Wie anhand der Ergebnisse in Abbildung 4-24 (Prüffrequenz 10 Hz) zu erkennen ist, kann für die beiden Referenzvarianten TS60R und TS80R keine außergewöhnliche Veränderung der Steifigkeitsmoduln nach 28 Tagen festgestellt werden. Bei den beiden Varianten TS60S und TS80S (160/220 B) nehmen die Steifigkeitsmoduln nach 28 Tagen um 1.460 MPa und 519 MPa zu. Die Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten TS60S + Add. und TS80S (160/220 A) nehmen hingegen nach 28 Tagen um 738 MPa und 667 MPa ab.

Abbildung 4-25 beinhaltet die Steifigkeitsmoduln als Differenz zwischen der Messung am 1.Tag und der Messung am 28.Tag. In Rot hervorgehoben ist die maximale Abweichung, die für die jeweilige Referenzvariante ermittelt wurde.



**Abbildung 4-25: Differenz im Steifigkeitsmodul nach 1 Tag und 28 Tagen Trockenlagerung**

Da die Referenzvarianten ohne den Einsatz von Schaumbitumen hergestellt wurden, können die Schwankungen der Steifigkeitsmoduln hier nur mit der Verfahrenspräzision und nicht mit einer verzögerten Steifigkeitsentwicklung durch Wasserverlust erklärt werden. Wie in Abbildung 4-25 zu erkennen ist, schwanken die Werte der Referenzvarianten zwischen -1.083 MPa und 1.504 MPa. Die Beurteilung der Steifigkeitsentwicklung der Schaumbitumenvarianten wurde daher basierend auf diesem Wertebereich vorgenommen. In diesem Zusammenhang ist deutlich zu erkennen, dass die überwiegende Mehrzahl der Ergebnisse innerhalb dieser Grenzen liegen. Die Hypothese, wonach mit Schaumbitumen hergestellte Varianten ihre Gebrauchseigenschaften zu einem späteren Zeitpunkt erreichen als ein Asphalt ohne Schaumbitumen, kann mit den hier aufgezeigten Daten nicht bestätigt werden. Die Unterschiede im Steifigkeitsmodul sind daher mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Verfahrenspräzision zurückzuführen.

### 4.1.8 Asphalt-Performance

Für die Beurteilung der Asphalt-Performance wurden Asphalt-Probepplatten mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellt. An daraus entnommenen Bohrkernen wurde der einaxiale Druck-Schwellversuch (nur Deck- und Binderschicht) zur Abschätzung des Verformungsverhaltens und der Spaltzug-Schwellversuch zur Bestimmung der Steifigkeit durchgeführt. Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten der Referenzgemische erfolgte mit den in den TP Asphalt-StB, Teil 33 definierten Verdichtungstemperaturen. Die Asphalt-Probepplatten mit Schaumbitumenmischgut wurden hingegen mit um 20 °C reduzierten Temperaturen hergestellt und verdichtet.

#### Verformungsverhalten bei Wärme

In Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 sind die mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschichtvarianten dargestellt.

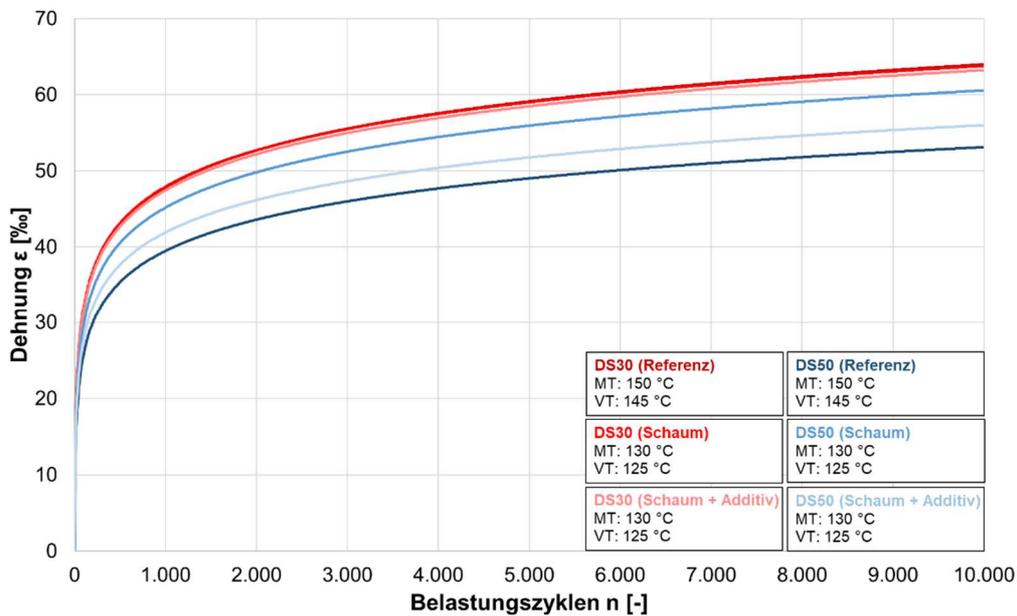


Abbildung 4-26: Impulskriechkurven AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat

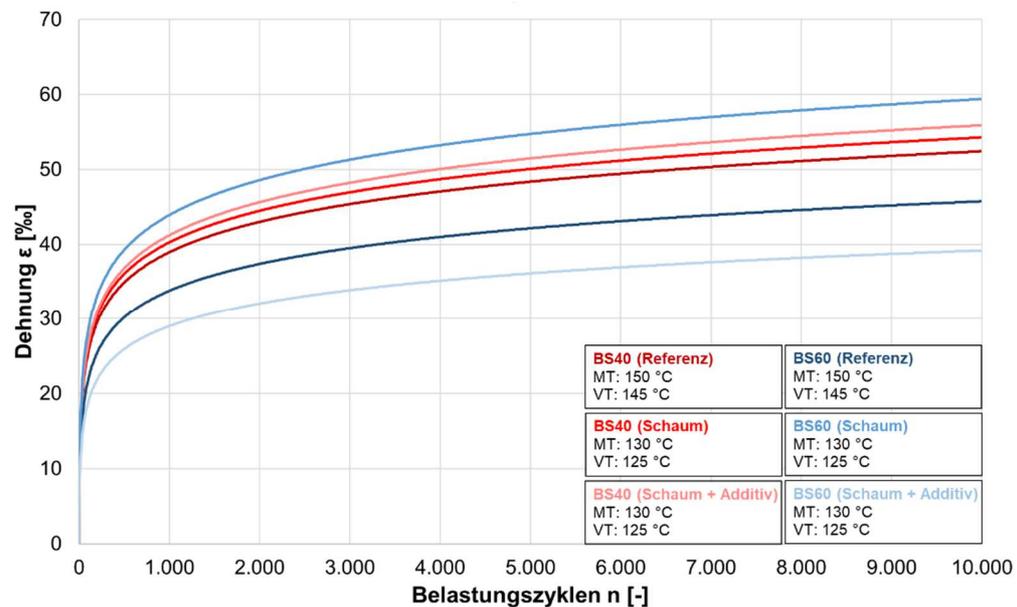
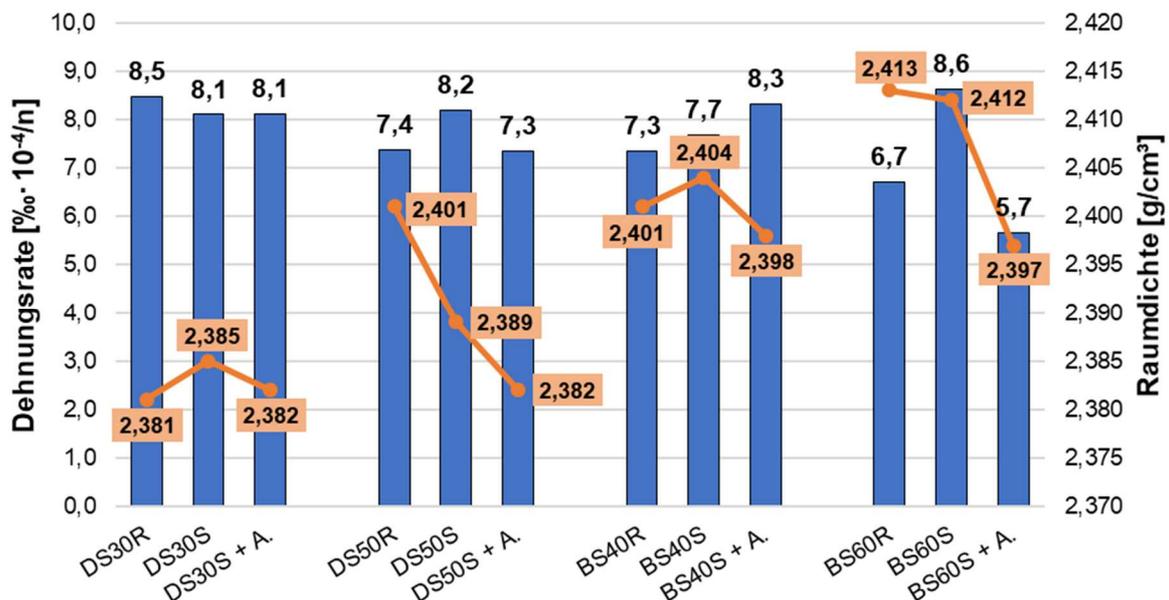


Abbildung 4-27: Impulskriechkurven SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Im Hinblick auf die Varianten DS30 und BS40 können keine bis sehr geringfügige Unterschiede zwischen den bleibenden Verformungen der Referenzvarianten und den bleibenden Verformungen der temperaturabgesenkten Varianten mit Schaumbitumen festgestellt werden. Bei den Varianten DS50 und BS60 zeigt sich eine etwas größere Streuung der Ergebnisse. Die Variante DS50 (Schaum) weist etwas höhere und die Variante DS50 (Schaum + Additiv) geringfügig höhere bleibende Verformungen als die Variante DS50 (Referenz) auf (vgl. Abbildung 4-26). An den Proben der Variante BS60 (Schaum) wurden deutlichere Unterschiede der bleibenden Verformungen gegenüber der Referenzvariante BS60 (Referenz) festgestellt (Abbildung 4-27). Die bleibenden Verformungen der Variante BS60 (Schaum + Additiv) fallen hingegen geringer aus als bei der Referenzvariante BS60 (Referenz), was wiederum die Plausibilität der Ergebnisse von Variante BS60 (Schaum) in Frage stellt.

Um die Ergebnisse unabhängig von den anfänglich hohen Dehnungen (Konsolidierung) besser einordnen zu können, wurde die Dehnungsrate zwischen den Belastungszyklen 9.800 und 10.000 für alle in Abbildung 4-26 und Abbildung 4-27 dargestellten Varianten ermittelt. Abbildung 4-28 beinhaltet die ermittelten Dehnungsraten sowie die Raumdichten der Bohrkern.



**Abbildung 4-28: Dehnungsraten und Raumdichten der Referenz- und Schaumbitumenvarianten**

Mit Ausnahme der Variante BS60 (Schaum), liegen die Dehnungsraten innerhalb der jeweiligen Mischgutvarianten auf einem ähnlichen Niveau. Weiterhin kann kein Zusammenhang zwischen Raumdichte und Dehnungsrate festgestellt werden, wobei die Unterschiede der Raumdichte auch nur sehr gering sind. Die hier dargestellten Resultate lassen somit keinen endgültigen Rückschluss auf einen zeitlich reduzierten Verformungswiderstand der Schaumbitumenmischgüter zu.

### Asphaltsteifigkeit

Die Tabelle 4-18, Tabelle 4-19 und Tabelle 4-20 beinhalten die Steifigkeitsmoduln der aus den Asphalt-Probeplatten entnommenen Bohrkern. In der Abbildung 4-29, Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 sind die Steifigkeitsmoduln bei einer Prüffrequenz von 10 Hz gegenübergestellt. Die Abbildung 4-32, Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 beinhalten die nach TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelten Hauptkurven (Masterkurven).

Tabelle 4-18: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	DS30R Referenz	DS30S Schaum	DS30S Schaum + Add.	DS50R Referenz	DS50S Schaum	DS50S Schaum + Add.
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	16.333	15.177	15.318	18.181	16.493	17.248
-10	0,3	17.958	17.330	17.148	19.896	18.144	19.241
-10	1	20.605	19.361	19.239	21.343	20.256	20.879
-10	3	21.957	21.486	21.116	23.476	22.306	22.810
-10	5	22.844	22.706	22.236	24.187	22.623	23.163
-10	10	24.143	23.624	23.599	25.486	23.785	24.515
0	0,1	9.040	9.818	9.227	10.703	10.241	10.690
0	0,3	10.896	11.617	11.173	12.710	12.088	12.824
0	1	13.465	14.047	13.421	14.959	14.388	15.027
0	3	15.937	16.268	15.656	17.052	16.566	17.429
0	5	16.599	17.245	16.648	18.014	17.573	18.235
0	10	18.385	19.141	17.994	19.470	18.763	19.621
5	0,1	6.339	6.284	6.293	7.912	6.896	7.676
5	0,3	8.081	8.116	8.107	9.799	8.916	9.654
5	1	10.276	10.373	10.281	11.976	11.081	11.893
5	3	12.610	12.481	12.444	14.187	13.530	14.127
5	5	13.462	13.750	13.858	15.214	14.474	15.292
5	10	15.084	14.992	15.109	16.753	15.668	16.562
10	0,1	3.983	4.117	4.123	5.270	4.627	4.990
10	0,3	5.444	5.587	5.509	6.841	6.070	6.595
10	1	7.257	7.373	7.375	8.882	8.026	8.728
10	3	9.259	9.470	9.430	10.986	10.082	10.727
10	5	10.414	10.459	10.541	12.008	11.212	11.915
10	10	11.765	12.102	12.062	13.611	12.716	13.573
20	0,1	1.569	1.635	1.620	2.122	1.904	2.024
20	0,3	2.269	2.368	2.396	3.010	2.727	2.942
20	1	3.321	3.385	3.474	4.381	3.968	4.223
20	3	4.733	4.768	4.795	5.917	5.495	5.753
20	5	5.591	5.621	5.672	6.765	6.424	6.648
20	10	6.674	6.606	6.741	7.963	7.589	7.849

AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat

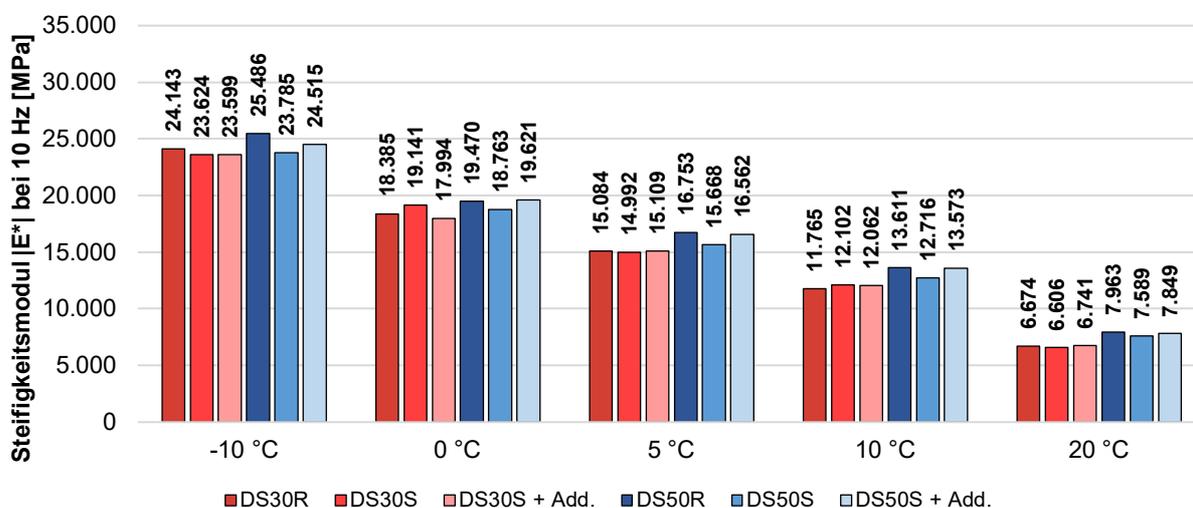


Abbildung 4-29: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG

Tabelle 4-19: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	BS40R Referenz	BS40S Schaum	BS40S Schaum + Add.	BS60R Referenz	BS60S Schaum	BS60S Schaum + Add.
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	19.612	19.824	19.391	20.575	20.333	18.676
-10	0,3	21.242	21.469	21.163	22.233	21.681	20.221
-10	1	23.167	23.177	22.592	23.746	23.011	21.419
-10	3	24.705	24.355	23.856	24.908	24.285	23.023
-10	5	25.631	24.948	24.463	25.364	24.801	23.699
-10	10	26.559	26.330	25.141	26.374	26.372	24.280
0	0,1	13.431	13.302	12.624	14.648	14.456	13.266
0	0,3	15.545	15.235	14.605	16.666	16.194	15.053
0	1	17.732	17.389	16.670	18.681	18.289	16.845
0	3	19.553	19.378	18.570	20.408	20.152	18.600
0	5	20.200	20.198	19.492	21.371	20.660	19.554
0	10	21.454	21.393	20.382	22.844	22.355	20.755
5	0,1	9.810	9.713	9.481	11.950	10.381	9.764
5	0,3	12.100	11.625	11.491	14.176	12.303	11.624
5	1	14.442	13.912	13.627	16.205	14.601	13.745
5	3	16.736	16.428	15.626	18.184	16.620	15.585
5	5	17.374	17.498	16.471	19.521	17.612	16.466
5	10	19.036	18.787	17.926	20.695	18.851	17.740
10	0,1	7.399	6.551	6.736	8.818	8.214	7.234
10	0,3	9.357	8.402	8.535	10.779	10.263	8.935
10	1	11.515	10.718	10.793	13.139	12.668	11.153
10	3	13.894	12.948	12.715	15.520	15.103	13.260
10	5	15.063	13.984	13.849	16.413	16.027	14.194
10	10	16.405	15.277	15.305	17.707	17.632	15.622
20	0,1	3.237	2.732	3.221	4.201	3.461	3.634
20	0,3	4.533	3.857	4.378	5.638	4.754	4.903
20	1	6.212	5.499	6.001	7.497	6.428	6.495
20	3	8.157	7.327	7.781	9.743	8.307	8.432
20	5	9.360	8.220	8.881	10.794	9.329	9.432
20	10	10.704	9.612	10.005	12.199	10.722	10.750

SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

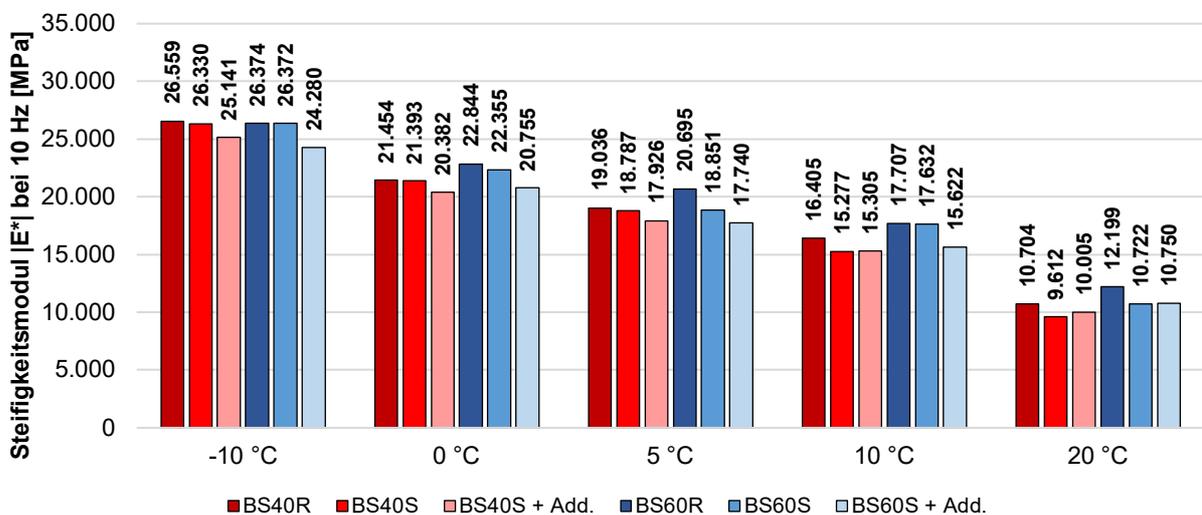


Abbildung 4-30: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG

Tabelle 4-20: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	TS60R Referenz	TS60S Schaum	TS60S Schaum + Add.	TS80R Referenz 160/220 B	TS80S Schaum 160/220 B	TS80S Schaum 160/220 A
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	23.796	17.001	18.032	21.300	14.208	13.647
-10	0,3	25.590	18.601	19.643	22.765	15.589	15.332
-10	1	27.201	20.209	21.055	24.476	16.799	16.423
-10	3	28.715	21.390	22.753	26.153	18.103	18.241
-10	5	29.331	22.211	23.049	26.831	18.562	18.684
-10	10	30.722	23.085	23.832	27.746	19.238	19.581
0	0,1	17.652	11.462	12.002	14.316	9.371	7.590
0	0,3	19.834	13.351	13.757	16.357	10.858	9.015
0	1	22.261	15.375	16.194	18.691	12.540	10.733
0	3	24.072	17.207	17.886	20.455	14.073	12.339
0	5	25.135	18.139	18.803	21.245	14.818	13.251
0	10	26.393	19.578	20.181	21.970	16.038	14.330
5	0,1	13.483	8.966	9.117	10.769	6.867	6.344
5	0,3	15.807	10.885	10.912	12.649	8.381	7.864
5	1	18.268	12.858	13.146	15.120	10.045	9.501
5	3	20.686	15.178	15.119	17.315	11.562	11.281
5	5	21.799	16.084	16.156	18.456	12.482	12.162
5	10	23.364	17.547	17.564	19.724	14.028	13.452
10	0,1	10.258	5.931	6.664	7.537	5.353	4.511
10	0,3	12.546	7.619	8.352	9.500	6.693	5.642
10	1	15.074	9.590	10.461	11.742	8.317	7.227
10	3	17.600	11.764	12.633	14.165	10.064	8.943
10	5	19.006	12.690	13.750	15.286	10.914	9.709
10	10	20.464	14.225	15.211	16.993	12.207	10.844
20	0,1	4.973	2.928	2.851	3.637	2.785	2.221
20	0,3	6.711	4.052	3.989	4.936	3.715	3.095
20	1	8.828	5.526	5.523	6.669	4.935	4.108
20	3	11.182	7.257	7.262	8.584	6.409	5.398
20	5	12.400	8.124	8.229	9.666	7.237	6.030
20	10	14.067	9.654	9.405	11.346	8.365	7.498

AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat

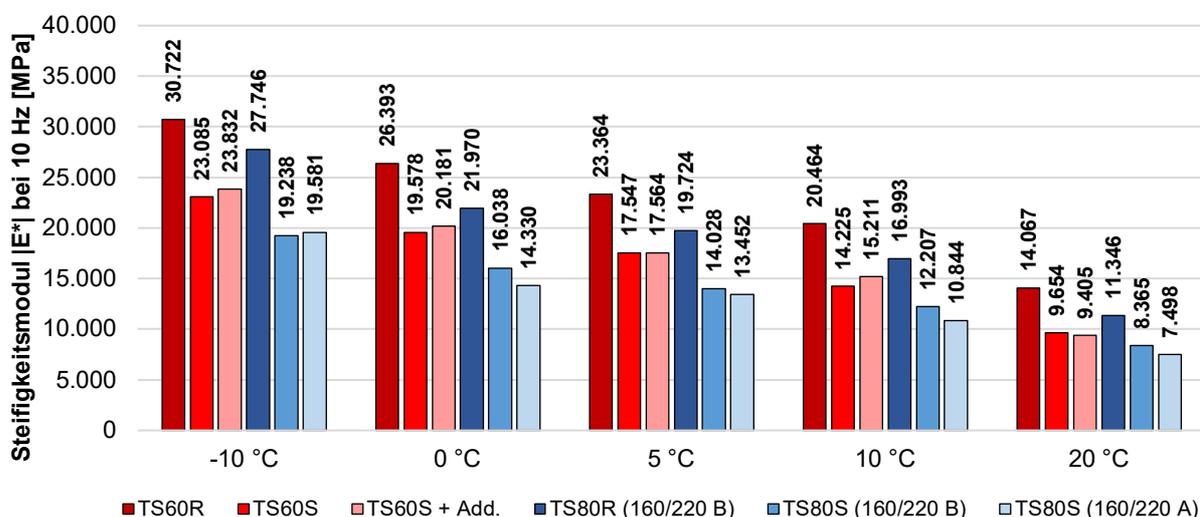


Abbildung 4-31: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% AG

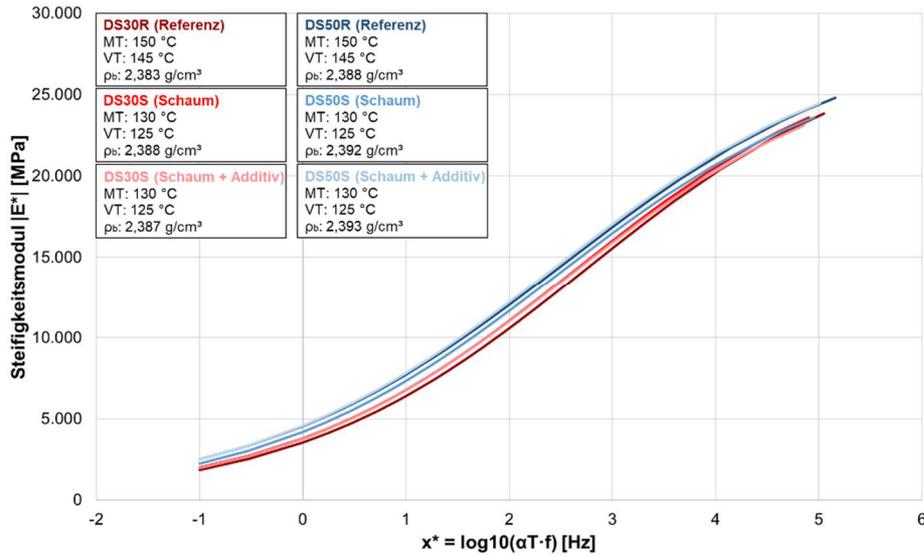


Abbildung 4-32: Masterkurven nach TP A-StB, Teil 26 – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG

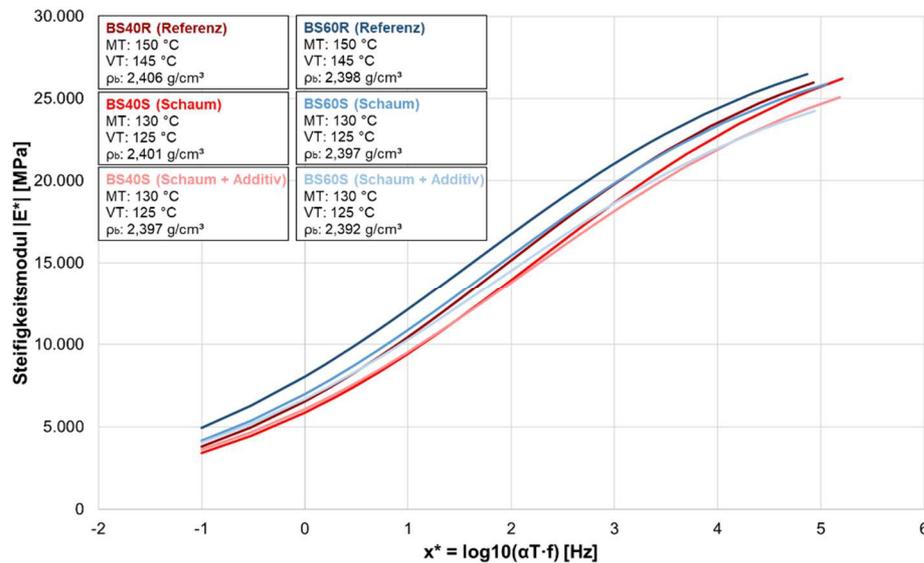


Abbildung 4-33: Masterkurven nach TP A-StB, Teil 26 – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG

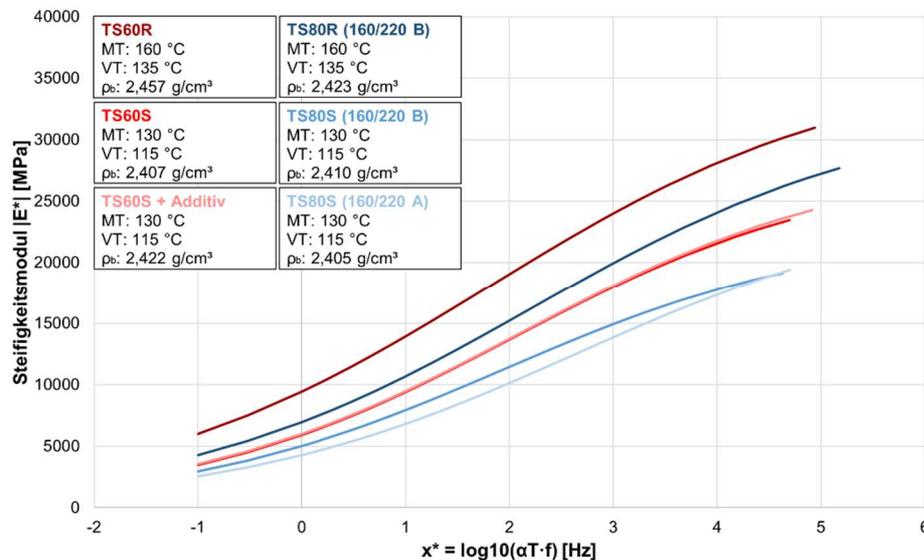
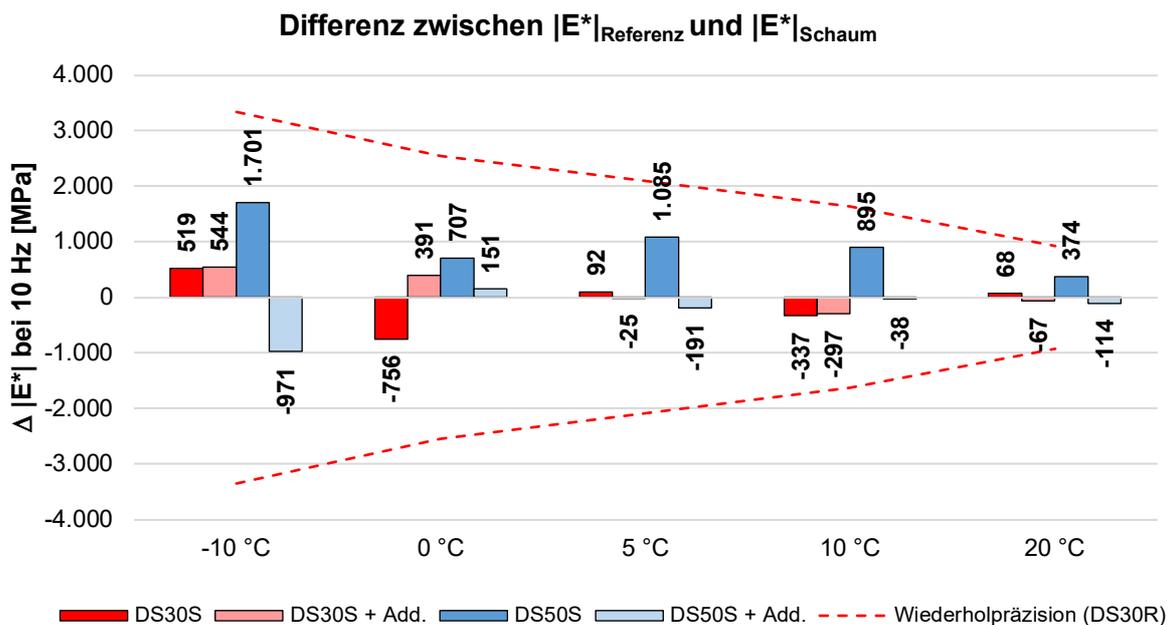


Abbildung 4-34: Masterkurven nach TP A-StB, Teil 26 – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% AG

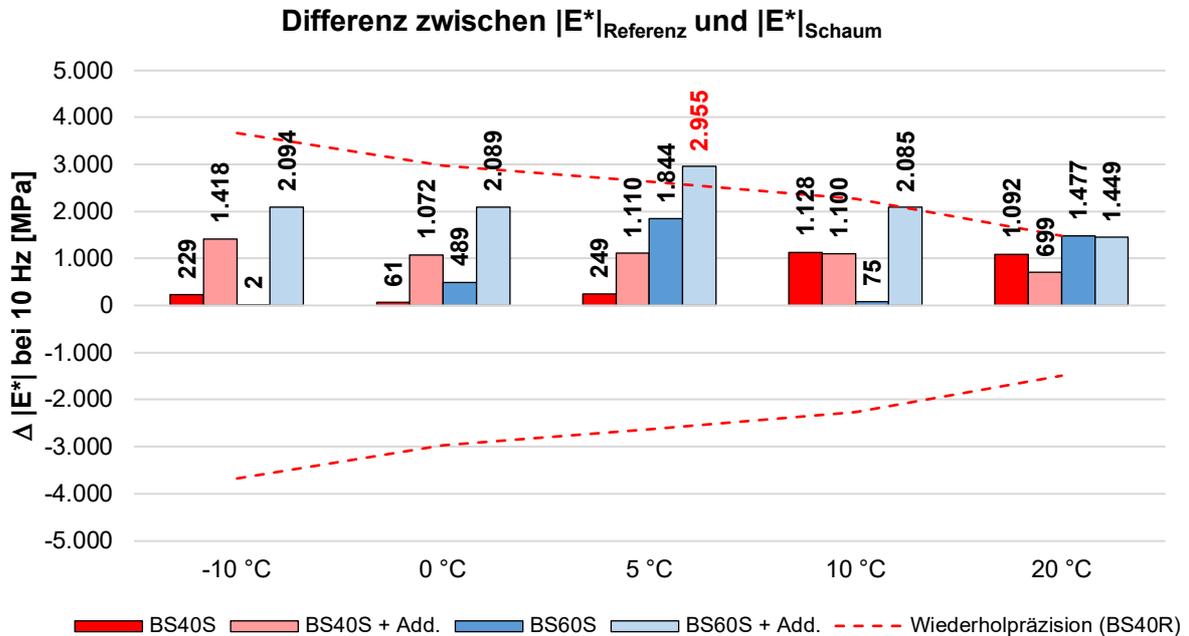
Wie anhand der in Abbildung 4-32 dargestellten Masterkurven der Asphaltdeckschicht zu erkennen ist, befinden sich die Steifigkeitsmoduln der temperaturabgesenkten Schaumbitumenvarianten auf dem gleichen Niveau wie die Steifigkeitsmoduln der Referenzmischgüter, die bei höherer Misch- und Verdichtungstemperatur hergestellt wurden. Das schaumstabilisierende Additiv hat dabei weder einen positiven noch einen negativen Einfluss auf die Steifigkeit. Für eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse wurden die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten und den Steifigkeitsmoduln der zugehörigen Schaumbitumenvarianten bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-35 dargestellt. Ein positives Vorzeichen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Steifigkeitsmodul der Referenzvariante auf einem höheren Niveau liegt als das Steifigkeitsmodul der Variante mit Schaumbitumen. Für Werte mit einem negativen Vorzeichen ergibt sich der gegenteilige Fall. Zur Beurteilung der Abweichungen wurde die Präzision des Verfahrens unter Wiederholbedingungen in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelt. Hierzu wurde die Standardabweichung (10,0 % des Mittelwertes des Steifigkeitsmoduls) mit dem Faktor 2,77 multipliziert. Dies wurde exemplarisch für die Referenzvariante DS30R durchgeführt. Wie anhand der Ergebnisse in Abbildung 4-35 zu erkennen ist, liegen die Abweichungen aller Schaumbitumenvarianten innerhalb der Wiederholpräzision der Variante DS30R. Die geringeren Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten können somit als nicht kritisch eingestuft werden.



**Abbildung 4-35: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat (Prüffrequenz 10 Hz)**

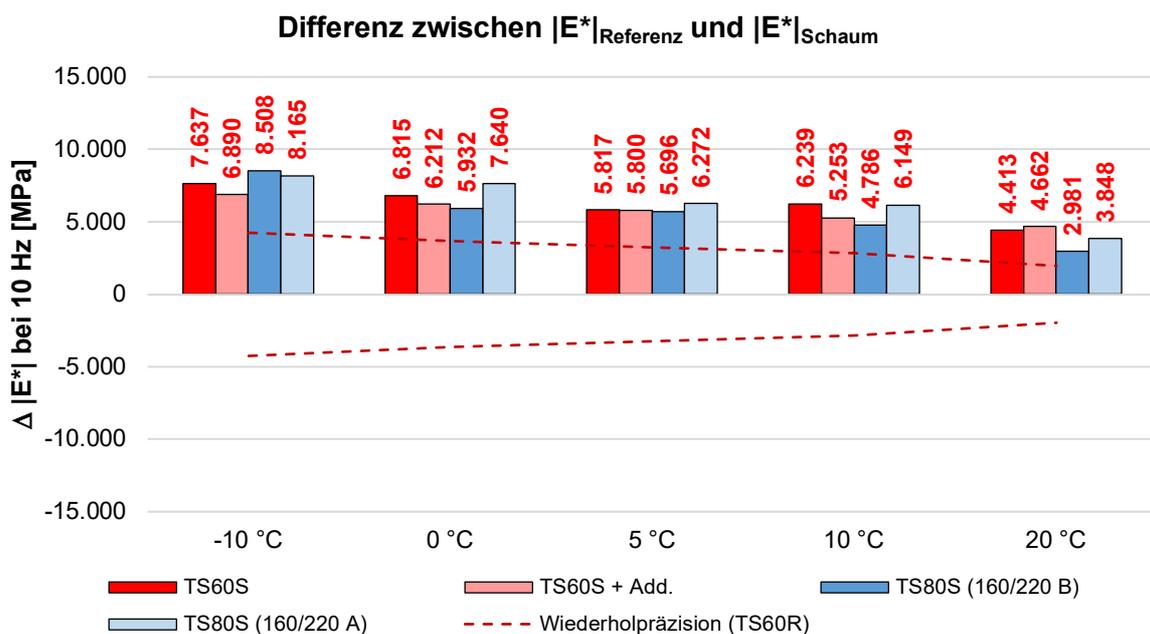
Für den Splittmastixasphaltbinder können größere Unterschiede in der Höhe der Steifigkeitsmoduln festgestellt werden. Wie anhand der Masterkurven in Abbildung 4-33 zu erkennen ist, liegen die Steifigkeitsmoduln der temperaturabgesenkten Schaumbitumenvarianten grundsätzlich unter den Steifigkeitsmoduln der bei höherer Misch- und Verdichtungstemperatur hergestellten Referenzvarianten. Diese Unterschiede können nicht mit einer geringeren Raumdichte erklärt werden, wie an den in Abbildung 4-33 aufgeführten Raumdichten (Mittelwert aus drei Ergebnissen) zu erkennen ist. Der Einfluss von im Mischgut verbleibender Feuchtigkeit aus dem Schaumbitumen (Schaumwasser) ist aufgrund des eher geringen Zugabebindemittelgehaltes unwahrscheinlich und wurde im Rahmen der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen

nicht nachgewiesen. Wie in Abbildung 4-36 zu erkennen ist, liegen die Abweichungen mit Ausnahme der Variante BS60S + Add. (bei 5 °C) innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision und können somit noch als nicht kritisch eingestuft werden. Dennoch ist auffällig, dass alle Schaumbitumenvarianten im Vergleich zu den Referenzvarianten einen niedrigeren Steifigkeitsmodul aufweisen.



**Abbildung 4-36: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmodul – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat (Prüffrequenz 10 Hz)**

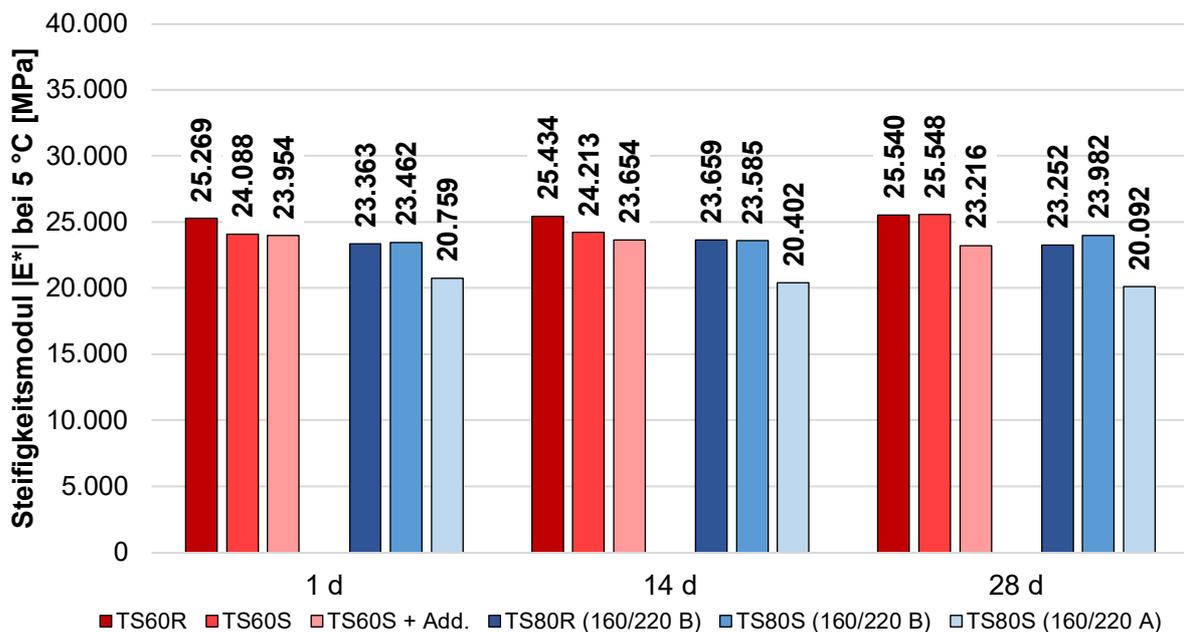
Noch größere Unterschiede in den Steifigkeitsmodul zeigen sich bei der Asphalttragschicht (siehe Abbildung 4-34). Hier liegen die Steifigkeitsmodul der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten deutlich unter den Steifigkeitsmodul der Referenzvarianten und somit auch nicht im Bereich der Wiederholpräzision (siehe Abbildung 4-38).



**Abbildung 4-37: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmodul – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat (Prüffrequenz 10 Hz)**

Eine mögliche Ursache für die geringeren Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten ist ein höherer Hohlraumgehalt. Bei der Variante mit 60 M.-% Asphaltgranulat sind Unterschiede ausgehend von den Mittelwerten der Raumdichten um bis zu 0,050 g/cm<sup>3</sup> zu erkennen (siehe Abbildung 4-34). Bei den Varianten mit 80 M.-% Asphaltgranulat sind es 0,018 g/cm<sup>3</sup>. Eine weitere Ursache für die geringeren Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten könnte die um 30 K reduzierte Mischtemperatur und eine daraus resultierende Doppelumhüllung oder unzureichende Homogenisierung des Asphaltgranulates sein. Diese Hypothese scheint im Hinblick auf die hohen Zugabemengen plausibel. Eine solche Tendenz sollte jedoch auch bei den Steifigkeitsmoduln der Gyrator-Probekörper, die im Zuge der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen bestimmt wurden, zu erkennen sein. Dem ist jedoch nicht so. Bei diesen liegen die Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten und der Schaumbitumenvarianten deutlich näher beieinander (siehe Abbildung 4-38) als bei den Bohrkernen der Asphalt-Probepplatten, obwohl diese unter gleichen Bedingungen (gleiche Mischzeit sowie Misch- und Verdichtungstemperaturen) wie die Asphalt-Probepplatten hergestellt wurden. Die Doppelumhüllung als Ursache für die geringeren Steifigkeitsmoduln scheint daher auch eher zweifelhaft. Auch der Einfluss von im Mischgut verbleibender Feuchtigkeit aus dem Schaumbitumen (Schaumwasser) ist aufgrund des sehr geringen Zugabebindemittelgehaltes von 1,5 M.-% und 1,0 M.-% unwahrscheinlich.

**AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat  
Prüffrequenz 10 Hz**



**Abbildung 4-38: An Gyrator-Probekörpern ermittelte Steifigkeitsmoduln – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat**

## 4.2 Großtechnische Erprobung an Asphaltmischanlagen

Zur Validierung der Erkenntnisse aus dem Labormaßstab wurden vergleichbare Asphaltmischgüter großtechnisch hergestellt und performanceorientiert geprüft. Die großtechnische Erprobung erfolgte an insgesamt drei Asphaltmischanlagen, welche jeweils mit einer Schaumbitumenanlage ausgestattet sind. Ziel dieses Arbeitspaketes war der Nachweis, dass die im Labormaßstab ermittelten Ergebnisse auch dann gültig sind, wenn das Schaumbitumenmischgut unter realen Produktionsbedingungen großtechnisch hergestellt wird.

### 4.2.1 Asphaltmischwerk C

Am Asphaltmischwerk C wurden Vorversuche mit einem Asphalttragschichtmischgut AC 32 T N mit 80 M.-% Asphaltgranulat durchgeführt. Ziel dieser Vorversuche war die Ermittlung einer optimalen Trockenmischzeit zur Sicherstellung eines Bindemittelüberganges zwischen dem Bindemittel des Asphaltgranulates und der frisch zugesetzten Gesteinskörnung. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Versuche fanden ohne Zugabe von Frischbindemittel statt, um den Effekt des Bindemittelüberganges visuell besser beurteilen zu können. Neben der Optimierung der Trockenmischzeit, war die Überprüfung der Möglichkeiten einer Absenkung der Asphaltmischguttemperatur ein weiteres Ziel dieser Voruntersuchungen. Aufgrund des hohen Zugabeanteiles an Asphaltgranulat konnte das angestrebte niedrige Temperaturniveau über die Temperatur der Weißmineraltrommel nicht erreicht werden. Eine Reduktion der Temperatur des Asphaltgranulates unterhalb von 150 °C ist aufgrund von möglichen Bindemittelanhaftungen in der Paralleltrommel ebenfalls nicht sinnvoll. Die Reduktion der Asphaltmischguttemperatur an der Asphaltmischanlage MW ließ sich bei diesen hohen Zugabemengen an Asphaltgranulat daher nur über eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe der Asphaltgranulate umsetzen. Die Ermittlung des optimalen Verhältnisses zwischen kaltem und warmen Asphaltgranulat bei gleichzeitiger Sicherstellung eines Bindemittelüberganges war daher das wesentliche Ziel dieser Vorversuche. Abbildung 4-39 zeigt drei Versuchsmischungen bestehend aus 80 M.-% Asphaltgranulat und 20 M.-% frischer Gesteinskörnung, gemischt mit unterschiedlich langen Trockenmischzeiten.

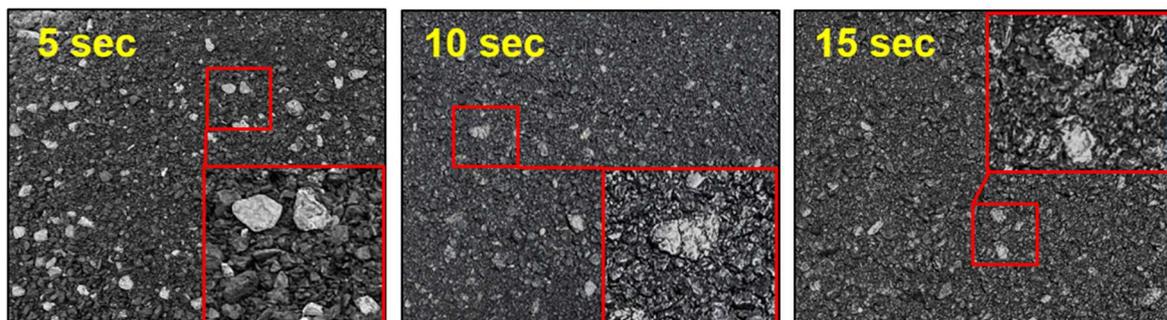


Abbildung 4-39: Ermittlung einer optimalen Trockenmischzeit – AC 32 T S mit 80 M.-% AG

Die Versuche haben gezeigt, dass eine Trockenmischzeit von 10 Sekunden ausreichend ist, um einen hinreichenden Bindemittelübergang zu erhalten. Eine Verlängerung der Trockenmischzeit oberhalb von 10 Sekunden brachte keine zusätzliche optisch erkennbare Verbesserung.

Zur Reduzierung der Asphaltmischguttemperatur wurden verschiedene Verhältnisse von kaltem und warmen Asphaltgranulat ausprobiert. Eine Versuchsmischung im Verhältnis 30 M.-% (kalt) zu 50 M.-% (warm) ergab eine resultierende Mischguttemperatur von 126 °C, wies jedoch keine ausreichende Homogenität auf. Erst die Erhöhung des warmen Anteils an Asphaltgranulat auf 60 M.-% (20 M.-% kalt) führte zu einer homogenen Asphaltmischung. Die resultierende Mischguttemperatur betrug dann 144 °C.

#### 4.2.2 Asphaltmischwerk A

Am Asphaltmischwerk A wurden zehn Asphalttragschichtvarianten AC 22 T S und zehn Splittmastixasphaltbinder-Varianten SMA 16 B S hergestellt. Die Herstellung erfolgte entsprechend Tabelle 4-21 mit jeweils zwei unterschiedlichen Anteilen an Asphaltgranulat bei konventionellen Temperaturen sowie temperaturabgesenkt. Ein Fokus wurde auch hier auf die Trockenmischzeit (TMZ) gelegt, welche mit 5 s und 10 s variiert wurde. Hintergrund dieser Überlegung ist, dass dem Bindemittel im Asphaltgranulat unterschiedliche Zeitspannen zum Übergang auf die frisch zugegebene Gesteinskörnungen gegeben werden sollte. Die Nachmischzeit blieb mit 20 s unverändert. Für die Herstellung der Asphalttragschicht kam ein Straßenbaubitumen 70/100 zum Einsatz. Die Herstellung des Splittmastixasphaltbinders erfolgte unter Verwendung eines polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A (RC).

**Tabelle 4-21: Mischgutvarianten (Asphaltmischwerk A)**

Variante	AG-Anteil [M.-%]	Zieltemperatur [°C]	IST-Temperatur [°C]	Trockenmischzeit [s]	Schaumbitumen	Bezeichnung
AC 22 T S	60	160	158	5	nein	TS60R
AC 22 T S	60	160	156	5	ja	SCH 1
AC 22 T S	60	160	158	10	ja	SCH 2
AC 22 T S	60	140	143	5	ja	SCH 5
AC 22 T S	60	140	141	10	ja	SCH 6
AC 22 T S	80	160	161	5	nein	TS80R
AC 22 T S	80	160	161	5	ja	SCH 3
AC 22 T S	80	160	156	10	ja	SCH 4
AC 22 T S	80	140	135	5	ja	SCH 7
AC 22 T S	80	140	134	10	ja	SCH 8
SMA 16 B S	40	160	161	5	nein	BS40R
SMA 16 B S	40	160	162	5	ja	SCH 1
SMA 16 B S	40	160	162	10	ja	SCH 2
SMA 16 B S	40	140	145	5	ja	SCH 5
SMA 16 B S	40	140	141	10	ja	SCH 6
SMA 16 B S	60	160	157	5	nein	BS60R
SMA 16 B S	60	160	162	5	ja	SCH 3
SMA 16 B S	60	160	158	10	ja	SCH 4
SMA 16 B S	60	140	151	5	ja	SCH 7
SMA 16 B S	60	140	152	10	ja	SCH 8

#### 4.2.3 Asphaltmischwerk A – Schaumbitumenherstellung

Die Herstellung der Schaumbitumen an der Asphaltmischanlage erfolgte mit der Schaumbitumenanlage der Firma Ammann. Für die Mischgutherstellung wurden die Bitumen 70/100 und 25/55-55 A (RC) bei einer Bitumentemperatur von ca. 170 °C (Anlieferungstemperatur), mit einem Wassergehalt von 3 % und einem Druck von 2,5 bar aufgeschäumt. Während der Mischgutherstellung wurden Schaumbitumenproben über die Entnahmeverrichtung entnommen und visuell begutachtet (siehe Abbildung 4-40). Die Expansion und Halbwertzeit beider Bitumen wurde auf Grundlage der visuellen Begutachtung auf 10fach (ER) und 5 bis 10 Sekunden (HWZ) geschätzt.



Abbildung 4-40: Entnahmevorrichtung und Schaumbitumenprobe (25/55-55 A (RC))

Die qualitative Bestimmung der Schaumbitumeneigenschaften der Bitumen 25/55-55 A (RC) und 70/100 wurde an der Ruhr-Universität Bochum unter Einsatz eines Laser-Entfernungsmessgerätes und der Labor-Schaumbitumenanlage von Wirtgen überprüft. Die Ermittlung der Expansionsrate und Halbwertzeit erfolgte bei einer Temperatur von 170 °C und einem Wassergehalt von 3 %. Die Ergebnisse (Expansionsrate und Halbwertzeit) der im Labor hergestellten Schaumbitumen sind in Abbildung 4-41 dargestellt.

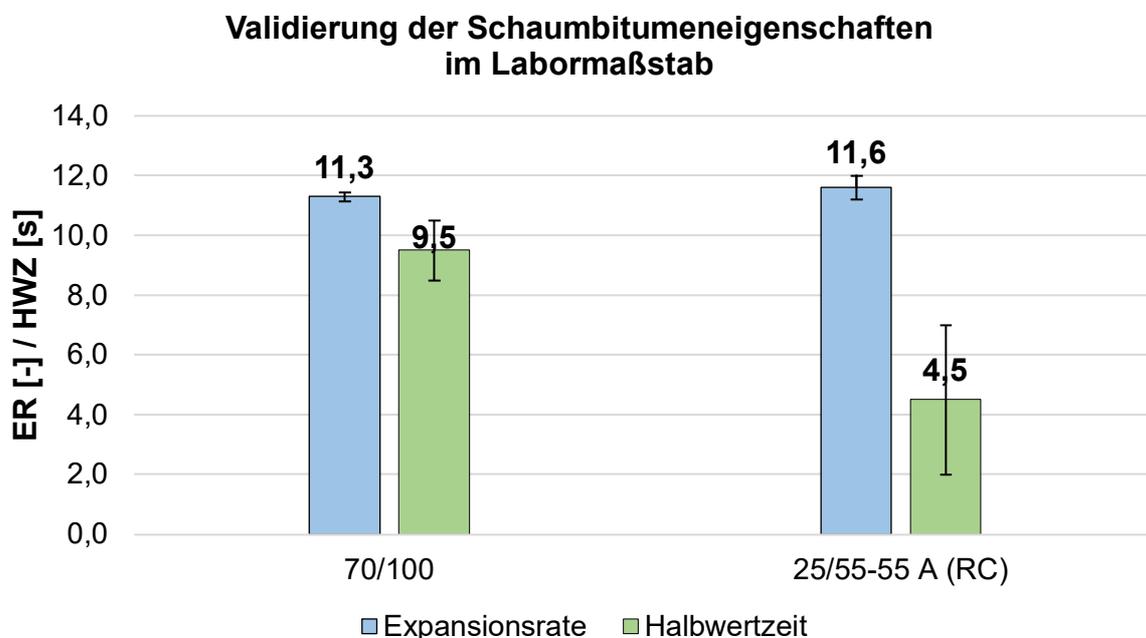


Abbildung 4-41: Expansionsrate und Halbwertzeit – 170 °C und Wassergehalt von 3 %

#### 4.2.4 Asphaltmischwerk A – Asphaltmischgutherstellung

Die Absenkung der Mischguttemperatur auf 140 °C wurde über eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe der Asphaltgranulate und über die Leistung des Brenners im Heißgaserzeuger umgesetzt. Die Steuerung der resultierenden Mischguttemperatur über die Temperatur des Weißminerals war insbesondere bei der Asphalttragschicht mit 80 M.-% Asphaltgranulat nur sehr eingeschränkt möglich. Die Zugabereihenfolge und die Verzögerungszeiten der einzelnen Komponenten wurden auf einen möglichst optimalen Bindemittelübergang in der Trockenmischphase optimiert. Eine augenscheinliche Beurteilung der hergestellten Mischgüter ergab bei allen Varianten eine gute Umhüllung der Körner sowie eine homogen erscheinende Verteilung des Bindemittels. Bei dem mit Schaumbitumen hergestelltem Asphaltmischgut waren weder Schaumblasen sichtbar noch verdampfende Wasseranteile hörbar. Abbildung 4-42 zeigt exemplarisch das mit und ohne Schaumbitumen hergestellte Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat. Abbildung 4-43 zeigt eine Auswahl von Asphaltbindervarianten kurz nach der Herstellung. Die unterschiedlichen Lichtverhältnisse der Aufnahmen sind zu beachten.

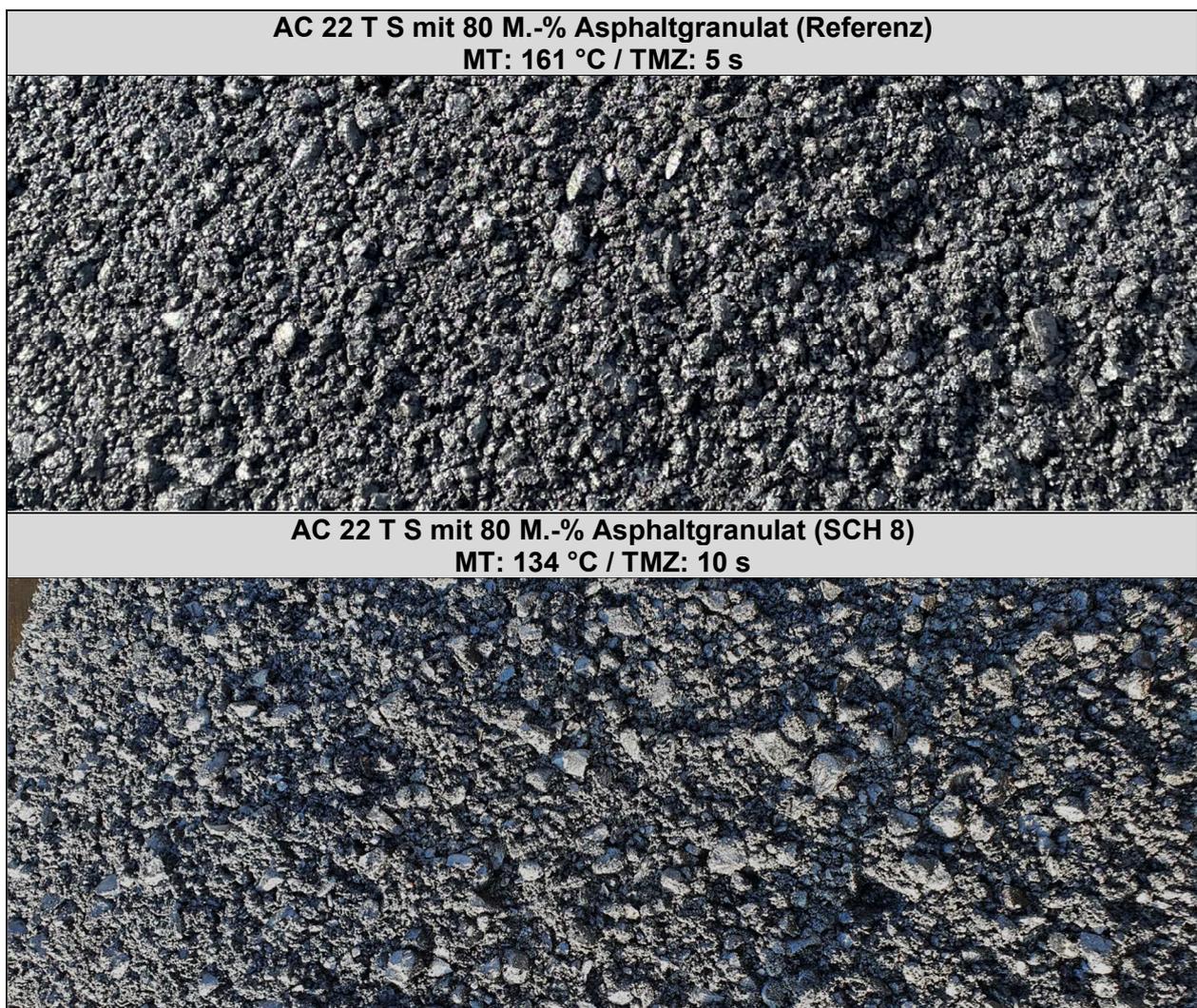


Abbildung 4-42: AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat



Abbildung 4-43: SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Aus dem Mischgut ausgewählter Varianten wurden Marshall-Probekörper (50 Schläge je Seite) unmittelbar nach der Mischgutproduktion, d. h. ohne Wiedererwärmung des Mischgutes, hergestellt. Die Verdichtungstemperatur der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten wurde im Vergleich zu den Varianten ohne Schaumbitumen um 10 K bis 20 K reduziert. Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45 beinhalten die an den Marshall-Probekörpern ermittelten Raumdichten.

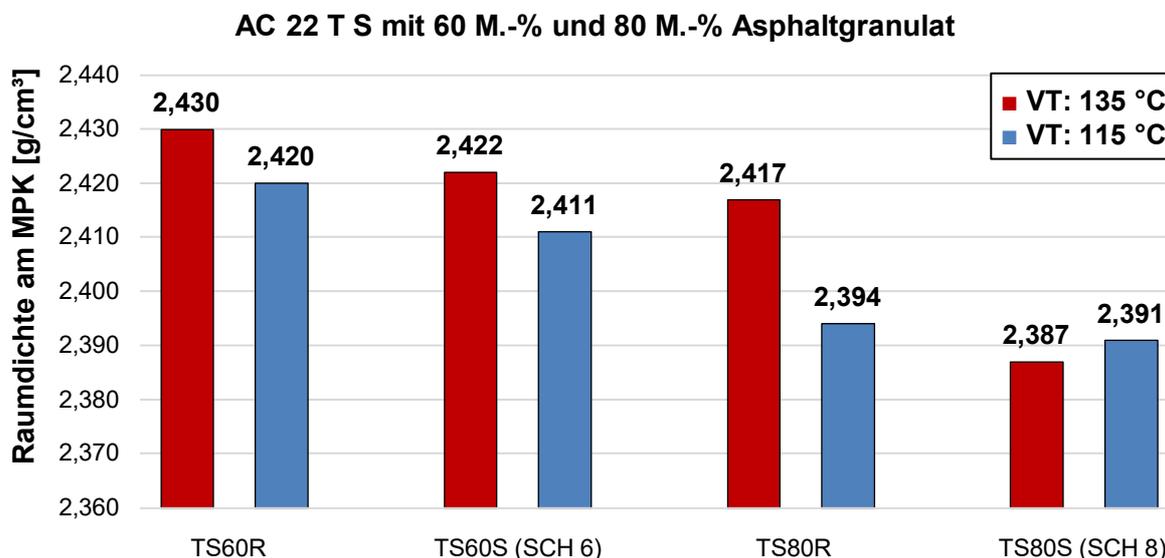


Abbildung 4-44: Raumdichten am MPK – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat

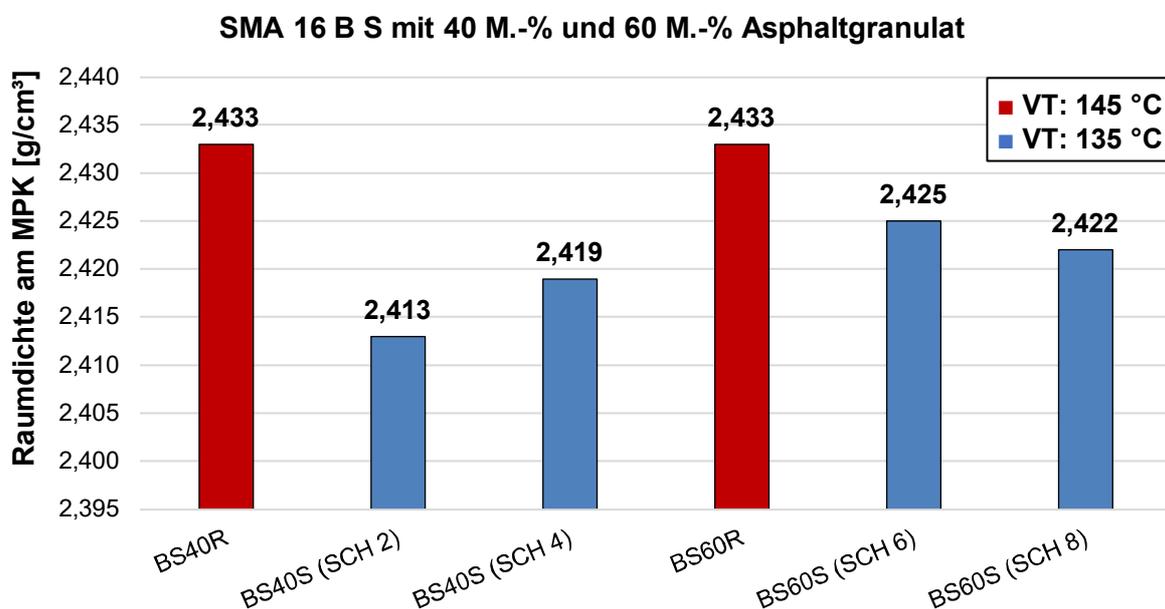


Abbildung 4-45: Raumdichten am MPK – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Bei der Asphalttragschicht können tendenziell niedrigere Raumdichten mit höherem Anteil an Asphaltgranulat sowie abnehmender Misch- und Verdichtungstemperatur festgestellt werden (siehe Abbildung 4-44). Auch beim Splittmastixasphaltbinder nimmt die Raumdichte mit abnehmender Temperatur ab (siehe in Abbildung 4-45). Im Kontext der großtechnischen Herstellung befinden sich die Raumdichten insgesamt auf einem ähnlichen Niveau.

#### 4.2.5 Asphaltmischwerk A – Asphaltuntersuchungen an der RUB

Die Untersuchung der Performanceeigenschaften erfolgte an der Ruhr-Universität Bochum. Hierzu wurden Mischgutproben in Eimer abgefüllt und möglichst luftdicht verpackt, um ein Entweichen von möglicher Restfeuchtigkeit (Asphaltgranulat und/oder Schaumbitumen) zu minimieren und eine eventuell noch vorhandene Wirkung des Schaumbitumens zu konservieren. Das Asphaltmischgut wurde an der RUB wiedererwärmt und zu Asphalt-Probepplatten verdichtet. Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten ohne wiedererwärmen des Schaumbitumenmischgutes war aufgrund der großen Distanz zwischen Asphaltmischanlage und RUB nicht möglich. Allerdings konnten vier ausgewählte Asphalttragschichtvarianten (vgl. Tabelle 4-22) zeitnah nach der Herstellung, d. h. ohne Wiedererwärmung des Asphaltmischgutes, am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) zu Asphalt-Probepplatten verdichtet werden. Wir bedanken uns an dieser Stelle für die Unterstützung. Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten erfolgte unabhängig davon, ob das Asphaltmischgut wiedererwärmt wurde oder nicht, bei den in der TP Asphalt-StB, Teil 33 genannten Verdichtungstemperaturen ( $135 \pm 5 \text{ °C}$  und  $145 \pm 5 \text{ °C}$ ). Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten bei reduzierten Verdichtungstemperaturen (wie im Labormaßstab) wurde wegen der Thematik der Wiedererwärmung des Schaumbitumenmischgutes hier als nicht zielführend erachtet.

**Tabelle 4-22: Ohne wiedererwärmen des Mischgutes hergestellte Asphalt-Probepplatten am KIT**

Variante	AG-Anteil [M.-%]	Zieltemperatur [°C]	IST-Temperatur [°C]	Trockenmischzeit [s]	Schaumbitumen	Bezeichnung
AC 22 T S	60	160	156	5	ja	SCH 1
AC 22 T S	60	140	143	5	ja	SCH 5
AC 22 T S	80	160	156	10	ja	SCH 4
AC 22 T S	80	140	134	10	ja	SCH 8

Abbildung 4-46 zeigt die Asphaltmischgutproben (rechts) und die am KIT hergestellten Asphalt-Probepplatten (links).



**Abbildung 4-46: Asphalt-Probepplatten (links) und Mischguteimer (rechts)**

**Umhüllung**

Neben der Untersuchung der Asphaltperformance, wurde die Umhüllung einiger ausgewählter Varianten näher betrachtet. Hierzu wurde eine Mischgutprobe von ca. 3 kg aus einem erwärmten Mischguteimer entnommen und vorsichtig aufgelockert. Aus dieser Probe wurde eine repräsentative Anzahl an groben Gesteinskörnern ausgewählt und bei möglichst einheitlichen Lichtverhältnissen fotografiert. In Abbildung 4-47 sind einige grobe Gesteinskörner des Splittmastixasphaltbinders mit 60 M.-% Asphaltgranulat dargestellt.

<p><b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (Referenz)</b>  <b>MT: 157 °C / TMZ: 5 s</b></p>	<p><b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (SCH 3)</b>  <b>MT: 162 °C / TMZ: 5 s</b></p>
	
<p><b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (SCH 4)</b>  <b>MT: 158 °C / TMZ: 10 s</b></p>	<p><b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (SCH 7)</b>  <b>MT: 151 °C / TMZ: 5 s</b></p>
	
<p><b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (SCH 8)</b>  <b>MT: 152 °C / TMZ: 10 s</b></p>	
	

Abbildung 4-47: Dokumentation der Umhüllung – SMA 16 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

Wie in Abbildung 4-47 zu erkennen ist, sind alle Gesteinskörner vollständig mit Bindemittel umhüllt. An allen Gesteinskörnern können Anhaftungen von Feinanteilen identifiziert werden. Die Variante SCH 7 weist vereinzelt Steine mit vergleichsweise wenigen Feinanteilen auf. Die Gesteinskörner der restlichen Schaumbitumenvarianten wirken im Vergleich zur Referenzvariante feinteilreicher.

In Abbildung 4-48 sind einige grobe Gesteinskörner der Asphalttragschicht mit 60 M.-% und 80 M.-% Asphaltgranulat dargestellt.

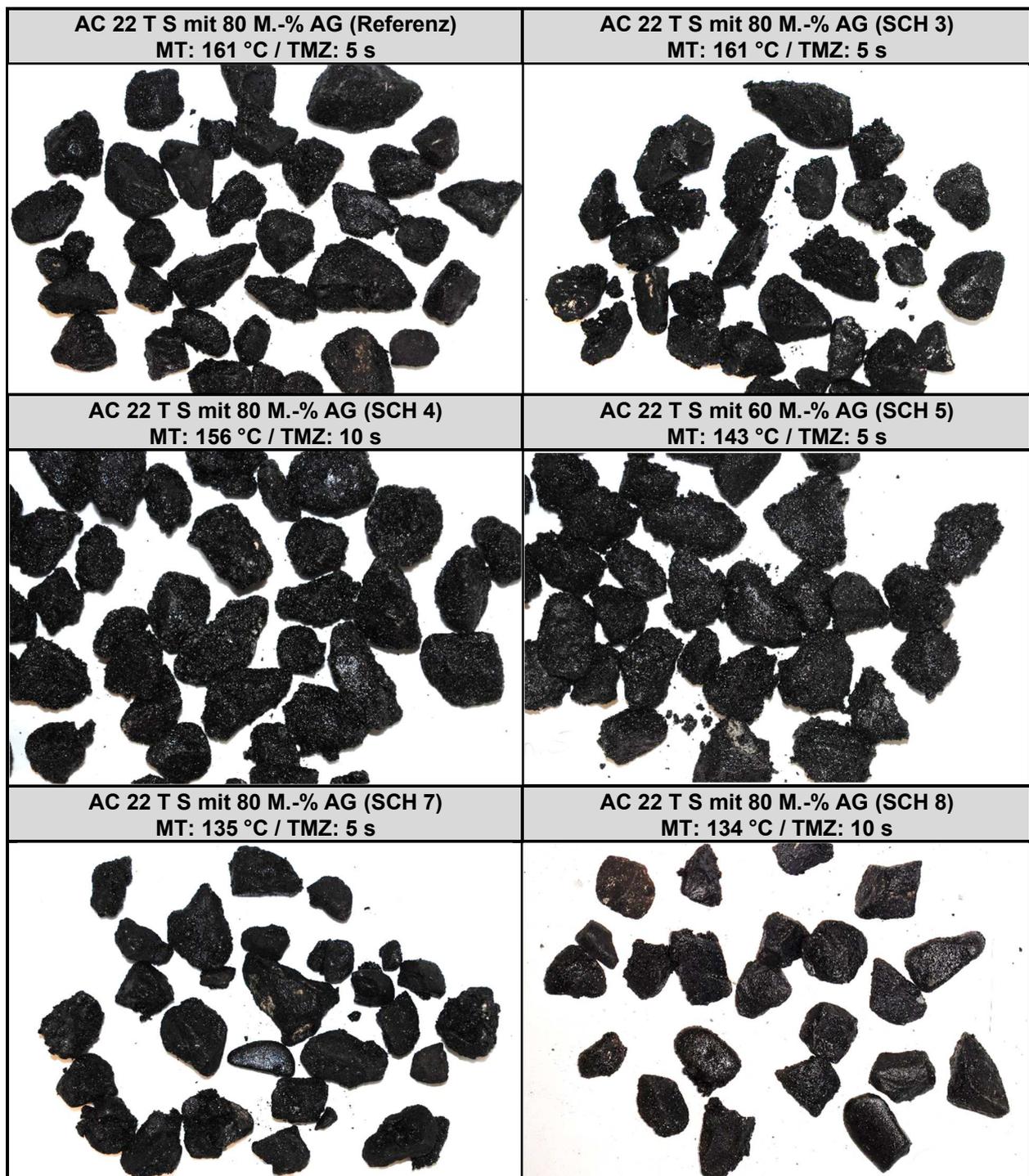


Abbildung 4-48: Dokumentation der Umhüllung – AC 22 T S mit 60 M.-% und 80 M.-% AG

Bei der Asphalttragschicht ist die überwiegende Mehrheit der Gesteinskörner vollständig mit Bindemittel umhüllt (vgl. Abbildung 4-48). Optisch auffällig sind die Varianten SCH 4 und SCH 5, wegen der im Vergleich zu den anderen Varianten höheren Menge an feinen Gesteinskörnern. Bei der Variante SCH 5 (60 M.-% Asphaltgranulat) ist dies möglicherweise auf die höhere Zugabemenge des frischen Bindemittels zurückzuführen. Bei der Variante SCH 4 könnte die längere Trockenmischzeit eine Rolle spielen.

**Verformungsverhalten bei Wärme**

In Abbildung 4-49 und Abbildung 4-50 sind die mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven der Asphaltbinderschichtvarianten mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat dargestellt.

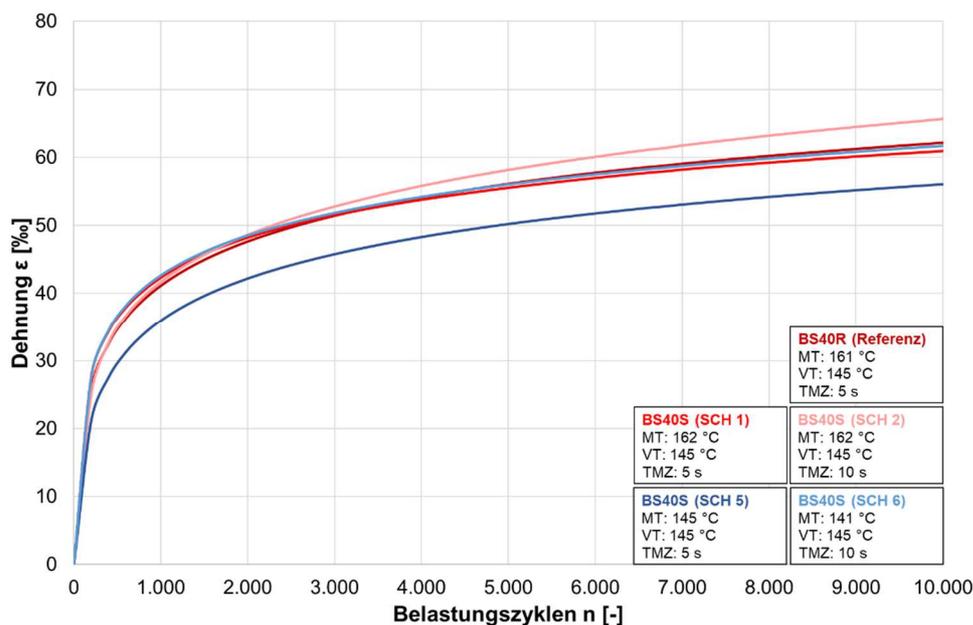


Abbildung 4-49: Impulskriechkurven SMA 16 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat

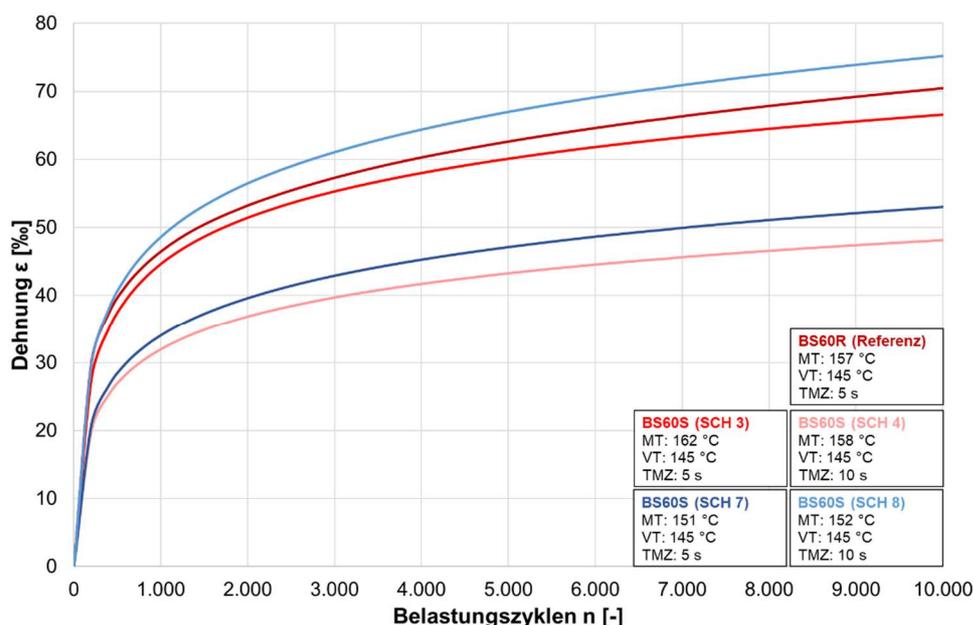
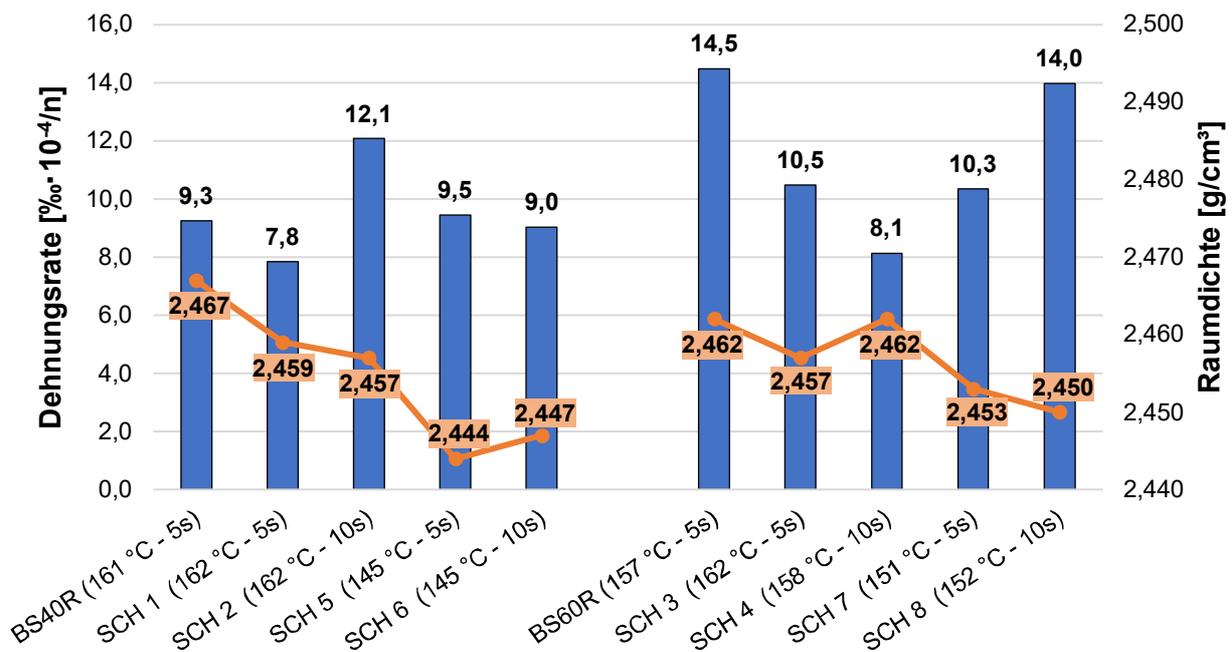


Abbildung 4-50: Impulskriechkurven SMA 16 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

Wie in Abbildung 4-49 zu erkennen ist, liegen die Dehnungen nach 10.000 Belastungszyklen bei den Varianten mit 40 M.-% Asphaltgranulat auf einem vergleichbaren Niveau. Bei den Varianten mit 60 M.-% Asphaltgranulat können größere Unterschiede zwischen den Dehnungen der verschiedenen Varianten festgestellt werden (siehe Abbildung 4-50). Ein negativer Einfluss durch Schaumbitumen oder die Temperaturabsenkung kann aus den in Abbildung 4-50 dargestellten Impulskriechkurven allerdings nicht abgeleitet werden. Dies bestätigen auch die zwischen den Belastungszyklen 9.800 und 10.000 ermittelten Dehnungsraten (siehe Abbildung 4-51).



**Abbildung 4-51: Dehnungsraten und Raumdichten – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG**

Wie in Abbildung 4-51 zu erkennen ist, liegen die Dehnungsraten der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten – davon ausgenommen ist die Variante SCH 2 – unter der Dehnungsrate der jeweiligen Referenzvariante. Die Raumdichten der Bohrkerns zeigen eine Reduktion mit abnehmender Produktionstemperatur, was allerdings keine erkennbare Auswirkung auf die Dehnungsrate zu haben scheint (siehe Abbildung 4-51). Die hier dargestellten Resultate lassen keinen Rückschluss auf einen reduzierten Verformungswiderstand der Schaumbitumenvarianten zu. Ein positiver Einfluss einer längeren Trockenmischzeit auf das Verformungsverhalten ist an den hier dargestellten Ergebnissen ebenfalls nicht zu erkennen.

### Asphaltsteifigkeit

Die Tabelle 4-23 bis Tabelle 4-26 beinhalten die Steifigkeitsmoduln der aus den Asphalt-Probplatten entnommenen Bohrkerns des Splittmastixasphaltbinders SMA 16 B S und Asphalt-tragschicht AC 22 T S. In Abbildung 4-52 bis Abbildung 4-55 sind die Steifigkeitsmoduln bei einer Prüffrequenz von 10 Hz gegenübergestellt. Abbildung 4-56 bis Abbildung 4-59 beinhalten die nach TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelten Masterkurven.

Tabelle 4-23: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 40 M.-% AG

Prüf-temperatur	Prüffre- quenz	BS40R Referenz MT: 161 °C TMZ: 5 s	BS40S SCH 1 MT: 162 °C TMZ: 5 s	BS40S SCH 2 MT: 162 °C TMZ: 10 s	BS40S SCH 5 MT: 145 °C TMZ: 5 s	BS40S SCH 6 MT: 141 °C TMZ: 10 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	18.561	19.645	19.255	20.472	17.514
-10	0,3	19.628	20.979	20.722	21.719	18.863
-10	1	21.143	22.614	22.054	23.212	20.697
-10	3	22.286	24.099	23.328	24.999	21.720
-10	5	22.444	25.097	23.791	25.204	22.140
-10	10	23.872	25.752	24.183	25.778	22.790
0	0,1	10.369	12.502	11.864	12.737	11.313
0	0,3	11.993	14.537	13.845	14.816	13.427
0	1	13.658	17.267	15.902	17.083	15.550
0	3	15.281	19.563	17.674	18.898	17.162
0	5	16.032	20.490	18.410	19.905	18.100
0	10	18.064	21.395	19.244	20.686	19.241
5	0,1	8.358	8.565	8.362	7.709	7.370
5	0,3	10.177	10.539	10.093	9.519	8.852
5	1	12.235	12.774	12.157	11.667	10.555
5	3	14.536	15.034	13.784	13.392	11.952
5	5	15.534	16.104	15.076	14.393	13.080
5	10	16.757	17.497	16.154	15.966	13.964
10	0,1	5.985	5.975	7.047	6.437	5.451
10	0,3	7.636	7.423	8.900	8.153	7.036
10	1	9.575	9.160	11.114	10.299	8.954
10	3	11.321	10.763	13.321	12.261	10.674
10	5	12.509	11.951	14.299	13.046	11.804
10	10	14.339	13.013	15.486	14.691	13.006
20	0,1	2.294	2.287	2.771	2.642	2.314
20	0,3	3.129	3.145	3.720	3.627	3.155
20	1	3.770	4.118	5.055	5.014	4.336
20	3	4.851	5.029	6.399	6.531	5.674
20	5	5.393	5.723	7.006	7.203	6.345
20	10	5.930	6.502	7.542	7.961	7.361

SMA 16 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat

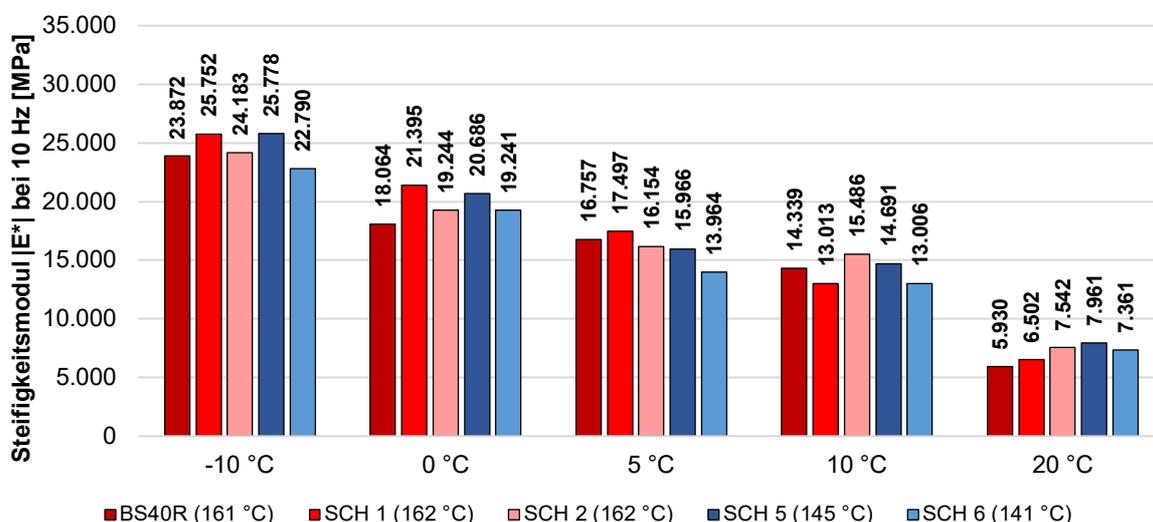


Abbildung 4-52: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat

Tabelle 4-24: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 60 M.-% AG

Prüf-temperatur	Prüffre- quenz	BS60R Referenz MT: 157 °C TMZ: 5 s	BS60S SCH 3 MT: 162 °C TMZ: 5 s	BS60S SCH 4 MT: 158 °C TMZ: 10 s	BS60S SCH 7 MT: 151 °C TMZ: 5 s	BS60S SCH 8 MT: 152 °C TMZ: 10 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	21.189	20.014	22.213	20.145	19.027
-10	0,3	22.526	21.132	22.295	20.955	20.457
-10	1	24.270	22.870	23.665	22.367	21.970
-10	3	25.510	24.295	25.023	23.265	23.096
-10	5	26.135	24.975	25.693	23.960	24.107
-10	10	26.894	25.787	26.210	24.341	24.433
0	0,1	11.018	11.495	9.748	13.694	11.661
0	0,3	12.495	12.933	11.691	14.983	13.661
0	1	13.850	14.599	14.126	16.332	15.730
0	3	15.348	15.893	16.084	17.565	17.093
0	5	15.669	16.744	17.061	18.368	17.940
0	10	17.248	17.585	19.016	18.909	18.848
5	0,1	8.245	9.428	12.148	10.739	8.712
5	0,3	10.052	11.587	13.577	12.481	10.498
5	1	11.978	13.944	15.113	14.439	12.604
5	3	13.731	16.205	16.465	16.534	14.612
5	5	14.697	17.465	17.204	17.478	15.971
5	10	15.423	18.135	17.922	18.592	17.160
10	0,1	6.125	5.949	7.533	8.077	5.650
10	0,3	7.795	7.394	9.375	9.998	7.258
10	1	9.760	8.923	11.593	12.492	9.223
10	3	11.649	10.161	13.812	14.699	11.183
10	5	12.601	10.771	14.550	15.864	12.294
10	10	13.776	11.594	15.712	18.451	13.915
20	0,1	1.968	2.612	3.442	4.139	3.000
20	0,3	3.133	3.524	4.678	5.264	4.056
20	1	4.366	4.657	6.274	6.755	5.517
20	3	5.734	5.739	8.060	8.443	6.979
20	5	6.654	6.432	8.968	9.498	7.602
20	10	8.127	7.540	9.661	10.818	8.363

SMA 16 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

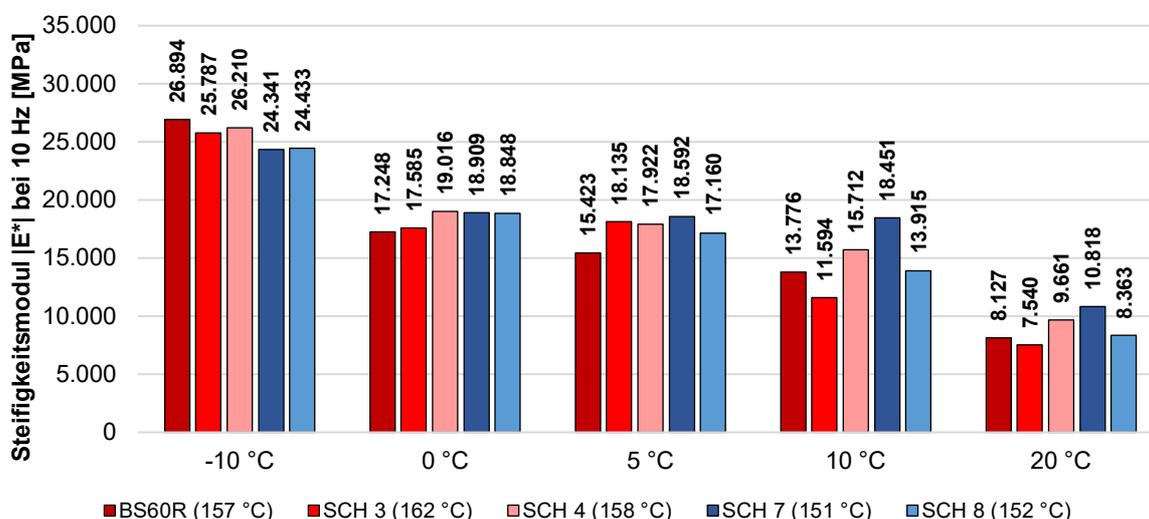


Abbildung 4-53: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

Tabelle 4-25: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 22 T S mit 60 M.-% AG

Prüf-temperatur	Prüf-fre-quenz	TS60R Referenz MT: 158 °C TMZ: 5 s	TS60S SCH 1 MT: 156 °C TMZ: 5 s	TS60S SCH 2 MT: 158 °C TMZ: 10 s	TS60S SCH 5 MT: 143 °C TMZ: 5 s	TS60S SCH 6 MT: 141 °C TMZ: 10 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	26.342	23.058	22.942	24.621	26.270
-10	0,3	28.128	24.493	24.369	26.367	27.959
-10	1	29.895	26.266	26.075	28.305	29.940
-10	3	31.219	27.542	27.500	29.608	31.199
-10	5	31.769	27.875	28.037	29.787	31.851
-10	10	32.924	29.379	30.357	30.365	32.799
0	0,1	18.053	15.877	16.323	18.038	18.712
0	0,3	20.402	18.034	18.590	20.474	21.137
0	1	23.062	20.516	20.958	22.780	23.470
0	3	25.265	22.652	23.058	25.137	25.973
0	5	26.194	23.177	24.217	26.049	26.616
0	10	27.680	24.544	25.453	27.879	28.222
5	0,1	13.682	12.026	12.416	13.184	14.707
5	0,3	16.403	14.275	14.892	16.054	17.321
5	1	19.341	16.920	17.551	18.825	20.165
5	3	21.986	19.483	19.860	21.376	22.335
5	5	23.296	20.488	21.046	22.747	23.542
5	10	24.758	22.011	22.464	24.112	25.133
10	0,1	9.549	9.479	8.823	9.929	10.349
10	0,3	12.217	11.949	10.944	12.435	12.851
10	1	15.013	14.339	13.785	15.453	15.568
10	3	17.869	17.008	16.319	18.083	18.589
10	5	19.171	18.477	17.847	19.530	20.079
10	10	21.283	20.101	19.653	21.487	21.526
20	0,1	4.415	4.475	4.167	4.588	4.743
20	0,3	6.205	6.107	5.729	6.372	6.640
20	1	8.639	8.231	7.780	8.635	8.991
20	3	11.330	10.707	10.076	11.199	11.717
20	5	12.721	11.949	11.665	12.822	13.095
20	10	14.347	13.368	13.187	14.685	15.346

AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

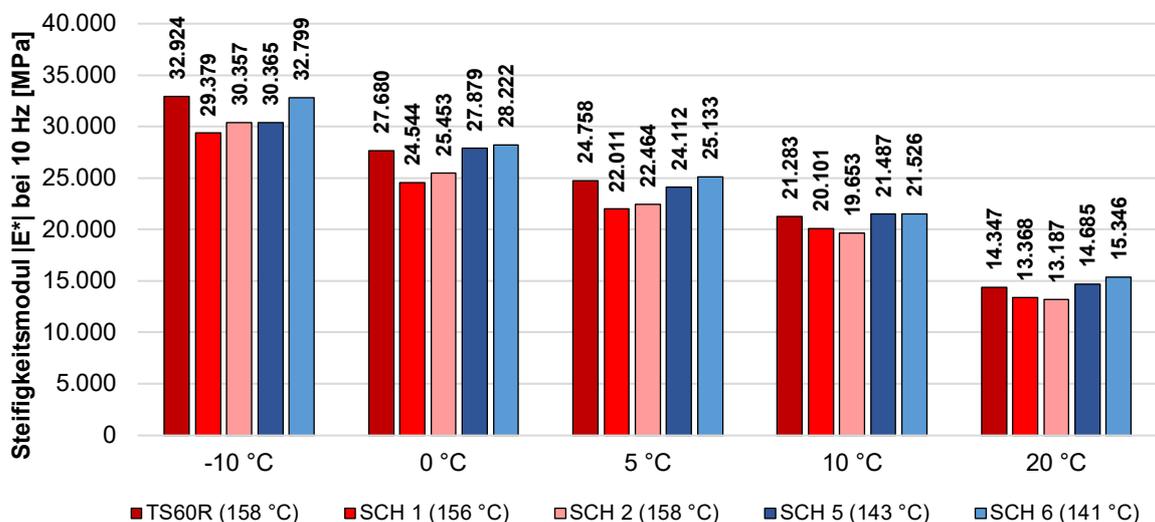


Abbildung 4-54: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

Tabelle 4-26: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 22 T S mit 80 M.-% AG

Prüf-temperatur	Prüf-fre-quenz	TS80R Referenz MT: 161 °C TMZ: 5 s	TS80S SCH 3 MT: 161 °C TMZ: 5 s	TS80S SCH 4 MT: 156 °C TMZ: 10 s	TS80S SCH 7 MT: 135 °C TMZ: 5 s	TS80S SCH 8 MT: 134 °C TMZ: 10 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	26.644	20.912	21.991	24.858	23.614
-10	0,3	28.269	21.842	23.408	26.192	24.908
-10	1	29.951	23.235	25.141	27.993	26.724
-10	3	31.064	24.097	26.382	29.222	28.264
-10	5	31.491	24.931	26.939	29.759	28.834
-10	10	32.826	25.262	27.809	31.766	29.610
0	0,1	19.904	14.577	16.609	17.990	18.321
0	0,3	22.125	16.149	18.902	20.062	20.421
0	1	24.570	18.209	20.668	22.325	22.462
0	3	26.647	19.541	22.615	24.048	24.484
0	5	27.684	20.478	23.476	25.022	25.367
0	10	29.270	21.518	24.462	26.314	27.004
5	0,1	15.694	12.479	13.473	13.615	13.944
5	0,3	18.496	14.195	15.565	15.738	16.273
5	1	21.187	16.169	17.913	18.366	18.791
5	3	23.551	18.296	20.048	20.731	21.267
5	5	24.506	19.065	21.011	21.572	22.070
5	10	25.977	20.001	22.494	22.787	23.474
10	0,1	11.782	9078	11.335	10.500	10.801
10	0,3	14.392	10.839	13.472	12.850	13.225
10	1	17.111	13.022	15.889	15.390	15.784
10	3	20.111	15.073	18.181	17.649	18.366
10	5	21.340	15.848	19.229	19.178	19.591
10	10	22.890	17.388	20.654	20.741	21.192
20	0,1	5.826	5.045	5.491	5.285	5.594
20	0,3	7.726	6.623	7.128	6.927	7.323
20	1	10.280	8.379	9.200	9.056	9.645
20	3	12.969	10.387	11.508	11.579	12.209
20	5	14.343	11.564	12.505	12.725	13.504
20	10	16.110	13.044	14.101	14.571	15.090

AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat

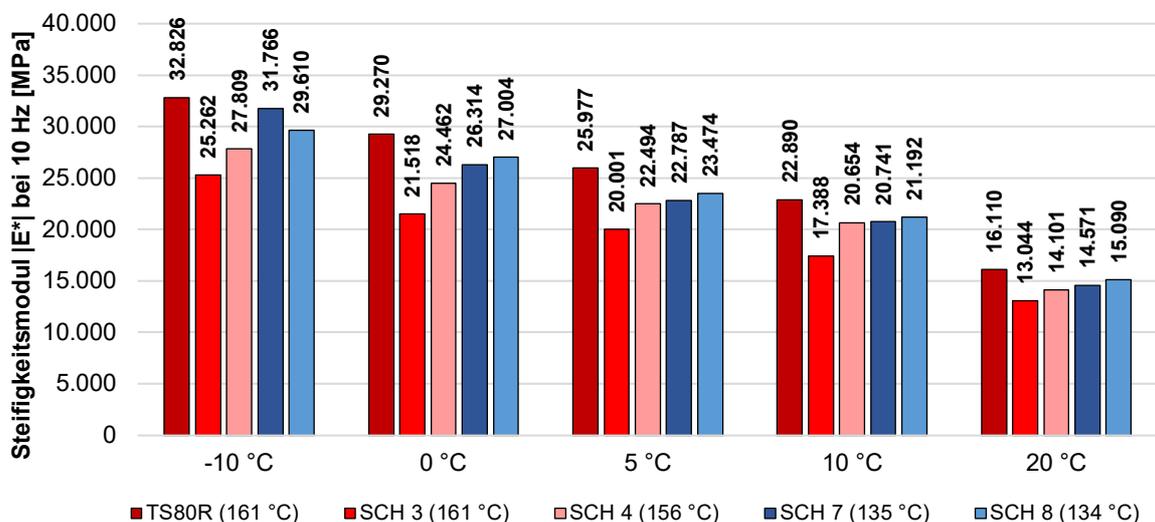


Abbildung 4-55: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat

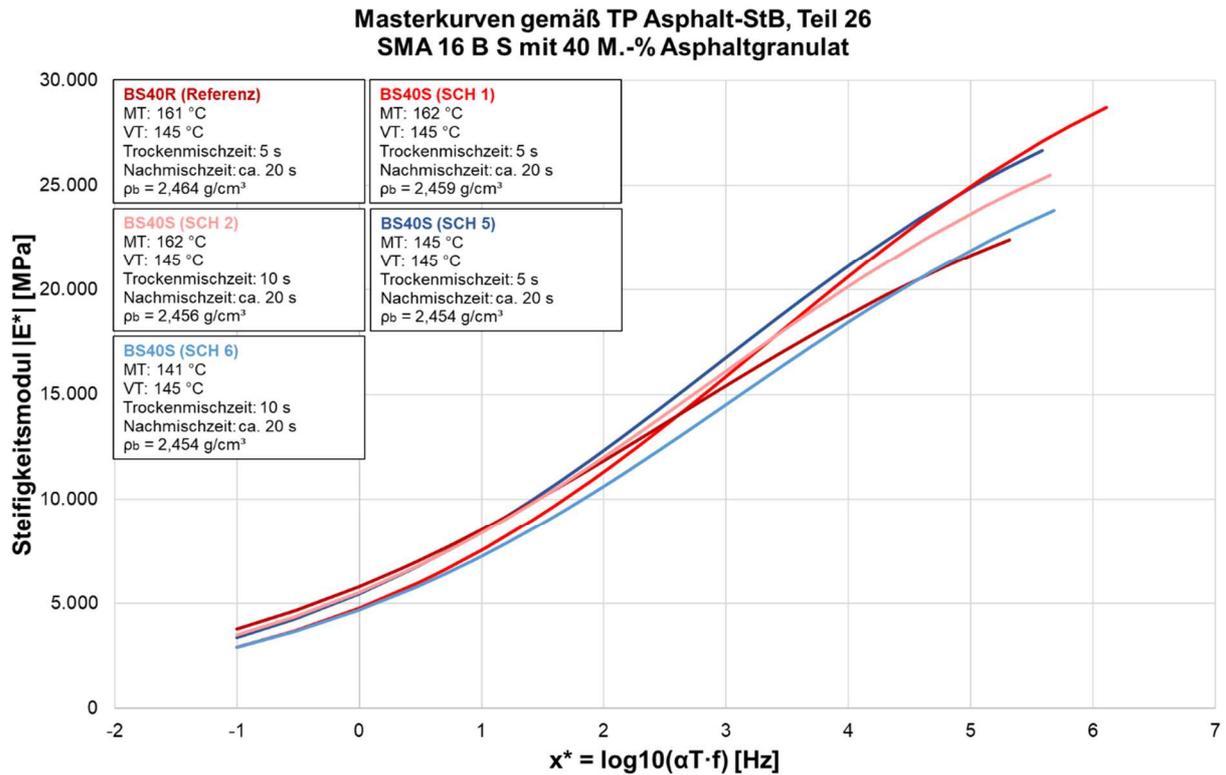


Abbildung 4-56: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S mit 40 M.-% AG

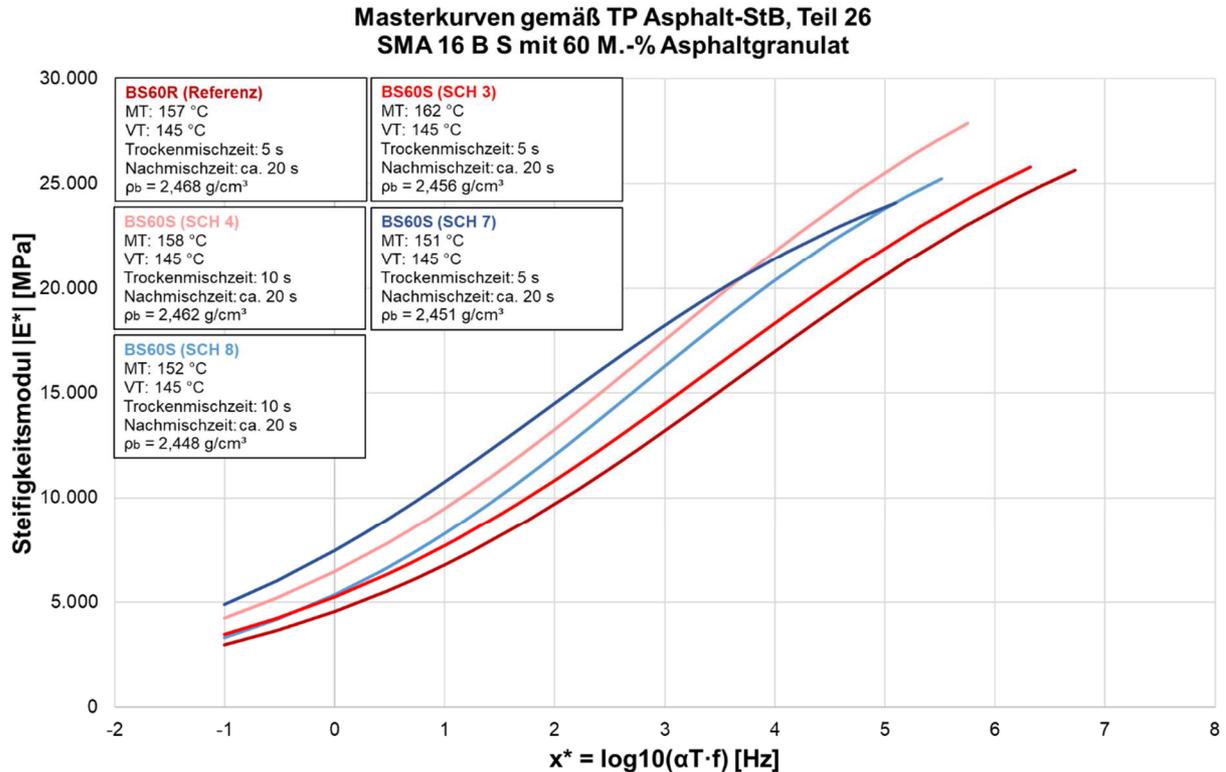


Abbildung 4-57: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S mit 60 M.-% AG

**Masterkurven gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26  
AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat**

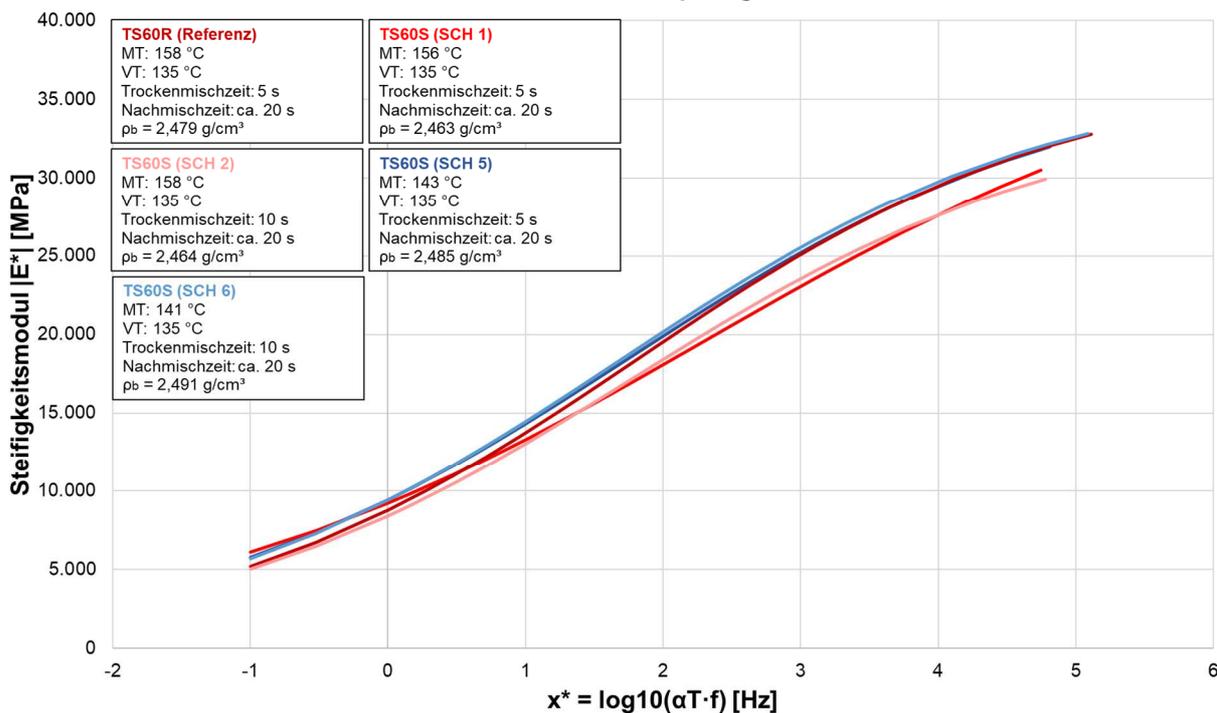


Abbildung 4-58: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 22 T S mit 60 M.-% AG

**Masterkurven gemäß TP Asphalt-StB, Teil 26  
AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat**

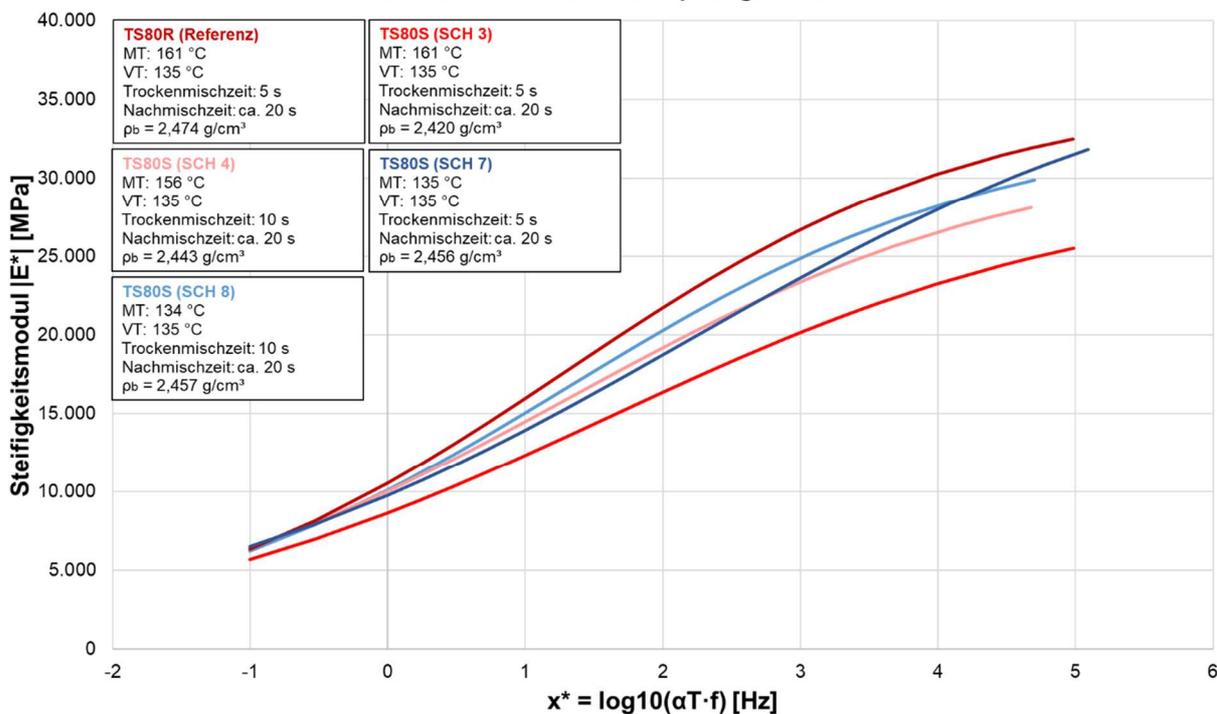


Abbildung 4-59: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 22 T S mit 80 M.-% AG

Für eine differenziertere Betrachtung der Ergebnisse wurden die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten und den Steifigkeitsmoduln der Varianten mit Schaumbitumen bei einer Prüffrequenz von 10 Hz ermittelt. Ein positives Vorzeichen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Steifigkeitsmodul der Referenzvariante auf einem höheren Niveau liegt als das Steifigkeitsmodul der Variante mit Schaumbitumen. Für Werte mit einem negativen Vorzeichen ergibt sich der gegenteilige Fall. Zur Beurteilung dieser Abweichungen wurde die Präzision des Verfahrens unter Wiederholbedingungen in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelt. Hierzu wurde die Standardabweichung (10,0 % des Mittelwertes des Steifigkeitsmoduls) mit dem Faktor 2,77 multipliziert. Dies wurde für die Referenzvarianten BS40R, BS60R, TS60R und TS80R durchgeführt. Abbildung 4-60 und Abbildung 4-61 beinhalten die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvarianten des Splittmastixasphaltbinders SMA 16 B S bei 10 Hz.

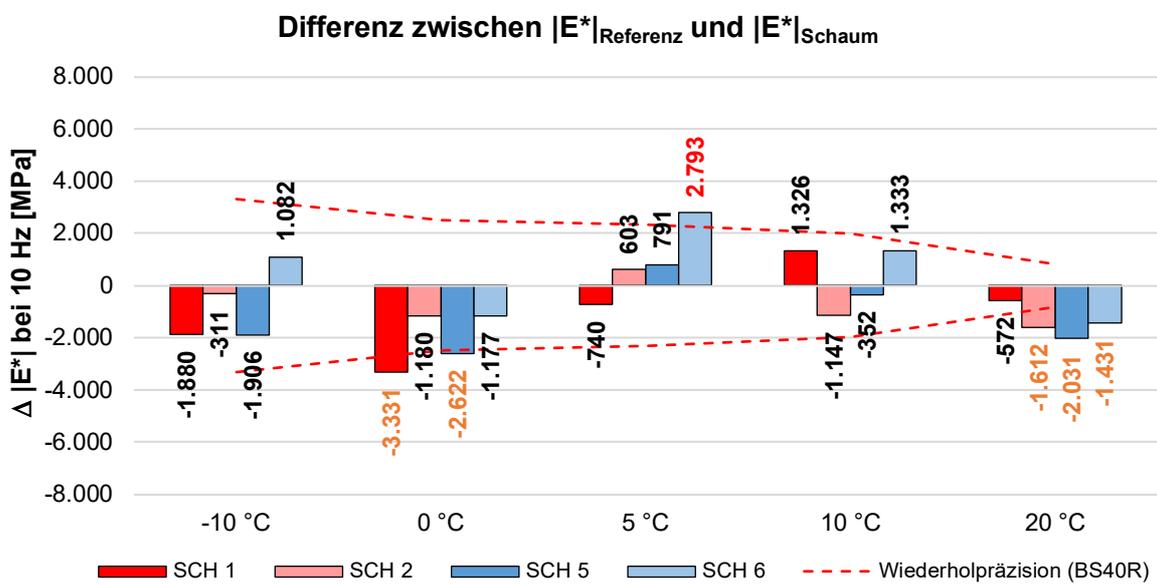


Abbildung 4-60: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – SMA 16 B S mit 40 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)

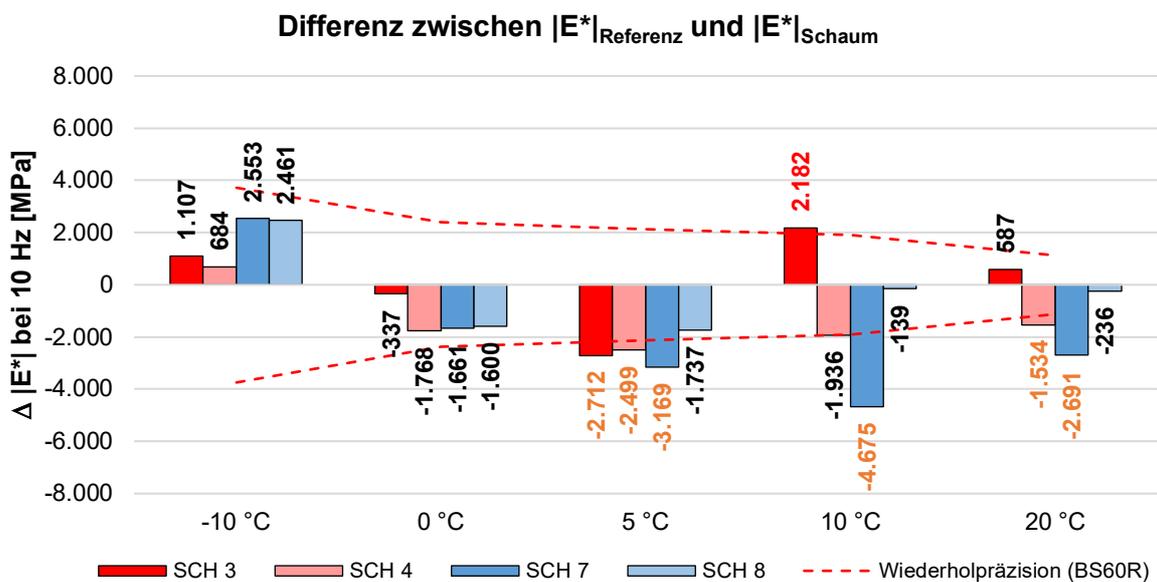


Abbildung 4-61: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)

Wie in Abbildung 4-60 und Abbildung 4-61 zu erkennen ist, liegt eine Vielzahl der Resultate im Bereich der Wiederholpräzision der Referenzvarianten BS40R und BS60R. Von denjenigen Varianten, die außerhalb der Wiederholpräzision liegen, besitzt die überwiegende Mehrheit ein negatives Vorzeichen. Bei diesen Schaumbitumenvarianten liegt das Steifigkeitsmodul demnach über dem Steifigkeitsmodul der Referenzvariante, was sich im Gebrauchstemperaturbereich positiv auf das Ermüdungs- und Verformungsverhalten auswirken könnte.

Abbildung 4-62 und Abbildung 4-63 beinhalten die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvarianten der Asphalttragschicht AC 22 T S.

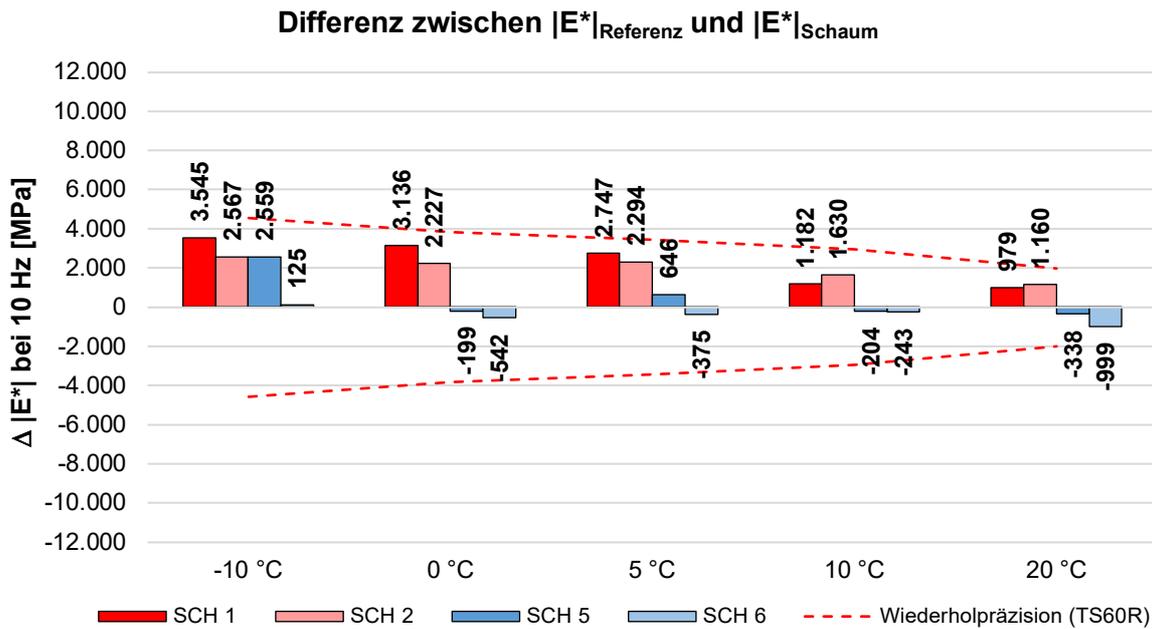


Abbildung 4-62: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – AC 22 T S mit 60 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)

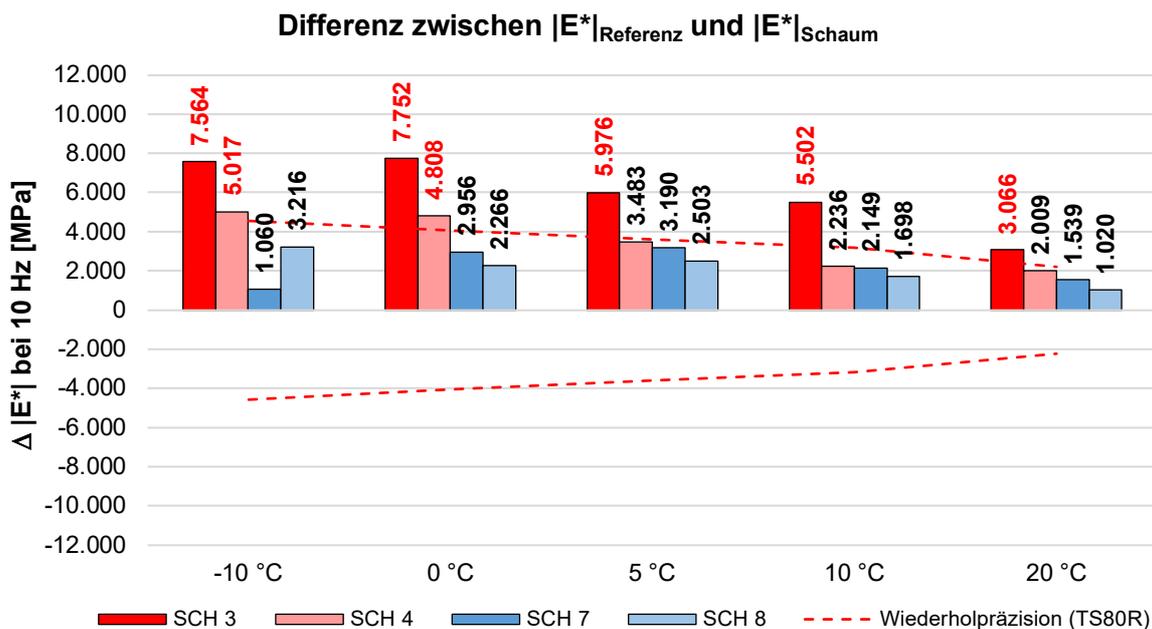


Abbildung 4-63: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – AC 22 T S mit 80 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)

Wie in Abbildung 4-62 zu erkennen ist, liegen die Abweichungen bei den Varianten AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision der Variante TS60R. Bei der Asphalttragschicht mit 80 M.-% Asphaltgranulat weist die Variante SCH 3 bedeutend geringere Steifigkeitsmoduln als die Referenzvariante TS80R auf. Wie in Abbildung 4-63 zu erkennen ist, kann diese Differenz nicht mit der Präzision des Verfahrens erklärt werden. Eine mögliche Ursache für die geringere Steifigkeit der Variante SCH 3 ist ein höherer Hohlraumgehalt der Bohrerne, wie anhand der in Abbildung 4-59 aufgeführten Raumdichten zu vermuten ist. In diesem Zusammenhang beträgt die Differenz zwischen den Raumdichten der Varianten TS80R und SCH 3 0,054 g/cm<sup>3</sup>. Auch die Variante SCH 4 überscheidet bei den Temperaturen von -10 °C und 0 °C die Grenzen der Wiederholpräzision. Die Vermutung liegt nahe, dass sich die Steifigkeitsmoduln dieser beiden Varianten mit zunehmender Raumdichte den Steifigkeitsmoduln der Variante TS80R annähern würden. Diese These wird durch die Reihung der Raumdichten in Abbildung 4-64 und Abbildung 4-65 untermauert.

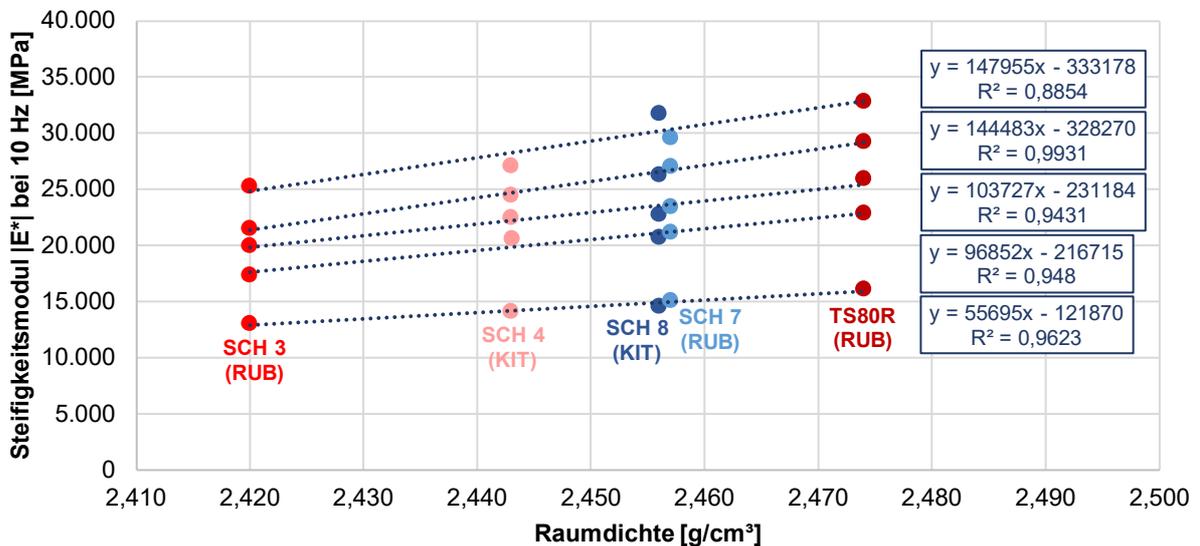


Abbildung 4-64: Zusammenhang zwischen Steifigkeitsmodul und Raumdichte – AC 22 T S mit 80 M.-% Asphaltgranulat

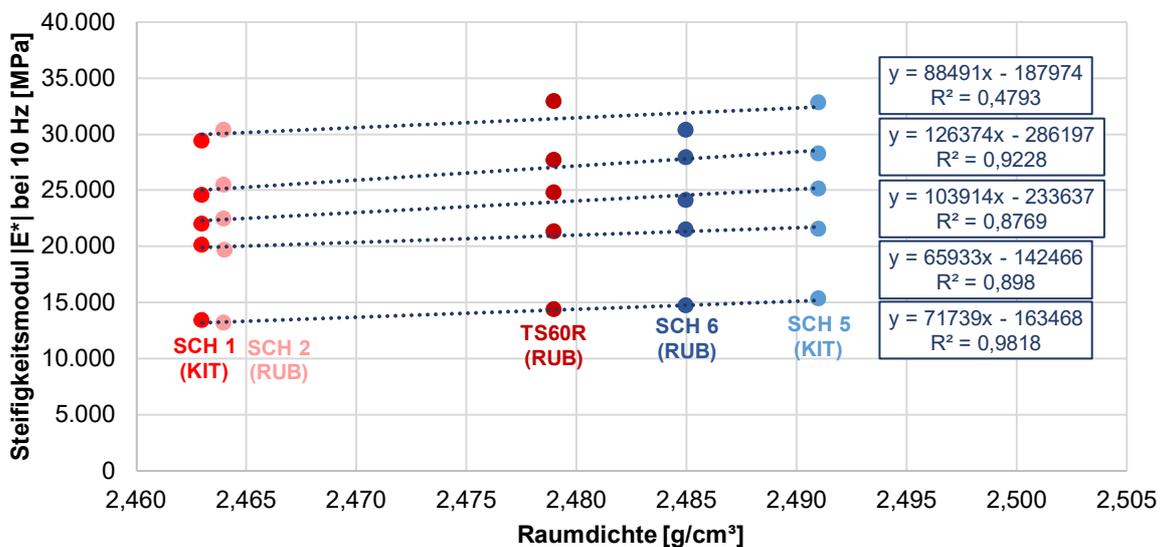


Abbildung 4-65: Zusammenhang zwischen Steifigkeitsmodul und Raumdichte – AC 22 T S mit 60 M.-% Asphaltgranulat

In Abbildung 4-64 und Abbildung 4-65 sind die Varianten, die möglichst zeitnah nach der Herstellung des Mischgutes (KIT) und die Varianten, die erst nach Wiedererwärmung des Mischgutes (RUB) zu Asphalt-Probeplatten verdichtet wurden, gekennzeichnet. Mit Ausnahme der beiden Varianten SCH 3 und SCH 4, zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der wiedererwärmten Schaumbitumenmischgüter SCH 2, SCH 6 und SCH 7 und den Ergebnissen der nicht wiedererwärmten Schaumbitumenmischgüter SCH 1, SCH 5 und SCH 8 (siehe Abbildung 4-64 und Abbildung 4-65).

#### 4.2.6 Asphaltmischwerk B

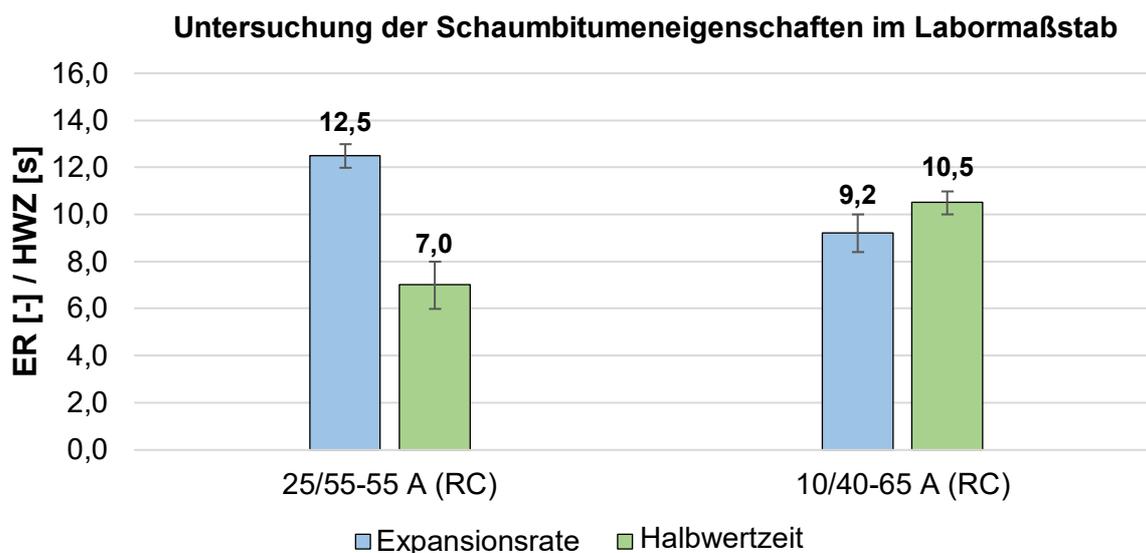
Am Asphaltmischwerk B wurden sechs Asphaltdeckschichtvarianten AC 11 D S und zehn Splittmastixasphaltbinder-Varianten SMA 16 B S bei konventionellen Temperaturen (ohne Schaumbitumen) sowie temperaturabgesenkt unter Verwendung von Schaumbitumen hergestellt. Als Bindemittel für das Asphaltdeckschichtmischgut kam ein PmB 25/55-55 A (RC) zum Einsatz. Für die Splittmastixasphaltbinder-Varianten wurde sowohl ein PmB 25/55-55 A (RC) als auch ein PmB 10/40-65 A (RC) verwendet (siehe Tabelle 4-27). Im Zuge der Herstellung von sechs Mischgutvarianten mit Schaumbitumen wurde die Nachmischzeit (NMZ) mit 10 Sekunden, 25 Sekunden und 60 Sekunden variiert. Die Trockenmischzeit blieb mit ca. 5 Sekunden unverändert. Tabelle 4-27 beinhaltet eine Übersicht der am Asphaltmischwerk B hergestellten Mischgutvarianten.

**Tabelle 4-27: Mischgutvarianten (Asphaltmischwerk B)**

Variante	AG-Anteil [M.-%]	MT [°C]	NMZ [s]	Schaumbitumen	Bindemittel	Bezeichnung
SMA 16 B S	30	165	25	nein	10/40-65 A (RC)	BS30R (165 °C – 25 s)
SMA 16 B S	30	145	25	ja	10/40-65 A (RC)	BS30S (145 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	165	25	nein	10/40-65 A (RC)	BS60R (165 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	145	25	ja	10/40-65 A (RC)	BS60S (145 °C – 25 s)
SMA 16 B S	40	170	25	nein	25/55-55 A (RC)	BS40R (170 °C – 25 s)
SMA 16 B S	40	140	25	ja	25/55-55 A (RC)	BS40S (140 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	170	25	nein	25/55-55 A (RC)	BS60R (170 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	140	10	ja	25/55-55 A (RC)	BS60S (140 °C – 10 s)
SMA 16 B S	60	140	25	ja	25/55-55 A (RC)	BS60S (140 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	140	60	ja	25/55-55 A (RC)	BS60S (140 °C – 60 s)
AC 11 D S	30	170	25	nein	25/55-55 A (RC)	DS30R (170 °C – 25 s)
AC 11 D S	30	140	25	ja	25/55-55 A (RC)	DS30S (140 °C – 25 s)
AC 11 D S	50	170	25	nein	25/55-55 A (RC)	DS50R (170 °C – 25 s)
AC 11 D S	50	140	10	ja	25/55-55 A (RC)	DS50S (140 °C – 10 s)
AC 11 D S	50	140	25	ja	25/55-55 A (RC)	DS50S (140 °C – 25 s)
AC 11 D S	50	140	60	ja	25/55-55 A (RC)	DS50S (140 °C – 60 s)

#### 4.2.7 Asphaltmischwerk B – Schaumbitumenherstellung

Die Herstellung der Schaumbitumen am Asphaltmischwerk B erfolgte unter Verwendung eines Schaumbitumenmoduls der Firma Benninghoven. Das 25/55-55 A (RC) und 10/40-65 A (RC) wurden bei einer Bitumentemperatur von ca. 170 °C (Anlieferungstemperatur) und einem Wassergehalt von 3 % aufgeschäumt. Schaumbitumenproben wurden im Zuge der Mischgutherstellung nicht entnommen. Die Expansionsrate und Halbwertszeit beider Bitumen wurde an der RUB unter Einsatz eines Laser-Entfernungsmessgerätes und der Labor-Schaumbitumenanlage von Wirtgen ermittelt (siehe Abbildung 4-66).



**Abbildung 4-66: Expansionsrate und Halbwertzeit – 170 °C und Wassergehalt von 3 %**

#### 4.2.8 Asphaltmischwerk B – Asphaltmischgutherstellung

Da Asphaltgranulat am Asphaltmischwerk B auf Temperaturen von max. 140 °C erwärmt wird, musste für die Absenkung der Mischguttemperatur lediglich die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen reduziert werden. Eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe von Asphaltgranulat war, anders als bei den anderen beiden Asphaltmischanlagen, nicht erforderlich. Nach der Mischgutherstellung waren die Gesteinskörnungen der bei konventioneller Temperatur hergestellten Varianten und die Gesteinskörnungen der temperaturabgesenkten Varianten mit Schaumbitumen vollständig mit Bindemittel umhüllt. Dies traf selbst auf die temperaturabgesenkten Schaumbitumenmischgüter mit Nachmischzeiten von 10 Sekunden zu.

#### 4.2.9 Asphaltmischwerk B – Asphaltuntersuchungen an der RUB

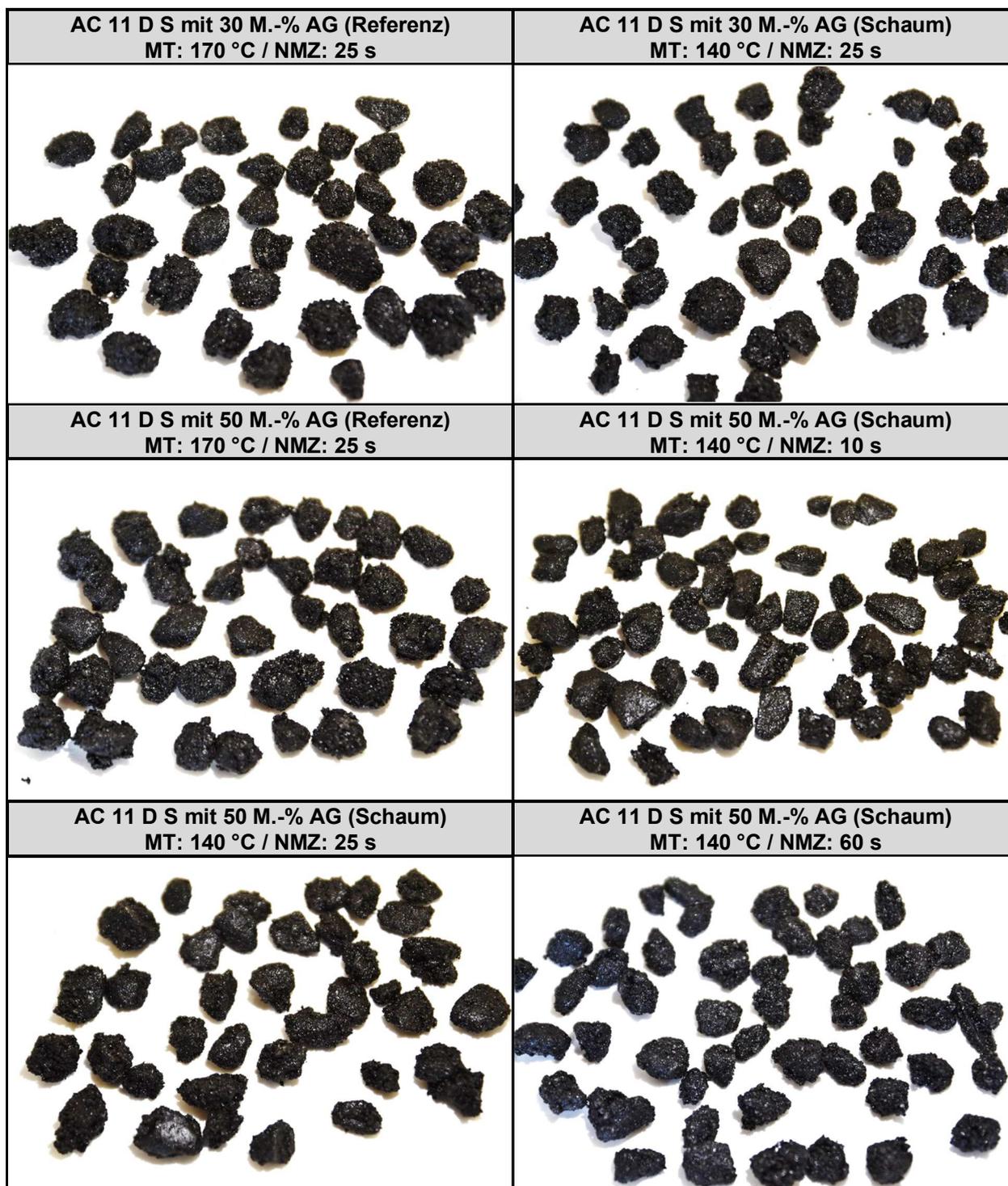
Die Untersuchung der Performanceeigenschaften der am Asphaltmischwerk B hergestellten Asphaltmischgüter erfolgte an der RUB. Die in Tabelle 4-28 aufgeführten Asphaltmischgutvarianten wurden zeitnah nach Herstellung, d. h. ohne Wiedererwärmung des Mischgutes, am KIT zu Asphalt-Probepplatten verdichtet. Die restlichen Asphaltmischgüter wurden möglichst luftdicht in Eimern verpackt und an das Straßenbaulabor der RUB übersandt und dort nach Wiedererwärmen des Mischgutes zu Asphalt-Probepplatten verdichtet. In beiden Fällen wurde die in der TP Asphalt-StB, Teil 33 genannte Verdichtungstemperatur von  $145 \pm 5$  °C für die Herstellung der Asphalt-Probepplatten herangezogen.

**Tabelle 4-28: Am KIT, ohne wiedererwärmen des Mischgutes, hergestellte Asphalt-Probepplatten**

Variante	AG-Anteil [M.-%]	MT [°C]	NMZ [s]	Schaumbitumen	Bezeichnung
SMA 16 B S	30	145	25	ja	BS30S (145 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	145	25	ja	BS60S (145 °C – 25 s)
SMA 16 B S	40	140	25	ja	BS40S (140 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	140	10	ja	BS60S (140 °C – 10 s)
SMA 16 B S	60	140	25	ja	BS60S (140 °C – 25 s)
SMA 16 B S	60	140	60	ja	BS60S (140 °C – 60 s)
AC 11 D S	30	140	25	ja	DS30S (140 °C – 25 s)
AC 11 D S	50	140	25	ja	DS50S (140 °C – 25 s)

**Umhüllung**

Ergänzend zu den am Asphaltmischwerk A hergestellten Asphalttragschicht- und Asphaltbinder-schichtmischungen, wurde hier die Umhüllung der groben Gesteinskörner der Asphaltdeckschicht näher betrachtet. In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 4-67 einige grobe Gesteinskörner der Asphaltdeckschicht mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat dargestellt.



**Abbildung 4-67: Dokumentation der Umhüllung – AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat**

Wie in Abbildung 4-67 zu erkennen ist, sind die Gesteinskörner aller Varianten vollständig mit Bindemittel umhüllt. An den Gesteinskörnern der Variante mit 60 Sekunden Nachmischzeit

scheinen mehr feine Gesteinskörner anzuhaften als bei der Variante, die mit einer Nachmischzeit von 10 Sekunden hergestellt wurde (vgl. Abbildung 4-67).

**Verformungsverhalten bei Wärme**

In Abbildung 4-68 und Abbildung 4-69 sind die mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven der Splittmastixasphaltbinder-Varianten mit 30 M.-%, 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat dargestellt. Abbildung 4-70 beinhaltet die Impulskriechkurven der Asphaltdeckschichtvarianten mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat.

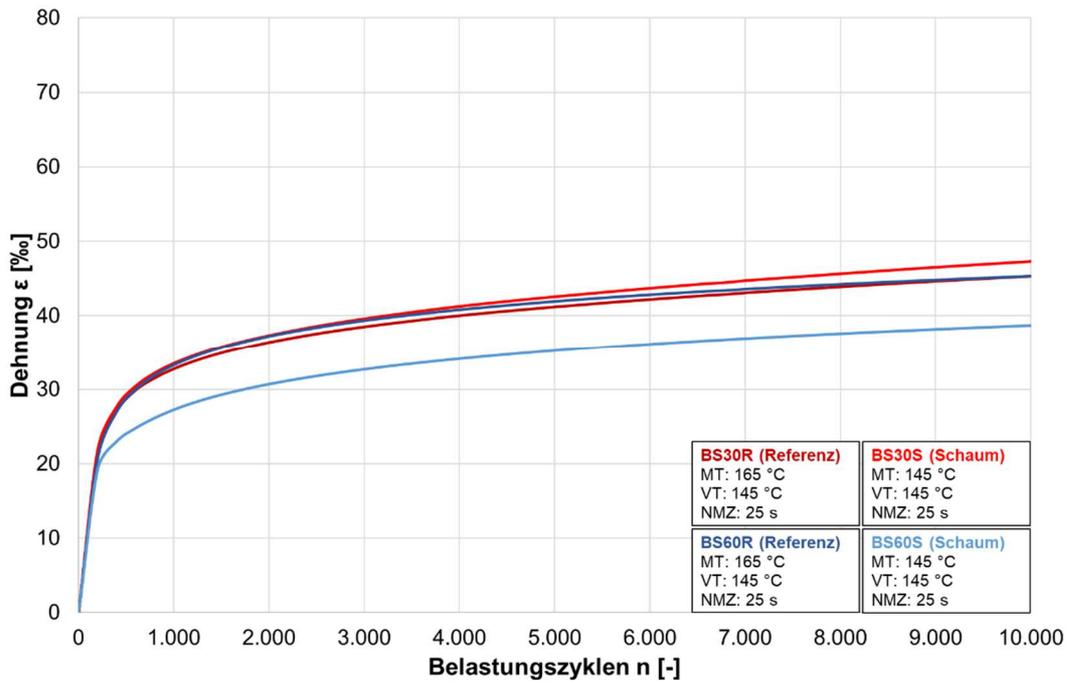


Abbildung 4-68: Impulskriechkurven SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

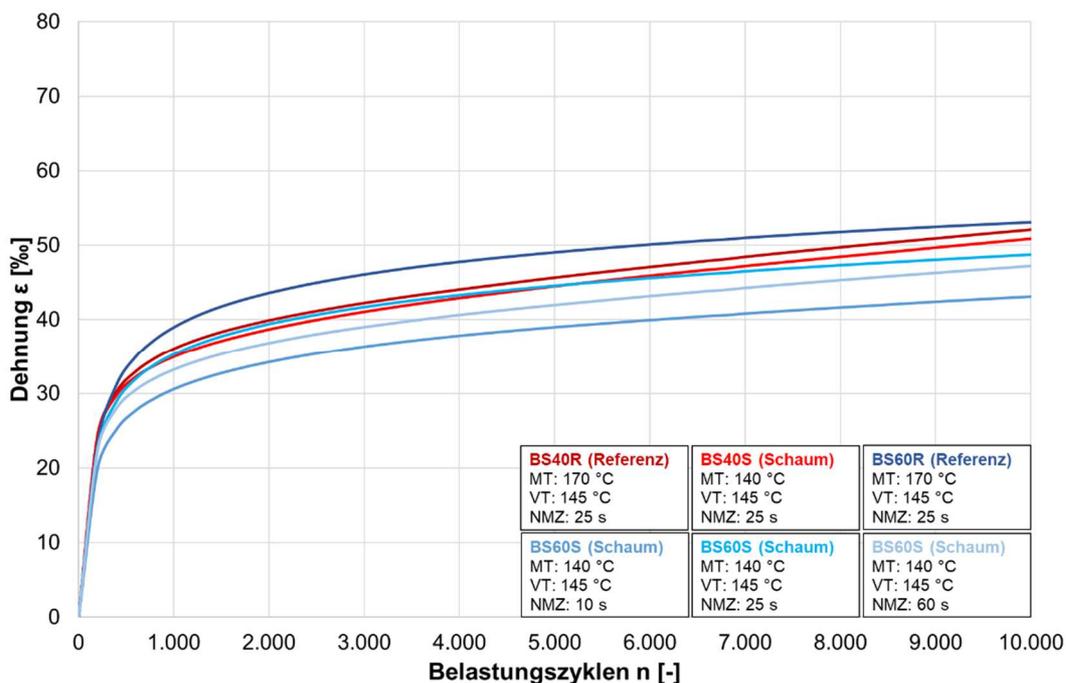
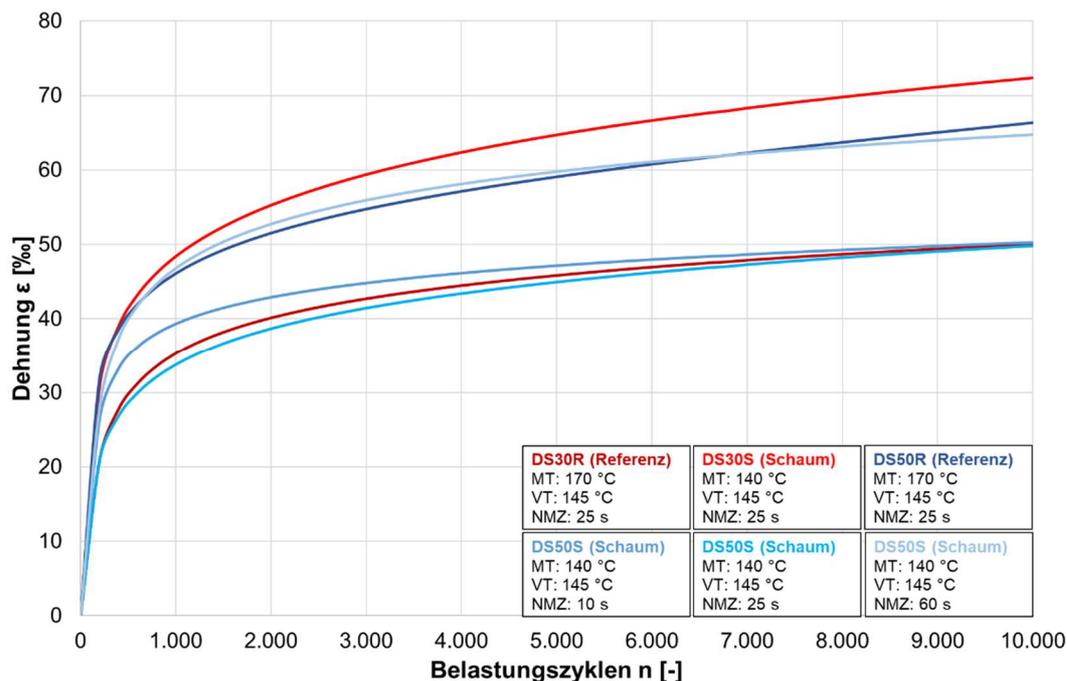


Abbildung 4-69: Impulskriechkurven SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat



**Abbildung 4-70: Impulskriechkurven AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat**

Beim Splittmastixasphaltbinder liegen die Dehnungen nach 10.000 Belastungszyklen zwischen 39 ‰ und 47 ‰ (Abbildung 4-69) sowie zwischen 43 ‰ und 53 ‰ (Abbildung 4-70). Die höchsten Dehnungen weisen in diesem Zusammenhang die Varianten BS30S mit 47 ‰ (Abbildung 4-69) und BS60R mit 53 ‰ (Abbildung 4-70) auf. Die geringsten Dehnungen ergeben sich für die Varianten BS60S mit 10 Sekunden Nachmischzeit (Abbildung 4-69) und BS60S mit 25 Sekunden Nachmischzeit (Abbildung 4-70).

Bei der Asphaltdeckschicht liegen die Dehnungen im Bereich von 50 ‰ und 72 ‰ und damit auf einem höheren Niveau als beim Splittmastixasphaltbinder. Wie in Abbildung 4-70 zu erkennen ist, nähern sich die Varianten DS50S (10 Sekunden Nachmischzeit), DS50S (25 Sekunden Nachmischzeit) und DS30R (25 Sekunden Nachmischzeit) gleichermaßen einem Endwert von 50 ‰ an. Auch die Varianten DS50S (60 Sekunden Nachmischzeit) und DS50R (25 Sekunden Nachmischzeit) liegen auf einem ähnlichen Niveau. Die Variante DS30S ist die mit den höchsten Dehnungen. Dies ist die Variante mit dem höchsten Frischbindemittelgehalt und somit auch mit dem höchsten Schaumwassergehalt. Höhere Verformungen durch im Asphaltmischgut verbleibendes Schaumwasser scheinen bei näherer Betrachtung der Impulskriechkurven jedoch unwahrscheinlich. So weist die Referenzvariante DS50R vergleichbar hohe Dehnungen auf, obwohl kein Schaumbitumen für die Herstellung eingesetzt wurde.

Um die Ergebnisse unabhängig von den anfänglich hohen Dehnungen besser einordnen zu können, wurde die Dehnungsrate zwischen den Belastungszyklen 9.800 und 10.000 für alle in Abbildung 4-68, Abbildung 4-69 und Abbildung 4-70 dargestellten Mischgutvarianten ermittelt. In Abbildung 4-71 sind die Dehnungsraten sowie die Raumdichten der Bohrkern der Asphaltbinder- und Asphaltdeckschichtvarianten dargestellt.

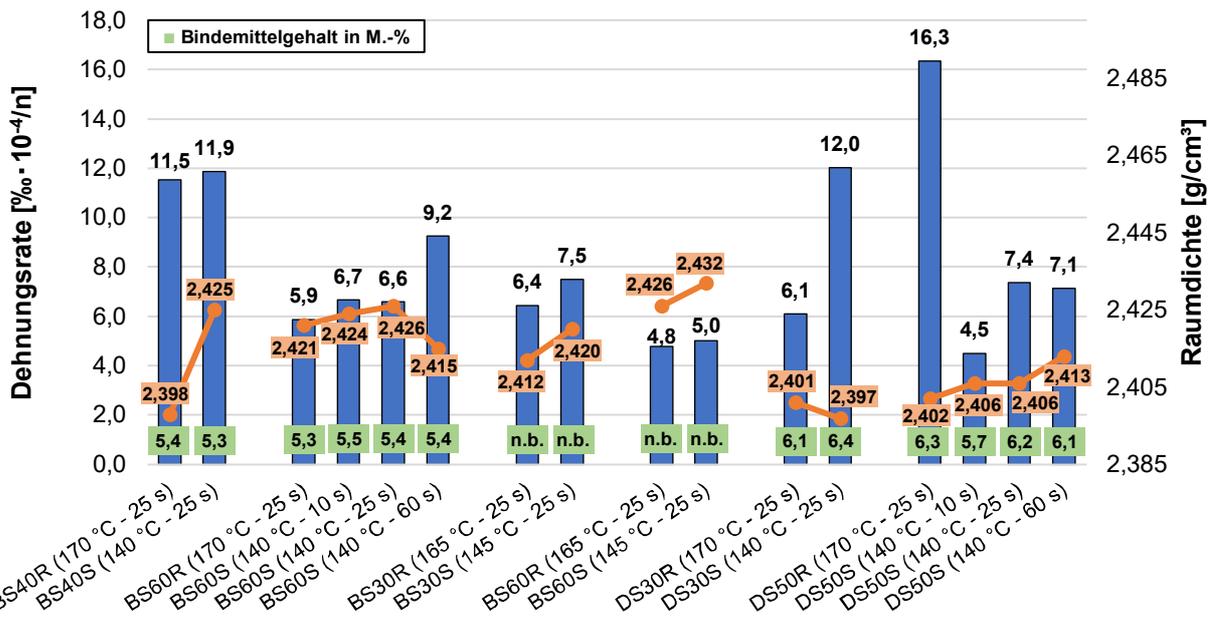


Abbildung 4-71: Dehnungsraten und Raumdichten – SMA 16 B S und AC 11 D S

Wie in Abbildung 4-71 zu erkennen ist, liegen die Dehnungsraten der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten auf einem ähnlichen Niveau wie die Dehnungsrate der zugehörigen Referenzvariante. Die einzigen nennenswerten Ausnahmen bilden die Varianten BS60S (60 Sekunde Nachmischzeit) und DS30S. Über die Ursache der im Vergleich zur Referenzvariante deutlich höheren Dehnungsrate der Variante DS30S kann nur gemutmaßt werden. Eine zu geringe oder zu hohe Raumdichte kann als Ursache ausgeschlossen werden. Die Rückgewinnung des Bindemittels von Variante DS30S ergab einen um 0,3 M.-% höheren Bindemittelgehalt gegenüber der Referenzvariante DS30R (vgl. Abbildung 4-71). Inwieweit diese Differenz alleine zur höheren Dehnungsrate beigetragen hat, kann nicht abschließend geklärt werden. Auffällig ist auch die relativ hohe Dehnungsrate der Referenzvariante DS50R. Der Bindemittelgehalt als Ursache für die hohe Dehnungsrate der Variante DS50R scheint jedoch wenig plausibel zu sein.

Die hier dargestellten Resultate lassen prinzipiell keinen Rückschluss auf einen reduzierten Verformungswiderstand der Schaumbitumenvarianten zu. Ein positiver Einfluss einer längeren Nachmischzeit auf das Verformungsverhalten ist an den hier dargestellten Ergebnissen ebenfalls nicht zu erkennen.

### Asphaltsteifigkeit

Die Tabelle 4-29 bis Tabelle 4-31 beinhalten die Steifigkeitsmoduln der aus den Asphalt-Probenplatten entnommenen Bohrkerne des Splittmastixasphaltbinders SMA 16 B S und der Asphaltdeckschicht AC 11 D S. In Abbildung 4-72 bis Abbildung 4-74 sind die Steifigkeitsmoduln bei einer Prüffrequenz von 10 Hz gegenübergestellt. Die Abbildung 4-75 bis Abbildung 4-77 beinhalten die nach TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelten Masterkurven.

Tabelle 4-29: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	BS30R Referenz 165 °C NMZ: 25 s	BS30S Schaum 145 °C NMZ: 25 s	BS60R Referenz 165 °C NMZ: 25 s	BS60S Schaum 145 °C NMZ: 25 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	18.511	16.028	17.348	19.462
-10	0,3	19.987	17.273	18.953	21.382
-10	1	21.562	19.052	20.443	22.484
-10	3	22.623	20.201	21.742	23.941
-10	5	23.148	20.692	21.987	24.617
-10	10	23.559	21.944	22.076	25.379
0	0,1	12.412	9.702	12.668	12.961
0	0,3	14.135	11.449	14.238	14.940
0	1	16.135	13.409	16.182	16.998
0	3	17.774	15.260	17.685	18.608
0	5	18.314	15.941	18.846	19.776
0	10	19.611	17.039	19.452	20.909
5	0,1	9.182	7.090	9.527	9.718
5	0,3	10.907	8.669	11.331	11.701
5	1	12.719	10.984	13.095	13.977
5	3	14.387	13.093	14.755	16.286
5	5	15.054	14.083	15.710	16.866
5	10	15.863	15.067	16.017	18.222
10	0,1	6.429	4.398	6.257	6.746
10	0,3	8.252	5.909	7.909	8.596
10	1	10.435	7.789	9.804	10.848
10	3	12.780	9.555	11.606	13.023
10	5	13.619	10.566	12.411	14.192
10	10	14.959	11.979	13.455	15.349
20	0,1	2.294	1.893	2.822	3.115
20	0,3	3.278	2.714	3.932	4.377
20	1	4.739	3.858	5.481	6.009
20	3	6.283	5.352	7.318	7.925
20	5	7.257	6.260	8.329	8.953
20	10	8.241	7.314	9.498	10.231

SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

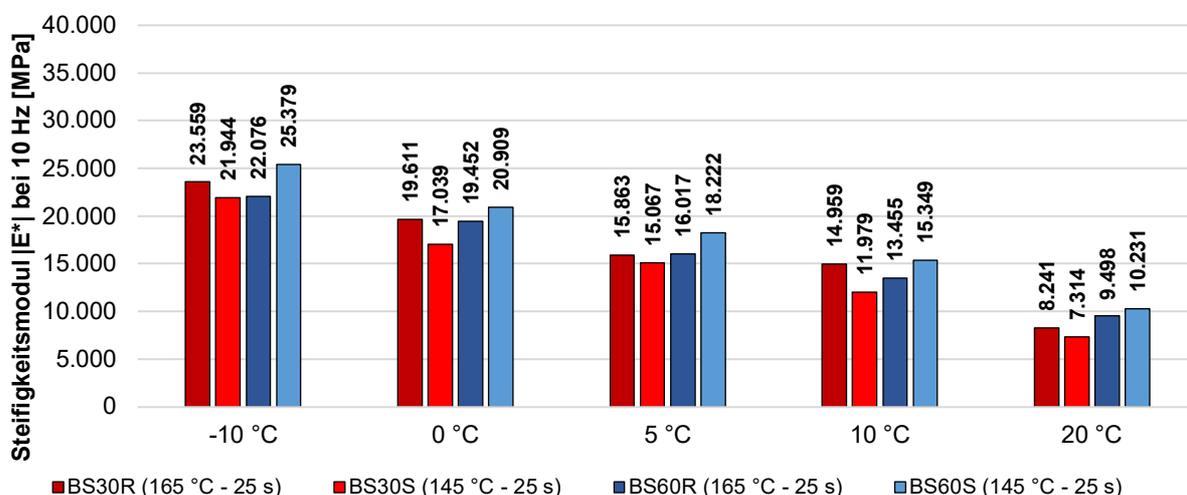


Abbildung 4-72: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% AG

Tabelle 4-30: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	BS40R Referenz 170 °C NMZ: 25 s	BS40S Schaum 140 °C NMZ: 25 s	BS60R Referenz 170 °C NMZ: 25 s	BS60S Schaum 140 °C NMZ: 10 s	BS60S Schaum 140 °C NMZ: 25 s	BS60S Schaum 140 °C NMZ: 60 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	17.172	16.155	18.954	17.398	18.056	18.689
-10	0,3	19.094	18.014	20.492	19.272	19.685	20.240
-10	1	20.656	20.133	22.627	20.630	21.635	22.025
-10	3	22.495	21.520	23.930	22.349	22.882	23.462
-10	5	23.248	22.619	24.599	23.018	23.798	24.146
-10	10	23.819	23.398	25.288	23.807	24.458	25.232
0	0,1	10.410	9.539	12.543	9.557	11.158	10.636
0	0,3	12.525	11.520	14.482	11.329	13.135	12.564
0	1	14.500	13.873	16.986	13.559	15.260	14.769
0	3	16.419	15.782	18.955	15.560	17.240	16.551
0	5	17.630	17.252	20.061	16.479	18.395	17.603
0	10	19.152	18.186	21.316	17.726	19.585	18.820
5	0,1	7.412	6.592	8.412	7.896	8.875	8.062
5	0,3	9.306	8.366	10.379	9.809	10.993	9.983
5	1	11.570	10.635	12.777	11.767	13.188	12.116
5	3	13.860	12.793	14.931	13.790	15.331	14.139
5	5	14.841	13.796	16.001	14.869	16.260	15.152
5	10	15.975	15.381	17.593	16.259	17.885	16.519
10	0,1	5.308	4.323	5.907	5.689	6.207	6.029
10	0,3	6.895	5.734	7.741	7.476	7.985	7.793
10	1	8.992	7.592	9.820	9.526	10.133	9.939
10	3	11.025	9.607	12.051	11.508	12.483	12.281
10	5	12.152	10.641	13.065	12.610	13.542	13.254
10	10	13.567	12.261	14.739	14.244	14.875	14.921
20	0,1	1.838	1.951	2.513	2.360	2.613	2.615
20	0,3	2.620	2.780	3.566	3.395	3.860	3.753
20	1	3.745	3.987	5.079	4.772	5.346	5.216
20	3	5.132	5.518	6.875	6.430	7.174	7.013
20	5	5.893	6.416	7.824	7.433	8.201	7.882
20	10	7.042	7.757	9.170	8.595	9.463	9.396

SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

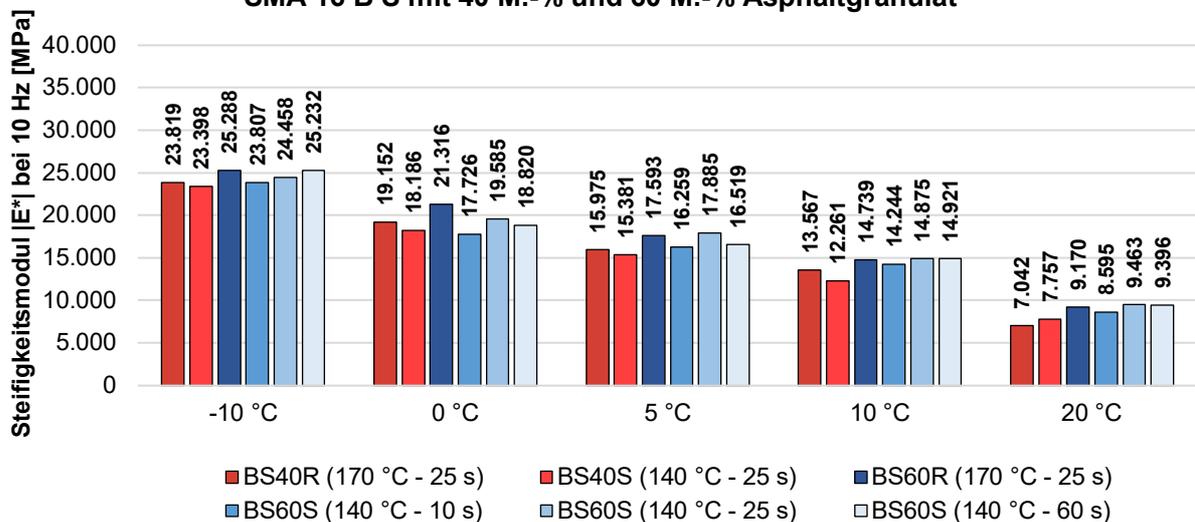


Abbildung 4-73: Steifigkeitsmodul bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG

Tabelle 4-31: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat

Prüftemperatur	Prüffrequenz	DS30R Referenz 170 °C NMZ: 25 s	DS30S Schaum 140 °C NMZ: 25 s	DS50R Referenz 170 °C NMZ: 25 s	DS50S Schaum 140 °C NMZ: 10 s	DS50S Schaum 140 °C NMZ: 25 s	DS50S Schaum 140 °C NMZ: 60 s
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	19.935	17.922	18.485	20.148	19.485	19.604
-10	0,3	21.855	20.277	20.365	21.915	21.518	21.547
-10	1	23.976	22.067	22.563	24.204	23.480	23.688
-10	3	25.226	23.564	24.825	25.720	24.675	25.390
-10	5	26.021	24.875	25.291	26.462	25.354	26.014
-10	10	27.260	26.140	26.522	27.656	26.313	27.560
0	0,1	13.253	11.423	11.912	13.324	13.986	12.874
0	0,3	15.476	13.658	14.297	15.309	15.833	14.983
0	1	17.865	15.962	16.843	17.932	18.177	17.356
0	3	20.252	18.193	18.688	20.001	20.213	19.602
0	5	20.943	19.352	20.137	21.198	21.799	20.390
0	10	22.356	20.683	21.546	22.479	22.628	22.309
5	0,1	9.260	7.360	8.384	9.591	9.215	9.630
5	0,3	11.263	9.335	10.381	11.641	11.127	11.847
5	1	13.651	11.742	12.831	14.124	13.312	14.186
5	3	16.134	14.198	15.147	16.399	15.663	16.616
5	5	17.200	15.203	15.987	17.644	16.845	17.763
5	10	18.551	16.833	17.911	19.223	18.167	19.292
10	0,1	6.798	4.916	5.564	6.810	6.900	6.620
10	0,3	8.572	6.692	7.405	8.676	8.665	8.588
10	1	10.987	8.756	9.596	11.127	10.977	10.744
10	3	13.311	11.118	12.022	13.653	13.017	13.166
10	5	14.634	12.307	13.497	14.864	14.483	14.280
10	10	15.935	14.040	14.610	16.708	15.909	15.808
20	0,1	2.703	1.880	2.261	2.766	2.701	2.774
20	0,3	3.821	2.779	3.320	4.005	3.871	3.935
20	1	5.429	4.120	4.828	5.653	5.460	5.611
20	3	7.418	5.847	6.607	7.702	7.297	7.586
20	5	8.458	6.751	7.575	8.797	8.467	8.680
20	10	9.830	8.166	8.977	10.208	10.076	10.150

AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat

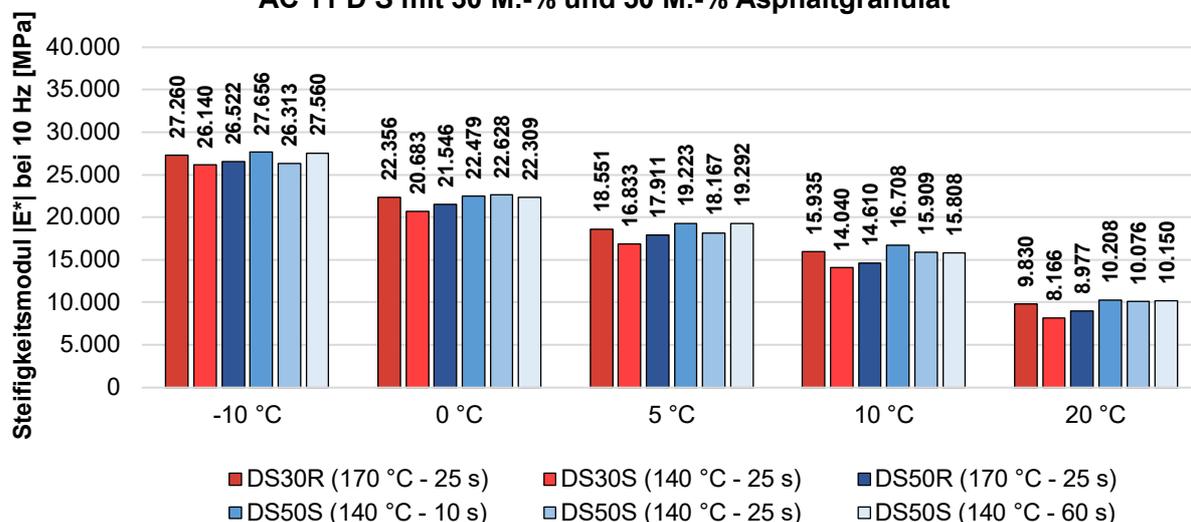


Abbildung 4-74: Steifigkeitsmodul bei 10 Hz – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG

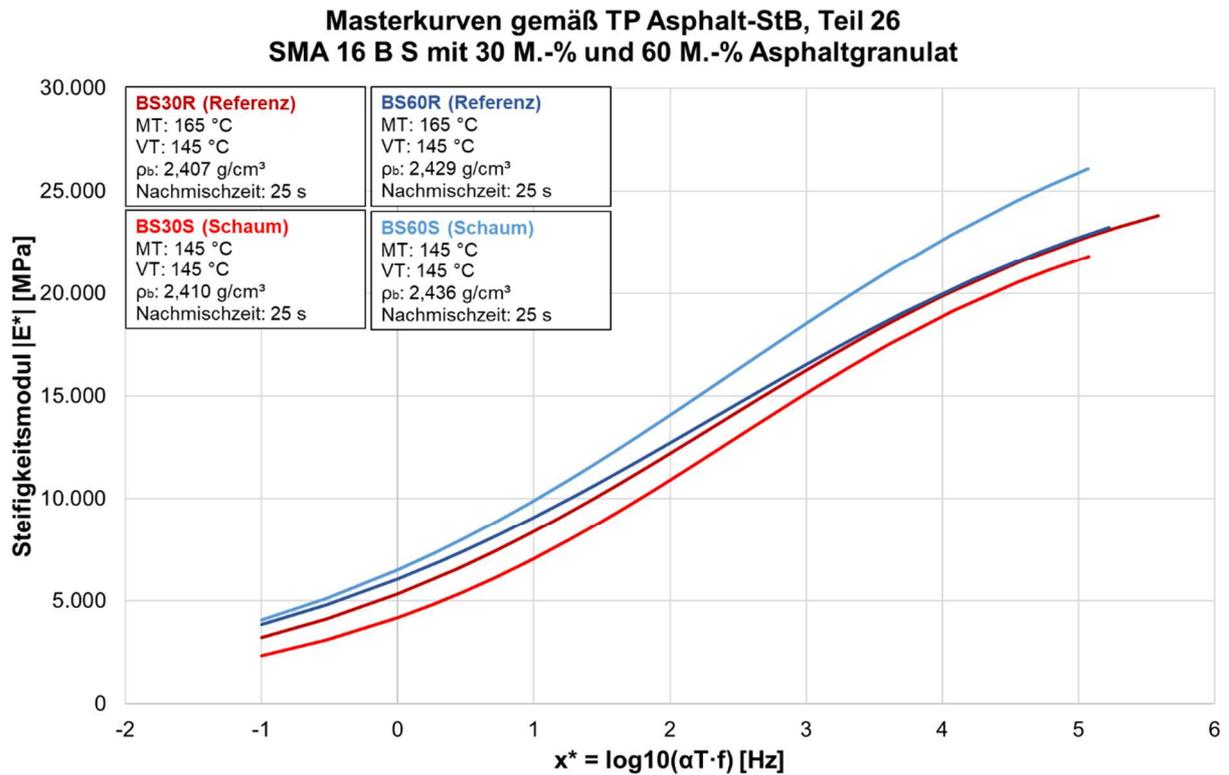


Abbildung 4-75: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat

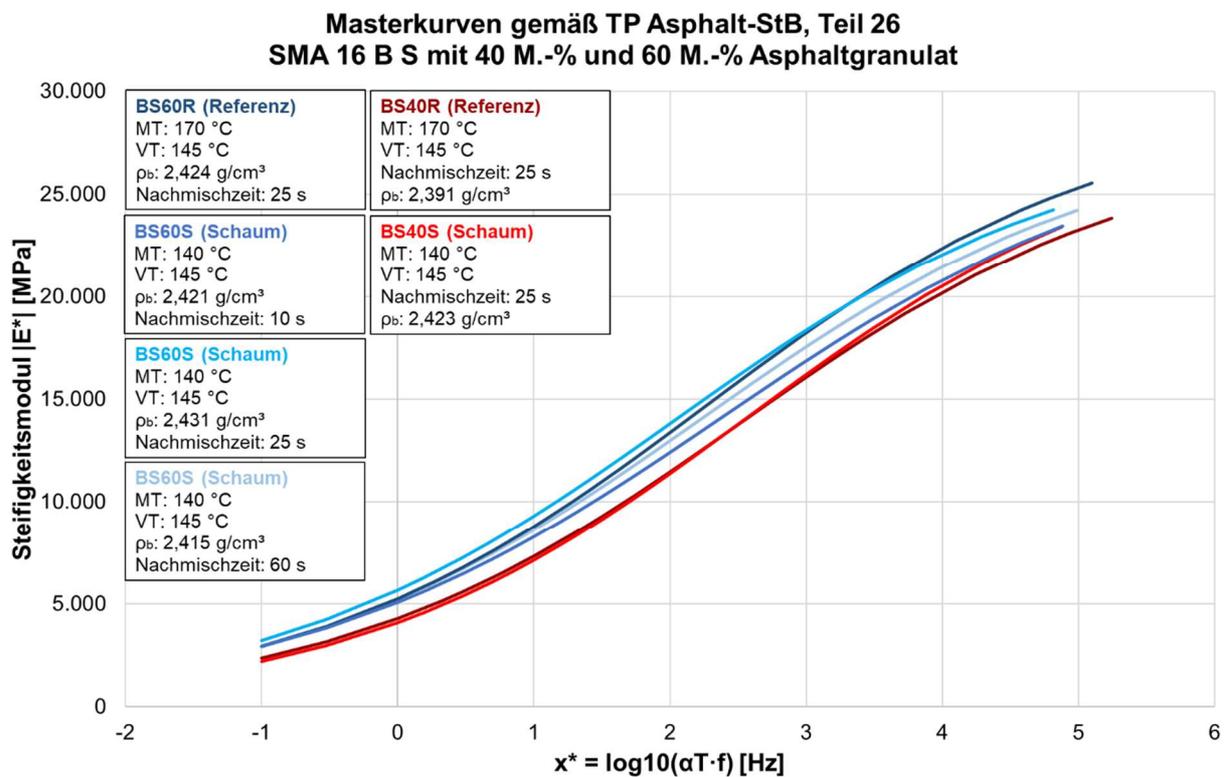
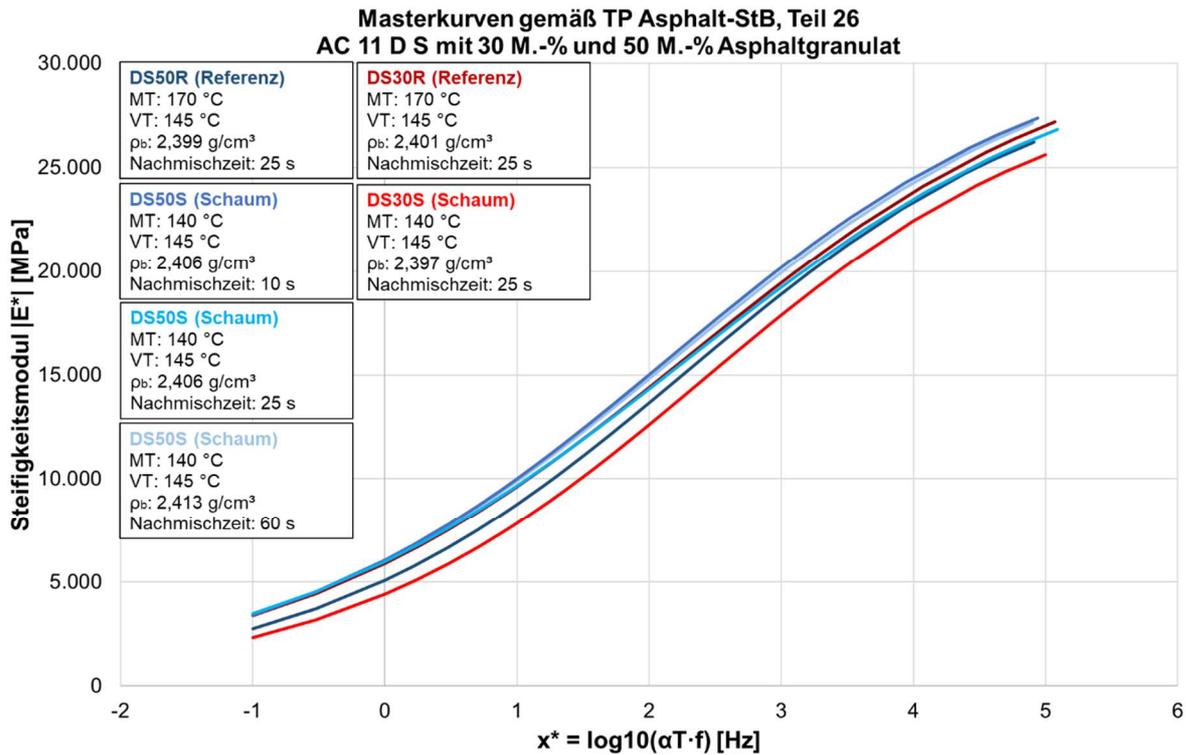


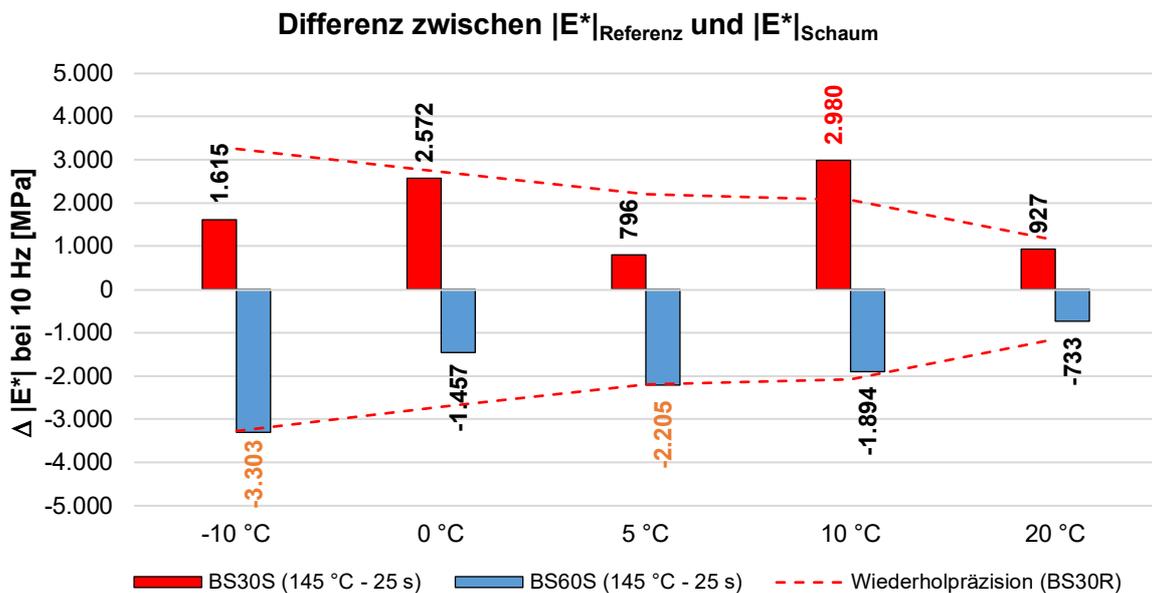
Abbildung 4-76: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat



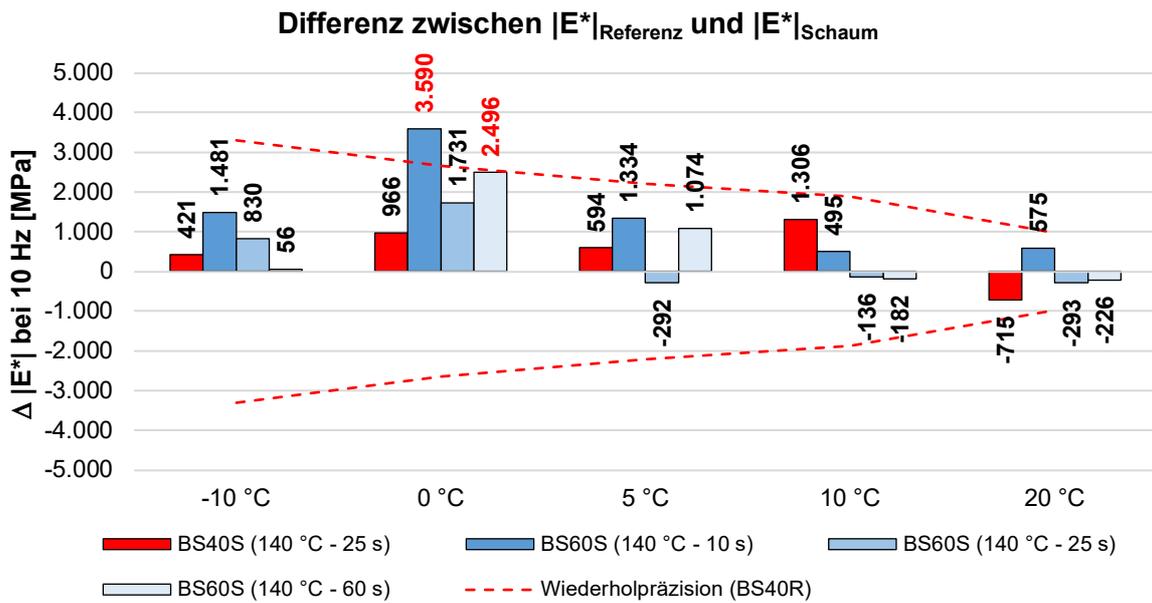
**Abbildung 4-77: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat**

Wie an den Ergebnissen in Abbildung 4-72 bis Abbildung 4-74 zu erkennen ist, liegen die Steifigkeitsmoduln der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten auf einem vergleichbaren Niveau mit den Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten. Ein Einfluss der Nachmischzeit auf das Steifigkeitsmodul ist weder an den Daten in Abbildung 4-72 und Abbildung 4-74 noch an den Verläufen der Masterkurven (vgl. Abbildung 4-76 und Abbildung 4-77) zu erkennen.

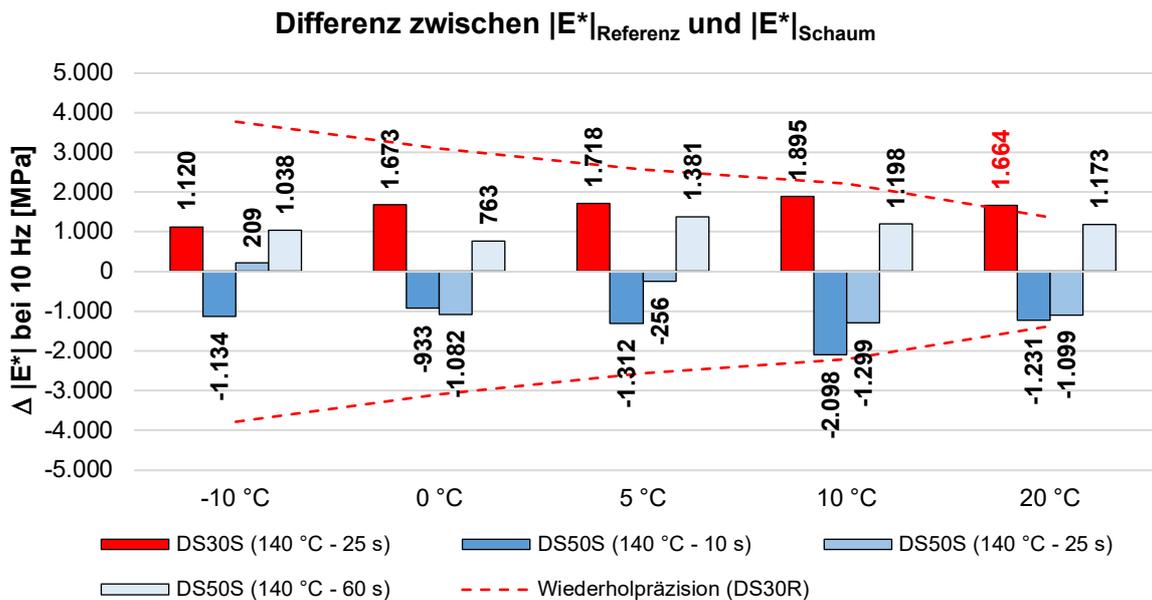
Abbildung 4-78 bis Abbildung 4-80 beinhalten die Differenzen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten und den Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten.



**Abbildung 4-78: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – SMA 16 B S mit 30 M.-% und 60 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)**



**Abbildung 4-79: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)**



**Abbildung 4-80: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)**

Wie in Abbildung 4-78 bis Abbildung 4-80 zu erkennen ist, liegt die überwiegende Mehrheit der zwischen Referenz- und Schaumbitumenvarianten ermittelten Abweichungen innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision.

### 4.3 Großtechnische Validierung in Untersuchungsstrecken

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zwei Untersuchungsstrecken unter Einsatz des Schaumbitumenverfahrens realisiert. Im Folgenden werden die gewonnenen Erkenntnisse vorgestellt.

#### 4.3.1 L 1141 Löchgau – Kleinsachsenheim (Baden-Württemberg)

Die erste Untersuchungsstrecke entstand am 30. September 2022 im Rahmen einer Deckenerneuerung auf der Landesstraße L 1141 zwischen Löchgau und Kleinsachsenheim (Baden-Württemberg). Auf etwa 2 km Länge wurde eine 4 cm starke Asphaltdeckschicht AC 11 D S in zwei Teilabschnitten eingebaut. Der erste Teilabschnitt wurde bei konventionellen Temperaturen und einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A (RC) realisiert. Der zweite Teilabschnitt wurde temperaturabgesenkt unter Verwendung eines aufgeschäumten 25/55-55 A (RC) umgesetzt. Das Asphaltmischgut wurde mit einem Asphaltgranulat-Anteil von 50 M.-% konzipiert. Die Mischgutherstellung erfolgte durch das Asphaltmischwerk C. Tabelle 4-32 beinhaltet allgemeine Informationen dieser Untersuchungsstrecke.

**Tabelle 4-32: Untersuchungsstrecke L 1141**

Art der Baumaßnahme	Deckenerneuerung in beide Fahrtrichtungen
Standort	Löchgau – Kleinsachsenheim (Baden-Württemberg)
Bezeichnung	L 1141
Belastungsklasse	BK3,2
Fahrbahnaufbau	4,0 cm Asphaltdeckschicht 6,5 cm Asphalttragschicht
Länge der Untersuchungsstrecke	ca. 2 km 1. Teilabschnitt: Heißbauweise 2. Teilabschnitt: Temperaturabgesenkter Asphalt
Asphaltmischgut	AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat
Bindemittel	25/55-55 A (RC)
Bauverfahren	Einbau heiß an heiß mit zwei Asphaltfertigern

#### 4.3.2 L 1141 – Asphaltmischgutherstellung

Die labortechnische Betreuung erfolgte durch Projektpartner C, welcher ebenso die Erstprüfung für das eingesetzte Asphaltmischgut konzipierte. Eine gesonderte Erstprüfung für das mit Schaumbitumen hergestellte Asphaltmischgut wurde nicht erstellt. Grund dafür ist die Annahme, dass nach dem Verdampfen des zugegebenen Wassers die ursprünglich ermittelten Asphalteeigenschaften vorliegen. Für das Bauvorhaben wurde eine Asphaltmischguttemperatur von 140 bis 150 °C angestrebt. Vor diesem Hintergrund musste der Produktionsprozess auf die Temperaturabsenkung abgestimmt werden. Aufgrund möglicher Materialanhaftungen an den Seitenwänden der Paralleltrommel, sind bei der Erwärmung des Asphaltgranulates Temperaturen von mindestens 150 °C notwendig. Auch die Temperatur der frischen Gesteinskörnungen kann in der Weißtrommel nicht weit genug reduziert werden, um die Zieltemperatur des resultierenden Asphaltmischgutes zu erreichen. Die Absenkung der Mischguttemperatur wurde daher durch eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe der Asphaltgranulate realisiert. Das optimale Verhältnis zwischen kaltem und warmen Asphaltgranulat wurde in Vorversuchen zu 20 M.-% (kalt) und 30 M.-% (warm) ermittelt.

Stundenleistung, Chargengröße und Mischzeiten wurden bei beiden Varianten gezielt gleichgestellt. Im Anlagenbetrieb wurde eine deutlich ruhigere und schonendere Produktion bei der Herstellung des Temperaturabgesenkten Asphaltmischgutes festgestellt. Das übliche Verpuffen von Wasserdampf im Bereich der Mineraltrommel war nicht vorhanden; die Abgastemperatur unterschritt den Taupunkt bei Filtereintritt nicht. Die Energieeinsparung beim Exhaustor betrug im Vergleich zum konventionellen Heißasphalt ca. 10 %, was im vorliegenden Fall einer Einsparung von 33,5 kW/h entspricht. Die Leistung beim Mineralstoffbrenner war um 15 % reduziert, was zu einer Energieeinsparung von ca. 1.500 kW/h führte. Die hier dargelegten Energiegrößen entsprechen den bekannten Erfahrungswerten bei der Herstellung von Temperaturabgesenktem Asphalt. Im Durchschnitt wurden an der Asphaltmischanlage durch die Absenkung der Produktionstemperatur 562 kg CO<sub>2</sub> pro Stunde eingespart.

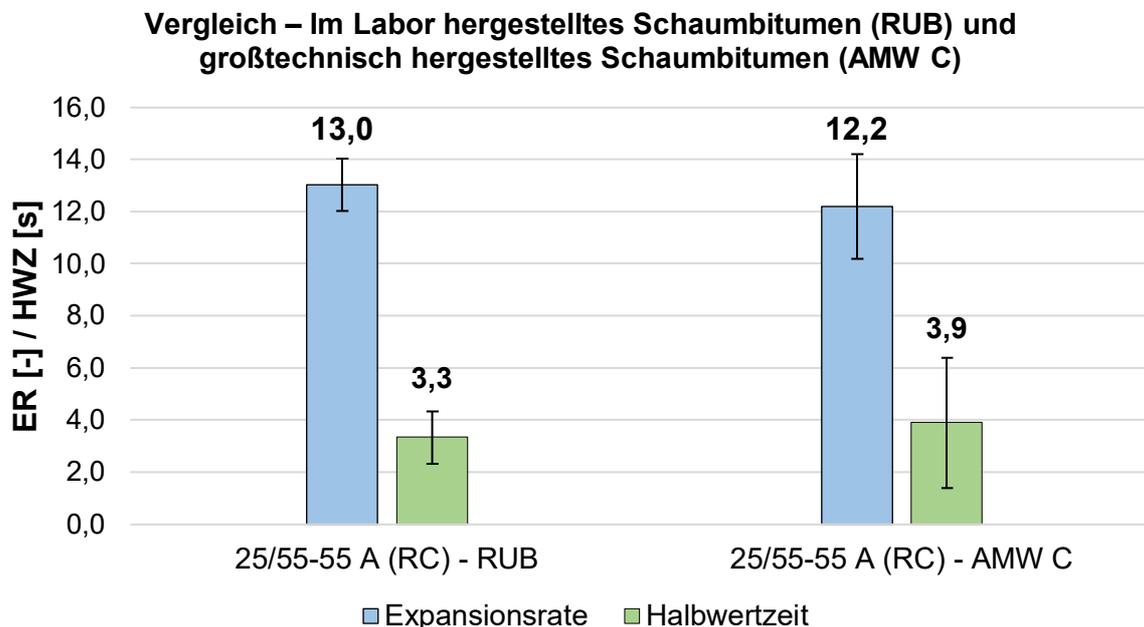
#### 4.3.3 L 1141 – Schaumbitumenherstellung und -untersuchung

Die Schaumbitumenherstellung erfolgte mit einer Schaumbitumenanlage der Firma Ammann (vgl. Kapitel 3.3.1, Abbildung 3-8). Das polymermodifizierte Bitumen 25/55-55 A (RC) wurde hierzu bei einer Bitumentemperatur von ca. 170 °C und einem Wassergehalt von 3 % aufgeschäumt. Während der Mischgutproduktion wurden zwei Schaumbitumenproben über die Probenahmeverrichtung der Schaumbitumenanlage entnommen und mittels Laser-Entfernungsmessgerät untersucht. Mit Hilfe der vom Messgerät aufgezeichneten Daten wurde die Expansionsrate und Halbwertszeit des großtechnisch hergestellten Schaumbitumens bestimmt. Die im Rahmen der großtechnischen Schaumbitumenherstellung gewonnenen Ergebnisse wurden im Labormaßstab validiert. Hierzu wurde das PmB 25/55-55 A (RC) mit der Labor-Schaumbitumenanlage von Wirtgen, bei denselben Rahmenbedingungen (Bitumenmenge, Temperatur und Wassergehalt), aufgeschäumt. In Abbildung 4-81 sind die Probenahmeverrichtung der Ammann-Anlage, die Schaumbitumenprobe unmittelbar nach Herstellung und die Schaumbitumenprobe einige Sekunden nach Herstellung dargestellt.



**Abbildung 4-81:** Probenahmeverrichtung für Schaumbitumen an der Mischanlage (links), Schaumbitumen unmittelbar nach Herstellung (Mitte), Schaumbitumen nach mehreren Sekunden (rechts)

In Abbildung 4-82 sind die mittels Laser-Entfernungsmessgerät ermittelten Schaumbitumenkenngrößen (Expansionsrate und Halbwertzeit) der großtechnisch am Asphaltmischwerk C (AMW C) und labortechnisch hergestellten Schaumbitumen gegenübergestellt.



**Abbildung 4-82: Expansionsrate und Halbwertzeit – 170 °C und Wassergehalt von 3 %**

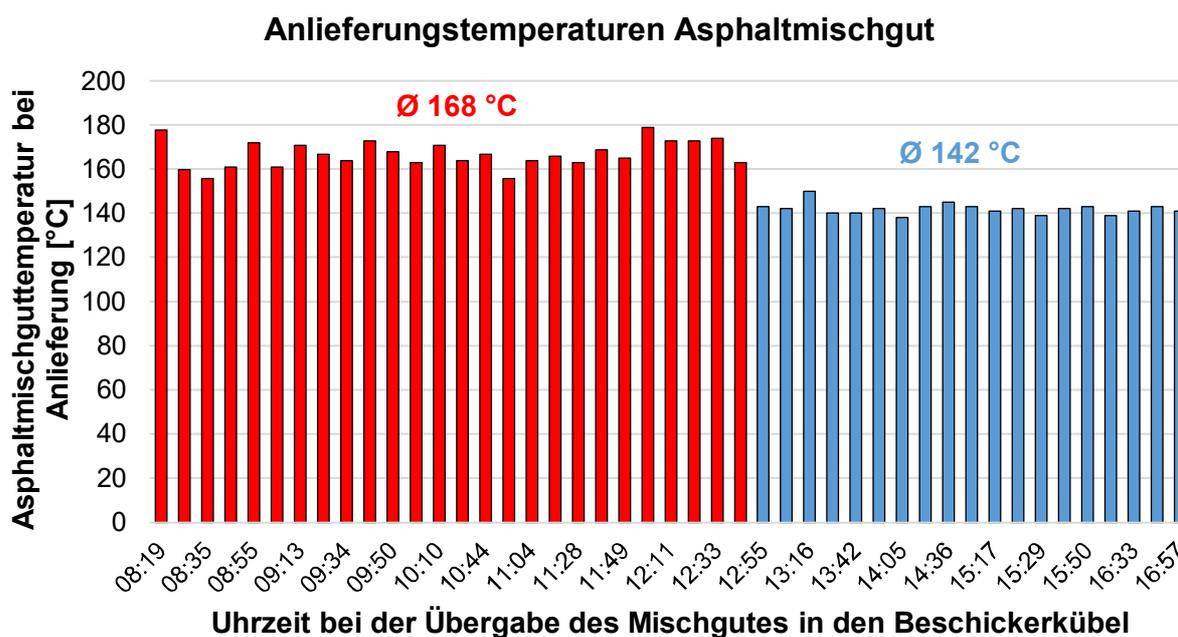
Wie in Abbildung 4-82 zu erkennen ist, wurden in beiden Anlagen Schaumbitumen mit vergleichbaren Schaumbitumeneigenschaften (Expansionsrate und Halbwertzeit) produziert.

#### 4.3.4 L 1141 – Asphalteinbau und baubegleitende Untersuchungen

Der Einbau beider Teilabschnitte wurde innerhalb eines Tages realisiert, wobei mit der Variante in Heißbauweise (Referenzvariante) begonnen wurde. Zu Beginn der Asphaltarbeiten am Morgen lagen Lufttemperaturen von 10 °C sowie leichter Nebel vor. Im Verlauf des Tages stieg die Lufttemperatur auf 23 °C an. Über den gesamten Einbautag war es nahezu windstill. Insgesamt können die klimatischen Einbaubedingungen als günstig für den Einbau bewertet werden. Für die Asphaltierungsarbeiten wurden folgende Baumaschinen eingesetzt:

Beschicker:	MT 3000-3   Offset
Fertiger:	Vögele Super 1800-3i und Vögele Super 1800-2, jeweils ausgestattet mit Bohlenabsaugung und RoadScan
Walzen:	2 x Bomag BW 154 Kombiwalze, 2 x Bomag BM 174 Tandem-Glattmantelwalze, alle ausgestattet mit Völkel FDVK-A-Navigator

Im Zuge der Asphaltierungsarbeiten wurden Temperaturmessungen in unterschiedlichen Bereichen durchgeführt. Zum einen wurde die Oberflächentemperatur in der Mitte der Einbaubohle mit dem Thermografiesystem „RoadScan“ erfasst, zum anderen wurden die Asphaltmischguttemperaturen bei der Übergabe vom Lkw in den Beschickerkübel mit einem Einstichthermometer gemessen und dokumentiert. Abbildung 4-83 beinhaltet die mittels Einstichthermometer gemessenen Temperaturen des Asphaltmischgutes im Beschickerkübel.



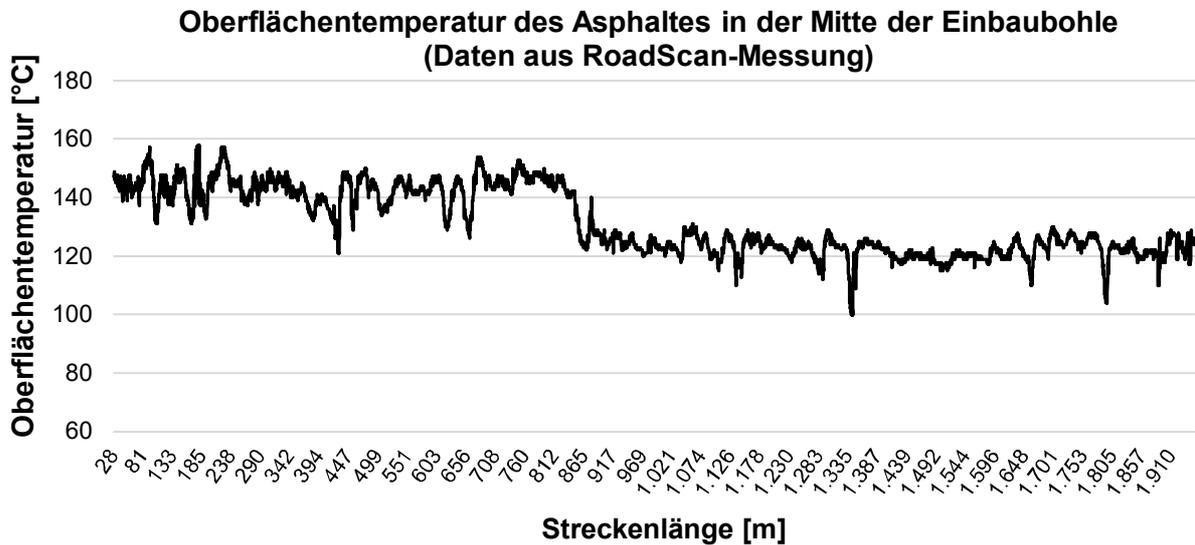
**Abbildung 4-83:** Beim Abkippen in den Beschickerkübel mittels Einstichthermometer gemessene Anlieferungstemperaturen des Asphaltmischgutes

Wie in Abbildung 4-83 zu erkennen ist, betrug die Asphaltmischguttemperatur im Beschickerkübel beim Einbau des Referenzfeldes im Durchschnitt 168 °C. Beim temperaturabgesenkten Probe-feld (NTA-Feld) wurden im Beschickerkübel Asphaltmischguttemperaturen von durchschnittlich 142 °C gemessen. Somit konnte eine Temperaturreduzierung von im Mittel 26 K erzielt werden. Während des Einbaus waren die Folgen der Temperaturreduzierung bereits beim Abkippen des Asphaltmischgutes in Form einer deutlich reduzierten Dampfentwicklung sichtbar. Auch der Asphaltgeruch war während des Einbaus des temperaturabgesenkten Asphaltmischgutes subjektiv weniger wahrnehmbar.



**Abbildung 4-84:** Dampfentwicklung beim Einbau des Referenzfeldes (links), Dampfentwicklung beim Einbau des NTA-Feldes (rechts)

Abbildung 4-85 zeigt den Verlauf der Oberflächentemperatur des Asphaltes, gemessen in der Mitte der Einbaubohle in einem Raster von 25 x 25 cm. Im Mittel lagen die erreichten Oberflächentemperaturen im Referenzfeld bei 143 °C und im NTA-Feld bei 122 °C. Somit betrug die Temperaturdifferenz auch hinter der Einbaubohle mehr als 20 K.

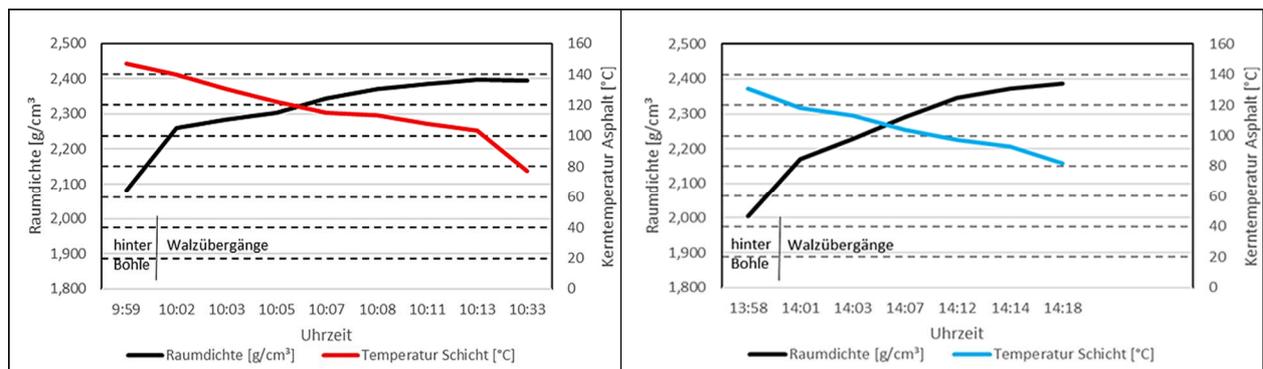


**Abbildung 4-85: Oberflächentemperatur in der Mitte der Einbaubohle eines Fertigers**

Für die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens wurde jeweils ein Prüfabschnitt im Referenz- und NTA-Feld angelegt, in welchem die Dichteänderung der eingebauten Asphaltdeckschicht nach jedem Walzübergang mittels Isotopsonde dokumentiert wurde. Die innerhalb der Asphalt-schicht herrschende Temperatur (Schichttemperatur) wurde über darin angebrachte Temperatur-Messfühler erfasst. Hierdurch war es möglich, das für die Walzen verfügbare Verdichtungs-zeitfenster abzuschätzen. Für die Verdichtung wurde folgende Reihenfolge und Anzahl an stati-schen und dynamischen Walzübergängen angestrebt:

- 1 x statisch                      Kombiwalze
- 2 bis 3 x dynamisch        Kombiwalze
- 2 x dynamisch                Glattmantelwalze
- 2 x statisch                     Glattmantelwalze

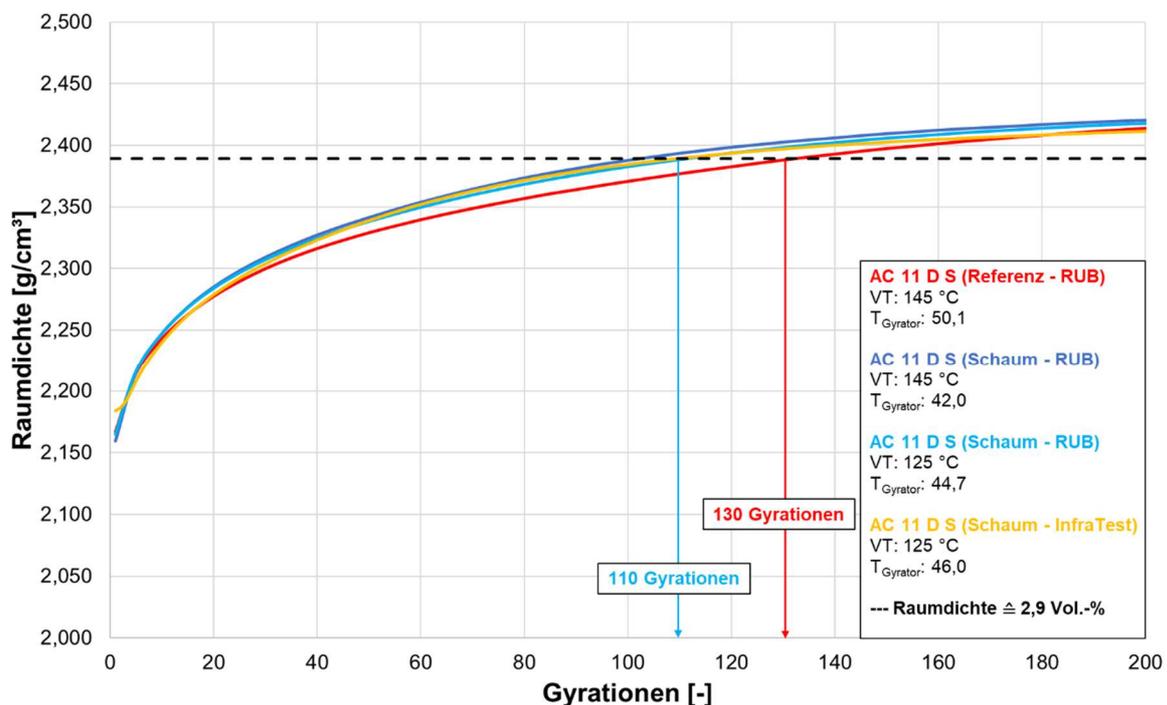
In Abbildung 4-86 sind die mittels Isotopsonde gemessenen Raumdichten nach jedem Walzübergang sowie die Schichttemperatur des AC 11 D S über die Einbauzeit dargestellt.



**Abbildung 4-86: Verdichtungszunahme in Abhängigkeit der Walzübergänge und Kerntemperatur, Referenzfeld (links) und NTA-Feld (rechts)**

Wie in Abbildung 4-86 zu erkennen ist, wurde beim Schaumbitumenmischgut eine im Vergleich zum Referenzmischgut geringe Vorverdichtung durch die Einbaubohle erreicht, was mit einer geringeren Asphaltmischguttemperatur begründet werden kann. Gleichzeitig scheinen die Walzen eine stärkere Verdichtung des Schaumbitumenmischgutes bei jedem Walzübergang erzielt zu haben, wie anhand des anfänglich steileren Anstieges der Verdichtungskurve zu erkennen ist (siehe Abbildung 4-86). Beim Referenzfeld ist die Schichttemperatur – die Lufttemperatur betrug zu diesem Zeitpunkt 11 °C – innerhalb von 15 Minuten von 147 °C auf 100 °C abgesunken. Nach dieser Zeit war auch das Erreichen der Endverdichtung der Schicht festzustellen. Eine weitere Zunahme der Raumdichten durch die Walzen blieb aus. Beim NTA-Feld wurde die Schichttemperatur von 100 °C, trotz deutlich höherer Lufttemperatur von 22 °C, bereits nach 12 Minuten erreicht. Anders als beim Referenzfeld konnte hier auch unterhalb einer Schichttemperatur von 100 °C noch eine Verdichtungszunahme festgestellt werden.

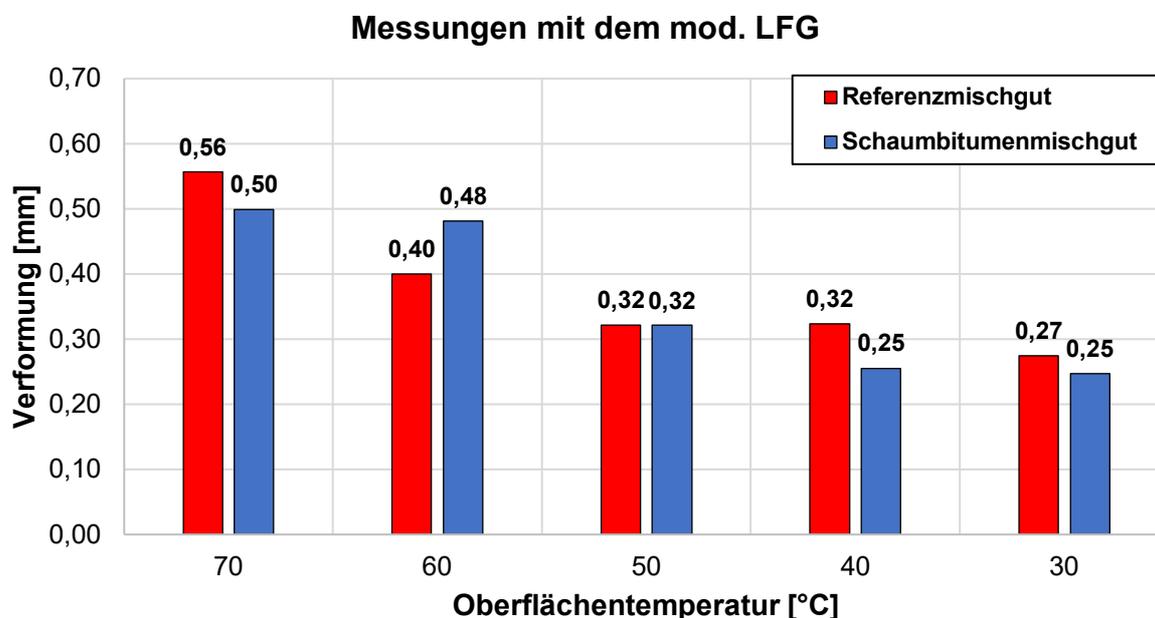
Um weitere Erkenntnisse über das Verdichtungsverhalten zu gewinnen, wurden Gyrator-Probekörper aus dem Referenz- und Schaumbitumenmischgut hergestellt. Die Herstellung der Gyrator-Probekörper mit dem noch warmen Schaumbitumenmischgut erfolgte möglichst zeitnah bei der InfraTest Prüftechnik GmbH in Brackenheim. Weitere Gyrator-Probekörper wurden am wiedererwärmten Asphaltmischgut an der Ruhr-Universität Bochum hergestellt. Aus den gewonnenen Daten wurden Verdichtungskurven erstellt und zusätzlich der Verdichtungswiderstand  $T_{\text{Gyrator}}$  in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 10 B bestimmt. Die Ergebnisse der Verdichtungsversuche mit dem Gyrator sind in Abbildung 4-87 dargestellt.



**Abbildung 4-87: Untersuchung des Verdichtungsverhaltens mit dem Gyrator – AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat (L 1141)**

Beim Schaumbitumenmischgut zeigt sich auch bei reduzierter Verdichtungstemperatur ein, wenn auch geringfügig, besseres Verdichtungsverhalten im Vergleich zum Referenzmischgut, wie an der geringeren Gyrationenanzahl und am geringeren Verdichtungswiderstand  $T_{\text{Gyrator}}$  zu erkennen ist (siehe Abbildung 4-87). Dies trifft sowohl auf das wiedererwärmte Mischgut (Schaum – RUB) als auch auf das bei InfraTest verdichtete nicht wiedererwärmte Mischgut (Schaum – InfraTest) zu.

Vor dem Hintergrund einer möglicherweise langsameren Steifigkeitszunahme durch Schaumbitumen, wurde das Verformungsverhalten mit dem modifizierten leichten Fallgewichtsgerät (mod. LFG) untersucht. Hierzu wurde sowohl das Referenzfeld als auch das NTA-Feld bei unterschiedlichen Temperaturen mit dem mod. LFG beansprucht und die daraus resultierenden Verformungen dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung 4-88 dargestellt.



**Abbildung 4-88: Untersuchung des Verformungsverhaltens mit dem modifizierten leichten Fallgewicht**

Die im Referenz- und NTA-Feld gemessenen Verformungen liegen auf einem vergleichbaren Niveau (siehe Abbildung 4-88). Aus den ermittelten Verformungen lassen sich keinerlei Tendenzen einer verminderten Steifigkeit durch den Einsatz von Schaumbitumen ableiten. Die Ergebnisse des mod. LFG bekräftigen die im Labormaßstab durch nachgelagerte Steifigkeitsuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse.

#### 4.3.5 L 1141 – Kontrollprüfungen und Performanceuntersuchungen

Tabelle 4-33 beinhaltet die Ergebnisse der am Asphaltmischgut und an der eingebauten Asphalt-schicht durchgeführten Kontrollprüfungen.

**Tabelle 4-33: Ergebnisse der Kontrollprüfungen (L 1141)**

		Einheit	AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat		Anforderung
			25/55-55 A (RC) (konventionell)	25/55-55 A (RC) (geschäumt)	
	Bindemittel	-			-
Mischgut	Bindemittelgehalt	M.-%	6,0	6,0	mind. 6,0
	EP RuK	°C	66,8	65,8	-
	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,449	2,450	-
	Raumdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,412	2,415	-
	Hohlraumgehalt	Vol.-%	1,5	1,4	2,5 bis 3,5
Schicht	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,441	2,444	-
	Raumdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,361	2,336	-
	Hohlraumgehalt	Vol.-%	3,3	4,4	≤ 5,5
	Schichtenverbund	kN	33,7	28,7	mind. 12,0

Mit Ausnahme des Hohlraumgehaltes der Marshall-Probekörper, welcher bei beiden Varianten den Mindestwert nach TL Asphalt-StB unterschreitet, wurden alle Anforderungen an die Schicht- und Mischguteigenschaften erfüllt. Insbesondere beim Asphaltmischgut können keine Unterschiede zwischen den im Zuge der Kontrollprüfung ermittelten Kenngrößen der Referenz- und Schaumbitumenvariante festgestellt werden. Der für das NTA-Feld ermittelte Schichtenverbund ist im Vergleich zum Schichtenverbund des Referenzfeldes geringfügig niedriger. Ungeachtet dessen wird die in den ZTV Asphalt-StB gestellte Mindestanforderung an den Schichtenverbund, trotz abgesenkter Misch- und Verdichtungstemperatur sicher eingehalten. Die Bohrkerne des NTA-Feldes weisen im Vergleich zu den Bohrkerne des Referenzfeldes einen um 1,1 Vol.-% höheren Hohlraumgehalt auf (siehe Tabelle 4-33), welcher die Folge der reduzierten Asphaltmischguttemperatur sein könnte. Die Anforderungen an den Hohlraumgehalt der eingebauten Schicht werden aber auch hier eingehalten.

### Untersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel

In Abbildung 4-89 sind die temperaturabhängigen Ergebnisse der rückgewonnenen Bindemittel im DSR bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz dargestellt. Tabelle 4-34 beinhaltet die an den rückgewonnenen Bindemitteln mittels BBR- und DSR-Prüfung ermittelten Kenngrößen.

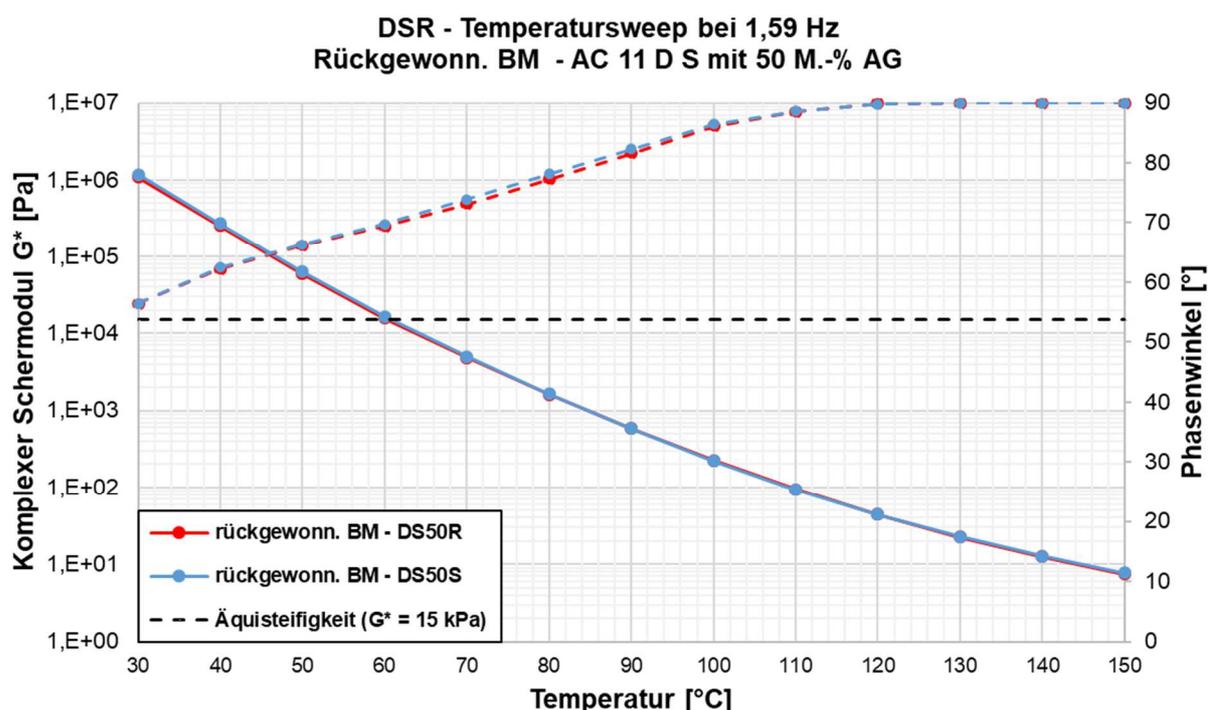


Abbildung 4-89: Untersuchung des rückgewonn. Bindemittels – Temperatursweep bei 1,59 Hz

Tabelle 4-34: Ergebnisse der am rückgewonn. Bindemittel durchgeführten BBR- und DSR-Prüfung

Temperatur	Rückgewonn. BM – DS50R	Rückgewonn. BM – DS50S
Äquisteifigkeitstemperatur T (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	60,5 °C	60,9 °C
Phasenwinkel δ (G* = 15 kPa) bei 1,59 Hz	69,5 °	70,1 °
Temperatur (T <sub>S300</sub> )	-20,2 °C	-19,6 °C
Temperatur (T <sub>m0,3</sub> )	-18,4 °C	-17,8 °C

Die Ergebnisse der BBR- und DSR-Prüfung zeigen keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Eigenschaften des aus dem Referenzmischgut rückgewonnenen Bindemittels und des aus dem Schaumbitumenmischgut rückgewonnenen Bindemittels. Die geringfügigen Abweichungen zwischen den einzelnen Kenngrößen (siehe Tabelle 4-34) liegen innerhalb der Präzision des jeweiligen Prüfverfahrens.

### Asphaltsteifigkeit

Die Untersuchung der Asphaltsteifigkeit erfolgte an Ausbauproben ( $BK_{\text{Strecke}}$ ) und an aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkernen ( $BK_{\text{WSV}}$ ). Die Asphalt-Probepplatten der Referenzvariante wurden im Straßenbaulabor der RUB nach dem Wiedererwärmen des Mischgutes mit einer Verdichtungstemperatur von  $145 \pm 5 \text{ °C}$  hergestellt. Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten aus dem Schaumbitumenmischgut erfolgte innerhalb einer Stunde nach Probenahme mit der gleichen Verdichtungstemperatur bei der TPA GmbH in Stuttgart. Die Tabelle 4-35 beinhaltet die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen der aus der Untersuchungsstrecke und aus der Asphalt-Probepplatte entnommenen Bohrkern. In Abbildung 4-90 sind die Steifigkeitsmoduln bei einer Prüffrequenz von 10 Hz dargestellt. Abbildung 4-91 beinhaltet die nach TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelten Masterkurven.

**Tabelle 4-35: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S mit 50 M.-% AG (L 1141)**

Prüftemperatur	Prüffrequenz	DS50R Referenz $BK_{\text{WSV}}$	DS50S Schaum $BK_{\text{WSV}}$	DS50R Referenz $BK_{\text{Strecke}}$	DS50S Schaum $BK_{\text{Strecke}}$
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	19.592	18.371	17.564	15.976
-10	0,3	21.545	20.377	19.309	17.569
-10	1	23.180	22.436	20.847	19.335
-10	3	25.157	23.854	22.265	20.502
-10	5	26.017	24.720	22.560	21.205
-10	10	26.833	25.680	23.501	21.695
0	0,1	12.888	10.368	10.956	9.639
0	0,3	15.118	12.678	12.781	11.390
0	1	17.663	15.217	15.020	13.598
0	3	19.832	17.472	17.110	15.369
0	5	20.605	18.482	17.984	16.452
0	10	21.660	20.059	19.011	17.840
5	0,1	9.438	7.193	8.062	7.030
5	0,3	11.701	9.200	10.005	8.848
5	1	14.114	11.637	12.344	10.788
5	3	16.473	14.122	14.346	12.743
5	5	17.700	15.318	15.358	13.783
5	10	18.909	16.723	17.014	15.062
10	0,1	6.461	4.252	5.006	4.468
10	0,3	8.315	5.962	6.673	5.916
10	1	10.809	8.119	8.885	7.732
10	3	13.120	10.373	11.032	9.731
10	5	14.422	11.632	12.111	10.663
10	10	15.746	13.335	13.202	12.025
20	0,1	2.488	1.425	1.931	1.763
20	0,3	3.669	2.192	2.880	2.542
20	1	5.222	3.418	4.166	3.723
20	3	7.054	4.908	5.803	5.186
20	5	8.044	5.841	6.720	5.949
20	10	9.524	7.091	7.966	7.116

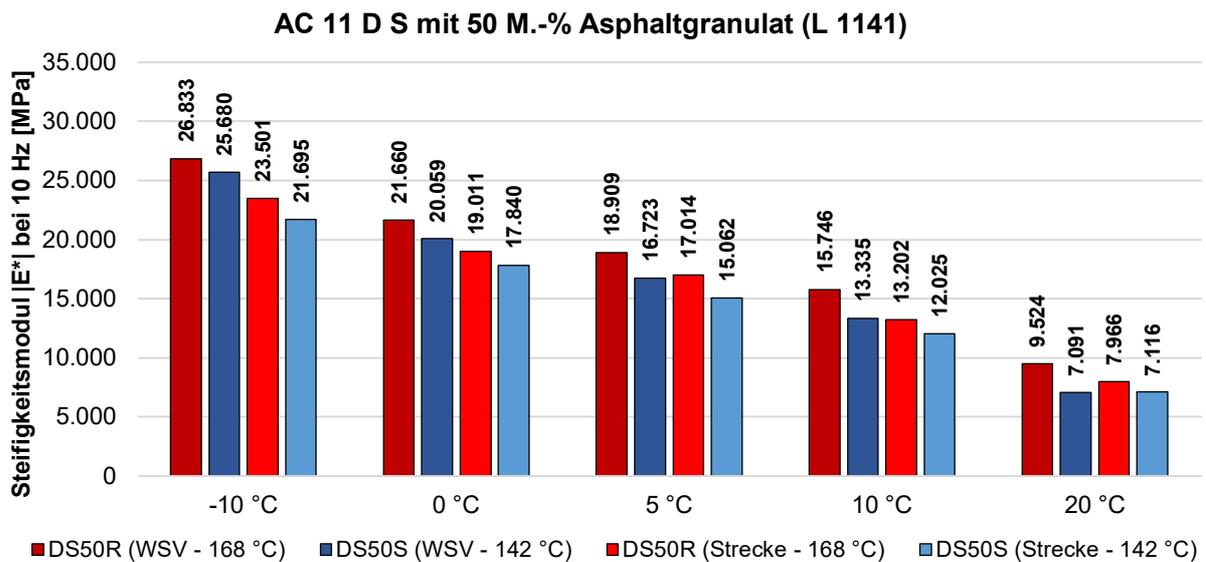


Abbildung 4-90: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat (L 1141)

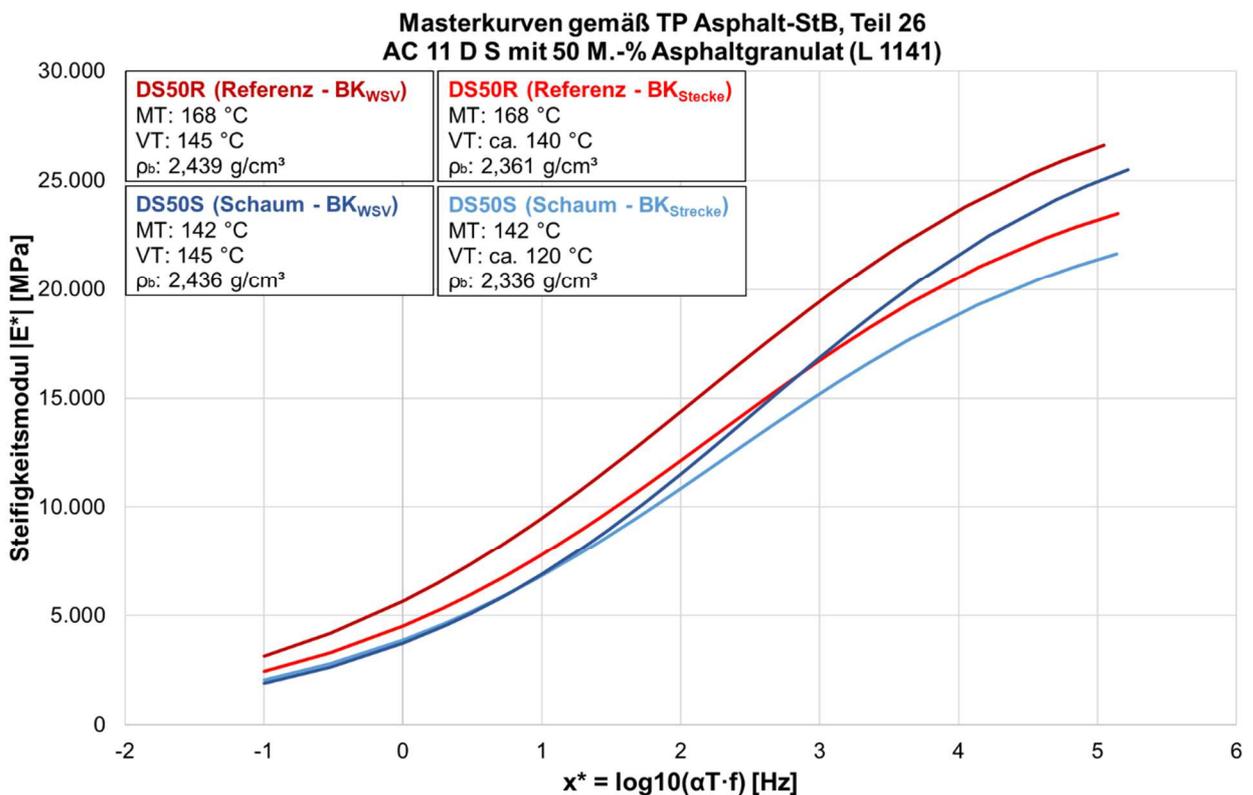
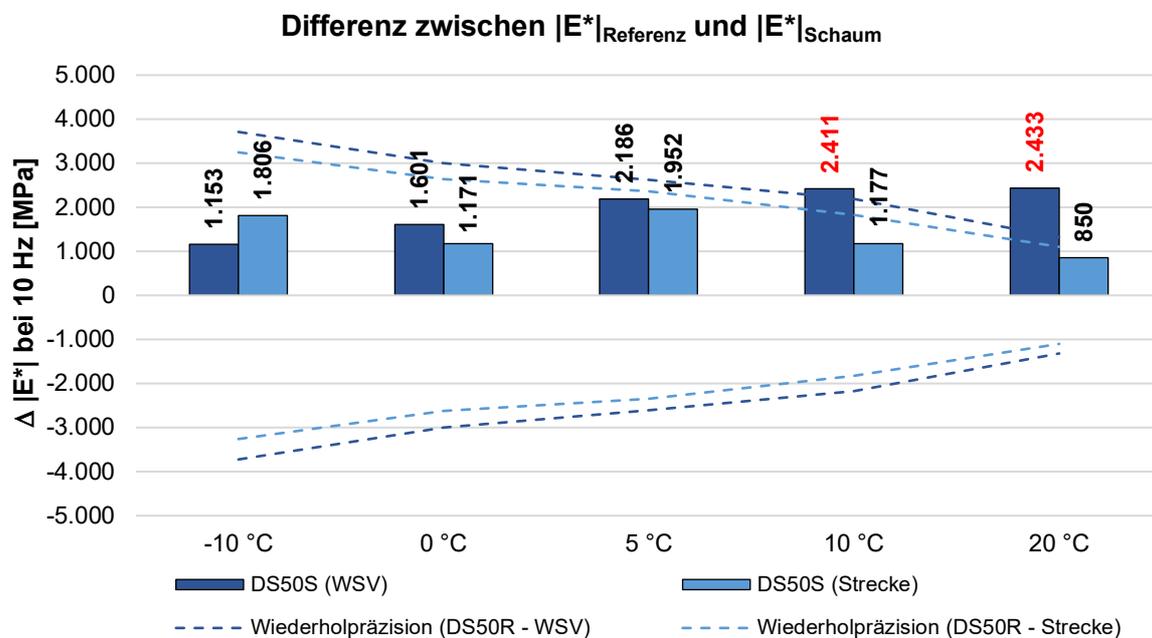


Abbildung 4-91: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 11 D S mit 50 M.-% AG (L 1141)

Wie anhand der in Abbildung 4-90 dargestellten Resultate und den Verläufen der Masterkurven (siehe Abbildung 4-91) zu erkennen ist, befinden sich die Steifigkeitsmoduln der aus den Asphalt-Probekörpern entnommenen Bohrkern auf einem höheren Niveau als die Steifigkeitsmoduln der aus der Untersuchungsstrecke entnommenen Bohrkern. Eine höhere Lagerungsdichte des Asphaltmischgutes der Probekörper aus den Asphalt-Probekörpern kann als eine, vermutlich aber nicht alleinige Ursache für die hier ermittelten Unterschiede genannt werden.

Grundsätzlich zeigt auch der Vergleich zwischen Referenz- und Schaumbitumenmischgut einen Unterschied in der Höhe der Steifigkeitsmoduln. Abbildung 4-92 beinhaltet die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvarianten bei einer Prüffrequenz von 10 Hz.



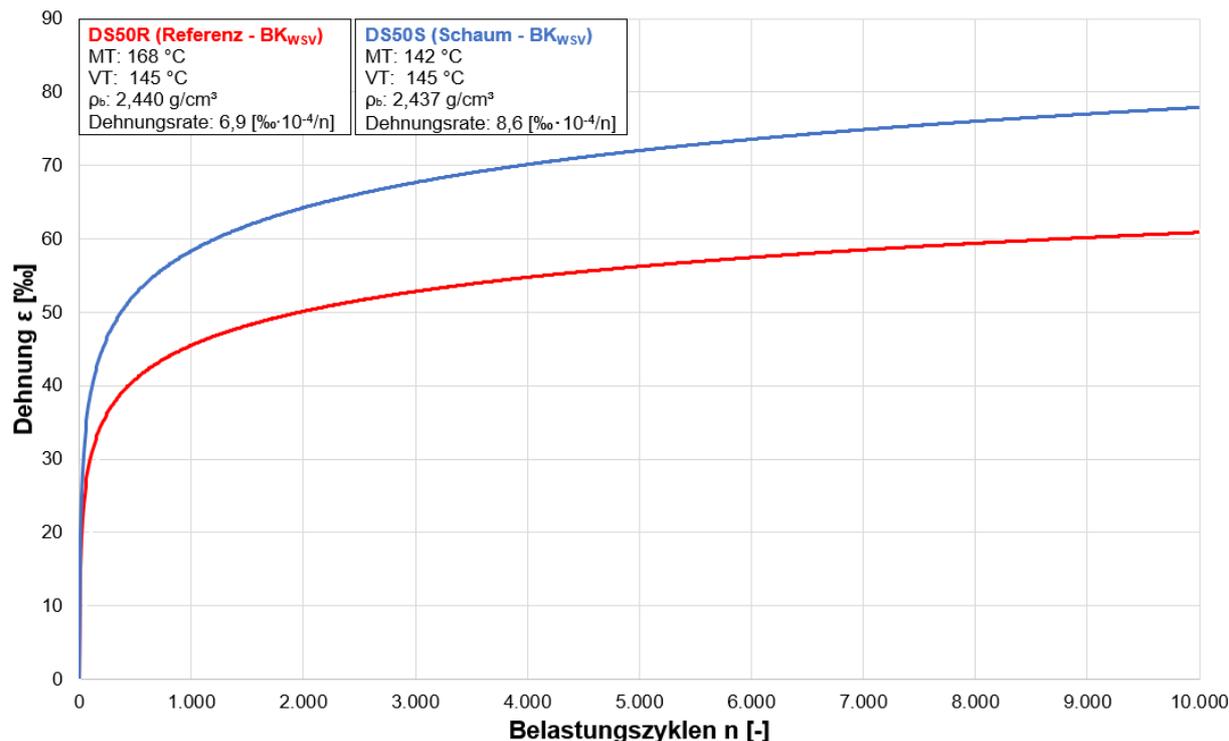
**Abbildung 4-92: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln – AC 11 D S mit 50 M.-% AG (Prüffrequenz 10 Hz)**

Die Abweichung zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvariante fällt bei den Ausbauproben aus der Strecke, trotz deutlich höherer Differenz der Raumdichten ( $2,361 \text{ g/cm}^3$  und  $2,336 \text{ g/cm}^3$ ), im Durchschnitt geringer aus als bei den Bohrkernen der Asphalt-Probepplatten (vgl. Abbildung 4-92). Wie in Abbildung 4-92 darüber hinaus zu erkennen ist, liegen die Abweichungen bei den Ausbauproben, anders als bei den im Labor hergestellten Proben (WSV), innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision. Bei den WSV-Proben ist außerdem eine Zunahme der Steifigkeitsdifferenz mit steigender Temperatur zu erkennen.

Die Ursache für die geringere Steifigkeit des mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltmischgutes (DS50S) konnte nicht gefunden werden. Sowohl der Hohlraumgehalt der Probekörper als auch die Eigenschaften des rückgewonnenen Bindemittels sind bei beiden Varianten nahezu identisch und können als Ursache ausgeschlossen werden. Restwasser aus der Schaumbitumenherstellung scheint als Ursache eher unwahrscheinlich zu sein, kann allerdings auch nicht ausgeschlossen werden.

### Verformungsverhalten bei Wärme

Die Untersuchung des Verformungsverhaltens bei Wärme erfolgte an Ausbauproben und an aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkernen. In Abbildung 4-93 sind die mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven und die Dehnungsraten der aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkern dargestellt.



**Abbildung 4-93: Impulskriechkurven (BK<sub>WSV</sub>) – AC 11 D S mit 50 M.-% (L 1141)**

Wie anhand der in Abbildung 4-93 dargestellten Impulskriechkurven zu erkennen ist, weist die Schaumbitumenvariante höhere bleibende Verformungen und eine höhere Dehnungsrate auf als die Referenzvariante. Als mögliche Ursache hierfür kann die geringere Steifigkeit des mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltmischgutes infolge von Restwasser im Bitumen vermutet werden.

Für die Beurteilung des Verformungsverhaltens mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch führen die „Ergänzungen zu den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg“ [ETV-StB-BW, 2020] für Asphaltbeton für Asphaltdeckschichten eine zulässige Dehnungsrate von  $10 \text{ ‰} \cdot 10^{-4}/\text{n}$  am Marshall-Probekörper als Anforderungswert an. Da Marshall-Probekörper grundsätzlich geringere Dehnungsraten als Bohrkerne aus Asphalt-Probepplatten hervorbringen, kann davon ausgegangen werden, dass die beiden hier untersuchten Varianten mit Dehnungsraten von  $6,9 \text{ ‰} \cdot 10^{-4}/\text{n}$  und  $8,6 \text{ ‰} \cdot 10^{-4}/\text{n}$  ein noch anforderungsgerechtes Verformungsverhalten bei Wärme aufweisen.

Für die Untersuchung des Verformungsverhaltens der Ausbauproben wurde von der Vorgabe der TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 abgewichen. Demnach sollen bei Bohrkerne mit Schichtdicken kleiner 60 mm zwei Proben derselben Schicht planparallel geschliffen und anschließend „mit geeignetem Klebstoff deckungsgleich aufeinander fixiert werden“, um so eine Probekörperhöhe von 60 mm zu erhalten. Um einen möglichen Einfluss durch eine geklebte Schichtgrenze auszuschließen und den Aufwand bei der Bohrkernentnahme zu minimieren, wurden die aus der Erprobungsstrecke entnommenen Bohrkerne stattdessen mit einem Teil der sich unter der Asphaltdeckschicht befindenden Asphalttragschicht geprüft, um so die erforderliche Schichtdicke von 60 mm einzuhalten. Die Bohrkerne setzten sich somit aus 40 mm Asphaltdeck- und 20 mm Asphalttragschicht zusammen. Während der Prüfung des ersten Probekörpers wurde ein Versagen der Asphalttragschicht mit anschließendem Versagen der Asphaltdeckschicht festgestellt (siehe Abbildung 4-94). Um das Verformungsverhalten der Asphaltdeckschicht dann doch

isoliert zu betrachten, wurde die Asphalttragschicht bei den anschließend geprüften Bohrkernen entfernt. Die nachfolgend geprüften Probekörper hatten infolgedessen eine Höhe von 40 mm. Die Abbildung 4-95 zeigt exemplarisch die Impulskriechkurven der Referenzvariante mit und ohne Asphalttragschicht. In Abbildung 4-96 sind die Impulskriechkurven der Referenz- und Schaumbitumenvariante gegenübergestellt.



Abbildung 4-94: Beginnendes Versagen der Asphalttragschicht (links) und vollständiges Versagen des Bohrkerns (rechts)

Einaxialer Druck-Schwellversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1  
 Ausbauproben (BK<sub>Strecke</sub>) - AC 11 D S mit 50 M.-% AG (Referenz)

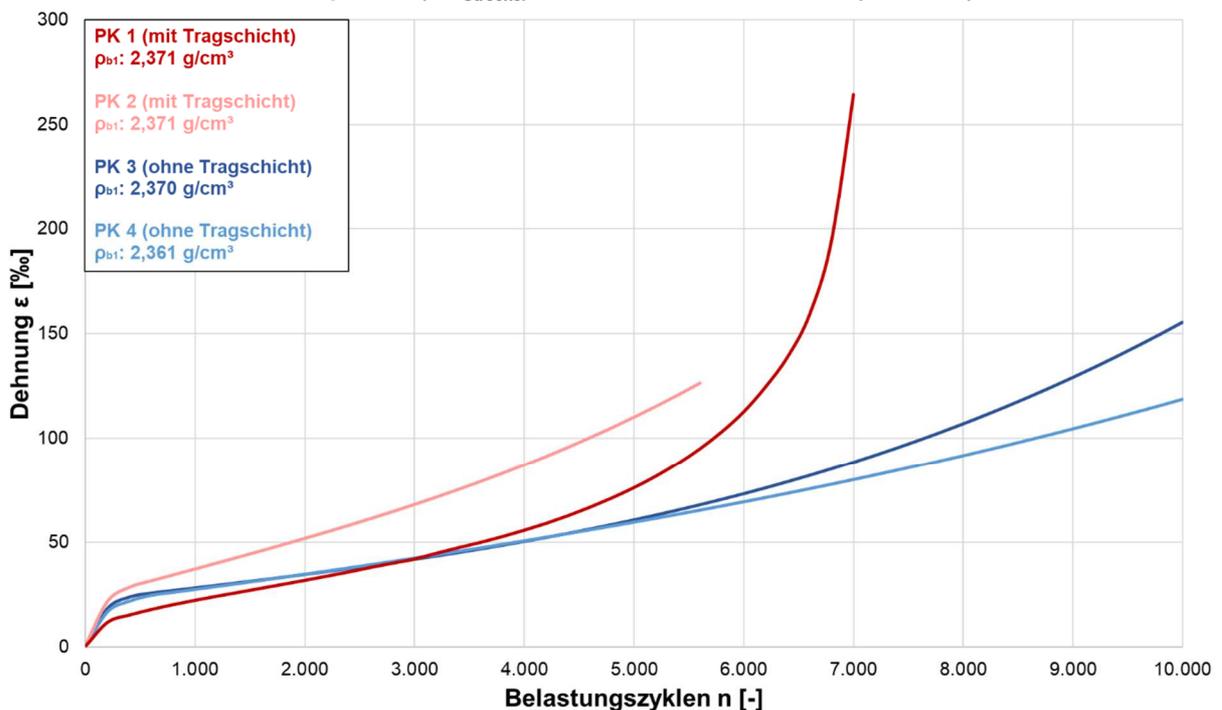
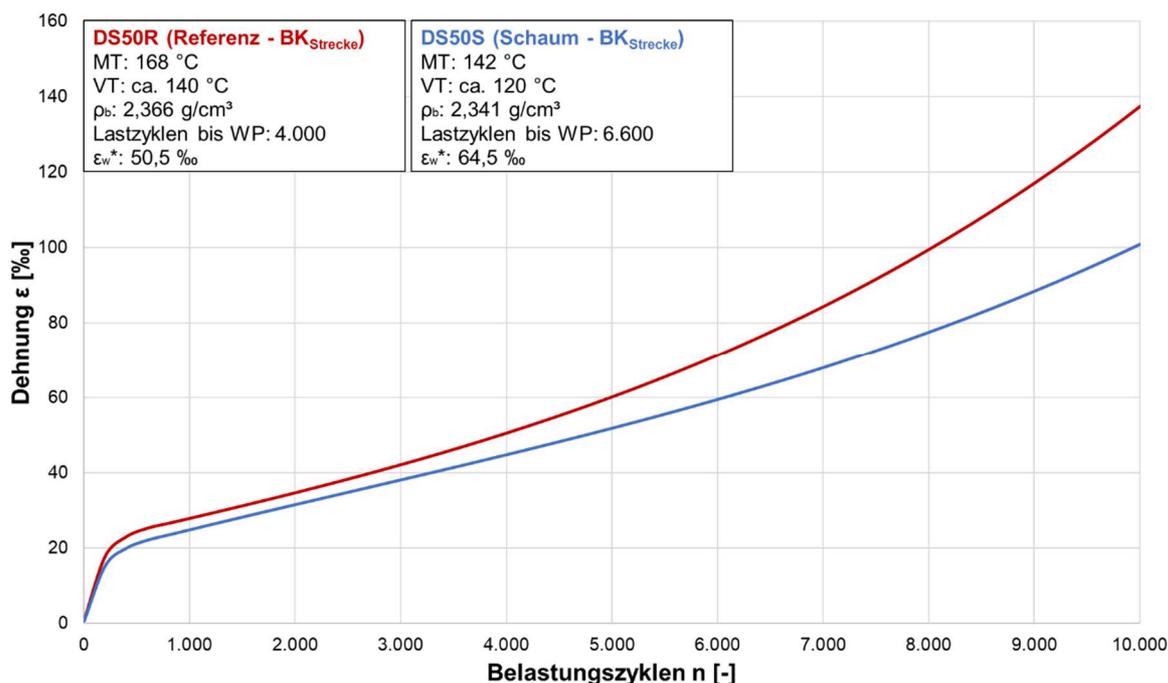


Abbildung 4-95: Impulskriechkurven mit und ohne Asphalttragschicht (BK<sub>Strecke</sub>)



**Abbildung 4-96: Impulskriechkurven (BK<sub>Stretch</sub>) – AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat (L 1141)**

Wie anhand der in Abbildung 4-96 dargestellten Resultate zu erkennen ist, weisen die Ausbauproben deutlich höhere Dehnungen auf als die Bohrkern aus den Asphalt-Probepplatten. Diese Beobachtung entspricht den Erfahrungen aus der Literatur, wonach mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch untersuchte Ausbauproben höhere Verformungen aufweisen als Bohrkern aus im Laboratorium hergestellten Asphalt-Probepplatten. Zusätzlich zu den insgesamt höheren Dehnungen, kann an den in Abbildung 4-96 dargestellten Impulskriechkurven jeweils ein Wendepunkt festgestellt werden. Ein Wendepunkt in der Impulskriechkurve deutet laut TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1 auf eine „beginnende und fortschreitende volumendilatante Gefügezerstörung des Probekörpers“ hin. In diesem Zusammenhang ist in Abbildung 4-96 zu erkennen, dass der Wendepunkt bei der Referenzvariante etwa 2.600 Belastungszyklen früher eintritt als beim Asphaltmischgut, welches mit Schaumbitumen hergestellt wurde. Dieser Unterschied ist allerdings unter Berücksichtigungen der hohen Verformungen als nicht signifikant einstufen. Vielmehr kann in Anbetracht aller Resultate für beide Varianten ein vergleichbares Verformungsverhalten angenommen werden.

**Kälteeigenschaften**

Für die Untersuchung der Kälteeigenschaften der Referenz- und Schaumbitumenvariante wurden Abkühlversuche nach TP Asphalt-StB, Teil 46 A durchgeführt. Tabelle 4-36 beinhaltet diejenige Temperatur, die zum Versagen des Probekörpers geführt hat (Bruchtemperatur), und die dazu korrespondierende Ausfallspannung.

**Tabelle 4-36: Ergebnisse der Abkühlersuche**

		Einheit	AC 11 D S mit 50 M.-% RC	
			Referenz	Schaum
Anfangstemperatur	T <sub>0</sub>	°C	20	20
Abkühlgeschwindigkeit	dT	K/h	-10	-10
Ausfallspannung	σ <sub>F</sub>	MPa	4,846	5,434
Bruchtemperatur	T <sub>F</sub>	°C	-20,2	-24,8

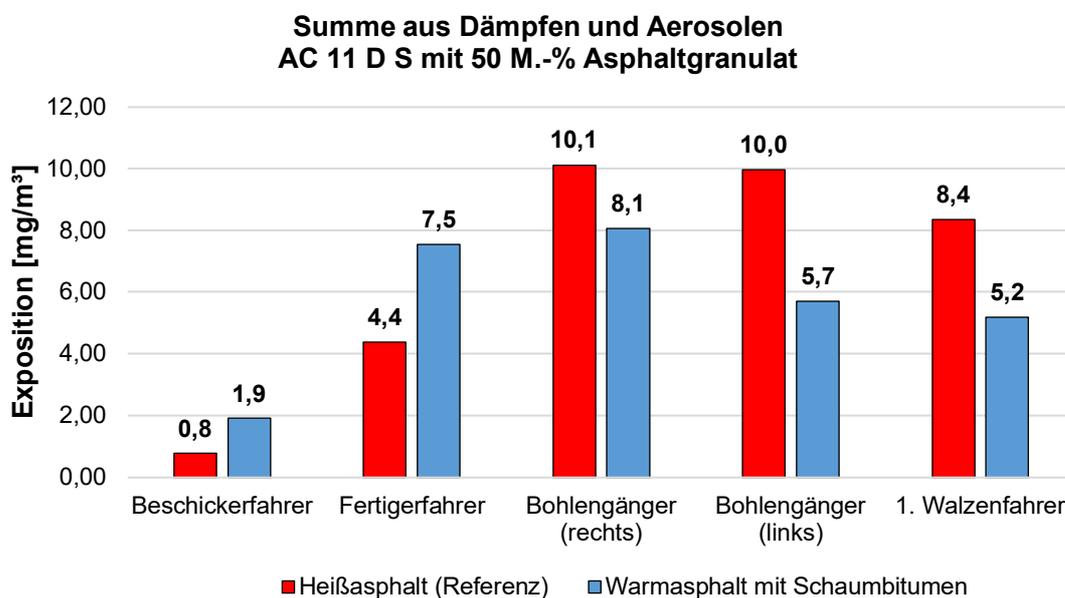
Grundsätzlich weisen beide Varianten ein gutes Tieftemperaturverhalten auf. Im Vergleich zur Referenzvariante sind die Ausfallspannung und die Bruchtemperatur der Schaumbitumenvariante etwas besser einzustufen (vgl. Tabelle 4-36). Es wurden für das mit Schaumbitumen hergestellte Asphaltmischgut eine um 0,588 MPa höhere Ausfallspannung und eine um 4,6 K tiefere Bruchtemperatur ermittelt. Für die Verbesserung der Kälteeigenschaften durch den Einsatz von Schaumbitumen kann nach bisherigem Kenntnisstand kein Erklärungsmodell angeführt werden. Hierzu müssen weitere und systematische Untersuchungen an Asphalten mit Schaumbitumen folgen.

#### 4.3.6 L 1141 – Expositionsmessungen

Um einen Rückschluss über die Exposition des Einbaupersonals mit Dämpfen und Aerosolen bei der Heißverarbeitung des in Asphalt verwendeten Bitumens zu erhalten, wurden Messungen gemäß TRGS 402 durch die Eurofins Umwelt Nord GmbH durchgeführt. Die Messungen dauerten je Asphaltmischgutvariante zwei Stunden an und wurden unter Verwendung von personengetragenen Messgeräten durchgeführt. An folgenden Messpunkten wurden die Expositionen gegenüber Dämpfen und Aerosolen erfasst:

- Fahrer Straßenfertiger
- Bohrlängänger links und Bohrlängänger rechts
- Beschickerfahrer
- Walzenfahrer (1. Walze)

Die Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen sind in Abbildung 4-97 dargestellt.

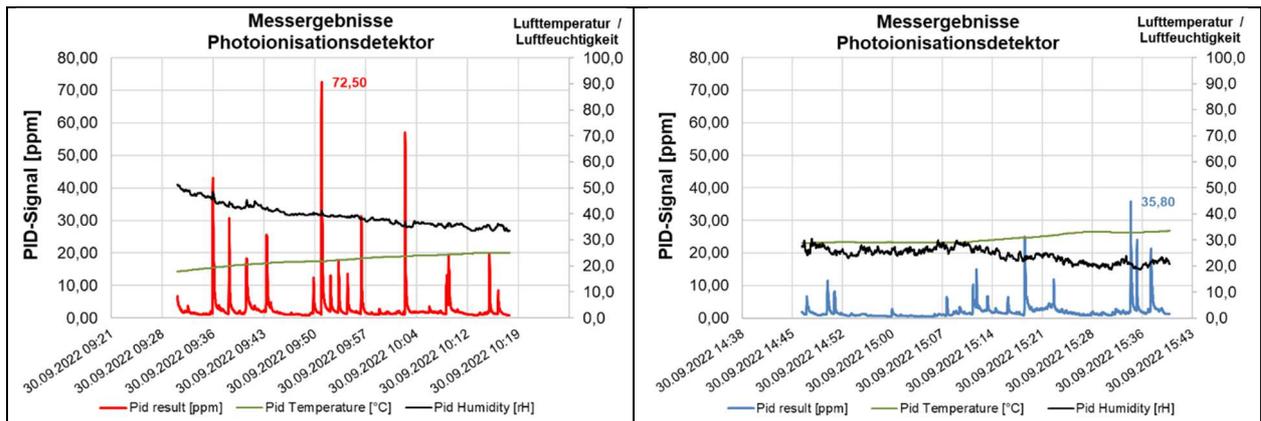


**Abbildung 4-97: Summe der gemessenen Dämpfe und Aerosole beim Einbau von Heiß- und Warmasphalt auf der L 1141**

Mit Ausnahme des Beschickerfahrers, wird der Arbeitsplatzgrenzwert von 1,5 mg/m³ sowohl beim Heißasphalt als auch beim Warmasphalt deutlich überschritten. Beim Warmasphalt wurden in drei von fünf Fällen geringere Expositionen im Vergleich zum Heißasphalt gemessen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Temperaturreduzierung zurückzuführen sind. Die stärkste Reduktion an Dämpfen und Aerosolen kann mit 42,8 % beim linken Bohrlängänger beobachtet werden. Beim 1. Walzenfahren und beim rechten Bohrlängänger sind die Expositionen beim Warmasphalt um 37,9 % und 20,2 % geringer als beim Heißasphalt. Beim Beschicker- und

Fertigerfahrer wurden hingegen höhere Expositionen im Zusammenhang mit dem Warmasphalt gemessen. Die Witterungsbedingungen als Ursache für die höheren Messergebnisse beim Warmasphalt, können ausgeschlossen werden, da zum Zeitpunkt der Messungen stabile Windverhältnisse vorlagen; über den gesamten Einbautag war es nahezu windstill. Ein Einfluss des mineralöhlhaltigen Trennmittels kann allerdings nicht ausgeschlossen werden.

Zusätzliche Expositionsmessungen wurden zur Erfahrungssammlung mit dem Photoionisationsdetektor (PID) durchgeführt. Hierzu wurde ein PID für einen Zeitraum von etwa einer Stunde an den linken Bohrlängänger angebracht. Die Messergebnisse (Messsignal in parts per million) sind in Abbildung 4-98 (links Heißasphalt, rechts Warmasphalt) dargestellt.



**Abbildung 4-98: PID-Messung (linker Bohrlängänger) – Heißasphalt (links), Warmasphalt (rechts)**

Bei den Messungen mit dem PID wurde eine deutlich geringere Anzahl an Ausschlägen in der Messkurve während des Einbaus des Warmasphaltes ermittelt. Auch die Höhe der Ausschläge (Belastungen) ist beim Warmasphalt deutlich niedriger (siehe Abbildung 4-98).

4.3.7 L 1141 – Visuelle Begutachtung nach ca. einem Jahr

Abbildung 4-99 zeigt zwei Abschnitte der L 1141, ca. ein Jahr nach den durchgeführten Asphaltierungsarbeiten. Bei der visuellen Begutachtung wurden keine sichtbaren Schäden oder sonstige Mängel festgestellt. Eine Evaluierung des Zustandes nach längerer Liegedauer sollte zur Erfahrungssammlung erfolgen.



**Abbildung 4-99: Visuelle Inspektion der L 1141 nach ca. 1 Jahr**

4.3.8 L 548 Kandel – Minderslachen (Rheinland-Pfalz)

Die zweite Untersuchungsstrecke wurde in der 45. KW 2022 im Zuge der Sanierung der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht der L 548 bei Winden bis zum Ortseingang Minderslachen (Rheinland-Pfalz) realisiert. Die L 548 weist eine Belastungsklasse Bk3,2 auf. Entsprechend dieser Belastungsklasse hat der Baulastträger eine 3,5 cm Asphaltdeckschicht und eine 6,5 cm Asphaltbinderschicht ausgeschrieben. Für das Mischgutkonzept der Asphaltdeckschicht kam ein Asphaltbeton AC 11 D S mit einem polymermodifizierten Bitumen 25/55-55 A (RC) zum Einsatz. Für die Asphaltbinderschicht wurde im Sinne einer Vergleichbarkeit der Erkenntnisse mit den im Labor gemischten Varianten ein Splittmastixasphaltmischgut SMA 16 B S mit einem PmB 25/55-55 A (RC) ausgewählt. Im Zuge des Bauvorhabens wurden je Asphaltschicht vier Erprobungsfelder angelegt. Die ersten beiden Erprobungsfelder wurden mit zwei unterschiedlichen Anteilen an Asphaltgranulat bei konventioneller Temperatur eingebaut. Die restlichen beiden Erprobungsfelder wurden mit dem gleichen Mischgutkonzept, jedoch temperaturabgesenkt unter Einsatz von Schaumbitumen hergestellt. Die Länge der Erprobungsfelder wurde so gewählt, dass eine Messdauer von mindestens 2 Stunden für die Messung der Dämpfe und Aerosole sichergestellt werden konnte. Die Probefelder der L 548 sind in Abbildung 4-100 schematisch dargestellt. Tabelle 4-32 beinhaltet allgemeine Informationen dieser Untersuchungsstrecke.

<b>AC 11 D S mit 30 M.-% AG (Referenz)</b>	<b>AC 11 D S mit 50 M.-% AG (Referenz)</b>	<b>AC 11 D S mit 30 M.-% AG (temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen)</b>	<b>AC 11 D S mit 50 M.-% AG (temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen)</b>
<b>SMA 16 B S mit 40 M.-% AG (Referenz)</b>	<b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (Referenz)</b>	<b>SMA 16 B S mit 40 M.-% AG (temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen)</b>	<b>SMA 16 B S mit 60 M.-% AG (temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen)</b>

Abbildung 4-100: Schematische Darstellung der Erprobungsfelder auf der L 548

Tabelle 4-37: Untersuchungsstrecke L 548

Art der Baumaßnahme	Deckenerneuerung in beide Fahrtrichtungen
Standort	Kandel – Minderslachen (Rheinland-Pfalz)
Bezeichnung	L 548
Belastungsklasse	BK3,2
Fahrbahnaufbau	3,5 cm Asphaltdeckschicht 6,5 cm Asphalttragschicht
Länge der Untersuchungsstrecke	ca. 1,5 km 1. Teilabschnitt: Heißbauweise 2. Teilabschnitt: Temperaturabgesenkter Asphalt
Asphaltmischgut	AC 11 D S mit 30 M.-% Asphaltgranulat AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat SMA 16 B S mit 40 M.-% Asphaltgranulat SMA 16 B S mit 60 M.-% Asphaltgranulat
Bindemittel	25/55-55 A (RC)
Bauablauf	Vollsperrung und Einbau über die gesamte Straßenbreite

#### 4.3.9 L 548 – Asphaltmischgutherstellung

Die Mischgutlieferung sowie die Erstellung der Erstprüfungen erfolgte durch das Asphaltmischwerk B. Gesonderte Erstprüfungen für die mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltmischgüter wurden nicht erstellt. Für den Warmasphalt mit Schaumbitumen wurde eine Asphaltmischguttemperatur von 140 bis 150 °C angestrebt. Um vergleichbare Produktionsbedingungen zu schaffen, wurden alle Mischgutvarianten mit denselben Mischzeiten produziert. Die Herstellung des Schaumbitumens erfolgte mit einem Schaumbitumenmodul der Firma Benninghoven (vgl. Kapitel 3.3.1, Abbildung 3-9). Das 25/55-55 A (RC) wurde bei einer Bitumentemperatur von ca. 170 °C (Anlieferungstemperatur) und einem Wassergehalt von 3 % aufgeschäumt. Schaumbitumenproben wurden an der Asphaltmischanlage nicht entnommen. Das für die Mischgutherstellung eingesetzte PmB 25/55-55 A (RC) wurde allerdings an der RUB unter Einsatz einer Labor-Schaumbitumenanlage und einem Laser-Entfernungsmessgerät untersucht. Die Schaumbitumenherstellung erfolgte hier ebenfalls bei 170 °C und einem Wassergehalt von 3 %. Die Untersuchungen ergaben eine Expansionsrate von 12,5 und eine Halbwertzeit von 7 Sekunden.

#### 4.3.10 L 548 – Asphalteinbau und baubegleitende Untersuchungen

Im Zuge der Baumaßnahme wurde ein Fertiger mit einem Ventilationssystem zur Absaugung von Bitumendämpfen verwendet. Um eine unterbrechungsfreie Versorgung des Fertigers mit Asphaltmischgut sicherzustellen, kam zudem ein Beschicker zum Einsatz. Abbildung 4-101 zeigt die Asphaltkolonne beim Einbau der temperaturabgesenkten Asphaltbinderschicht.



**Abbildung 4-101: Einbau der temperaturabgesenkten Asphaltbinderschicht**

Die Erprobungsfelder der Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht wurden jeweils an einem Tag hergestellt. Die Lufttemperatur schwankte an den Einbautagen zwischen 6 °C und 9 °C am Morgen sowie 14 °C und 16 °C am Mittag. Zur Kontrolle der Asphaltmischguttemperatur wurden Temperaturmessungen am Beschickerkübel mittels Einstichthermometer durchgeführt. Die Temperaturmessungen ergaben für die konventionell hergestellte Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht Mischguttemperaturen von durchschnittlich 170 °C. Die Mischguttemperatur der mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht lag bei durchschnittlich 140 °C und 143 °C. Eine Absenkung der Mischguttemperatur um ca. 30 K konnte somit realisiert werden. Der Einfluss der Temperaturabsenkung auf die Menge der aus dem Asphalt austretenden Dämpfe war vor Ort mit dem bloßen Auge sichtbar (vgl. Abbildung 4-102).



**Abbildung 4-102: Dampfentwicklung beim Einbau des konventionellen Mischgutes (links) und temperaturabgesenkten Mischgutes (rechts)**

4.3.11 L 548 – Kontrollprüfungen und Performanceuntersuchungen

Tabelle 4-38 und Tabelle 4-39 beinhalten die Ergebnisse der am Asphaltmischgut und an der eingebauten Asphaltmischschicht durchgeführten Kontrollprüfungen. Die MPK wurden mit einer Verdichtungstemperatur von  $145 \pm 5 \text{ °C}$  hergestellt.

**Tabelle 4-38: Ergebnisse der Kontrollprüfungen SMA 16 B S (L 548)**

		Einheit	SMA 16 B S 40 M.-% AG Heißasphalt	SMA 16 B S 60 M.-% AG Heißasphalt	SMA 16 B S 40 M.-% AG Warmasphalt	SMA 16 B S 60 M.-% AG Warmasphalt
Mischgut	Bindemittel		25/55-55 A (RC) (konventionell)		25/55-55 A (RC) (geschäumt)	
	Bindemittelgehalt	M.-%	5,4	5,3	5,3	5,4
	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,433	2,447	2,446	2,439
	Raumdichte MPK	g/cm <sup>3</sup>	2,334	2,367	2,358	2,357
	Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	4,1	3,3	3,6	3,4
Schicht	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,445	2,443	2,441	2,446
	Raumdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,408	2,389	2,397	2,370
	Hohlraumgehalt	Vol.-%	1,5	2,2	1,8	3,1
	Schichtenverbund	kN	30,2	28,5	28,9	27,2

**Tabelle 4-39: Ergebnisse der Kontrollprüfungen AC 11 D S (L 548)**

		Einheit	AC 11 D S 30 M.-% AG Heißasphalt	AC 11 D S 50 M.-% AG Heißasphalt	AC 11 D S 30 M.-% AG Warmasphalt	AC 11 D S 50 M.-% AG Warmasphalt
Mischgut	Bindemittel		25/55-55 A (RC) (konventionell)		25/55-55 A (RC) (geschäumt)	
	Bindemittelgehalt	M.-%	6,1	6,3	6,4	6,2
	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,419	2,418	2,417	2,421
	Raumdichte MPK	g/cm <sup>3</sup>	2,371	2,370	2,370	2,360
	Hohlraumgehalt MPK	Vol.-%	2,0	2,0	1,9	2,5
Schicht	Rohdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,415	2,419	2,415	2,418
	Raumdichte	g/cm <sup>3</sup>	2,266	2,223	2,351	2,272
	Hohlraumgehalt	Vol.-%	6,2	8,1	2,7	6,0
	Schichtenverbund	kN	34,8	32,8	37,3	40,9

Beim Splittmastixasphaltbinder wurden sowohl die Anforderungen an das Asphaltmischgut als auch die Anforderungen an die eingebaute Asphaltdeckenschicht erfüllt. Wie bei der Untersuchungstrecke auf der L 1141 weisen auch hier die Ausbauproben der temperaturabgesenkten Erprobungsfelder höhere Hohlraumgehalte auf als die Ausbauproben der Referenzfelder (vgl. Tabelle 4-38). Der maximal zulässige Hohlraumgehalt von 5,5 Vol.-% an Ausbauproben nach [H AI ABi, 2015] wird dennoch deutlich unterschritten.

Bei der Asphaltdeckenschicht wird der minimal zul. Hohlraumgehalt am MPK nach den TL Asphalt-StB bei drei von vier Varianten unterschritten. Davon abgesehen können keine relevanten Unterschiede zwischen den volumetrischen Kenngrößen und dem Bindemittelgehalt der Referenz- und Schaumbitumenmischgüter festgestellt werden (siehe Tabelle 4-39). Anders sind die Eigenschaften der eingebauten Schichten zu bewerten. In diesem Zusammenhang wird der maximal zul. Hohlraumgehalt von 5,5 Vol.-% nach den ZTV Asphalt-StB in drei von vier Fällen überschritten (siehe Tabelle 4-39). Die Temperaturabsenkung als Ursache für den hohen Hohlraumgehalt der Asphaltdeckenschicht kann ausgeschlossen werden, da auch beim Heißasphalt die Anforderungen nicht eingehalten werden konnten. Während der Asphaltierungsarbeiten der Asphaltdeckenschicht kam es zum Ausfall einer Walze, für die im Laufe des Einbautages kein Ersatz gefunden werden konnte. Dies hatte vermutlich zur Folge, dass nicht ausreichend verdichtet werden konnte. Einzig bei der mit Schaumbitumen hergestellten Variante mit 30 M.-% Asphaltgranulat konnte die notwendige Verdichtung erreicht werden (vgl. Tabelle 4-39). Auch der Warmasphalt mit 50 M.-% Asphaltgranulat ist im Vergleich zum Heißasphalt besser verdichtet worden. Obwohl dies für eine Verdichtungsverbesserung durch Schaumbitumen spricht, sind vermutlich Gründe im Bauablauf hierfür verantwortlich.

**Untersuchungen am rückgewonnenen Bindemittel**

In Abbildung 4-103 sind die temperaturabhängigen Ergebnisse der rückgewonnenen Bindemittel im DSR bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz dargestellt. Tabelle 4-40 und Tabelle 4-41 beinhalten die an den rückgewonnenen Bindemitteln mittels BBR- und DSR-Prüfung ermittelten Kennwerte.

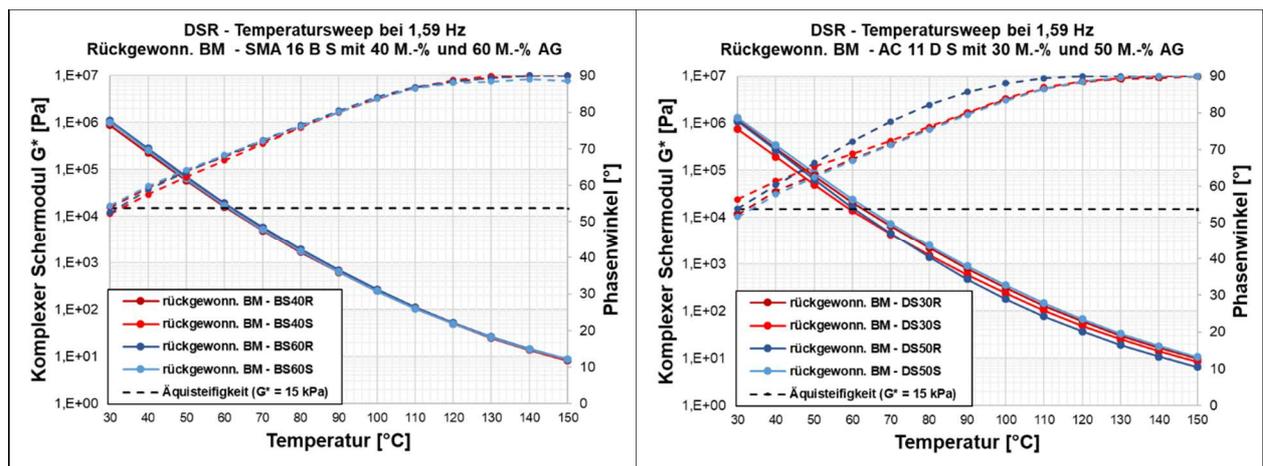


Abbildung 4-103: Temperatursweep am rückgewonn. BM bei 1,59 Hz – SMA 16 B S und AC 11 D S

Tabelle 4-40: Ergebnisse der am rückgewonn. Bindemittel durchgeführten BBR- und DSR-Prüfung (SMA 16 B S)

Temperatur	Rückgew. BM BS40R Referenz	Rückgew. BM BS40S Schaum	Rückgew. BM BS60R Referenz	Rückgew. BM BS60S Schaum
Äquisteifigkeitstemperatur T ( $G^* = 15 \text{ kPa}$ ) bei 1,59 Hz	60,6	62,0	62,1	61,1
Phasenwinkel $\delta$ ( $G^* = 15 \text{ kPa}$ ) bei 1,59 Hz	68,2	67,2	69,0	68,7
Temperatur ( $T_{S300}$ )	-23,2	-22,6	-21,2	-22,2
Temperatur ( $T_{m0,3}$ )	-20,0	-19,4	-20,0	-20,6

Tabelle 4-41: Ergebnisse der am rückgewonn. Bindemittel durchgeführten BBR- und DSR-Prüfung (AC 11 D S)

Temperatur	Rückgew. BM DS30R Referenz	Rückgew. BM DS30S Schaum	Rückgew. BM DS50R Referenz	Rückgew. BM DS50S Schaum
Äquisteifigkeitstemperatur T ( $G^* = 15 \text{ kPa}$ ) bei 1,59 Hz	63,0	59,4	60,7	64,1
Phasenwinkel $\delta$ ( $G^* = 15 \text{ kPa}$ ) bei 1,59 Hz	68,6	68,6	72,7	68,8
Temperatur ( $T_{S300}$ )	-22,2	-20,4	-20,8	-19,8
Temperatur ( $T_{m0,3}$ )	-20,4	-19,0	-19,2	-18,4

Beim rückgewonnenen Bindemittel der Asphaltbinderschichtvarianten befinden sich die mittels BBR- und DSR-Prüfung ermittelten Kennwerte auf einem vergleichbaren Niveau. Die geringfügigen Abweichungen zwischen den einzelnen Kenngrößen (siehe Tabelle 4-40) liegen überwiegend innerhalb der Präzision des jeweiligen Prüfverfahrens.

Beim rückgewonnenen Bindemittel der Asphaltdeckschichtvarianten ist eine größere Streuung der Untersuchungsergebnisse zu erkennen (siehe Abbildung 4-103 und Tabelle 4-41). Eine eindeutige Systematik, die auf eine stärkere Alterung des Bindemittels bei höherer Produktions-temperatur oder einen Einfluss durch Schaumbitumen hindeutet, ist aus den hier aufgeführten Ergebnissen allerdings nicht erkennbar.

### Asphaltsteifigkeit

Die Untersuchung der Asphaltsteifigkeit erfolgte an Ausbauproben ( $BK_{\text{Strecke}}$ ) und an aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkernen ( $BK_{\text{WSV}}$ ). Die Asphalt-Probepplatten der Referenzvarianten wurden im Straßenbaulabor der RUB nach Wiedererwärmen des Mischgutes mit einer Verdichtungstemperatur von  $145 \pm 5 \text{ °C}$  hergestellt. Die Herstellung der Asphalt-Probepplatten aus den Warmasphalten erfolgte innerhalb einer Stunde nach Probenahme mit einer Verdichtungstemperatur von  $145 \pm 5 \text{ °C}$  am KIT. Tabelle 4-42 und Tabelle 4-44 beinhalten die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen der aus den Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkern. In Tabelle 4-43 und Tabelle 4-45 sind die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen der Ausbauproben ( $BK_{\text{Strecke}}$ ) zusammengefasst. In Abbildung 4-104 bis Abbildung 4-107 sind die Steifigkeitsmoduln bei einer Prüffrequenz von 10 Hz dargestellt. Abbildung 4-108 bis Abbildung 4-111 beinhalten die nach den TP Asphalt-StB, Teil 26 ermittelten Masterkurven.

Tabelle 4-42: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat (BK<sub>WSV</sub>)

Prüf-temperatur	Prüf-frequenz	BS40R Referenz BK <sub>WSV</sub>	BS40S Schaum BK <sub>WSV</sub>	BS60R Referenz BK <sub>WSV</sub>	BS60S Schaum BK <sub>WSV</sub>
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	17.172	16.155	18.954	18.056
-10	0,3	19.094	18.014	20.492	19.685
-10	1	20.656	20.133	22.627	21.635
-10	3	22.495	21.520	23.930	22.882
-10	5	23.248	22.619	24.599	23.798
-10	10	23.819	23.398	25.288	24.458
0	0,1	10.410	9.539	12.543	11.158
0	0,3	12.525	11.520	14.482	13.135
0	1	14.500	13.873	16.986	15.260
0	3	16.419	15.782	18.955	17.240
0	5	17.630	17.252	20.061	18.395
0	10	19.152	18.186	21.316	19.585
5	0,1	7.412	6.592	8.412	8.875
5	0,3	9.306	8.366	10.379	10.993
5	1	11.570	10.635	12.777	13.188
5	3	13.860	12.793	14.931	15.331
5	5	14.841	13.796	16.001	16.260
5	10	15.975	15.381	17.593	17.885
10	0,1	5.308	4.323	5.907	6.207
10	0,3	6.895	5.734	7.741	7.985
10	1	8.992	7.592	9.820	10.133
10	3	11.025	9.607	12.051	12.483
10	5	12.152	10.641	13.065	13.542
10	10	13.567	12.261	14.739	14.875
20	0,1	1.838	1.951	2.513	2.613
20	0,3	2.620	2.780	3.566	3.860
20	1	3.745	3.987	5.079	5.346
20	3	5.132	5.518	6.875	7.174
20	5	5.893	6.416	7.824	8.201
20	10	7.042	7.757	9.170	9.463

SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG (BK<sub>WSV</sub>)

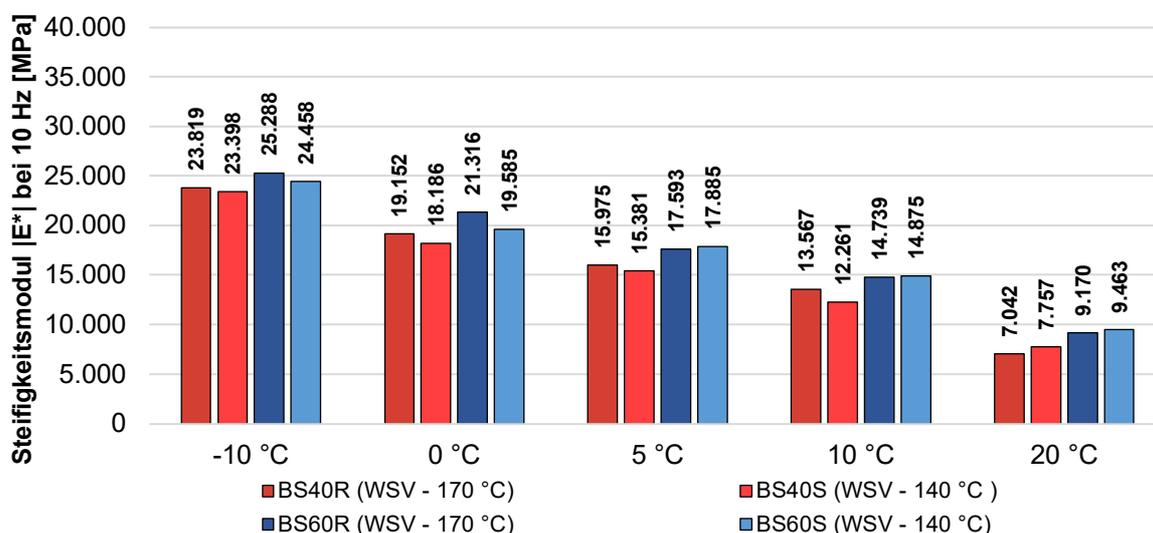


Abbildung 4-104: Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG (BK<sub>WSV</sub>)

Tabelle 4-43: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat (BK<sub>Strecke</sub>)

Prüftemperatur	Prüffrequenz	BS40R Referenz BK <sub>Strecke</sub>	BS40S Schaum BK <sub>Strecke</sub>	BS60R Referenz BK <sub>Strecke</sub>	BS60S Schaum BK <sub>Strecke</sub>
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	16.137	14.998	15.231	15.041
-10	0,3	17.951	16.558	17.013	16.525
-10	1	19.958	18.504	18.587	17.619
-10	3	21.610	20.079	20.101	18.908
-10	5	22.070	20.703	20.583	19.781
-10	10	23.362	21.563	21.600	19.912
0	0,1	8.913	8.795	9.255	9.781
0	0,3	10.908	10.685	11.204	11.539
0	1	13.226	12.833	13.082	13.326
0	3	15.390	14.894	15.185	15.147
0	5	16.464	15.930	16.206	15.980
0	10	17.648	17.130	17.402	17.115
5	0,1	5.438	6.233	6.765	6.714
5	0,3	7.034	8.020	8.674	8.478
5	1	9.216	10.234	10.689	10.428
5	3	11.300	12.353	12.840	12.414
5	5	12.471	13.178	13.630	13.363
5	10	13.874	14.784	15.194	14.426
10	0,1	3.795	4.465	4.582	4.296
10	0,3	5.289	6.098	6.083	5.724
10	1	7.139	8.131	8.153	7.297
10	3	9.120	10.357	10.397	9.165
10	5	10.252	11.326	11.295	9.972
10	10	11.767	12.830	12.526	11.219
20	0,1	1.572	1.635	1.811	1.841
20	0,3	2.426	2.425	2.676	2.669
20	1	3.649	3.652	3.922	3.887
20	3	5.251	5.242	5.560	5.470
20	5	6.151	6.094	6.503	6.272
20	10	7.294	7.355	7.719	7.407

SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG (BK<sub>Strecke</sub>)

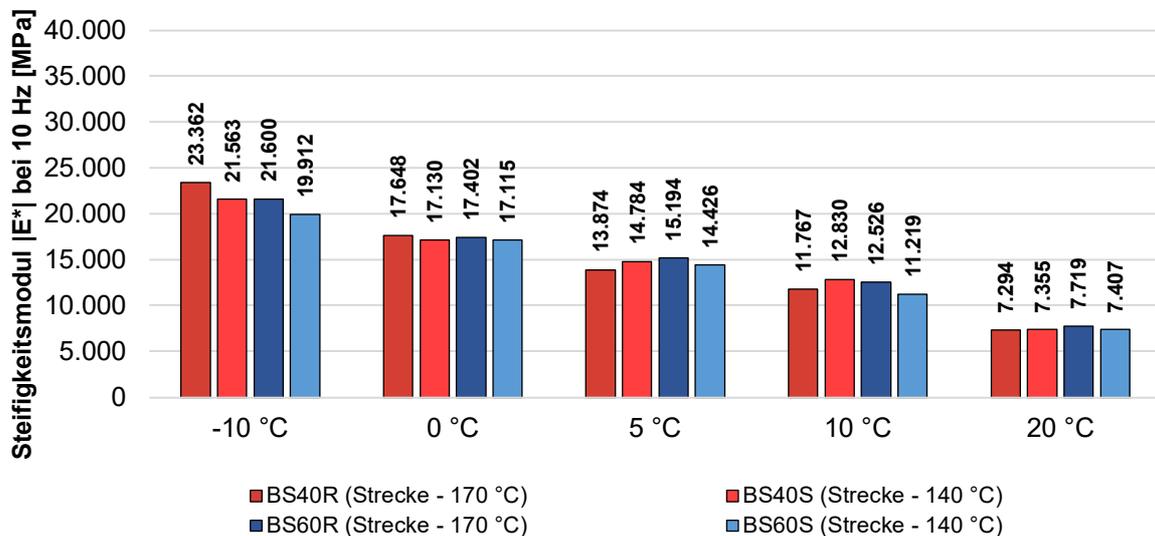


Abbildung 4-105: Steifigkeitsmodul bei 10 Hz – SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% AG (BK<sub>Strecke</sub>)

Tabelle 4-44: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat (BK<sub>WSV</sub>)

Prüftemperatur	Prüffrequenz	DS30R Referenz BK <sub>WSV</sub>	DS30S Schaum BK <sub>WSV</sub>	DS50S Referenz BK <sub>WSV</sub>	DS50S Schaum BK <sub>WSV</sub>
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	19.935	17.922	18.485	19.485
-10	0,3	21.855	20.277	20.365	21.518
-10	1	23.976	22.067	22.563	23.480
-10	3	25.226	23.564	24.825	24.675
-10	5	26.021	24.875	25.291	25.354
-10	10	27.260	26.140	26.522	26.313
0	0,1	13.253	11.423	11.912	13.986
0	0,3	15.476	13.658	14.297	15.833
0	1	17.865	15.962	16.843	18.177
0	3	20.252	18.193	18.688	20.213
0	5	20.943	19.352	20.137	21.799
0	10	22.356	20.683	21.546	22.628
5	0,1	9.260	7.360	8.384	9.215
5	0,3	11.263	9.335	10.381	11.127
5	1	13.651	11.742	12.831	13.312
5	3	16.134	14.198	15.147	15.663
5	5	17.200	15.203	15.987	16.845
5	10	18.551	16.833	17.911	18.167
10	0,1	6.798	4.916	5.564	6.900
10	0,3	8.572	6.692	7.405	8.665
10	1	10.987	8.756	9.596	10.977
10	3	13.311	11.118	12.022	13.017
10	5	14.634	12.307	13.497	14.483
10	10	15.935	14.040	14.610	15.909
20	0,1	2.703	1.880	2.261	2.701
20	0,3	3.821	2.779	3.320	3.871
20	1	5.429	4.120	4.828	5.460
20	3	7.418	5.847	6.607	7.297
20	5	8.458	6.751	7.575	8.467
20	10	9.830	8.166	8.977	10.076

AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (BK<sub>WSV</sub>)

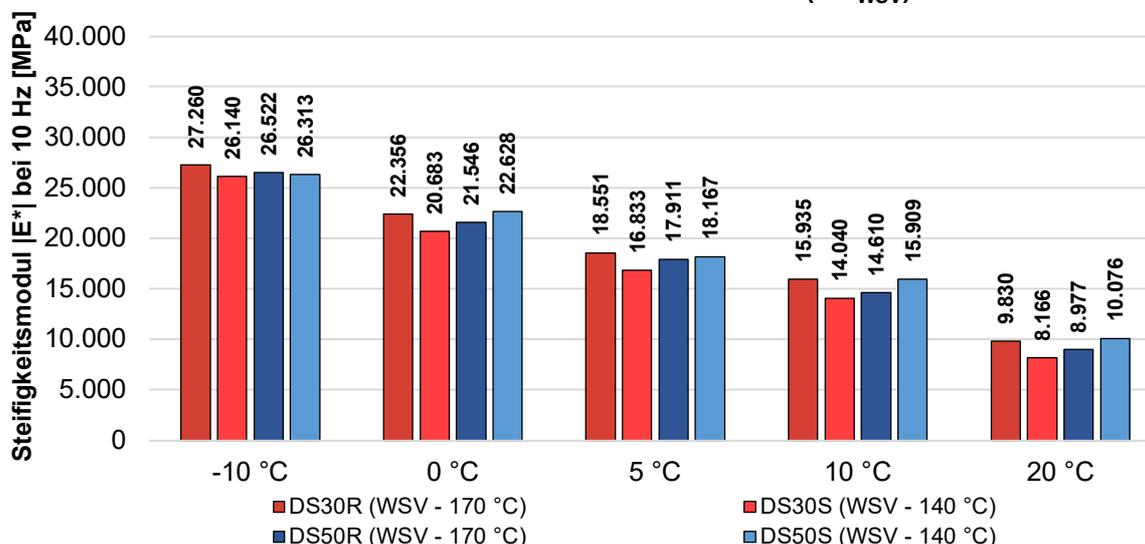


Abbildung 4-106: Steifigkeitsmodul bei 10 Hz – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (BK<sub>WSV</sub>)

Tabelle 4-45: Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat (BK<sub>Strecke</sub>)

Prüf-temperatur	Prüf-frequenz	DS30R Referenz BK <sub>Strecke</sub>	DS30S Schaum BK <sub>Strecke</sub>	DS50R Referenz BK <sub>Strecke</sub>	DS50S Schaum BK <sub>Strecke</sub>
T [°C]	f [Hz]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]	E*  [MPa]
-10	0,1	14.794	15.490	12.140	14.547
-10	0,3	16.136	17.336	13.672	15.886
-10	1	17.505	19.549	14.954	17.490
-10	3	19.065	21.336	16.103	18.768
-10	5	19.692	22.192	16.729	19.512
-10	10	20.713	22.817	17.674	20.365
0	0,1	9.525	9.438	7.532	9.004
0	0,3	11.326	11.381	9.160	10.697
0	1	13.146	13.741	10.715	12.384
0	3	14.847	16.157	12.356	14.390
0	5	15.728	17.288	13.411	15.181
0	10	16.945	18.434	14.172	16.296
5	0,1	6.448	6.238	5.136	6.550
5	0,3	8.070	7.893	6.645	8.216
5	1	10.022	10.113	8.382	10.064
5	3	11.818	12.545	10.179	11.891
5	5	12.850	13.695	10.898	12.672
5	10	13.839	14.886	11.912	13.809
10	0,1	4.108	4.076	3.128	4.230
10	0,3	5.539	5.615	4.296	5.651
10	1	7.291	7.689	5.920	7.453
10	3	9.000	9.930	7.452	9.171
10	5	9.988	10.917	8.156	10.239
10	10	11.212	12.325	9.321	11.275
20	0,1	1.736	1.563	1.150	1.722
20	0,3	2.487	2.413	1.736	2.499
20	1	3.574	3.630	2.622	3.610
20	3	4.900	5.156	3.707	5.021
20	5	5.808	5.991	4.312	5.718
20	10	6.749	7.143	5.146	6.927

AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (BK<sub>Strecke</sub>)

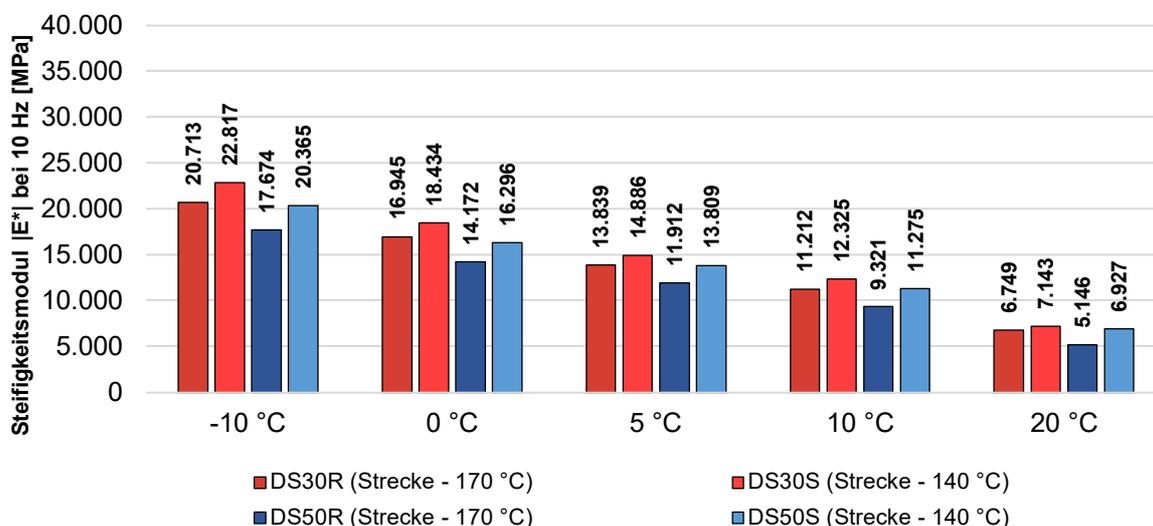


Abbildung 4-107: Steifigkeitsmodul bei 10 Hz – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (BK<sub>Strecke</sub>)

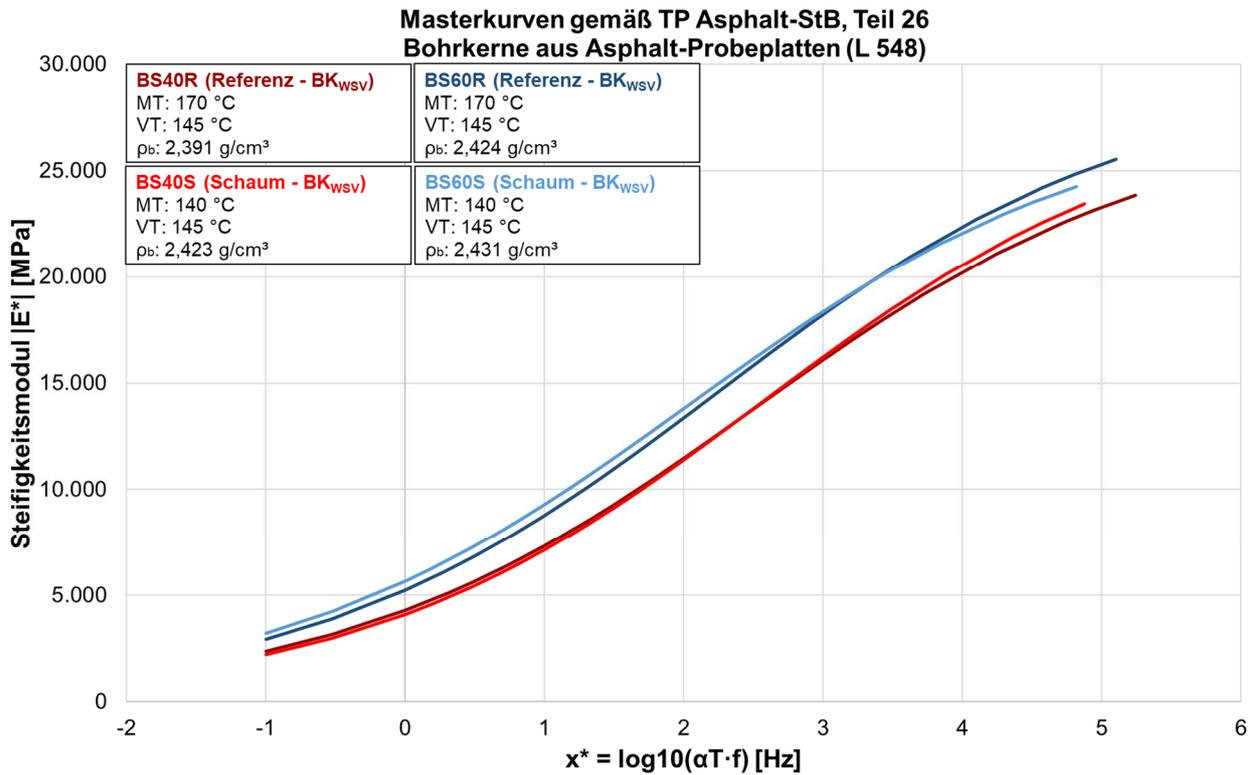


Abbildung 4-108: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S (BK<sub>wsv</sub> L 548)

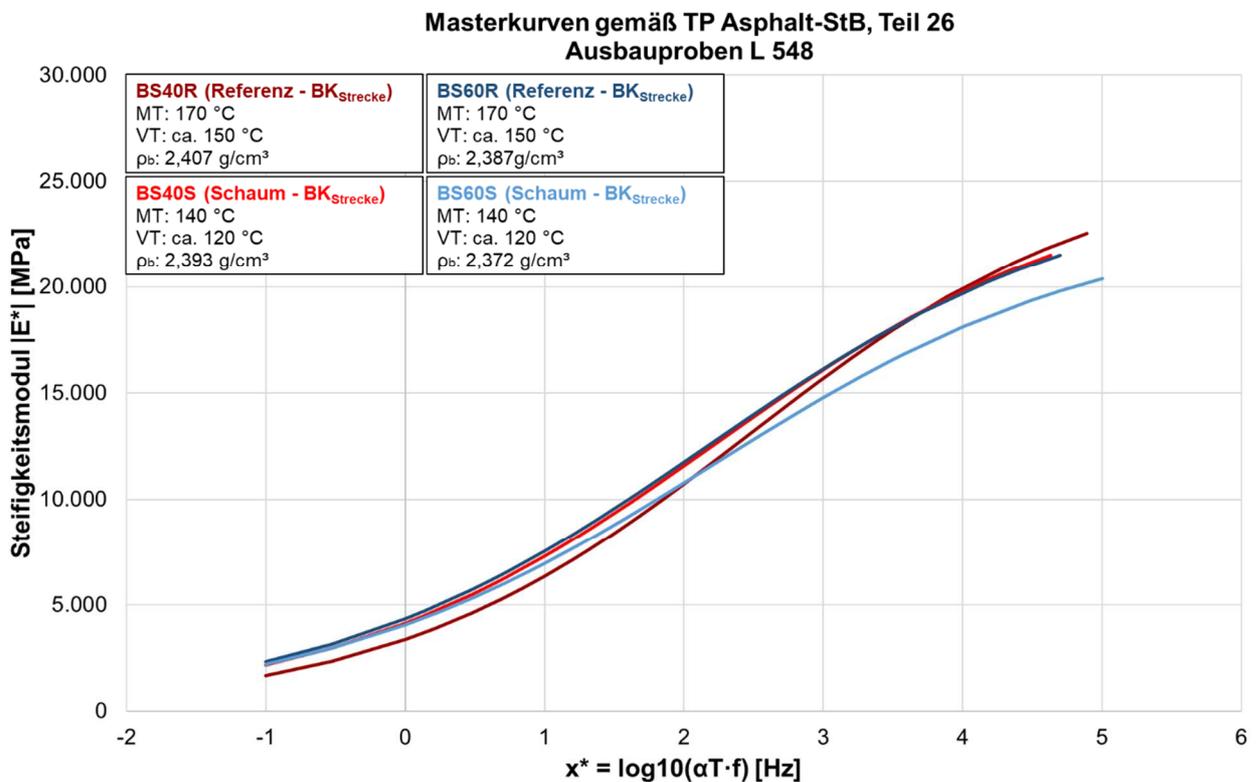


Abbildung 4-109: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – SMA 16 B S (Ausbauproben L 548)

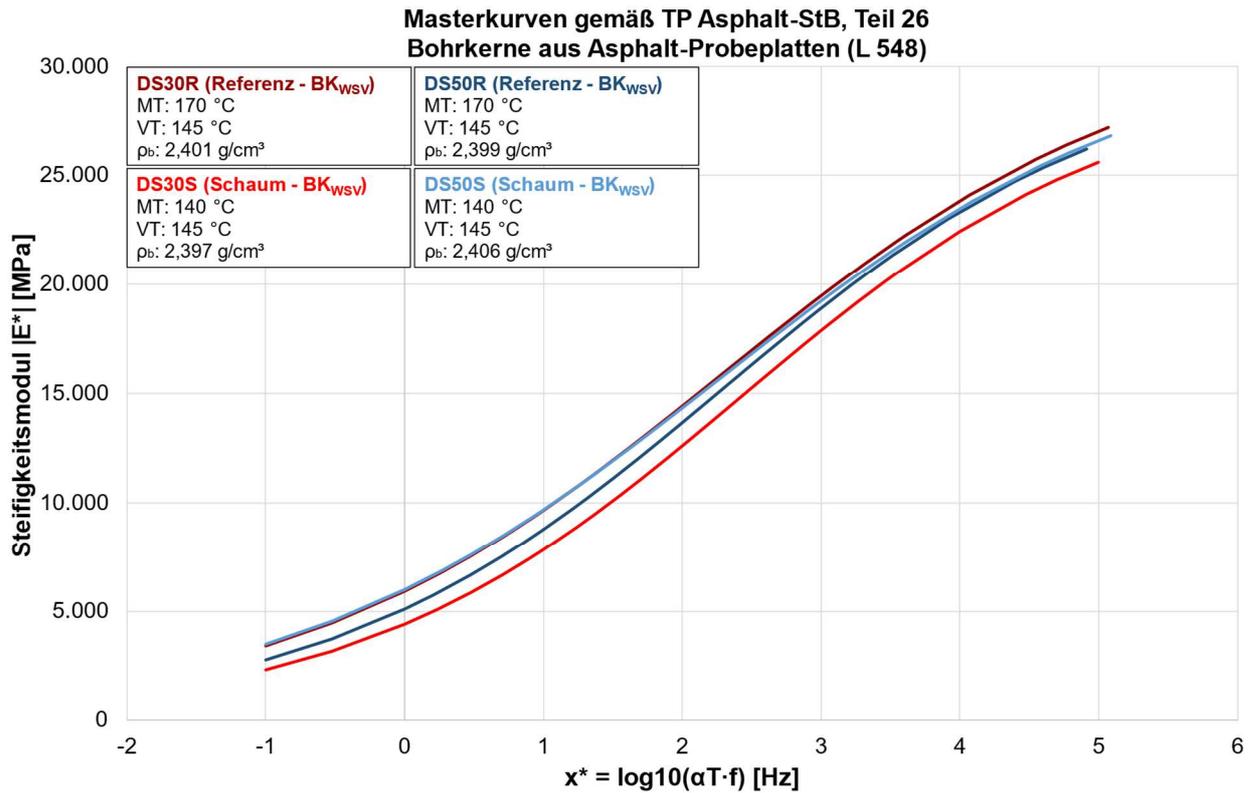


Abbildung 4-110: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 11 D S (BK<sub>WSV</sub> L 548)

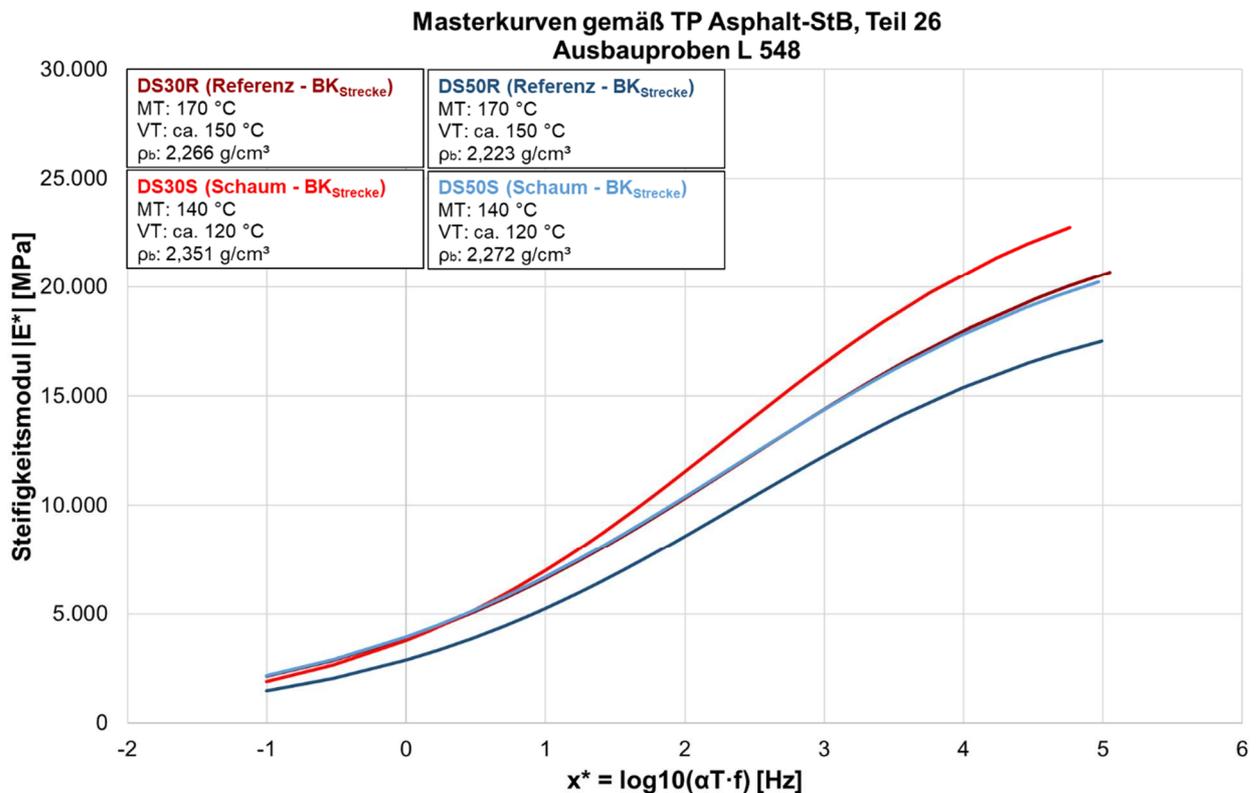
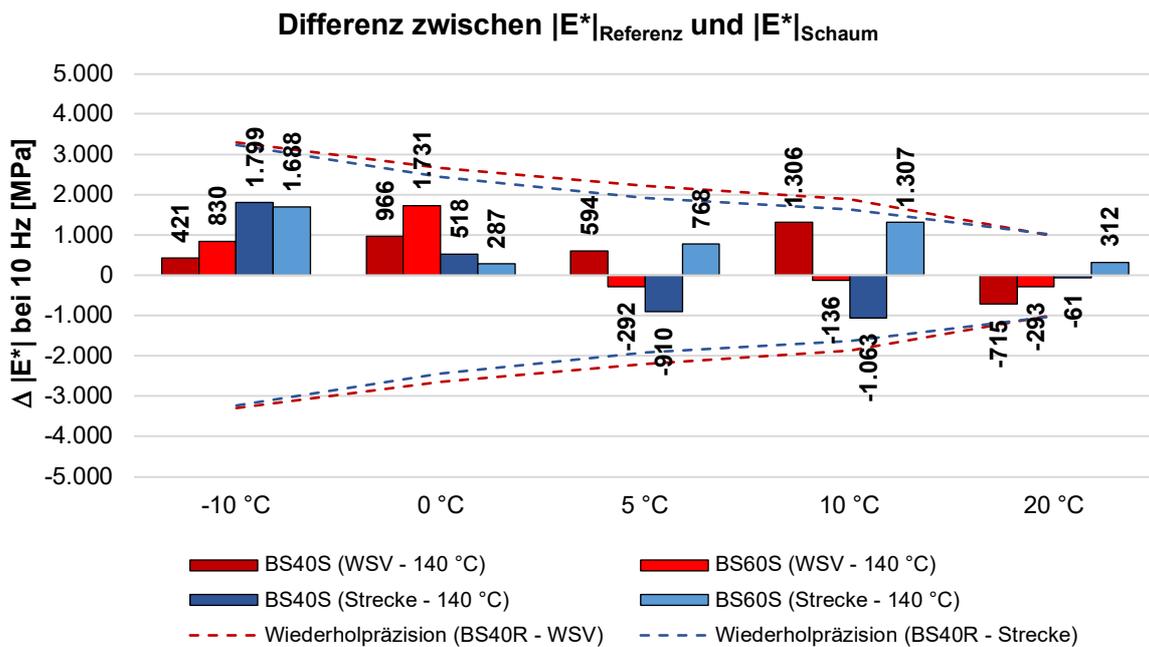


Abbildung 4-111: Masterkurven nach TP Asphalt-StB, Teil 26 – AC 11 D S (Ausbauproben L 548)

Die Steifigkeitsmoduln der bei abgesenkter und der bei konventioneller Temperatur hergestellten Asphaltbinderschicht liegen sowohl bei den Ausbauproben ( $BK_{\text{Strecke}}$ ) als auch bei den im Labor verdichteten Proben ( $BK_{\text{WSV}}$ ) auf einem ähnlichen Niveau. Abbildung 4-112 beinhaltet in diesem Zusammenhang die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvarianten der Asphaltbinderschicht bei einer Prüffrequenz von 10 Hz. Wie an den Resultaten zu erkennen ist, liegen die Abweichungen zwischen den Referenz- und Schaumbitumenvarianten innerhalb der Wiederholpräzision der jeweiligen Referenzvariante.

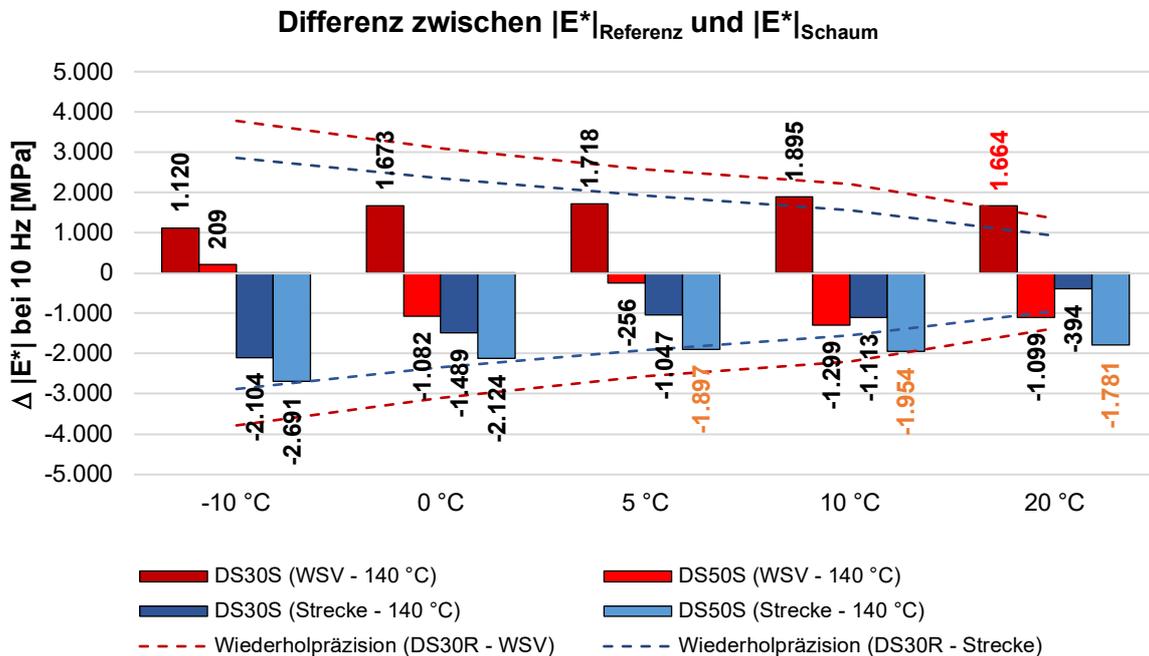


**Abbildung 4-112: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – SMA 16 B S (L 548)**

Bei der Asphaltdeckschicht können insbesondere bei den Ausbauproben größere Unterschiede in den Steifigkeitsmoduln festgestellt werden. Die Ursache hierfür liegt in den unterschiedlichen Verdichtungsgraden der Probefelder. Die Variante DS30S weist die höchste Raumdichte und die höchsten Steifigkeitsmoduln auf, wie beispielsweise an den Masterkurven in Abbildung 4-111 zu erkennen ist. Die Variante mit der niedrigsten Raumdichte (DS50R) weist hingegen die geringsten Steifigkeitsmoduln auf (siehe Abbildung 4-111). Es ist anzunehmen, dass die Steifigkeitsmoduln der Ausbauproben deutlich näher beieinander liegen würden, wenn die Verdichtungsgrade bzw. die Raumdichten auf einem ähnlichen Niveau liegen würden.

Die Steifigkeitsmoduln der aus den Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkerne liegen bei den Varianten DS50R und DS50S auf einem ähnlichen Niveau, wie beispielsweise an den Masterkurven in Abbildung 4-110 zu erkennen ist. Die Variante DS30R weist hingegen höhere Steifigkeitsmoduln auf als die mit Schaumbitumen hergestellte Variante DS30S. Die Bohrkerne beider Varianten weisen mit  $2,401 \text{ g/cm}^3$  und  $2,397 \text{ g/cm}^3$  nahezu identische Raumdichten auf, sodass die Raumdichte als Ursache in diesem Zusammenhang ausgeschlossen werden kann. Wie die Untersuchungen des rückgewonnenen Bindemittels gezeigt haben, weist das rückgewonnene Bindemittel der Variante DS30R eine um  $3,6 \text{ °C}$  höhere Äquisteifigkeitstemperatur auf als das rückgewonnene Bindemittel der Variante DS30S. Die höhere Asphaltsteifigkeit der Variante DS30R ist also vermutlich auf die höhere Viskosität des Bindemittels zurückzuführen.

Abbildung 4-113 beinhaltet die Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln der Referenz- und Schaumbitumenvarianten der Asphaltdeckschicht AC 11 D S bei einer Prüffrequenz von 10 Hz.



**Abbildung 4-113: Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln bei 10 Hz – AC 11 D S (L 548)**

Bei den aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkernen liegt die Variante DS30S (WSV), die eine geringere Steifigkeit als die Referenzvariante DS30R (WSV) aufweist, bei 20 °C außerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision (vgl. Abbildung 4-113). Im höheren Gebrauchstemperaturbereich ist hier ein im Vergleich zur Referenzvariante niedrigerer Widerstand gegenüber bleibenden Verformungen zu erwarten. Bei den Bohrkernen aus der Untersuchungsstrecke weisen die mit Schaumbitumen hergestellten Varianten DS30S und DS50S höhere Steifigkeitsmoduln auf als die Referenzvarianten, wie am negativen Vorzeichen in Abbildung 4-113 zu erkennen ist. Dabei liegen die Abweichungen von Variante DS30S, trotz deutlich höherer Raumdicke der Bohrkern, innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision. Die Abweichungen der Variante DS50S liegen hingegen außerhalb der Wiederholpräzision, was insbesondere im höheren Gebrauchstemperaturbereich positiv hinsichtlich des Verformungswiderstandes zu bewerten ist.

### Verformungsverhalten bei Wärme

Die Untersuchung des Verformungsverhaltens bei Wärme erfolgte an Ausbauproben und an aus Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkernen. Die Untersuchung des Verformungsverhaltens der Asphaltdeckschicht erfolgte bei den Bohrkernen aus der Untersuchungsstrecke aufgrund einer Schichtdicke kleiner 60 mm mit einem Teil der Asphaltbinderschicht. Die Probekörper für die Untersuchung der Asphaltdeckschicht setzten sich somit zusammen aus 35 mm Asphaltdeck- und 15 mm Asphaltbinderschicht. Dies hatte zur Folge, dass auch die Bohrkern der Asphaltbinderschicht mit einer von der Prüfvorschrift abweichenden Schichtdicke von 50 mm geprüft werden mussten. In Abbildung 4-114 und Abbildung 4-115 sind die mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ermittelten Impulskriechkurven und Dehnungsraten der aus den Asphalt-Probepplatten entnommenen Bohrkern dargestellt.

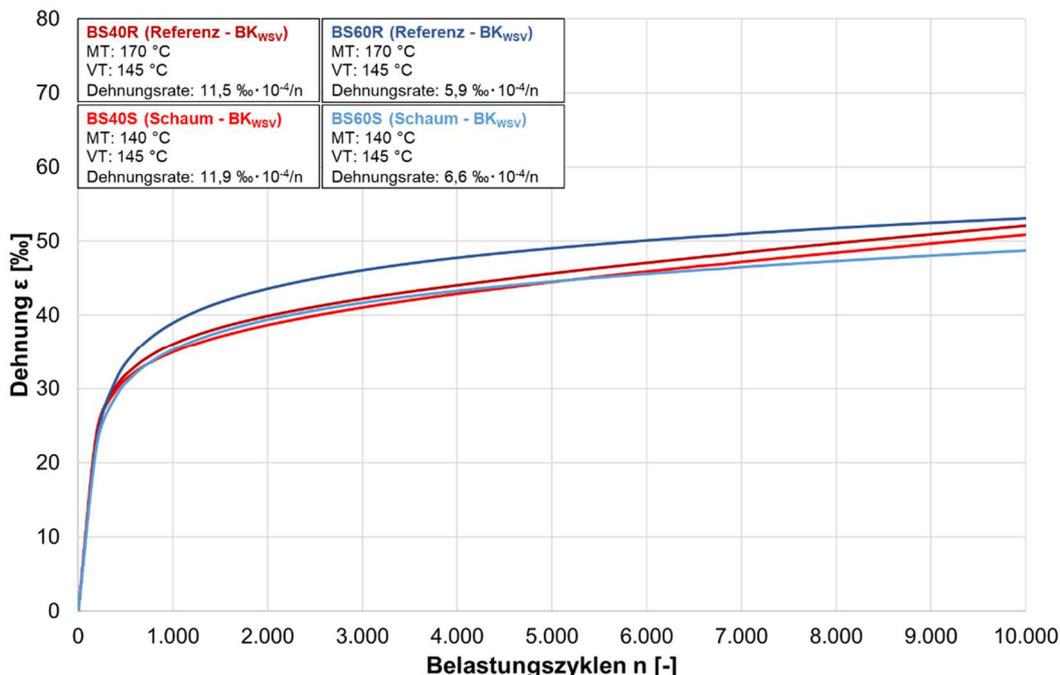


Abbildung 4-114: Impulskriechkurven (BK<sub>WSV</sub>) – SMA 16 B S (L 548)

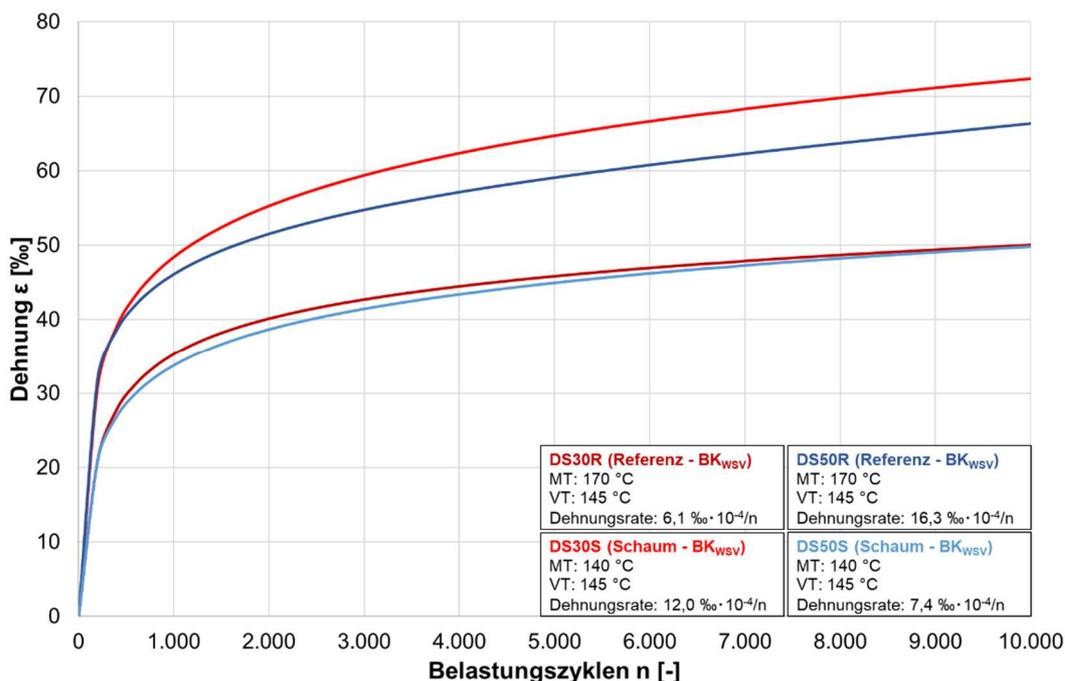


Abbildung 4-115: Impulskriechkurven (BK<sub>WSV</sub>) – AC 11 D S (L 548)

Bei der Asphaltbinderschicht liegen die Dehnungen und Dehnungsraten der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten BS40S und BS60S auf einem vergleichbaren Niveau wie die Dehnungen und Dehnungsraten der Referenzvarianten BS40R und BS60R (siehe Abbildung 4-114). Bei der Asphaltdeckschichtvariante DS50S wurden deutlich geringere Dehnungen und Dehnungsraten im Vergleich zur Referenzvariante DS50R ermittelt (siehe Abbildung 4-115). Im Gegensatz dazu weist die Schaumbitumenvariante DS30S höhere Dehnungen und eine höhere Dehnungsrate auf als die Referenzvariante DS30R auf. Als Ursache für den im Vergleich zur Referenzvariante geringeren Verformungswiderstand von Variante DS30S kann die geringere Asphaltsteifigkeit angeführt werden.

Abbildung 4-116 und Abbildung 4-117 beinhalten die Impulskriechkurven der aus der Untersuchungsstrecke entnommenen Bohrkern.

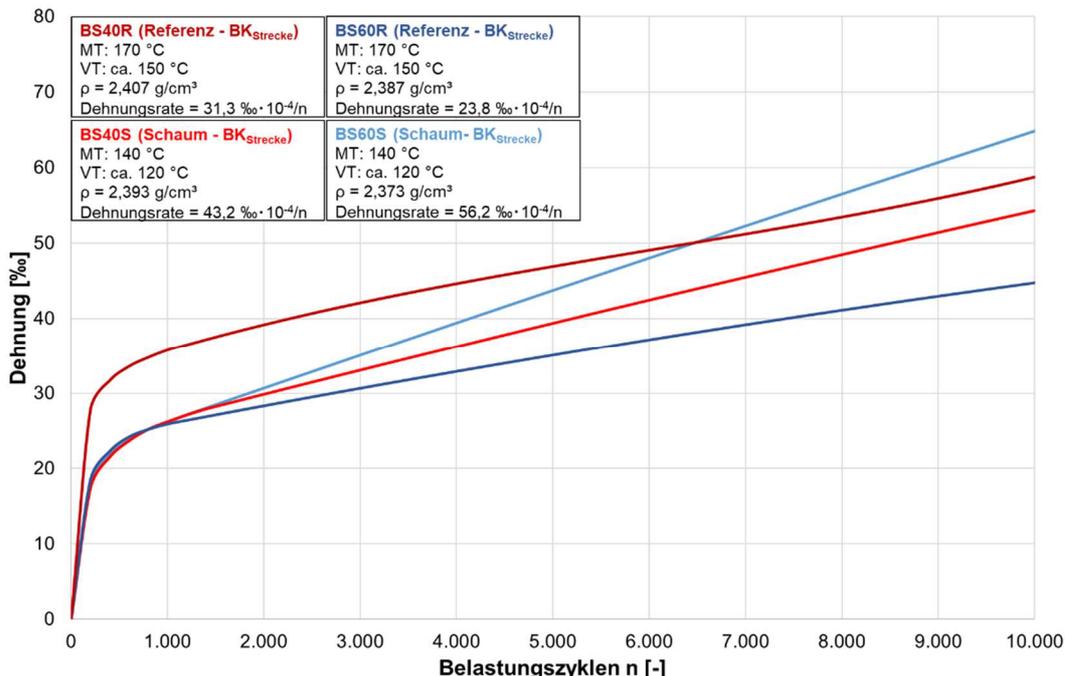


Abbildung 4-116: Impulskriechkurven (BK<sub>Strecke</sub>) – SMA 16 B S (L 548)

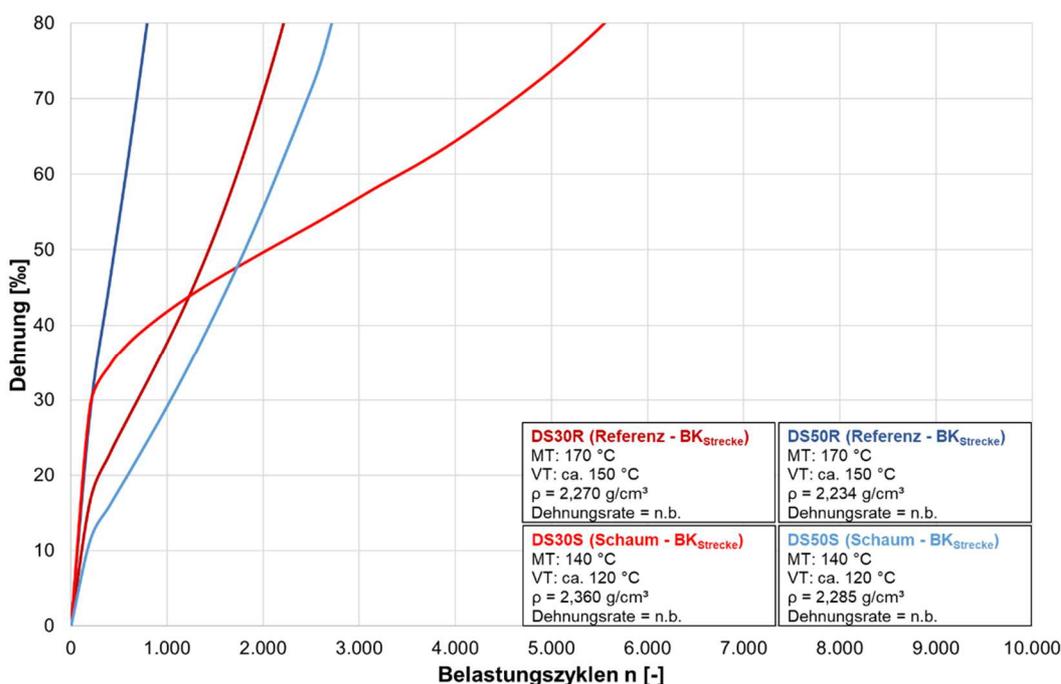


Abbildung 4-117: Impulskriechkurven (BK<sub>Strecke</sub>) – AC 11 D S (L 548)

Wie in Abbildung 4-116 zu erkennen ist, weisen die Bohrkern der Asphaltbinderschichtvarianten eine lineare Verformungszunahme auf. Die Variante mit der geringsten Dehnung ist BS60R. Die stärkste Dehnung weist hingegen die Schaumbitumenvariante BS60S auf. Die Variante BS40S weist nach 10.000 Belastungszyklen eine geringere Verformung auf als die Referenzvariante BS40R. Die Dehnungsrate von Variante BS40S ist hingegen höher als bei Variante BS40R. Die mit Schaumbitumen hergestellten Asphalte weisen, wie in Abbildung 4-116 zu erkennen ist,

höhere Dehnungsraten auf als die Referenzvarianten. Die Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden. Eine reduzierte Steifigkeit der mit Schaumbitumen hergestellten Varianten kann als Ursache prinzipiell ausgeschlossen werden, wie die Ergebnisse der Steifigkeitsuntersuchungen an den Ausbauproben der Asphaltbinderschicht gezeigt haben (siehe Tabelle 4-43). Auch die Untersuchungen der rückgewonnenen Bindemittel haben keine außergewöhnlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ergeben.

Die Ausbauproben der Asphaltdeckschicht weisen bereits nach wenigen Belastungszyklen starke Verformungen auf, wie den Impulskriechkurven in Abbildung 4-117 zu entnehmen ist. Die Ursache für die starken Verformungen ist mit hoher Wahrscheinlichkeit die unzureichende Verdichtung der Asphaltdeckschicht und dementsprechend ein zu hoher Hohlraumgehalt der Bohrkerne. Der Einfluss des Hohlraumgehaltes ist unter anderem an der Impulskriechkurve der Variante DS30S zu erkennen. Die Bohrkerne dieser Variante weisen die höchste Raumdichte auf, was offenbar in einem im Vergleich mit den anderen Varianten besseren Verformungsverhalten resultiert hat. Aufgrund der sehr starken Verformungen der Ausbauproben wurde auf die Ermittlung der Dehnungsraten im Wendepunkt der Impulskriechkurven verzichtet. Ein Rückschluss auf ein günstiges oder ungünstiges Verformungsverhalten der mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltdeckschichtvarianten kann im Hinblick auf die hohen Verformungen der hier aufgeführten Varianten nicht getroffen werden.

#### 4.3.12 L 548 – Expositionsmessungen

Die Messungen der Dämpfe und Aerosole während des Einbaus der Erprobungsfelder wurden durch das Institut für Baustoff-Qualitätssicherung (IBQ) durchgeführt. Erfasst wurden die Expositionen im Bereich des Fertigerfahrers, Beschickerfahrers, Walzenfahrers und der beiden Bohrlängler. Je Asphalt-schicht wurden drei Messkampagnen (insgesamt sechs Messkampagnen) durchgeführt. Dabei wurden die Expositionen beim Einbau der Referenzfelder der Asphaltbinderschicht SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat sowie die Expositionen beim Einbau der Referenzfelder der Asphaltdeckschicht AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat jeweils zusammengefasst. Die Probenahme der Luftemissionen beim Einbau der temperaturabsenkten Erprobungsfelder erfolgte hingegen getrennt nach den Asphaltgranulat-Anteilen des Mischgutes. Eine Übersicht der Expositionsmessungen sowie der zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Witterung kann der Abbildung 4-118 entnommen werden. Die Ergebnisse der Expositionsmessungen sind in Abbildung 4-119 und Abbildung 4-120 dargestellt.

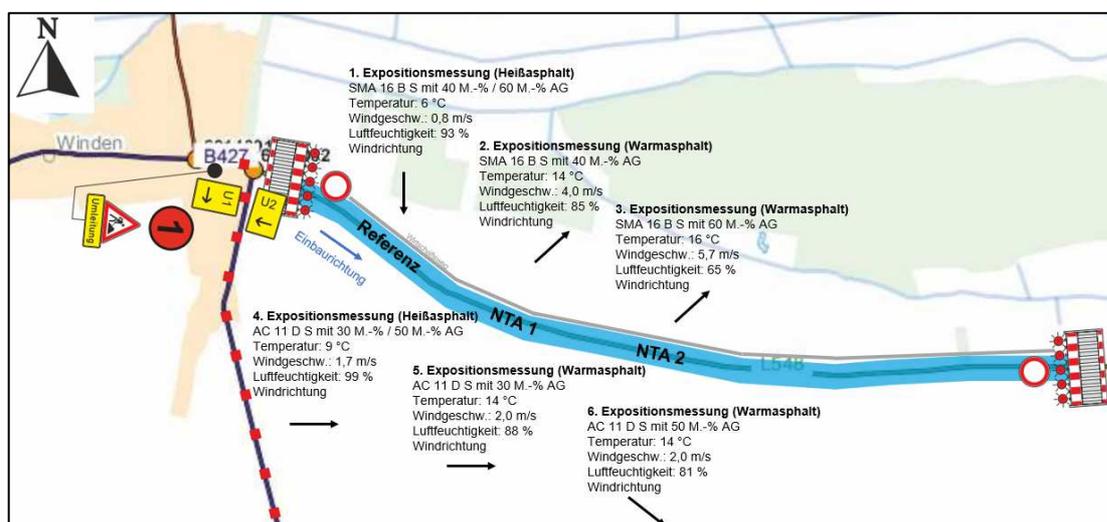
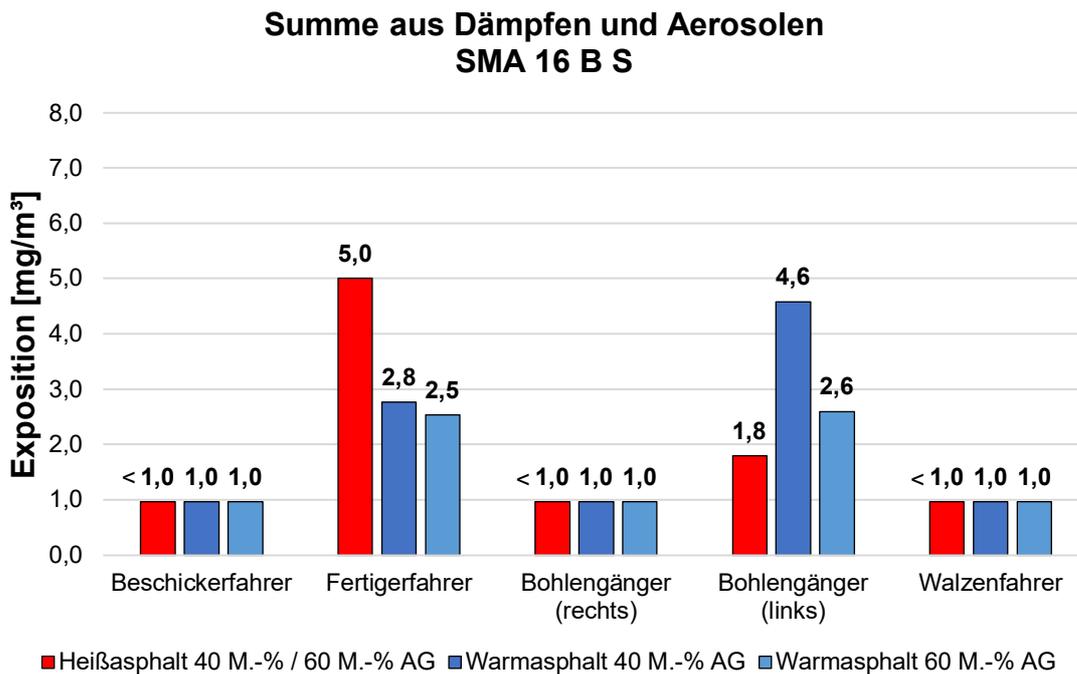
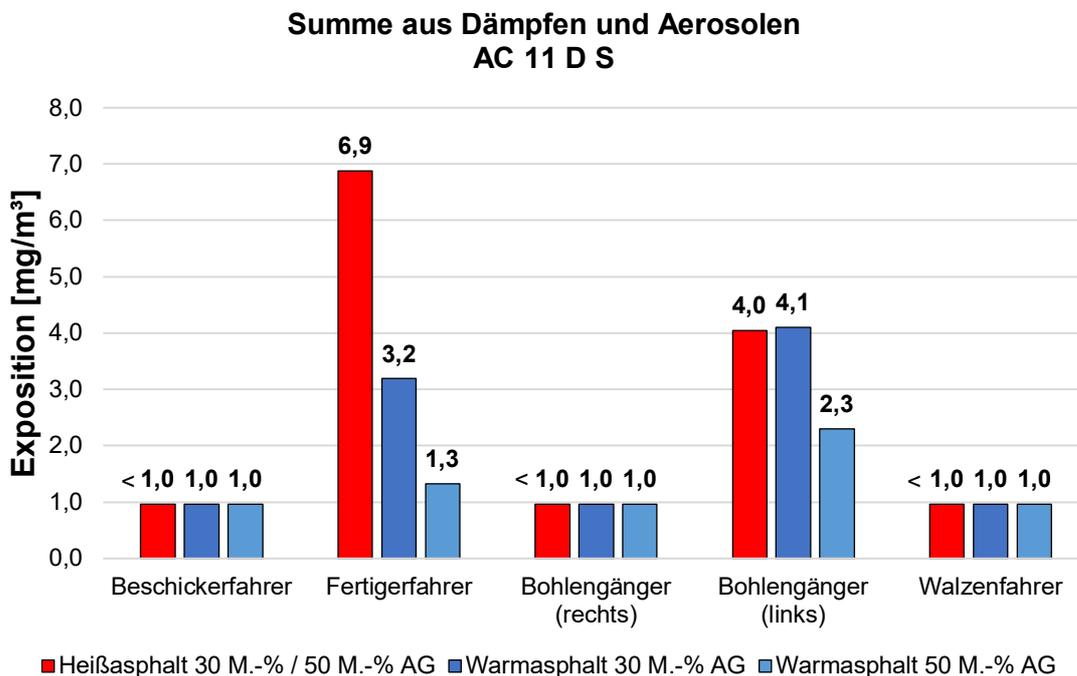


Abbildung 4-118: Übersicht – Expositionsmessungen und Witterungsbedingungen (L 548)



**Abbildung 4-119: Summe der gemessenen Dämpfe und Aerosole beim Einbau der Asphaltbinder-schicht auf der L 548**



**Abbildung 4-120: Summe der gemessenen Dämpfe und Aerosole beim Einbau der Asphaltdeck-schicht auf der L 548**

Wie anhand der hier vorliegenden Messergebnisse zu erkennen ist, liegen die Expositionen im Bereich des Beschickerfahrers, des Walzenfahrers und des Bohrlängängers (rechts) sowohl beim konventionellen als auch beim temperaturabsenkten Asphaltmischgut unter 1,0 mg/m<sup>3</sup>. Der Arbeitsplatzgrenzwert von 1,5 mg/m<sup>3</sup> wird in diesen Arbeitsbereichen eingehalten. Im Bereich des Fertigerfahrers und des linken Bohrlängängers liegen die Expositionen, mit Ausnahme der tempe-

raturabgesenkten Asphaltdeckschicht AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat, über dem Arbeitsplatzgrenzwert von 1,5 mg/m<sup>3</sup>. Der positive Effekt der Temperaturabsenkung zeigt sich insbesondere beim Fertigerfahrer. So sind die beim Einbau der temperaturabgesenkten Asphaltbinderschicht gemessenen Expositionen um bis zu 50 % geringer als beim Heißasphalt (siehe Abbildung 4-119). Bei der Asphaltdeckschicht ist eine Reduzierung der Expositionen um bis zu 81 % im Bereich des Fertigerfahrers (vgl. Abbildung 4-120), bei insgesamt sehr ähnlichen Windverhältnissen (siehe Abbildung 4-118), festzustellen. Ein Trend der Emissionsminderung mit zunehmendem Anteil an Asphaltgranulat, der mutmaßlich auf geringere Zugabemengen des Frischbindemittels zurückgeführt werden kann, ist sowohl bei der Asphaltbinderschicht als auch bei der Asphaltdeckschicht zu erkennen. Auffallend und nur schwer zu erklären, sind die Messergebnisse des linken Bohlgängers. Hier wurden im Vergleich zum rechten Bohlgänger insgesamt höhere Werte ermittelt, die zudem keine Systematik zur Einbautemperatur zeigen. Bei der Asphaltbinderschicht können die höheren Expositionen des linken Bohlgängers mit der zum Zeitpunkt des Einbaus vorliegenden Windrichtung erklärt werden (vgl. Abbildung 4-118). Bei der Asphaltdeckschicht ist dieses Erklärungsmodell nicht möglich. Ob die Windverhältnisse oder andere Faktoren (Trennmittel) für die höheren Messergebnisse beim linken Bohlgänger verantwortlich sind, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Wie bei der Untersuchungsstrecke auf der L 1141 wurden auch hier PID-Messungen zur Erfahrungssammlung durchgeführt. Die Messungen erfolgten durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter der FH Münster. Anders als bei der ersten Untersuchungsstrecke wurden bei dieser Baumaßnahme mehrere PID-Geräte eingesetzt. Gemessen wurde während der Asphaltierungsarbeiten der Asphaltdeckschicht im Bereich des Beschickerfahrers, des Fertigerfahrers und des linken sowie rechten Bohlgängers (Bohle). Die Ergebnisse der PID-Messungen über den gesamten Einbautag sind in Abbildung 4-121 dargestellt.

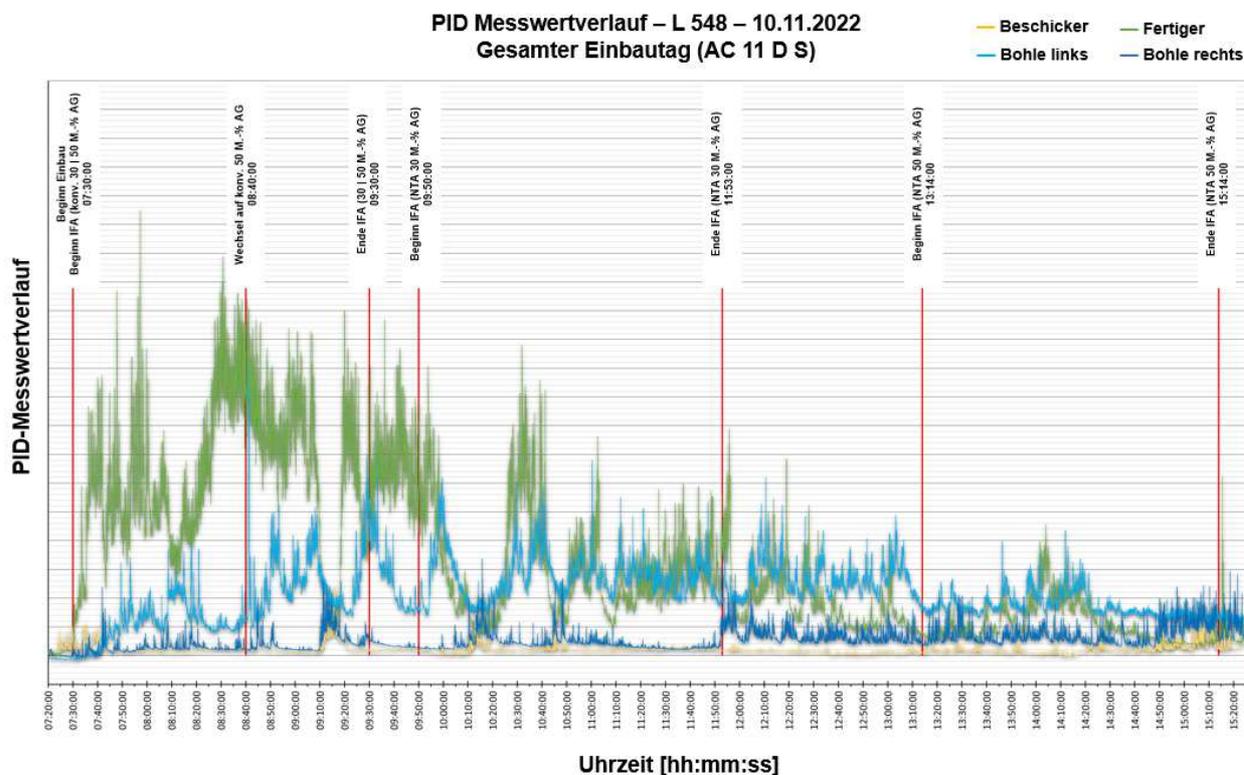


Abbildung 4-121: Ergebnisse der PID-Messungen – AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% AG (L 548)

Die Ergebnisse der PID-Messungen haben – was die Reihung der gemessenen Expositionen betrifft – eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der vom Messinstitut IBQ durchgeführten Expositionsmessungen (IFA-Messungen).

#### 4.3.13 L 548 – Visuelle Begutachtung nach neun Monaten

Bei einer visuellen Begutachtung neun Monate nach den Asphaltierungsarbeiten der L 548 wurden keine Spurrinnen oder Risse festgestellt. Die Asphaltdeckschicht wies jedoch in mehreren Bereichen Substanzschäden auf (siehe Abbildung 4-122).



**Abbildung 4-122: L 548 neun Monate nach Asphaltierungsarbeiten**

Dieses Schadensbild wurde sowohl bei den Referenzfeldern (Heißbauweise) als auch bei den NTA-Feldern festgestellt, womit Schaumbitumen als Ursache ausgeschlossen werden kann. Die Ursache für diese Substanzschäden sind vermutlich durch den Verkehr eingefahrene Konglomerate aus Asphaltgranulat (z. B. Abplatzungen aus Paralleltrommel) oder sonstige mineralische Bestandteile, die im Asphaltmischer nicht aufgeschlossen werden konnten. Eine erneute Evaluierung des Zustandes nach längerer Liegedauer scheint zur Erfahrungssammlung angebracht zu sein.

#### 4.3.14 Zwischenfazit – Untersuchungsstrecken

Anhand von zwei Untersuchungsstrecken konnte demonstriert werden, dass eine Asphaltdeckschicht und eine Asphaltbinderschicht mit hohen Anteilen an Asphaltgranulat unter Einsatz von Schaumbitumen temperaturabgesenkt hergestellt und eingebaut werden kann. Die Ergebnisse der im Laboratorium durchgeführten Performanceuntersuchungen am Mischgut und an Bohrkernen beider Untersuchungsstrecken zeigen vergleichbare Performanceeigenschaften zwischen den Heißasphalten und den unter Verwendung von Schaumbitumen hergestellten Warmasphalten. Um dennoch das Verformungsrisiko zu reduzieren, sollten für zukünftige Untersuchungsstrecken mit Schaumbitumen möglichst geringe Schaumwassergehalte ( $\leq 2\%$ ) angestrebt werden. Weiterhin zeigen die Erkenntnisse der Untersuchungsstrecke L 548, wie wichtig ein hoher Verdichtungsgrad der Asphaltdeckschicht ist und zwar unabhängig davon, ob Heiß- oder Warmasphalt eingebaut wird.

Für die Konzentration der gemessenen Dämpfe und Aerosole zeigt sich ein insgesamt positiver Trend durch die Temperaturabsenkung und die Schaumbitumentechologie. So konnten die Expositionen in mehreren Bereichen durch die Temperaturabsenkung reduziert werden. In Anbetracht der Einhaltung des Arbeitsplatzgrenzwertes von  $1,5 \text{ mg/m}^3$  zeigt sich allerdings noch dringender Verbesserungsbedarf.

Im Zuge der Bauarbeiten auf der L 1140 zwischen Ludwigsburg und Möglingen wurde im Mai 2023 eine Asphaltbinder- und Asphaltdeckschicht temperaturabgesenkt unter Einsatz von Schaumbitumen eingebaut. Anders als bei den beiden anderen Untersuchungsstrecken, kam hier ein lösemittelfreies, biologisch abbaubares Trennmittel während der Asphaltierungsarbeiten zum Einsatz. Die Mischgutlieferung erfolgte durch das Asphaltmischwerk C. Die Ergebnisse der dort gemessenen Expositionen sind in Tabelle 4-46 dargestellt.

**Tabelle 4-46: Ergebnisse der Dampf- und Aerosolmessungen – L 1140 (Ludwigsburg – Möglingen)**

Messort	Asphaltbinderschicht NTA mit Schaumbitumen	Asphaltdeckschicht NTA mit Schaumbitumen
Beschickerfahrer	< BG (0,11)	1,33
Fertigerfahrer	0,64	0,67
Bohlengänger rechts	1,24	1,33
Bohlengänger links	0,62	< BG (0,11)
Walzenfahrer	3,81	1,22

Die Ergebnisse der Arbeitsplatzmessungen dieser Baumaßnahme zeigen, dass die Einhaltung des Arbeitsplatzgrenzwertes auch unter Einsatz von Schaumbitumen möglich ist. Diese Baumaßnahme wurde bei ähnlichen Randbedingungen wie die Untersuchungsstrecke auf der L 1141 realisiert. Dennoch wurden hier deutlich geringere Expositionen gemessen. Dies zeigt, dass die Art des eingesetzten Trennmittels einen Einfluss auf die Höhe der gemessenen Expositionen hat und bei der Betrachtung der Ergebnisse stets berücksichtigt werden sollte.

## 4.4 Energie- und Emissionsbilanzierung der Asphaltmischanlage

### 4.4.1 Berechnungsmodell

Die Ermittlung der anfallenden Energiemengen und CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Produktion einer Tonne Asphalt wurde auf Grundlage der in Tabelle 4-47 aufgeführten Daten durchgeführt. Diese setzen sich unter anderem zusammen aus nicht veränderlichen physikalischen Kennwerten (z. B. spezifische Wärmekapazität) und veränderlichen Kennwerten. Veränderliche Kennwerte sind in diesem Zusammenhang die Asphaltmischguttemperatur, der Asphaltgranulat-Anteil und der Frischbindemittelgehalt. Die Feuchtegehalte und Ausgangstemperaturen der Asphaltgranulate und Gesteinskörnungsgemische sowie die Temperatur des Bitumens wurden über die gesamte Bilanzierung hinweg konstant gelassen, um vergleichbare Rahmenbedingungen zu schaffen. Die Energie- und Emissionsbilanzierung erfolgte für 22 großtechnisch hergestellte Asphaltmischgüter (siehe Kapitel 3.5) auf der Grundlage eines vereinfachten und vereinheitlichten thermischen Berechnungsmodells, welches im weiteren Verlauf näher erläutert wird.

**Tabelle 4-47: Eingangsdaten für die Energie- und Emissionsbilanzierung**

Kenngröße	Einheit	Erläuterung	Kenndaten
<b>T<sub>f</sub></b>	°C	Asphaltmischguttemperatur (Ziel)	<b>Zieltemperatur</b>
<b>T<sub>M</sub></b>	12 °C	Ausgangstemperatur Gesteinskörnung (inkl. Füller)	<b>Mineralstoffe</b>
<b>M</b>	M.-%	Anteil Gesteinskörnung (inkl. Füller)	
<b>M*</b>	M.-%	Anteil Gesteinskörnung (inkl. Füller), ohne Feuchtigkeit	
<b>H<sub>M</sub></b>	0,025 M.-%	Feuchtegehalt Gesteinskörnung (inkl. Füller)	
<b>CE<sub>M</sub></b>	0,90 M.-%	spez. Wärme Gesteinskörnung (inkl. Füller)	
<b>T<sub>EA</sub></b>	100 °C	mittlere Verdampfungstemperatur Wasser	<b>Feuchte</b>
<b>CE<sub>W</sub></b>	4,19 J/(g·°C)	spez. Wärme Wasser (l)	
<b>CV<sub>W</sub></b>	2257 J/(g·°C)	spez. Wärme Wasserdampf (g)	
<b>T<sub>RAP</sub></b>	12 °C	Ausgangstemperatur Asphaltgranulat	<b>Asphaltgranulat</b>
<b>R</b>	M.-%	Anteil Asphaltgranulat	
<b>R*</b>	M.-%	Anteil Asphaltgranulat, ohne Feuchtigkeit	
<b>H<sub>RAP</sub></b>	0,04 M.-%	Feuchtegehalt Asphaltgranulat	
<b>CE<sub>RAP</sub></b>	0,92 J/(g·°C)	spez. Wärme Asphaltgranulat	
<b>T<sub>B</sub></b>	170 °C	Ausgangstemperatur Bitumen	<b>Bitumen</b>
<b>B</b>	M.-%	Anteil Bitumen (nur Frischbindemittel)	
<b>CE<sub>B</sub></b>	1,7 J/(g·°C)	spez. Wärme Bitumen	
<b>T<sub>s</sub></b>	20 °C	mittlere Ausgangstemperatur Stahl (morgens nach Produktion am Vortag)	<b>Stahl und Strahlungsverluste</b>
<b>S</b>	100 t	Kontaktmasse Stahl in Tonnen	
<b>d<sub>s</sub></b>	500 t	Ø Tagesproduktionsmenge bis zur nächsten Erwärmung	
<b>CE<sub>s</sub></b>	0,45 J/(g·°C)	spez. Wärme Stahl (St37)	
<b>ΔH<sub>R</sub></b>	0,09 -	Schätzwert für Abgas- und Strahlungsverluste (6 % + 3 %) = 9 %	
<b>Gas<sub>TT</sub></b>	0,01 -	Ø Einsatzquote von Gas in Trockentrommel	<b>Einsatzquoten der Brennstoffe in Trocken- und Paralleltrommel</b>
<b>BKS<sub>TT</sub></b>	0,99 -	Ø Einsatzquote von Braunkohlestaub in Trockentrommel	
<b>GAS<sub>PT</sub></b>	0,01 -	Ø Einsatzquote von Gas in Paralleltrommel	
<b>BKS<sub>PT</sub></b>	0,99 -	Ø Einsatzquote von Braunkohlestaub in Paralleltrommel	

Die Ermittlung des Gesamtenergiebedarfs für die Produktion einer Tonne Asphalt erfolgte über die Berechnung des thermisch erforderlichen Energieeinsatzes für die Erwärmung und Trocknung der Gesteinskörnungsgemische und des Asphaltgranulates. Auch der Energiebedarf für die Erwärmung des Bitumens und des Stahls (Asphaltmischer) wurde ermittelt. Ebenfalls berücksichtigt wurden beim Herstellungsprozess entstehende Abgas- und Strahlungsverluste. Die Berechnung der anfallenden Energiemengen zur Produktion einer Tonne Asphalt erfolgte nach den in Tabelle 4-48 aufgeführten Formeln. Die hier errechneten Werte sind nur für den projektinternen Vergleich und die damit verbundene Einflussanalyse zu verstehen. Zur Ermittlung und Bewertung absoluter Kenngrößen ist die Erarbeitung allgemeingültiger Berechnungsverfahren und die Definition einheitlicher Eingangswerte (z. B. für den spezifischen Energieinhalt der Brennstoffe oder deren Emissionswerte) abzuwarten.

**Tabelle 4-48: Energiebilanzierung für die Produktion einer Tonne Asphalt**

	Wärmeanteil	Einheit	Prozess	Berechnung
Trocken-trommel	$\Delta H_M$	kJ/t	Erwärmung Gesteinskörnungsgemisch	$(T_f - T_M) \cdot M^* \cdot CE_M$
	$\Delta H_W$	kJ/t	Erwärmung Wasser in Gesteinskörnung	$(T_{EA} - T_M) \cdot H_M \cdot M^* \cdot CE_W$
	$\Delta H_{WW}$	kJ/t	Verdampfung Wasser aus Gesteinskörnung	$H_M \cdot M^* \cdot CV_W$
Parallel-trommel	$\Delta H_{RAP}$	kJ/t	Erwärmung Asphaltgranulat	$(T_f - T_{RAP}) \cdot R^* \cdot CE_{RAP}$
	$\Delta H_W$	kJ/t	Erwärmung Wasser in Asphaltgranulat	$(T_{EA} - T_{RAP}) \cdot H_{RAP} \cdot R^* \cdot CE_W$
	$\Delta H_{WW}$	kJ/t	Verdampfung Wasser aus Asphaltgranulat	$H_{RAP} \cdot R^* \cdot CV_W$
	$\Delta H_B$	kJ/t	Erwärmung Frischbitumen	$(T_f - T_B) \cdot B \cdot CE_B$
	$\Delta H_s$	kJ/t	Erwärmung Stahl	$\frac{(T_f - T_s) \cdot S \cdot CE_s}{d_s}$
	$\Delta H_R$	kJ/t	Abgas- und Strahlungsverluste	pauschal auf alle $\Delta H$
	$\Sigma \Delta H$	kJ/t	<b>Gesamtenergiebedarf</b>	

Die Berechnung der CO<sub>2</sub>-Emissionen erfolgte durch die Multiplikation der Energiemengen aus Tabelle 4-48 mit den in Tabelle 4-49 aufgeführten energiespezifischen Umrechnungsfaktoren.

**Tabelle 4-49: CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Verbraucher [BAFA, 2021]**

Verbraucher	Emissionen in kg CO <sub>2</sub> /kWh
BKS	0,383
GAS	0,201
Strommix	0,366

4.4.2 Referenzgemische (Heißasphalt)

Abbildung 4-123 beinhaltet die für die Produktion der Referenzgemische benötigten Energiemengen in kWh/t. In Abbildung 4-124 sind die bei der Produktion der Referenzgemische anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt.

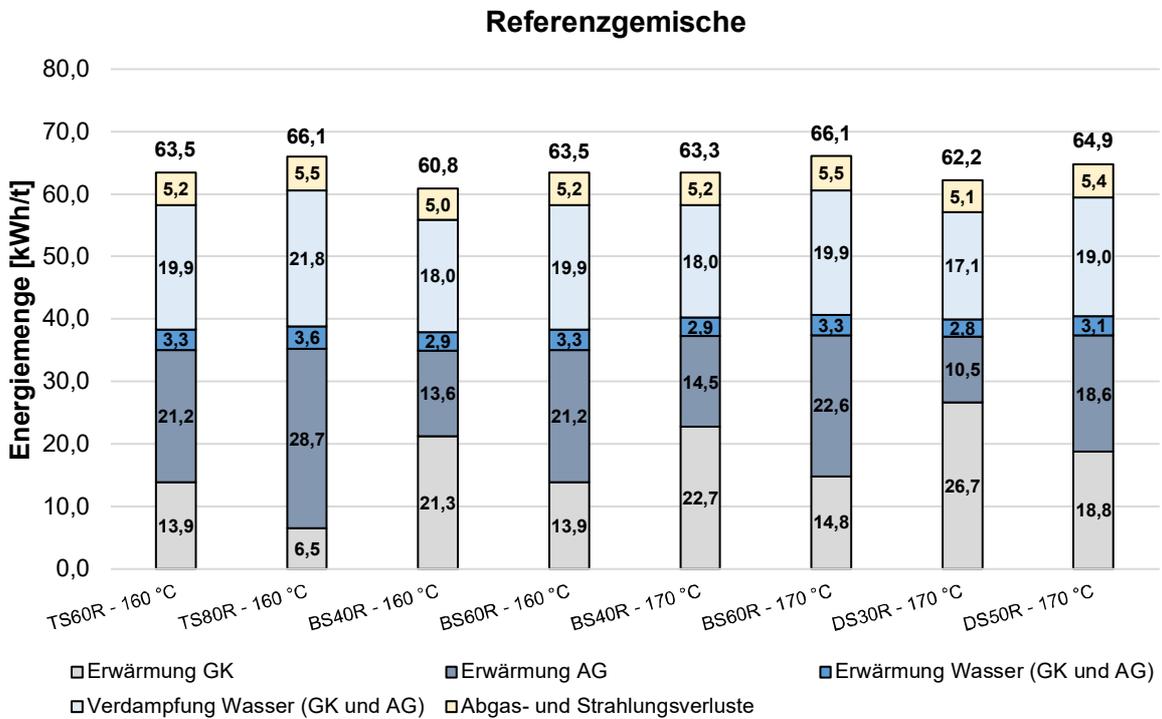


Abbildung 4-123: Energiebedarf für die Herstellung der Referenzgemische

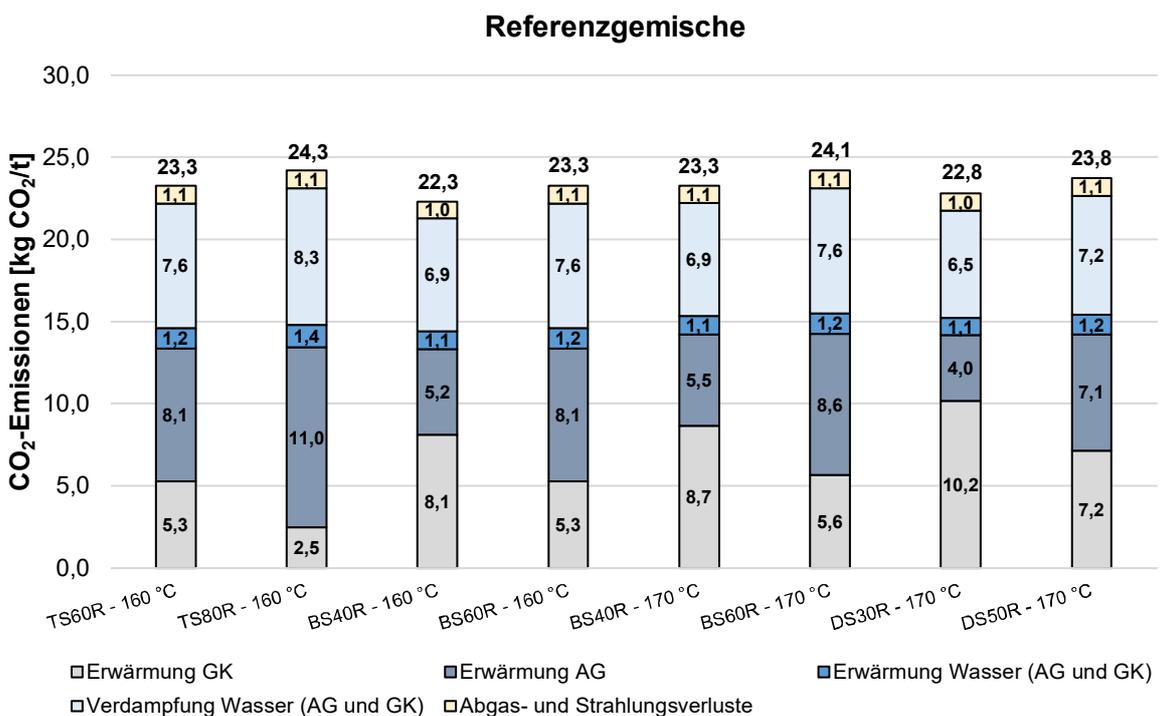


Abbildung 4-124: Bei der Herstellung der Referenzgemische anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen

Bei der Produktion einer Tonne Heißasphalt werden, unter den hier definierten Rahmenbedingungen, zwischen 60,8 und 66,1 kWh Energie verbraucht (siehe Abbildung 4-123) und zwischen 22,3 und 24,3 kg CO<sub>2</sub> (vgl. Abbildung 4-124) erzeugt. Die Erwärmung der Gesteinskörnung und des Asphaltgranulates nimmt zwischen 53 und 60 % der Gesamtenergiemenge und der CO<sub>2</sub>-Emissionen ein. Das Verhältnis zwischen der benötigten Energiemenge für die Erwärmung des Asphaltgranulates und der Energiemenge für die Erwärmung der Gesteinskörnungen ist proportional zum Verhältnis der Asphaltgranulatmenge und der Menge der frischen Gesteinskörnung. So werden wie im Fall von der Asphaltdeckschicht mit 50 M.-% Asphaltgranulat 18,8 kWh/t für die Erwärmung der Gesteinskörnungen und 18,6 kWh/t für die Erwärmung des Asphaltgranulates benötigt. Die Differenz von 0,2 kWh/t ergibt sich aus den unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten sowie der spezifischen Wärmekapazitäten beider Materialien. Der Energieaufwand für die Erwärmung und Verdampfung des Wassers bzw. der Feuchtigkeit ist ebenfalls proportional zur Menge des Asphaltgranulates. Die Ursache hierfür ist bei diesem Berechnungsbeispiel der im Vergleich zur frischen Gesteinskörnung höhere Feuchtegehalt des Asphaltgranulates. Eine Reduktion des Feuchtegehaltes von 4 % auf 2 % (z. B. durch eine überdachte Lagerung) führt bei der Produktion einer Tonne Asphalt mit 60 M.-% Asphaltgranulat unter den hier festgelegten Rahmenbedingungen zu einer Einsparung von 7,76 kWh Energie und 2,85 kg CO<sub>2</sub>. Bei 80 M.-% Asphaltgranulat beträgt die Einsparung 10,94 kWh/t und 4,01 kg CO<sub>2</sub>/t.

Die Erhöhung der Asphaltmischguttemperatur von 160 °C auf 170 °C führt zu einem Mehrverbrauch von 2,6 kWh Energie je Tonne Asphaltmischgut (siehe Abbildung 4-123). Die Menge an CO<sub>2</sub>-Emissionen erhöht sich in diesem Zusammenhang um 1,0 kg CO<sub>2</sub>/t (vgl. Abbildung 4-124).

Der Energiebedarf für die Erwärmung des Zugabebindemittels (Frischbindemittels) ist bezogen auf die Gesamtenergiebilanz vernachlässigbar gering. Auf eine Darstellung der Ergebnisse wurde daher verzichtet. Wichtig zu erwähnen ist, dass der geringe Einfluss des Bindemittels auf die Energie- und Emissionsbilanz sich hier ausschließlich auf die thermodynamischen Vorgänge bei der Mischgutherstellung an einer Asphaltmischanlage bezieht. Die Produktion von Bitumen hat dagegen einen maßgebenden Einfluss auf die Ökobilanz eines Asphaltes. Die Verwendung von Asphaltgranulat führt zur Einsparung von Bitumen, was sich positiv auf die Ökobilanz auswirkt. Dies trifft auch auf die frischen Gesteinskörnungen zu. Die Durchführung einer Ökobilanzierung war allerdings nicht Bestandteil dieses Forschungsprojektes, sodass hier lediglich die Energiemengen und CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit dem Herstellungsprozess betrachtet wurden.

#### 4.4.3 Vergleich zwischen Heiß- und Warmasphalt (Asphaltmischwerk A)

Abbildung 4-125 und Abbildung 4-127 beinhalten die für die Produktion einer Tonne Asphalttragschicht und Asphaltbinderschicht benötigten Energiemengen in kWh. In Abbildung 4-126 und Abbildung 4-128 sind die bei der Produktion anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt.

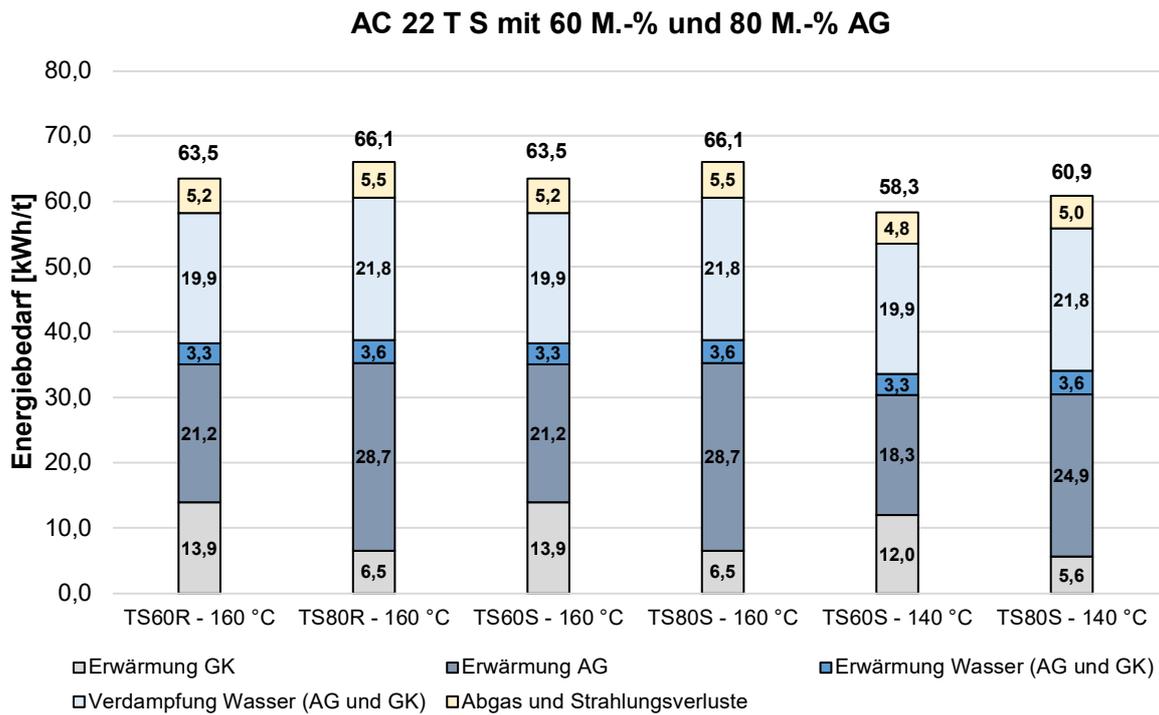


Abbildung 4-125: Energiebedarf für die Herstellung der ATS (Asphaltmischwerk A)

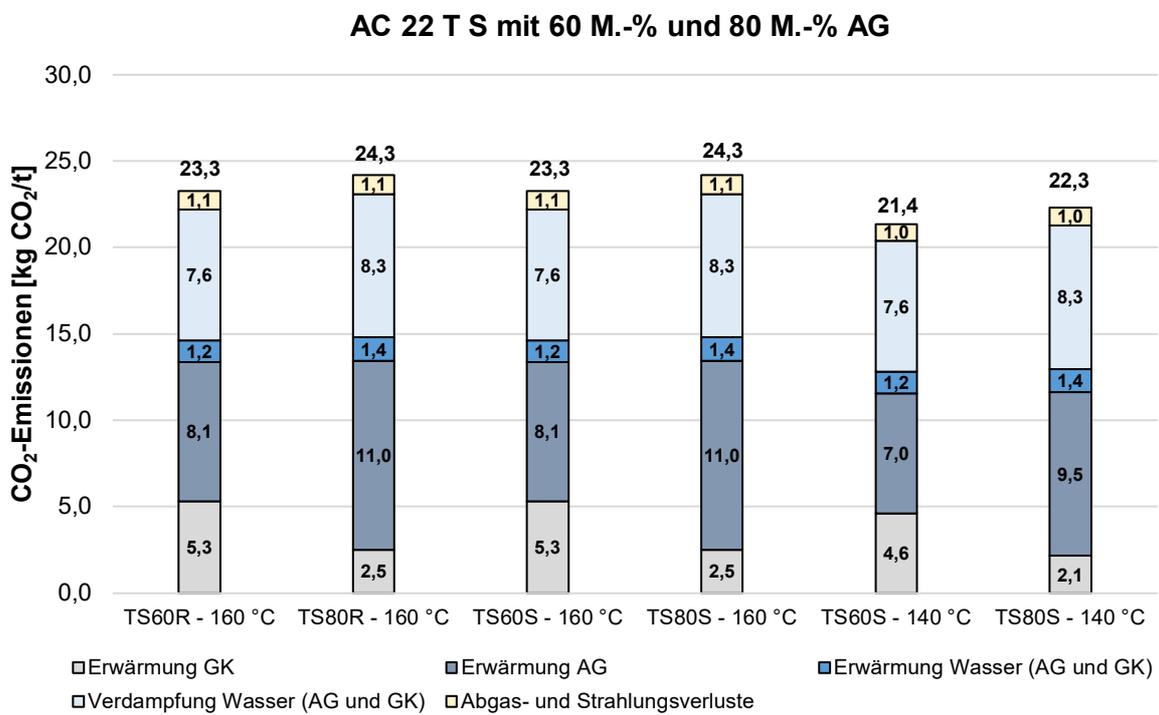


Abbildung 4-126: Bei der Herstellung der ATS anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen (Asphaltmischwerk A)

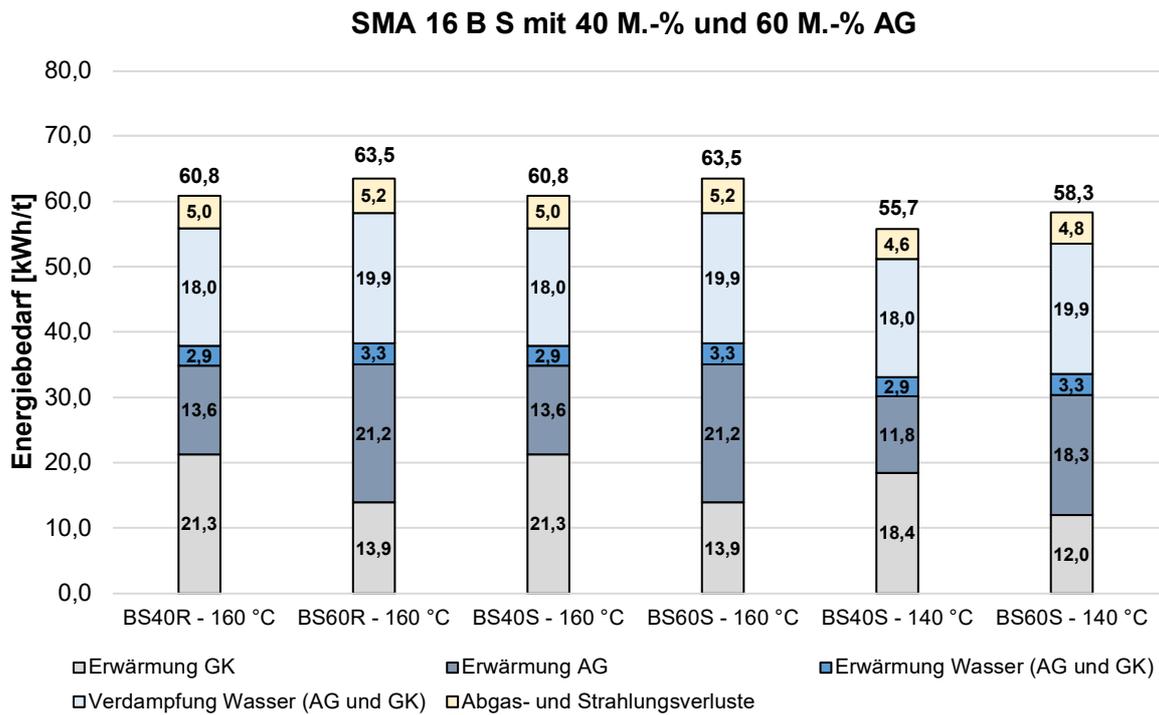


Abbildung 4-127: Energiebedarf für die Herstellung der ABS (Asphaltmischwerk A)

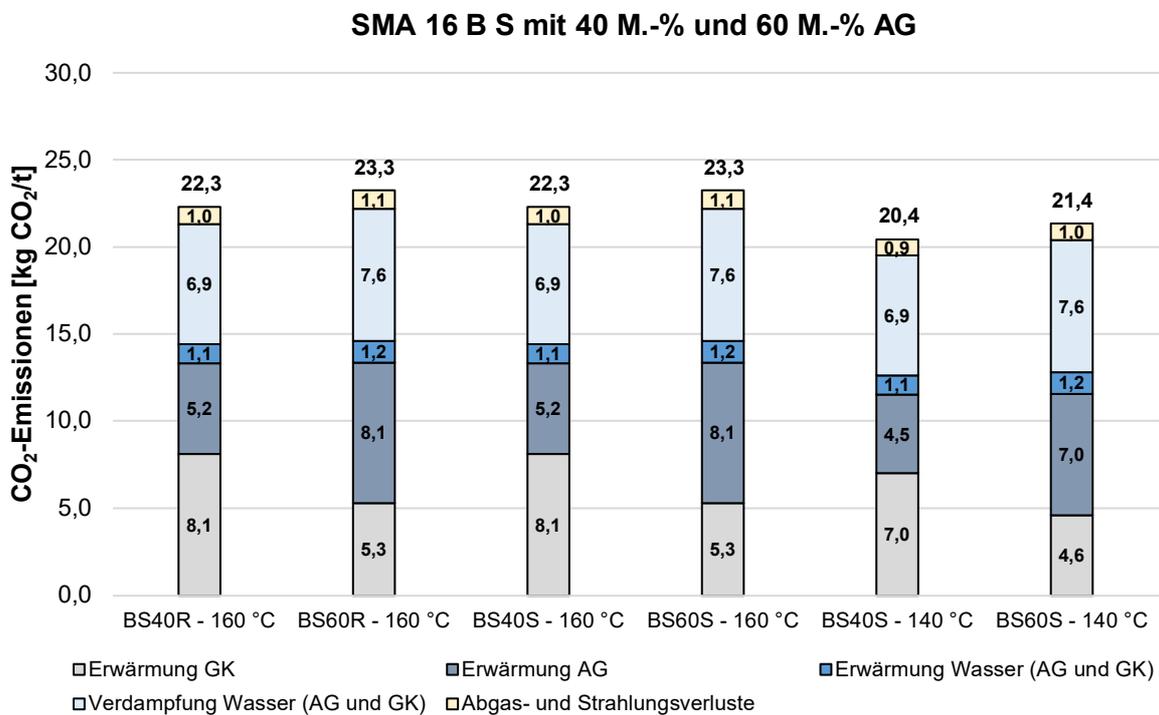


Abbildung 4-128: Bei der Herstellung der ABS anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen (Asphaltmischwerk A)

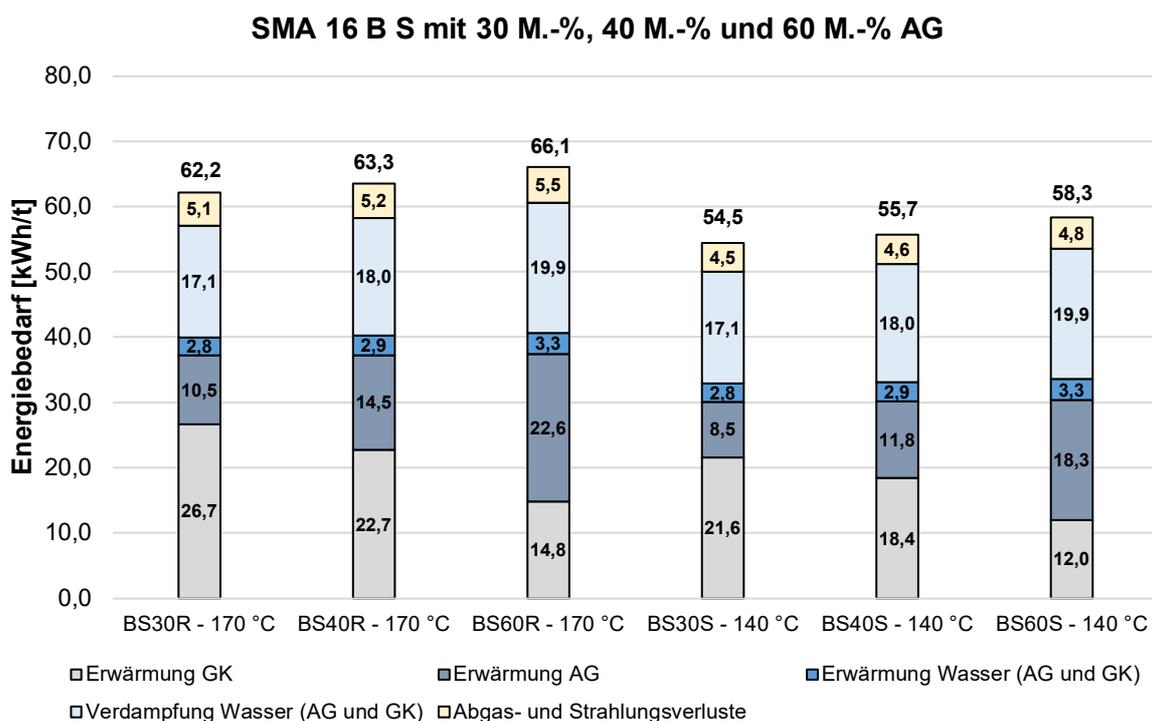
Aus den Resultaten ist ersichtlich, dass eine positive Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz unter den hier definierten Rahmenbedingungen ausschließlich mit der Reduktion der Produktionstemperatur einhergeht. Die Herstellung von Asphaltmischgut bei konventionellen Temperaturen mit Schaumbitumen führt bei ansonsten identischen Rahmenbedingungen und ohne Berücksichtigung des

Energiebedarfs der Schaumbitumenanlage zu den gleichen Energieverbräuchen und CO<sub>2</sub>-Emissionen wie beim Heißasphalt ohne Schaumbitumen (vgl. Abbildung 4-127 und Abbildung 4-128).

Die Reduktion der Asphaltmischguttemperatur von 160 °C auf 140 °C führt je produzierter Tonne Asphalttragschicht und Asphaltbinderschicht, unter den hier definierten Rahmenbedingungen, zu einer Energieeinsparung zwischen 5,1 und 5,2 kWh (vgl. Abbildung 4-125 und Abbildung 4-127). Die Differenz von 0,1 kWh ergibt sich aus den unterschiedlich hohen Abgas- und Strahlungsverlusten. Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich für beide Asphaltmischgüter eine Reduktion zwischen 1,9 und 2,0 kg/t (vgl. Abbildung 4-126 und Abbildung 4-128). Durch die Reduktion der Produktionstemperatur um 20 K können somit zwischen 7,8 und 8,4 % Energie sowie 8,2 und 8,5 % CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

#### 4.4.4 Vergleich zwischen Heiß- und Warmasphalt (Asphaltmischwerk B)

Abbildung 4-129 und Abbildung 4-131 beinhalten die für die Produktion einer Tonne Asphaltbinderschicht und Asphaltdeckschicht benötigten Energiemengen in kWh. In Abbildung 4-130 und Abbildung 4-132 sind die bei der Produktion anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen dargestellt.



**Abbildung 4-129: Energiebedarf für die Herstellung der ABS (Asphaltmischwerk B)**

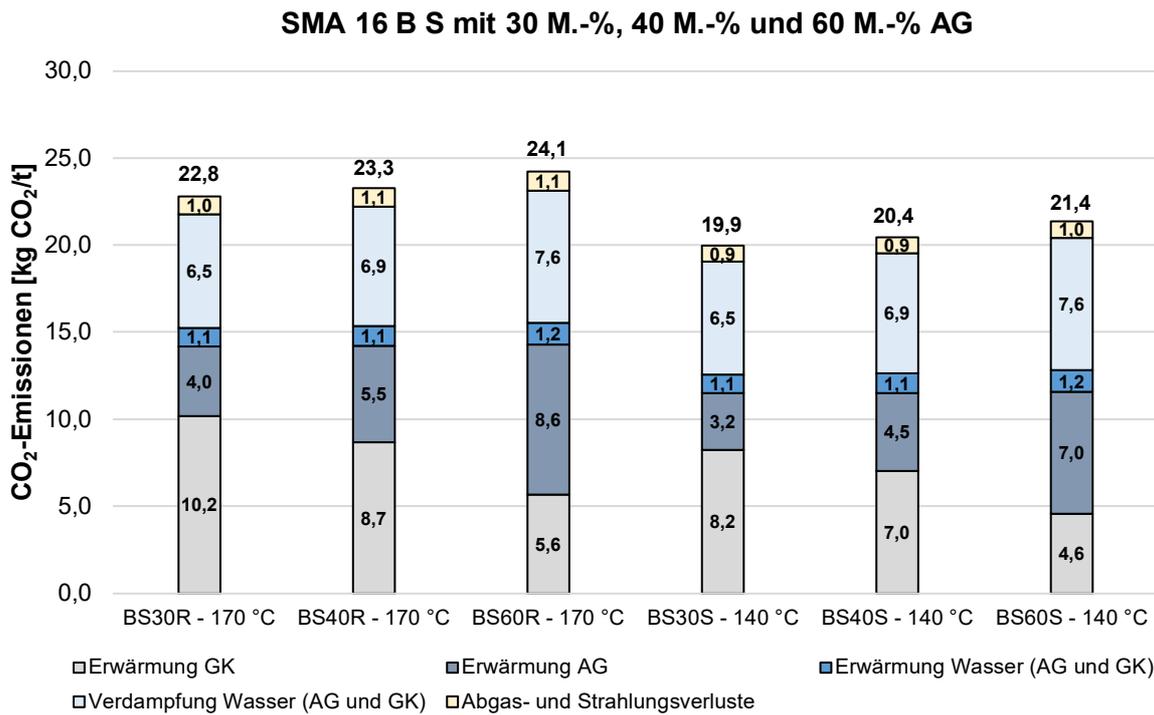


Abbildung 4-130: Bei der Herstellung der ABS anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen (Asphaltmischwerk B)

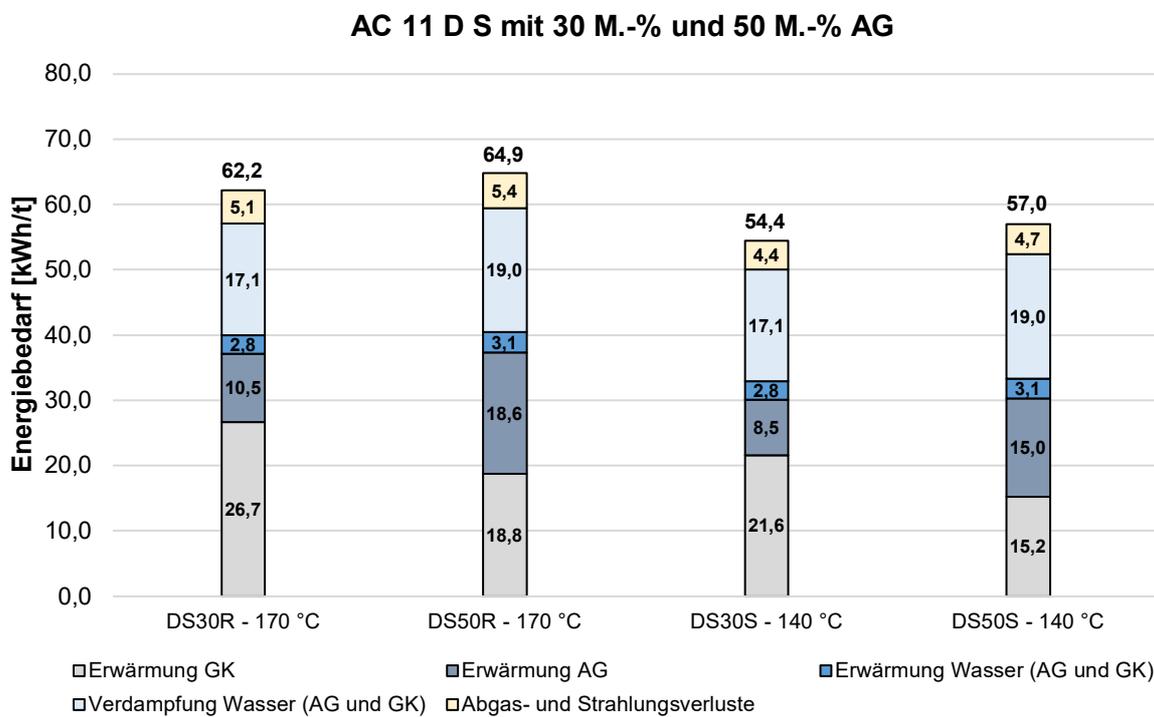
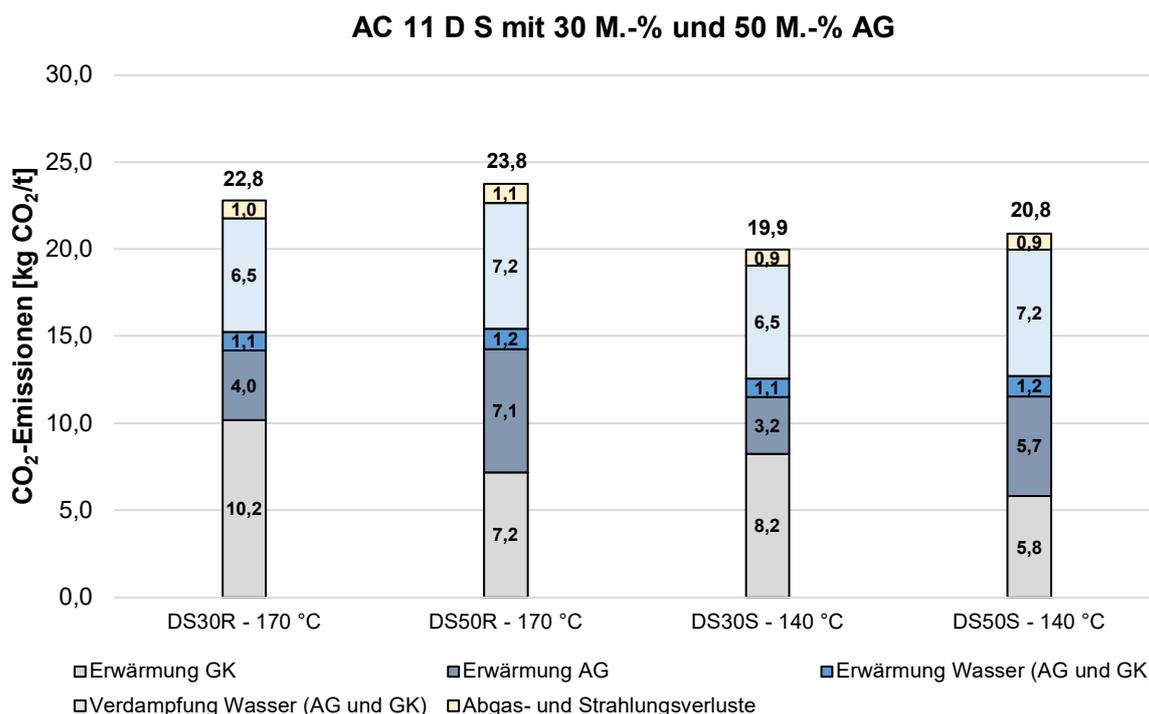


Abbildung 4-131: Energiebedarf für die Herstellung der ADS (Asphaltmischwerk B)



**Abbildung 4-132: Bei der Herstellung der ADS anfallende CO<sub>2</sub>-Emissionen (Asphaltmischwerk B)**

Die Reduktion der Asphaltmischguttemperatur von 170 °C auf 140 °C führt je produzierter Tonne Asphaltbinderschicht und Asphaltdeckschicht, unter den hier festgelegten Rahmenbedingungen, zu einer Energieeinsparung zwischen 7,6 und 7,9 kWh (Abbildung 4-129 und Abbildung 4-131). Für die CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich für beide Asphaltmischgüter eine Reduktion zwischen 2,9 und 3,0 kg/t (vgl. Abbildung 4-130 und Abbildung 4-132). Durch die Reduktion der Produktionstemperatur um 30 K können somit zwischen 11,8 und 12,5 % Energie und zwischen 11,2 und 12,7 % CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Jede weitere Reduktion der Produktionstemperatur um 10 K führt somit zu einer zusätzlichen Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung von ca. 4 %.

#### 4.4.5 Verwendung von Zusätzen

Die Verwendung von Zusätzen hat, unabhängig davon, ob es sich um Zusätze zur Schaumstabilisierung oder Zusätze zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit von Asphalt handelt, einen Einfluss auf die Emissionsbilanz eines Asphaltes. Grund hierfür sind die bei der Produktion der Zusätze anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. So entstehen beispielsweise bei der Produktion von einem Kilogramm eines auf dem Markt verfügbaren Zusatzes zur Temperaturabsenkung 2,5 kg CO<sub>2</sub>. Bei einer Dosiermenge von 2 % (bezogen auf die Menge des Bindemittels) und einem Bindemittelgehalt von 6 M.-% werden 1,2 kg des genannten Zusatzes je Tonne Asphaltmischgut benötigt, was wiederum 3,0 kg CO<sub>2</sub> je Tonne Mischgut entspricht. Wie die Berechnungen gezeigt haben, führt die Reduktion der Produktionstemperatur um 30 K zu einer Einsparung von ca. 3,0 kg CO<sub>2</sub> je Tonne Asphaltmischgut (vgl. Abbildung 4-132). Die Verwendung des genannten Zusatzes gleicht somit den positiven Effekt, welcher durch die Temperaturabsenkung erreicht wurde, wieder aus. Bei einer Temperaturabsenkung von < 30 K ergibt sich sogar ein Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den Einsatz des genannten Zusatzes.

### 4.5 Verfahrenstechnische Optimierung und Parametrierkonzept

#### 4.5.1 Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt

Abbildung 4-133 zeigt ein Ablaufdiagramm für die Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt.

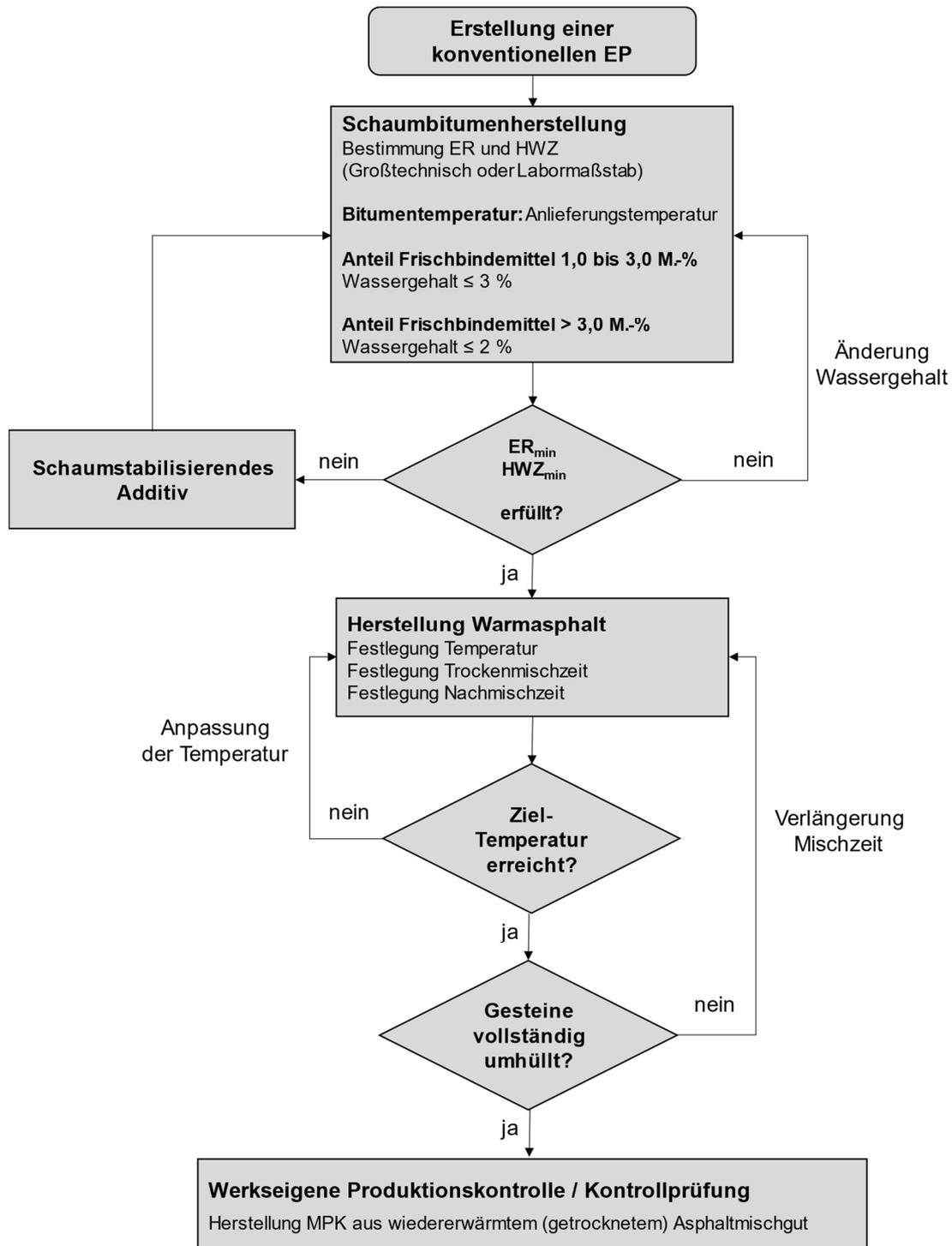


Abbildung 4-133: Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt

Für die Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt kann nach den bisherigen Erkenntnissen auf konventionelle Erstprüfungen gemäß [M KEP, 2012] unter Einsatz von Bitumen gemäß [TL Bitumen-StB, 07/13] und den dazugehörigen Verdichtungstemperaturen zurückgegriffen werden. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Verwendung von Asphaltgranulat  $\leq 50$  M.-% für Asphaltbetondeckschichten,  $\leq 60$  M.-% für SMA-Binderschichten und  $\leq 80$  M.-% für Asphalttragschichten möglich ist. Auch bei 80 M.-% Asphaltgranulat scheint das aufgeschäumte Frischbindemittel ein hinreichendes Bindemittelvolumen zu besitzen, um die Gesteine und das Asphaltgranulat auch noch bei reduzierten Produktionstemperaturen vollständig umhüllen zu können. Der Anteil des Frischbindemittels im Mischgut sollte allerdings 1 M.-% nicht unterschreiten.

Ein Schaumbitumen mit einer möglichst langen Halbwertzeit und einer möglichst hohen Expansionsrate ist für die Produktion von Schaumbitumen-Warmasphalt anzustreben. Im Idealfall ist das vorgesehene Bitumen entweder großtechnisch in Vorversuchen oder im Labormaßstab mit unterschiedlichen Zugabewassermengen aufzuschäumen und die Expansionsrate und die Halbwertzeit in Abhängigkeit des Wassergehaltes zu ermitteln. Der Wassergehalt für die Herstellung von Schaumbitumen sollte in Abhängigkeit von der dem Asphaltmischgut zugegebenen Frischbindemittelmenge gewählt werden. Bei Frischbindemittelanteilen zwischen 1,0 und 3,0 M.-% wird ein Wassergehalt  $\leq 3$  % für die Herstellung von Schaumbitumen empfohlen. Bei Frischbindemittelanteilen  $> 3,0$  M.-% sollte der Wassergehalt zur Herstellung von Schaumbitumen möglichst  $\leq 2$  % betragen. Hierdurch lässt sich das Verformungsrisiko insbesondere für Deckschichten aus Warmasphalt infolge von möglichem Restwasser aus Schaumbitumen noch weiter reduzieren.

Die Schaumbitumeneigenschaften können zusätzlich über die Bitumentemperatur optimiert werden. Allerdings ist die Temperatur des Bitumens an einer Asphaltmischanlage durch die Anlieferungstemperatur vorgegeben und eine Veränderung dieser aus unterschiedlichen Gründen nicht ohne weiteres möglich bzw. auch aus energetischen Gründen nicht zwangsläufig sinnvoll. Nach Festlegung der Zugabewassermenge sollte das Schaumbitumen eine mindestens 10fache Expansionsrate und eine Halbwertzeit von mindestens 10 Sekunden aufweisen. Können diese Anforderungen durch die Variation der Zugabewassermenge nicht erreicht werden, dann kann über den Einsatz eines schaumstabilisierenden Additivs nachgedacht werden. Dies führt in der Regel dann zu einer Verschlechterung der Emissionsbilanz des Warmasphaltes. Die hier genannten Mindestwerte an die Expansionsrate und die Halbwertzeit sollen als Empfehlungen verstanden werden. Auch Schaumbitumen mit Halbwertzeiten  $< 10$  Sekunden können für die Herstellung von Warmasphalt geeignet sein, wie die großtechnischen Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens gezeigt haben. Allerdings haben die Laborversuche gezeigt, dass bei Verwendung eines stabileren Schaumbitumens (mit Additiv) geringere Verdichtungswiderstände im Asphalt zu erwarten sind. Diese Beobachtung sollte noch durch Praxisversuche überprüft werden.

Nach Optimierung der Schaumbitumeneigenschaften ist das angestrebte Temperaturniveau für die Herstellung des Warmasphaltes unter Beachtung des technischen Regelwerkes und der Witterungsbedingungen festzulegen. Dabei stehen die Qualität und die Verarbeitbarkeit des Asphaltmischgutes im Zielkonflikt mit der Energieeinsparung und CO<sub>2</sub>-Reduktion an der Asphaltmischanlage sowie der Reduktion der Dämpfe und Aerosole an der Baustelle. In diesem Forschungsvorhaben haben sich Produktionstemperaturen zwischen 140 und 150 °C im Zusammenhang mit den untersuchten Asphaltmischgütern bewährt. Je nach Anlagentechnik kann dieses Temperaturniveau allein über die Temperatur in der Trockentrommel erreicht werden. An

anderen Asphaltmischanlagen ist eine Kombination aus Kalt- und Warmzugabe von Asphaltgranulat zur Reduktion der Produktionstemperatur notwendig bzw. sinnvoll. Hier ist das optimale Verhältnis von kaltem und warmem Asphaltgranulat zunächst in Vorversuchen zu ermitteln. In diesem Forschungsvorhaben konnten Mischguttemperaturen zwischen 140 und 150 °C in der Regel mit einer Kombination aus 40 M.-% kaltem und 60 M.-% warmem Asphaltgranulat erreicht werden. Durch die reduzierte Produktionstemperatur und je nach Eigenschaften des Schaumbitumens, kann eine Verlängerung der Mischzeit bei der Herstellung von Warmasphalt notwendig sein. Der Bindemittelübergang vom Asphaltgranulat auf die frische Gesteinskörnung lässt sich durch die Trockenmischzeit positiv beeinflussen. Im Falle einer unzureichenden Umhüllung sollte die Nachmischzeit so lange verlängert werden, bis das Asphaltmischgut vollständig und gleichmäßig umhüllt ist. In diesem Forschungsvorhaben konnten zufriedenstellende Ergebnisse mit einer Trockenmischzeit von 10 Sekunden und einer Nachmischzeit von 25 Sekunden erzielt werden.

Für die Kontrollprüfung wird empfohlen, den an der Baustelle entnommenen Warmasphalt schonend bis zur Massekonstanz im Trockenschrank zu trocknen und erst danach daraus MPK herzustellen. Hierdurch soll vermieden werden, dass MPK aus Warmasphalt durch einen eventuell noch vorhandenen Schaumbitumeneffekt zu dicht werden, wodurch dann die Anforderungen an den Verdichtungsgrad an der eingebauten Asphaltsschicht nicht mehr erfüllt werden können. Die Herstellung der MPK sollte nach „Trocknung“ des Schaumbitumen-Warmasphaltes bei konventionellen Verdichtungstemperaturen ( $145 \pm 5$  °C für PmB bzw.  $135 \pm 5$  °C für SBB) erfolgen. Die gleiche Vorgehensweise sollte auch für die werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) angewandt werden.

#### 4.5.2 Einbau von Schaumbitumen-Warmasphalt

Der Schaumbitumen-Warmasphalt sollte ausschließlich mit Fahrzeugen mit thermoisolierten Mulden zur Baustelle transportiert werden. Wie auch bei den anderen NTA-Verfahren, kann beim Einbau von Schaumbitumen-Warmasphalt das für die Verdichtung zur Verfügung stehende Zeitfenster reduziert sein. Dies ist insbesondere beim Einbau von Asphaltsschichten  $\leq 6$  cm zu berücksichtigen. Der Einsatz eines Beschickers führt in der Regel zu einem zusätzlichen Temperaturverlust des Asphaltmischgutes, was ebenfalls berücksichtigt werden sollte. Eine Kontrolle der Asphaltmischguttemperatur im Beschicker- / Fertigerkübel sowie hinter der Einbaubohle wird empfohlen.

Bei der Verdichtung sind kurze Walzbahnlängen und ein möglichst kurzer Abstand zum Straßenfertiger anzustreben. Die notwendige Anzahl der Walzen ist im Vorfeld abzustimmen. Es wird empfohlen mindestens eine Walze mehr vorzuhalten, damit bei Ausfall oder auch in anderen Situationen rechtzeitig reagiert werden kann. Die Verdichtung der Asphaltsschicht sollte mit einem Gerät für zerstörungsfreie Dichtemessungen kontinuierlich überprüft werden. Hieraus können bei unzureichender Verdichtung Sofortmaßnahmen zur Erhöhung der Verdichtung getroffen werden.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieses Forschungsprojektes war der Nachweis, dass ein hinreichender Absenkungseffekt der Misch- und Verdichtungstemperatur von Asphalt durch den Einsatz von Schaumbitumen auch bei Zugabe von Asphaltgranulat in zulässigem und praxisüblichem Umfang wirksam ist. Die Untersuchungen erfolgten am Asphaltdeckschichtmischgut AC 11 D S, Asphaltbinderschichtmischgut SMA 16 B S und Asphalttragschichtmischgut AC 22 T S. Die Zugabeanteile an Asphaltgranulat betragen bei der Asphaltdeckschicht 30 M.-% und 50 M.-%, bei der Asphaltbinderschicht 40 M.-% und 60 M.-% und bei der Asphalttragschicht 60 M.-% und 80 M.-%.

Der Nachweis erfolgte zunächst im Labormaßstab. Für die drei Ausgangsmischgüter wurden je zwei konventionelle Erstprüfungen konzipiert, auf deren Basis auch die Mischgüter mit Schaumbitumen hergestellt wurden. Im Vorfeld der Mischgütherstellung wurden drei Straßenbaubitumen (70/100, 160/220 A und 160/220 B) und ein polymermodifiziertes Bitumen (25/55-55 A (RC)) mit und ohne Zugabe eines Additivs bei jeweils drei Bitumentemperaturen und drei Wassergehalten mit der Labor-Schaumbitumenanlage aufgeschäumt, um am Schaumbitumen die Expansionsrate und Halbwertzeit zu bestimmen. Die Untersuchung des Verdichtungsverhaltens der Heißasphalte (Referenzvarianten) und Schambitumen-Warmasphalte erfolgte mit dem Marshall-Verdichtungsgerät und dem Gyrator. Der Nachweis einer zeitverzögernden Steifigkeitsentwicklung durch Schaumbitumen erfolgte an ausgelagerten Gyrator-Probekörpern mit dem Spaltzug-Schwellversuch. Die Performanceeigenschaften der Heiß- und Warmasphalte wurden mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch und dem dynamischen Spaltzug-Schwellversuch untersucht. Folgende Erkenntnisse wurden im Zuge der Untersuchungen im Labormaßstab gewonnen:

- Die eingesetzten Straßenbaubitumen können bereits bei einer Bitumentemperatur von 140 °C gut aufgeschäumt werden. Eine Erhöhung der Bitumentemperatur auf 160 °C führt zu keiner Verbesserung der Schaumeigenschaften. Eine Erhöhung der Bitumentemperatur über 160 °C führt bei den Straßenbaubitumen tendenziell zur Abnahme der Expansionsrate. Beim PmB waren Temperaturen zwischen 160 °C und 180 °C notwendig, um eine zu den anderen Bitumen vergleichbare Expansionsrate und Halbwertzeit zu erhalten. Bei einer Bitumentemperatur von 160 °C und einem Wassergehalt von 3,0 % konnte für alle Bitumen ein Kompromiss zwischen möglichst hoher Expansionsrate und möglichst langer Halbwertzeit erzielt werden. Das Bitumen 160/220 B konnte die Mindestanforderungen nach M KRC ( $ER_{\min} = 10$  und  $HWZ_{\min} = 10$  Sekunden) für keine der untersuchten Einstellungen erfüllen. Die Bitumen 160/220 A und 160/220 B wiesen trotz gleicher Bitumensorte ein sehr unterschiedliches Schäumungsverhalten auf. Von drei untersuchten Additiven führte nur ein Additiv zur Verbesserung der Schaumeigenschaften.
- Der positive Effekt auf das Verdichtungsverhalten durch Schaumbitumen ließ sich mit dem Gyrator auch noch bei einem Schaumbitumenanteil von 1 M.-% (AC 22 T S mit 80 M.-% AG) nachweisen. Das Potenzial zur Temperaturabsenkung bei Verwendung von Schaumbitumen liegt im Labormaßstab zwischen 10 und 30 K. Der Einsatz von Bitumen mit guten Schaumeigenschaften und schaumstabilisierenden Additiven und begünstigt das Verdichtungsverhalten.

- Die Hypothese, wonach mit Schaumbitumen hergestellte Varianten ihre Gebrauchseigenschaften zu einem späteren Zeitpunkt erreichen als Referenzvarianten ohne Schaumbitumen, konnte im Zuge der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen nicht bestätigt werden.
- Die Untersuchungen mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch lieferten keine belastbaren Ergebnisse, die einen Rückschluss auf einen reduzierten Verformungswiderstand der Schaumbitumenmischgüter zulassen würden. Die Untersuchung mit dem dynamischen Spaltzug-Schwellversuch ergab für die Asphaltdeckschicht nur geringfügige Unterschiede zwischen der Steifigkeit des Heißasphaltes und der Steifigkeit des Warmasphaltes mit Schaumbitumen. Bei der mit Schaumbitumen hergestellten Asphaltbinderschicht wurden geringere Steifigkeitsmoduln als bei der Referenzvariante ohne Schaumbitumen ermittelt. Die Abweichungen im Steifigkeitsmodul lagen bei der Asphaltbinderschicht mit Ausnahme der Variante BS60S + Add. (bei 5 °C) im Bereich der Wiederholpräzision des Spaltzug-Schwellversuches (bei 10 Hz) und sind somit als nicht kritisch zu bewerten. Bei der Asphalttragschicht lagen die Steifigkeitsmoduln der Schaumbitumenvarianten deutlich unter den Steifigkeitsmoduln der Referenzvarianten und somit außerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision. Da dieses Ergebnis nicht an den Gyrator-Probekörpern reproduziert werden konnte, wird davon ausgegangen, dass die geringere Steifigkeit der Schaumbitumenvarianten auf niedrigere Raumdichten (oder andere strukturelle Unterschiede im verdichteten Asphalt) und nicht auf einen negativen Einfluss von Restschaumwasser aus Schaumbitumen zurückzuführen ist.
- Die mit Schaumbitumen hergestellten Asphalttragschichtvarianten mit 80 M.-% Asphaltgranulat zeigten zwar eine im Labormaßstab noch nachweisbar bessere Verdichtbarkeit, die Performance-Eigenschaften waren aber im Vergleich zum Referenzmischgut zumeist schlechter. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, da die Untersuchungen keine plausible Erklärung hierfür lieferten.

Die großtechnische Validierung erfolgte an drei Asphaltmischanlagen. Hierzu wurden 36 Asphaltmischungen an zwei der drei Asphaltmischanlagen mit und ohne Schaumbitumen sowie unter Variation der Trocken- und Nachmischzeit hergestellt. Aus diesen Asphaltmischungen wurden Asphalt-Probeplatten zur Untersuchung mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch und dynamischen Spaltzug-Schwellversuch hergestellt. Folgende Erkenntnisse wurden im Zuge der großtechnischen Erprobung gewonnen:

- Eine Reduktion der Temperatur des Asphaltgranulates unterhalb von 150 °C war aufgrund von Bindemittelanhaftungen in den Paralleltrommeln von zwei hier beteiligten Asphaltmischanlagen nicht sinnvoll. Auch die Regulierung der Asphaltmischguttemperatur über die Trockentrommel war nur eingeschränkt möglich. Die Absenkung der Produktionstemperatur um 20 bis 30 K wurde an den beiden Mischanlagen daher nicht durch eine Absenkung der Temperatur des Asphaltgranulates, sondern durch eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe der Asphaltgranulate erreicht.
- Ein positiver Einfluss auf die Asphalt-Performance durch eine längere Trockenmischzeit oder eine längere Nachmischzeit konnte weder mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch noch mit dem dynamischen Spaltzug-Schwellversuch nachgewiesen werden.

- Die Untersuchungen mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch ergaben für die Mehrzahl der Schaumbitumen-Warmasphalte ein mit dem Heißasphalt vergleichbares Verformungsverhalten. Die mit Schaumbitumen hergestellte Asphaltdeckschicht mit 30 M.-% Asphaltgranulat (DS30S) wies im Vergleich zur Referenzvariante ohne Schaumbitumen (DS30R) höhere Verformungen und eine geringere Steifigkeit auf. Die höchste Dehnungsrate wies in dieser Untersuchungsreihe jedoch nicht eine Variante mit Schaumbitumen, sondern die Referenzvariante DS50R auf.
- Bei etwa einem Drittel der Schaumbitumen-Warmasphalte wurde eine geringere Steifigkeit im Vergleich zur Referenzvariante ohne Schaumbitumen nachgewiesen. Allerdings lag die überwiegende Mehrheit der Abweichungen zwischen den Steifigkeitsmoduln noch innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision, sodass diese prinzipiell als nicht kritisch hinsichtlich der Performanceeigenschaften zu bewerten sind.
- Auch das an den Asphaltmischanlagen produzierten Asphalttragschichtgemisch mit 80 M.-% Asphaltgranulat zeigte im Vergleich zum Referenzmischgut schlechtere Performanceeigenschaften.

Zwei Untersuchungsstrecken wurden unter Einsatz von Schaumbitumen realisiert. Im Zuge der ersten Untersuchungsstrecke wurde eine Asphaltdeckschicht AC 11 D S mit 50 M.-% Asphaltgranulat bei konventionellen Temperaturen ohne Schaumbitumen und temperaturabgesenkt unter Verwendung von Schaumbitumen eingebaut. Im Zuge der zweiten Untersuchungsstrecke wurde eine Asphaltbinderschicht SMA 16 B S mit 40 M.-% und 60 M.-% Asphaltgranulat und eine Asphaltdeckschicht AC 11 D S mit 30 M.-% und 50 M.-% Asphaltgranulat konventionell sowie temperaturabgesenkt eingebaut. Folgende Erkenntnisse wurden im Zuge der Untersuchungen gewonnen:

- Die Expansionsrate und Halbwertzeit des großtechnisch hergestellten Schaumbitumens ist vergleichbar mit der Expansionsrate und Halbwertzeit desselben Bitumens, aufgeschäumt im Labormaßstab mit einer Labor-Schaumbitumenanlage. Allerdings war die Halbwertzeit des verwendeten Bitumens sehr gering.
- Der Schaumbitumen-Warmasphalt ließ sich im Gyrator auch bei reduzierter Verdichtungs-temperatur leichter verdichten als der Heißasphalt, der ohne Schaumbitumen hergestellt wurde. Auch am wiedererwärmten Schaumbitumenmischgut konnte noch ein Verdichtungseffekt mit dem Gyrator nachgewiesen werden.
- Die Untersuchungen mit dem modifizierten leichten Fallgewichtsgesetz haben keine Ergebnisse ergeben, die auf eine verminderte Steifigkeitszunahme durch den Einsatz von Schaumbitumen schließen lassen würden.
- Die Ergebnisse der BBR- und DSR-Prüfung zeigten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Eigenschaften des aus dem Referenzmischgut rückgewonnenen Bindemittels und des aus dem Schaumbitumenmischgut rückgewonnenen Bindemittels.

- Die Anforderung an den Hohlraumgehalt konnte bei der Asphaltdeckschicht (1. Untersuchungsstrecke) und der Asphaltbinderschicht (2. Untersuchungsstrecke) trotz Temperaturreduzierung von 20 bis 30 K erfüllt werden. Die Bohrkern der Probefelder mit Warmasphalt wiesen jedoch etwas höhere Hohlraumgehalte auf als die Bohrkern der Referenzfelder, die bei höherer Temperatur eingebaut wurden. Bei der 2. Untersuchungsstrecke wurde der max. zulässige Hohlraumgehalt bei beiden Referenzfeldern sowie einem der beiden Probefelder mit Schaumbitumen überschritten.
- Die Anforderung an den Schichtenverbund wurde bei beiden Untersuchungsstrecken eingehalten. Ein negativer Einfluss auf den Schichtenverbund durch die Temperaturabsenkung ist anhand der gewonnenen Resultate nicht zu erkennen.
- Die Steifigkeitsmoduln und Dehnungsraten der bei abgesenkter und der bei konventioneller Temperatur hergestellten Asphaltbinderschicht liegen bei den im Labor verdichteten Proben ( $BK_{wsv}$ ) auf einem ähnlichen Niveau. Bei der Asphaltdeckschicht weisen die Varianten DS30S (1. Untersuchungsstrecke) und DS50S (2. Untersuchungsstrecke) eine geringere Steifigkeit und höhere Dehnungsraten im Vergleich zu den Referenzvarianten DS30R und DS50R auf. Die Untersuchungen der rückgewonnenen Bindemittel haben in diesem Zusammenhang keine Auffälligkeiten ergeben.
- Die Steifigkeitsmoduln der bei abgesenkter und der bei konventioneller Temperatur hergestellten Asphaltbinderschicht liegen bei den Ausbauproben ( $BK_{Strecke}$ ) auf einem ähnlichen Niveau. Allerdings ist die Dehnungsrate bei den Varianten mit Schaumbitumen höher im Vergleich zu den Heißasphalten. Bei der Asphaltdeckschicht (2. Untersuchungsstrecke) ist die Steifigkeit und der Verformungswiderstand der Ausbauproben DS30R und DS50R aufgrund der höheren Hohlraumgehalte geringer als die Steifigkeit und der Verformungswiderstand der Ausbauproben mit Schaumbitumen (DS30S und DS50S). Bei der 1. Untersuchungsstrecke wiesen die Ausbauproben der mit Schaumbitumen hergestellten Variante DS50S geringere Steifigkeiten auf als die Ausbauproben der Referenzvariante DS50R. Die Abweichungen lagen allerdings noch innerhalb der Grenzen der Wiederholpräzision des Spaltzug-Schwellversuches. Hinsichtlich des Verformungsverhaltens bei Wärme konnten für die Ausbauproben der 1. Untersuchungsstrecke keine nennenswerten Unterschiede zwischen Heiß- und Warmasphalt festgestellt werden.
- Bei beiden Untersuchungsstrecken konnte eine Reduktion der Dämpfe und Aerosole durch Schaumbitumen-Warmasphalt erzielt werden. Die Reduktion der Expositionen lag je nach Arbeitsbereich zwischen 20,2 und 42,8 % (1. Untersuchungsstrecke) sowie zwischen 50 und 81 % (2. Untersuchungsstrecke). Zur Einhaltung des Arbeitsplatzgrenzwertes von  $1,5 \text{ mg/m}^3$  zeigt sich allerdings noch dringender Verbesserungsbedarf. Eine im Mai 2023 realisierte Baumaßnahme zeigt jedoch, dass die Einhaltung des Arbeitsplatzgrenzwertes auch mit Schaumbitumen-Warmasphalt möglich ist.

Aus den 36 großtechnisch untersuchten Asphaltmischgütern wurden 22 Varianten ausgewählt, für die dann eine Energie- und Emissionsbilanzierung durchgeführt wurde. Die Energie- und Emissionsbilanzierung beschränkte sich ausschließlich auf den Herstellungsprozess der Mischgüter an einer Asphaltmischanlage. Die Bilanzierung ergab folgende Ergebnisse:

- Für die Herstellung einer Tonne Heißasphalt fallen, unter den hier definierten Rahmenbedingungen, zwischen 60,8 und 66,1 kWh Energie sowie zwischen 22,3 und 24,3 kg CO<sub>2</sub> an. Die Erwärmung und Trocknung des Asphaltgranulates und der Gesteinskörnungen macht zusammen über 80 % der Gesamtenergiemenge aus. Eine Reduktion des Feuchtegehaltes von 4 % auf 2 % (z. B. durch eine überdachte Lagerung des Asphaltgranulates) führt, je nach Asphaltgranulat-Anteil im Mischgut, zu einer Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung von bis 15 %.
- Der Energiebedarf für die Erwärmung des Zugabebindemittels (Frischbindemittels) ist, bezogen auf die Gesamtenergiebilanz, vernachlässigbar gering.
- Für die Herstellung einer Tonne Warmasphalt fallen zwischen 54,4 und 60,9 kWh Energie sowie zwischen 19,9 und 21,4 kg CO<sub>2</sub> an. Durch die Reduktion der Produktionstemperatur um 30 K können an der Asphaltmischanlage zwischen 11,8 und 12,5 % Energie und ebenso viele CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Jede weitere Reduktion der Produktionstemperatur um 10 K führt zu einer zusätzlichen Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparung von ca. 4 %.
- Zusätze können einen negativen Einfluss auf die Emissionsbilanz eines Asphalttes haben. Je nach CO<sub>2</sub>-Bilanz des eingesetzten Zusatzes können die durch die Temperaturabsenkung eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Verwendung des Zusatzes wieder ausgeglichen werden. Dieser Sachverhalt sollte beim Einsatz von Zusätzen jeglicher Art (z. B. viskositätsverändernde organische Zusätze oder schaumstabilisierende Zusätze) berücksichtigt werden.

Im Zuge dieses Forschungsprojektes wurde die verfahrenstechnische, bautechnische und energetische Eignung der Schaumbitumentechologie zur Herstellung von Warmasphalt unter Mitverwendung von Asphaltgranulat nachgewiesen. Es konnte demonstriert werden, dass Schaumbitumen-Warmasphalt mit vergleichbaren Performanceeigenschaften wie konventioneller Heißasphalt produziert werden kann. Ein negativer Einfluss durch Restschaumwasser konnte im Zuge der nachgelagerten Steifigkeitsuntersuchungen nicht nachgewiesen werden. Dennoch wurde bei einigen großtechnisch hergestellten Schaumbitumen-Warmasphalten – hier insbesondere die Asphalttragschichten mit 80 M.-% Asphaltgranulat zu nennen – ein im Vergleich zum Heißasphalt ungünstigeres Gebrauchsverhalten festgestellt. Die Ursache hierfür konnte nicht abschließend geklärt werden. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

In diesem Forschungsprojekt wurde das Schäumungsverhalten von fünf Bitumen untersucht. Dabei zeigten zwei Straßenbaubitumen gleicher Sorte völlig unterschiedliche Schaumbitumeneigenschaften. In zukünftigen Forschungsprojekten sollten chemische Eigenschaften und Unterschiede der Bitumen untersucht werden. Darüber hinaus muss ein größerer Erfahrungshintergrund bezüglich der Schäumbarkeit von Straßenbaubitumen, polymermodifizierten Bitumen und Bitumen mit viskositätsveränderten Zusätzen geschaffen werden. Sinnvoll wäre außerdem eine Klassifizierung der Frischbindemittel hinsichtlich ihres Schäumungsverhaltens. Bitumenlieferanten könnten diese Angaben als Bestandteil ihrer Lieferspezifikationen vor dem Hintergrund neu zu schaffender Anforderungen bzw. Klassifizierungsmodelle innerhalb einer Fortschreibung der Regelwerke für Bitumen an den Mischguthersteller mitteilen.

Im Zuge dieses Forschungsprojektes konnte ein Potential zur Temperaturabsenkung von bis zu 30 K im Labormaßstab nachgewiesen werden. Durch die Kombination von Schaumbitumen und oberflächenaktiven chemischen Zusätzen könnte das Potenzial zur Temperaturabsenkung ggf. noch weiter ausgeschöpft werden. Hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf.

## 6 Anhang

### Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Im Bearbeitungszeitraum sind folgende Maßnahmen zum Ergebnistransfer erfolgt:

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraumen
Laufender Bericht im Arbeitskreis AK 7.4.4 der FGSV	Einbindung in das nationale technische Regelwerk	Online-Sitzung	24.11.2021 25.04.2022 13.09.2022
		Bochum / Ruhr Universität Bochum	31.01.2023
		Köln / Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen	28.09.2023
Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	Einbindung in lfd. Projekt durch fachlichen Austausch	Online-Sitzungen	07.06.2021 26.10.2021 19.05.2022 18.11.2022
Publikation der Forschungsidee und der dabei gewählten Vorgehensweise	Information des Fachpublikums über Vorgehensweise und Zielsetzung sowie erzielte Forschungsergebnisse	Zeitschrift „asphalt“	Ausgabe 3/2021 Ausgabe 8/2022 Ausgabe 1/2023 Ausgabe 2/2023
Publikation der Forschungsidee und der dabei gewählten Vorgehensweise	Information des Fachpublikums über Vorgehensweise und Zielsetzung sowie erzielte Forschungsergebnisse	Zeitschrift „Straße und Autobahn“	Ausgabe 1/2023
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über das Forschungsprojekt	Baden-Baden / Regionalversammlung des DAV	13.09.2021
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Dortmund / Deutscher Straßenkongress	05.10.2022
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Berchtesgaden / Deutsche Asphalttage	08.02.2023 bis 10.02.2023
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Willingen / Asphaltseminar	15.03.2023

Folgende Maßnahmen zum Ergebnistransfer sind nach Projektende geplant:

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraumen
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Münster / VSVI NRW, Seminar an FH Münster	24.10.2023
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Karlsruhe /Kolloquium, Karlsruher Institut für Technologie	22.11.2023
Vortrag vor Fachpublikum	Information des Fachpublikums über die Ergebnisse des Projektes mit Hinweisen zur Umsetzung	Dresden / 8. Dresdner Asphalttage	07.12.2023 bis 08.12.2023
Schlussbericht	Umfassende Darstellung der Projektergebnisse für die Öffentlichkeit	Homepage der Forschungsvereinigung	Oktober/November 2023

### Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

Ziele	Ergebnisse
Wissenschaftliche Erkenntnisse im Labormaßstab zum Einsatz von Schaumbitumen-Warmasphalt unter Verwendung von höchstmöglichen Asphaltgranulatanteilen mit gleichzeitiger Berücksichtigung der einschlägigen Bestimmungen und Vorgaben	Eine Asphaltdeck, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht konnte im Labormaßstab unter Mitverwendung von hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen hergestellt werden. Es konnte ein Verdichtungseffekt durch Schaumbitumen auch bei Asphaltgranulat-Anteilen von 80 M.-% mit dem Gyrator nachgewiesen werden. Das Potential zur Temperaturabsenkung mit Schaumbitumen liegt im Labormaßstab für die hier untersuchten Varianten bei 10 bis 30 K. Die hergestellten Schaumbitumen-Warmasphalte weisen eine ähnliche Asphalt-Performance wie die Heißasphalte (Referenz) auf.
Produktionstechnische Erkenntnisse über Schaumbitumen-Warmasphalt-Technologie im großtechnischen Maßstab in Verbindung mit höchstmöglichem Asphaltgranulateinsatz	Schaumbitumen-Warmasphalt konnte an drei Asphaltmischwerken mit zwei unterschiedlichen Anlagenherstellern unter Mitverwendung von hohen Zugabeanteilen an Asphaltgranulat temperaturabgesenkt mit Schaumbitumen hergestellt werden. Alle drei im Forschungsvorhaben eingesetzten großtechnischen Schaumbitumenanlagen sind zur großtechnischen Herstellung von Warmasphalt geeignet. Die Temperaturabsenkung konnte an zwei der drei Asphaltmischanlagen durch eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe von Asphaltgranulat realisiert werden. An einer der drei Asphaltmischanlagen erfolgte die Zugabe des Asphaltgranulates ausschließlich über die Paralleltrommel (Warmzugabe). Die großtechnisch hergestellten Warmasphalte weisen eine vergleichbare Performance auf wie die Heißasphalte. Die Erkenntnisse im Labormaßstab wurden somit in der großtechnischen Erprobung bestätigt.

Erkenntnisse über das Verhalten und die Qualität von Warmasphalt-Gemischen unter realen Misch- und Einbau-bedingungen	Es konnte gezeigt werden, dass Asphaltdeck- und Asphaltbinder-schichten mit hohen Anteilen an Asphaltgranulat mit Schaumbitumen temperaturabgesenkt unter realen Bedingungen produziert und eingebaut werden können. Durch die Temperaturabsenkung konnten Dämpfe und Aerosole beim Einbau zum Teil deutlich reduziert werden.
Praxiserprobte skalierbare Erkenntnisse über Energieeinsparpotential bei großtechnischem Einsatz von Warmasphalt, sowie verringerter CO <sub>2</sub> -Emissionen als Beitrag zu den nationalen Klimazielen	Durch eine Energie- und Emissionsbilanzierung wurde das Potential zur Einsparung von Energie und CO <sub>2</sub> -Emissionen bei der Herstellung von unterschiedlichen Warmasphalt-Gemischen (Asphaltdeck-, Asphaltbinder- und Asphalttragschicht) an einer Asphaltmischanlage aufgezeigt.
Übersichten und Schaubilder zur Übertragung des entwickelten Parametrierkonzeptes auf andere in der Praxis auftretende Randbedingungen wurden erstellt	Ablaufdiagramme für die Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt mit Hinweisen und Empfehlungen zur Optimierung der Schaumbitumen- und Mischguteigenschaften wurden erstellt. Empfehlungen und Hinweise für den Einbau von Schaumbitumen-Warmasphalt wurden formuliert.

**Getrennt nach Forschungseinrichtungen Angaben zu den aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben für Personenmonate des wissenschaftlich-technischen Personals gemäß Beleg über Beschäftigungszeiten (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans), für Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans) und für Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)**

Für das Forschungsprojekt wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter gemäß Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes für insgesamt 14,5 Personenmonate (Antrag: 14,5) aus Projektmitteln finanziert.

Gemäß Einzelansatz B des Finanzierungsplanes wurde eine Schaumbitumen-Laboranlage WLB 10 der Firma Wirtgen zum Preis von 31.225,00 Euro angeschafft.

Es wurden keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen.

**Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden vollumfänglich erreicht. Die Ergebnisse bestätigen die Notwendigkeit und Angemessenheit des Untersuchungsprogramms. Die geleistete Arbeit entspricht vollumfänglich dem begutachteten und bewilligten Antrag, daher war die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

**Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU**

Ein wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU ergibt sich aus den folgenden Schlussfolgerungen:

- Temperaturabgesenkter Asphalt (Warmasphalt) kann unter Zuhilfenahme der Schaumbitumentechologie auch bei Mitverwendung von hohen Asphaltgranulat-Anteilen produziert und eingebaut werden. Durch die Verwendung von Asphaltgranulat werden Ressourcen eingespart, was sowohl die Produktionskosten senkt als auch einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leistet.

- Durch die Absenkung der Produktionstemperatur werden Energiekosten an der Asphaltmischanlage reduziert. Die Einsparung von Energie geht mit einer Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen einher. Die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen führt im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Steuer zu einer Kostenersparnis und trägt zur Erfüllung der nationalen Klimaziele bei. Vor diesem Hintergrund ist Schaumbitumen möglichst ohne Zusatz weiterer, die CO<sub>2</sub>-Bilanz beeinflussender Additive, herzustellen.
- Es konnte demonstriert werden, dass Schaumbitumen-Warmasphalt an drei Asphaltmischwerken und mit zwei unterschiedlichen Schaumbitumenanlagen produziert werden kann. KMU sind somit nicht an einen einzigen Schaumbitumenanlagen-Hersteller gebunden, sondern haben die Möglichkeit aus mehreren Herstellern zu wählen.
- Die Erstellung einer gesonderten Erstprüfung für Schaumbitumen-Warmasphalt ist nicht zwingend notwendig. Schaumbitumen-Warmasphalt kann auf der Grundlage konventioneller Erstprüfungen gemäß [M KEP, 2012] konzipiert und produziert werden.
- Asphaltmischanlagen, die von Bindemittelanhaftungen in der Paralleltrommel (bei zu geringen Temperaturen) betroffen sind, können die Absenkung der Asphaltmischguttemperatur bei Mitverwendung hoher Zugabemengen an Asphaltgranulat, soweit es die Anlagentechnologie zulässt, durch eine kombinierte Kalt- und Warmzugabe des Asphaltgranulates erreichen.
- KMU können mit einer einfachen Methode (Laser-Entfernungsmessung) die Expansionsrate und Halbwertzeit von Schaumbitumen bestimmen und diese beiden Kenngrößen, falls erforderlich, durch die Variation des Wassergehaltes an der Asphaltmischanlage optimieren. Alternativ besteht die Möglichkeit die Schaumbitumeneigenschaften mit einer Schaumbitumenanlage im Labormaßstab zu optimieren und den dort ermittelten Wassergehalt anschließend auf die großtechnische Anlage zu übertragen. Diese Übertragung ist nach jetzigem Kenntnisstand aufgrund der abweichenden großtechnischen Randbedingungen mit Einfluss auf das Schäumungsverhalten im Asphaltmischer der Mischanlage jedoch nur bedingt möglich.
- Es konnte demonstriert werden, dass Schaumbitumen auch mit einer geringen Halbwertzeit (HWZ < 5 Sekunden) für die Herstellung von Warmasphalt geeignet sein kann. Solch ein Schaumbitumen sollte allerdings eine mindestens 10fache Expansionsrate aufweisen. Anlagenbetreiber können die Eigenschaften von Schaumbitumen durch die Verwendung von schaumstabilisierenden Additiven verbessern. Nach aktuellem Kenntnisstand existiert auf dem deutschen Markt bisher nur ein Additiv, das dazu in der Lage ist. Im Zuge dieses Forschungsvorhabens konnte allerdings demonstriert werden, dass die Herstellung von Schaumbitumen-Warmasphalt auch ohne Einsatz eines schaumstabilisierenden Additivs möglich ist. Dennoch sind verbesserte Verdichtungseigenschaften bei Verwendung eines geeigneten Additivs zu erwarten. Dies sollte durch Praxisversuche überprüft werden.

- 
- Der Wassergehalt für die Herstellung von Schaumbitumen sollte in Abhängigkeit von der dem Asphaltmischgut zugegebenen Frischbindemittelmenge gewählt werden. Bei Frischbindemittelanteilen zwischen 1,0 und 3,0 M.-% wird ein Wassergehalt  $\leq 3$  % für die Herstellung von Schaumbitumen empfohlen. Bei Frischbindemittelanteilen  $> 3,0$  M.-% sollte der Wassergehalt zur Herstellung von Schaumbitumen möglichst  $\leq 2$  % betragen. Hierdurch lässt sich das Verformungsrisiko insbesondere für Deckschichten aus Warmasphalt infolge von möglichem Restwasser aus Schaumbitumen noch weiter reduzieren.
  
  - Die Erkenntnisse dieses Forschungsvorhabens leisten einen Beitrag zur Erstellung eines FGSV-Dokumentes. Mit diesem Dokument erhalten KMU Handlungsanweisungen und Empfehlungen hinsichtlich der Herstellung von Warmasphalt unter Einsatz von Schaumbitumen. Eine aktive Beteiligung des Forschungsnehmers an der Bearbeitung des FGSV-Dokumentes ist gewährleistet.

## 7 Literaturverzeichnis

### [Ammann, 2018]

Ammann (2018): Bedienungsanleitung Schaumbitumenaggregat. Ammann Group Holding AG. Langenthal.

### [AL BBR-Prüfung, 2017]

Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR) – AL BBR-Prüfung (Ausgabe 2017). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

### [AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2017]

Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) – Durchführung im Temperatursweep – AL DSR-Prüfung (Ausgabe 2014). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

### [BAFA, 2021]

Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (2021): Informationsblatt – CO<sub>2</sub>-Faktoren, Eschborn.

### [Benninghoven, 2021]

Benninghoven (2021): Temperaturabgesenkter Asphalt Schaumbitumenmodul / Zugabe von Additiven. [https://www.wirtgen-group.com/media/06\\_benninghoven/03\\_broschueren\\_3/02\\_technologien\\_6/01\\_asphaltherstellung\\_2/temp\\_asphalt/be\\_bro\\_low\\_temp\\_asphalt\\_de.pdf](https://www.wirtgen-group.com/media/06_benninghoven/03_broschueren_3/02_technologien_6/01_asphaltherstellung_2/temp_asphalt/be_bro_low_temp_asphalt_de.pdf) (Abrufdatum: 03.03.2023).

### [Bonaquist, 2011]

Ramon, Bonaquist (2011): Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. NCHRP Report 691, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C.

### [Chiu et al., 2002]

Chiu CT, Huang MY (2002): A study on properties of foamed asphalt treated mixes. University, Department of Civil Engineering, Tung Shiang, Hsin Chu, Taiwan.

**[D'Angelo et al., 2008]**

John, D'Angelo; Eric, Harm; John, Bartoszek; Gaylon, Baumgardner; Matthew, Corrigan; Jack, Cowser; Thomas, Harman; Mostafa, Jamshidi; Wayne, Jones; Dave, Newcomb; Brian, Prowell; Ron, Sines; Bruce, Yeaton (2008): Warm-Mix Asphalt: European Practice. National Cooperative Highway Research Program. Technical Report FHWA-PL-08-007, Washington D.C.

**[DAV, 2021]**

DAV (2021): Technisches Informationspapier – Niedrigtemperaturasphalt (NTA). Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V., Bonn.

**[DIN EN 1097-6, 2022]**

DIN EN 1097-6 (Fassung 2022). Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[DIN EN 933-10, 2009]**

DIN EN 933-10 (Fassung 2009). Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 10: Beurteilung von Feinanteilen - Kornverteilung von Füller (Luftstrahlsiebung). Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[DIN EN 933-1, 2012]**

DIN EN 933-1 (Fassung 2012). Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[DIN EN 1426, 2013]**

DIN EN 1426 (Fassung 2013): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Nadelpenetration. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[DIN EN 1427, 2013]**

DIN EN 1427 (Fassung 2013): Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes – Ring- und Kugel-Verfahren. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[DIN EN 12697, 2019]**

DIN EN 12697 (Fassung 2019). Asphalt – Prüfverfahren – Teil 31: Herstellung von Probekörpern mit dem Gyrator-Verdichter. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH, Berlin.

**[EAPA, 2014]**

EAPA (2014): The use of Warm Mix Asphalt, EAPA – Position Paper, European Asphalt Pavement Association (EAPA), Brussels.

**[ETV-StB-BW, 2020]**

Ergänzungen zu den Technische Vertragsbedingungen im Straßenbau Baden-Württemberg – ETV-StB-BW (Ausgabe 2020). Ministerium für Verkehr, Stuttgart.

**[H AI ABi, 2015]**

Hinweise für die Planung und Ausführung von Alternativen Asphaltbinderschichten (Ausgabe 2015). Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[Hailesilassie et al., 2015]**

Biruk W. Hailesilassie, Martin Hugener, Manfred N. Partl (2015): Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures. In: Construction and Building Materials. Elsevier, Amsterdam.

**[He et al., 2006]**

Gui-ping He, Wing-gun Wong (2006): Decay properties of the foamed bitumens. In: Construction and Building Materials. Elsevier, Amsterdam.

**[Iwanski et al., 2021]**

Marek Iwanski, Anna Chomicz-Kowalska, Grzegorz Mazurek, Przemyslaw Buczynski, Malgorzata Cholewinska, Mateusz M. Iwanski, Krzysztof Maciejewski, Piotr Ramiaczek (2021): Effects of the Water-Based Foaming Process on the Basic and Rheological Properties of Bitumen 70/100. In: Materials. MDPI, Basel.

**[Jenkins, 2000]**

Kim Jonathan, Jenkins (2000): Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with emphasis on Foamed Bitumen. University of Stellenbosch, South Africa.

**[Kar et al., 2019]**

Siksha Swaroop Kar, Aravind K. Swamy, Devesh Tiwari, P. K. Jain (2019): Impact of low viscosity grade bitumen on foaming characteristics. In: Journal of the South African Institution of Civil Engineering. Paper 1635. South African Institution of Civil Engineering, Midrand, Johannesburg, Gauteng.

**[Kowalska et al., 2017]**

Anna Chomicz-Kowalska, Justyna Mrugala, Krzysztof Maciejewski (2017): Evaluation of Foaming Performance of Bitumen Modified with the Addition of Surface Active Agent In: Conference Series – Materials Science and Engineering.

**[Leek et al., 2011]**

Leek C, Jameson G (2011): Review of foamed bitumen stabilisation mix design methods. Austroads, Sydney.

**[Lesueur et al., 2004]**

Didier Lesueur, Hélène Clech, Aline Brosseaud, Christian Such, Bogdan Cazaciu, Burgard Koenders, Pierre-Jean Cérimo, Jacques Bonvallet (2004): Foamed Bitumens: Foamability and foam stability. In: Road Materials and Pavement Design. Taylor & Francis, Oxfordshire.

**[M KEP, 2012]**

Merkblatt für die Konzeption und die Erstprüfung von Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen– M KEP (Ausgabe 2012), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[M KRC, 2005]**

Merkblatt für Kaltrecycling in situ im Straßenoberbau – M KRC (Ausgabe 2005), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[M TA, 2006]**

Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt – M TA (Ausgabe 2006), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[M TA, 2011]**

Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt – M TA (Ausgabe 2011), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[M TA, 2021]**

Merkblatt für die Temperaturabsenkung von Asphalt – M TA (Ausgabe 2021), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[Martinez et al., 2014]**

Gilberto Martinez-Arguelles, Filippo Giustozzi, Maurizio Crispino, Gerardo W. Flintsch (2014): Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen. In: Construction and Building Materials. Elsevier, Amsterdam.

**[Milton et al., 1999]**

Milton LJ, Earland M. (1999): Design guide and specification for structural maintenance of High Way pavements by cold in situ recycling. Transport Research Laboratory.

**[Muthen et al., 1999]**

Muthen KM, Lewis A, Vos RM (1999): Foamed asphalt mixes, mix design procedure. Presented at the 7th conference on asphalt pavements for southern Africa, South Africa.

**[Namutebi, 2011]**

May Namutebi (2011): Some Aspects of Foamed Bitumen Technology. Licentiate Thesis. Department of Transport Science School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm.

**[Newcomb et al., 2015]**

David E. Newcomb, Edith Arambula, Fan Yin, Jun Zhang (2015): Properties of Foamed Asphalt for Warm Mix Asphalt Applications. NCHRP Report 807, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington D.C.

**[Ozturk, 2013]**

Hande Isik Ozturk (2013): Quantification of Quality of Foamed Warm Mix Asphalt Binders and Mixtures. Dissertation. Michigan State University, Michigan.

**[Ramanujam et al., 2009]**

Ramanujam J, Jones J, Janosevic M (2009): Design, construction and performance of insitu foamed bitumen stabilized pavements. Queensland.

**[Sabita, 2009]**

Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials (2009). Southern African Bitumen Association (Sabita), South Africa.

**[Sabita, 2020]**

Technical Guideline: Bitumen Stabilised Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilised Materials. Third Edition (2020). Southern African Bitumen Association (Sabita), South Africa.

**[Saleh, 2006]**

M. F. Saleh (2006): Characterisation of Foam Bitumen Quality and the Mechanical Properties of Foam Stabilised Mixes.

[https://www.researchgate.net/publication/29487124\\_Characterisation\\_of\\_Foam\\_Bitumen\\_Quality\\_and\\_the\\_Mechanical\\_Properties\\_of\\_Foam\\_Stabilised\\_Mixes](https://www.researchgate.net/publication/29487124_Characterisation_of_Foam_Bitumen_Quality_and_the_Mechanical_Properties_of_Foam_Stabilised_Mixes) (Abfrage: 20.06.2023).

**[Sunarjono, 2008]**

Sri Sunarjono (2008): The Influence of Foamed Bitumen Characteristics on Cold-Mix Asphalt Properties. Thesis. University of Nottingham, Nottingham.

**[TL Asphalt-StB, 07/13]**

Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen – TL Asphalt-StB (Ausgabe 2007/ Fassung 2013). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[TL Bitumen-StB, 07/13]**

Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen – TL Bitumen-StB (Ausgabe 2007/ Fassung 2013). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 1]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 1 (Ausgabe 2022): Bindemittelgehalt. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 2]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 2 (Ausgabe 2013): Korngrößenverteilung. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 5]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5 (Ausgabe 2013): Rohdichte von Asphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 6]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5 (Ausgabe 2023): Raumdichte von Asphalt-Probekörpern. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 8]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5 (Ausgabe 2012): Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 10 B]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 10 B (Ausgabe 2010): Verdichtungswiderstand mit Hilfe des Marshall-Verdichtungsgerätes, Verfahren B: Änderung der Probekörperdicke. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 B1 (Ausgabe 2022): Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 26]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 26 (Ausgabe 2018): Spaltzug-Schwellversuch – Bestimmung der Steifigkeit, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 33]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 33 (Ausgabe 2007): Herstellung von Asphalt-Probepplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät (WSV), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 35 A]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 35 A (Ausgabe 2021): Asphaltmischgutherstellung im Laboratorium (Heißasphalt), Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TP Asphalt-StB, Teil 46 A]**

Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 46 A (Ausgabe 2022): Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e. V., Köln.

**[TRSG 900, 2020]**

Technischen Regeln für Gefahrstoffe – TRGS 900 (Ausgabe 2020). Bundesministerium für Arbeit und Soziales, Berlin.

**[Wirtgen, 2005]**

Cold recycling manual (2005). Wirtgen GmbH, Windhagen.

**[Wirth et al., 2008]**

W., Wirth; A., Opel (2008): Herstellung von Niedrigtemperaturasphalt (Walzasphalt) unter Verwendung von Schaumbitumen: Schaumbitumen-Heißmischgut, AiF-Forschungsvorhaben Nr. 14749 N, Universität der Bundeswehr München, München.

**[ZTV Asphalt-StB, 07/13]**

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt – ZTV Asphalt-StB (Ausgabe 2007/ Fassung 2013). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.