

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 144

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly rounded and have a white outline, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

von

Martin Radenberg
Matthias Staschkiewicz

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Verkehrswegebau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 144

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst Forschung kompakt berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung. <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 07.0293
Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Fachbetreuung

Volker Hirsch

Referat

Chemische Grundlagen, Umweltschutz, Labordienst

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-95606-539-2

Bergisch Gladbach, Dezember 2020



Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Prüfmethode zu entwickeln, die eine Charakterisierung der Binde-mittleigenschaften im Tieftemperaturbereich prozesssicher und mit moderatem Prüfaufwand ermöglicht. Die verwendeten Prüfgeräte sollten hierbei modern, aber an hinreichend vielen Prüfstellen vorhanden sein.

Aufbauend auf einer internationale Literaturrecherche wurden folgende vier DSR-Prüfverfahren ausgewählt, die diesen Rahmenbedingungen entsprechen:

- Scher-Relaxationsversuch (SRV)
- Kälteprüfung mit der 4 mm Platte-Platte-Geometrie (PP04)
- Zug-Relaxationsversuch (ZRV)
- Kälteprüfung an schlanken, zylindrischen Proben – dynamisch-mechanische Thermoanalyse (DMTA)

Zur Auswahl des Prüfverfahrens, wurde ein dreistufiges Untersuchungsprogramm entworfen. Im ersten Schritt wurden zehn Bindemittel, mit allen vier Verfahren untersucht. Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Untersuchungspaketes, wurden der SRV und die Untersuchung mittels PP04 für die Hauptuntersuchungen ausgewählt.

In diesem Schritt wurden 40 weitere Bindemittel mit den beiden Prüfverfahren untersucht. Mit diesen Daten konnten erste Auswertungsmethoden entwickelt und überprüft werden.

Abschließend wurden die Ergebnisse der beiden Methoden in der Validierung unter Verwendung des BBR und des Zug-Retardationsversuches überprüft. Im Laufe dieses Projektes wurden insgesamt 72 Bindemittel mit dem SRV und der PP04 untersucht. Die Auswertung des SRVs erfolgte mit der Relaxationsviskosität λ_{Rel} . Zur Bewertung des Kälteverhaltens der Bindemittel mit der PP04, wurde die Summe der Phasenwinkel von -20, -10 und 0 °C verwendet. Die Korrelationen zu den anerkannten Verfahren lagen auf sehr hohem Niveau. Neben der Vergleichbarkeit mit bekannten Prüfmethoden, wurde im Zuge der Validierung auch der Einfluss des

Prüfenden analysiert. Weiterhin wurden kritische Werte der beiden Verfahren, zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen bestimmt und der SRV als Prüfmethode zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen vorgeschlagen.

Development of a test method to determine the low temperature performance of Bitumen

The aim of this project was to develop a test method for characterising the low temperature performance of Bitumen. The used test device should be modern and also present in many testing laboratories.

Based on an international research the following four DSR-Methods were chosen:

- The Shear-Relaxation-Test (SRV) - A Creep stress test at -10 °C that uses the 8 mm diameter parallel plates (rotation).
- The Tensile-Relaxation-Test (ZRV) - A Creep stress test at -10 °C that uses the 8 mm diameter parallel plates (normal direction).
- The 4-mm DSR – An oscillation test, performing a frequency sweep from 0.01 Hz to 10 Hz at various temperatures from -20 °C to 30 °C, using the 4 mm diameter parallel plates.
- The Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA) – An oscillation test using slender cylindrical samples (h = 12 mm; d = 8 mm).

To determine the most suitable of these four methods, a three-step experimental work is engineered. In the first step all four methods were used to analyze ten different types of bitumen. After this, the SRV and the PP04 were chosen to characterize additional 40 types. The last step was the validation of the results, using the Bending-Beam-Rheometer (BBR) and the tensile-retardation-test by Schellenberg. Overall 72 bitumen were analysed with the SRV and the PP04. To assess the SRV the relaxation-viscosity λ_{Rel} was used. For the Assessment of the method using the PP04, the sum of the phase angle measured at a frequency of 0.01 Hz within the temperature range from -20 to 0 °C was used. The correlations between the two renowned methods and the two new methods

were very good. Also the effect of the tester was analysed during the validation.

Finally critical values for the results were determined and the SRV was chosen as most suitable method to characterise the low temperature performance of bitumen.

Short report

Development of a test method to determine the low temperature performance of Bitumen

1 Introduction

The increase of heavy traffic in the last years is the reason why more asphalt-mixes are designed with bitumen with higher e-moduli. Simultaneously the frequency of freeze-thaw cycles and gritting actions increased too. Thus result in higher tensile stress in the asphalt overlay and more thermal cracking of the asphalt.

The examination of the Bitumen properties as part of the compliance test of asphalt-mixes are often restricted to Softening Point Ring and Ball only. The properties at low temperatures are not explicitly determined (e.g. Bending Beam Rheometer (BBR) test or Fraass Breaking Point). Instead a limit for the softening point or the increase of softening point is used as indicator for negative changes of the low-temperature properties of the used bitumen.

Hence, the current research program aims at developing a test method, which requires only a small amount of bitumen to characterize the low-temperature performance. Also this method has to be easily to perform and as quickly as possible. For this purpose, the focus is on test methods using the dynamic shear rheometer (DSR), already used for measuring the medium- and high-temperature rheological properties. So it would be possible to determine the properties of bitumen over the entire temperature range of interest with a single testing device.

2 Examination

In current standards only the 25 mm and 8 mm parallel-plate geometries are established for Bitumen-testing with a DSR. With these geometries it is not possible to examine bitumen at temperatures lower than 0 °C, due to instrument compliance errors.

Based on national and international research the current study contains the following four test methods:

- The Shear-Relaxation-Test (SRV) - A Creep Stress Test at -10 °C that uses the 8 mm diameter parallel plates (rotation).
- The Tensile-Relaxation-Test (ZRV) - A Creep Stress Test at -10 °C that uses the 8 mm diameter parallel plates (normal direction).
- The 4-mm DSR (PP04-test) – An oscillation test, performing a frequency sweep from 0.01 Hz to 10 Hz at various temperatures from -20 °C to 30 °C, using the 4 mm diameter parallel plates.
- The Dynamic Mechanical Thermal Analysis (DMTA-08) – An oscillation test using slender cylindrical samples (h = 12 mm; d = 8 mm).

To determine which of these four methods is the most suitable to characterize the low-temperature performance of bitumen, a three-step experimental work is engineered.

During the first step (preliminary investigation – UP1) the four methods were used to characterise ten bitumen, which differ in hardness and modification. Based on the results of the first step two methods have been selected for the second step (main investigation – UP2). These methods were the PP04-test and the SRV by [Gehrke, 2017]. In the experimental campaign's second step a further 40 bitumen were tested with the PP04 and the SRV. Hereby the experience gathered with the two chosen methods were supposed to be extended and a basis for rating the low-temperature performance of bitumen should be created. The further 40 samples, included bitumen recovered from thermally cracked asphalt pavements, bitumen recovered from asphalt pavements with service lives more than 20 years, in lab simulated multiple aged bitumen and bitumen recovered from rejuvenated asphalt. After these extensive investigations in the last step of the campaign (validation – UP3) the results have been confirmed by validation, using the Bending Beam Rheometer (BBR) [DIN EN 14771] and the tensile-retardation-test by Schellenberg [K. Schellenberg und H.-J. Eullitz, 1995]. During all three steps of the experimental work 72 bitumen were evaluated.

Finally one method to determine the low temperature performance of Bitumen have been suggested by evaluating the pro and contra of the two methods.

3 Results

For example in Figure 3-1 the curves of the SRV and the PP04-test at 0.01 Hz of in lab simulated multiple aged 30/45 are shown. By using the two methods it is possible to differ between the bitumen easily.

The aim of this study was to develop a quick and easy test method to describe the low-temperature performance of bitumen. For this purpose sums of the phase angles measured by 0.01 Hz or 1.59 Hz within the temperature range from -20 °C to 0 °C of all 72 bitumen were calculated. Figure 3-2 shows these sums assorted by size at the test-frequency 0.01 Hz. A high value correspond to a good low-temperature-performance. To analyse the SRV the relaxation-viscosity was developed, which is the integral of the shear stress during the relaxation-phase of the SRV. Figure 3-3 shows the measured and calculated values of all 72 relaxations-viscosities assorted by size, here a low value correspond to a good low-temperature-performance.

In this study a data basis of 72 different bitumen for both DSR-methods could be created. Using these findings it is possible to determine the low-temperature performance of bitumen, with both methods. But doing so it is necessary to consider that there are many aspects, which affect the low-temperature behavior of asphalt roads (e.g. geographic location, concept of the asphalt, volume of the binder or degree of compaction). Because of that it is not expediently to give “hard limits” but critical values. If the measured values exceed (d_{Rel}) or fall below ($\Sigma\delta$) these critical values, a higher probability of cracking due to the rheology of the bitumen is given. These critical values are $\lambda_{Rel} = 40 \text{ MPa s}$ for the SRV and 70° for the measuring using the PP04. Should the measured

value of the SRV exceed $\lambda_{Rel} = 60 \text{ MPa s}$ or the sum of the phase angle fall below 50° the probability of cracking is actually very high.

The results of the validation to the approved methods are given in Tab. 3-1. They are all very good. The correlation between the results of the SRV and the BBR-test are shown in Figure 3-4 for example. But to give an objective and transparent advice, many different criteria has to be considered. The correlation to the approved methods, the precision and the effect of the tester (handling), the test-time, the customary nature of the testing-system and the scientific value of the results.

The analysis of the validation of the effect of the tester showed that the precision of both methods are acceptable. Both methods detected the 15/25 VL as the only bitumen, which has a critical performance at low-temperatures. Actually the precision of the PP04-test was a little bit better, which is remarkable because the lab assistants assessed the handling with the test specimen with 4 mm diameter more difficult than with the 8 mm diameter.

An important criteria for the work routine in the lab is the test time. Shorter test times, lead to more tests at a day. So incorrect measurements will be noticed sooner. The test time of the measurement using the PP04 (7.5 h) is much longer than the test time of the SRV (1.75 h).

Another practical criteria is the customary nature of the testing-system. For the SRV only the PP08 is needed, which belongs to the standard equipment of the DSR. The PP04 is not compatible with all DSR and older systems maybe need compliance corrections, as describe in [DI WANG et al., 2019].

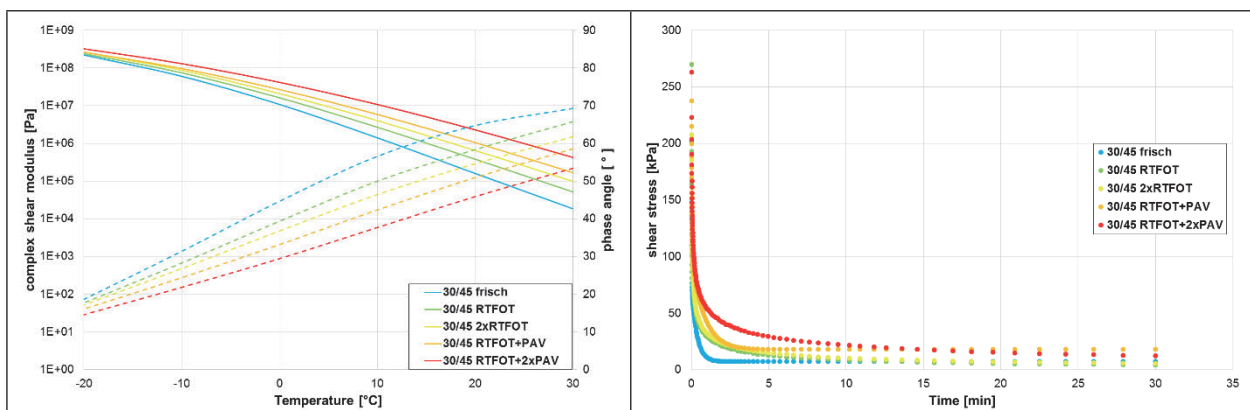


Fig. 3-1: Temperature-Sweep at 0.01 Hz with the PP04 (left) and the shear stress during the SRV (right) of the bitumen 30/45 with several aging steps

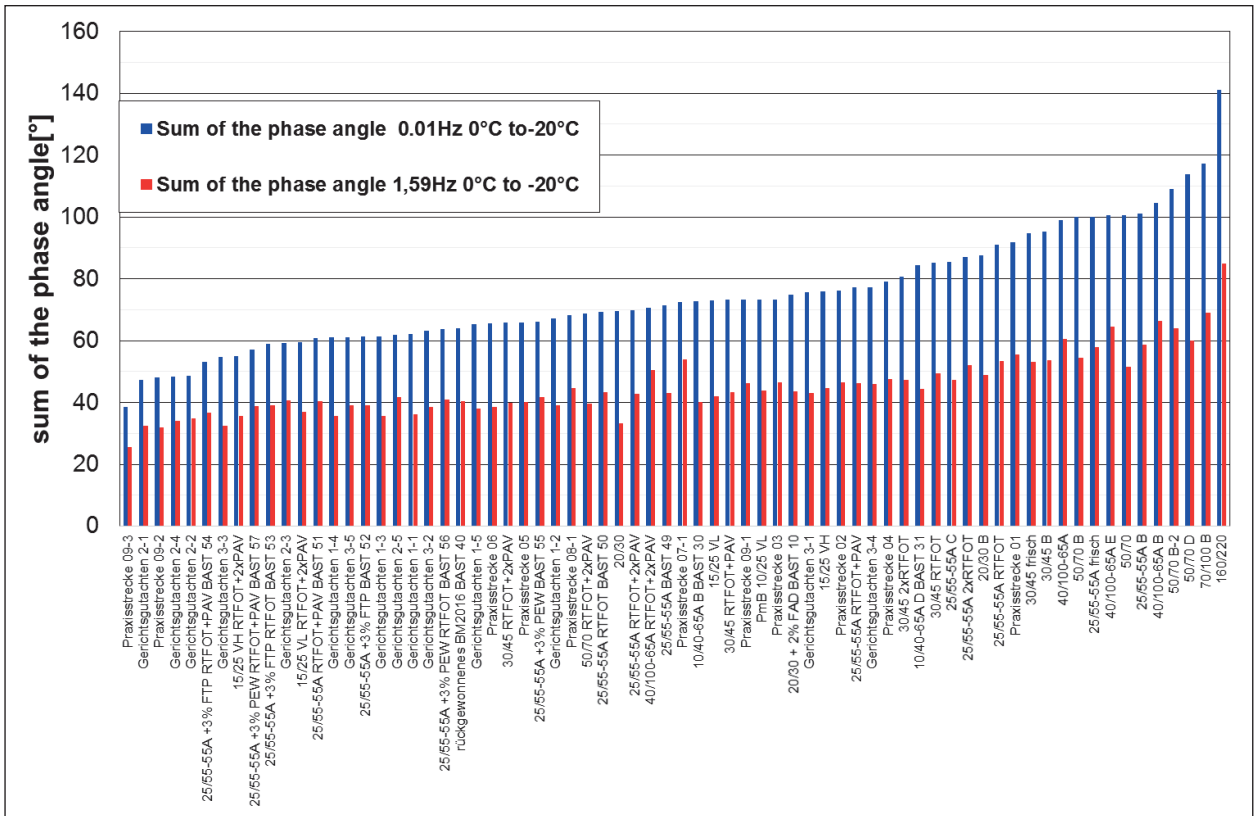


Fig. 3-2: Sums of the phase angle measured with the PP04 at a frequency of 0.01 Hz or 1,59 Hz within the temperature range from -20 °C to 0 °C of all 72 bitumen assorted by size at 0.01 Hz

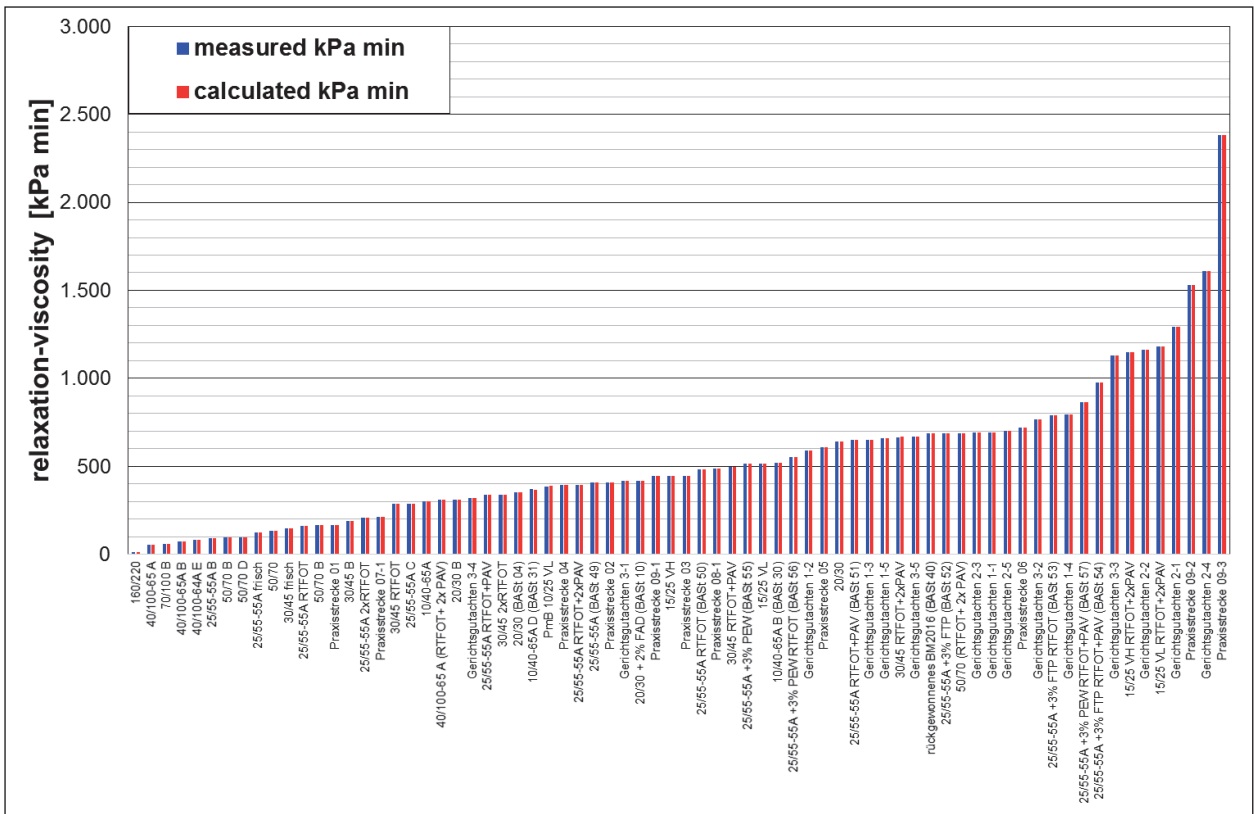


Fig. 3-3: Relaxation-viscosity determined with the SRV of all 72 bitumen assorted by size

DSR	BBR				Tensile-retardation-test	
	T (m = 0,3)	T (S = 300)	m (-10 °C)	S (-10 °C)	λ_z (-10 °C)	b
$\sum \delta(-20; -10; 0)$	0,93	0,76	-	-	0,82	0,86
$\lambda_{Rel} = \int_0^{30} \tau dt$	-	-	0,94	0,95	0,89	0,83

Tab. 3-1: Summary of the correlations between the DSR-methods and the approved methods

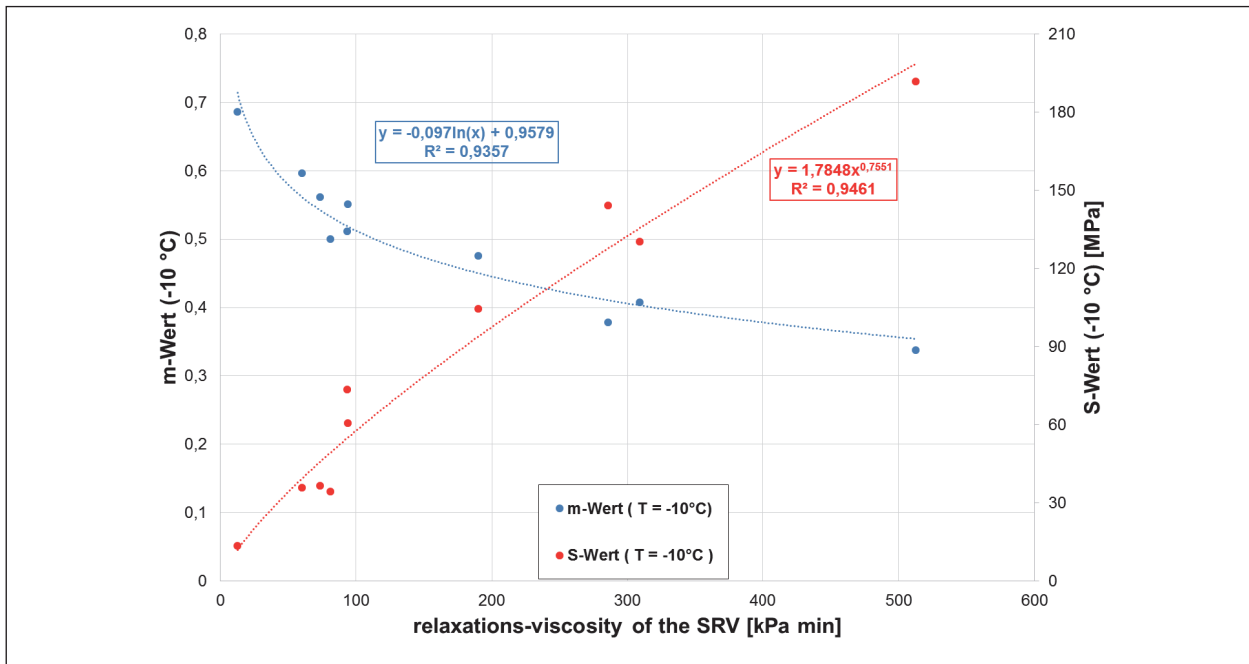


Fig. 3-4: Correlation between the SRV and the BBR-test

Scientifically both methods are equally.

Based on these criteria the SRV is more suitable than the PP04. Thus don't mean that the PP04 is not suitable to determine the low-temperature-performance of bitumen but the SRV comply better with the necessary properties, given by the contracting authority.

4 Summary

The aim of this project was to develop a test method for characterising the low temperature performance of Bitumen. The used test device should be modern and also present in many testing laboratories.

Based on an international research the four DSR-Methods were chosen.

To determine the most suitable of these four methods, a three-step experimental work is engineered. In the first step all four methods were used to analyse ten different types of bitumen. After this, the SRV and the PP04 were chosen to

characterize additional 40 types. The last step was the validation of the results, using the Bending-Beam-Rheometer (BBR) and the tensile-retardation-test by Schellenberg. Overall 72 bitumen were analysed with the SRV and the PP04. To assess the SRV the relaxation-viscosity λ_{Rel} was used. For the Assessment of the method using the PP04, the sum of the phase angle measured at a frequency of 0.01 Hz within the temperature range from -20 to 0 °C was used. The correlations between the two renowned methods and the two new methods were very good. Also the effect of the tester was analysed during the validation.

Finally critical values of the probability of cracking were determined and the SRV have been chosen as most suitable method to characterise the low temperature performance of bitumen.

Inhalt

Abkürzungen	11	3.2.5	Ergebnisse aus den DTMA-08-Versuchen.....	30
1 Einleitung	13	3.3	Auswertung der Voruntersuchungen	31
1.1 Problemstellung und Zielsetzung.....	13	3.4	Allgemeine Bewertung der Voruntersuchungen	36
1.2 Vorgehen	13			
2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse	15	4	Hauptuntersuchungen	37
2.1 Rheologisches Verhalten bitumenhaltiger Bindemittel.....	15	4.1	Untersuchungsprogramm der Hauptuntersuchungen.....	37
2.1.1 Linear-viskoelastischer Bereich	16	4.2	Ergebnisse der Hauptuntersuchungen	39
2.1.2 Viskoelastisches Verhalten während der Relaxation	16	4.2.1	Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)	40
2.2 Grundlagen zu Untersuchungen des Kälteverhaltens.....	17	4.2.2	Ergebnisse aus den SRV	41
2.2.1 Untersuchung des Kälteverhaltens von Bitumen.....	17	4.2.3	Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04	41
2.3 Grundlagen rheologischer Untersuchungen an Bitumen mittels DSR	18	4.3	Auswertung der Hauptuntersuchungen	42
2.3.1 Entwicklungen zur Untersuchung des Kälteverhaltens von Bitumen mit dem DSR	19	4.4	Allgemeine Bewertung der Hauptuntersuchungen	45
3 Voruntersuchungen	19	5	Validierung	45
3.1 Untersuchungsprogramm der Voruntersuchungen	20	5.1	Untersuchungsprogramm der Validierung.....	45
3.1.1 Zug-Relaxationsversuch (ZRV).....	20	5.1.1	Prüfung im Bending Beam Rheometer (BBR-Prüfung)	47
3.1.2 Scher-Relaxationsversuch (SRV)	21	5.1.2	Zug-Retardationsversuch.....	47
3.1.3 4 mm-Messgeometrie.....	22	5.2	Ergebnisse der Validierung	48
3.1.4 Dynamisch-mechanische Thermoanalyse (DMTA).....	24	5.2.1	Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)	48
3.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen.....	26	5.2.2	Ergebnisse aus den SRV	49
3.2.1 Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)	26	5.2.3	Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04	50
3.2.2 Ergebnisse aus den ZRV	27	5.2.4	Ergebnisse aus den BBR-Versuchen	52
3.2.3 Ergebnisse aus den SRV	27	5.2.5	Ergebnisse aus den Zug- Retardationsversuchen	52
3.2.4 Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04	28	5.2.6	Ergebnisse aus der Untersuchungsreihe zur Variation der Lagerungsdauer.....	52
		5.3	Auswertung der Validierung	54

5.3.1	Auswertung der Untersuchung zur Variation der Lagerungsdauer von DSR-Proben	56
5.4	Bewertung der Validierung	56
5.4.1	Validierung der Messverfahren mit einem zweiten Prüfer.....	57
5.4.2	Validierung mit den Ergebnissen der BBR-Untersuchungen	59
5.4.3	Validierung mit den Ergebnissen des Zug-Retardationsversuchs	60
5.4.4	Bewertung und Empfehlungen auf Grundlage der Validierung.....	61
6	Zusammenfassung und Ausblick	62
	Literatur.....	64
	Bilder	66
	Tabellen.....	71
	Anhang	73

Abkürzungen

BBR	Bending Beam Rheometer (Biegebalkenrheometer)	ReVis	Zug-Retardationsversuch zur Bestimmung der Retardationsviskosität
BTSV	Bitumen-Typisierungs-Schnell-Verfahren	RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test (Kurzeitalterung)
DAV	Deutscher Asphaltverband e. V.	RUB	Ruhr-Universität Bochum
DMTA	Dynamisch-mechanische Thermoanalyse	SRV	Scher-Relaxationsversuch
DSR	Dynamisches Scherrheometer	TCT	Tensile Creep Test
DTT	Direct Tension Test	T-Sweep	Temperatur-Sweep
FAD	Fettsäurederivat	UP1	Untersuchungspaket 1 (Voruntersuchungen)
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.	UP2	Untersuchungspaket 2 (Hauptuntersuchungen)
FTP	Fischer-Tropsch-Paraffin	UP3	Untersuchungspaket 3 (Validierung)
gmZV	getrimmt mit Zeitvorgabe	ZRV	Zug-Relaxationsversuch
ISBS	Institut für Straßenwesen der TU Braunschweig		
LVE- Bereich	Linear-viskoelastischer Bereich		
LVW	Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr- Universität Bochum		
MSCRT	Mutiple Stress Creep and Recovery Test		
PAV	Pressure-Aging-Vessel (Langzeitalterung)		
PEW	Polyethylenwachs		
PmB	Polymermodifizierte Bitumen		
PP04	Platte-Platte Geometrie mit 04 mm Durchmesser		
PP08	Platte-Platte Geometrie mit 08 mm Durchmesser		
PP25	Platte-Platte Geometrie mit 25 mm Durchmesser		
PTFE	Polytetrafluorethylen		
RELSRV	Verhältniswert von Anfangs- und Endspannung der Relaxationsphase beim SRV		
RELZRV	Verhältniswert von Anfangs- und Endspannung der Relaxationsphase beim ZRV		

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Nachweis der Veränderungen des Performance-Verhaltens von Asphalten aufgrund von Alterungsprozessen des bitumenhaltigen Bindemittels hat in den letzten Jahren einen hohen Stellenwert in Wissenschaft und Forschung erhalten. Allerdings lagen hierbei die dimensionierungsrelevanten Gebrauchseigenschaften im Fokus. Bei der Dimensionierung von Straßen werden aufgrund der Schwerverkehrszunahme und zur Vermeidung von Spurrinnen vermehrt Bindemittel mit höheren Steifigkeiten verwendet. Aufgrund der Zunahme von Rissbildungen in Asphaltdeckschichten werden in den verwendeten Bindemitteln, welche teilweise mehrfach modifiziert sind (z. B. Elastomere und Wachse), unzureichende Kälteeigenschaften (mangelhaftes Relaxations- bzw. Retardationsverhalten) der Asphalte vermutet.

Die Untersuchungen der Bindemittleigenschaften im Rahmen von Erst- oder Kontrollprüfungen am Asphaltmischgut beschränken sich zurzeit im Wesentlichen auf die Bestimmung des Erweichungspunktes Ring und Kugel. Eine gesonderte Prüfung der Kälteeigenschaften findet, wenn nicht explizit gefordert, kaum statt. Stattdessen wird bei einer Überschreitung von festgelegten Grenzwerten des Erweichungspunktes auf eine Versprödung des Materials und damit einer negativen Veränderung der Kälteeigenschaften geschlossen. Allerdings ist dieser Rückschluss von Eigenschaften im hohen Temperaturbereich auf Tieftemperatureigenschaften, besonders bei modifizierten Bindemitteln, stark fehlerbehaftet.

Weiterhin ist die zurzeit in den Regelwerken verankerte Prüfung der Kälteeigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln durch den Brechpunkt nach Fraaß aufgrund der geringen Präzision nicht zielführend. Ein alternatives Verfahren stellt die Messung mit dem Biegebalkenrheometer (BBR) dar. Hierfür sind allerdings Probenmengen erforderlich, die nur sehr aufwendig aus dem Asphalt rückgewonnen werden können. Es fehlt somit eine Prüfmethode zur Beurteilung der Eigenschaften im Tieftemperaturbereich, bei der nur eine geringere Probenmenge (z. B. aus einer üblichen Kontrollprüfung) erforderlich ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Prüfmethode zu entwickeln, die eine Charakterisierung der Bindemittel-

eigenschaften im Tieftemperaturbereich prozesssicher und mit moderatem Prüfaufwand ermöglicht. Hierdurch wird eine verbesserte Qualitätskontrolle angestrebt, welche einen wichtigen Beitrag zur Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen darstellt. Die verwendeten Prüfgeräte sollen hierbei modern, aber an hinreichend vielen Prüfstellen vorhanden sein.

1.2 Vorgehen

Im hohen Temperaturbereich hat sich das Dynamische Scherrheometer (DSR) als Messgerät zur Bestimmung der Performance-Eigenschaften von Bitumen etabliert. Es ermöglicht die Charakterisierung anhand von kleinen Probenmengen und ist somit grundsätzlich für die Aufgabenstellung geeignet.

Zwar ermöglicht das DSR auch die Bestimmung von rheologischen Eigenschaften bei Prüftemperaturen weit unter 0 °C, allerdings stoßen die aktuell in den Regelwerken verankerten Prüfgeometrien (Platte-Platte-System mit 25 oder 8 mm Durchmesser) mit den entsprechenden Prüffrequenzen hier oft an ihre Grenzen.

Bei einer ersten internationalen Recherche sowie durch eigene intensive Forschungsaktivitäten konnten verschiedene Prüfverfahren gefunden werden, die den in der Aufgabenstellung festgelegten Rahmenbedingungen entsprechen. Hieraus wurden vier Methoden mit vielversprechenden Ansätzen ausgewählt. Diese im Kapitel 3.1 näher beschriebenen Verfahren, sind:

- Kälteprüfung mit der 8 mm Platte-Platte-Geometrie bei Kriechspannungen - Scher-Relaxationsversuch (SRV)

Bezeichnung	Hersteller	Raffinerie	Alterung
20/30	A	G	
50/70	A	G	-
160/220	A	G	-
10/40-65 A	A	B	-
40/100-65 A	A	D	-
15/25 VL	B	T	-
15/25 VH	C	S	-
PmB 10/25 VL	B	T	-
50/70	A	G	RTFOT + 2 x PAV
40/100-65 A	A	D	RTFOT + 2 x PAV

Tab. 1-1: Verwendete Bitumensorten in den Voruntersuchungen

- Kälteprüfung mit der 4 mm Platte-Platte-Geometrie (mit und ohne Trimmen)
- Zug-Relaxationsversuch (ZRV)
- Kälteprüfung an schlanken, zylindrischen Proben – dynamisch-mechanische Thermoanalyse (DMTA)

Im ersten Schritt (Voruntersuchungen – UP1) wurden zehn ausgewählte Bindemittel, welche in ihrer Härte und Modifikation das gesamte Spektrum der gängigen Bindemittel für die Asphaltherstellung weitgehend abdecken, mit allen vier Prüfmethoden untersucht. In Tabelle 1-1 sind die zehn untersuchten Bitumensorten aufgeführt.

Anhand der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen wurden anschließend in Absprache mit dem Betreuerkreis, unter Berücksichtigung verschiedenster Bewertungsparameter (z. B. Genauigkeit oder Zeitaufwand), zwei geeignete Methoden ausgewählt. Hierbei handelte es sich um das Prüfverfahren mit der 4 mm Platte-Platte-Messgeometrie und den Scher-Relaxationsversuch. Mit diesen wurden im nächsten Untersuchungspaket (Hauptuntersuchung – UP2) 40 weitere Bindemittel untersucht. Diese 40 Bindemittel sollten unter anderem extrahierte Bindemittel aus schadhaften Asphaltdeckschichten (Kälterisse), weitere kurz- und langzeitgealterte Bindemittel sowie weitere frische Bindemittel enthalten. In Tabelle 4--1 sind die untersuchten Bin-

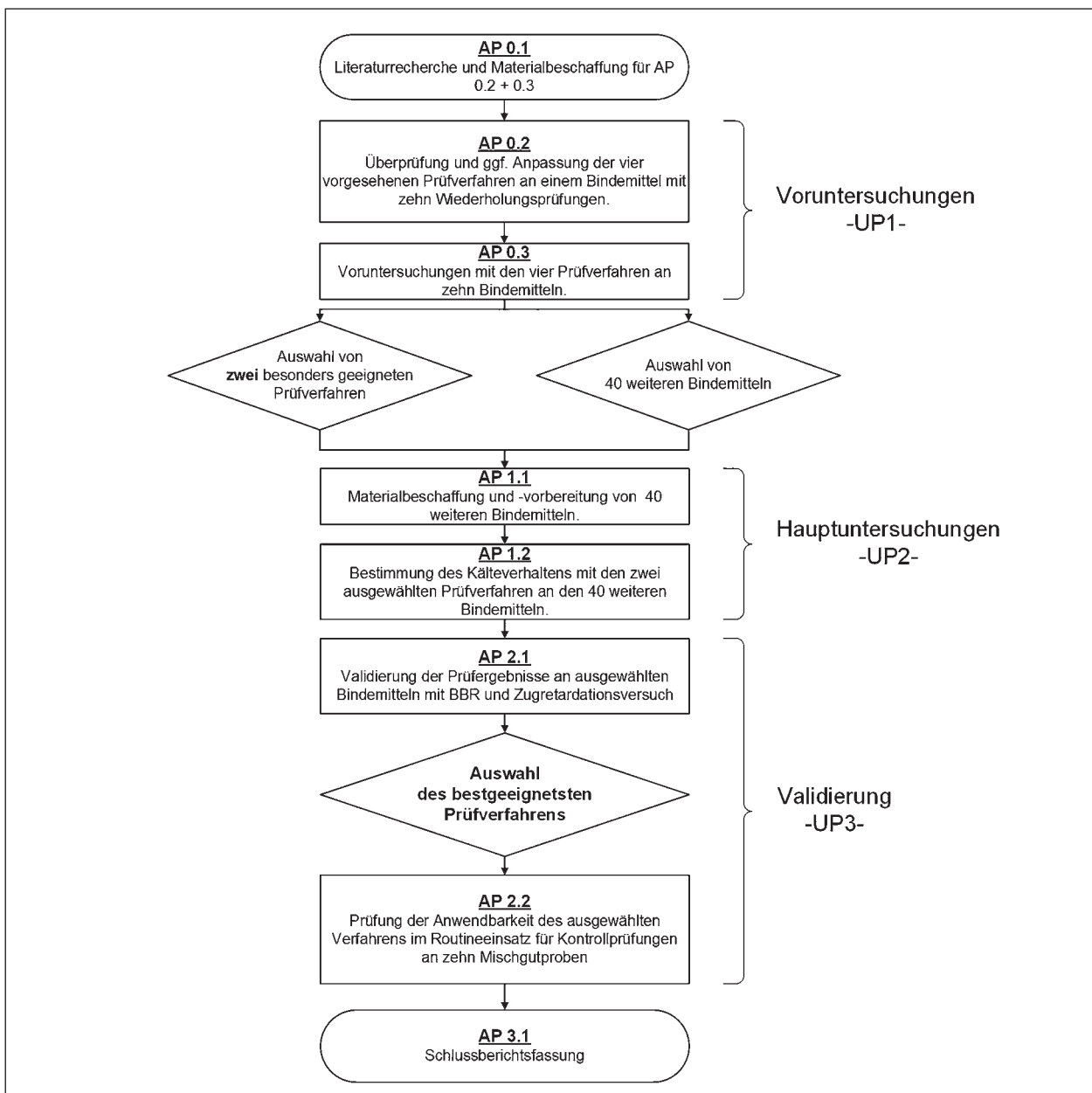


Bild 1-1: Ablauf des Forschungsprojektes im Fließdiagramm

demittel und -wenn bekannt- deren Ursprung aufgelistet. Mit dieser Vorgehensweise wurde eine umfassende Basis zu den Kälteeigenschaften bitumenhaltiger Bindemittel unterschiedlicher Art und Sorte sowie Beanspruchungsgrad geschaffen.

Nach Abschluss dieser umfangreichen Untersuchungen wurden im letzten Schritt (Validierung – UP3) an ausgewählten Bindemitteln vergleichende bzw. validierende Prüfungen mit anderen Prüfmethode durchgeführt. Hierzu wurde zum einen das Bending Beam Rheometer (BBR) zur Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit bei zwei Temperaturen gemäß [AL BBR-Prüfung] verwendet und zum anderen der Zug-Retardationsversuch nach Schellenberg (ReVis) bei +5, -5, -15 und -25 °C durchgeführt [SCHELLENBERG, EULITZ, 1995]. Die Validierung der Ergebnisse erfolgte an zehn (BBR) bzw. 16 (ReVis) Bindemittelproben. Die zehn Bindemittel für die BBR-Untersuchungen wurden in Abstimmung mit dem Betreuerkreis ausgewählt. Die Validierung mit dem Verfahren ReVis konnte aufgrund von technischen Problemen lediglich an zwei dieser zehn Bindemittel durchgeführt. Bei den 14 weiteren Bindemitteln handelte es sich um Rückstellproben der BAST, die bereits mit dem Verfahren ReVis untersucht wurden. [BOMMERT, 2017] Anschließend wurden unter Betrachtung der Differenzierbarkeit der Ergebnisse, der Handhabung im Routineeinsatz und ggf. dem wissenschaftlichen Stellenwert die Vor- und Nachteile der zwei für das Hauptuntersuchungsprogramm aus-

gewählten Verfahren betrachtet, um abschließend ein Verfahren für die zukünftige Beurteilung des Kälteverhaltens vorzuschlagen.

Der beschriebene Ablauf ist zur Verdeutlichung in Bild 1-1 noch einmal in einem Fließdiagramm zusammengefasst.

2 Theoretische Grundlagen und Stand der Kenntnisse

Bitumen ist das älteste bekannte Mineralölprodukt, welches bereits 3.000 v. Chr. im mittleren Osten als Baustoff verwendet wurde [FORBES, 1934] und sogar in der Bibel Erwähnung findet. Im Gegensatz zu dem damals aus natürlichen Quellen an der Oberfläche direkt gewonnenen Bitumen, wird es heute größtenteils in Raffinerien aus Erdöl produziert. Hauptbestandteil von Bitumen (90 bis 98 %) sind viele unterschiedliche hochkomplexe Kohlenwasserstoff-Verbindungen, deren Anzahl von [WIEHE, LIANG, 1996] auf über 100.000 geschätzt wird.

2.1 Rheologisches Verhalten bitumenhaltiger Bindemittel

Bitumenhaltige Bindemittel besitzen in einem sehr großen Temperaturbereich, einen viskosen und ei-

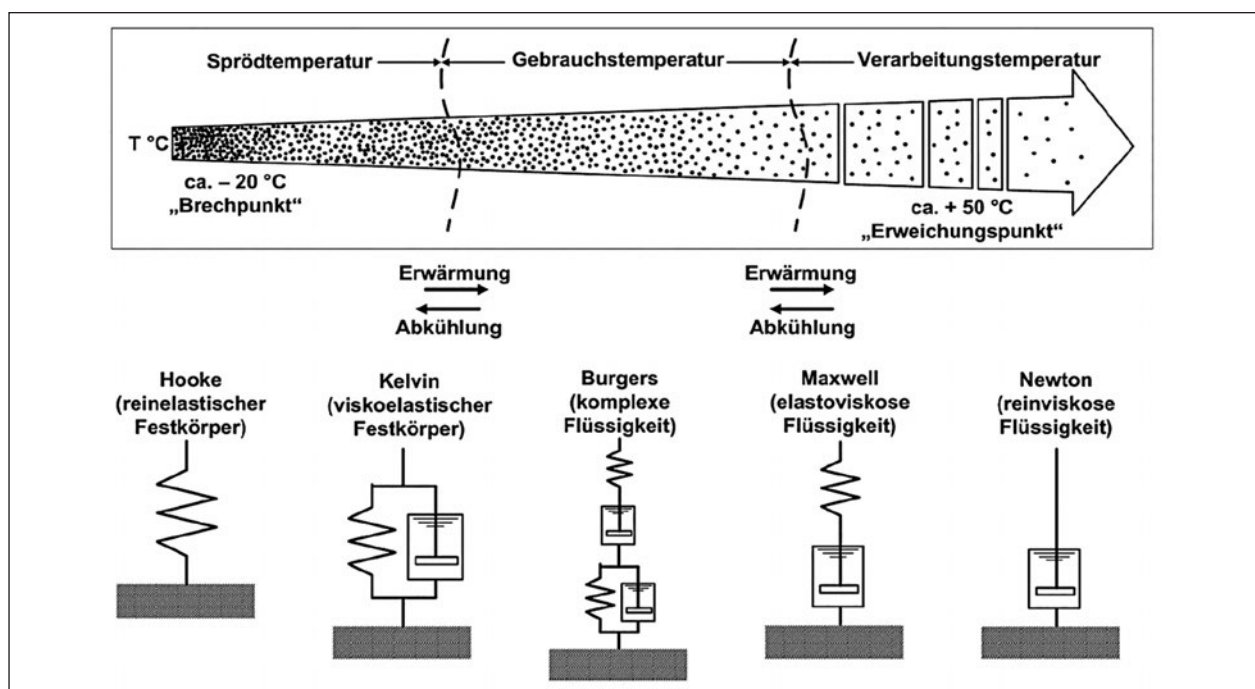


Bild 2-1: Zustandsbereiche und zugehörige rheologische Modelle von Bitumen in Anlehnung an [CETINKAYA, 2011; ZENKE, 1990; HUTSCHENREUTHER, WÖRNER, 1998 // 2010]

nen elastischen Verformungsanteil. Zur Beschreibung dieses Verhaltens wird die Rheologie, die Lehre von der Deformation und vom Fließen der Substanzen, verwendet. Die Größe des jeweiligen Anteils im Bitumen ist stark temperaturabhängig, wobei mit sinkender Temperatur der viskose Anteil abnimmt und der elastische zunimmt. In Bild 2-1 sind die rheologischen Modelle dargestellt, welche heute zur Beschreibung des Materialverhaltens im entsprechenden Temperaturbereich herangezogen werden können.

In diesen mechanischen Modellen werden die viskosen Anteile durch Dämpfer und die elastischen Anteile durch Federn beschrieben. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass bestimmte Materialreaktionen, welche z. B. durch den Relaxationsversuch im Tieftemperaturbereich hervorgerufen werden, nur durch rheologische Modelle beschrieben werden können, die ggf. im Widerspruch zu der in Bild 2-1 dargestellten Zuordnung stehen. [MEZGER, 2006]

2.1.1 Linear-viskoelastischer Bereich

Der linear-viskoelastische Bereich (LVE-Bereich) ist der Bereich, in welchem die Belastungen während der Prüfung die Struktur der Probe nicht zerstören. Nur innerhalb des LVE-Bereichs besitzt das Hookesche Gesetz (vgl. Gleichung 1) und somit die in Bild 2-1 dargestellten mechanischen Modelle volle Gültigkeit.

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Gl. 1}$$

Zur Bestimmung der Grenzen des LVE-Bereichs für Prüfungen mit dem DSR werden sogenannte Amplitudentests durchgeführt. Diese müssen aufgrund der Zeitabhängigkeit des rheologischen Verhaltens während der Belastung bei allen Prüffrequenzen durchgeführt werden. In Bild 2-2 ist exemplarisch ein solcher Test mit Variation der Deformation an einer Probe eines mehrfach gealterten Bindemittels 50/70 mit einem Durchmesser von 4 mm (PP04) bei -20 °C und 10 Hz dargestellt. Im LVE-Bereich ist die Schubspannung $\tau(t)$ proportional zur vorgegebenen Deformation $\gamma(t)$, wodurch der komplexe Schermodul konstant ist (vgl. Gleichung 1). Gemäß Anhang C der [DIN EN 14770] ist die Grenze des LVE-Bereichs bei einer Abweichung des komplexen Schermoduls um 5 % erreicht. Für das in Bild 22 dargestellte Beispiel ist die Grenze des LVE-Bereichs somit ab einer Deformation von etwa 2 % überschritten.

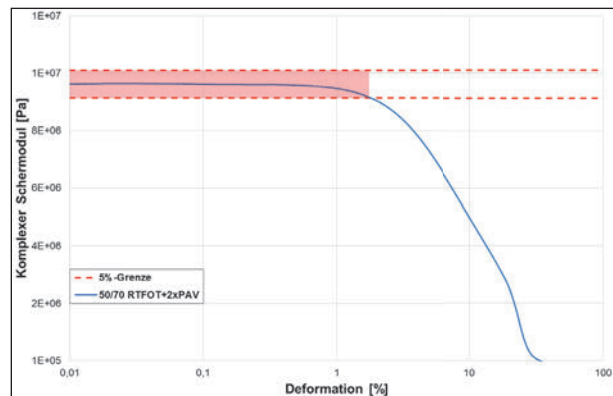


Bild 2-2: Beispielhafter Amplitudentest von einer 4 mm-Probe eines mehrfach gealterten 50/70 bei -20 °C und 10 Hz

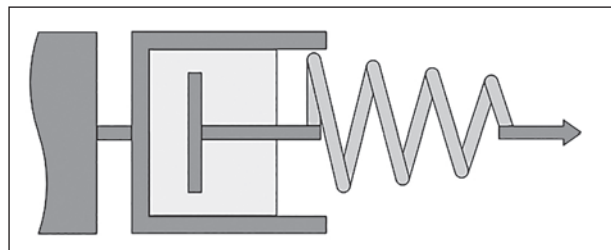


Bild 2-3: Maxwell-Modell

2.1.2 Viskoelastisches Verhalten während der Relaxation

Zur physikalisch-mathematischen Beschreibung des viskoelastischen Verhaltens während eines Relaxationsversuchs wird das Maxwell-Modell verwendet. In diesem Modell sind Feder und Dämpfer hintereinander geschaltet (Bild 2-3).

Es wird angenommen, dass die Summe der beiden Einzeldeformationen der Gesamtdeformation entspricht und dass auf Feder und Dämpfer die gleiche Spannung wirkt. Hieraus ergibt sich folgende Differentialgleichung:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_v + \dot{\gamma}_e = \tau_v/\eta + \dot{\tau}_e/G = \tau/\eta + \dot{\tau}/G \quad \text{Gl. 2}$$

Mithilfe der Relaxationszeit (λ), welche dem Quotienten aus Dämpferkonstante (η) und Federkonstante (G) entspricht, berechnet sich die Lösung der Differentialgleichung zu dieser zeitabhängigen Exponentialfunktion:

$$\tau(t) = \gamma_0 \cdot G \cdot e^{-t/\lambda} \quad \text{Gl. 3}$$

Für die Beschreibung des Relaxationsverhaltens von bitumenhaltigen Bindemitteln wird ein komplexeres rheologisches Modell benötigt. Begründet wird dies damit, dass Bitumen und die darin ggf.

enthaltene Zusätze aus vielen verschiedenen Kohlenwasserstoff-Verbindungen bestehen. Das hierdurch resultierende Relaxationsverhalten lässt sich nicht durch ein diskretes Maxwell-Modell mit einer Feder und einem Dämpfer beschreiben, sondern für die Beschreibung von komplexen Stoffen wie Bitumen sind mehrere einzelne Maxwell-Modelle, welche parallel geschaltet werden, notwendig.

Im LVE-Bereich ist dieses Vorgehen gemäß dem Superpositionsprinzip nach Ludwig Boltzmann möglich, wodurch die Gesamt-Schubspannung der Summe der einzelnen Schubspannungen entspricht (vgl. Gleichung 4).

$$\tau(t) = \sum_i \tau_i(t) = \gamma_0 \cdot \sum_i G_i \cdot e^{-t/\lambda_i} \quad \text{Gl. 4}$$

2.2 Grundlagen zu Untersuchungen des Kälteverhaltens

Im vorliegenden Projekt ist ein Prüfverfahren zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen zu entwickeln. Dieses Prüfverfahren soll dabei prozesssicher und mit moderatem Aufwand durchführbar sein. Bei der Entwicklung eines solchen Verfahrens ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den später verwendeten Baustoff Asphalt genauso ein zu beachtendes Kriterium wie die umgekehrte Richtung, also die Widerspiegelung der tatsächlichen Belastung in situ durch die Prüfung.

Im Asphaltbereich werden Zug- und Abkühlversuche gemäß [DIN EN 12697-46] verwendet, um das Tieftemperaturverhalten zu untersuchen. Hierzu sind in den vergangenen Jahren einige Forschungsprojekte durchgeführt worden. [ARAND et al., 1988; BÜCHLER et al., 2008; RADENBERG, HOLZWARTH, 2018]

Die in diesen Projekten bei den Abkühlversuchen beobachteten kryogenen Spannungen sind von vielen Parametern, wie den verwendeten Materialien und dem Hohlraumgehalt, abhängig. Die maximalen thermisch induzierten Zugspannungen sind bei Gussasphalten zu beobachten und werden im Temperaturbereich von -10 bis -20 °C in einer Höhe von ca. 5 MPa bestimmt. Die niedrigsten Spannungen werden beim Offenporigen Asphalt gemessen, hier liegen diese in einer Größenordnung von ca. 2 MPa. Zu beachten ist, dass der Abkühlversuch keine zerstörungsfreie Methode ist, womit das Bindemittel außerhalb des LVE-Bereiches belastet wird.

2.2.1 Untersuchung des Kälteverhaltens von Bitumen

Für den Straßenbau wird Bitumen seit dem 19. Jahrhundert verwendet und mit der DIN 1995 „Vorschriften für die Probenahme und die Beschaffenheit sowie die Untersuchung von bituminösen Straßenbaubindemitteln“ erschien 1929 die erste Prüfnorm für Bindemittel. In dieser wurde bereits festgelegt, dass das Kälteverhalten von Bindemitteln durch die Bestimmung des Brechpunkts nach Fraaß zu untersuchen ist. Bei diesem Versuch wird ein dünner Film eines bitumenhaltigen Bindemittels auf ein Metallblech aufgebracht. Danach wird dieser Probekörper mit konstanter Geschwindigkeit abgekühlt und hierbei einer wiederholten Biegebelastung unterzogen. Als Brechpunkt nach Fraaß wird die Temperatur angegeben, bei welcher der erste Riss im Bindemittelfilm auftritt. [DIN EN 12593]

In mehreren Untersuchungen wurde allerdings festgestellt, dass der Brechpunkt nach Fraaß gravierende Mängel aufweist. So ist zum Beispiel die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zwischen verschiedenen Laboratorien besonders bei modifizierten Bindemitteln nicht gegeben. [ECKMANN et al., 2004] [RADENBERG et al., 2017]. Außerdem handelt es sich hierbei nicht um ein sogenanntes Performance-Prüfverfahren. Aus diesem Grunde hat sich der Deutsche Asphaltverband (DAV) im Dezember 2016 in einem Positionspapier für die Verwendung des BBR zur Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen ausgesprochen. [Deutscher Asphaltverband e. V., 2016]

Das BBR wird in den Vereinigten Staaten seit den 1990er-Jahren zur Untersuchung des Tieftemperaturverhaltens von Bindemitteln standardmäßig verwendet und ist in der [AASHTO T 313-12] beschrieben. Seit 2005 ist der Versuch auch auf europäischer Ebene in der [DIN EN 14771] genormt. 2017 wurde für Deutschland zusätzlich die Arbeitsanleitung zur Konkretisierung der Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer [AL BBR-Prüfung] veröffentlicht.

Bei dem im BBR durchgeführten Versuch handelt es sich um einen Drei-Punkt-Biegeversuch, welcher gemäß [AL BBR-Prüfung] bei -16 °C und abhängig von der Bindemittelhärte bei -10 °C oder -22 °C durchgeführt wird. Als Kenngrößen für das Kälteverhalten von Bindemitteln haben sich die Temperaturen bei einer Biegekriechsteifigkeit von 300 MPa

und bei einem sogenannten m-Wert von 0,3 etabliert. Dieser m-Wert entspricht der Steigung der Kurve des Logarithmus der Biegekriechsteifigkeit aufgetragen gegen den Logarithmus der Zeit. Beide Kenngrößen müssen aus den Ergebnissen des Drei-Punkt-Biegeversuches mit statischer Auflast berechnet werden.

Obwohl mithilfe des BBR das Tieftemperaturverhalten von Bitumen differenziert untersucht werden kann, wird auch dieser Versuch in [HUGENER, BUENO, 2014] als kritisch betrachtet, da es sich um eine reine Kriechbeanspruchung handelt und nicht der eigentliche Versagensfall - die Rissbildung - untersucht wird. Darüber hinaus ist für die Untersuchung mit dem BBR eine große Menge an Bitumen notwendig, die besonders bei Untersuchungen im Schadensfall, aber auch bei Untersuchungen im Rahmen der Kontrollprüfung nicht immer vorhanden sind.

Zusätzlich zum Brechpunkt nach Fraaß und dem Drei-Punkt-Biegeversuch kann der Direct Tension Test (DTT), welcher bisher allerdings nur in das US-amerikanische Regelwerk [AASHTO T 314-12] eingegangen ist, zur Beschreibung des Kälteverhaltens von Bindemitteln genutzt werden. Aufgrund der schwierigen Handhabung und hoher Anschaffungskosten, wird der DTT aber selbst in den USA wenig angewendet. In Deutschland wurde 1995 im Zuge eines Forschungsprojektes am Institut für Materialprüfung in Rottweil der Zug-Retardationsversuch an reinen Bindemitteln und Mörtelproben untersucht und Versuchsparameter festgeschrieben. [SCHELLENBERG, EULITZ, 1995] Allerdings ist hier die benötigte Probenmenge noch größer als für die BBR-Untersuchung, so dass auch dieser Versuch, trotz guter Ergebnisse und hoher Präzision, bisher wenig verbreitet ist.

Es bedarf somit einer neuen Prüfmethode, mit welcher das Tieftemperaturverhalten von Bindemitteln performance-orientiert an kleinen Probemengen untersucht werden kann. Für solche Untersuchungen ist das Dynamische Scherrheometer (DSR) sehr gut geeignet und hat sich zumindest für Untersuchungen im hohen und mittleren Temperaturbereich in den letzten Jahren etabliert. Mit dem DSR ist es möglich an kleinen Proben das rheologische Verhalten bitumenhaltiger Bindemittel sehr präzise zu beschreiben. [ECKMANN et al., 2004]

2.3 Grundlagen rheologischer Untersuchungen an Bitumen mittels DSR

Typischerweise wird mit dem DSR das Scherverhalten von Bitumen untersucht. Die hierbei verwendeten Methoden werden in rotierende oder oszillierende Versuche eingeteilt. Der Unterschied zwischen diesen beiden Versuchsarten liegt in der Richtung, in welcher die Scherspannungen auf den Probekörper aufgebracht werden. Während beim Oszillationsversuchen die Spannung sinusförmig abwechselnd in beide Richtungen aufgebracht wird, werden bei Rotationsversuchen die Spannungen nur in eine Richtung aufgebracht. Auf diese Weise können beim Oszillationsversuch der komplexe Schermodul (Steifigkeit) und über die verzögerte Reaktion der Probe, der Phasenwinkel, bestimmt werden. Bei Rotationsversuchen kann ebenfalls die Steifigkeit und darüber hinaus das Kriechverhalten ermittelt werden. Mithilfe des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels lassen sich noch weitere rheologische Größen berechnen und so mögliche Rückschlüsse der beiden Messgrößen miteinander kombinieren. Der Zusammenhang zwischen komplexen Schermodul (G^*) und Phasenwinkel (δ) so-

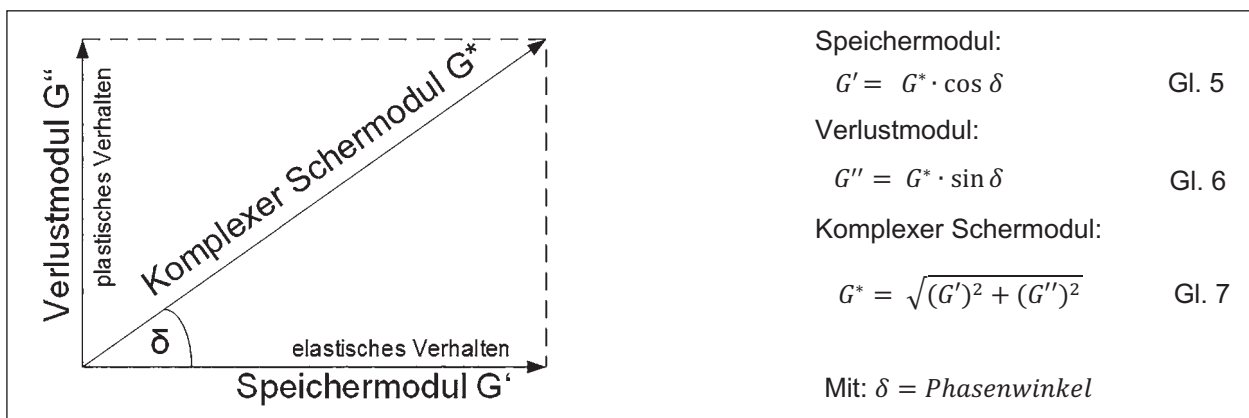


Bild 2-4: Zusammenhänge zwischen den rheologischen Kenngrößen

wie weiteren rheologischen Kenngrößen ist in Bild 2-4 dargestellt.

Die mithilfe der Trigonometrie bestimmbaren Größen des Speichermoduls (G') und des Verlustmoduls (G'') (vgl. Gleichung 5 bis Gleichung 7) gelten als Maß, inwieweit während der Belastung die Probe die aufgebrachte Deformationsenergie speichert bzw. verliert. Hierbei wird das elastische Materialverhalten durch den Speichermodul und das viskose Materialverhalten durch den Verlustmodul repräsentiert.

2.3.1 Entwicklungen zur Untersuchung des Kälteverhaltens von Bitumen mit dem DSR

Wie bereits in Kapitel 1.2 dargelegt, werden in diesem Forschungsprojekt vier verschiedenen Prüfverfahren mittels DSR verwendet, um das Kälteverhalten von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Tieftemperaturbereich zu charakterisieren. Die vier ausgewählten Methoden weisen grundlegende Unterschiede auf. So wird bei der Prüfung mit der 4 mm Platte-Platte-Geometrie (PP04) und der Festkörper-Untersuchung ein Temperatur-Sweep analog zur [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] sowie bei jeder Temperatur ein Frequenz-Sweep mit oszillierender Belastung aufgebracht. Während bei den beiden an der Ruhr-Universität Bochum entwickelten Relaxationsversuchen (ZRV und SRV) die Probe nach einer Temperierung auf -10 °C eine Belastung für eine längere Zeit erfährt und anschließend der Spannungsabbau in der Probe beobachtet wird. [GEHRKE, 2017]

Als Alternative zu der etablierten 8 mm-Messgeometrie (PP08) für die Ansprache des Tieftemperaturverhaltens von Bindemitteln mittels DSR, wurde 2010 die 4 mm-Messgeometrie (PP04) von [SUI et al., 2010] eingeführt. Hintergrund für die Verminderung des Querschnitts ist, dass bei Verwendung der PP08 aufgrund der hohen Torsionssteifigkeit der Proben im Tieftemperaturbereich ($T < -10\text{ °C}$), häufig das maximale Drehmoment der Prüfgeräte erreicht wird und somit eine Messung nicht möglich ist. Dies wird durch Verminderung des Querschnitts vermieden. In verschiedenen Forschungsprojekten konnte ein guter Zusammenhang zwischen den Ergebnissen dieser Messmethode und den Ergebnissen von BBR-Prüfung und anderen Kälteprüfverfahren nachgewiesen werden. [LAUKKANEN et al., 2015; SUI et al., 2011]. Mit dem Technical White Paper „Determining the Low-Temperature Rheological

Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)“ [FARRAR et al., 2015] ist 2015 ein Entwurf für das US-amerikanische Regelwerk erstellt worden, der diese Methode beschreibt. Gemäß [SUI et al., 2011] ist es mit der 4 mm-Messgeometrie möglich, Bitumen bis zu einer Temperatur von -40 °C zu untersuchen. In Abhängigkeit von dem verwendeten Messgerät müssen hierbei gegebenenfalls Korrekturfaktoren berücksichtigt werden [FARRAR et al., 2015].

Die guten Ergebnisse aus den USA konnten in [SCHÄFFLER et al., 2015] nicht bestätigt werden, hier wurden Abweichungen von teilweise über 30 % bei Doppelbestimmungen festgestellt.

Die Kälteprüfung an schlanken, zylindrischen Proben mittels dynamisch-mechanischer Thermoanalyse (DMTA) stammt ursprünglich aus der Polymerindustrie. 2007 wurde das Verfahren an der TU Delft für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel sowie Mörtel oder Mastix (Bindemittel-Füller-Gemisch) adaptiert. [WOLDEKIDAN, 2011] Die Besonderheit, dass neben reinen Bindemittel auch Gemische mit Füllstoffen untersucht werden können, macht dieses Prüfverfahren aus wissenschaftlicher Sicht besonders interessant. Die Verwendung von schlanken Torsionsstäben ermöglicht, genauso wie die Verringerung des Messquerschnitts bei der 4 mm-Messgeometrie, Messungen im Temperaturbereich $< -10\text{ °C}$ ohne den Einfluss gerätebedingter Messfehler.

3 Voruntersuchungen

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, wurde das Untersuchungsprogramm des Forschungsprojektes in drei Untersuchungspakete eingeteilt. In den Voruntersuchungen wurden zehn Bindemittel mit den vier Prüfverfahren untersucht. Im zweiten Untersuchungspaket wurden die zwei favorisierten Verfahren angewendet, um 40 weitere Bindemittel zu untersuchen. Im letzten Untersuchungspaket wurden der Drei-Punkt-Biegeversuch mit dem BBR und der Zug-Retardationsversuch zur Validierung der Ergebnisse angewendet, um so die bestgeeignete Untersuchungsmethode zu ermitteln. [SCHELLENBERG, EULITZ, 1995]

In diesem Kapitel wird zunächst das Untersuchungsprogramm der Voruntersuchungen detailliert beschrieben. Darauf folgen die Darstellung der Er-

gebnisse sowie deren Auswertung. Abschließend werden die Voruntersuchungen im Hinblick auf das weitere Vorgehen bewertet.

3.1 Untersuchungsprogramm der Voruntersuchungen

Zu Beginn der Voruntersuchungen wurden alle zehn in diesem Untersuchungsprogramm verwendeten Bindemittel mittels T-Sweep in Anlehnung an [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] untersucht. Es wurde der Temperaturbereich von -10 °C bis 150 °C untersucht. Diese Untersuchung erfolgte in zwei Teilprüfungen, zum einen mit der 25 mm-Messgeometrie (PP25) von 30 bis 150 °C bei einer Frequenz von $1,59\text{ Hz}$ und zum anderen mit der 8 mm-Messgeometrie (PP08) von 30 bis -10 °C inklusive Frequenz-Sweep mit den Stufen $0,1\text{ Hz}$, $1,0\text{ Hz}$, $1,59\text{ Hz}$, $5,0\text{ Hz}$ und 10 Hz . Hiermit liegt eine umfassende rheologische Charakterisierung der zehn Bindemittel vor und die Applikationstemperatur bei der die Applikation der Probekörper auf die untere Platte der Messsysteme beim SRV, ZRV und der Untersuchung mittels PP04 erfolgt, kann bestimmt werden. Weiterhin wurden Amplitudentests zur Bestimmung des LVE-Bereichs durchgeführt.

Nach diesen charakterisierenden Untersuchungen wurde das Kälteverhalten der zehn Bindemittel mit den vier ausgewählten Untersuchungsmethoden bestimmt. Begonnen wurde jeweils mit einer Zehnfachbestimmung des Bindemittels 20/30, welches das härteste Straßenbaubitumen in diesem Untersuchungspaket war, um so evtl. notwendige Veränderungen an den Prüfparametern und/oder den Randbedingungen festzustellen. Wurde die Zehnfachbestimmung mit ausreichender Wiederholpräzision durchgeführt, folgten Doppelbestimmungen der anderen neun Bindemittel.

3.1.1 Zug-Relaxationsversuch (ZRV)

Bei den bisher im Regelwerk beschriebenen Versuchen mittels DSR (T-Sweep, MSCRT und BTSV) wird das Bindemittelverhalten bei Aufbringung von Scherspannungen untersucht. Abweichend hiervon wird bei dem an der Ruhr-Universität Bochum (RUB) entwickelten ZRV eine axiale Zugspannung auf die Probe aufgebracht und der Spannungsabbau bei konstanter Dehnung gemessen. In Bild 3-1 ist zur Verdeutlichung der Versuchsaufbau schema-

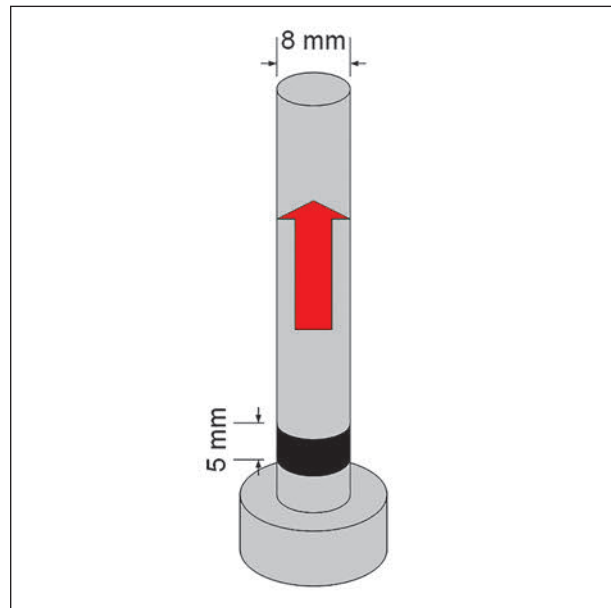


Bild 3-1: Schema des ZRV

Zug-Relaxationsversuch	
Messsystem	8 mm-Platte/Platte (PP08)
Prüfart	kraftgesteuert/ziehend
Prüftemperatur	-10 °C
Zeit der Temperierung	45 min
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite zu Beginn des Versuchs	5 mm
Vorgegebene Zugspannung	0,2 MPa
Dauer der Belastungsphase	5 min
Dauer der Relaxationsphase	60 min

Tab. 3-1: Versuchsparameter des Zug-Relaxationsversuchs

tisch dargestellt und in Tabelle 3-1 sind die Versuchsparameter aufgeführt.

Die Messung wird mit einem gemäß [DIN EN 14770] genormten 8 mm-Messsystem bei einer Prüftemperatur von -10 °C durchgeführt. Die Probekörperhöhe beträgt abweichend von den vorgenannten Versuchen 5 mm. Für die Herstellung dieser erhöhten Probekörper wurden spezielle Gussformen aus Silikon hergestellt. Abgesehen von der Probengeometrie erfolgt die Probenherstellung gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)]. Vor Beginn des Versuches werden die Probekörper mit einem heißen Spatel getrimmt.

Um eine einheitliche Temperatur im gesamten Probekörper sicherzustellen, wird dieser vor Beginn des Versuches 45 Minuten temperiert und hierbei

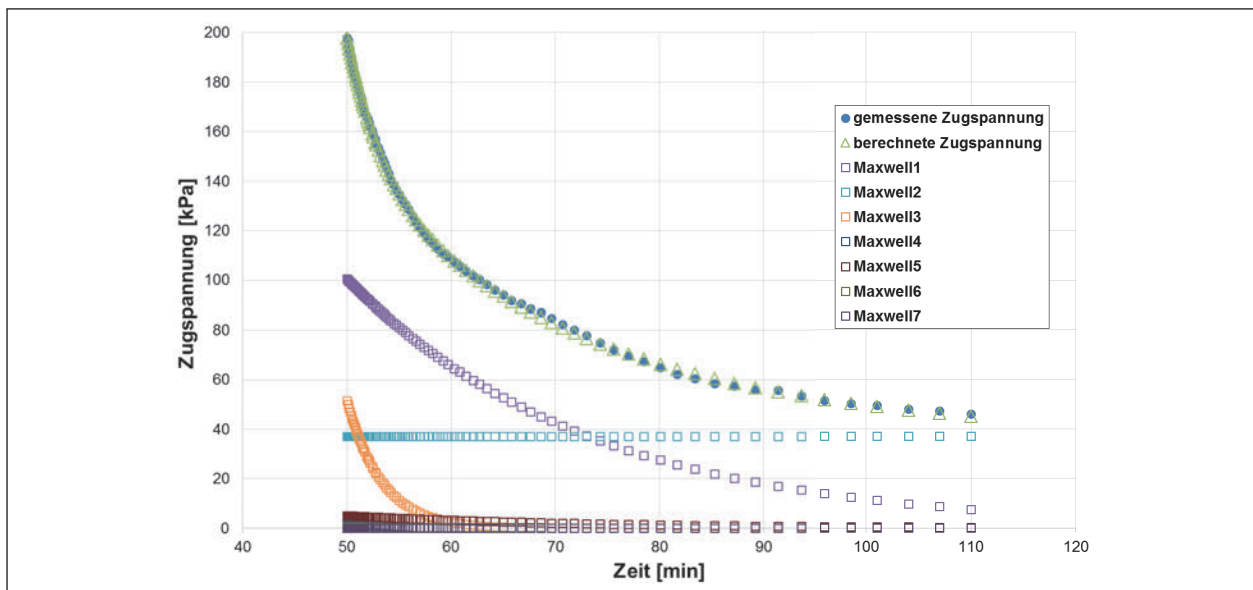


Bild 3-2: Beispiel von sieben parallelgeschalteten Maxwell-Modellen zur Beschreibung des ZRVs eines Straßenbaubitumens 20/30

spannungsfrei gelagert. Anschließend wird die Probe in der Belastungsphase mit einer Zugspannung von 0,2 MPa ($F_z = 10 \text{ N}$) für fünf Minuten gedehnt. Die hierbei erzeugte Dehnung wird gemessen und in der darauffolgenden 60-minütigen Relaxationsphase konstant gehalten. Die zur Aufrechterhaltung dieser Dehnung benötigte Zugspannung wird in der Relaxationsphase erfasst. Dieser Spannungsverlauf ist zwischen verschiedenen Bindemitteln gut differenzierbar und kann mithilfe von Maxwell-Modellen beschrieben werden. In [GEHRKE, 2017] wurden hierzu drei parallelgeschaltete Modelle verwendet. Da allerdings im vorliegenden Forschungsprojekt hochmodifizierte, gealterte und verjüngte Bindemittel untersucht werden sollen, wurde eine mathematische Abbildung mit sieben Maxwell-Modellen verwendet, um das erwartet hochkomplexe Bindemittelverhalten exakter zu beschreiben. In Bild 3-2 ist beispielhaft eine Messreihe sowie die zugehörigen sieben Maxwell-Modelle eines Straßenbaubitumens 20/30 dargestellt.

Anschließend an die Relaxationsphase wird die Probe zehn Minuten spannungsfrei gelagert und die aus den Restspannungen resultierende Rückverformung (Retardation) beobachtet.

Die Gesamtdauer des Versuchs beträgt somit 120 Minuten.

Neben der präzisen Erfassung des Bindemittelverhaltens während der Relaxationsphase ist es mithilfe der Maxwell-Modelle zusätzlich möglich, den Spannungsverlauf zu extrapolieren und den Zeitpunkt der fast vollständigen Relaxation (λ_{99}) zu be-

stimmen. Dieser kann abhängig von der Bindemittelsorte teilweise weit außerhalb des Messzeitraums liegen. Bei dieser Extrapolation ist zu beachten, dass rein mathematisch, die Spannung aufgrund der im Maxwell-Modell verwendeten e-Funktion, nie auf absolut Null absinken kann und bei einem sehr flachen asymptotischem Verlauf, schon geringe Änderungen in der Steigung einen großen Zeitunterschied ausmachen können.

Neben der Beschreibung des Relaxationsverhaltens mittels Maxwell-Modellen ist nach [GEHRKE, 2017] auch die absolute Restspannung am Ende der Relaxationsphase des ZRVs (σ_{60}) eine diskrete, charakteristische Größe zur Beurteilung des Tiefemperaturverhaltens von Bindemitteln.

3.1.2 Scher-Relaxationsversuch (SRV)

Der SRV wird analog zum ZRV mit einem 8 mm-Messsystem gemäß [DIN EN 14770] und an 5 mm hohen Probekörpern durchgeführt. Allerdings erfolgt bei diesem Versuch die Auslenkung nicht axial und kraftgesteuert, sondern rotierend und weggesteuert (vgl. Bild 3-3).

Nachdem die Probe für 45 Minuten spannungsfrei auf -10 °C temperiert wurde (Die Spaltbreite wird hierbei automatisch vom DSR angepasst), wird innerhalb einer Minute eine Deformation von 0,1 % aufgebracht. Anschließend wird diese für 30 Minuten konstant gehalten und dabei der Spannungsabbau aufgezeichnet. Nach dieser Relaxationsphase wird die Probe für weitere 30 Minuten wieder spannungsfrei gelagert und die Rückformung der Probe

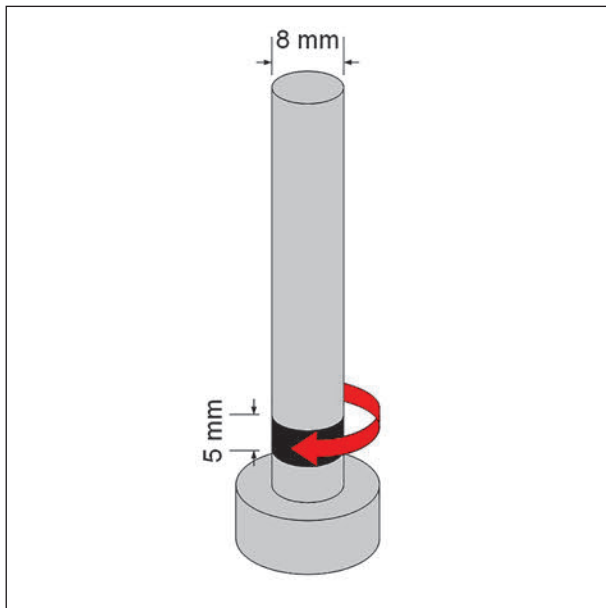


Bild 3-3: Schema des SRV

Scherversuchsversuch	
Messsystem	8 mm-Platte/Platte (PP08)
Prüfart	weggesteuert/rotierend
Prüftemperatur	-10 °C
Zeit der Temperierung	45 min
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite zu Beginn des Versuchs	5 mm
Vorgegebene Deformation	0,1 %
Dauer der Belastungsphase	1 min
Dauer der Relaxationsphase	30 min
Dauer der Retardationsphase	30 min

Tab. 3-2: Versuchsparameter des Scherversuchsversuchs

gemessen. In Bild 3-3 ist das Versuchsschema dargestellt und in Tabelle 3-2 die Versuchsparameter zusammengefasst.

Die Gesamtdauer des Versuchs beträgt 105 Minuten.

Analog zum ZRV lässt sich auch beim SRV der Spannungsverlauf während der Relaxationsphase mittels Maxwell-Modellen beschreiben sowie die Restspannung nach der Relaxationsphase (τ_{30}) bestimmen.

Beim SRV dient darüber hinaus der Verhältniswert zwischen der Spannung am Ende der Relaxationsphase (τ_{30}) und zu Beginn der Relaxationsphase (τ_0) als Kennwert für das Relaxationsverhalten, je höher dieser Wert ist, desto besser ist das Relaxationsvermögen des Bindemittels (vgl. Gleichung 8).

$$REL_{SRV} = \tau_{30} / \tau_0 \cdot 100 \quad \text{Gl. 8}$$

In [GEHRKE, 2017] wurden zwischen diesem Kennwert und dem m-Wert aus der Prüfung im BBR bei -10 °C gute Korrelationen ermittelt (Bild 34).

In Bild 3-5 ist der Spannungsverlauf sowie die Deformation einer Probe aus Straßenbaubitumen 20/30 während des SRVs beispielhaft dargestellt.

3.1.3 4 mm-Messgeometrie

Bei der Messung mit der 4 mm-Messgeometrie wird analog zur [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] eine Temperaturrampe von 30 °C bis -20 °C in Schritten von 10 K gefahren. Bei jeder Temperatur wird zusätzlich ein Frequenz-Sweep von 0,1 Hz bis 10 Hz durchgeführt. Die hierbei sinusförmig aufgebracht oszillierenden Deformationen variieren in Abhängigkeit von Prüftemperatur und -frequenz, um eine Prüfung außerhalb des LVE-Bereichs zu vermeiden. Die Temperierung zwischen den einzelnen Prüfsequenzen dauert jeweils 15 Minuten und erfolgt ebenfalls spannungsfrei, was durch die automatische Anpassung der Spaltbreite durch das DSR sichergestellt ist. In Tabelle A1 im Anhang ist der genaue Versuchsablauf zusammengefasst, die gesamte Versuchsdauer beträgt 2 h 40 min. Zur Übersicht ist in Bild 3-6 das Versuchsschema dargestellt und in Tabelle 3-3 die Versuchsparameter zusammengefasst.

Die Probenkörper-Herstellung erfolgt wie in der [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] gefordert, in Gussformen aus Silikon gemäß [AASHTO T 315]. Auch bei Temperatur und Lagerung werden die Grenzwerte der [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] als maßgebend herangezogen. Ebenfalls analog zu den bisherigen Arbeitsanleitungen werden die Probekörper unmittelbar vor Beginn des Versuches im Gerät mit einem heißen Spatel getrimmt.

Das Ergebnis dieser Untersuchung sind die in Kapitel 2.3 beschriebenen rheologischen Kenngrößen, die in Abhängigkeit von Frequenz und Temperatur als Graphen dargestellt, für jedes Bindemittel diskrete Kurvenverläufe ergeben. Anhand dieser Kurvenverläufe ist eine direkte Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse durch eine gemeinsame Darstellung mit den Ergebnissen der Untersuchungen mit den PP08- und PP25-Messgeometrien möglich. Als Beispiel sind in Bild 3-7 der Phasenwinkel und der komplexe Schermodul eines Straßenbaubitumens

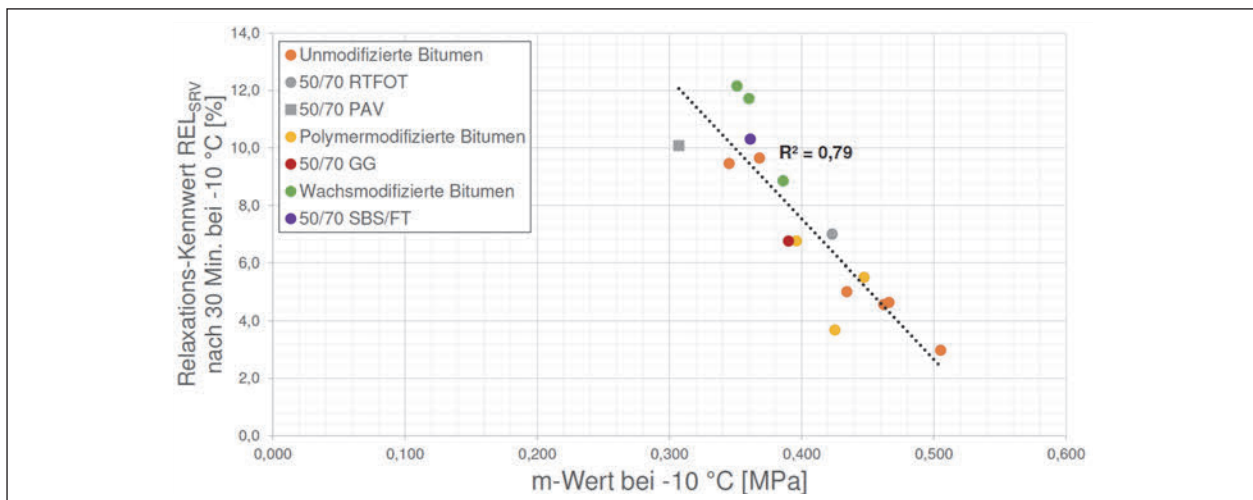


Bild 3-4: Zusammenhang zwischen dem m-Wert und dem Relaxations-Kennwert REL_{SRV} , jeweils bei -10 °C [GEHRKE, 2017]

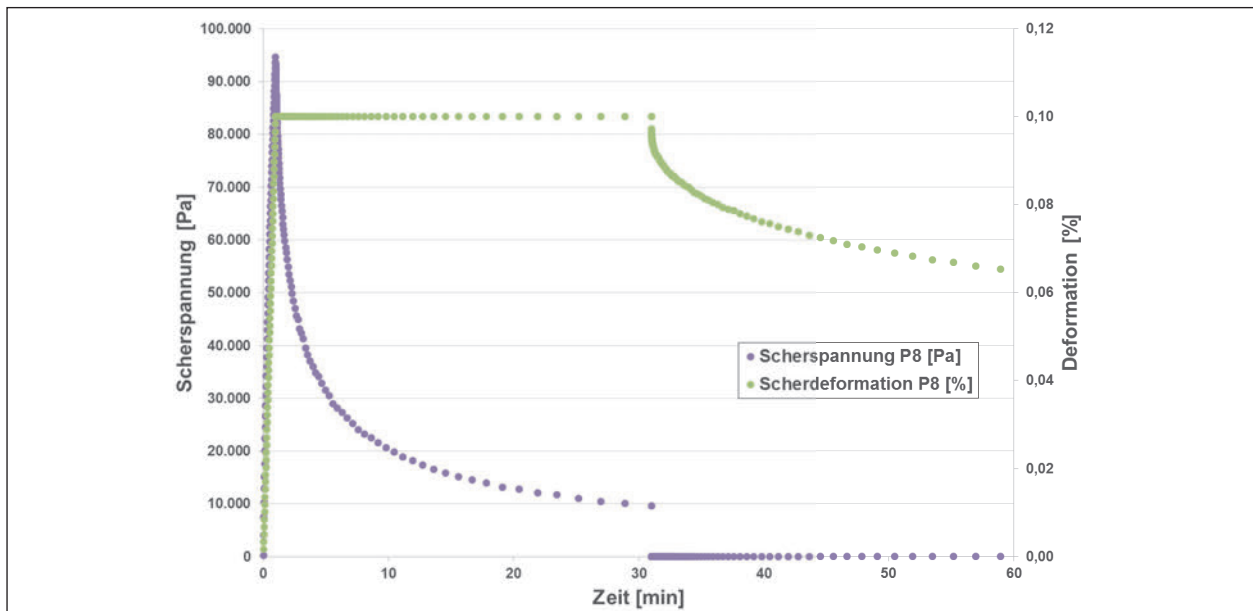


Bild 3-5: Beispielhafter Spannungs- und Deformationsverlauf des Scher-Relaxationsversuchs eines Straßenbaubitumens 20/30

20/30 in Abhängigkeit von der Temperatur bei einer Frequenz von 1,59 Hz dargestellt.

In einer Forschungsarbeit über die 4 mm-Messgeometrie wurde besonders der Trimmvorgang der kleinen Messgeometrie als kritisch beurteilt, sodass neben dem in diesem Projekt angewendeten Trimmen der Probe mit heißem Spatel im Prüfgerät unmittelbar vor dem Beginn des Versuches, weitere Verfahren zur Probenherstellung in der Literatur vorgeschlagen werden [SUI et al., 2011; LU et al., 2017; WANG et al., 2019]. Hierzu gehören zum Beispiel, das Applizieren einer definierten Menge flüssigem Bitumens direkt auf die untere Messgeometrie ohne anschließendes Trimmen und ohne Verwendung von Gussformen, die Herstellung der Probekörper

in speziellen Gussformen im Gerät (auf der unteren oder oberen Platte) oder die Herstellung der Probekörper in den genormten Silikongussformen, ohne Trimmen vor der Prüfung. Die Problematik lässt sich durch ein Rechenbeispiel verdeutlichen: Bei einem fiktiven Trimmfehler von 0,5 mm, also Vergrößerung des Durchmessers um 1 mm, führt dies bei einem fiktiven 25 mm-Probendurchmesser zu einer Unterfüllung der Messgeometrie von 7,84 %. Bei einer 4 mm-Messgeometrie steigt die Unterfüllung bei gleichbleibendem Trimmfehler auf 43,75 % an. Eine weitere in diesen Forschungsarbeiten betrachtete Problematik, ist die Nachgiebigkeit des Messsystems. Diese wurde vom Hersteller in der Software des DSRs berücksichtigt, so dass keine nachträgliche Anpassung der Messwerte notwendig ist.

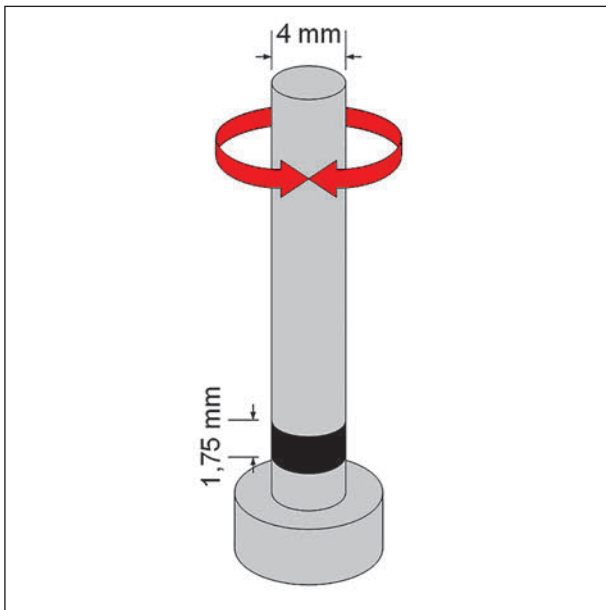


Bild 3-6: Schema der Messung mit einer PP04-Messgeometrie

4 mm-Messgeometrie	
Messsystem	4 mm-Platte/Platte (PP04)
Prüfart	weggesteuert/ oszillierend
Prüftemperaturbereich	Von 30 °C bis -20 °C
Prüffrequenz	0,1 Hz bis 10 Hz
Zeit der Temperierungen	15 min
Probendurchmesser	4 mm
Spaltbreite zu Beginn des Versuchs	1,75 mm
Vorgegebene Deformation	0,05 % bis 0,5 %
Dauer der Belastungsphase	80 bis 270 sec

Tab. 3-3: Versuchsparameter der Messung mit 4 mm-Messgeometrie

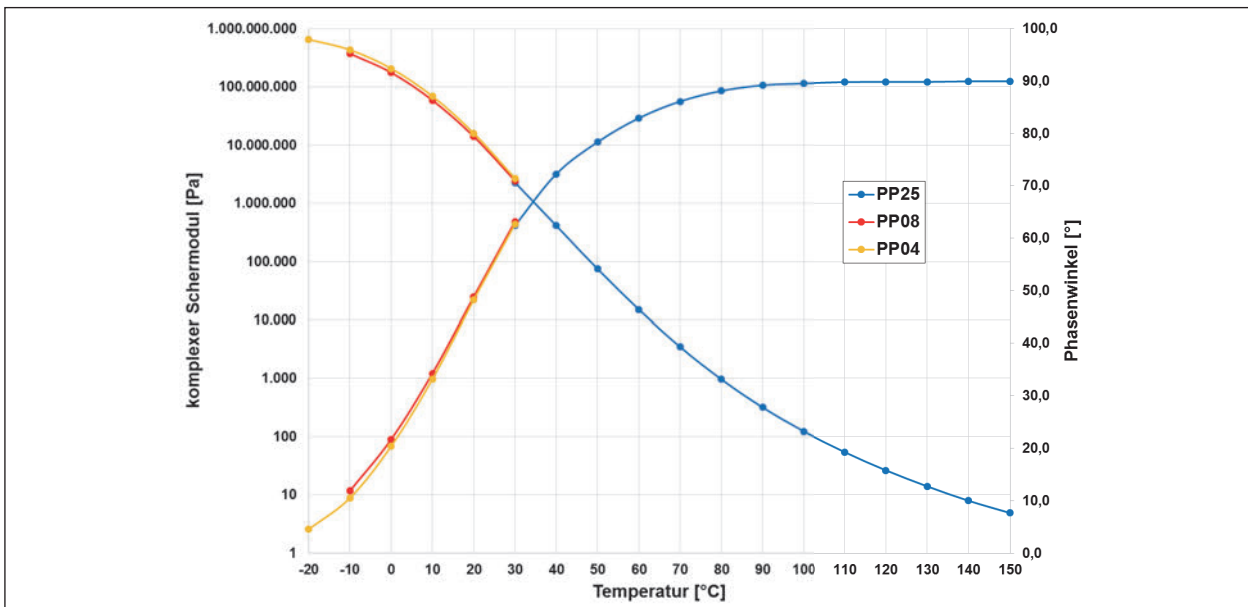


Bild 3-7: Beispielhafter Verlauf von Phasenwinkel und komplexen Schermodul im Temperaturbereich von -20 bis 150 °C bestimmt mit PP04, PP08 und PP25

3.1.4 Dynamisch-mechanische Thermoanalyse (DMTA)

Im Gegensatz zu den drei zuvor genannten Messmethoden wird bei der DMTA kein Platte-Platte-Messsystem verwendet. Stattdessen werden schlanke zylindrische Probekörper mit runden Metalladaptern in einer speziellen Festkörper-Einspannvorrichtung verwendet (vgl. Bild 3-8).

Die Probekörper werden hierfür in speziellen Gussformen hergestellt. Dazu wird die Form mit Silikonpaste als Trennmittel vorbereitet und die Metalladapter in die entsprechenden Aufweitungen der PTFE-Gussform eingesetzt. Anschließend wird das

auf 180 °C erhitze Bitumen langsam durch die Löcher der Adapter in die Form gefüllt. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich keine Hohlräume bilden. Anschließend werden die Probekörper in den Formen für zwei Stunden bei Raumtemperatur und danach noch einmal zwei Stunden im Kühlschrank bei 6 °C abgekühlt. Nach dem Abkühlen werden die Probekörper getrimmt (Bitumenüberstand oberhalb der Adapter wird mit einem heißen Messer entfernt) und können dann geprüft werden.

Für die Temperierung der Probekörper während der Untersuchung wird ein Konvektionsofen verwendet, der die gesamte Messgeometrie umschließt. Abwei-



Bild 3-8: Eingespannter Probekörper im Konvektionsofen

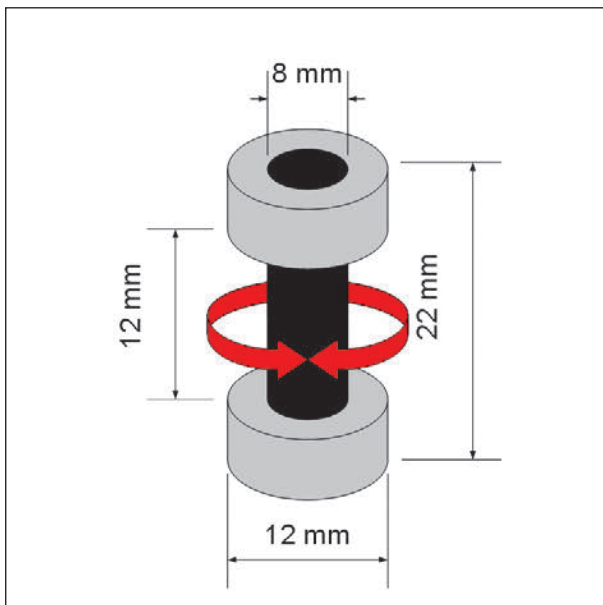


Bild 3-9: Schema der DMTA

chend von der Messung mittels 4 mm-Messgeometrie wird bei dieser Messmethode die Temperaturrampe in umgekehrter Reihenfolge von -20 nach 30 °C gefahren. In Anlehnung an die AL DSR-Prüfungen werden bei dieser Prüfung ebenfalls die rheologischen Kenngrößen bestimmt. Allerdings wird bei diesem Versuch nur eine Frequenz von 1,59 Hz geprüft. Zur Gewährleistung der Lagersicherheit des Bitumenstabes wird dieser während

Untersuchungsverfahren	DMTA an schlanken zylindrischen Probekörpern (DMTA-08)
Messsystem	Festkörper-Einspannvorrichtung
Prüfart	weggesteuert/ oszillierend
Prüftemperaturbereich	von -20 °C bis 30 °C
Prüffrequenz	1,59 Hz
Zeit der Temperierung bei -20 °C	40 min
Zeit der Temperierung zwischen den Prüfintervallen	20 min
Probendurchmesser	8 mm
Freie Einspannlänge	12 mm
Vorgegebene Deformationen	0,02 bis 0,1 %
Normalkraftvorspannung	2,6 mN/mm ²

Tab. 3-4: Versuchparameter DMTA an schlanken zylindrischen Probekörpern

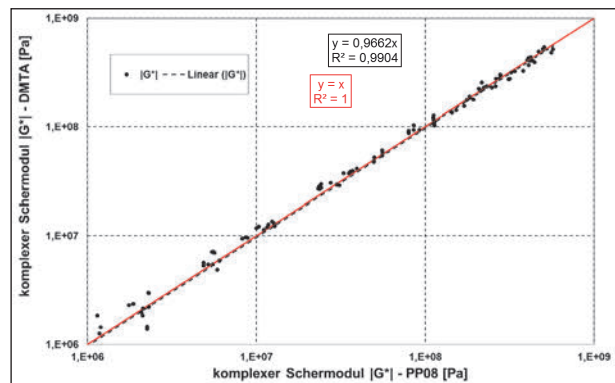


Bild 3-10: Korrelation des komplexen Schermoduls zwischen DMTA und PP08-Messsystem [Kornas, 2016]

des gesamten Versuchs mit einer konstanten Zugspannung von 2,6 mN/mm² vorgespannt gehalten. In Tabelle 3-4 sind die Versuchparameter zusammengefasst und in Bild 3-9 die Geometrie des Probekörpers dargestellt.

Die Gesamtdauer des Versuchs beträgt 155 Minuten.

Im Rahmen einer Masterarbeit am Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum [KORNAS, 2016] konnte eine gute Übereinstimmung mit Untersuchungen mittels einer PP08-Messgeometrie im Temperaturbereich von -10 °C bis 10 °C nachgewiesen werden. In Bild 3-10 sind zur Verdeutlichung dieser guten Übereinstimmung die gemessenen komplexen Schermodule gegeneinander aufgetragen.

In Bild 3-11 sind die Probekörper mit Gussform und Adapter abgebildet.

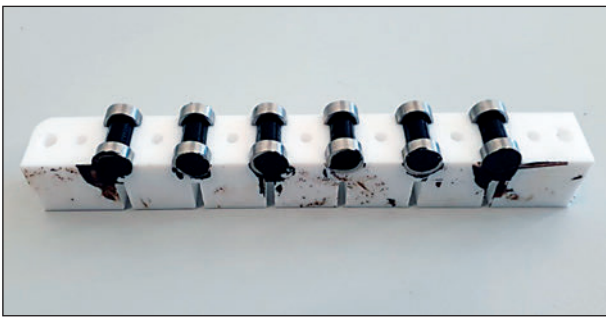


Bild 3-11: Schlanke zylindrische Probekörper mit runden Metalladaptern

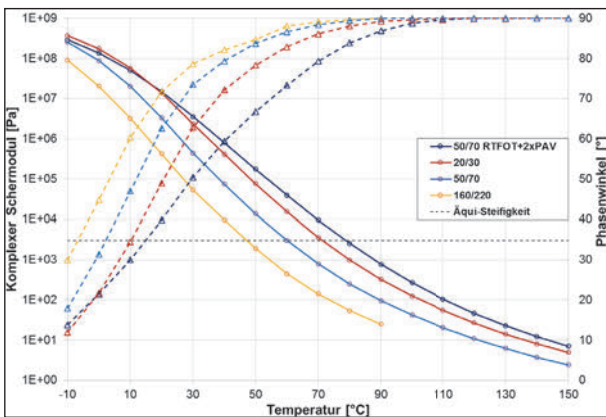


Bild 3-12: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der vier verwendeten nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

3.2 Ergebnisse der Voruntersuchungen

Für die Darstellung der Ergebnisse der Voruntersuchungen werden drei Gruppen – nicht modifizierte Bindemittel, viskositätsveränderte Bindemittel und polymermodifizierte Bindemittel (PmB) – gebildet. Hierbei handelt es sich immer um den Mittelwert der einzelnen Untersuchungen. Es werden lediglich die zehnfach-Bestimmungen der vier Prüfungen des Bitumens 20/30 alle graphisch dargestellt.

3.2.1 Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, wurde zu Beginn der Voruntersuchungen mit jedem Bindemittel ein Temperatur-Sweep (Doppelbestimmung) von -10 °C bis 150 °C (160/220 nur bis 90 °C – aufgrund der niedrigen Viskosität ist die Messung bei höheren Temperaturen nicht möglich) durchgeführt und anhand der Ergebnisse die Applikationstemperatur zur Äquivalenzsteifigkeit von 3.000 Pa bestimmt. Diese Äquivalenzsteifigkeit wurde aufgrund von positiven Erfahrungen aus der Laborpraxis gewählt. In Bezug auf die Äquivalenz-Steifigkeitstemperatur von 15.000 Pa, welche gemäß

Bindemittel	50/70 RTFOT + 2xPAV	20/30	50/70	160/220
Applikationstemperatur [°C]	80	70	60	45

Tab. 3-5: Applikationstemperaturen der nicht modifizierten Bindemittel

Bindemittel	15/25 VL	15/25 VH	PmB 10/25 VL
Applikationstemperatur [°C]	80	80	85

Tab. 3-6: Applikationstemperaturen der viskositätsveränderten Bindemittel

Bindemittel	40/100-65A RTFOT + 2xPAV	10/40-65A	40/100-65A
Applikationstemperatur [°C]	90	70	65

Tab. 3-7: Applikationstemperaturen der polymermodifizierten Bindemittel

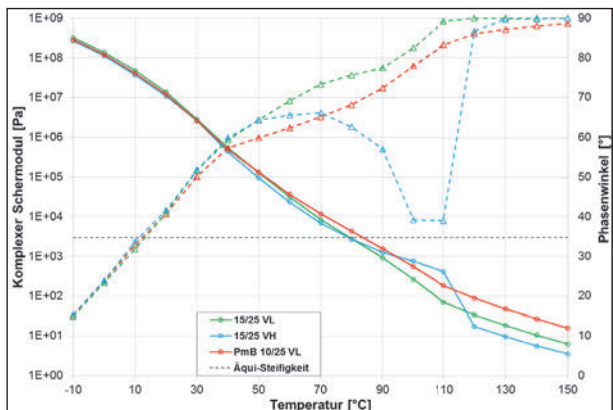


Bild 3-13: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der drei verwendeten viskositätsveränderten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

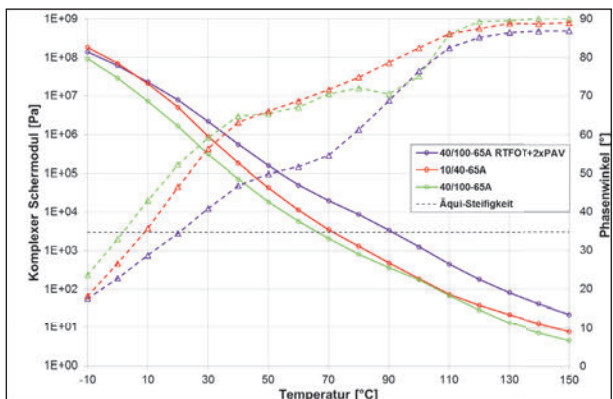


Bild 3-14: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der drei verwendeten polymermodifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

[RADENBERG et al., 2014] bei Straßenbaubitumen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel entspricht, liegt diese gewählte Applikationstemperatur ca. 10 bis 20 °C darüber. In Bild 3-12 bis Bild 3-14 sind die zehn Bindemittel inklusive der Äqui-

Bindemittel	Mittelwert	Standardabweichung		Spannweite	
	σ_{60}	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[%]
50/70 RTFOT + 2xPAV	58,09	1,39	2,4	2,79	4,8
20/30	46,08	5,10	11,1	14,32	31,1
50/70	13,45	1,74	13,0	2,47	18,3
160/220	5,54	0,21	3,8	0,48	8,6
PmB 10/25 VL	52,02	1,49	2,9	2,98	5,7
15/25 VL	50,73	2,26	4,4	4,97	9,8
15/25 VH	47,85	3,28	6,9	6,57	13,7
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	61,27	5,04	8,2	3,00	20,1
10/40-65A	37,50	0,10	0,3	0,20	0,5
40/100-65A	21,18	1,50	7,1	12,33	14,2

Tab. 3-8: Statistische Kenngrößen der Zug-Relaxationsversuche

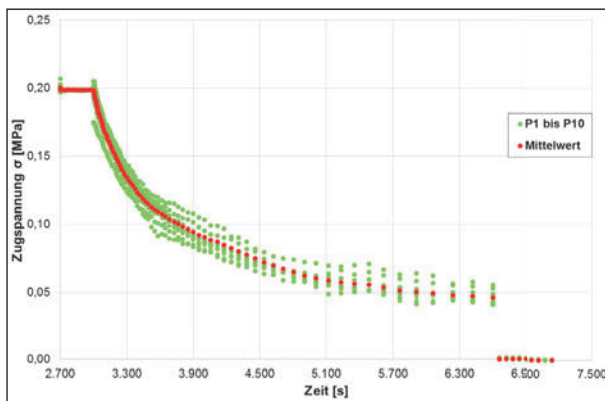


Bild 3-15: Zehnfach-Bestimmung des ZRV mit dem Bitumen 20/30 inklusive Mittelwert

valenzsteifigkeit von 3.000 Pa dargestellt. In Tabelle 3-5 bis Tabelle 3-7 sind die ermittelten Applikationstemperaturen zusammengefasst, die zwischen 45 °C und 90 °C schwanken.

3.2.2 Ergebnisse aus den ZRV

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse des Zug-Relaxationsversuches zusammengefasst. In Bild 3-15 ist die zehnfach-Bestimmung inklusive Mittelwert des Bitumens 20/30 dargestellt. In Tabelle 3-8 sind die Mittelwerte der Restzugspannung nach 60 Minuten sowie die zugehörigen Standardabweichungen und Spannweiten zusammengefasst. In Bild 3-16 bis Bild 3-18 sind die Mittelwerte aller untersuchten Bindemittel dargestellt.

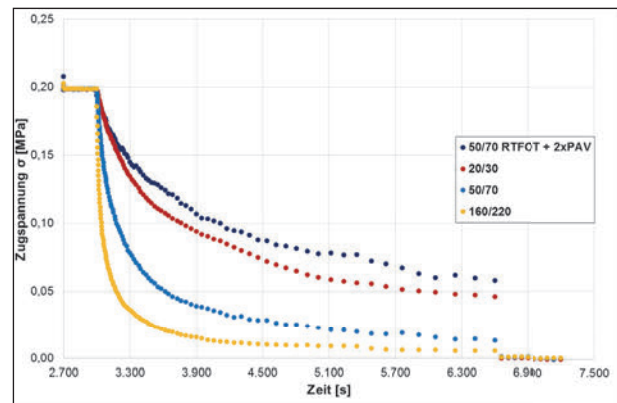


Bild 3-16: ZRV der nicht modifizierten Bindemittel

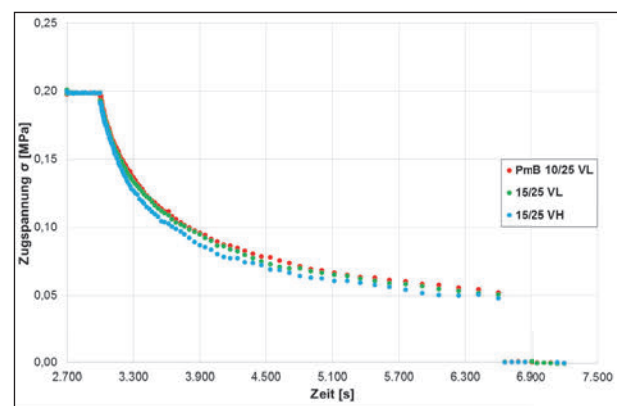


Bild 3-17: ZRV der viskositätsveränderten Bindemittel

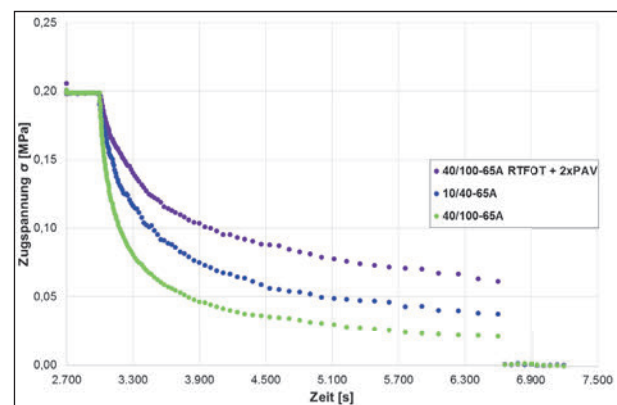


Bild 3-18: ZRV der polymermodifizierten Bindemittel

3.2.3 Ergebnisse aus den SRV

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse des Scher-Relaxationsversuchs dargestellt, beginnend mit der zehnfach-Bestimmung inklusive Mittelwert für das Bitumen 20/30 in Bild 3-19 sowie dem zugehörigen Deformationsabbau in Bild 3-20. In Bild 3-21 bis Bild 3-23 sind anschließend die Mittelwerte der Doppelbestimmungen aller zehn untersuchten Bindemittel dargestellt. Hierbei sind die unterschiedlichen Skalen auf der Ordinatenachse zu beachten, welche zur Differenzierung der einzelnen Bindemittel gewählt werden mussten. In Ta-

Bindemittel	σ_{τ_0}	Standard-abweichung		Spannweite	
	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
50/70 RTFOT + 2xPAV	62.200	3.100	5,0	6.200	10,0
20/30	89.954	9.091	10,1	26.217	29,1
50/70	19.050	750	3,9	1.500	7,9
160/220	2.615	15	0,6	30	1,1
PmB 10/25 VL	43.650	150	0,3	300	0,7
15/25 VL	47.050	1.650	3,5	3.300	7,0
15/25 VH	45.750	1.750	3,8	3.500	7,7
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	34.150	1.050	3,1	2.100	6,1
10/40-65A	25.650	1.450	5,7	2.900	11,3
40/100-65A	11.850	1.250	10,6	2.500	21,1
Bindemittel	$\sigma_{\tau_{30}}$	Standard-abweichung		Spannweite	
	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
50/70 RTFOT + 2xPAV	674,5	109,5	16,2	219,0	32,5
20/30	8.921,5	965,2	10,8	2.616,6	29,3
50/70	23,1	0,6	2,4	1,1	4,8
160/220	3,0	0,04	1,3	0,1	2,6
PmB 10/25 VL	657,5	95,5	15,0	197,0	30,0
15/25 VL	516,5	23,5	4,6	47,0	9,1
15/25 VH	604,5	55,5	9,2	111,0	18,4
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	81,6	60,0	5,0	120,0	10,1
10/40-65A	237,5	28,5	12,0	57,0	24,0
40/100-65A	81,6	3,4	4,2	6,8	8,3

Tab. 3-9: Statistische Kenngrößen des Scher-Relaxationsversuches

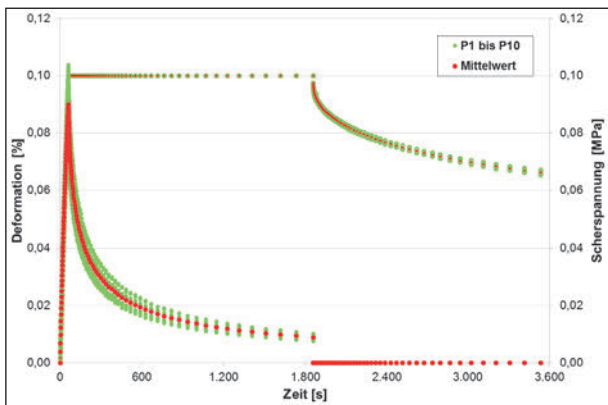


Bild 3-19: Zehnfach-Bestimmung des SRV mit einem Bitumen 20/30 inklusive Mittelwert

belle 3-9 sind die statistischen Kenngrößen abschließend zusammengefasst.

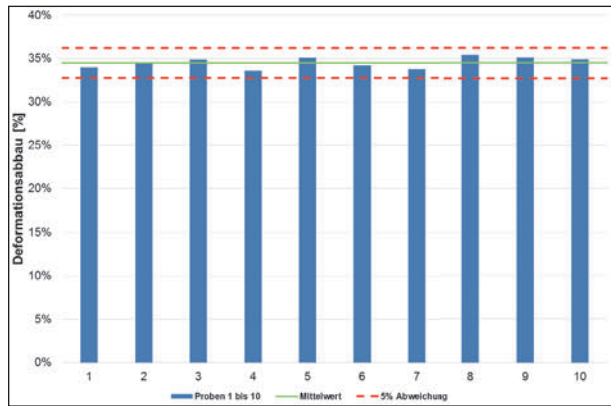


Bild 3-20: Deformationsabbau während des SRV bei der zehnfach-Bestimmung am Bitumen 20/30

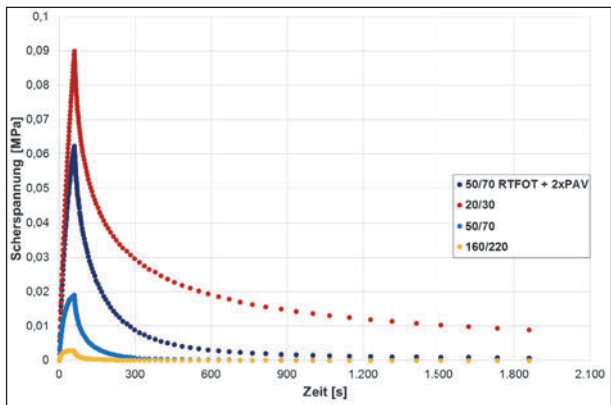


Bild 3-21: SRV der nicht modifizierten Bindemittel

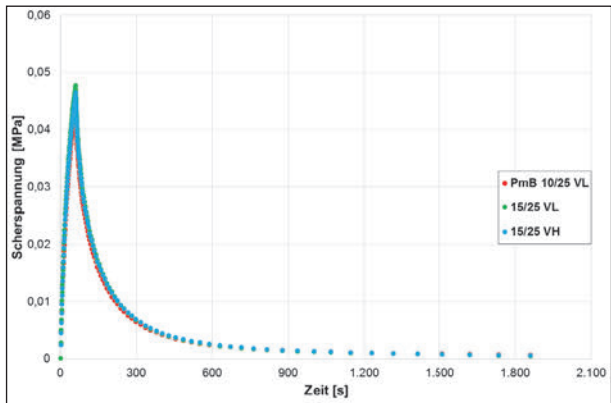


Bild 3-22: SRV der viskositätsveränderten Bindemittel

3.2.4 Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit der 4-mm-Messgeometrie (PP04) zusammengefasst. In Bild 3-24 ist die zehnfach-Bestimmung inklusive Mittelwert von Phasenwinkel und komplexen Schermodul des Bindemittels 20/30 für den Temperaturbereich von -20 °C bis 30 °C bei einer Frequenz von 1,59 Hz dargestellt. Hierbei ist ein auffälliger Verlauf (P6) zu erkennen, der als Aus-

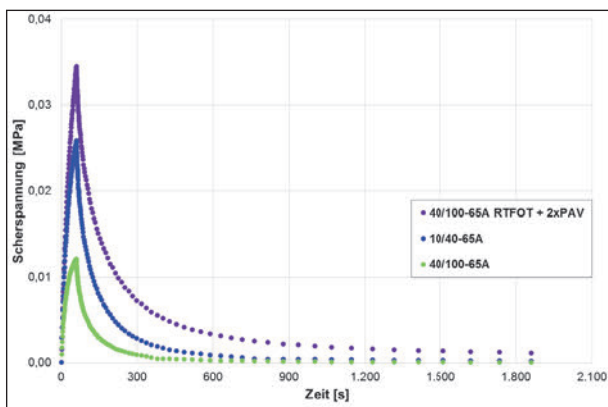


Bild 3-23: SRV der polymermodifizierten Bindemittel

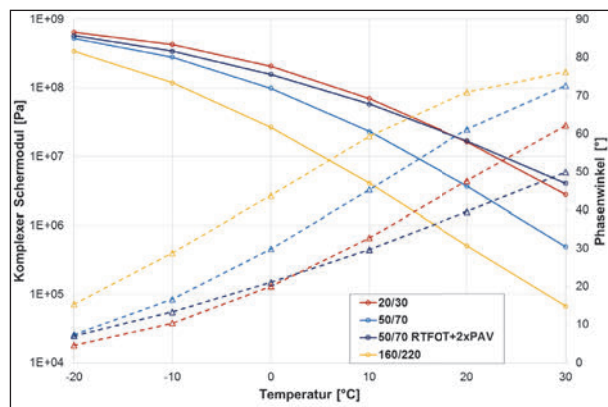


Bild 3-26: T-Sweep bei 1,59 Hz der nicht modifizierten Bindemittel mittels PP04-Geometrie

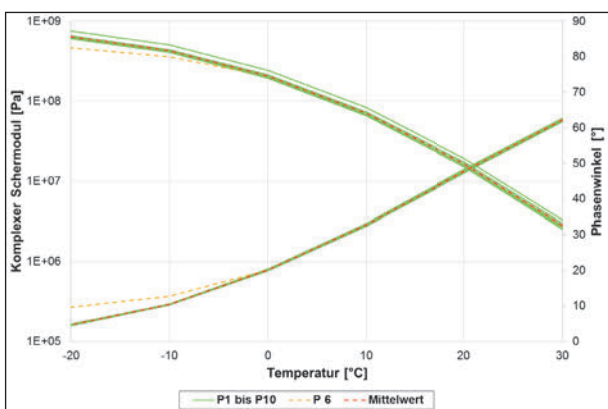


Bild 3-24: Zehnfach-Bestimmung des T-Sweeps bei 1,59 Hz mittels PP04-Geometrie inklusive Ausreißer P6 und Mittelwert des Bitumen 20/30

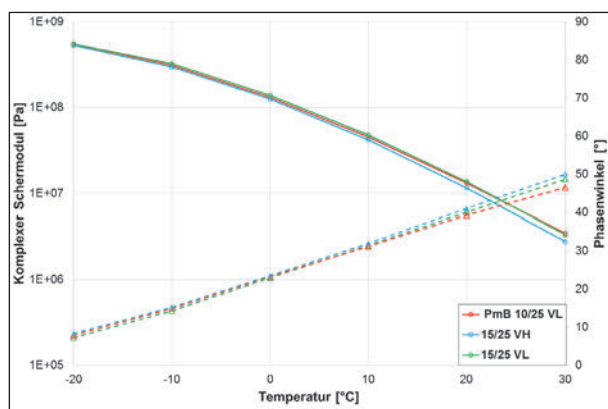


Bild 3-27: T-Sweep bei 1,59 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel mittels PP04-Geometrie

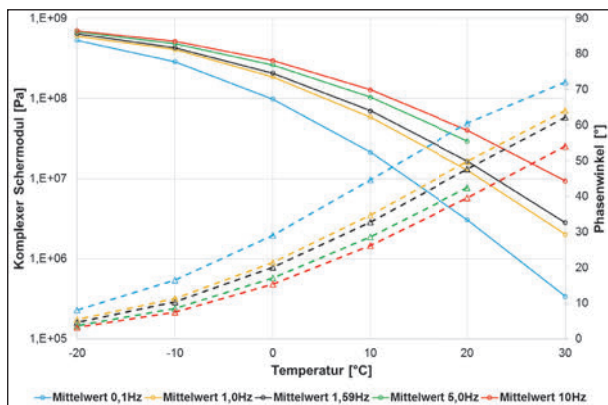


Bild 3-25: Frequenzschar aus den Mittelwerten der zehnfach-Bestimmung mittels PP04-Geometrie des Bitumen 20/30

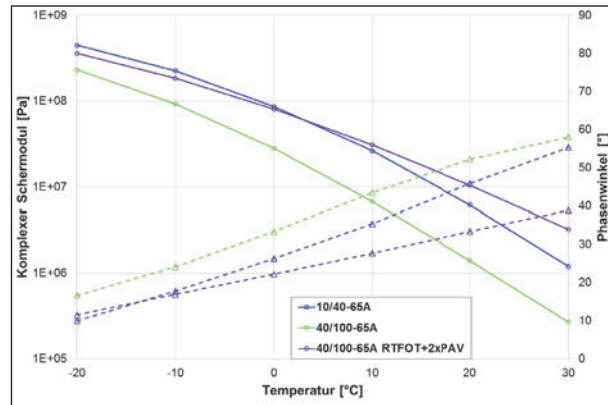


Bild 3-28: T-Sweep bei 1,59 Hz der polymermodifizierten Bindemittel mittels PP04-Geometrie

reißer eingestuft wird und nicht für die Berechnung des Mittelwertes berücksichtigt wird.

In Bild 3-25 sind die Mittelwerte der Phasenwinkel und der komplexen Schermodulen bei Frequenzvariation für das Bitumen 20/30 gegenüber der Temperatur aufgetragen. Die Messwerte mit der Prüffrequenz 5 Hz bei 30 °C wurden hierbei aufgrund eines Programmfehlers nicht aufgezeichnet. In Bild 3-26 bis Bild 3-28 sind die Mittelwerte des komple-

xen Schermoduls sowie des Phasenwinkels aller zehn untersuchten Bindemittel im untersuchten Temperaturbereich bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz dargestellt.

Die Tabelle 3-10 zeigt die Standardabweichungen des komplexen Schermoduls sowie des Phasenwinkels bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz gemittelt über den betrachteten Temperaturbereich von allen zehn Bindemitteln. Weiterhin enthält Ta-

belle 3-10 das Minimum und das Maximum der Standardabweichung im betrachteten Temperaturbereich, mit der Angabe bei welcher Temperatur diese festgestellt wurden.

3.2.5 Ergebnisse aus den DTMA-08-Versuchen

Wie im vorangegangenen Kapitel sind in Bild 3-29 die zehnfach-Bestimmung des Phasenwinkels und

des komplexen Schermoduls sowie deren Mittelwerte dargestellt. Auch hier hat die Probe P6 einen auffälligen Verlauf und wird daher als Ausreißer eingestuft. Die DMTA an den Festkörpern wurde, wie in Kapitel 3.1.4 beschrieben, nur bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz durchgeführt.

In Bild 3-30 bis Bild 3-32 sind die Mittelwerte von Phasenwinkel und komplexen Schermodul aller

Bindemittel	Standardabweichung von δ [%]			Standardabweichung von $ G^* $ [%]		
	\emptyset	Min.	Max.	\emptyset	Min.	Max.
50/70 RTFOT + 2xPAV	0,36	0,02 (0 °C)	1,15 (-20 °C)	5,49	4,84 (30 °C)	5,95 (-10 °C)
20/30	1,16	0,52 (30 °C)	3,31 (-20 °C)	6,82	6,48 (0 °C)	7,40 (30 °C)
50/70	0,27	0,02 (30 °C)	0,90 (-20 °C)	6,67	6,00 (-20 °C)	7,36 (10 °C)
160/220	0,27	0,06 (0 °C)	0,64 (-20 °C)	1,56	0,67 (-20 °C)	2,47 (30 °C)
PmB 10/25 VL	0,51	0,01 (30 °C)	1,13 (-20 °C)	4,94	4,44 (20 °C)	6,23 (-20 °C)
15/25 VL	0,54	0,03 (0 °C)	2,59 (-20 °C)	3,37	2,62 (-20 °C)	3,92 (-10 °C)
15/25 VH	0,53	0,01 (0 °C)	1,94 (-20 °C)	0,45	0,10 (30 °C)	0,63 (10 °C)
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	0,54	0,04 (30 °C)	0,84 (-10 °C)	2,27	1,43 (-20 °C)	2,79 (20 °C)
10/40-65A	0,40	0,03 (0 °C)	1,55 (-20 °C)	7,33	6,61 (-20 °C)	8,26 (-20 °C)
40/100-65A	0,33	0,12 (30 °C)	0,62 (10 °C)	0,99	0,37 (10 °C)	1,49 (-10 °C)

Tab. 3-10: Standardabweichung (\emptyset ;Min ;Max) der Untersuchungen mit der PP04-Geometrie bei 1,59 Hz

Bindemittel	Standardabweichung von δ [%]			Standardabweichung von $ G^* $ [%]		
	\emptyset	Min.	Max.	\emptyset	Min.	Max.
50/70 RTFOT + 2xPAV	0,18	0,01 (30 °C)	0,45 (10 °C)	0,62	0,03 (10 °C)	1,30 (0 °C)
20/30	3,29	0,83 (30 °C)	6,59 (-20 °C)	6,49	4,76 (10 °C)	8,23 (-10 °C)
50/70	1,66	0,51 (0 °C)	3,50 (-20 °C)	2,13	1,27 (0 °C)	2,65 (-10 °C)
PmB 10/25 VL	0,77	0,23 (20 °C)	1,53 (-20 °C)	4,46	3,36 (30 °C)	5,43 (10 °C)
15/25 VL	0,82	0,39 (30 °C)	1,31 (-20 °C)	1,47	0,03 (-10 °C)	2,42 (20 °C)
15/25 VH	0,75	0,12 (30 °C)	2,52 (-20 °C)	2,81	0,02 (10 °C)	4,99 (0 °C)
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	0,34	0,13 (-10 °C)	0,49 (30 °C)	2,53	1,28 (30 °C)	3,25 (-20 °C)
10/40-65A	0,40	0,09 (30 °C)	0,96 (-20 °C)	1,91	1,23 (-10 °C)	3,34 (20 °C)
40/100-65A	0,60	0,32 (30 °C)	0,92 (-20 °C)	5,15	4,39 (-20 °C)	5,66 (30 °C)

Tab. 3-11: Standardabweichung (\emptyset ;Min ;Max) der DMTA mit der Festkörpergeometrie

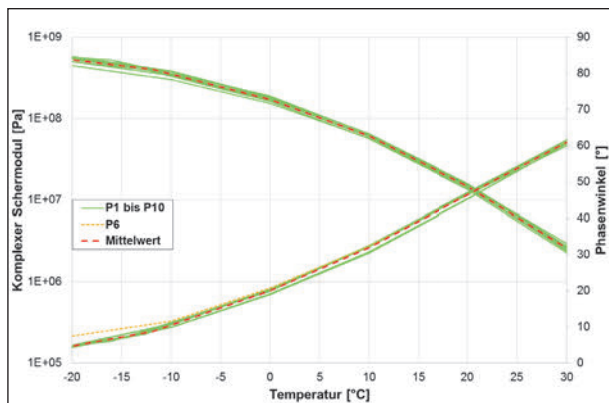


Bild 3-29: Zehnfach-Bestimmung des T-Sweeps bei 1,59 Hz an Festkörpern inklusive Ausreißer P6 und Mittelwert des Bitumen 20/30

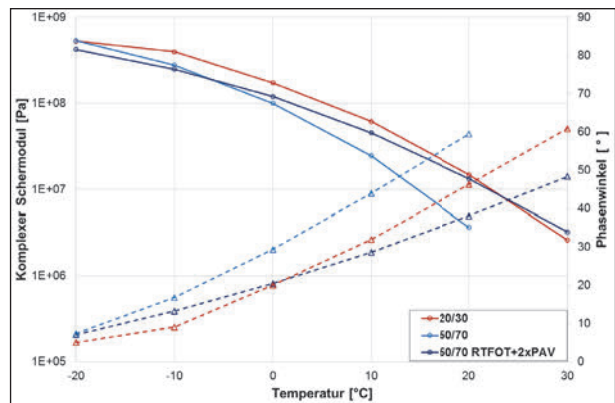


Bild 3-30: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der nicht modifizierten Bindemittel

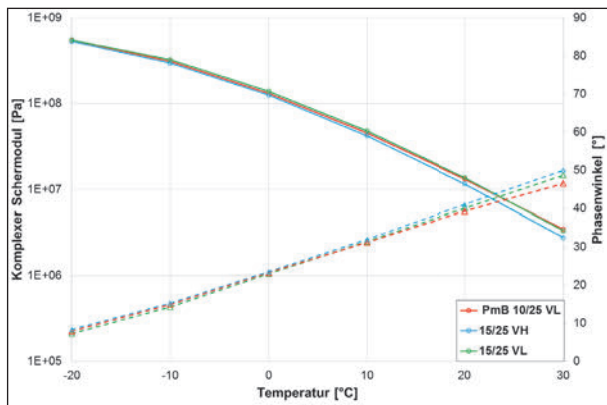


Bild 3-31: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der viskositätsveränderten Bindemittel

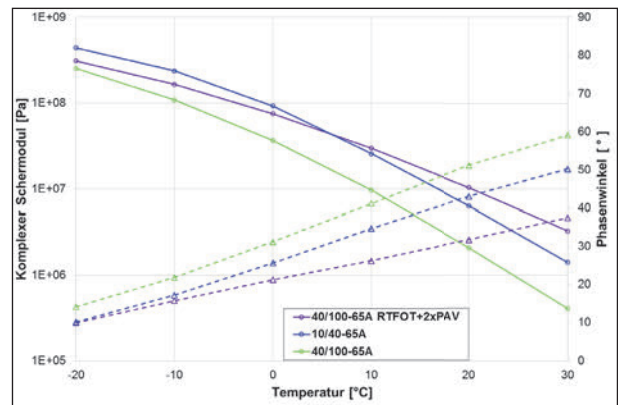


Bild 3-32: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der polymermodifizierten Bindemittel

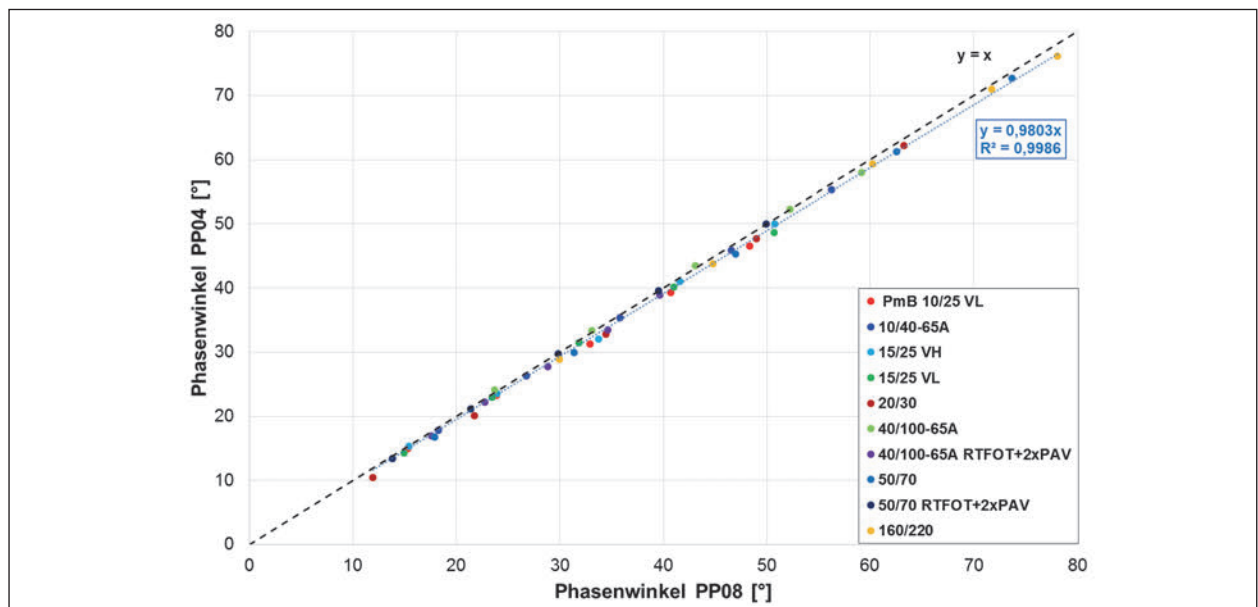


Bild 3-33: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

Bindemittel mit Ausnahme des Bitumens 160/220 dargestellt. Mit dem Bitumen 160/220 konnten trotz Anpassung der Randbedingungen, keine lagerungsbeständigen Prüfkörper hergestellt werden, daher war eine Prüfung nicht möglich. Dieselbe Problematik trat beim Standardbitumen 50/70 bei einer Prüftemperatur von 30 °C auf, daher fehlen diese Messpunkte in Bild 3-30.

In Tabelle 3-11 sind ebenfalls analog zum vorangegangenen Kapitel 3.2.4 die über den Temperaturverlauf gemittelte Standardabweichung sowie die Minima und Maxima der Standardabweichung von Phasenwinkel und komplexen Schermodul zusammengefasst.

3.3 Auswertung der Voruntersuchungen

Um die Aussagekraft der Untersuchungsergebnisse bewerten zu können, wurden die Messergebnisse mit der PP04-Messgeometrie sowie die Ergebnisse der DMTA-08-Messungen im Folgenden gegen die Ergebnisse, welche mit der PP08-Messgeometrie ermittelt wurden, aufgetragen. Bei allen drei Methoden wurden die Messwerte mit 1,59 Hz Prüffrequenz und den Temperaturen -10; 0; 10; 20 und 30 °C verwendet.

In Bild 3-33 ist der Vergleich der Phasenwinkel PP04 gegen PP08 aufgetragen. Die Steigung der Ausgleichsgerade durch den Ursprung beträgt 0,98 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,999. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse der 4 mm-Messgeo-

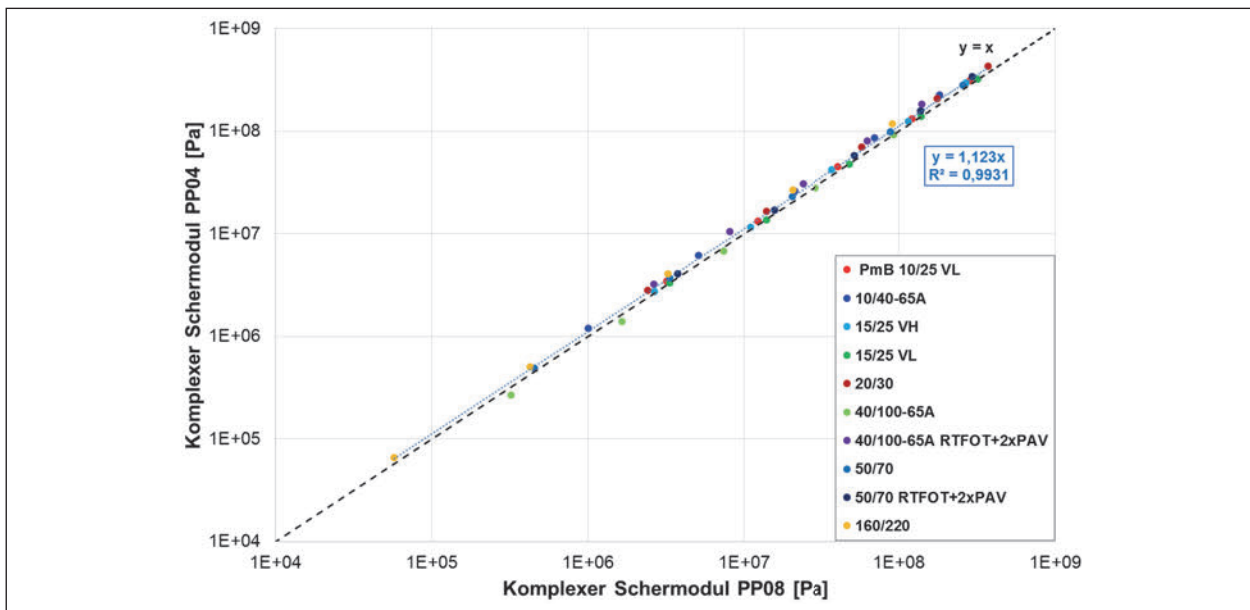


Bild 3-34: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

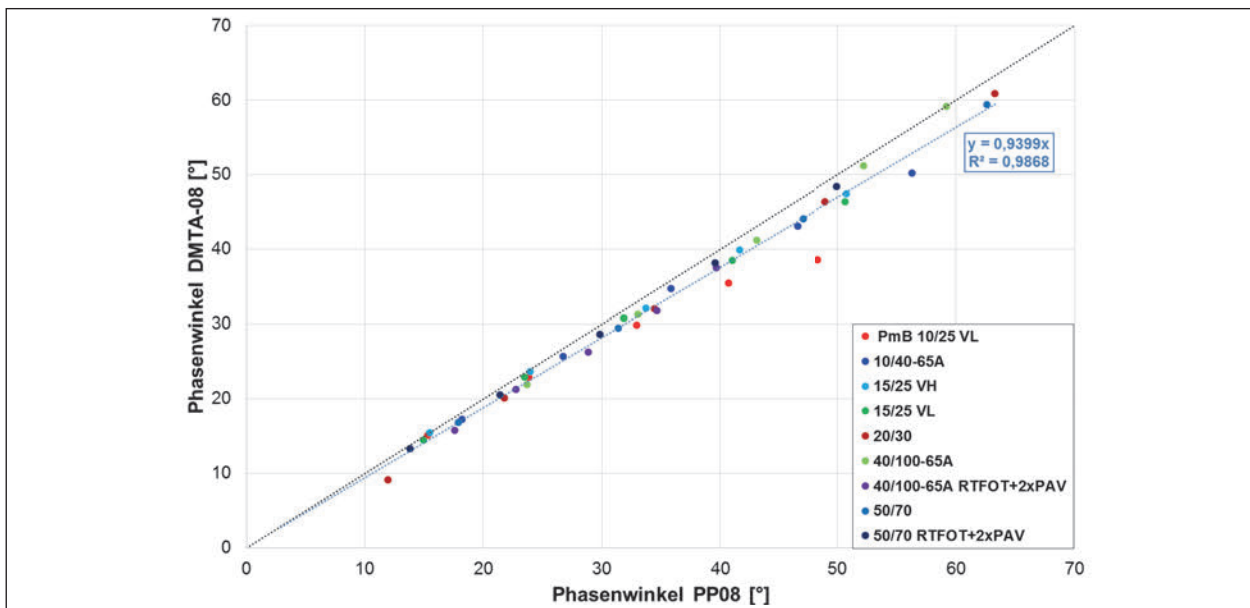


Bild 3-35: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

metrie sehr genau mit den Ergebnissen der 8 mm-Messgeometrie übereinstimmen.

In Bild 3-34 ist die Korrelation der komplexen Schermoduln mit den Messgeometrien PP04 und PP08 dargestellt. Hier beträgt die Steigung der Ausgleichsgeraden durch den Ursprung 1,12 bei einem ebenfalls sehr hohen Korrelationskoeffizienten von 0,993. Somit ist auch hier eine deutliche Korrelation gegeben, allerdings scheint ein Umrechnungsfaktor sinnvoll zu sein.

Analog zum Vorgehen mit der PP04-Messgeometrie sind in Bild 3-35 und in Bild 3-36 die Phasenwinkel und die komplexe Schermoduln der DMTA-08-Messungen gegen die Ergebnisse mit der PP08-Messgeometrie aufgetragen. Mit Korrelationskoeffizienten von 0,987 beim Phasenwinkel und 0,969 beim komplexen Schermodul, bestätigen sich die Ergebnisse aus [KORNAS, 2016]. Dies bedeutet, dass im Gegensatz zur 4 mm-Messgeometrie die komplexen Schermoduln besser übereinstimmen (Steigung 0,973) als die Phasenwinkel (Steigung 0,934).

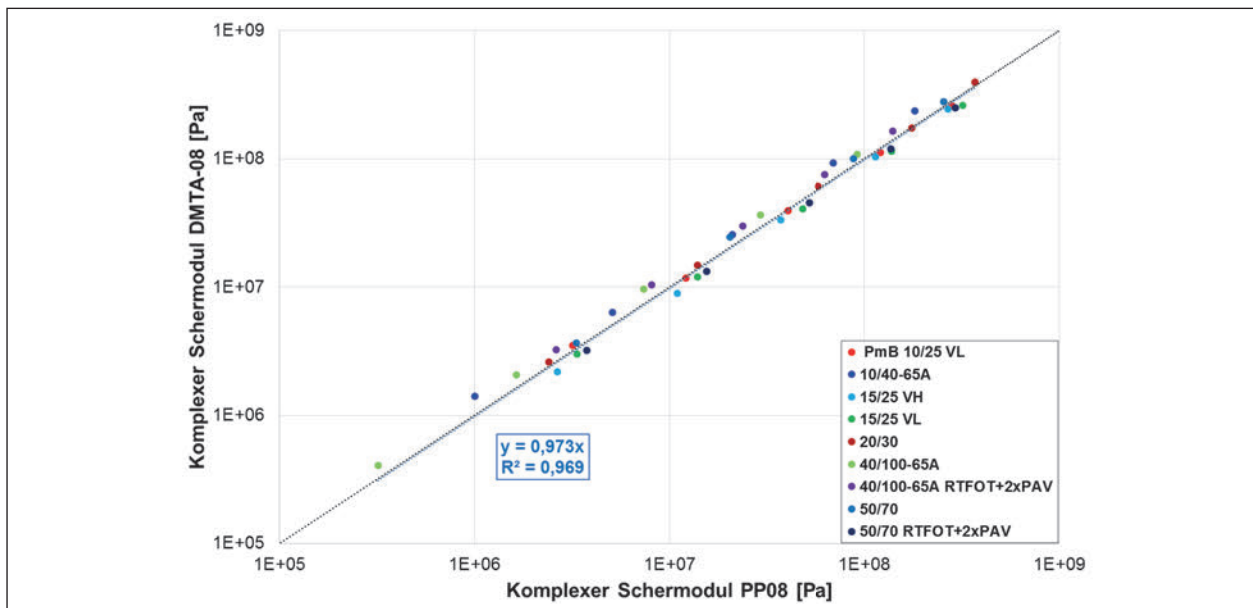


Bild 3-36: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

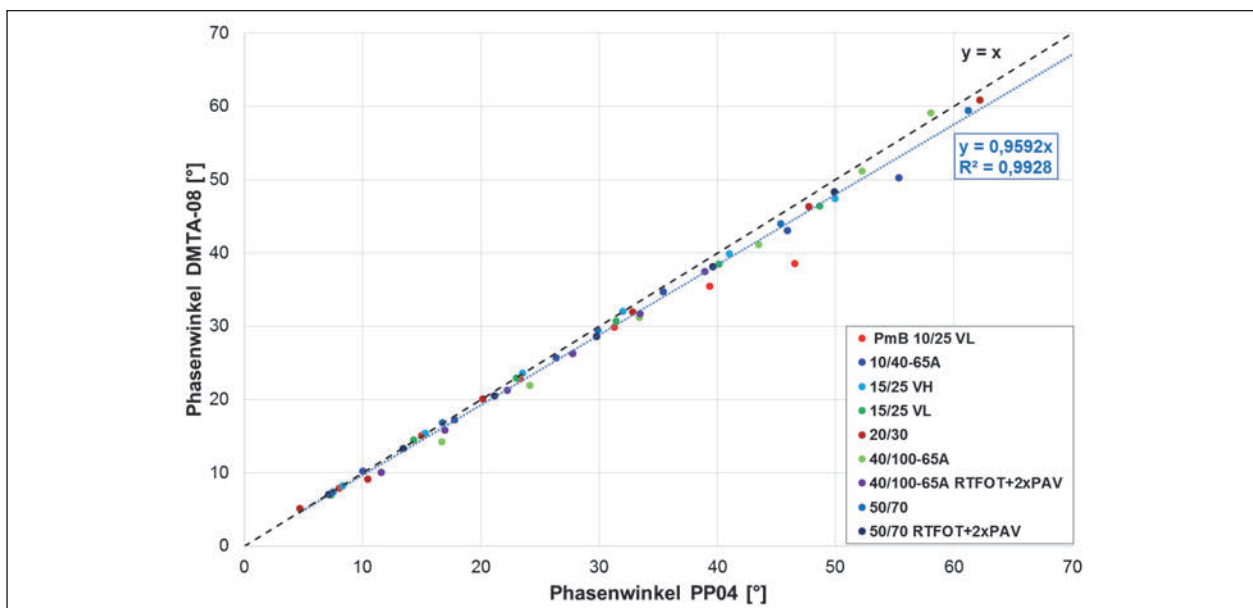


Bild 3-37: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP04-Messgeometrie bei 1,59 Hz

In Bild 3-37 und Bild 3-38 wurden die Phasenwinkel und die komplexen Schermodule von DMTA-08 und 4 mm-Messgeometrie gegeneinander aufgetragen. Auch hier bestätigten sich die vorher ermittelten sehr guten Zusammenhänge (Korrelation: 0,9928 und 0,9808).

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, ist es möglich den Spannungsabbau während des Zug-Relaxationsversuchs mittels eines komplexen Maxwell-Modells (7 parallele Maxwell-Elemente) zu beschreiben. In Bild 3-39 sind die gemessenen Verläufe zusammen mit den berechneten Verläufen abgebildet. Eine

mathematische Modellbildung kann hieraus eindeutig abgelesen werden.

In Bild 3-40 sind die gemessenen und die berechneten Restzugspannungen dargestellt und in Bild 3-41 sind die gemessenen und die berechneten Werte von REL_{ZRV} , dem Quotienten aus der Startspannung von 0,2 MPa und der Restzugspannung σ_{60} dargestellt. Je größer dieser Wert ist, desto weniger Spannung baut das Bindemittel innerhalb der Relaxationszeit ab und desto schlechter ist somit das Kälteverhalten.

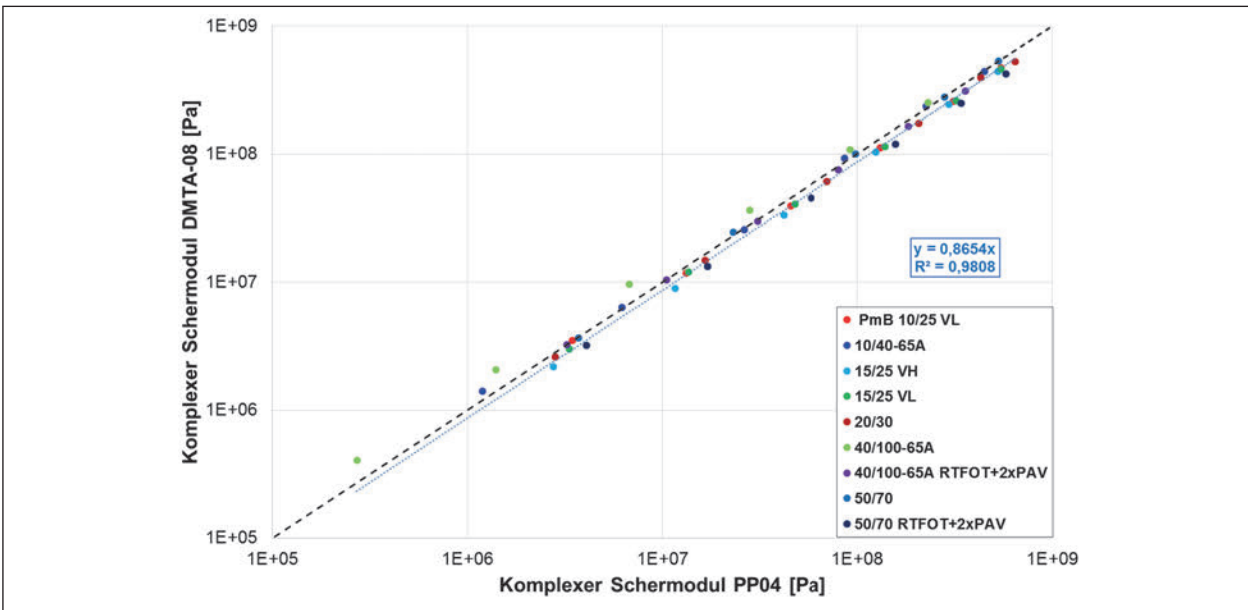


Bild 3-38: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP04-Messgeometrie bei 1,59 Hz

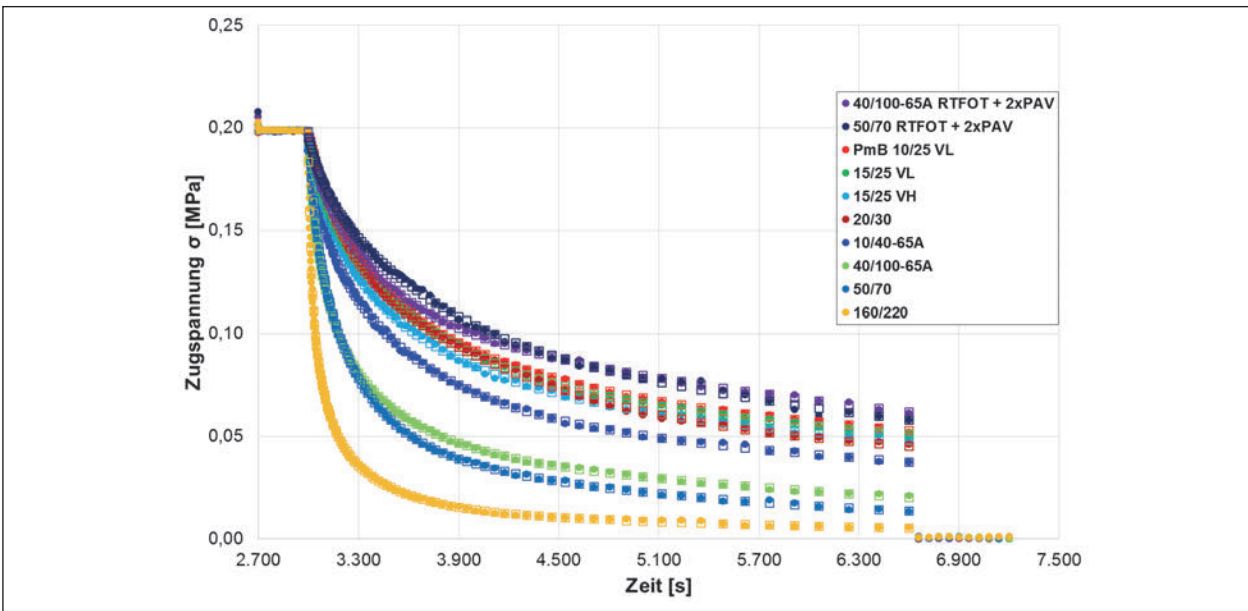


Bild 3-39: Gemessener (Punkte) und berechneter (Kästchen) Spannungsverlauf des ZRVs aller Bindemittel

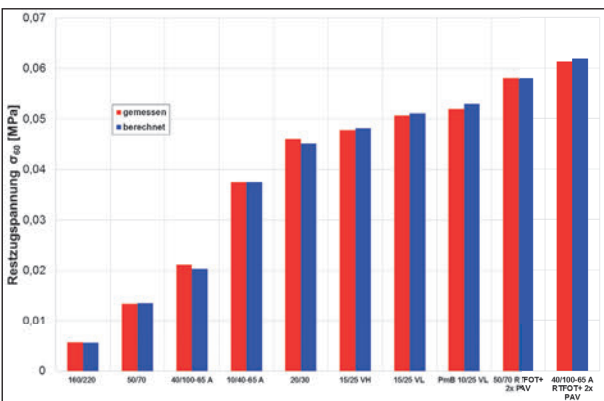


Bild 3-40: Gemessene und berechnete Restzugspannung σ_{60}

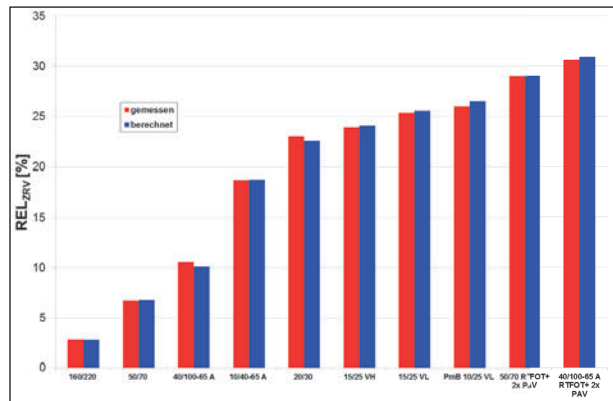


Bild 3-41: Gemessene und berechnete REL_{ZRV}

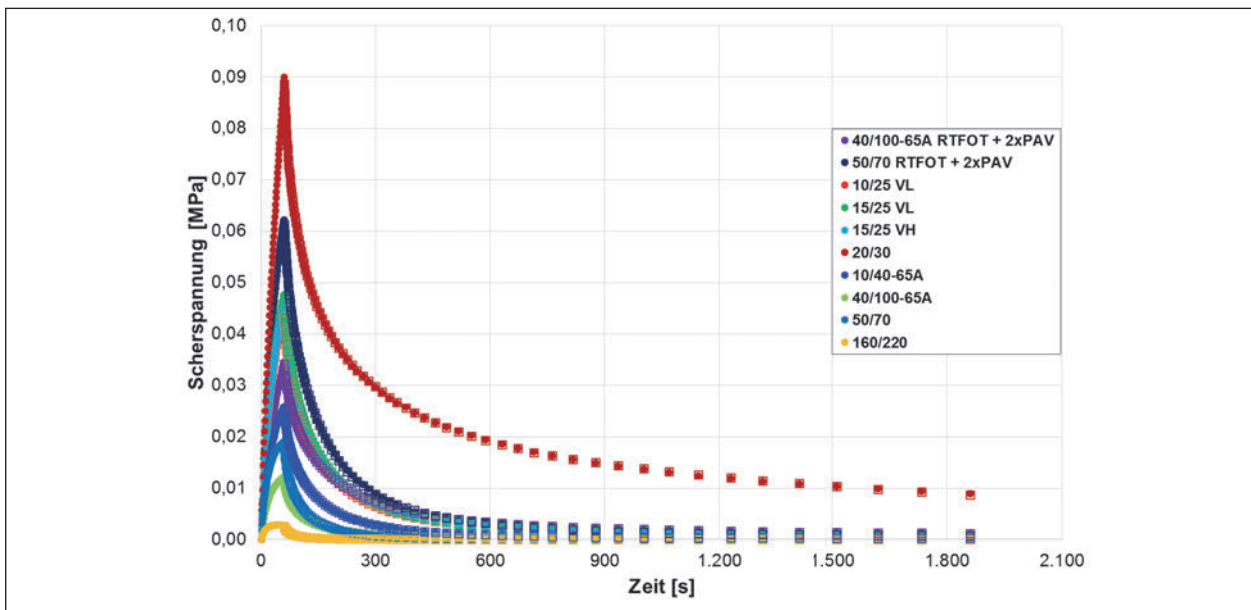


Bild 3-42: Gemessener (Punkte) und berechneter (Kästchen) Spannungsverlauf des SRVs aller Bindemittel

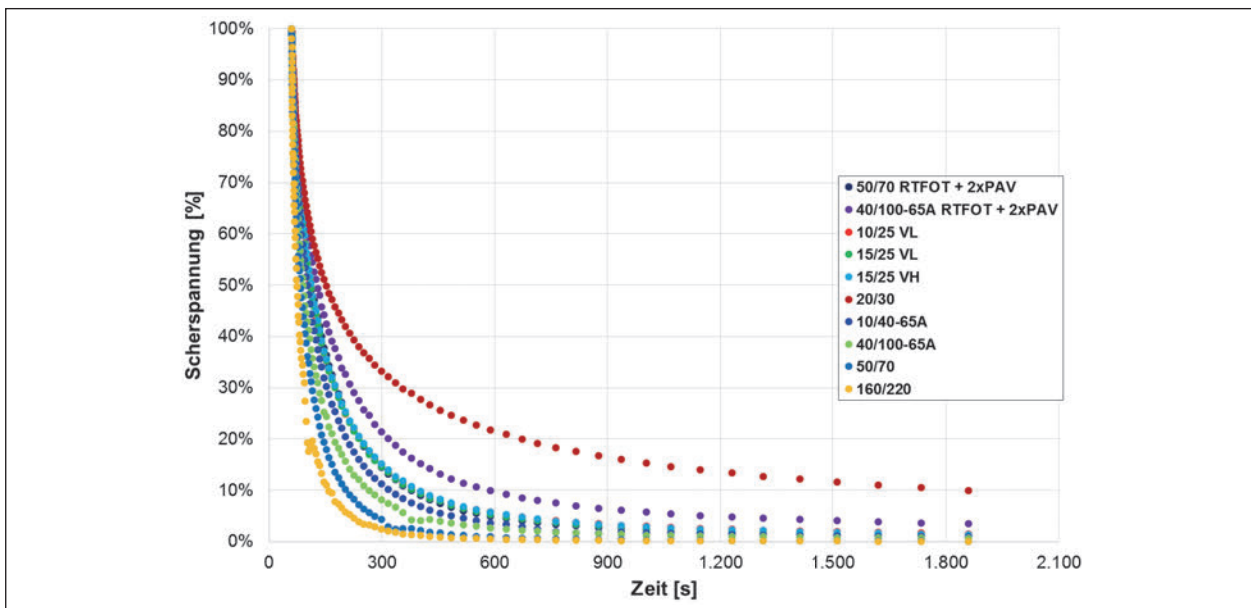


Bild 3-43: Prozentualer Spannungsverlauf aller Bindemittel während des SRV, bezogen auf die jeweilige Startspannung σ_0

Die sich in allen drei Abbildungen ergebene Reihung der Bindemittel entspricht den Erwartungen. Das weiche Bitumen 160/220 baut die Zugspannung am schnellsten und am weitesten ab. Es folgen das 50/70, das 40/100-65A, das 10/40-65A und das 20/30. Danach liegen die drei viskositätsveränderten Bindemittel (15/25-VH, 15/25-VL und PmB 10/25-VL) auf einer Höhe und die beiden gealterten Bindemittel (50/70 und 40/100-65A) bauen wie erwartet die Spannung am langsamsten und am geringsten ab. In allen drei Abbildungen wird ebenfalls deutlich, dass die berechneten und die gemessenen Kennwerte gut übereinstimmen.

Analog zum ZRV, kann der Spannungsabbau während des Scher-Relaxationsversuches ebenfalls mit Maxwell-Modellen rechnerisch beschrieben werden. In Bild 3-42 sind der gemessene und der berechnete Spannungsverlauf während des SRVs dargestellt. Auch hier bestätigt sich das gewählte, sehr exakte mathematische Modell.

In Bild 3-43 ist zur Verdeutlichung der Bindemittelreihung der prozentuale Spannungsabbau der zehn Bindemittel dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass das Bitumen 20/30 gemäß dieser Untersuchung das deutlich schlechteste Kälteverhalten aufweist.

Bindemittel	8 mm	4 mm	DMTA-08	ZRV	SRV	Ø
50/70 RTFOT + 2xPAV	9	9	9	9	5	9
20/30	10	10	10	5	10	10
50/70	4	5	4	2	2	3
160/220	1	1	*)	1	1	1
PmB 10/25 VL	7	7	7	8	8	7
15/25 VL	8	8	8	7	6	7
15/25 VH	6	6	6	6	7	6
40/100-65A RTFOT + 2xPAV	5	4	5	10	9	6
10/40-65A	3	3	3	4	4	3
40/100-65A	2	2	2	3	3	2

*) nicht durchführbar (siehe 3.2.5)

Tab. 3-12: Rangfolge des Kälteverhaltens der untersuchten Bindemittel in den vier Untersuchungsmethoden

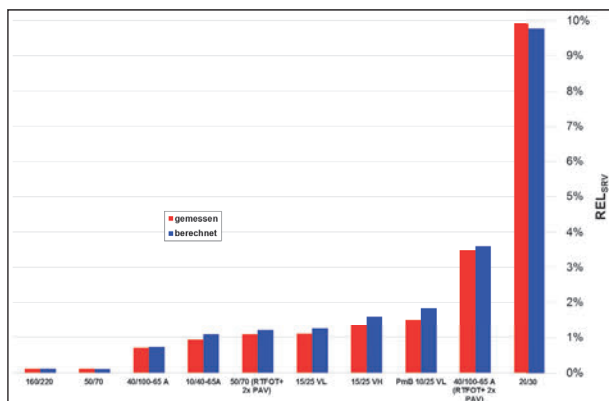


Bild 3-44: Gemessene und berechnete REL_{SRV}

Dies entspricht den Ergebnissen der drei Oszillationsversuche bei denen das Bitumen 20/30 ebenfalls den niedrigsten Phasenwinkel und das höchste komplexe Schermodul aufweist. Allerdings ist die Differenz von 5 % beim REL_{SRV} (siehe Bild 3-44) zum nächsten Bindemittel sehr groß.

Die Reihenfolge der restlichen Bindemittel entspricht mit Ausnahme des gealterten 50/70, welches gemäß SRV ein besseres Relaxationsverhalten aufweist, den Ergebnissen des ZRVs.

In Tabelle 3-12 sind die Reihenfolgen zur Bewertung der Kälteeigenschaften der Bindemittel (von 1 = gut bis 10 = schlecht) entsprechend der Versuchsergebnisse der vier verwendeten Methoden zusammengefasst. Für die Relaxationsversuche werden jeweils die REL-Kenngrößen für die Reihung herangezogen. Bei den Untersuchungen mittels DMTA-08-, 4 mm- und 8 mm-Messgeometrie wird der Phasenwinkel bei -10 °C und 1,59 Hz verwendet. Je kleiner dieser Winkel, desto schlechter ist das Kälteverhalten zu erwarten.

3.4 Allgemeine Bewertung der Voruntersuchungen

Ziel der im ersten Untersuchungspaket durchgeführten Voruntersuchungen war es, anhand der Ergebnisse der vier verwendeten Methoden zwei besonders geeignete Methoden auszuwählen, welche das Kälteverhalten der untersuchten Bindemittel ausreichend genau beschreiben.

Um diese Auswahl objektiv und transparent zu treffen, wurden folgende vier Bewertungskriterien ausgewählt:

- Handhabung im Labor
Zur Bewertung der Handhabung wurden die durchführenden Laboranten befragt, inwieweit Schwierigkeiten bei der Probekörperherstellung, -lagerung und dem Einbau der Proben bestehen.
- Zeitaufwand der Untersuchungsmethode
Bei diesem Kriterium wird die Versuchszeit zur Bewertung verwendet, je kürzer desto besser.
- Genauigkeit der Untersuchungsmethode
Zur Bewertung dieses Kriteriums werden die Mittelwerte aller berechneten prozentualen Standardabweichungen betrachtet.
- Aussagekraft der Ergebnisse und Korrelation zu bekannten Messmethoden
Die Rangfolge dieses Bewertungskriteriums ergibt sich aus der Auswertung der verschiedenen Korrelationen (Bild 3-33 bis Bild 3-38) sowie Tabelle 3-12.

Um für die weiteren Untersuchungen ein dynamisch-oszillierendes und ein statisch-kriechendes Lastregime zu vergleichen, wurden unter Berücksichtigung

sichtigung der oben genannten Bewertungskriterien für das Hauptuntersuchungsprogramm die PP04-Messgeometrie und der SRV ausgewählt.

4 Hauptuntersuchungen

Wie bereits in Bild 1-1 dargestellt, wurde dieses Forschungsprojekt in drei Untersuchungspakete unterteilt. In diesem Kapitel sind zunächst die Änderungen der Versuchsabläufe zu denen der Voruntersuchungen beschrieben. Danach folgt die Darstellung der Ergebnisse umfangreichen Untersuchungen, gefolgt von deren Auswertung. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse bewertet und das weitere Vorgehen beschrieben.

4.1 Untersuchungsprogramm der Hauptuntersuchungen

In Abstimmung mit dem Betreuerkreis des Forschungsprojektes, wurden ausgehend von den Ergebnissen der Voruntersuchungen (vgl. Kapitel 3.4) der Scher-Relaxationsversuch und das Prüfverfahren mit der 4 mm Platte-Platte-Messgeometrie als Verfahren für die Hauptuntersuchungen ausgewählt. Diese beiden Verfahren wurden bezüglich des Zeitaufwandes, der Aussagekraft der Ergebnisse und besonders der Handhabung im Labor am besten bewertet.

Abweichend von den Versuchsparametern, welche in den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 beschrieben wurden, sind für die Hauptuntersuchungen einige Anpassungen vorgenommen worden. Bei dem SRV wurde die Probenhöhe von 5 auf 2 mm reduziert, wodurch auf die speziellen Gussformen für die Probekörperherstellung verzichtet werden konnte. Wei-

terhin wurde die Belastungsphase von einer Minute auf eine Sekunde reduziert, sodass eine mögliche Überlagerung von Spannungsauf- und abbau in der Belastungsphase verhindert werden. Der in der Tabelle A1 im Anhang dargestellte Versuchsablauf für das Prüfverfahren mit der PP04-Messgeometrie wurde ebenfalls angepasst. Die Frequenzen 1,0 und 5,0 Hz wurden gestrichen, dafür wurde die Frequenz 0,01 Hz hinzugefügt und die Dauer der Temperierung von 15 auf 30 min verdoppelt. Der neue Versuchsablauf ist in Tabelle A2 ebenfalls im Anhang A dargestellt. Die Anzahl der Messpunkte sowie deren Dauer wurden so gewählt, dass die Prüfung von zwei Proben pro Tag möglich war (Gesamtdauer von 7 h 30 min, unter Beachtung eines achtstündigen Arbeitstages).

Die vorgenommenen Anpassungen an den Versuchsparametern der beiden Versuche, wurden mittels Amplitudentests überprüft, um sicherzustellen, dass die Prüfungen der Proben im LVE-Bereich durchgeführt werden. Weiterhin wurde eine Gussform aus PTFE für die Herstellung der 4 mm-Probekörper getestet (siehe Bild 4-1 links), um den Trimmvorgang – der in verschiedenen Literaturquellen als kritisch bezeichnet wurde – zu vermeiden. [Sui et al., 2011] Zur Herstellung der Proben wurde hierbei die Gussform auf die im DSR eingebaute Peltier-Einheit aufgesetzt, sodass ein Hohlraum mit der gewünschten Probekörperhöhe von 1,75 mm entstand (siehe Bild 4-1 rechts).

Nach dem Befüllen dieses Hohlraums mit Bindemittel wird der ggf. vorhandene Überstand entfernt und der obere Stempel auf Messspalthöhe heruntergefahren, so dass sich zwischen Probe und Stempel ein Verbund herstellt. Auch bei der Probekörperherstellung im DSR wurden die in den [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] festgeschriebenen Mindestlagerdauern eingehalten, sodass bei der Untersuchung

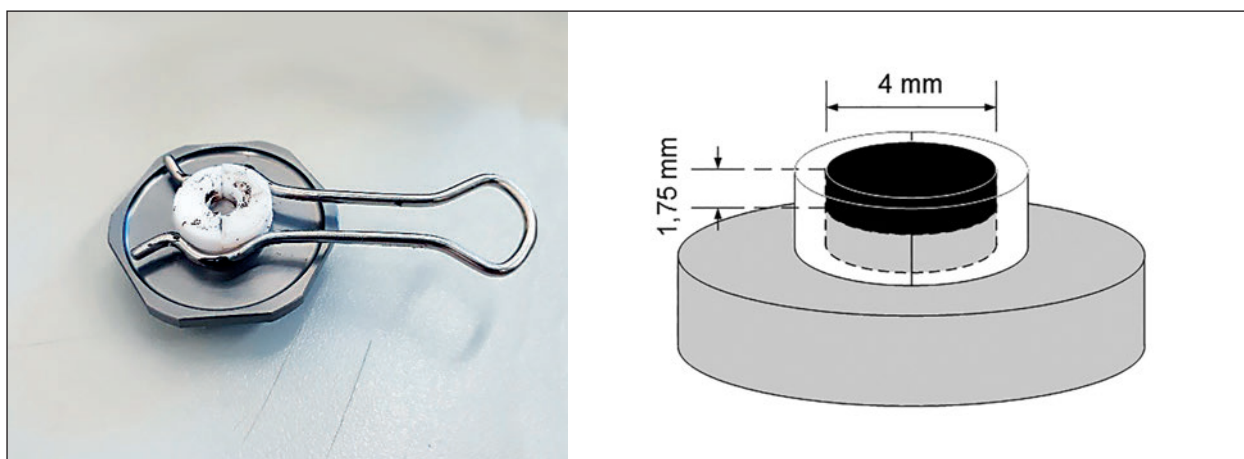


Bild 4-1: Foto (links) und Skizze der 4 mm-Gussform aus PTFE (rechts)

Bezeichnung	Hersteller	Alterung	Bezeichnung	Hersteller	Alterung
Gerichtsgutachten 1-1 (GG1-1)	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre	Praxisstrecke 02	n.b.	Liegedauer ca. 15 Jahre
Gerichtsgutachten 1-2 (GG1-2)	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre	Praxisstrecke 03	n.b.	Liegedauer ca. 18 Jahre
Gerichtsgutachten 1-3 (GG1-3)	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre	Praxisstrecke 04	n.b.	Liegedauer ca. 20 Jahre
Gerichtsgutachten 1-4 (GG1-4)	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre	Praxisstrecke 05	n.b.	Liegedauer ca. 15 Jahre
Gerichtsgutachten 1-5 (GG1-5)	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre	Praxisstrecke 06	n.b.	Liegedauer ca. 9 Jahre
Gerichtsgutachten 2-1 (GG2-1)	n.b.	Liegedauer ca. 4 Jahre	25/55-55A	A	
Gerichtsgutachten 2-2 (GG2-2)	n.b.	Liegedauer ca. 4 Jahre	25/55-55A	A	RTFOT
Gerichtsgutachten 2-3 (GG2-3)	n.b.	Liegedauer ca. 4 Jahre	25/55-55A	A	2x RTFOT
Gerichtsgutachten 2-4 (GG2-4)	n.b.	Liegedauer ca. 4 Jahre	25/55-55A	A	RTFOT+PAV
Gerichtsgutachten 2-5 (GG2-5)	n.b.	Liegedauer ca. 4 Jahre	25/55-55A	A	RTFOT+2xPAV
Gerichtsgutachten 3-1 (GG3-1)	n.b.	Liegedauer ca. 7 Jahre	30/45	A	
Gerichtsgutachten 3-2 (GG3-2)	n.b.	Liegedauer ca. 7 Jahre	30/45	A	RTFOT
Gerichtsgutachten 3-3 (GG3-3)	n.b.	Liegedauer ca. 7 Jahre	30/45	A	2x RTFOT
Gerichtsgutachten 3-4 (GG3-4)	n.b.	Liegedauer ca. 7 Jahre	30/45	A	RTFOT+PAV
Gerichtsgutachten 3-5 (GG3-5)	n.b.	Liegedauer ca. 7 Jahre	30/45	A	RTFOT+2xPAV
50/70 B	B		15/25 VL	B	RTFOT+2xPAV
50/70 D	D		15/25 VH	C	RTFOT+2xPAV
Praxisstrecke 01	n.b.	Liegedauer ca. 20 Jahre	Praxisstrecke 07-2	n.b.	72h BAV*)
			Praxisstrecke 08-2	n.b.	72h BAV
			Praxisstrecke 09-1	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre
			Praxisstrecke 09-2	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre
			Praxisstrecke 09-3	n.b.	Liegedauer ca. 6 Jahre

*) Bochumer Alterungsverfahren gemäß [CETINKAYA, 2011] / n.b. = nicht bekannt

Tab. 4-1: Zusätzlich verwendete Bindemittelsorten in den Hauptuntersuchungen

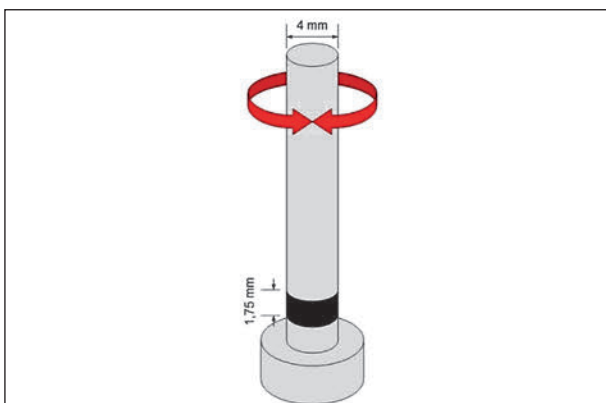


Bild 4-2: Schema der Messung mit einer PP04-Messgeometrie von polymermodifizierten Bindemitteln das Gerät 12 h blockiert werden würde. Ein analoges Vorgehen, allerdings mit einem Spaltabstand von 3 mm und einer Silikonform, wurde parallel zu diesem Forschungsprojekt am Institut für Straßenwesen der Technischen Universität Braunschweig (ISBS)

4 mm-Messgeometrie	
Messsystem	4 mm-Platte/Platte (PP04)
Prüfart	weggesteuert/oszillierend
Prüftemperaturbereich	Von 30 °C bis -20 °C
Prüffrequenz	0,01 Hz bis 10 Hz
Zeit der Temperierungen	30 min
Probendurchmesser	4 mm
Spaltbreite zu Beginn des Versuchs	1,75 mm
Vorgegebene Deformation	0,05 % bis 0,75 %
Dauer der Belastungsphase	100 bis 2.250 sec

Tab. 4-2: Angepasste Versuchsparameter der Messung mit einer PP04-Messgeometrie

mit der Standardmethode gemäß [FARRAR et al., 2015] in einer Untersuchung verglichen. Auch hier waren die Unterschiede zwischen den Ergebnisse der untersuchten Einbaumethoden vernachlässigbar gering. [WANG et al., 2019]

Neben dem Trimmen wurde auch der Einfluss der Messpunktdauer untersucht. Hierzu wurden einige Bindemittel unterschiedlicher Art und Sorte, mit und ohne Vorgabe der Messpunktdauer geprüft. Die Messpunktdauer setzt sich aus der Einregelzeit (Zeit die das DSR benötigt, um die programmierte Schwingung einzustellen) und der Mittelungszeit (tatsächliche Messzeit) zusammen. Ohne Vorgabe einer Messpunktdauer, stellt sich das DSR in Abhängigkeit der vorgegebenen Deformation, Frequenz und des zu prüfenden Materials selber ein. Bei Vorgabe einer Messpunktdauer wird diese Einregelzeit begrenzt, sodass es zu Abweichungen beim ersten Messpunkt kommen kann.

Die Prüfung mit der 4 mm Platte-Platte-Messgeometrie im Verlauf der Hauptuntersuchungen wurden auf Grundlage dieser durchgeführten Test-Versuche ohne Gussform aber mit Zeitvorgabe durchgeführt. In den Tabellen 4-2 und 4-3 sind die in UP2 angewendeten Versuchsparameter der beiden Versuche zusammengefasst.

Zu Beginn der Hauptuntersuchungen wurden die zehn Bindemittel aus dem ersten Untersuchungs-

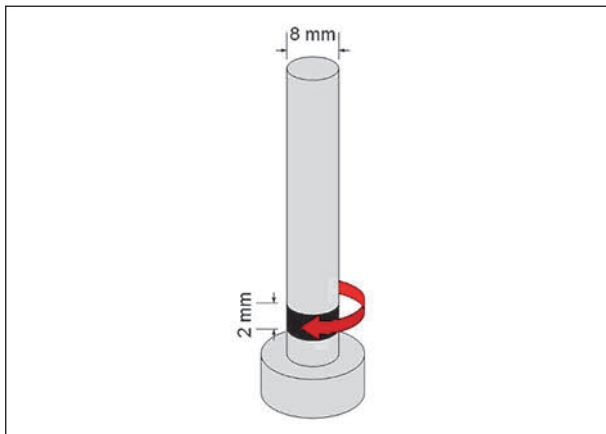


Bild 4-3: Neues Schema des SRV

Scher-Relaxationsversuch	
Messsystem	8 mm-Platte/Platte (PP08)
Prüfart	weggesteuert/rotierend
Prüftemperatur	-10 °C
Zeit der Temperierung	45 min
Probendurchmesser	8 mm
Spaltbreite zu Beginn des Versuchs	2 mm
Vorgegebene Deformation	0,1 %
Dauer der Belastungsphase	1 sec
Dauer der Relaxationsphase	30 min
Dauer der Retardationsphase	30 min

Tab. 4-3: Angepasste Versuchsparameter des Scher-Relaxationsversuchs für UP2

programm noch einmal mit diesen veränderten Versuchsbedingungen geprüft. Danach wurden 40 zusätzliche Bindemittel, welche in Tabelle 4-1 aufgelistet sind, untersucht. Zu diesen Bindemitteln gehören aus Schadstellen rückgewonnene Bindemittel (Gerichtsgutachten), rückgewonnene Bindemittel aus Praxisstrecken mit Liegedauern von mehr als 20 Jahren (Praxisstrecken 1 bis 6), mehrfach im Labor gealterte Lieferbitumen (25/55-55A und 30/45) sowie mit Rejuvenatoren verjüngte rückgewonnene Bindemittel (Praxisstrecken 7 bis 9).

4.2 Ergebnisse der Hauptuntersuchungen

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurden die Versuchsrandbedingungen des SRVs und der Untersuchung mit der PP04-Messgeometrie aus den Voruntersuchungen in den Hauptuntersuchungen angepasst. Darüber hinaus wurden der Trimmeinfluss sowie der Einfluss der Messpunktdauervorgabe untersucht. In Bild 4-4 sind beispielhaft die Ergebnisse

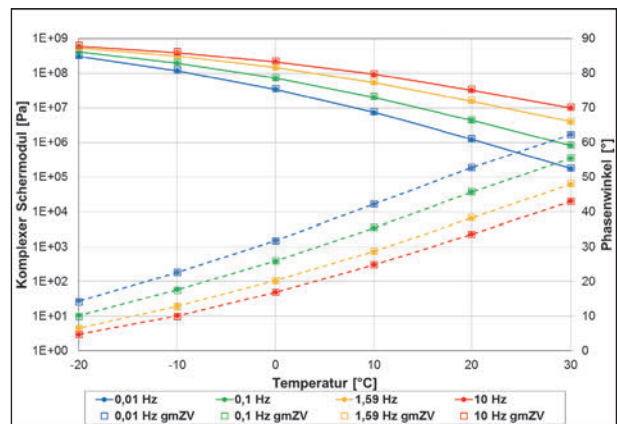


Bild 4-4: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen mittels PP04 mit Zeitvorgabe (gmZV) und ohne eines gealterten (RTFOT+2xPAV) 50/70 Straßenbaubitumens

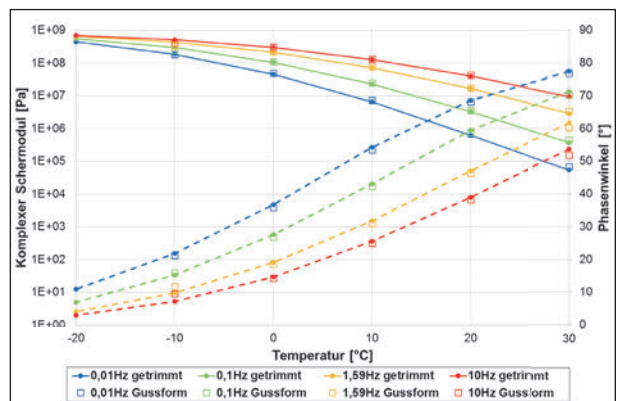


Bild 4-5: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen eines 20/30 Straßenbaubitumens mittels PP04 getrimmt und mit Gussform

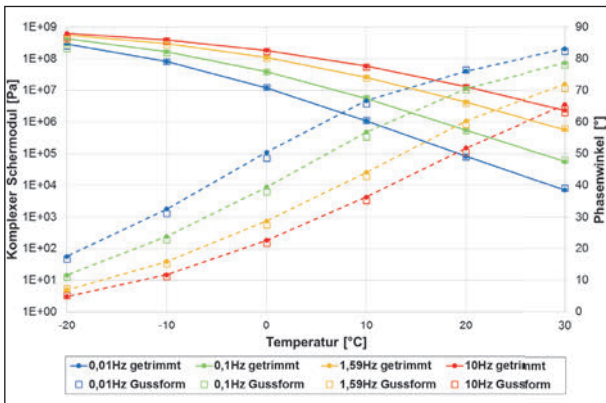


Bild 4-6: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen eines 50/70 Straßenbaubitumens mittels PP04 getrimmt und mit Gussform

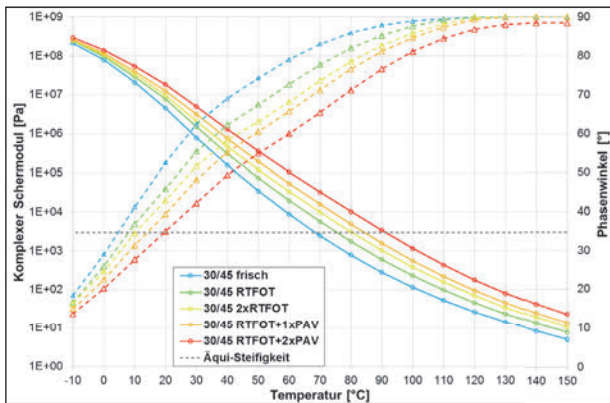


Bild 4-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines Straßenbaubitumens 30/45 (inklusive Äqui-StEIFigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

der Untersuchungen eines einfach RTFOT und doppelt PAV gealterten 50/70 Straßenbaubitumens getrimmt mit Zeitvorgabe (gmZV) und ohne dargestellt. In Bild 4-5 und Bild 4-6 sind die Ergebnisse von Untersuchungen mit Gussform und ohne Gussform an den Beispielen eines 20/30 und eines 50/70 Straßenbaubitumens vergleichend dargestellt (jeweils Doppelbestimmung). Bei der Verwendung der Gussform kam es bei tiefen Temperaturen zum Verlust des Verbundes zwischen Probe und Messgeometrie, sodass zum Beispiel in Bild 4-5 die Messreihe des 20/30 mit Gussform lediglich bis -10 °C aufgetragen werden konnte.

4.2.1 Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)

Analog zum Vorgehen in den Voruntersuchungen wurde zu Beginn der Hauptuntersuchungen an jedem Bindemittel ein Temperatur-Sweep (Doppelbestimmung) von -10 °C bis 150 °C durchgeführt und anhand der Ergebnisse die Applikationstemperatur zur Äquivalenzsteifigkeit von 3.000 Pa bestimmt. In

Bindemittelbezeichnung	Applikationstemperatur [°C]
Gerichtsgutachten 1-1 (GG1-1)	85
Gerichtsgutachten 1-2 (GG1-2)	85
Gerichtsgutachten 1-3 (GG1-3)	85
Gerichtsgutachten 1-4 (GG1-4)	85
Gerichtsgutachten 1-5 (GG1-5)	85
Gerichtsgutachten 2-1 (GG2-1)	125
Gerichtsgutachten 2-2 (GG2-2)	130
Gerichtsgutachten 2-3 (GG2-3)	105
Gerichtsgutachten 2-4 (GG2-4)	130
Gerichtsgutachten 2-5 (GG2-5)	95
Gerichtsgutachten 3-1 (GG3-1)	75
Gerichtsgutachten 3-2 (GG3-2)	95
Gerichtsgutachten 3-3 (GG3-3)	95
Gerichtsgutachten 3-4 (GG3-4)	80
Gerichtsgutachten 3-5 (GG3-5)	100
50/70 B	60
50/70 D	60
Praxisstrecke 01	75
Praxisstrecke 02	80
Praxisstrecke 03	80
Praxisstrecke 04	80
Praxisstrecke 05	85
Praxisstrecke 06	80
25/55-55A	70
25/55-55A RTFOT	75
25/55-55A 2xRTFOT	80
25/55-55A RTFOT+PAV	90
25/55-55A RTFOT+2xPAV	95
30/45	70
30/45 RTFOT	75
30/45 2xRTFOT	80
30/45 RTFOT+PAV	85
30/45 RTFOT+2xPAV	90
15/25 VL RTFOT+2xPAV	95
15/25 VH RTFOT+2xPAV	95
Praxisstrecke 07-1 72 h BAV	90
Praxisstrecke 08-1 72 h BAV	90
Praxisstrecke 09-1	85
Praxisstrecke 09-2	110
Praxisstrecke 09-3	125

Tab. 4-4: Applikationstemperaturen der 40 zusätzlichen Bindemittel für die Hauptuntersuchungen

Bild 4-7 sind beispielhaft die unterschiedlichen Alterungsstufen eines 30/45 inklusive der Äquivalenzsteifigkeit von 3.000 Pa dargestellt. Die Temperatur-Sweeps der 45 weiteren Bindemittel sind in den Bildern A-1 bis A-10 im Anhang dargestellt.

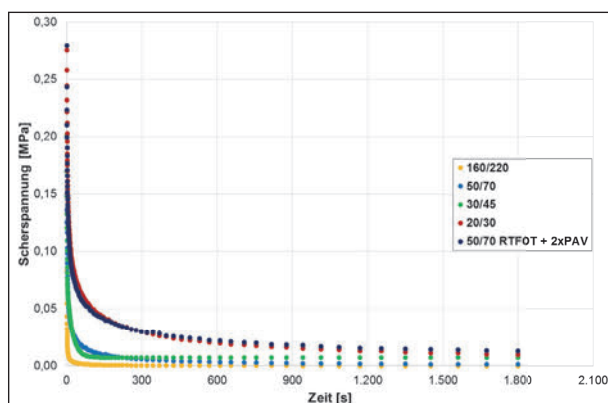


Bild 4-8: SRV der nicht modifizierten Bindemittel

In Tabelle 4-4 sind die ermittelten Applikationstemperaturen aller 40 in den Hauptuntersuchungen zusätzlich verwendeten Bindemittel zusammengefasst, die zwischen 60 °C und 130 °C liegen. Die Applikationstemperaturen der bereits während der Voruntersuchungen verwendeten Bindemittel sind in den Tabellen 3-5 bis 3-7 zusammengefasst.

4.2.2 Ergebnisse aus den SRV

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse des SRVs zusammengefasst. Hierbei handelt es sich, analog zu den Darstellungen in Kapitel 3.2.3, um die Mittelwerte der Scherspannungsverläufe. Aufgrund der Verkürzung der Belastungsphase auf eine Sekunde, wird auf deren Darstellung verzichtet und nur noch der Spannungsverlauf während der Relaxationsphase dargestellt. In Bild 4-8 sind beispielhaft die Verläufe der nicht modifizierten Bindemittel dargestellt. Die Verläufe der 45 weiteren Bindemittel sind im Anhang in den Bildern A-11 bis A-20 dargestellt. Auch hier ist eine einheitliche Skalierung der Ordinatenachse, ohne Verlust der Möglichkeit die verschiedenen Bindemittel zu differenzieren, nicht möglich.

Das über den Kennwert REL_{SRV} errechnete Relaxationsvermögen ist der Tabelle 4-5 zu entnehmen.

Die statistischen Kenngrößen sind ebenfalls im Anhang in Tabelle A3 dargestellt.

4.2.3 Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Untersuchungen mit der PP04 dargestellt. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurden die Bindemittel mittels kombiniertem Temperatur- und Frequenz-Sweep untersucht. Zur Übersichtlichkeit sind in Bild 4-9 beispiel-

Bindemittelbezeichnung	REL_{SRV} [%]
Gerichtsgutachten 1-1 (GG1-1)	4,88
Gerichtsgutachten 1-2 (GG1-2)	4,12
Gerichtsgutachten 1-3 (GG1-3)	4,96
Gerichtsgutachten 1-4 (GG1-4)	5,87
Gerichtsgutachten 1-5 (GG1-5)	4,21
Gerichtsgutachten 2-1 (GG2-1)	12,83
Gerichtsgutachten 2-2 (GG2-2)	13,20
Gerichtsgutachten 2-3 (GG2-3)	6,99
Gerichtsgutachten 2-4 (GG2-4)	13,90
Gerichtsgutachten 2-5 (GG2-5)	7,81
Gerichtsgutachten 3-1 (GG3-1)	3,08
Gerichtsgutachten 3-2 (GG3-2)	5,42
Gerichtsgutachten 3-3 (GG3-3)	8,95
Gerichtsgutachten 3-4 (GG3-4)	2,44
Gerichtsgutachten 3-5 (GG3-5)	5,70
50/70 B	0,90
50/70 D	0,35
Praxisstrecke 01	1,28
Praxisstrecke 02	2,94
Praxisstrecke 03	3,30
Praxisstrecke 04	3,16
Praxisstrecke 05	4,64
Praxisstrecke 06	5,13
25/55-55A	0,78
25/55-55A RTFOT	1,19
25/55-55A 2xRTFOT	1,38
25/55-55A RTFOT+PAV	2,60
25/55-55A RTFOT+2xPAV	3,69
30/45	0,90
30/45 RTFOT	1,54
30/45 2xRTFOT	2,74
30/45 RTFOT+PAV	3,25
30/45 RTFOT+2xPAV	4,73
15/25 VL RTFOT+2xPAV	7,55
15/25 VH RTFOT+2xPAV	8,97
Praxisstrecke 07-1 72 h BAV	3,36
Praxisstrecke 08-1 72 h BAV	4,53
Praxisstrecke 09-1	3,27
Praxisstrecke 09-2	11,21
Praxisstrecke 09-3	19,93

Tab. 4-5: Relaxationsvermögen der 40 zusätzlichen Bindemittel für die Hauptuntersuchungen

haft an einem 50/70 RTFOT + PAV die kompletten Frequenzscharen des Phasenwinkels und des komplexen Schermoduls dargestellt. In den darauffolgenden Diagrammen Bild 4-10 und Bild 4-11 sowie den restlichen 42 im Anhang dargestellten Verläufen (Bild A21 bis Bild A29) ist jeweils nur die Frequenz 0,01 Hz dargestellt, da diese nach Auffas-

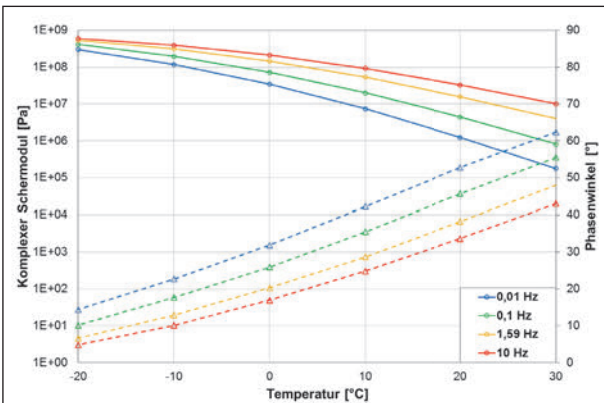


Bild 4-9: Frequenzscharen der PP04-Untersuchung des gealterten Bitumens 50/70 (50/70 RTFOT+2xPAV)

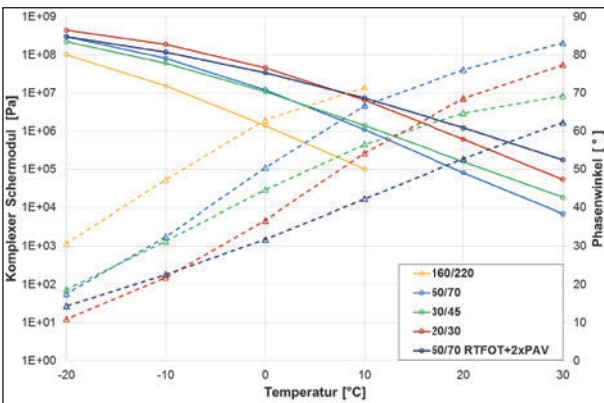


Bild 4-10: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der nicht modifizierten Bindemittel mittels PP04

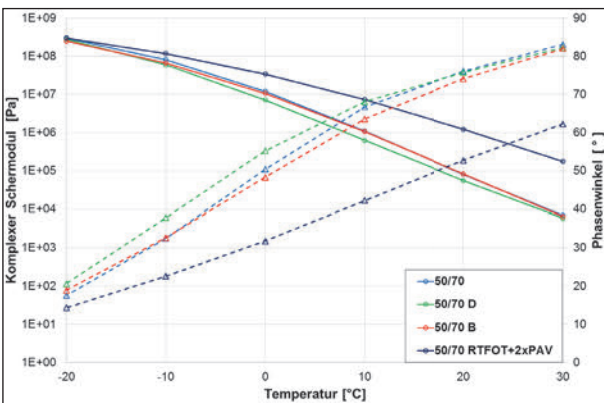


Bild 4-11: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten mittels PP04

sung des Forschungsnehmers in Bezug auf das Kälteverhalten von Bindemitteln, die maßgebende – weil niedrigste und somit die mit der in situ-Belastung vergleichbarste Frequenz – ist. Bei den dargestellten Graphen handelt es sich jeweils um den Mittelwert einer Doppelbestimmung, welche die in den Arbeitsanleitungen der FGSV für Untersuchungen mit dem DSR vorgegebenen Genauigkeiten ($\Delta\delta \leq 1^\circ$ und $\Delta|G^*| < 10\%$) einhalten. [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)]

In Bild 4-10 sind die T-Sweeps mit einer Frequenz von 0,01 Hz der nicht modifizierten Bindemittel, welche bereits in UP1 untersucht worden sind, dargestellt. Bei der neu gewählten Prüffrequenz 0,01 Hz kann das weiche Bindemittel 160/220 nur noch bis 10 °C mit der PP04 untersucht werden, bei darüber liegenden Temperaturen ist eine Prüfung im LVE-Bereich mit dieser Geometrie nicht mehr möglich.

Die Prüfung des Bindemittels 50/70, welches die nächstweichere Bindemittelsorte in der Hauptuntersuchung war, konnte durchgeführt werden. In Bild 4-11 sind somit T-Sweeps bei 0,01 Hz des Bindemittels 50/70 von verschiedenen Herstellern dargestellt.

4.3 Auswertung der Hauptuntersuchungen

Die Überprüfungen der geänderten Versuchsrandbedingungen, die im Vorfeld der Hauptuntersuchungen durchgeführt wurden und deren Ergebnisse sind beispielhaft in den Bildern Bild 4-4 bis Bild 4-6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Vorgabe der Messpunktdauer keinen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Allerdings verlängerte sich die Versuchsdauer um bis zu 1,5 h, wenn keine Messpunktdauer vorgegeben wurde. Dies führte dazu, dass nur eine Probe am Tag geprüft werden konnte, was eine nicht einkalkulierte Verlängerung der Laborbearbeitungszeiten zu Folge gehabt hätte. Aus diesem Grunde wurden die Untersuchungen mit Vorgabe der Messpunktdauer durchgeführt. Des Weiteren ist beim Vergleich der Ergebnisse der getrimmten Proben und bei Verwendung der Gussform ebenfalls kein maßgebender Einfluss auf die Ergebnisse zu erkennen. Allerdings kam es bei Verwendung der Gussform wiederholt zum Verlust des Verbundes zwischen Probe und Messgeometrie. Aus diesem Grunde und unter der Voraussetzung, dass bei einer Doppelbestimmung die Wiederholpräzision gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] eingehalten werden konnte, wurden alle weiteren Proben getrimmt.

Wie bei der Auswertung der Ergebnisse aus dem ersten Untersuchungspaket, werden zunächst der Phasenwinkel δ bzw. der komplexe Schermodul $|G^*|$, welche mit der PP04 bestimmt wurden, den Ergebnissen, welche mit der PP08 bestimmt wurden gegenübergestellt. In Bild 4-12 und Bild 4-13 sind die Ergebnisse bei einer Frequenz von 1,59 Hz über den Temperaturbereich von -10 bis 30 °C dar-

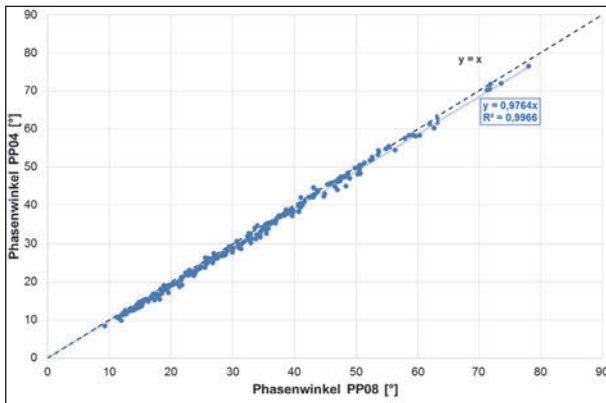


Bild 4-12: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

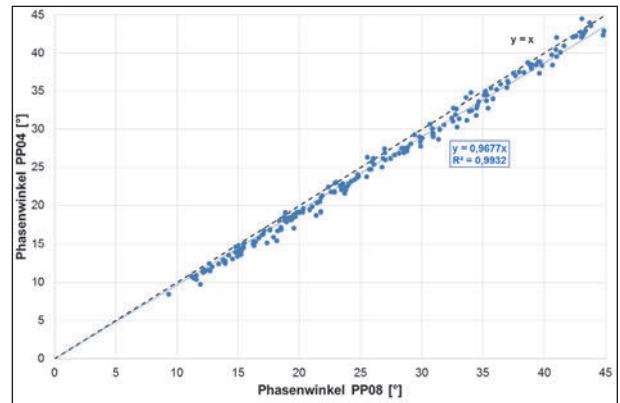


Bild 4-14: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln bis 45° ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

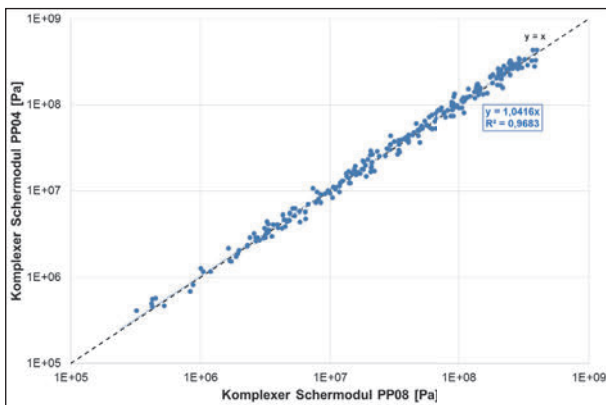


Bild 4-13: Korrelation zwischen den komplexen Schermodul ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

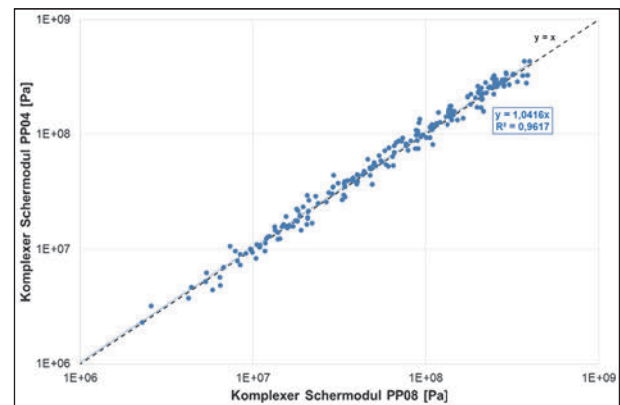


Bild 4-15: Korrelation zwischen den komplexen Schermodul bis zu einem Phasenwinkel von 45° ermittelt mit der PP04 und der PP08 im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

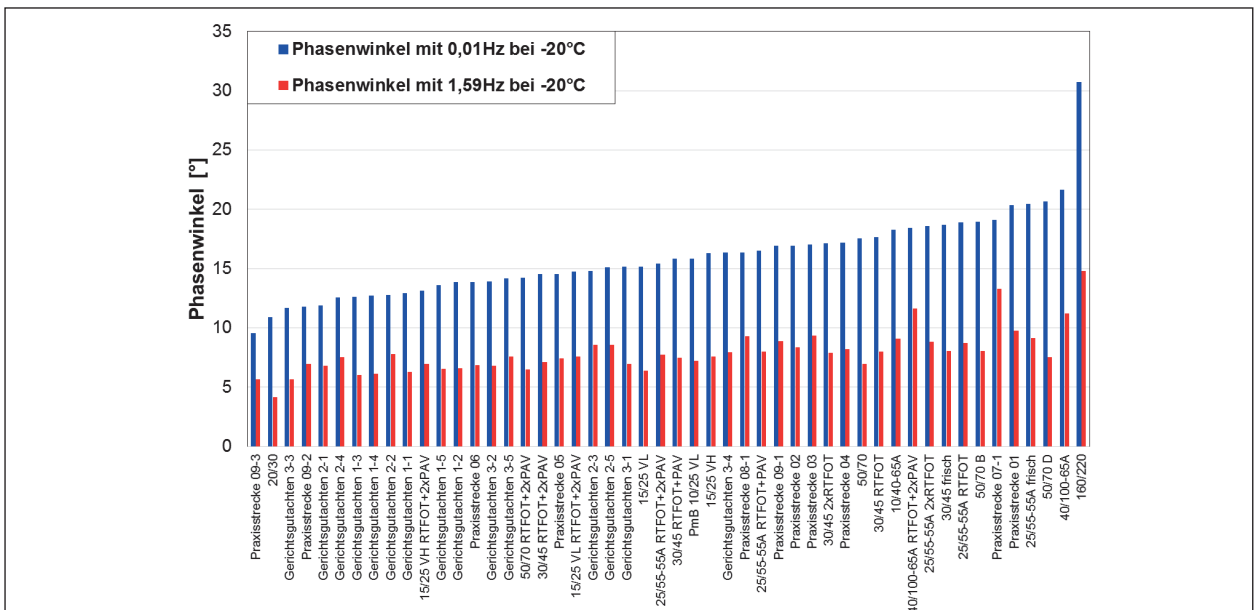


Bild 4-16: Phasenwinkel der 50 untersuchten Bindemittel bei -20 °C für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert

gestellt. In Bild 4-14 und Bild 4-15 werden nur die Wertepaare mit einem Phasenwinkel < 45 ° betrachtet, da ab diesem Wert das plastische Materialverhalten größer ist als das elastische Materialverhalten (vgl. Bild 24).

Bei der Betrachtung aller Messergebnisse ergibt sich für die Ausgleichsgerade durch den Ursprung für den Phasenwinkel eine Steigung von 0,98 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,99. Dies entspricht exakt den Ergebnissen der Voruntersuchun-

gen und bestätigt die sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen PP04 und PP08. Die Steigung der Ausgleichsgerade durch den Ursprung für die Messwerte des komplexen Schermoduls beträgt 1,04 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,97, dies ist eine signifikant bessere Übereinstimmung zwischen den beiden Messgeometrien als bei den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen ($s = 1,12$; $R^2 = 0,99$).

Bei der Darstellung der Ergebnisse mit primär viskosem Verhalten ändern sich die Kennwerte der Korrelationsgeraden nahezu nicht. Die Steigung sowie der Korrelationskoeffizient des Phasenwinkels verschlechtern sich um 0,009 bzw. 0,003. Der Einfluss beim komplexen Schermodul ist mit keiner Verschlechterungen bei der Steigung der Ausgleichsgeraden und 0,0066 beim Korrelationskoeffi-

zienten noch geringer. Die Messverfahren sind somit bei primär elastischen und bei primär viskosen Materialverhalten vergleichbar.

Anhand der nun vorliegenden 50 Messergebnisse, ist der Phasenwinkel, bestimmt mit der PP04 bei einer Frequenz von 0,01 Hz ein möglicher Kennwert zur Beurteilung der Kälteeigenschaften von Bindemitteln. In Bild 4-16 sind die Phasenwinkel von 0,01Hz und 1,59 Hz bei -20 °C aufgetragen. Die Daten sind hierbei der Größe nach aufsteigend sortiert (0,01 Hz) und die sich ergebene Reihenfolge entspricht mit Ausnahme von wenigen Ausreißern (20/30, 50/70) den Erwartungen des Forschungsnehmers. Der Phasenwinkel bei 1,59 Hz ergibt dagegen keine logische Reihenfolge und auch nur eine geringe Spreizung der Werte.

In Bild 4-17 sind Boxplot-Diagramme mit 25 %- bzw. 5 %-Quantil der Ergebnisse (0,01 Hz, -20 °C) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass 90 % der Daten zwischen 12 und 21° liegen und somit keine besonders große Spreizung der Daten vorliegt (Ausnahme 160/220). Zur Erhöhung der Spreizung und damit auch einer möglichen Differenzierung zwischen den verschiedenen Bindemitteln ist in Bild 4-18 analog zu Bild 4-16 die Summe der drei Phasenwinkel im gesamten bezüglich der Rissbildung kritischen Temperaturbereich $T < 0\text{ °C}$ (-20; -10 und 0 °C) dargestellt. Die sich hierbei ergebene Reihenfolge entspricht ebenfalls den Erwartungen und die Differenzierung zwischen den einzelnen Bindemitteln konnte, wie im Boxplot-Diagramm in Bild 4-19 dargestellt, erhöht werden.

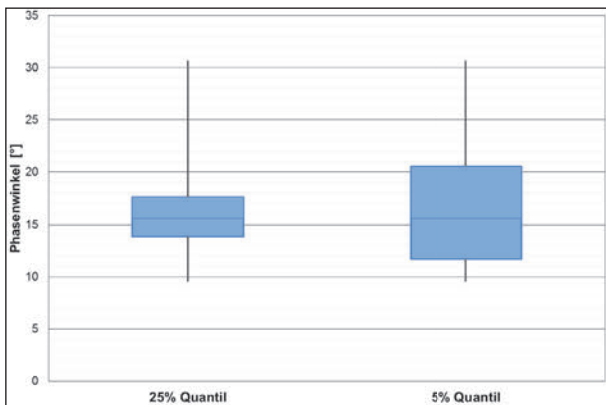


Bild 4-17: Boxplot-Diagramme mit 25 %- und 5 %-Quantil der Phasenwinkel bei -20 °C und 0,01 Hz

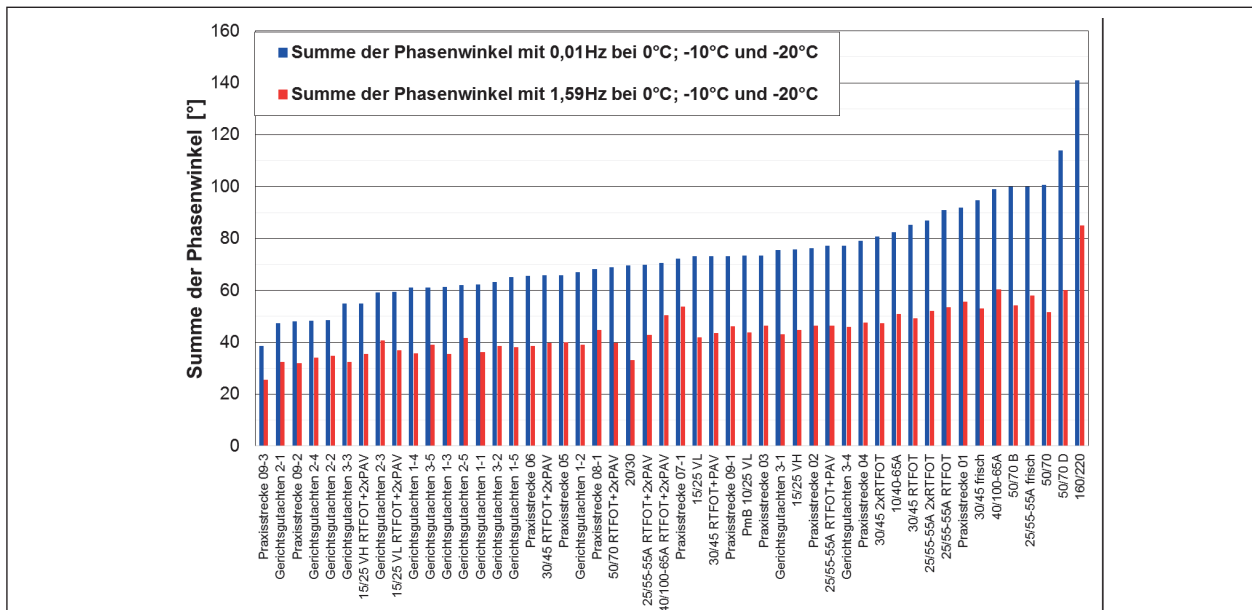


Bild 4-18: Summe der Phasenwinkel bei -20; -10 und 0 °C der 50 untersuchten Bindemittel für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert

In Bild 4-20 ist analog zu Bild 3-44 der gemessene und der berechnete REL_{SRV} der 50 untersuchten Bindemittel dargestellt. Die sich ergebene Reihung entspricht den Erwartungen. Allerdings scheint es aufgrund der teilweise sehr großen Spannweiten von bis zu 50 % bei den Doppelbestimmungen von (z. B. 30/45 frisch oder Praxisstrecke 09-3 in Tabelle A3 im Anhang), keine zufriedenstellende Wiederholpräzision zu geben. Die mittlere Spannweite aller 50 untersuchten Bindemittel liegt mit 12,3 % allerdings im annehmbaren Bereich.

4.4 Allgemeine Bewertung der Hauptuntersuchungen

Ziel der Hauptuntersuchungen war es, eine umfassende Bewertungsbasis zu den Kälteeigenschaften bitumenhaltiger Bindemittel unterschiedlicher Art und Sorte sowie Alterungsgrad zu schaffen. Dies

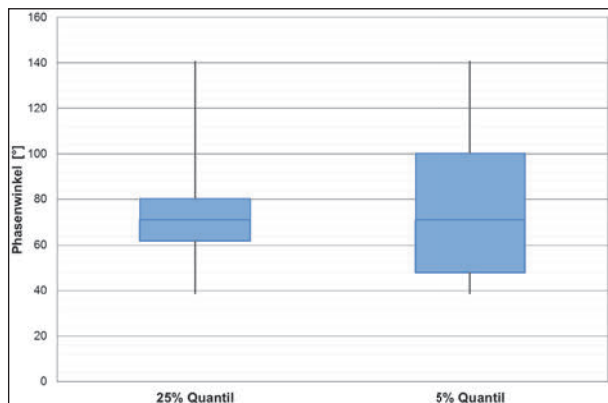


Bild 4-19: Boxplot-Diagramme mit 25 %- und 5 %-Quantil der Summe der Phasenwinkel von -20, -10 und 0 °C bei 0,01 Hz

wurde durch die Prüfung der in Tabelle 4-1 aufgelisteten Bindemittel erfüllt. Erste Bewertungsansätze für die verwendeten Prüfverfahren zeigen sinnvolle – da den Erwartungen entsprechende – Ergebnisse. Diese müssen nun im nächsten Arbeitspunkt durch die Validierung mit dem BBR und dem Zug-Retardationsversuch bestätigt werden. Hierzu wurden in Absprache mit dem Betreuerkreis folgende Bindemittel ausgewählt:

- Straßenbaubitumen: 20/30, 30/45, 50/70, 70/100, 160/220
- PmB: ein 25/55-55A und zwei 40/100-65A von verschiedenen Produzenten
- Viskositätsveränderte Bindemittel: 15/25 VL, 25/45 VL

5 Validierung

Im Anschluss an die Hauptuntersuchung wurden im Zuge der Validierung Zusammenhänge zwischen den zwei DSR-Methoden und der Untersuchung mittels BBR sowie dem Zug-Retardationsversuch überprüft.

5.1 Untersuchungsprogramm der Validierung

Im Rahmen der Validierung wurden erneut zehn Bindemittel, welche das gesamte Spektrum der auf dem Markt vorhandenen Bindemittel abdecken, in Absprache mit dem Betreuerkreis ausgewählt und

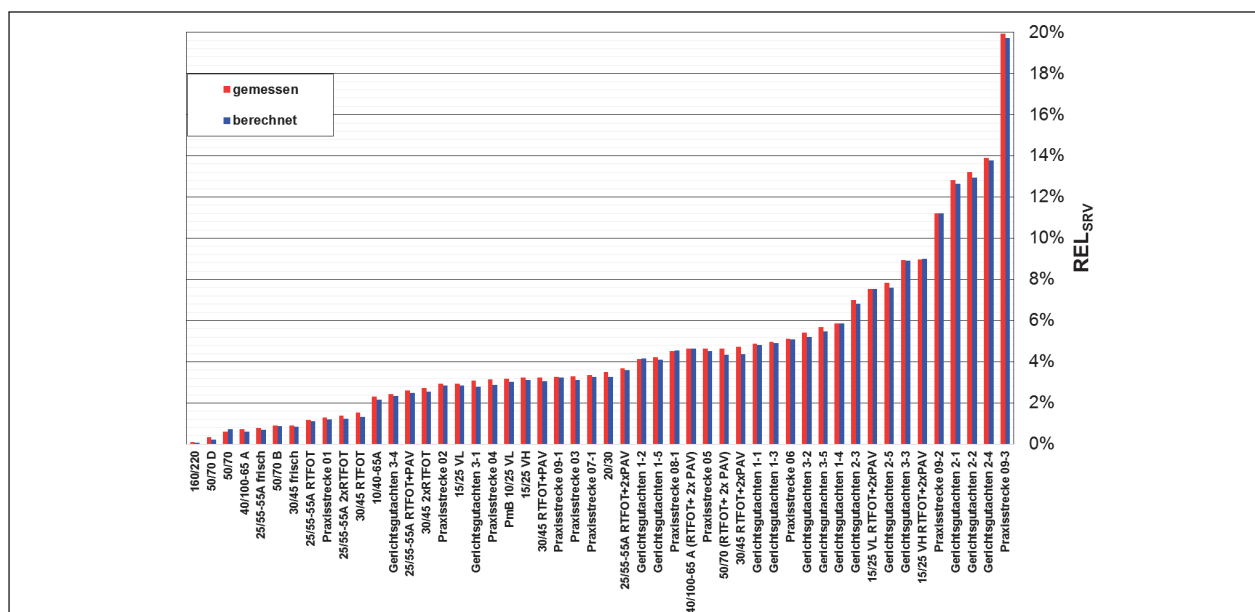


Bild 4-20: Gemessene und berechnete REL_{SRV} der 50 untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert

Bindemittel	SRV	PP04	BBR	Zug-Retardationsversuch	Bindemittel	SRV	PP04	BBR	Zug-Retardationsversuch
20/30 B	X	X	X	-	25/55-55A +3% FTP (BAST 52)	X	X	-	X ¹⁾
25/45 VL	X	X	X	-	25/55-55A +3% FTP RTFOT (BAST 53)	X	X	-	X ¹⁾
25/55-55A B	X	X	X	-	25/55-55A +3% FTP RTFOT+PAV (BAST 54)	X	X	-	X ¹⁾
30/45 B	X	X	X	-	25/55-55A +3% PEW (BAST 55)	X	X	-	X ¹⁾
40/100-65A E	X	X	X	-	25/55-55A +3% PEW RTFOT (BAST 56)	X	X	-	X ¹⁾
40/100-65A B	X	X	X	-	25/55-55A +3% PEW RTFOT+PAV (BAST 57)	X	X	-	X ¹⁾
50/70 B-2	X	X	X	-	rückgewonnenes BM2016 (BAST 40)	X	X	-	X ¹⁾
70/100 B	X	X	X	-	10/40-65A D (BAST 31)	X	X	-	X ¹⁾
160/220	X	X	X	-	10/40-65A B (BAST 30)	X	X	-	X ¹⁾
15/25 VL	X	X	X	-	1) Versuche wurden im Zuge eines anderen Projektes bei der BAST durchgeführt.				
20/30 (BAST 04)	X	X	-	X ¹⁾					
20/30 + 2% FAD (BAST 10)	X	X	-	X ¹⁾					
25/55-55A (BAST 49)	X	X	-	X ¹⁾					
25/55-55A RTFOT (BAST 50)	X	X	-	X ¹⁾					
25/55-55A RTFOT+PAV (BAST 51)	X	X	-	X ¹⁾					

Tab. 5-1: Untersuchungsumfang der Validierung

25/55-55A		40/100-65A		15/25 VL	
Ø 25 mm	Ø 8 mm	Ø 25 mm	Ø 8 mm	Ø 25 mm	Ø 8 mm
2 h	2 h	2 h	2 h	2 h	2 h
4 h	-	-	-	-	-
6 h	-	-	-	-	-
8 h	-	-	-	-	-
24 h	24 h	24 h	24 h	24 h	24 h
48 h	-	-	-	-	-
72 h	-	-	-	-	-
96 h	-	-	-	-	-
120 h	-	120 h	-	120 h	-
240 h	-	240 h	-	240 h	-
336 h	336 h	336 h	336 h	336 h	336 h

Tab. 5-2: Versuchsumfang der Untersuchung zum Einfluss der Lagerungsdauer von DSR-Proben

neben dem SRV und der Untersuchung mittels PP04 im DSR auch im BBR gemäß [AL BBR-Prüfung] untersucht. Darüber hinaus wurden dem Forschungsnehmer 14 Ergebnisse von Zug-Retardationsversuchen sowie die zugehörigen Bindemittelproben von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) zur Verfügung gestellt. Diese noch vorhandenen Probenmengen waren allerdings nicht ausreichend groß um BBR-Versuche durchzuführen, somit konnten lediglich die Untersuchungen mit dem DSR durchgeführt werden, sodass aber zumindest der Vergleich DSR(SRV und PP04)-REVIS möglich war. In Tabelle 5-1 sind die durchgeführten Untersuchungen zusammengefasst.

Bei den Bindemitteln 160/220 und 15/25 VL handelt es sich um dieselben Proben wie bei den Voruntersuchungen (UP1). Für die Untersuchung der acht weiteren Bindemittel, welche zusammen mit dem Betreuerkreis ausgewählt wurden, sind neue Bindemittelproben beschafft worden.

Zusätzlich zu diesen Untersuchungen wurden zur Prüfung des Einflusses des Prüfenden die DSR-Versuche an den zehn für die Validierung ausgewählten Bindemitteln von einem zweiten Laboranten wiederholt.

Aufgrund der in den Hauptuntersuchungen aufgetretenen Problematik der Lagerungsdauer von DSR-

Proben – besonders im Gerät – und des dadurch hervorgerufenen Stillstandes desselben, hat der Forschernehmer hierzu eine zusätzliche Untersuchungsreihe durchgeführt. Diese Untersuchungsreihe umfasst die Variation der Lagerungsdauer, von gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] hergestellten Probekörpern, von 2 bis zu 336 Stunden. Die Lagerung erfolgt hierbei im Kühlschrank bei 5 bis 8 °C, nach einer zweistündigen Abkühlphase bei Raumtemperatur. Untersucht wurden die Bindemittel 25/55-55A, 40/100-65A und 15/25 VL. Straßenbaubitumen wurden nicht verwendet, da diese als weniger problematisch bzgl. ihrer Lagerung angesehen werden. Durchgeführt wurden die in Voruntersuchungen beschriebenen T-Sweeps (Doppelbestimmung bei jeder Lagerungsdauer) mit Probendurchmessern von 8 und 25 mm. In Tabelle 5-2 ist der gesamte Umfang der Untersuchungsreihe dargestellt.

5.1.1 Prüfung im Bending Beam Rheometer (BBR-Prüfung)

Die Prüfung von Bitumenproben im BBR dient der Bestimmung der Biegekriechsteifigkeit im Tieftemperaturbereich. Neben der absoluten Biegekriechsteifigkeit werden die Temperaturen bei einer Biegekriechsteifigkeit von 300 MPa und einem m-Wert (Steigung der Biegekriechsteifigkeitskurve gegen die Zeit aufgetragen jeweils im Logarithmus) von 0,3 zur Beurteilung herangezogen. Im vorliegenden Projekt wurden die BBR-Untersuchungen gemäß [AL BBR-Prüfung] durchgeführt, welche auf der [DIN EN 14771] beruht.

Gemäß der Arbeitsanleitung sind jeweils mindestens zwei Proben bei zwei Prüftemperaturen zu prüfen. Für die meisten Bindemittel wird empfohlen mit einer Temperatur von -16 °C zu beginnen und abhängig von der ermittelten Steifigkeit ($S(T_1)$), diese um 6 Kelvin zu erhöhen ($S(T_1) < 300$ MPa) oder zu vermindern ($S(T_1) > 300$ MPa). Ausnahmen sind hier die weichen Bindemittel wie 160/220 oder 40/100-65A, bei diesen sollte mit -22 °C begonnen werden. Die Prüfung findet in einem Flüssigkeitsbad statt, in dem die Proben unmittelbar nach dem Ausformen für 60 min auf die Prüftemperatur temperiert und anschließend geprüft werden. Die Bitumenproben werden in speziellen mehrteiligen Gussformen hergestellt. Die Maße der Probekörper in Balkenform sind 127 x 12,7 x 6,4 mm. Das Prinzip der Prüfung beruht auf einem 3-Punkt-Biegeversuch. Es wird eine konstante Prüflast von 980 mN auf die Mitte des symmetrisch gelagerten Balkens für eine Dauer von 240 s

aufgebracht und die Durchbiegung in Balkenmitte gemessen. Aus dieser Durchbiegung sowie der vorliegenden Biegespannung bei einer Belastungsdauer von 60 s werden die Biegekriechsteifigkeit sowie der m-Wert berechnet. Die Temperaturen von $S = 300$ MPa und $m = 0,3$ werden abschließend durch Inter- oder Extrapolation aus den Prüfergebnissen gemäß [AL BBR-Prüfung] bestimmt.

5.1.2 Zug-Retardationsversuch

Der Zugretardationsversuch mit dem Prüfsystem REVIS basiert auf dem Tensile Creep Test (TCT) der [DIN EN 12697-46]. 1994 wurde im Zuge eines Forschungsprojektes am Institut für Materialprüfung in Rottweil die Übertragung der Prüfung auf reine Bitumenprobekörper vollzogen. [SCHELLENBERG, EULITZ, 1995] Mit diesem Verfahren ist es möglich, die Eigenschaften von Bindemitteln und Mörteln nicht nur im Tieftemperaturbereich, sondern auch im Gebrauchstemperaturbereich zu bestimmen. Als Materialkenngröße wird hierbei die Zugviskosität λ_z bestimmt.

Bei diesem Versuch wird der in Bild 5-1 dargestellte Probekörper nach einer spannungsfreien Temperierung von 150 min einer schlagartig aufgebrachten und anschließend konstant gehaltenen einaxialen Zugspannung ausgesetzt. Die Höhe und die Dauer der Belastung sind dabei temperaturabhängig (vgl. Tabelle 5-3). Die Prüftemperatur bleibt während der gesamten Belastung konstant.

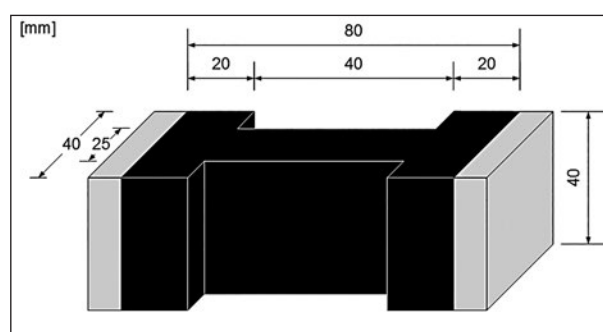


Bild 5-1: Probekörper für die Zug-Retardationsversuche

Prüftemperatur [°C]	Art der Probe [-]	Zugspannung σ [MPa]	Dauer der Belastung [min]
+ 5	Bindemittel / Mörtel	0,010 / 0,100	60
- 5	Bindemittel / Mörtel	0,100 / 0,100	120
- 15	Bindemittel / Mörtel	0,250 / 0,250	240
- 25	Bindemittel / Mörtel	0,250 / 0,500	480

Tab. 5-3: Prüfbedingungen der Zug-Retardationsversuche

Während des Versuchs wird die axiale Dehnung erfasst und die sich daraus ergebene Zeit-Dehnungskurve aufgezeichnet. Unter Verwendung der Gleichung 9 kann im linearen Abschnitt dieser Kurve die Zugviskosität der Bindemittelprobe bestimmt werden.

$$\tau = \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}} \quad \text{Gl. 9}$$

- Mit:
- τ Zugviskosität des Bindemittels [MPa s]
 - σ Konstante einaxiale Zugspannung [MPa]
 - $\dot{\epsilon}$ Steigung im betrachteten linearen Abschnitt der Zeit-Dehnungskurve [1/s]
 - Δl Längenänderung über die Zeit der Betrachtung [mm]
 - Δt Zeit der betrachteten Dehnung [s]
 - l_0 wirksame Länge des Probekörpers = 60 mm (konst.)

Die so berechneten Zugviskositäten werden auf einer logarithmischen Skala gegen die Prüftemperatur aufgetragen und abschließend für jedes Material eine Regressionsgerade der folgenden Form bestimmt:

$$\text{Gl. 10}$$

- Mit:
- a Zugviskosität bei 0 °C
 - b Steigung der Regressionsgeraden
 - T Prüftemperatur [°C]

5.2 Ergebnisse der Validierung

Analog zum Vorgehen in den beiden ersten Untersuchungspaketen (3.2 Voruntersuchungen und 4.1 Hauptuntersuchung) werden auch in diesem Kapitel die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsmethoden gruppenweise dargestellt. Die zehn zusammen mit dem Betreuerkreis festgelegten Bindemittel sind hierbei in zwei Gruppen geteilt worden. Die modifizierten und die nicht modifizierten Bindemittel. Darüber hinaus wurden, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, dem Forschungsnehmer von der BAST 14 weitere Bindemittelproben zur Verfügung gestellt, zu denen Ergebnisse von Zug-Retardationsversuchen vorlagen. Diese sind für die Darstellung der Ergebnisse in vier Gruppen eingeteilt worden,

bestehend aus je drei Alterungsstufen eines 25/55-55A, eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A und eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A sowie eine Gruppe aus fünf weiteren Bindemitteln (diverse). Nach der Darstellung der Ergebnisse der DSR-Untersuchungen in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 folgen die Ergebnisse der BBR-Untersuchungen und der Zug-Retardationsversuche. Zum Abschluss werden die Ergebnisse der Untersuchung zum Einfluss der Lagerungsdauer dargestellt.

5.2.1 Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz (-10 °C bis 150 °C)

Auch die von der BAST zur Verfügung gestellten Proben wurden zunächst mittels Temperatur-Sweep (Doppelbestimmung) von -10 bis 150 °C charakterisiert, um u. a. die Applikationstemperaturen (T bei $|G^*| = 3.000 \text{ Pa}$) zu bestimmen. In Bild 5-2 bis Bild 5-7 sind die Mittelwerte der Temperatur-Sweeps bei einer Frequenz von 1,59 Hz dargestellt. Die Applikationstemperaturen sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Eine Ausnahme bildet hierbei die von der

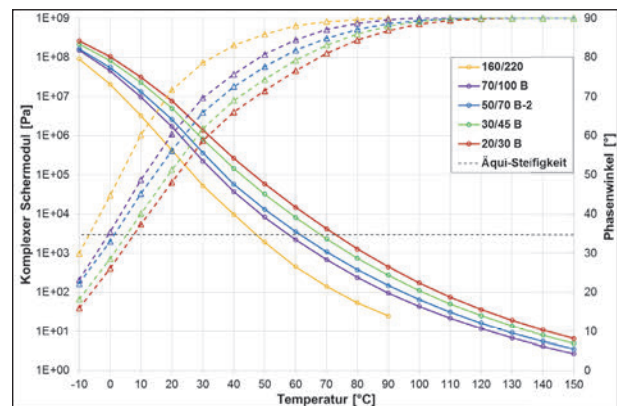


Bild 5-2: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

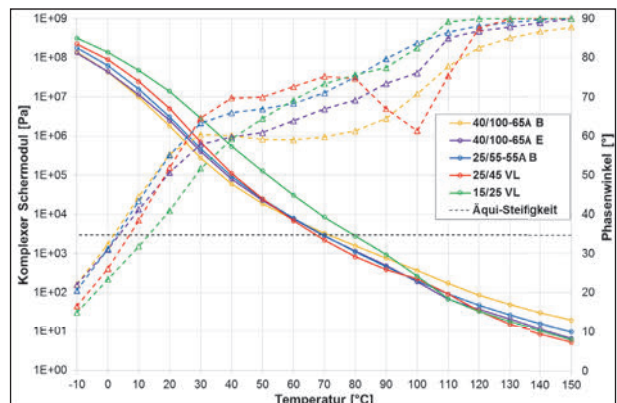


Bild 5-3: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

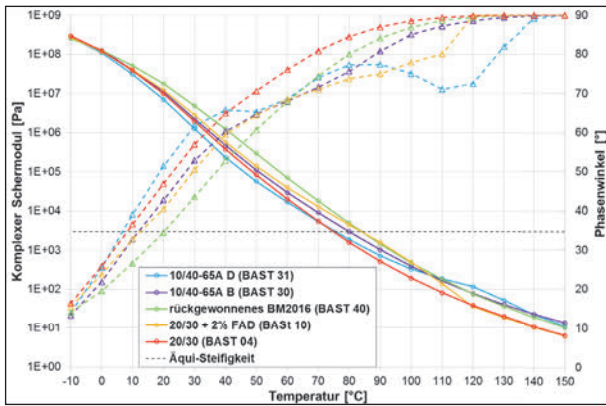


Bild 5-4: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

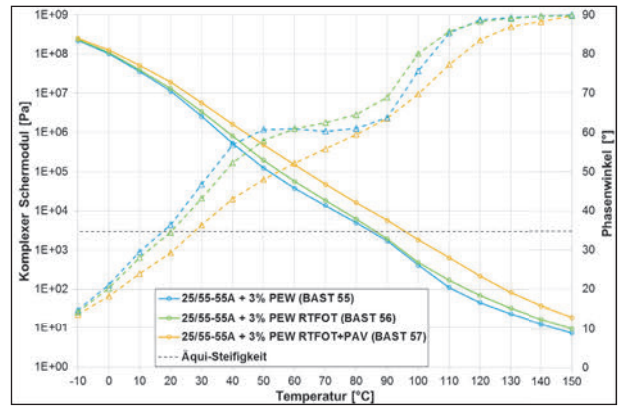


Bild 5-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

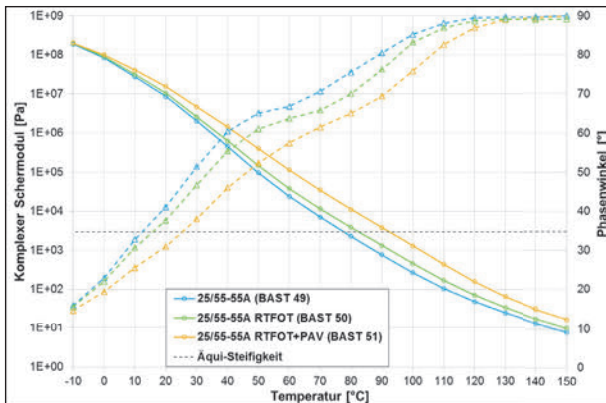


Bild 5-5: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

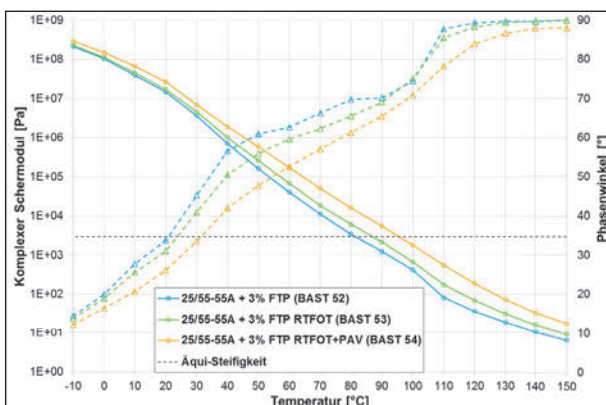


Bild 5-6: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

Bindemittel	Applikationstemperatur [°C]
20/30 B	75
25/45 VL	65
25/55-55A B	70
30/45 B	70
40/100-64A E	70
40/100-65A B	70
50/70 B-2	60
70/100 B	60
160/220	45
15/25 VL	80
20/30 (BAST 04)	75
20/30 + 2% FAD (BAST 10)	85
25/55-55A (BAST 49)	80
25/55-55A RTFOT (BAST 50)	80
25/55-55A RTFOT+PAV (BAST 51)	90
25/55-55A + 3 % FTP (BAST 52)	80
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT (BAST 53)	85
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT+PAV (BAST 54)	95
25/55-55A + 3 % PEW (BAST 55)	85
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT (BAST 56)	85
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT+PAV (BAST 57)	95
rückgewonnenes BM2016 (BAST 40)	85
10/40-65A D (BAST 31)	75
10/40-65A B (BAST 30)	80

Tab. 5-4: Applikationstemperaturen der in UP3 verwendeten Bindemittel

BAST bereitgestellte Bindemittelprobe-Nr. 54 (25/55-55A + 3 % FTP RTFOT+PAV), bei der die Probenmenge so gering war, dass kein homogener Probekörper für einen Temperatur-Sweep mit der PP08 hergestellt werden konnte. Bei der Darstellung des Temperatur-Sweeps in Bild 5-6 wurden daher für den Temperaturbereich -10 °C bis 30 °C die mit der PP04 ermittelten Messwerte verwendet.

5.2.2 Ergebnisse aus den SRV

Die in den Bildern Bild 5-8 bis Bild 5-13 dargestellten Mittelwerte der SRV sind entsprechend den Darstellungen der Vor- und Hauptuntersuchungen zur besseren Differenzierung der Verläufe mit unter-

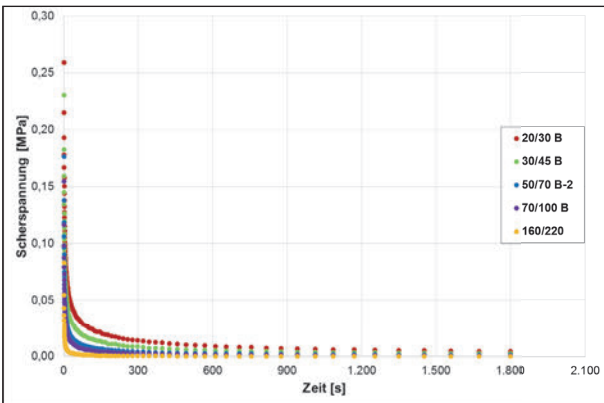


Bild 5-8: SRV der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel

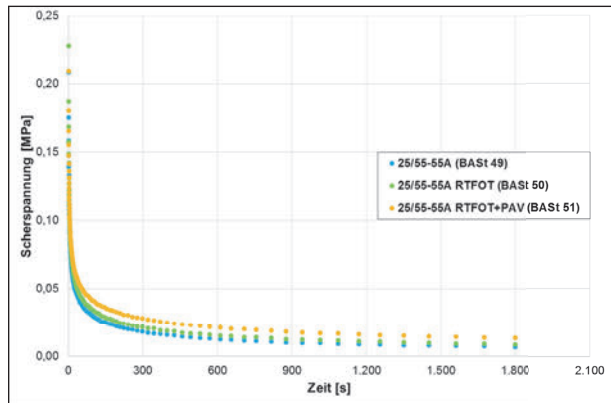


Bild 5-11: SRV mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung

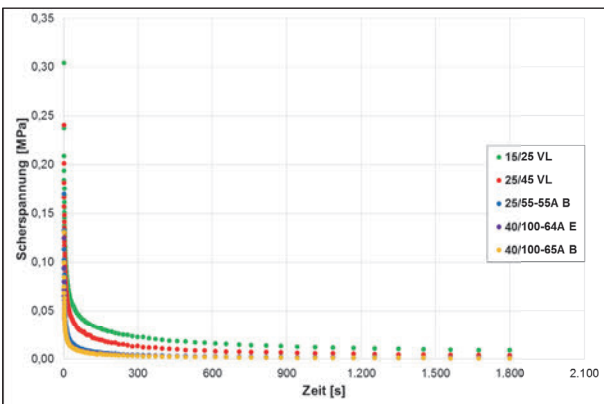


Bild 5-9: SRV der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel

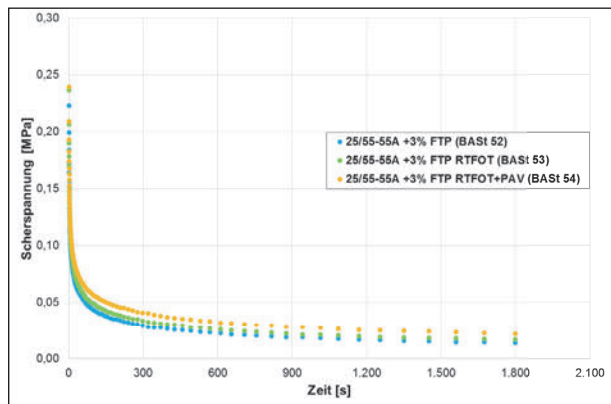


Bild 5-12: SRV mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung

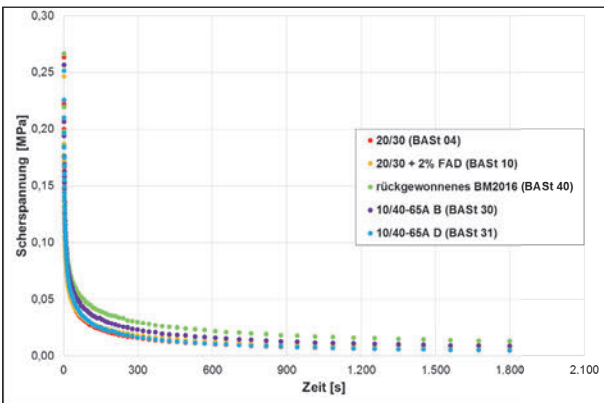


Bild 5-10: SRV diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung

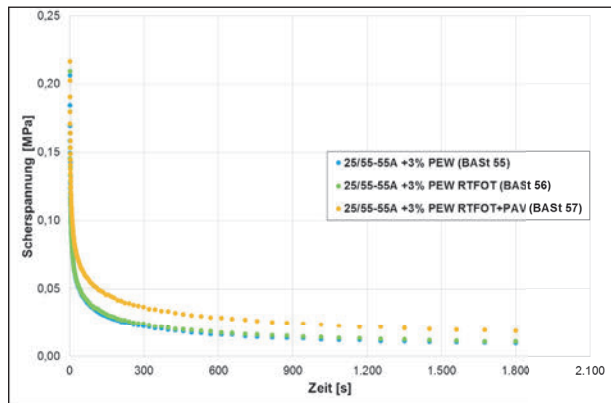


Bild 5-13: SRV mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung

schiedlicher Skalierung der Ordinatenachse versehen worden.

In Tabelle 5-5 sind die REL_{SRV} der in UP3 untersuchten Bindemittel zusammengefasst. Diese wurden aus den Spannungsverläufen der Relaxationsphase gemäß Gleichung 8 berechnet und beschreiben das Relaxationsvermögen.

5.2.3 Ergebnisse aus den DSR-Versuchen mit PP04

Analog zu den Hauptuntersuchungen sind in diesem Kapitel die Mittelwerte der Doppelbestimmungen der Temperatur-Sweeps bei einer Frequenz von 0,01 Hz, welche mit einer PP04-Messgeometrie bestimmt wurden, dargestellt.

In Bild 5-14 sind die Verläufe der nicht modifizierten Bindemittel, welche für die Validierung verwendet wurden, dargestellt. Hierbei ist auffällig, dass im

Bindemittelbezeichnung	REL _{SRV} [%]
20/30 B	1,65
25/55-55A C	1,58
25/55-55A B	0,59
30/45 B	1,13
40/100-64A E	0,89
40/100-65A B	0,69
50/70 B-2	0,60
70/100 B	0,41
160/220	0,11
15/25 VL	2,95
20/30 (BAST 04)	1,96
20/30 + 2% FAD (BAST 10)	2,95
25/55-55A (BAST 49)	3,34
25/55-55A RTFOT (BAST 50)	3,77
25/55-55A RTFOT+PAV (BAST 51)	6,40
25/55-55A + 3 % FTP (BAST 52)	6,26
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT (BAST 53)	7,10
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT+PAV (BAST 54)	9,14
25/55-55A + 3 % PEW (BAST 55)	4,80
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT (BAST 56)	5,20
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT+PAV (BAST 57)	8,64
rückgewonnenes BM2016 (BAST 40)	5,01
10/40-65A D (BAST 31)	1,98
10/40-65A B (BAST 30)	3,42

Tab. 5-5: Relaxationsvermögen der in UP3 untersuchten Bindemittel

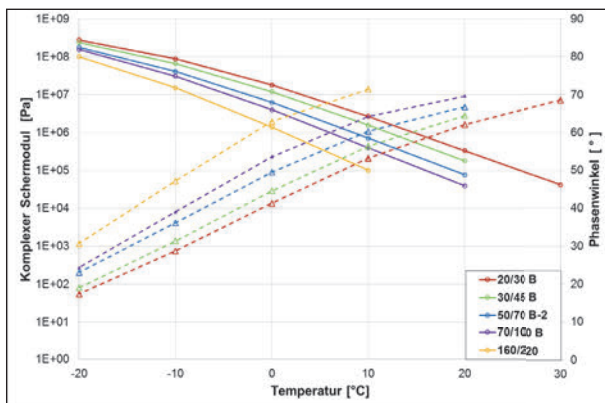


Bild 5-14: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel mittels PP04

Gegensatz zu den nicht modifizierten Bindemitteln, welche in den Hauptuntersuchungen verwendet wurden (Bild 4-10 und Bild 4-11), auch die Messung von Bindemitteln der Sorten 30/45, 50/70 und 70/100 bei einer Temperatur von 30 °C nicht möglich war.

Auch die Messung der modifizierten Bindemittel, welche in UP3 verwendet wurden (ausgenommen

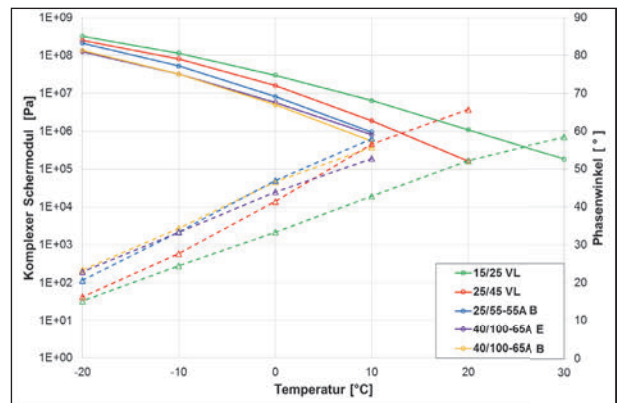


Bild 5-15: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel mittels PP04

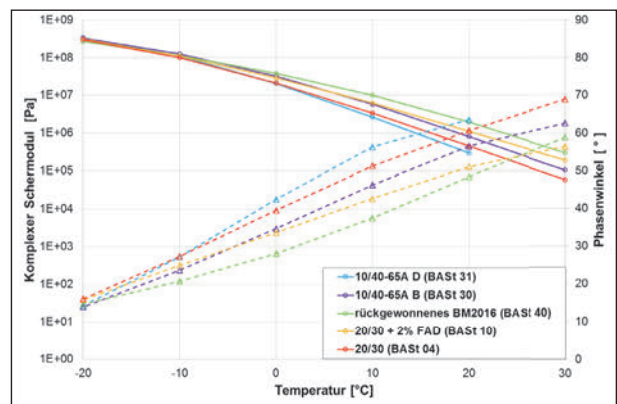


Bild 5-16: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung mittels PP04

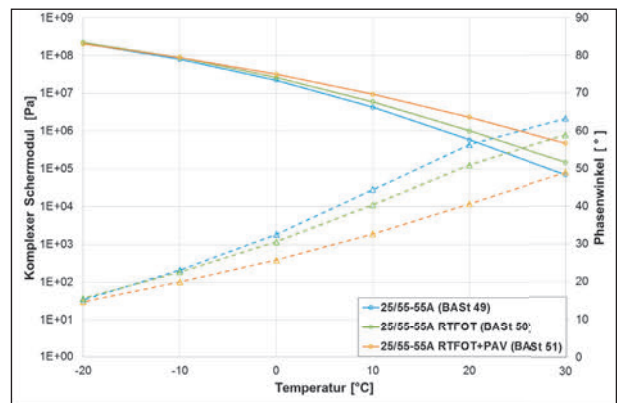


Bild 5-17: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04

das bereits in UP2 verwendete 15/25 VL), war bei einer Temperatur von 30 °C nicht möglich. Das 25/45 VL konnte ab 20 °C gemessen werden, das 25/55-55A und die beiden 40/100-65A sogar erst ab 10 °C. Die Verläufe sind in Bild 5-15 dargestellt.

Auch das Bindemittel 10/40-65A (BAST 31), dessen Verläufe mit diversen anderen in der BAST-Forschung verwendeten Bindemittel in Bild 5-16 dargestellt sind, konnte bei 30 °C nicht gemessen werden.

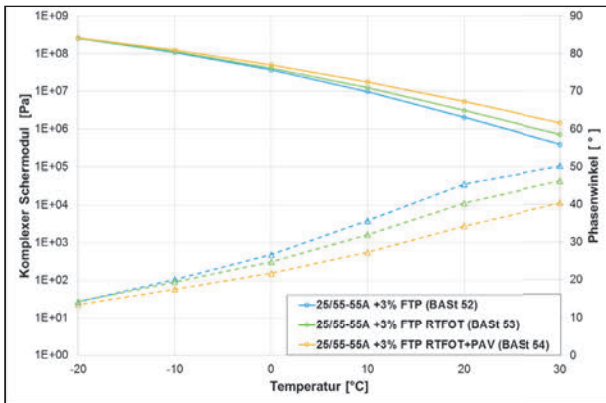


Bild 5-18: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04

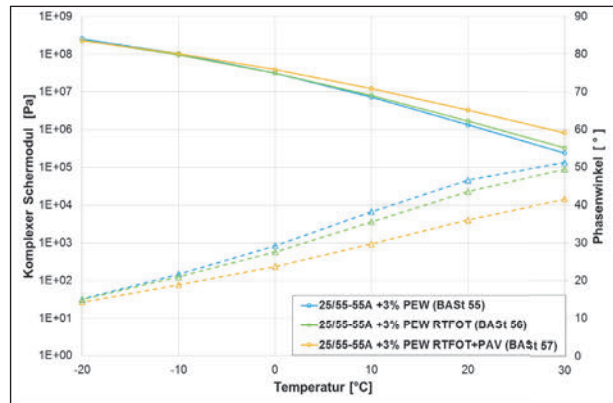


Bild 5-19: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04

Bindemittel	T (S = 300 MPa) [°C]	T (m = 0,3) [°C]	m (T = -10 °C) [-]	S (T = -10 °C) MPa
20/30 B	-15,4	-17,7	0,4077	130,32
30/45 B	-17,5	-19,0	0,4759	104,54
50/70 B-2	-20,3	-22,1	0,5511	60,60
70/100 B	-20,7	-23,2	0,5962	35,82
160/220	-23,0	-27,5	0,6861	13,61
25/55-55A B	-19,7	-20,8	0,5119	73,47
25/55-55A C	-16,4	-16,8	0,3782	144,28
40/100-65A B	-22,3	-22,6	0,5614	36,58
40/100-65A E	-22,1	-22,5	0,5006	34,46
15/25 VL	-13,9	-14,1	0,3379	191,69

Tab. 5-6: Ergebnisse der BBR-Untersuchungen der zehn für das UP3 ausgewählten Bindemittel

Die Messungen der verschiedenen Modifizierungen und Alterungsstufen des von der BAST verwendeten 25/55-55A konnten über den gesamten Temperaturbereich durchgeführt werden und sind in den Bildern Bild 5-17 bis Bild 5-19 dargestellt.

5.2.4 Ergebnisse aus den BBR-Versuchen

In Tabelle 5-6 sind die Ergebnisse der BBR-Untersuchungen zusammengefasst. Hierbei handelt es sich immer um den Mittelwert einer Doppelbestimmung. Teilweise sind dreifach-Bestimmungen durchgeführt worden, wenn die Anforderungen an die Präzision gemäß [AL BBR-Prüfung] zwischen den ersten beiden Proben nicht eingehalten wurden. Neben den von der Software des BBR automatisch ermittelten Temperaturen bei einer Biegesteifigkeit von 300 MPa (T(S = 300 MPa)) und einem m-Wert von 0,3 (T(m = 0,3)) sind zusätzlich die Biegesteifigkeit und der m-Wert bei einer Temperatur von -10 °C angegeben, welche mithilfe der ebenfalls von der Software des BBR bestimmten Parametern der Regressionsgeraden berechnet wurden.

5.2.5 Ergebnisse aus den Zug-Retardationsversuchen

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Zug-Retardationsversuche in Form der Regressionsgeraden (alle $R^2 > 0,98$) der verschiedenen Bindemittel in den Bildern Bild 5-20 bis Bild 5-24 dargestellt. Diese Regressionsgeraden sind in der Regel aus Messwerten bei drei verschiedenen Temperaturen bestimmt worden. In Tabelle A4 im Anhang sind die Ergebnisse der einzelnen Versuche zusammengefasst.

5.2.6 Ergebnisse aus der Untersuchungsreihe zur Variation der Lagerungsdauer

Die Lagerungsdauer der Bindemittelproben bis zur Prüfung im DSR ist in der Arbeitsanleitung [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] so geregelt, dass insbesondere für Polymermodifizierte Bitumen für Labore nicht wirtschaftliche Forderungen gestellt werden (mind. 12 Stunden Lagerungsdauer), die eine zeitnahe Abwicklung von Prüfaufträgen erschweren. Inwieweit diese Forderungen aus prüftechnischer Sicht not-

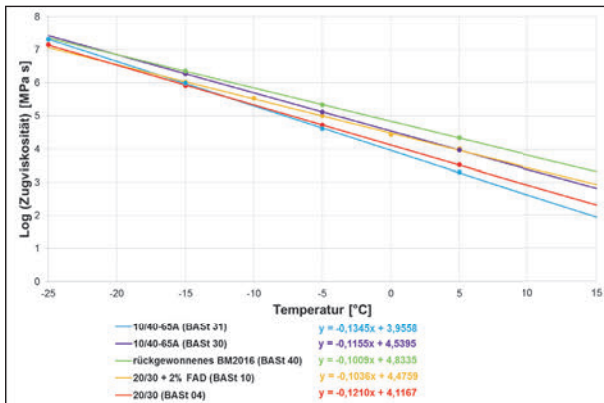


Bild 5-20: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche diverser Bindemittel aus der BASf-Forschung

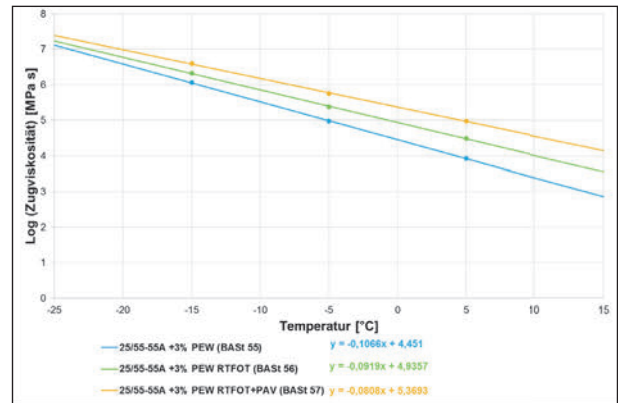


Bild 5-23: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BASf-Forschung

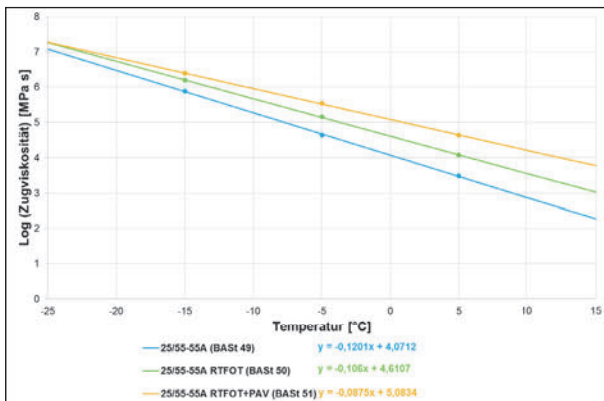


Bild 5-21: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BASf-Forschung

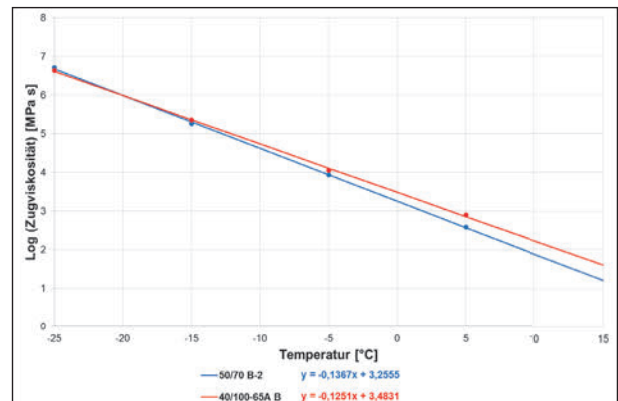


Bild 5-24: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche eines 50/70 und eines 40/100-65A aus dem UP3

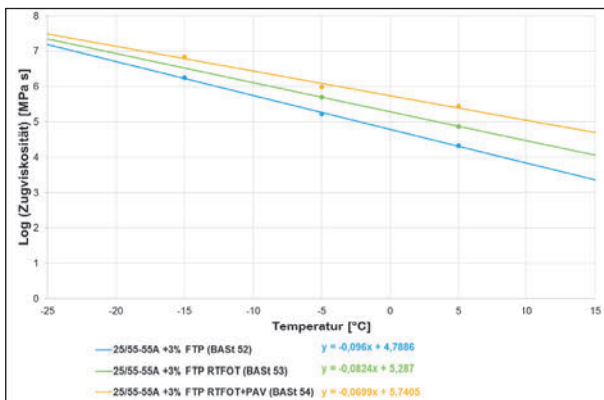


Bild 5-22: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BASf-Forschung

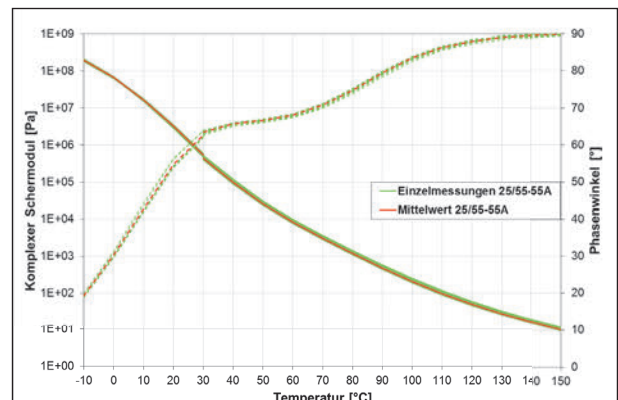


Bild 5-25: T-Sweeps von allen Lagerungsdauern sowie der Mittelwert des Bindemittels 25/55-55A

wendig sind, wurde in einer zusätzlichen Untersuchungsreihe ermittelt (siehe Tabelle 5-2). Die Lagerung wurde hierbei allerdings abweichend von der [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] im Kühlschrank durchgeführt.

Beispielhaft für die hierzu untersuchten Bindemittel sind in Bild 5-25 die Temperatur-Sweeps bei 1,59 Hz

des 25/55-55A aller Lagerungsdauern (2 bis 336 Stunden) sowie deren Mittelwert dargestellt.

Die hohe Übereinstimmung der Prüfergebnisse mit sehr unterschiedlicher Lagerungsdauer der Proben vor Beginn der DSR-Untersuchungen verdeutlicht, dass eine kritische Überprüfung der Angaben hierzu in der Arbeitsanleitung sinnvoll wäre.

5.3 Auswertung der Validierung

Nachdem in den Hauptuntersuchungen eine große Vielfalt von verschiedenen Bindemitteln mit den verschiedenen Methoden im DSR untersucht worden sind (insgesamt 50 Bindemittel), wurde in der Validierungsphase dieser Probenumfang um weitere 22 Bindemittel erweitert. Somit sind im gesamten Projekt 72 Bindemittel mit dem SRV, der PP04, der PP08 sowie der PP25 untersucht worden. Die einzige Ausnahme ist hierbei, wie bereits in Kapitel 5.2.1 erläutert, die von der BAST bereitgestellte Bindemittelprobe-Nr. 54 (25/55-55A + 3 % FTP RTFOT+PAV).

Die bisherige Auswertung des SRV erfolgte mithilfe des REL_{SRV} , welcher sich aus dem Start- und Endwert der Scherspannung in der Relaxationsphase berechnet (vgl. Gleichung 8). Hierdurch ist der Kennwert REL_{SRV} sehr anfällig gegen einzelne Messfehler am Anfang und am Ende der Relaxationszeit (vgl. Tabelle A3 im Anhang). Weiterhin beschreiben Start- und Endwert den Verlauf der Scherspannung nur sehr grob. Daher wurde als erweiterte Auswertmethode das Integral der Scherspannung über die gesamte Relaxationszeit ausgewählt. Diese Kenngröße wird im Folgenden mit Relaxationsviskosität λ_{Rel} bezeichnet (vgl. Gleichung 11). Hiermit wird der gesamte, nicht lineare Spannungsverlauf bei der Auswertung berücksichtigt und das Relaxationsverhalten kann damit viel genauer beschrieben werden.

Gl. 11

In den Hauptuntersuchungen dargestellt. In Bild 5-26 und Bild 5-27 sind die in den Hauptuntersuchungen dargelegten Korrelationen zwischen den Untersuchungen mit PP04 und PP08 bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz (vgl. Bild 4-12 und Bild 4-13), um die Ergebnisse der in der Validierung untersuchten Bindemittel erweitert, dargestellt. Die Steigungen der Regressionsgeraden durch den Ursprung – als Parameter zur Bewertung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermittelt mit PP08 und PP04 – sind mit Werten von 0,9784 (vorher 0,9757) beim Phasenwinkel und 1,0717 (vorher 1,0383) beim komplexen Schermodul weiterhin auf sehr hohem Niveau. Der Korrelationskoeffizient (R^2) der Regressionsgeraden beim Phasenwinkel ist mit 0,9962 exakt gleich geblieben. Beim komplexen Schermodul ist die Änderung von 0,9975 auf 0,9699 wie die Änderungen der Steigungen sehr gering und auf sehr hohem Niveau.

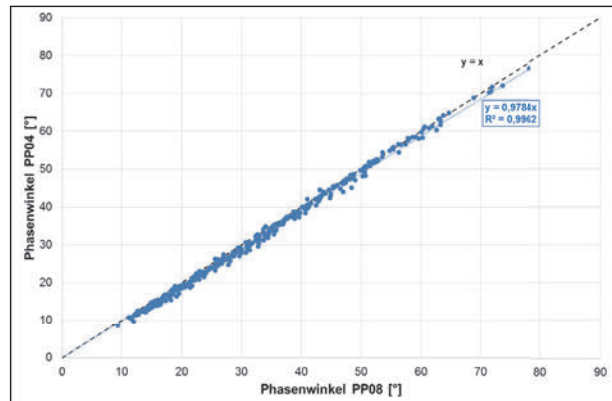


Bild 5-26: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln aller untersuchten Bindemittel, ermittelt mit der PP04 und PP08 bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

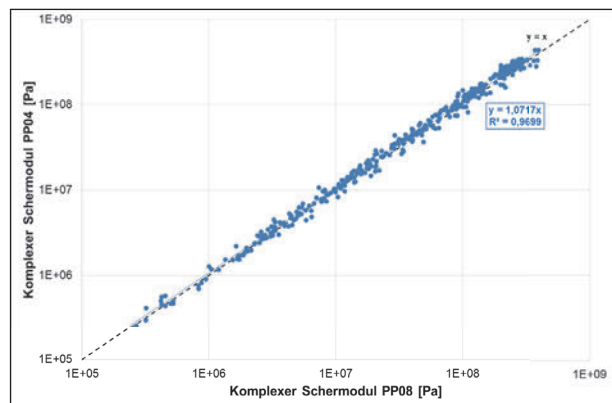


Bild 5-27: Korrelation zwischen den komplexen Schermodul aller untersuchten Bindemittel, ermittelt mit der PP04 und PP08 bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C

In Bild 5-28 sind die Summen der Phasenwinkel von -20 °C bis 0 °C bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz, bestimmt mit der PP04, der Größe nach aufsteigend sortiert, vergleichend zu den Messungen bei einer Frequenz von 1,59 Hz dargestellt. Die sich hierbei ergebende Rangfolge ist mit wenigen Ausnahmen – wie das 20/30 – aus UP1 logisch. Die häufig niedrigeren Summen der Phasenwinkel bei den Bindemittelproben der BAST, im Vergleich zu äquivalenten regulären Proben, können in einer mehrfachen Erwärmung der Proben im Labor begründet liegen. Diese sind dem Forschungsnehmer allerdings nicht exakt bekannt.

In Bild 5-29 sind die Ergebnisse des SRV der Größe nach aufsteigend sortiert dargestellt. Wie die Rangfolge gemäß REL_{SRV} in Bild 4-20 ist auch die Rangfolge gemäß der neuen Auswertemethode der Relaxationsviskosität logisch.

Die statistischen Kenngrößen sind im Anhang in Tabelle A5 dargestellt und machen deutlich, dass die

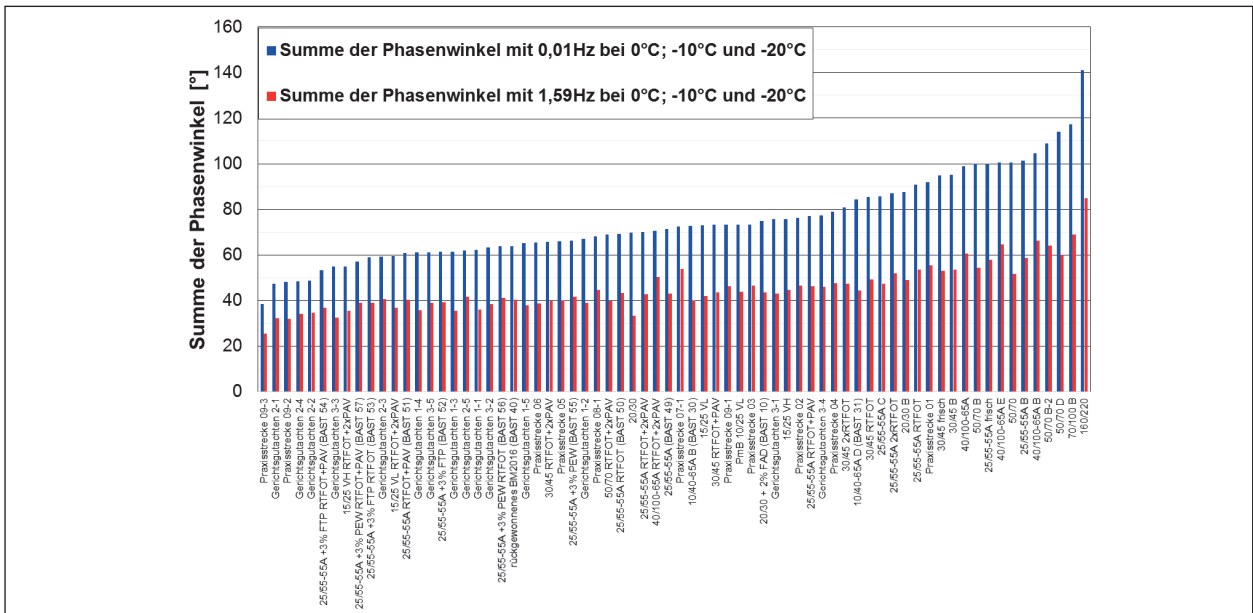


Bild 5-28: Summen der Phasenwinkel bei -20; -10 und 0 °C aller mit der PP04 untersuchten Bindemittel für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert

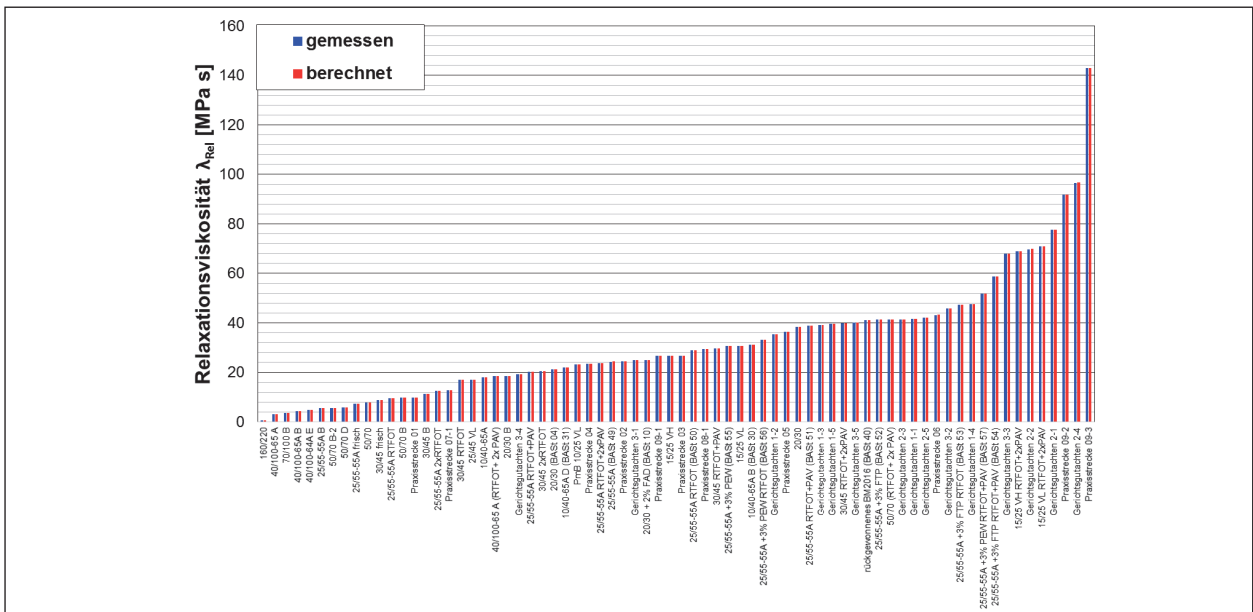


Bild 5-29: Relaxationsviskositäten aller untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert

Berechnung des REL_{SRV} aus zwei Messwerten des Spannungsverlaufes größeren Schwankungen unterliegt, als die Berechnung des Integrals aus allen Messwerten. Die maximale Spannweite bei einer Doppelbestimmung bezogen auf den Mittelwert, beträgt beim REL_{SRV} 54,8 %. Beim der Relaxationsviskosität (λ_{Rel}) ist diese mit 27,0 % nur halb so groß. Auch der Mittelwert der Spannweiten aller 72 untersuchten Bindemittel ist bei λ_{Rel} mit 8,3 % geringer als beim REL_{SRV} mit 10,9%. Zum Vergleich, in der [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] ist für den komplexen Schermodul ein Grenzwert von 10 % für die Spannweite vorgegeben. Dies bestätigt, dass für die Be-

urteilung der Ergebnisse des SRV die Relaxationsviskosität dem REL_{SRV} vorzuziehen ist.

In diesem Forschungsprojekt wurde eine Datengrundlage für die beiden ausgewählten DSR-Methoden bestehend aus 72 verschiedenen Bindemitteln, die eine große Bandbreite an unterschiedlichsten Provenienzen, Sorten, Modifikationen und Alterungsarten abdecken, geschaffen. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse besteht die Möglichkeit einer Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen und modifizierten Bitumen durch die beiden verwendeten Verfahren. Dabei ist zu beachten, dass durch

viele weitere Aspekte das Kälteverhalten eines Asphaltes (z. B. geografische Lage, Mischgutkonzept, Bindemittelvolumen, Verdichtungsgrad) beeinflusst wird, sodass eine allgemeine Gültigkeit von scharfen Grenzen grundsätzlich nicht möglich ist. Daher werden auch keine Grenzwerte vorgeschlagen, sondern lediglich kritische Werte genannt, bei deren

Über- (d_{Rel}) bzw. Unterschreitung ($\Sigma\delta$) eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Rissbildung aufgrund der Rheologie des Bindemittels vorliegt. Beim SRV ist dies ein Wert von $\lambda_{\text{Rel}} = 40$ MPa s und bei der Untersuchung mittels PP04 eine Summe der Phasenwinkel von 70° . Bei Werten von $\lambda_{\text{Rel}} = 60$ MPa s und einer Summe der Phasenwinkel kleiner als 50° ist die Wahrscheinlichkeit der Rissbildung sogar sehr hoch.

Temperatur [°C]	25/55-55A		40/100-65A		15/25 VL	
	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]
-10	19,3	0,4	22,5	0,3	14,1	0,1
0	30,3	0,6	32,9	0,5	22,7	0,2
10	42,8	0,9	44,5	0,9	32,0	0,3
20	54,8	1,0	55,7	1,0	39,7	1,2
30	62,7	0,8	61,3	0,7	48,9	1,1
\varnothing		0,7		0,7		0,6

Tab. 5-7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Phasenwinkel (δ) aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP08

Temperatur [°C]	25/55-55A		40/100-65A		15/25 VL	
	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]	$\varnothing(\delta)$ [°]	$\sigma(\delta)$ [°]
30	63,4	0,4	60,6	0,3	51,5	0,7
40	65,8	0,3	60,0	0,2	60,7	1,2
50	66,7	0,3	59,0	0,3	66,1	1,0
60	68,0	0,3	58,9	0,4	71,6	0,9
70	70,8	0,4	59,6	0,4	76,3	0,7
80	74,8	0,4	61,1	0,4	80,0	0,6
90	79,5	0,4	64,3	0,4	82,0	0,5
100	83,5	0,3	70,5	0,5	85,9	0,2
110	86,3	0,3	77,5	0,6	89,5	0,1
120	88,0	0,2	82,3	0,6	90,0	0,1
130	89,1	0,3	84,8	0,5	90,0	0,0
140	89,7	0,4	86,2	0,5	90,0	0,0
150	89,9	0,2	87,7	0,4	90,0	0,0
\varnothing		0,3		0,4		0,5

Tab. 5-8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Phasenwinkel (δ) aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP25

Temperatur [°C]	25/55-55A		40/100-65A		15/25 VL	
	$\varnothing(G^*)$ [Pa]	$\sigma(G^*)$ [%]	$\varnothing(G^*)$ [Pa]	[°C]	$\varnothing(G^*)$ [Pa]	$\sigma(G^*)$ [%]
-10	195.990.000	4,5	134.225.000	2,6	310.473.333	5,5
0	67.643.167	3,9	41.664.167	1,9	135.698.333	5,0
10	16.474.833	5,3	11.421.867	3,1	45.011.667	5,0
20	3.209.317	7,1	2.120.517	5,5	13.264.000	2,2
30	539.118	8,2	363.468	6,4	3.206.967	2,7
\varnothing		5,8		3,9		4,1

Tab. 5-9: Mittelwerte und Standardabweichungen der komplexen Schermodule $|G^*|$ aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP08

5.3.1 Auswertung der Untersuchung zur Variation der Lagerungsdauer von DSR-Proben

In den Tabellen 5-7 bis 5-10 sind die Mittelwerte sowie die zugehörigen Standardabweichungen des Phasenwinkels und des komplexen Schermoduls, gemessen bei einer Prüffrequenz von 1,59 Hz, der drei untersuchten Bindemittel zusammengefasst. Die Standardabweichungen des komplexen Schermoduls werden hierbei prozentual bezogen auf den Mittelwert ausgedrückt.

Die mittleren Standardabweichungen über den gesamten Temperaturbereich der DSR-Prüfung liegen beim Phasenwinkels zwischen 0,3 und 0,7° und zwischen 3,9 und 8,2 % beim komplexen Schermodul. Diese Werte sind so gering, dass die Grenzwerte der [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)] bzgl. der Lagerungsdauer von Probekörpern überprüft werden sollten. Ein Fokus ist dabei auf die zeitnahe laborpraktische Umsetzung zu legen.

5.4 Bewertung der Validierung

Die Aufgabe in diesem Arbeitsschritt war es, anhand von ausgewählten Bindemitteln (vgl. 4.4) die Aussagekraft der zwei ausgewählten DSR-Methoden bezüglich des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen zu untersuchen. Hierzu wurden diese Bindemittel mittels PP04 und SRV im DSR sowie im BBR und mit dem Zug-Retardationsversuch untersucht.

Temperatur [°C]	25/55-55A		40/100-65A		15/25 VL	
	\emptyset ([G*]) [Pa]	σ ([G*]) [%]	\emptyset ([G*]) [Pa]	σ ([G*]) [%]	\emptyset ([G*]) [Pa]	σ ([G*]) [%]
30	441.042	7,3	248.441	9,0	2.376.663	1,5
40	98.225	6,9	63.250	8,4	545.498	6,4
50	25.573	6,6	19.908	8,1	130.263	6,6
60	8.266	6,3	7.836	7,9	31.651	6,8
70	3.018	6,3	3.496	7,9	8.181	5,6
80	1.169	6,3	1.669	7,8	2.562	4,8
90	480	6,4	805	8,1	859	4,2
100	207	6,2	390	8,4	249	3,3
110	97	6,1	185	8,8	73	3,3
120	50	5,8	92	8,6	35	3,1
130	28	5,5	52	8,1	19	2,8
140	16	4,9	32	8,0	11	2,8
150	10	4,6	20	7,6	6	2,9
\emptyset		6,1		8,2		4,1

Tab. 5-10: Mittelwerte und Standardabweichungen der komplexen Schermodule [G*] aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP25

5.4.1 Validierung der Messverfahren mit einem zweiten Prüfer

Zur Überprüfung des Einflusses des Prüfenden, wurden an zehn Bindemitteln Doppelbestimmungen mit der PP04-Messgeometrie und dem SRV im DSR durchgeführt. In Tabelle 5-11 bis Tabelle 5-15 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

In Tabelle 5-11 sind die REL_{SRV} von Laborant 1 (L1) und Laborant 2 (L2), deren Mittelwert sowie die prozentuale Spannweite bezogen auf diesen Mittelwert aufgeführt. Die sich hierbei ergebenden Rangfolgen, sortiert nach Laborant 1, sind in Bild 5-30 dargestellt.

Analog zum REL_{SRV} sind in Tabelle 5-12 die von den beiden Laboranten bestimmten Relaxationsviskositäten, deren Mittelwerte und die auf diesen bezogenen prozentualen Spannweiten der beiden Ergebnisse aufgeführt. Die sich hierbei ergebenden Rangfolgen, sortiert nach Laborant 1, sind in Bild 5-31 dargestellt.

In Bild A30 und Bild A31 im Anhang sind die Ergebnisse der beiden Laboranten gegeneinander aufgetragen, hierbei hat die Ausgleichsgerade durch den Ursprung bei der Relaxationsviskosität eine Steigung von 1,07 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,94 und die Gerade beim REL_{SRV} hat eine Steigung von 0,9 bei einem Korrelationskoeffizienten von 0,95.

Bindemittelbezeichnung	REL_{SRV} L1 [%]	REL_{SRV} L2 [%]	$\emptyset REL_{SRV}$ [%]	ΔREL_{SRV} [%]
20/30 B	1,65	1,71	1,68	3,9
25/45 VL	1,58	1,65	1,61	4,8
25/55-55A B	0,59	0,84	0,71	34,0
30/45 B	1,13	0,85	0,99	27,8
40/100-65A E	0,89	0,97	0,93	9,3
40/100-65A B	0,69	0,59	0,64	16,0
50/70 B-2	0,60	0,41	0,50	39,0
70/100 B	0,41	0,35	0,38	15,2
160/220	0,11	0,12	0,11	8,3
15/25 VL	2,95	3,49	3,22	16,8
Mittelwert				17,5

Tab. 5-11: Einfluss des Prüfenden auf die Kenngröße REL_{SRV}

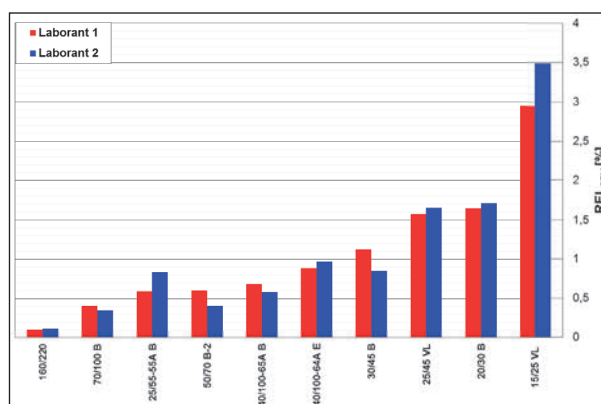


Bild 5-30: REL_{SRV} der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1

Zur Auswertung der Vergleichsuntersuchungen der beiden Laboranten mit der PP04-Messgeometrie werden die Phasenwinkel und der komplexe Schermodul bei -20 °C jeweils bei einer Frequenz von

Bindemittel-bezeichnung	$\lambda_{\text{Rel L1}}$ [kPa min]	$\lambda_{\text{Rel L2}}$ [kPa min]	$\varnothing \lambda_{\text{Rel}}$ [kPa min]	$\Delta \lambda_{\text{Rel}}$ [%]
20/30 B	308,8	265,8	287,3	15,0
25/45 VL	285,5	201,6	243,6	34,4
25/55-55A B	93,2	109,2	101,2	15,8
30/45 B	189,7	127,7	158,7	39,1
40/100-65A E	81,0	81,4	81,2	0,5
40/100-65A B	73,2	60,6	66,9	18,8
50/70 B-2	93,9	60,6	77,3	43,0
70/100 B	60,1	43,2	51,7	32,6
160/220	12,5	16,8	14,6	29,5
15/25 VL	512,6	527,9	520,3	2,9
Mittelwert				23,2

Tab. 5-12: Einfluss des Prüfenden auf die Kenngröße Relaxationsviskosität (λ_{Rel}) beim SRV

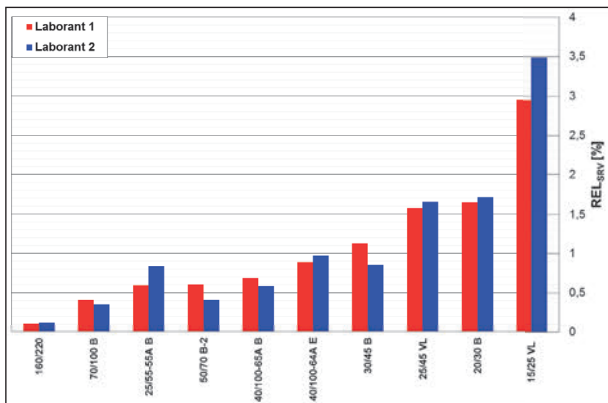


Bild 5-31: Relaxationsviskositäten der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1 (links) und Laborant 2 (rechts)

Bindemittel-bezeichnung	δ 0,01 Hz -20°C L1 [°]	δ 0,01 Hz -20°C L2 [°]	$\varnothing \delta$ 0,01 Hz -20°C [°]	$\Delta \delta$ 0,01 Hz -20°C [°]
20/30 B	17,4	16,5	17,4	0,9
25/45 VL	16,3	16,9	16,3	0,6
25/55-55A B	20,7	21,4	20,7	0,8
30/45 B	19,1	20,8	19,1	1,7
40/100-65A E	23,0	23,7	23,0	0,8
40/100-65A B	23,4	23,8	23,4	0,4
50/70 B-2	23,1	24,0	23,1	0,9
70/100 B	24,4	26,4	24,4	2,1
160/220	30,7	31,7	30,7	1,0
15/25 VL	15,1	15,8	15,1	0,6
Mittelwert				1,0

Tab. 5-13: Einfluss des Prüfenden auf den Phasenwinkel bei -20 °C und 0,01 Hz mit der PP04-Messgeometrie

0,01 Hz sowie die Summen der Phasenwinkel bei -20, -10 und 0 °C ebenfalls bei 0,01 Hz herangezogen. In der Tabelle 5-13 sind analog zum Vorgehen beim SRV die von den beiden Laboranten bestimm-

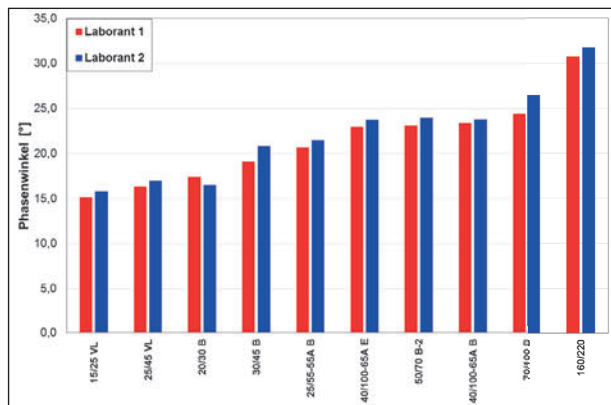


Bild 5-32: Phasenwinkel der zehn untersuchten Bindemittel bei -20 °C und 0,01 Hz aufsteigend sortiert nach Laborant 1

Bindemittel-bezeichnung	$\Sigma \delta$ 0,01 Hz -20 bis 0 °C L1 [°]	$\Sigma \delta$ 0,01 Hz -20 bis 0 °C L2 [°]	$\varnothing \Sigma \delta$ 0,01 Hz -20 bis 0 °C [°]	$\Delta \Sigma \delta$ 0,01 Hz -20 bis 0 °C [°]
20/30 B	87,521	83,79	87,5	3,7
25/45 VL	85,466	85,85	85,5	0,4
25/55-55A B	101,091	101,508	101,1	0,4
30/45 B	95,117	98,29	95,1	3,2
40/100-65A E	100,333	99,599	100,3	0,7
40/100-65A B	104,413	105,865	104,4	1,5
50/70 B-2	108,848	111,863	108,8	3,0
70/100 B	117,143	120,311	117,1	3,2
160/220	73,008	74,203	73,0	1,2
15/25 VL	140,887	142,649	140,9	1,8
Mittelwert				1,9

Tab. 5-14: Einfluss des Prüfenden auf die Summe der Phasenwinkel von -20, -10 und 0 °C bei 0,01 Hz mit der PP04-Messgeometrie

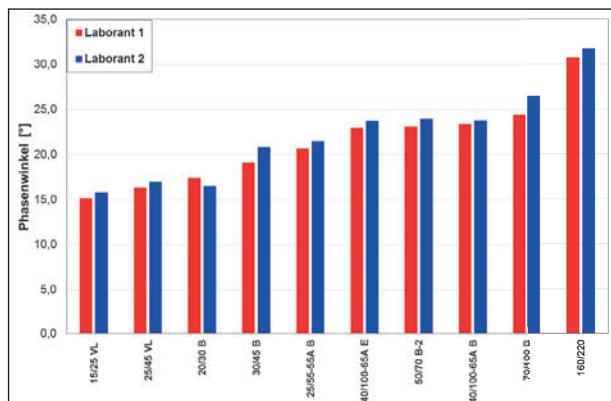


Bild 5-33: Summe der Phasenwinkel bei -20, -10 und 0 °C mit 0,01 Hz der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1

ten Phasenwinkel δ , deren Mittelwert sowie die Spannweite der beiden Ergebnisse aufgeführt. Das Bild 5-32 zeigt die sich aus den Phasenwinkeln ergebenden Rangfolgen gemäß Laborant 1.

In Tabelle 5-14 sind die Summe der Phasenwinkel beider Laboranten zusammengestellt. Die entsprechenden Rangfolgen für die Summen der Phasenwinkel sind in Bild 5-33 abgebildet. In Tabelle 5-15 sind abschließend die von den beiden Laboranten ermittelten komplexen Schermoduln, deren Mittelwert sowie die auf diesen bezogene prozentuale Spannweite aufgeführt.

Im Anhang (Bild A32, Bild A33 und Bild A34) sind die Ergebnisse aus Tabelle 5-13, Tabelle 5-14 und Tabelle 5-15 gegeneinander aufgetragen, die durch den Ursprung laufenden Ausgleichsgeraden haben eine Steigung von 0,96 beim Phasenwinkel (δ), 0,99 bei $\Sigma(\delta)$ und 1,12 bei $|G^*|$. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten betragen 0,98 bei Betrachtung des Phasenwinkels δ bei -20 °C, 0,99 bei Betrachtung der Summe der Phasenwinkel ($\Sigma(\delta)$) und 0,87 bei $|G^*|$.

Die Spannweiten zwischen den Ergebnissen von zwei unterschiedlichen Prüfern, sind wie zu erwarten größer als innerhalb einer Doppelbestimmung eines Prüfers. Allerdings konnten besonders bei der PP04 die schlechten Erfahrungen von z. B. [SCHÄFFLER et al., 2015] nicht bestätigt werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass beide Verfahren noch relativ neu sind und somit die Prüfenden nur wenig Übung besitzen, liegen die Ergebnisse von beiden Verfahren im akzeptablen Bereich. Dies wird auch durch die nur geringen Änderungen bei den qualitativen Rangfolgen bestätigt.

5.4.2 Validierung mit den Ergebnissen der BBR-Untersuchungen

Aus den Untersuchungsergebnissen mit dem BBR werden die Temperaturen bei einer Biegekrechsteifigkeit von $S = 300$ MPa und einem m-Wert von 0,3

Bindemittelbezeichnung	$ G^* $ 0,01 Hz -20°C L1 [Pa]	$ G^* $ 0,01 Hz -20°C L2 [Pa]	$\delta G^* $ 0,01 Hz -20°C [Pa]	$\Delta G^* $ 0,01 Hz -20°C [%]
20/30 B	278.480.000	282.755.000	278.480.000	1,5
25/55-55A C	251.504.000	238.062.000	251.504.000	5,3
25/55-55A B	212.678.000	175.849.000	212.678.000	17,3
30/45 B	240.853.000	176.216.000	240.853.000	26,8
40/100-65A E	127.004.000	114.759.000	127.004.000	9,6
40/100-65A B	135.146.000	127.280.000	135.146.000	5,8
50/70 B	178.238.000	129.280.000	178.238.000	27,5
70/100 B	156.784.000	116.907.000	156.784.000	25,4
160/220	101.206.200	78.253.300	101.206.200	22,7
15/25 VL	318.958.000	288.659.000	318.958.000	9,5
Mittelwert				15,2

Tab. 5-15: Einfluss des Prüfenden auf den komplexen Schermodul bei -20 °C und 0,01 Hz mit der PP04-Messgeometrie

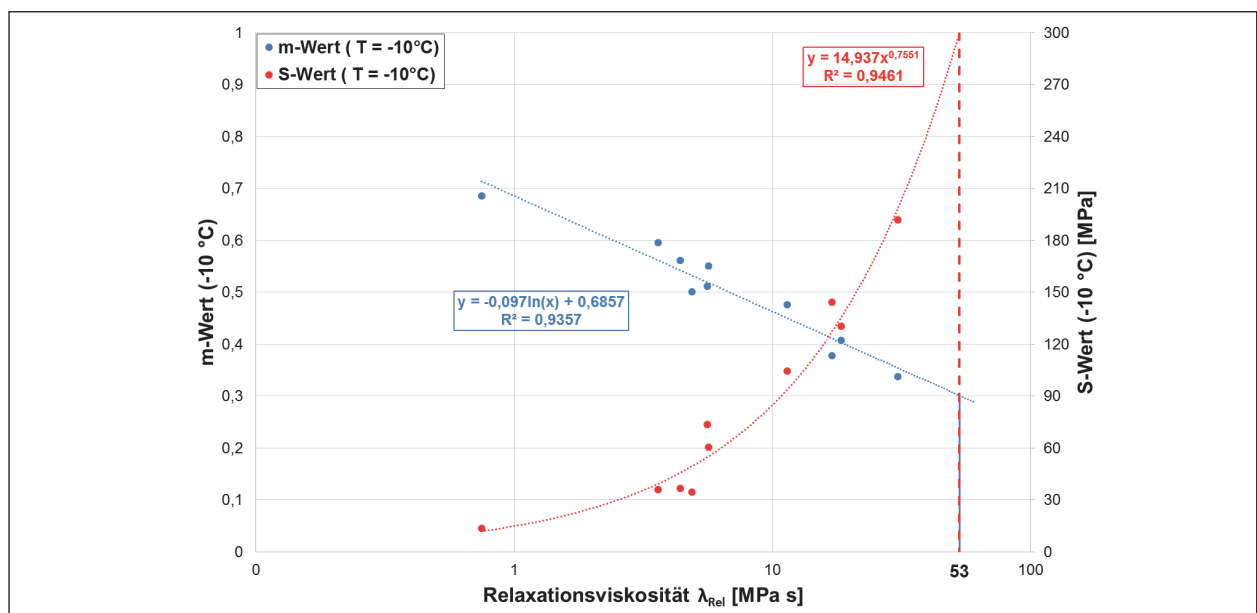


Bild 5-34: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} und den Ergebnissen der BBR-Untersuchung

bestimmt. Weiterhin können die Biegekriechsteifigkeit und der m-Wert bei einer bestimmten Temperatur mithilfe der Regressionsgeraden berechnet werden (vgl. Kapitel 5.1.1).

In Bild 5-34 sind die Korrelationen der zehn untersuchten Bindemittel zwischen dem m- bzw. S-Wert bei -10 °C und der Relaxationsviskosität des SRVs dargestellt. Für beide Messgrößen der BBR-Untersuchung bestehen sehr deutliche Zusammenhänge mit dem Ergebnis des SRV. Die Korrelationskoeffizienten betragen 0,94 für den m-Wert sowie 0,95 für den S-Wert. Weiterhin wurden unter Verwendung der Regressionskurven die Grenzwerte der BBR-Untersuchung auf die Relaxationsviskosität zurückgerechnet. Hierbei ergibt sich für $m = 0,3$ und $S = 300$ MPa (jeweils bei -10 °C) eine Relaxationsviskosität von 53 MPa s. Dieser Wert liegt zwischen den beiden in Kapitel 5.2 genannten kritischen Werten und bestätigt somit die bisherigen Ergebnisse.

Auch die anderen Kenngrößen zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen, welche mit dem SRV bestimmt werden können (z. B. REL_{SRV}) besitzen gute Korrelationen ($R^2 > 0,8$) zu den mit dem BBR bestimmten m- und S-Werten bei -10 °C (vgl. Bild A35 im Anhang).

Die Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Untersuchung mit der PP04 (Summe der Phasenwinkel von -20 °C bis 0 °C) und der BBR-Untersuchung (T von $m = 0,3$ sowie $S = 300$ MPa) sind in Bild 5-35 dargestellt. Hierbei ist die logarithmische Korrelation zwischen den Temperaturen bei einem m-Wert von 0,3 und den Summen der Phasenwinkel mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,96 ebenfalls sehr hoch und deutlich besser als zwischen den Temperaturen bei einer Biegekrechsteifigkeit von 300 MPa und den Summen der Phasenwinkel ($R^2 = 0,76$). Dieser Unterschied liegt in der

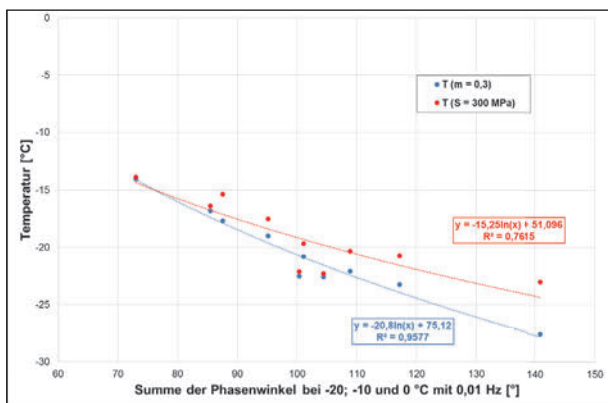


Bild 5-35: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der BBR-Untersuchung

Bedeutung der Kenngrößen, da m-Wert und Phasenwinkel zur Beurteilung der Viskosität von Bindemitteln genutzt werden, während S-Wert und komplexer Schermodul die Steifigkeit beschreiben.

Aus diesen Ergebnissen wird deutlich, dass sowohl der SRV als auch die Untersuchung mittels PP04 geeignet sind, die Bindemittleigenschaften im Tieftemperaturbereich auf demselben Niveau zu beschreiben wie die BBR-Untersuchung.

5.4.3 Validierung mit den Ergebnissen des Zug-Retardationsversuchs

In Kapitel 5.2.5 sind die aus den Einzelmessungen der Zug-Retardationsversuche errechneten Regressionsgeraden dargestellt. Neben der Zugviskosität (λ_z), ist die Steigung (b) dieser Regressionsgeraden gemäß [BOMMERT, 2017] ein Kennwert zur Beurteilung des Tief-Temperaturverhaltens. Mithilfe dieser Regressionsgeraden besteht die Möglichkeit, die Zugviskosität des Bindemittels bei einer gewünschten Temperatur zu berechnen. Zur Gegenüberstellung der Zug-Retardationsversuche mit den

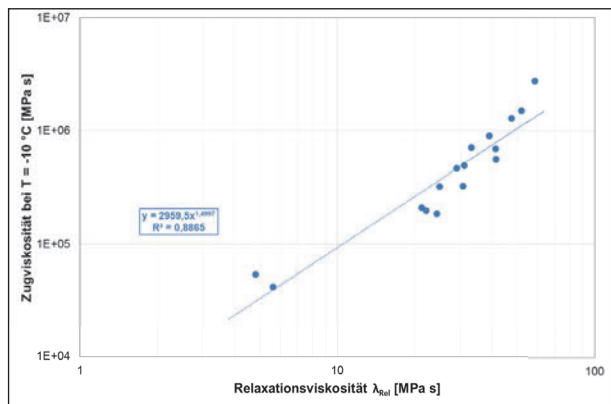


Bild 5-36: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} des SRVs und der Zugviskosität bei -10 °C des Zug-Retardationsversuchs

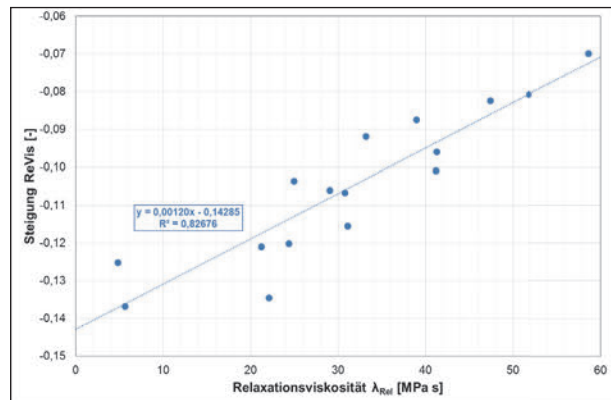


Bild 5-37: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} des SRVs und der Steigung der Regressionsgeraden des Zug-Retardationsversuchs

Scher-Relaxationsversuchen wurde die Zugviskosität für eine Prüftemperatur von -10 °C berechnet. In Bild 5-36 ist diese berechnete Zugviskosität gegen die Relaxationsviskosität aufgetragen. Zu beachten ist hierbei die logarithmische Skalierung der beiden Achsen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,89 besteht ein sehr guter Zusammenhang zwischen diesen beiden Kenngrößen. In Bild 5-37 ist die Korrelation zwischen der Steigung der Regressionsgeraden und der Relaxationsviskosität dargestellt. Hier ist der Korrelationskoeffizient mit 0,83 etwas schlechter, aber immer noch im guten Bereich.

In Bild 5-38 ist der Zusammenhang zwischen Zugviskosität bestimmt mit dem Zug-Retardationsversuch und Phasenwinkel bestimmt mit der PP04 dar-

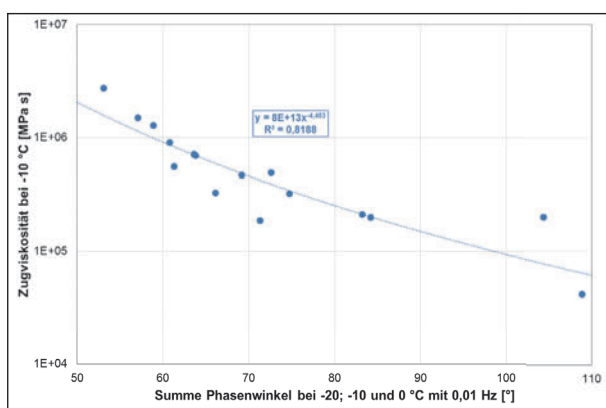


Bild 5-38: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der Zugviskosität bei -10 °C des Zug-Retardationsversuchs

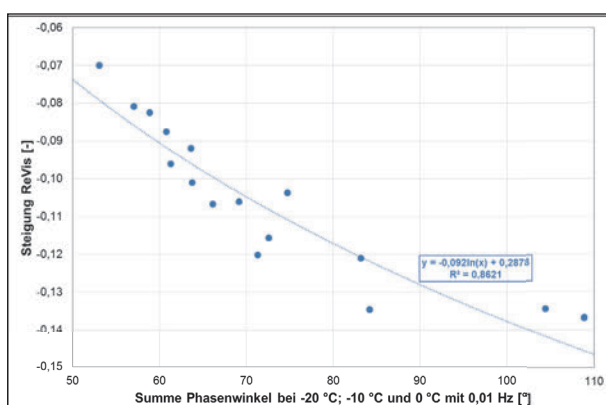


Bild 5-39: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der Steigung der Regressionsgeraden des Zug-Retardationsversuchs

gestellt. Dieser ist mit $R^2 = 0,82$ noch im guten Bereich. Die Korrelation zwischen der Steigung der Regressionsgeraden und der Summe der Phasenwinkel, welche in Bild 5-39 dargestellt ist, liegt mit 0,86 im guten Bereich.

Die Validierung mit dem Zug-Retardationsversuch bestätigt die Ergebnisse aus dem Kapitel 5.4.2, dass sowohl der SRV als auch die Untersuchung mittels PP04 geeignet sind, um das Kälteverhalten von Bitumen zu beurteilen.

5.4.4 Bewertung und Empfehlungen auf Grundlage der Validierung

Auf Grundlage aller im Laufe dieses Forschungsprojektes ermittelten Ergebnisse, der gewonnenen Erkenntnisse sowie der herausgearbeiteten Korrelationen zu anerkannten Prüfmethode zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen, werden die beiden DSR-Untersuchungsmethoden (PP04 und SRV) in diesem Kapitel bewertet.

Um eine möglichst objektive und transparente Empfehlung geben zu können, ist eine große Bandbreite an Bewertungskriterien zu verwenden. Hierzu zählen neben den Korrelationen zu anerkannten Prüfmethode, die Genauigkeit und der Einfluss der Prüfenden (Handhabung), die Versuchszeit, die Gebräuchlichkeit des Messsystems, das Differenzierungspotential sowie der wissenschaftliche Wert der Ergebnisse. In Tabelle 5-16 sind die Korrelationen zwischen den Kenngrößen aus den DSR-Untersuchungen und den Kenngrößen der BBR-Untersuchung und des Zug-Retardationsversuchs aus den Kapiteln 5.4.2 und 5.4.3 noch einmal zusammengefasst.

Anhand dieser Korrelationen wird deutlich, dass beide DSR-Methoden gute bis sehr gute Zusammenhänge mit den anderen Methoden haben. Tendenziell sind die Werte des SRV etwas besser als die mit der PP04 ermittelten Kennwerte.

Bei der Auswertung der Ergebnisse der Validierung mit einem zweiten Prüfer in Kapitel 5.4.1 ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Genauigkeit beider Verfah-

DSR	BBR				Zug-Retardationsversuch	
	T (m = 0,3)	T (S = 300)	m (-10 °C)	S (-10 °C)	λ_z (-10 °C)	b
$\sum \delta(-20; -10; 0)$	0,96	0,76	-	-	0,82	0,86
$\lambda_{Rel} = \int_0^{30} \tau dt$	-	-	0,94	0,95	0,89	0,83

Tab. 5-16: Zusammenfassung der Korrelationen zwischen den DSR-Methoden und den anerkannten Methoden

ren liegen in einem annehmbaren Bereich und beide Laboranten ermitteln mit beiden Prüfverfahren das 15/25 VL als einzig kritisch zu betrachtendes Bitumen bzgl. des Kälteverhaltens. Die Untersuchung mittels PP04 ist bei dieser vergleichenden Betrachtung etwas besser zu beurteilen. Dies ist bemerkenswert, da die Handhabung der Bitumenproben im Labor (Herstellung, Transport und Einbau) bei den Probekörpern mit 4 mm Durchmesser von den Prüfenden als allgemein schwieriger eingeschätzt wird, was beispielsweise auch auf dem Prozess des Trimmens beruht. An dieser Stelle sei erwähnt, dass beide Laboranten in diesem Vergleich alle zehn Proben konventionell getrimmt haben.

Ein für den Laboralltag wichtiges Beurteilungskriterium ist die Versuchszeit. Je kürzer ein Versuch ist, desto mehr Proben können untersucht und somit auch gegebenenfalls vorhandene Fehlmessungen schneller festgestellt oder wiederholt werden. Mit einer Versuchszeit von 7 h 30 min ist die Untersuchung mittels PP04 deutlich länger als der SRV mit 1 h 45 min.

Dies bedeutet bei einer Doppelbestimmung eines polymermodifizierten Bindemittels inklusive Probenvorbereitung und der Annahme eines achtstündigen Arbeitstages sowie der Einhaltung der Mindestlagerungsdauer von DSR-Proben gemäß [AL DSR-Prüfung (T-Sweep)], liegen die Ergebnisse der Untersuchung mittels PP04 frühestens am Nachmittag des dritten Tages vor. Beim SRV liegen die Ergebnisse spätestens am Mittag des zweiten Tages vor. Die Auswertungen der Ergebnisse haben gezeigt, dass die im SRV angesetzte 30-minütige Retardationsphase entbehrlich ist, wodurch sich eine Verkürzung der Gesamtversuchsdauer auf 1 h 15 min ergeben würde. Bei der Untersuchung mittels PP04 ist besonders bei weichen Bindemitteln die Messung bei Temperaturen $> 10\text{ °C}$ als kritisch zu bewerten, so dass die Versuchsdauer durch den Verzicht der Messtemperaturen 20 und 30 °C auf 5 h verkürzt werden kann. Weiterhin besteht die Möglichkeit der Teilwellenauswertung, dies würde die Versuchszeit ebenfalls verkürzen.

Ein weiteres für die Beurteilung der Praxistauglichkeit relevantes Kriterium ist die Verfügbarkeit der notwendigen Geräteausstattungen in den Prüflaboren. Die für den SRV notwendige PP08 gehört zur Standardausstattung eines DSRs, während die PP04-Einheit bei den meisten Prüflaboren angeschafft werden müsste. Allerdings ist die Verwendung der PP04 nicht ohne weiteres mit allen im

Markt vorhandenen DSR möglich, wie unter anderem in [WANG et al., 2019] beschrieben. Gegebenenfalls müssen dazu Nachgiebigkeits-Korrekturen vorgenommen werden. Auch die maximalen Drehmomente besonders älterer Geräte könnten die Anwendung der Methoden verhindern. Aus Sicht der Praxistauglichkeit ist daher der SRV zu bevorzugen.

Aus wissenschaftlicher Sicht, sind die beiden Methoden gleichwertig zu beurteilen. Mit dem SRV wird die Relaxationsviskosität bei einer Temperatur von -10 °C bestimmt, mit dieser Kenngröße der Relaxation ist eine direkte Beurteilung des Kälteverhaltens möglich. Bei der Untersuchung mittels PP04 wird eine oszillierende Beanspruchung auf die Probe aufgebracht, somit ist die Probe zwangsbeansprucht und nicht frei wie beim SRV, aufgrund der guten Korrelationen scheint allerdings eine Beurteilung des Kälteverhaltens mittels Phasenwinkel möglich, wozu allerdings eine sehr niedrige Frequenz (0,01 Hz) erforderlich zu sein scheint. Die in den Kapiteln 4.3 und 5.3 aufgeführten Rangfolgen sind ebenfalls vergleichbar. Weiterhin besteht die Möglichkeit mithilfe der Ergebnisse der Untersuchung mittels PP04-Masterkurven zu bestimmen und so das Verhalten des Bitumens im gesamten Temperaturbereich zu beschreiben. Somit liefert der SRV die für das Kälteverhalten relevantere Kenngröße, mittels PP04 ist allerdings eine wissenschaftlich tiefergehende Auswertung möglich.

Auf Grundlage dieser Bewertungskriterien wird abschließend, insbesondere aufgrund der besseren Praxistauglichkeit der SRV empfohlen, wobei Untersuchung mittels PP04 zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen grundsätzlich ebenfalls geeignet sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Prüfmethode zu entwickeln, die eine Charakterisierung der Eigenschaften von Bitumen und modifizierten Bitumen im Tieftemperaturbereich prozesssicher und mit moderatem Prüfaufwand ermöglicht. Die Methode soll eine Alternative zum BBR sein, wobei durch die Vorgabe des Prüfgerätes (DSR) eine im Vergleich zum BBR deutliche geringere Probenmenge unterstellt werden kann. Hierdurch wird eine einfachere

und schnellere Qualitätskontrolle angestrebt, welche einen wichtigen Beitrag zur Dauerhaftigkeit von Asphaltbefestigungen darstellt. Die verwendeten Prüfgeräte sollten hierbei modern, aber an hinreichend vielen Prüfstellen vorhandenen sein, was das DSR grundsätzlich leistet.

Aufbauend auf einer internationale Literaturrecherche wurden folgende vier Prüfverfahren ausgewählt, die diesen Rahmenbedingungen entsprechen:

- (1) Kälteprüfung mit der 8 mm Platte-Platte-Geometrie bei Kriechspannungen - Scher-Relaxationsversuch (SRV)
- (2) Kälteprüfung mit der 4 mm Platte-Platte-Geometrie (PP04)
- (3) Zug-Relaxationsversuch (ZRV)
- (4) Kälteprüfung an schlanken, zylindrischen Proben – dynamisch-mechanische Thermoanalyse (DMTA)

Zur Eingrenzung der Anzahl der Prüfverfahren, wurde das in Bild 1-1 dargestellte dreistufige Untersuchungsprogramm mit allen vier Verfahren durchgeführt. Hierzu wurden im ersten Schritt (Voruntersuchungen - UP1) zehn Bindemittel untersucht, welche eine möglichst große Bandbreite der im Markt üblichen Bitumen abdecken. Auf Grundlage der Ergebnisse dieses Untersuchungspaketes wurden in Absprache mit dem Betreuerkreis die beiden Prüfverfahren SRV (1) und PP04 (2) für die weiteren Untersuchungen ausgewählt.

Im Rahmen der Hauptuntersuchungen wurden 40 weitere Bindemittel mit den beiden Prüfverfahren untersucht, sodass anschließend für beide Methoden eine Datenbasis von 50 Bindemitteln vorlag. Unter diesen 40 zusätzlichen Bindemitteln waren neben im Labor gealterten Bitumen (verschiedene Kombinationen von RTFOT und PAV) und rückgewonnenen Bindemitteln aus Praxisstrecken mit langer Liegedauer (> 20 Jahre), auch rückgewonnene Bindemittel aus Strecken mit Kälterissen. Aus diesen Daten wurden Auswerteparameter abgeleitet, mit denen sich eine sinnvolle Reihung der untersuchten Bindemittel herleiten ließ. Zudem konnten anhand dieser Parameter Empfehlungen zur Bewertung der Kälteempfindlichkeit von Bitumen und modifizierten Bitumen gegeben werden.

Abschließend wurden die Ergebnisse der beiden Methoden in der Validierung (UP3 – Kapitel 5) un-

ter Verwendung des BBR und des Zug-Retardationsversuches überprüft. Mit den aus Zug-Retardationsversuchen noch vorhandenen Rückstellproben der BAST wurden im Zuge dieses Projektes insgesamt 72 Bindemittel mit dem SRV und der PP04 untersucht. Die Auswertung des SRVs erfolgte mit der Relaxationsviskosität λ_{Rel} gemäß Gleichung 11, welche in diesem Projekt als Alternative zum REL_{SRV} (vgl. Gleichung 8) nach [GEHRKE, 2017] eingeführt wurde. Zur Bewertung des Kälteverhaltens der Bindemittel mit der PP04, wurde die Summe der Phasenwinkel von -20 bis 0 °C als sinnvoller Bewertungsparameter gewählt. Die Korrelationen zu den beiden anderen Kälteprüfverfahren (BBR und ReVis) liegen auf sehr hohem Niveau. Neben der Vergleichbarkeit mit bekannten Prüfmethode, wurde im Zuge der Validierung auch der Einfluss des Prüfenden sowie der Lagerungsdauer der DSR-Probekörper analysiert. Aufbauend auf den Ergebnissen diesen Erkenntnissen wurden für beide Prüfmethode (SRV und PP04) kritische Werte zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen und modifizierten Bitumen vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung aller Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt (vgl. Kriterien-Beurteilung in Kapitel 5.4.4) wird der SRV als sehr praxistaugliche, stark differenzierend und hinreichend wissenschaftliche Prüfmethode zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen empfohlen.

Des Weiteren sollte in einem nächsten Schritt eine Arbeitsanleitung zum SRV formuliert und unter Verwendung von dieser ein Ringversuch durchgeführt werden. Hierbei sollten mindestens drei Bindemittel mit möglichst großen Unterschied in den Kälteeigenschaften einbezogen werden. Dabei könnten die Prüfstellen, die über die PP04-Geometrie verfügen, das Kälteverhalten der drei Bindemittel mit beiden Prüfmethode ermitteln. Ergänzende Prüfungen bis zu einer Temperatur von 150 °C wären ebenfalls wünschenswert, hierbei ist aufgrund der Erfahrungen aus diesem Forschungsprojekt eine dreigestaffelte Prüfung zu empfehlen (-20 bis 10 °C mit PP04, 0 bis 40 °C mit PP08 und 30 bis 150 °C mit PP25). Bei erfolgreichem Ergebnis des Ringversuches kann dann die Erstellung eines Technischen Regelwerkes der FGSV erfolgen.

Weiterhin sollten die Angaben zu den Lagerungsdauern der Bitumenproben für die Prüfung im DSR in den entsprechenden Regelwerken kritisch hinterfragt werden. Geänderte Werte mit besserer

Berücksichtigung der laborpraktischen Abläufe scheinen insbesondere für polymermodifizierte Bitumen zweckmäßig und wissenschaftlich begründet zu sein.

Literatur

- AL DSR-Prüfung (T-Sweep), 2014: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln im Dynamischen Scherrheometer (DSR) - Durchführung im Temperatursweep: FGSV Verlag, Köln.
- AL BBR-Prüfung, 2017: Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Verhaltens von Bitumen und bitumenhaltigen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen im Biegebalkenrheometer (BBR): FGSV Verlag, Köln.
- AASHTO T 313-12, 2012: Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR).
- AASHTO T 314-12, 2012: Standard Method of test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT).
- AASHTO T 315: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR), Washington, D.C.
- ARAND, Wolfgang; POHLMANN, Peter; DÖRSCHLAG, Siegfried (1988): Einfluss der Bitumenhärte auf das Ermüdungsverhalten von Asphaltbefestigungen unterschiedlicher Dicke in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Unterlage, der Verkehrsbelastung und der Temperatur. FE 07.120 G 85 K. Braunschweig, September 1988 (AG: Bundesanstalt für Straßenwesen, FE 07.120 G 85 K).
- BOMMERT, Franz (2017): Ansprache des Kälteverhaltens von Bitumen und Asphaltmörtel mit dem Zug-Retardationsversuch. In: FGSV - FGSV Verlag (Hg.): Vorträge der Tagung der Arbeitsgruppe „Asphaltbauweisen“. Asphaltstraßentagung 2017. Bamberg, 16./17. Mai. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. Köln: FGSV Verlag (Schriftenreihe der Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, FGSV A 43).
- BÜCHLER, Stephan; MOLLENHAUER, Konrad; RENKEN, Peter (2008): Einfluss von modifiziertem Bitumen auf die Kälte- und Ermüdungseigenschaften von Asphalt und deren Veränderung während der Nutzungsdauer. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH (Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, H. 991).
- CETINKAYA, Reha (2011): Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt. Dissertation. Bochum: Bochumer Universitätsverlag (Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau, 23).
- Deutscher Asphaltverband e. V. (2016): Der DAV präferiert das BBR zur Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen. Positionspapier.
- DIN EN 14770, August 2012: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR): Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12593, September 2015: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß: Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12697-46, Juli 2012: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen: Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 14771, August 2012: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der Biege- und Kriechsteifigkeit - Biegebalkenrheometer (BBR): Beuth Verlag, Berlin.
- ECKMANN, B.; MAZE, M.; LE HIR, Y.; HARDERS, O.; GAUTHIER, G. (2004): Checking Low Temperature Properties of Polymer Modified Bitumen. Is There a Future for the Fraass Breaking Point? In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress Vienna 2004, Paper 244, S. 1195–1211.
- FARRAR, Mike; SUI, Changping; SALMANS, Steve; QIN, Qian (2015): Determining the Low-Tem-

- perature Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Technical White Paper. Laramie, WY.
- FORBES, R. J. (1934): Aus der ältesten Geschichte des Bitumens (1934). In: Bitumen (1 - 3), 6-11;43-47;60-66.
- GEHRKE, Michael (2017): Komplexe Charakterisierung bitumenhaltiger Bindemittel anhand temperatur-, frequenz-, und belastungsabhängiger Kennwerte. Dissertation. Bochum (Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau, 27).
- HUGENER, Martin; BUENO, Moisés (2014): Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln. Bericht zum Forschungsprojekt VSS 2006/001. Zürich, November 2014.
- HUTSCHENREUTHER, Jürgen; WÖRNER, Thomas (1998 // 2010): Asphalt im Straßenbau // Asphalt im Strassenbau. 2. Aufl. Unter Mitarbeit von Thomas Wörner. Berlin: Verlag für Bauwesen; Kirschbaum Verlag GmbH.
- KORNAS, David (2016): Entwicklung und Validierung einer prozesssicheren Prüfmethode für bitumenhaltige Bindemittel und Asphaltmörtel an schlanken Probekörpern. Masterarbeit (unveröffentlicht). Unter Mitarbeit von Dominik Twer. Bochum, 2016.
- LAUKKANEN, Olli-Ville; WINTER, H. Henning; SOENEN, Hilde (2015): Rheological analysis of the low-temperature dynamics of bitumens (Annual Transactions of the Nordic Rheology Society, 23).
- LU, Xiaohu; UHLBACK, Petri; SOENEN, Hilde (2017): Investigation of bitumen low temperature properties using a dynamic shear rheometer with 4 mm parallel plates (10). In: International Journal of Pavement Research and Technology (1), S. 15–22.
- MEZGER, Thomas G. (2006): Rheologie Handbuch, 2. Auflage Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometer // Das Rheologie-Handbuch. Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern. 2., überarb. Aufl. Hannover: Vincentz Network.
- RADENBERG, Martin; GEHRKE, Michael; NYTUS, geb. Rube, Nina (2014): Literaturrecherche über den Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung von Bitumen und deren straßenbautechnischen Eigenschaften. FE 07.0273/2013/BRB. Bochum, 2014.
- RADENBERG, Martin; FLOTTMANN, Nina; DREWES, Bianca; KÖNIG, Markus; HILFERT, Thomas (2017): Datentechnische Erfassung und Auswertung von Prüfdaten und Erfahrungssammlung. Schlussbericht zum FE 29.0327/2013/BASSt (unveröffentlicht).
- RADENBERG, Martin; HOLZWARTH, Sören (2018): Untersuchungen eines praxisbezogenen Instrumentariums zur Bewertung der Rissicherheit von Gussasphalten. FE 07.0281/2014/DGB. Bergisch Gladbach, 2018.
- SCHÄFFLER, Michael; NILL, Tobias; SACK, Oliver; RÜCKERT, Philipp (2015): Ansprache des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen mit dem DSR. Untersuchung des frequenzabhängigen Verhaltens von fünf Straßenbaubitumen bei tiefen Gebrauchstemperaturen mit der Festkörpereinspannung und der PP04. Anwendungsbericht, 2015. Online verfügbar unter http://www.asphalta.de/prueflabor/downloads/DSR_PP04_SRF.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2018.
- SHELLENBERG, Kurt; EULITZ, Hans-Jörg (1995): Ansprache des Fließverhaltens von Bitumen und polymermodifizierten Bitumen bei tiefen Temperaturen. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft (Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, 695).
- SUI, Changping; FARRAR, Michael, J.; TUMINELLO, William H.; TURNER, Thomas F. (2010): A New Technique for Measuring Low-Temperature Properties of Asphalt Binders with Small Amounts of Material. Washington, D.C. (Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board), 2010 (2179).
- SUI, Changping; FARRAR, Michael, J.; HARNBERGER, P. Michael; TUMINELLO, William H.; TURNER, Thomas F. (2011): A New Low-temperature Performance Grading Method. Using 4 mm Parallel-plates on a DSR. Washington, D.C. (Transportation Research Re-

cord: Journal of the Transportation Research Board) (2207).

- WANG, Di; FALCHETTO, Augusto Cannone; ALLISOV, Alexander; SCHRADER, Johannes; RICCARDI, Chiara; WISTUBA, Michael P. (2019): An Alternative experimental Method for Measuring the low Temperature rheological Properties of Asphalt Binder by using 4-mm parallel Plates on Dynamic Shear Rheometer. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (3), S. 427–438.
- WIEHE, Irwin A.; LIANG, K. S. (1996): Asphaltenes, resins, and other petroleum macromolecules. Amsterdam: Elsevier Applied Science. In: Fluid Phase Equilibria (117), S. 201–210.
- WOLDEKIDAN, Milliyon Fekade (2011): Modelleren van het Responsgedrag van Bitumen, Bitumeneuze Mastiek en Mortel. Dissertation.
- ZENKE, Günther (1990): Stoffbestand und Verhalten von Straßenbaubitumen: Eine Übersicht zum Stande der Erkenntnisse (I). In: Bitumen (3), S. 101–110.

Bilder

- Bild 1-1: Ablauf des Forschungsprojektes im Fließdiagramm
- Bild 2-1: Zustandsbereiche und zugehörige rheologische Modelle von Bitumen in Anlehnung an [CETINKAYA, 2011; ZENKE, 1990; HUTSCHENREUTHER, WÖRNER, 1998 // 2010]
- Bild 2-2: Beispielhafter Amplitudentest von einer 4 mm-Probe eines mehrfach gealterten 50/70 bei -20 °C und 10 Hz
- Bild 2-3: Maxwell-Modell
- Bild 2-4: Zusammenhänge zwischen den rheologischen Kenngrößen
- Bild 3-1: Schema des ZRV Tab. 31: Versuchsparameter des Zug-Relaxationsversuchs
- Bild 3-2: Beispiel von sieben parallelgeschalteten Maxwell-Modellen zur Beschreibung des ZRVs eines Straßenbaubitumens 20/30
- Bild 3-3: Schema des SRV Tab. 32: Versuchsparameter des Scher-Relaxationsversuchs
- Bild 3-4: Zusammenhang zwischen dem m-Wert und dem Relaxations-Kennwert RELSRV, jeweils bei -10 °C [Gehrke, 2017]
- Bild 3-5: Beispielhafter Spannungs- und Deformationsverlauf des Scher-Relaxationsversuchs eines Straßenbaubitumens 20/30
- Bild 3-6: Schema der Messung mit Tab. 33: Versuchsparameter der Messung mit 4 mm-Messgeometrie
- Bild 3-7: Beispielhafter Verlauf von Phasenwinkel und komplexen Schermodul im Temperaturbereich von -20 bis 150 °C bestimmt mit PP04, PP08 und PP25
- Bild 3-8: Eingespannter Probekörper im Konvektionsofen
- Bild 3-9: Schema der DMTA Tab. 34: Versuchsparameter DMTA an schlanken zylindrischen Probekörpern
- Bild 3-10: Korrelation des komplexen Schermoduls zwischen DMTA und PP08-Messsystem [Kornas, 2016]
- Bild 3-11: Schlanke zylindrische Probekörper mit runden Metalladaptern
- Bild 3-12: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der vier verwendeten nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 3-13: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der drei verwendeten viskositätsveränderten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 3-14: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der drei verwendeten polymermodifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 3-15: Zehnfach-Bestimmung des ZRV mit dem Bitumen 20/30 inklusive Mittelwert
- Bild 3-16: ZRV der nicht modifizierten Bindemittel
- Bild 3-17: ZRV der viskositätsveränderten Bindemittel
- Bild 3-18: ZRV der polymermodifizierten Bindemittel

- Bild 3-19: Zehnfach-Bestimmung des SRV mit einem Bitumen 20/30 inklusive Mittelwert
- Bild 3-20: Deformationsabbau während des SRV bei der zehnfach-Bestimmung am Bitumen 20/30
- Bild 3-21: SRV der nicht modifizierten Bindemittel
- Bild 3-22: SRV der viskositätsveränderten Bindemittel
- Bild 3-23: SRV der polymermodifizierten Bindemittel
- Bild 3-24: Zehnfach-Bestimmung des T-Sweeps bei 1,59 Hz mittels PP04-Geometrie inklusive Ausreißer P6 und Mittelwert des Bitumen 20/30
- Bild 3-25: Frequenzschar aus den Mittelwerten der zehnfach-Bestimmung mittels PP04-Geometrie des Bitumen 20/30
- Bild 3-26: T-Sweep bei 1,59 Hz der nicht modifizierten Bindemittel mittels PP04-Geometrie
- Bild 3-27: T-Sweep bei 1,59 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel mittels PP04-Geometrie
- Bild 3-28: T-Sweep bei 1,59 Hz der polymermodifizierten Bindemittel mittels PP04-Geometrie
- Bild 3-29: Zehnfach-Bestimmung des T-Sweeps bei 1,59 Hz an Festkörpern inklusive Ausreißer P6 und Mittelwert des Bitumen 20/30
- Bild 3-30: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der nicht modifizierten Bindemittel
- Bild 3-31: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der viskositätsveränderten Bindemittel
- Bild 3-32: T-Sweep bei 1,59 Hz an Festkörpern der polymermodifizierten Bindemittel
- Bild 3-33: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 3-34: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 3-35: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 3-36: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 3-37: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP04-Messgeometrie bei 1,59 Hz.
- Bild 3-38: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der DMTA-08- und der PP04-Messgeometrie bei 1,59 Hz
- Bild 3-39: Gemessener (Punkte) und berechneter (Kästchen) Spannungsverlauf des ZRVs aller Bindemittel
- Bild 3-40: Gemessene und berechnete Restzugspannung σ_{60}
- Bild 3-41: Gemessene und berechnete REL_{ZRV}
- Bild 3-42: Gemessener (Punkte) und berechneter (Kästchen) Spannungsverlauf des SRVs aller Bindemittel
- Bild 3-43: Prozentualer Spannungsverlauf aller Bindemittel während des SRVs, bezogen auf die jeweilige Startspannung τ_0
- Bild 3-44: Gemessene und berechnete REL_{SRV}
- Bild 4-1: Foto (links) und Skizze der 4 mm-Gussform aus PTFE (rechts)
- Bild 4-2: Schema der Messung mit Tab. 4-2: Angepasste Versuchsparameter der Messung mit einer PP04-Messgeometrie einer PP04-Messgeometrie
- Bild 4-3: Neues Schema des SRV
- Bild 4-4: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen mittels PP04 mit Zeitvorgabe (gmZV) und ohne eines gealterten (RTFOT+2xPAV) 50/70 Straßenbaubitumens
- Bild 4-5: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen eines 20/30 Straßenbaubitumens mittels PP04 getrimmt und mit Gussform

- Bild 4-6: Frequenzscharen aus Doppelbestimmungen von Untersuchungen eines 50/70 Straßenbaubitumens mittels PP04 getrimmt und mit Gussform
- Bild 4-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines Straßenbaubitumens 30/45 (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 4-8: SRV der nicht modifizierten Bindemittel
- Bild 4-9: Frequenzscharen der PP04-Untersuchung des gealterten Bitumens 50/70 (50/70 RTFOT+2xPAV)
- Bild 4-10: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der nicht modifizierten Bindemittel mittels PP0460
- Bild 4-11: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten mittels PP04
- Bild 4-12: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 4-13: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 4-14: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln bis 45° ermittelt mit der PP04- und der PP08-Messgeometrie bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 4-15: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln bis zu einem Phasenwinkel von 45° ermittelt mit der PP04 und der PP08 im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 4-16: Phasenwinkel der 50 untersuchten Bindemittel bei -20 °C für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert
- Bild 4-17: Boxplot-Diagramme mit 25 %- und 5 %-Quantil der Phasenwinkel bei -20 °C und 0,01 Hz
- Bild 4-18: Summe der Phasenwinkel bei -20; -10 und 0 °C der 50 untersuchten Bindemittel für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert
- Bild 4-19: Boxplot-Diagramme mit 25 %- und 5 %-Quantil der Summe der Phasenwinkel von -20, -10 und 0 °C bei 0,01 Hz
- Bild 4-20: Gemessene und berechnete RELSRV der 50 untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert
- Bild 5-1: Probekörper für die Zug-Retardationsversuche
- Bild 5-2: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-3: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-4: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-5: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-6: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild 5-8: SRV der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel
- Bild 5-9: SRV der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel
- Bild 5-10: SRV diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung
- Bild 5-11: SRV mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung
- Bild 5-12: SRV mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung

- Bild 5-13: SRV mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung
- Bild 5-14: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der in UP3 verwendeten nicht modifizierten Bindemittel mittels PP04
- Bild 5-15: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der in UP3 verwendeten modifizierten Bindemittel mittels PP04
- Bild 5-16: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung mittels PP04
- Bild 5-17: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04
- Bild 5-18: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04
- Bild 5-19: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung mittels PP04
- Bild 5-20: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche diverser Bindemittel aus der BAST-Forschung
- Bild 5-21: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A aus der BAST-Forschung
- Bild 5-22: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % FTP modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung
- Bild 5-23: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche mehrerer Alterungsstufen eines mit 3 % PEW modifizierten 25/55-55A aus der BAST-Forschung
- Bild 5-24: Regressionsgeraden der Zug-Retardationsversuche eines 50/70 und eines 40/100-65A aus dem UP3
- Bild 5-25: T-Sweeps von allen Lagerungsdauern sowie der Mittelwert des Bindemittels 25/55-55A
- Bild 5-26: Korrelation zwischen den Phasenwinkeln aller untersuchten Bindemittel, ermittelt mit der PP04 und PP08 bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 5-27: Korrelation zwischen den komplexen Schermoduln aller untersuchten Bindemittel, ermittelt mit der PP04 und PP08 bei 1,59 Hz im Temperaturbereich von -10 bis 30 °C
- Bild 5-28: Summen der Phasenwinkel bei -20; -10 und 0 °C aller mit der PP04 untersuchten Bindemittel für 0,01 Hz und 1,59 Hz aufsteigend sortiert
- Bild 5-29: Relaxationsviskositäten aller untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert
- Bild 5-30: RELSRV der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1
- Bild 5-31: Relaxationsviskositäten der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1 (links) und Laborant 2 (rechts)
- Bild 5-32: Phasenwinkel der zehn untersuchten Bindemittel bei -20 °C und 0,01 Hz aufsteigend sortiert nach Laborant 1
- Bild 5-33: Summe der Phasenwinkel bei -20, -10 und 0 °C mit 0,01 Hz der zehn untersuchten Bindemittel aufsteigend sortiert nach Laborant 1
- Bild 5-34: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} und den Ergebnissen der BBR-Untersuchung
- Bild 5-35: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der BBR-Untersuchung
- Bild 5-36: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} des SRVs und der Zugviskosität bei -10 °C des Zug-Retardationsversuchs
- Bild 5-37: Korrelation zwischen der Relaxationsviskosität λ_{Rel} des SRVs und der Steigung der Regressionsgeraden des Zug-Retardationsversuchs

- Bild 5-38: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der Zugviskosität bei -10 °C des Zug-Retardationsversuchs
- Bild 5-39: Korrelation zwischen der Untersuchung mittels PP04 im DSR und der Steigung der Regressionsgeraden des Zug-Retardationsversuchs
- Bild A- 1: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-2: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-3: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der polymermodifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-4: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-5: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa). 120
- Bild A-6: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 1) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 2) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-8: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 3) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-9: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben mit Liegedauern > 20 Jahren (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-10: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus Asphalt mit Rejuvenator-Zugabe (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)
- Bild A-11: SRV des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten
- Bild A-12: SRV des Bindemittels 30/45 mit mehreren Alterungsstufen
- Bild A-13: SRV der polymermodifizierten Bindemittel
- Bild A-14: SRV des Bindemittels 25/55-55A mit mehreren Alterungsstufen
- Bild A-15: SRV der viskositätsveränderten Bindemittel
- Bild A-16: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 1)
- Bild A-17: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 2)
- Bild A-18: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 3)
- Bild A-19: SRV der rückgewonnenen Bindemittel aus Praxisstrecken mit Liegezeiten > 20 Jahren
- Bild A-20: SRV der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphalt mit Rejuvenator-Zugabe
- Bild A-21: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 30/45 mit mehreren Alterungsstufen mittels PP04
- Bild A-22: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der polymermodifizierten Bindemittel mittels PP04
- Bild A-23: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 25/55-55A mit mehreren Alterungsstufen mittels PP04
- Bild A-24: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel mittels PP04
- Bild A-25: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 1 mittels PP04

- Bild A-26: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 2 mittels PP04
- Bild A-27: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 3 mittels PP04
- Bild A-28: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus Praxisstrecken mit Liegezeiten > 20 Jahren mittels PP04
- Bild A-29: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphalten mit Rejuvenator-Zugabe mittels PP04
- Bild A-30: Korrelation der Relaxationsviskosität zwischen den beiden Laboranten
- Bild A-31: Korrelation von RELSRV zwischen den beiden Laboranten
- Bild A-32: Korrelation zwischen den beiden Laboranten beim Phasenwinkel gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20°C
- Bild A-33: Korrelation zwischen den beiden Laboranten bei der Summe der Phasenwinkel gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20; -10 und 0 °C
- Bild A-34: Korrelation zwischen den beiden Laboranten beim komplexen Schermodul gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20°C
- Bild A-35: Korrelation zwischen dem RELSRV und den Ergebnissen der BBR-Untersuchungen
- Tab. 3-6: Applikationstemperaturen der viskositätsveränderten Bindemittel
- Tab. 3-7: Applikationstemperaturen der polymermodifizierten Bindemittel
- Tab. 3-8: Statistische Kenngrößen der Zug-Relaxationsversuche
- Tab. 3-9: Statistische Kenngrößen des Scher-Relaxationsversuches
- Tab. 3-10: Standardabweichung (\emptyset ; Min.; Max.) der Untersuchungen mit der PP04-Geometrie bei 1,59 Hz
- Tab. 3-11: Standardabweichung (\emptyset ; Min.; Max.) der DMTA mit der Festkörpergeometrie
- Tab. 3-12: Rangfolge des Kälteverhaltens der untersuchten Bindemittel in den vier Untersuchungsmethoden
- Tab. 4-1: Zusätzlich verwendete Bindemittelsorten in den Hauptuntersuchungen
- Tab. 4-2: Angepasste Versuchsparameter der Messung mit einer PP04-Messgeometrie
- Tab. 4-3: Angepasste Versuchsparameter des Scher-Relaxationsversuchs für UP2
- Tab. 4-4: Applikationstemperaturen der 40 zusätzlichen Bindemittel für die Hauptuntersuchungen
- Tab. 4-5: Relaxationsvermögen der 40 zusätzlichen Bindemittel für die Hauptuntersuchungen
- Tab. 5-1: Untersuchungsumfang der Validierung
- Tab. 5-2: Versuchsumfang der Untersuchung zum Einfluss der Lagerungsdauer von DSR-Proben
- Tab. 5-3: Prüfbedingungen der Zug-Retardationsversuche
- Tab. 5-4: Applikationstemperaturen der in UP3 verwendeten Bindemittel
- Tab. 5-5: Relaxationsvermögen der in UP3 untersuchten Bindemittel
- Tab. 5-6: Ergebnisse der BBR-Untersuchungen der zehn für das UP3 ausgewählten Bindemittel

Tabellen

- Tab. 1-1: Verwendete Bitumensorten in den Voruntersuchungen
- Tab. 3-1: Versuchsparameter des Zug-Relaxationsversuchs
- Tab. 3-2: Versuchsparameter des Scher-Relaxationsversuchs
- Tab. 3-3: Versuchsparameter der Messung mit 4 mm-Messgeometrie
- Tab. 3-4: Versuchsparameter DMTA an schlanken zylindrischen Probekörpern
- Tab. 3-5: Applikationstemperaturen der nicht modifizierten Bindemittel

- Tab. 5-7: Mittelwerte und Standardabweichungen der Phasenwinkel (δ) aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP08
- Tab. 5-8: Mittelwerte und Standardabweichungen der Phasenwinkel (δ) aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP25
- Tab. 5-9: Mittelwerte und Standardabweichungen der komplexen Schermodule $|G^*|$ aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP08
- Tab. 5-10: Mittelwerte und Standardabweichungen der komplexen Schermodule $|G^*|$ aller Lagerungsdauern untersucht mit der PP25
- Tab. 5-11: Einfluss des Prüfenden auf die Kenngröße REL_{SRV}
- Tab. 5-12: Einfluss des Prüfenden auf die Kenngröße Relaxationsviskosität (λ_{Rel}) beim SRV
- Tab. 5-13: Einfluss des Prüfenden auf den Phasenwinkel bei -20 °C und $0,01\text{ Hz}$ mit der PP04-Messgeometrie
- Tab. 5-14: Einfluss des Prüfenden auf die Summe der Phasenwinkel von -20 , -10 und 0 °C bei $0,01\text{ Hz}$ mit der PP04- Messgeometrie
- Tab. 5-15: Einfluss des Prüfenden auf den komplexen Schermodul bei -20 °C und $0,01\text{ Hz}$ mit der PP04-Messgeometrie
- Tab. 5-16: Zusammenfassung der Korrelationen zwischen den DSR-Methoden und den anerkannten Methoden
- Tab. A-1: Versuchsablauf 4 mm-Messgeometrie Voruntersuchungen
- Tab. A-2: Versuchsablauf 4 mm-Messgeometrie Hauptuntersuchungen
- Tab. A-3: Statistische Kenngrößen des Scher-Relaxationsversuches der Hauptuntersuchung
- Tab. A-4: Ergebnisse der einzelnen Zug-Retardationsversuche durchgeführt von der BAST
- Tab. A-5: Statistische Kenngrößen des SRVs aller 72 untersuchten Bindemittel

Anhang

Abschnittsdauer [s]	Temperatur [°C]	Prozess
900	30	Temperierung
270	30	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	30	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	30	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
80	30	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
900	20	Temperierung
270	20	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	20	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	20	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
80	20	8 Messpunkte: $f = 5,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
80	20	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
900	10	Temperierung
270	10	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	10	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	10	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
80	10	8 Messpunkte: $f = 5,0$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
80	10	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
900	0	Temperierung
270	0	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	0	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	0	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
80	0	8 Messpunkte: $f = 5,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
80	0	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
900	-10	Temperierung
270	-10	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	-10	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	-10	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
80	-10	8 Messpunkte: $f = 5,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
80	-10	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
900	-20	Temperierung
270	-20	6 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	-20	10 Messpunkte: $f = 1,0$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
150	-20	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
80	-20	8 Messpunkte: $f = 5,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
80	-20	8 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %

Tab. A-1: Versuchsablauf 4 mm-Messgeometrie Voruntersuchungen

Abschnittsdauer [s]	Temperatur [°C]	Prozess
1800	30	Temperierung
2250	30	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,75$ %
225	30	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	30	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
100	30	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
1800	20	Temperierung
2250	20	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,75$ %
225	20	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	20	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
100	20	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
1800	10	Temperierung
2250	10	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
225	10	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,5$ %
150	10	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
100	10	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
1800	0	Temperierung
2250	0	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,3$ %
225	0	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	0	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
100	0	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
1800	-10	Temperierung
2250	-10	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,3$ %
225	-10	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	-10	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,1$ %
100	-10	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
1800	-20	Temperierung
2250	-20	5 Messpunkte: $f = 0,01$ Hz und $\gamma = 0,3$ %
225	-20	5 Messpunkte: $f = 0,1$ Hz und $\gamma = 0,2$ %
150	-20	10 Messpunkte: $f = 1,59$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
100	-20	10 Messpunkte: $f = 10,0$ Hz und $\gamma = 0,05$ %
$\Sigma = 27150$	Das entspricht 7 h 32 min 30 s	

Tab. A-2: Versuchsablauf 4 mm-Messgeometrie Hauptuntersuchungen

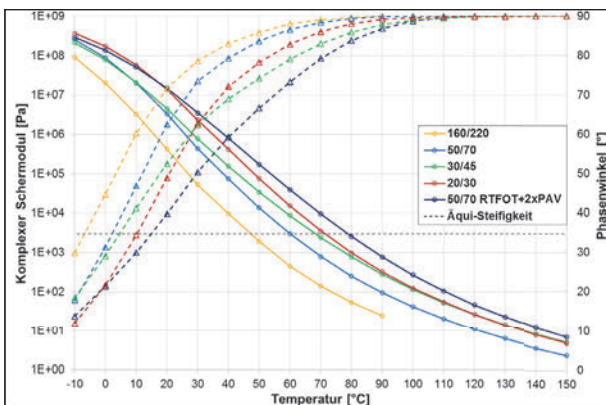


Bild A-1: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der nicht modifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

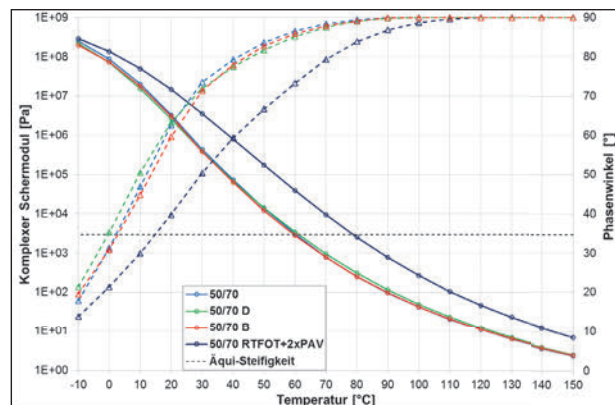


Bild A-2: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

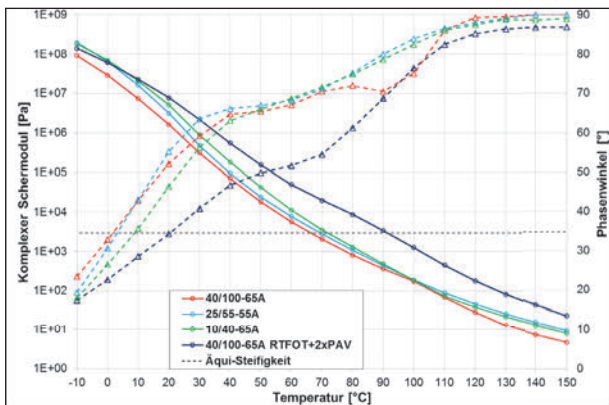


Bild A-3: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der polymermodifizierten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

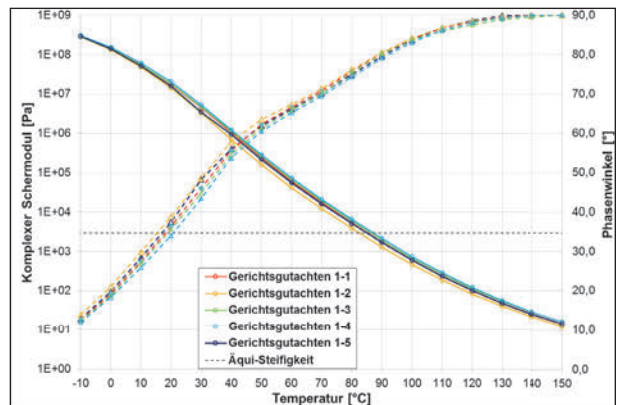


Bild A-6: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 1) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

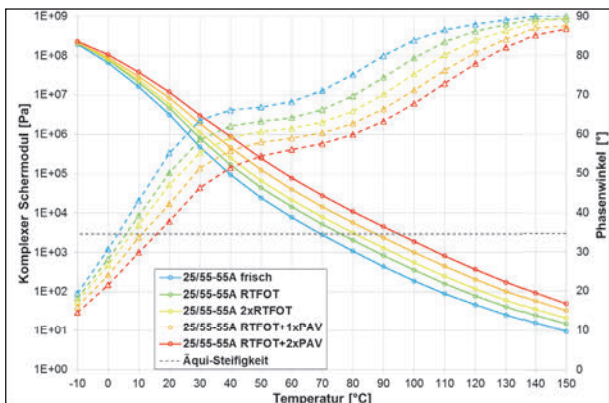


Bild A-4: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz mehrerer Alterungsstufen eines 25/55-55A (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

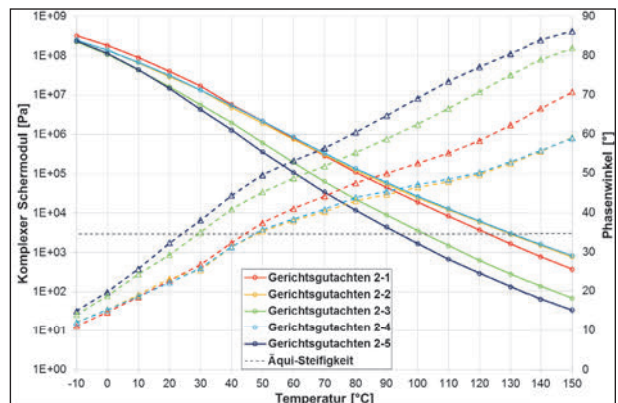


Bild A-7: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 2) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

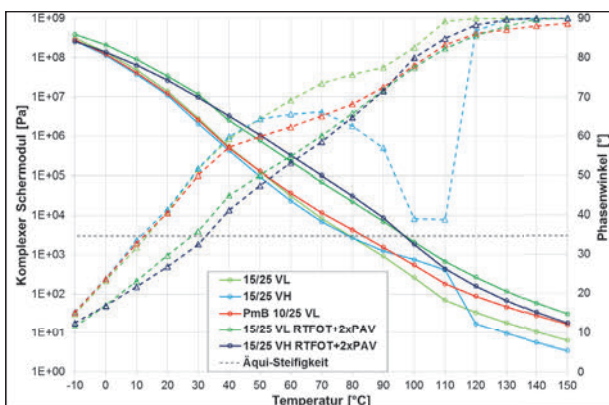


Bild A-5: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

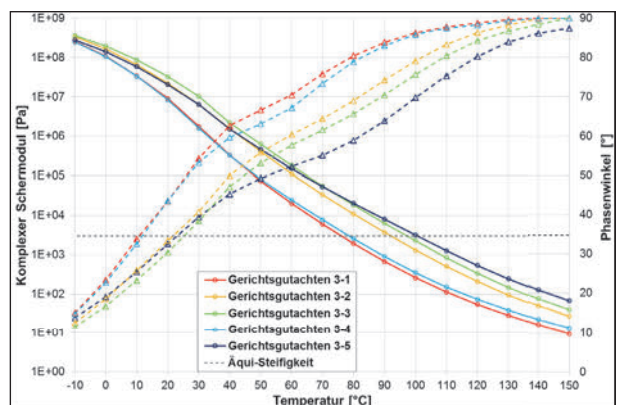


Bild A-8: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse – Gerichtsgutachten 3) (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

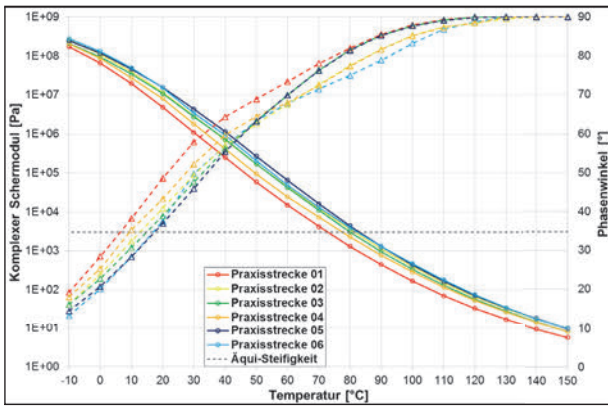


Bild A-9: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben mit Liegedauern > 20 Jahren (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

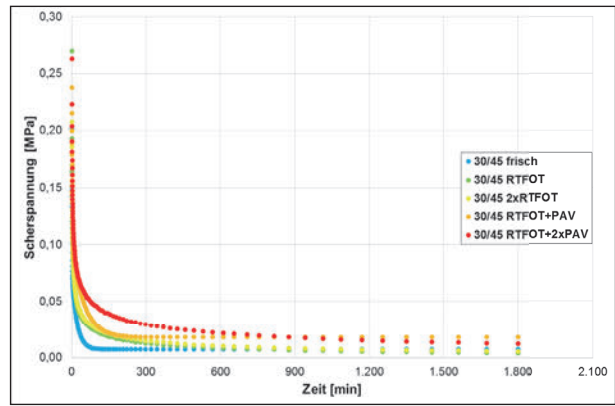


Bild A-12: SRV des Bindemittels 30/45 mit mehreren Alterungsstufen

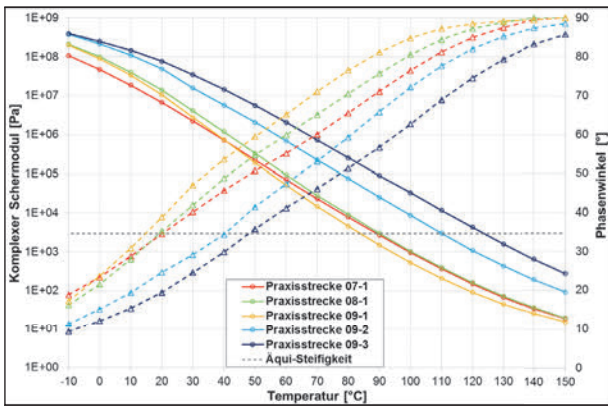


Bild A-10: Temperatur-Sweep bei 1,59 Hz von rückgewonnenen Bindemittelproben aus Asphalten mit Rejuvenator-Zugabe (inklusive Äqui-Steifigkeitstemperatur bei 3.000 Pa)

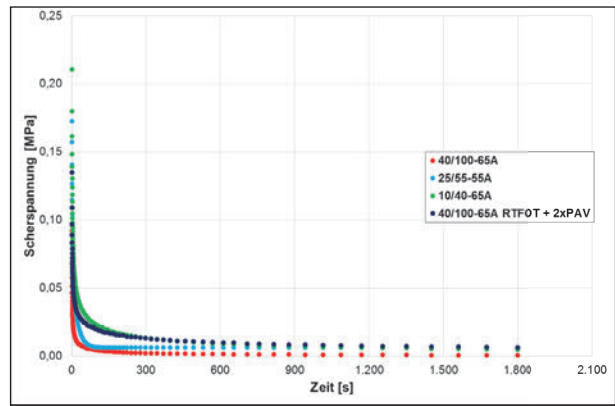


Bild A-13: SRV der polymermodifizierten Bindemittel

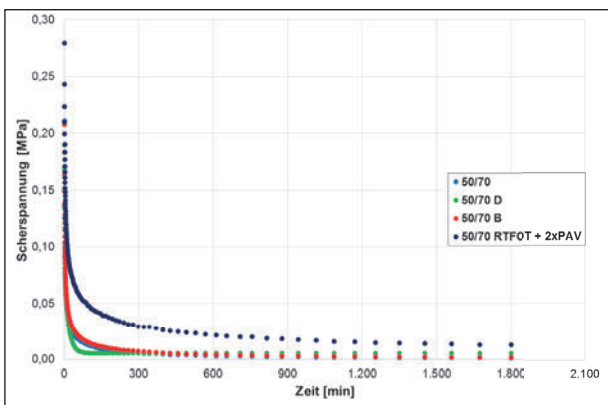


Bild A-11: SRV des Bindemittels 50/70 von drei verschiedenen Produzenten

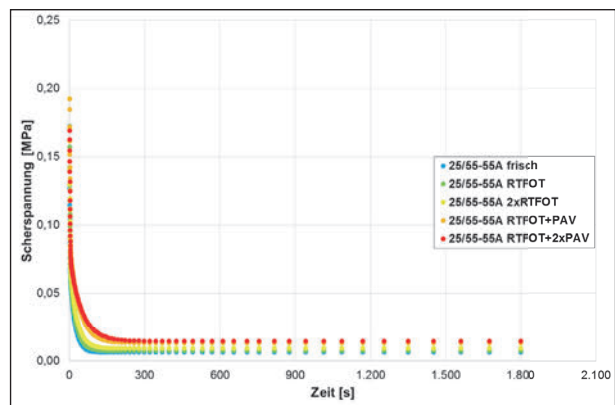


Bild A-14: SRV des Bindemittels 25/55-55A mit mehreren Alterungsstufen

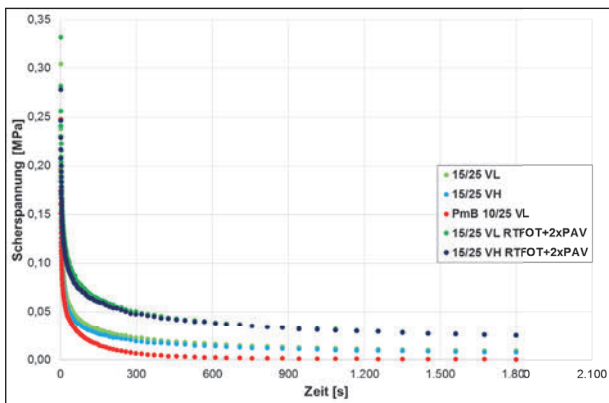


Bild A-15: SRV der viskositätsveränderten Bindemittel

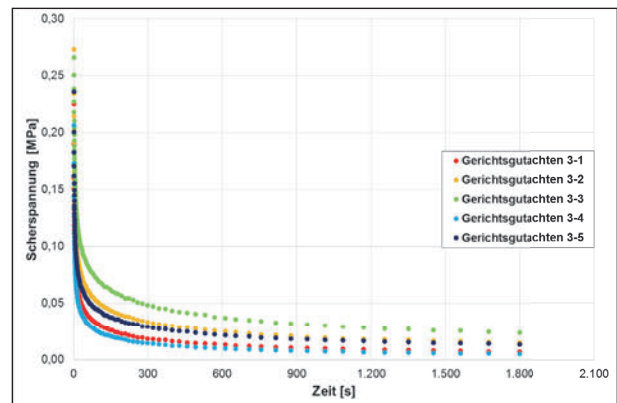


Bild A-18: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 3)

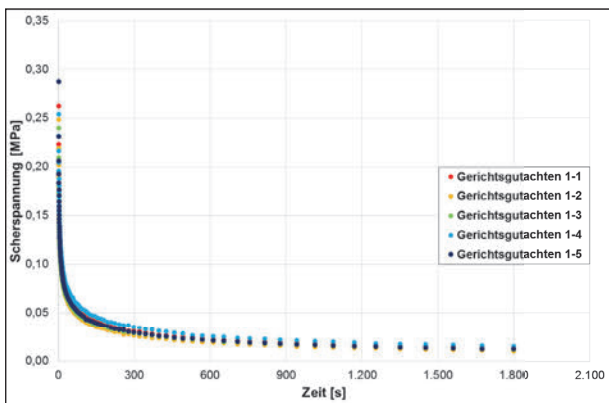


Bild A-16: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 1)

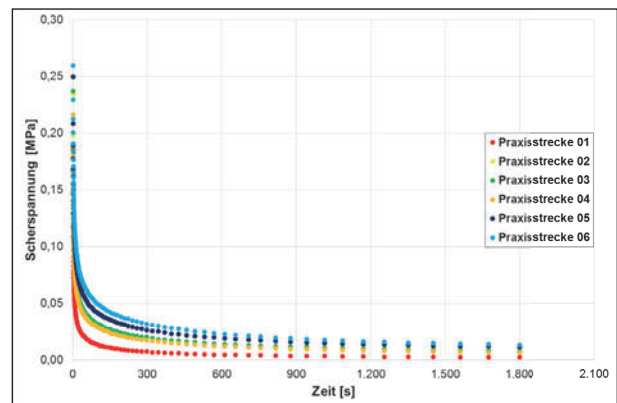


Bild A-19: SRV der rückgewonnenen Bindemittel aus Praxisstrecken mit Liegezeiten > 20 Jahren

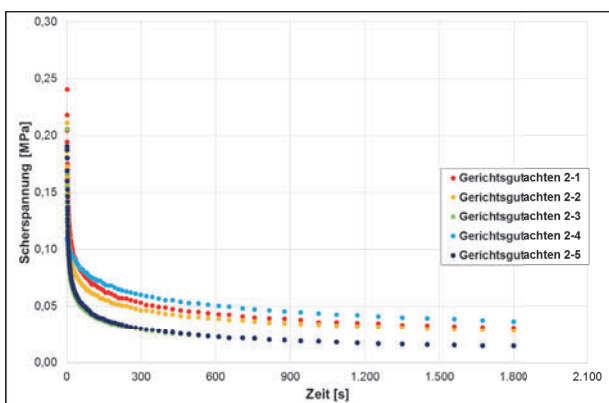


Bild A-17: SRV von rückgewonnenen Bindemittelproben aus einer Schadstelle (Kälterisse - Gerichtsgutachten 2)

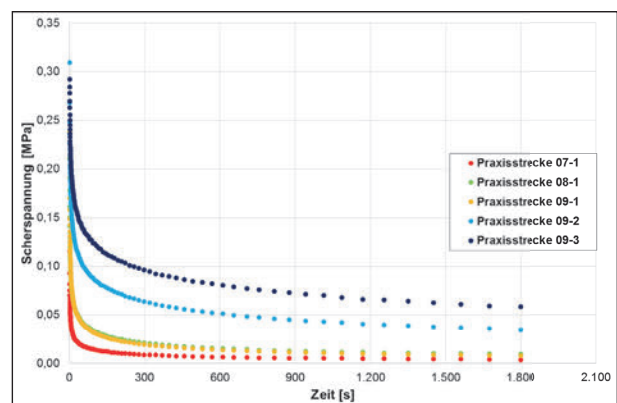


Bild A-20: SRV der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphalt mit Rejuvenator-Zugabe

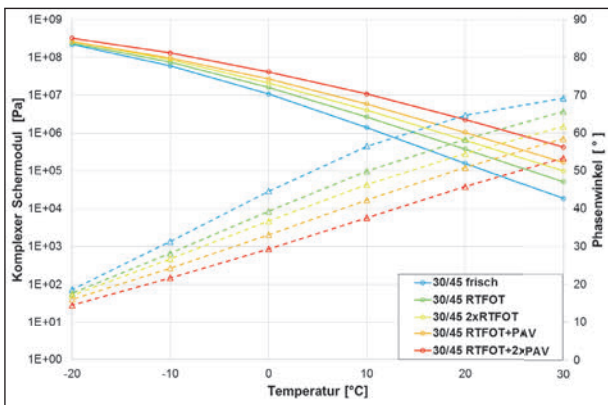


Bild A-21: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 30/45 mit mehreren Alterungsstufen mittels PP04

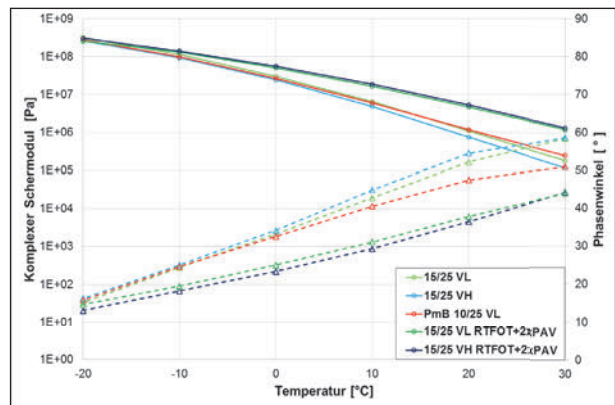


Bild A-24: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der viskositätsveränderten Bindemittel mittels PP04

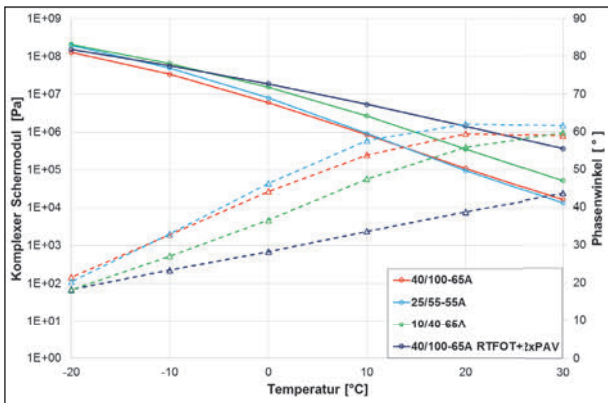


Bild A-22: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der polymermodifizierten Bindemittel mittels PP04

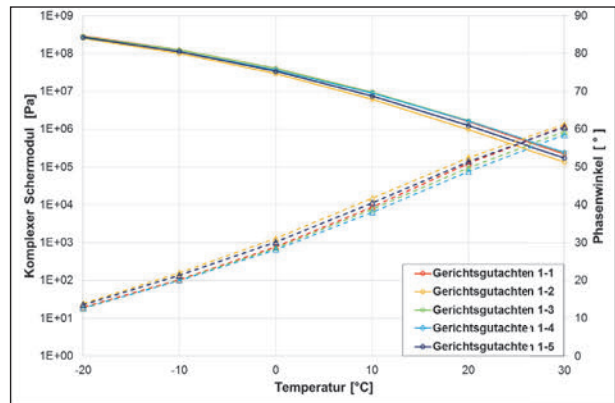


Bild A-25: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 1 mittels PP04

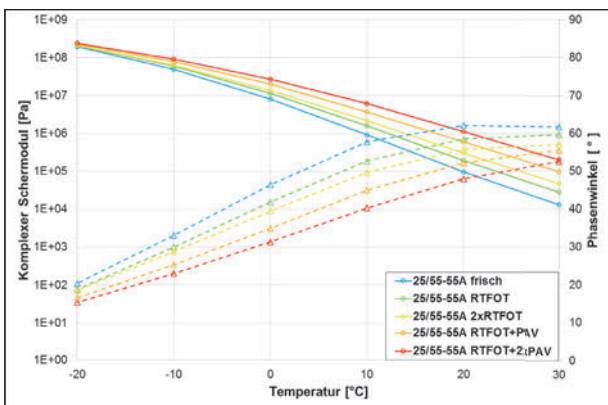


Bild A-23: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz des Bindemittels 25/55-55A mit mehreren Alterungsstufen mittels PP04

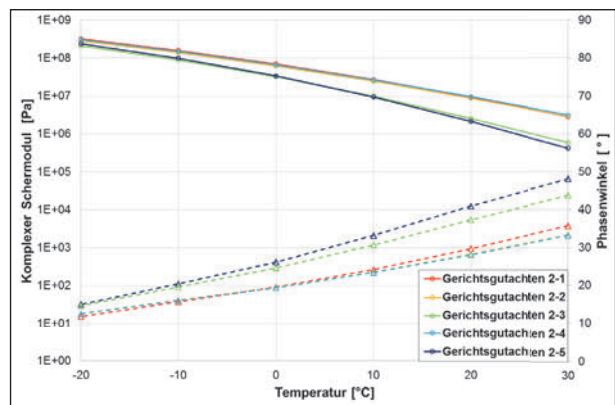


Bild A-26: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 2 mittels PP04

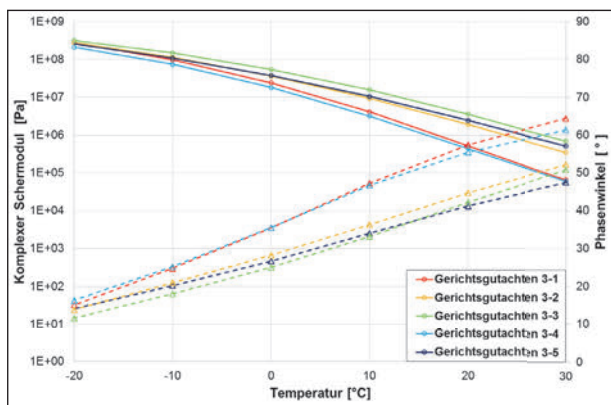


Bild A-27: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus dem Gerichtsgutachten 3 mittels PP04

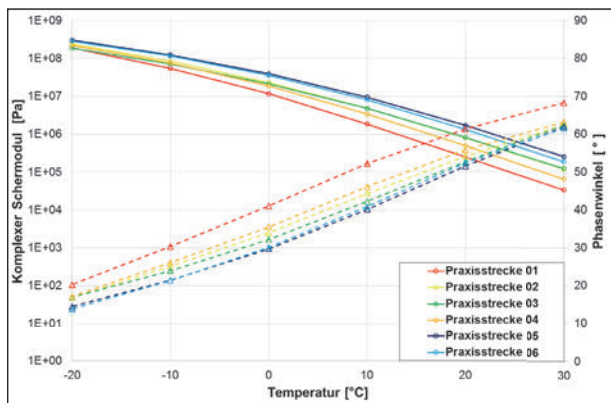


Bild A-28: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus Praxisstrecken mit Liegezeiten > 20 Jahren mittels PP04

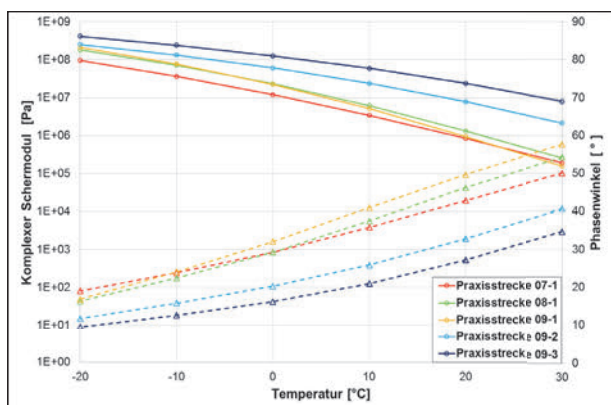


Bild A-29: Temperatur-Sweep bei 0,01 Hz der rückgewonnenen Bindemittel aus Asphalten mit Rejuvenator-Zugabe mittels PP04

Bindemittelsorte	$\varnothing \tau_1$	Spannweite τ_1		$\varnothing \tau_{30}$	Spannweite τ_{30}	
	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[Pa]	[%]
20/30	275.500	39.000	14,2	9.620	360,0	3,7
50/70	211.000	22.000	10,4	1.305	110,0	8,4
160/220	83.250	6.300	7,6	91	6,0	6,6
40/100-65 A	92.100	10.800	11,7	680	158,0	23,2
10/40-65A	210.500	7.000	3,3	4.865	650,0	13,4
15/25 VL	304.500	1.500	0,5	8.975	1.225,0	13,6
15/25 VH	240.000	4.000	1,7	7.790	170,0	2,2
PmB 10/25 VL	213.500	21.000	9,8	6.760	240,0	3,6
50/70 (RTFOT+ 2x PAV)	279.500	7.000	2,5	13.000	1.000,0	7,7
40/100-65 A (RTFOT+ 2x PAV)	135.000	-	0,0	6.245	390,0	6,2
Gerichtsgutachten 1-1	262.500	11.000	4,2	12.800	2.000,0	15,6
Gerichtsgutachten 1-2	248.500	21.000	8,5	10.250	300,0	2,9
Gerichtsgutachten 1-3	240.000	48.000	20,0	11.900	2.600,0	21,8
Gerichtsgutachten 1-4	254.000	52.000	20,5	14.900	2.000,0	13,4
Gerichtsgutachten 1-5	287.500	109.000	37,9	12.100	2.400,0	19,8
Gerichtsgutachten 2-1	240.500	15.000	6,2	30.850	3.500,0	11,3
Gerichtsgutachten 2-2	211.295	12.810	6,1	27.900	2.208,0	7,9
Gerichtsgutachten 2-3	206.000	6.000	2,9	14.400	1.400,0	9,7
Gerichtsgutachten 2-4	279.500	11.000	3,9	38.850	5.100,0	13,1
Gerichtsgutachten 2-5	187.500	35.000	18,7	14.650	100,0	0,7
Gerichtsgutachten 3-1	225.210	18.660	8,3	6.931	566,7	8,2
Gerichtsgutachten 3-2	273.000	12.000	4,4	14.800	-	0,0
Gerichtsgutachten 3-3	266.000	14.000	5,3	23.800	1.000,0	4,2
Gerichtsgutachten 3-4	206.500	3.000	1,5	5.035	450,0	8,9
Gerichtsgutachten 3-5	236.000	10.000	4,2	13.450	900,0	6,7
50/70 D	228.000	2.000	0,9	790	306,0	38,7
50/70 B	208.000	48.000	23,1	1.865	250,0	13,4
Praxisstrecke 01	185.500	7.000	3,8	2.375	30,0	1,3
Praxisstrecke 02	234.000	4.000	1,7	6.885	70,0	1,0
Praxisstrecke 03	237.000	40.000	16,9	7.820	640,0	8,2
Praxisstrecke 04	216.535	5.510	2,5	6.843	32,5	0,5
Praxisstrecke 05	250.000	32.000	12,8	11.600	1.800,0	15,5
Praxisstrecke 06	259.500	3.000	1,2	13.300	200,0	1,5
25/55-55A frisch	189.000	6.000	3,2	1.465	30,0	2,0
25/55-55A RTFOT	187.500	3.000	1,6	2.230	80,0	3,6
25/55-55A 2xRTFOT	213.000	36.000	16,9	2.935	5,0	0,2
25/55-55A RTFOT+PAV	217.000	8.000	3,7	5.650	280,0	5,0
25/55-55A RTFOT+2xPAV	192.000	40.000	20,8	7.090	1.840,0	26,0
30/45 frisch	219.500	81.000	36,9	1.970	360,0	18,3
30/45 RTFOT	270.000	86.000	31,9	4.165	470,0	11,3
30/45 2xRTFOT	207.500	39.000	18,8	5.685	150,0	2,6

Tab. A-3: Statistische Kenngrößen des Scher-Relaxationsversuches der Hauptuntersuchung

Bindemittelsorte	$\varnothing \tau_1$ [Pa]	Spannweite τ_1		$\varnothing \tau_{30}$ [Pa]	Spannweite τ_{30}	
		[Pa]	[%]		[Pa]	[%]
30/45 RTFOT+PAV	268.000	56.000	20,9	8.710	180,0	2,1
30/45 RTFOT+2xPAV	263.000	74.000	28,1	12.450	1.700,0	13,7
Praxisstrecke 07-1	115.500	7.000	6,1	3.880	280,0	7,2
Praxisstrecke 08-1	210.500	7.000	3,3	9.545	1.110,0	11,6
15/25 VL RTFOT+2xPAV	332.000	134.000	40,4	25.050	900,0	3,6
15/25 VH RTFOT+2xPAV	278.000	28.000	10,1	24.950	3.700,0	14,8
Praxisstrecke 09-1	238.000	72.000	30,3	7.790	2.080,0	26,7
Praxisstrecke 09-2	309.500	37.000	12,0	34.700	1.000,0	2,9
Praxisstrecke 09-3	292.500	149.000	50,9	58.300	2.400,0	4,1
Mittelwert:			12,3			9,4

Tab. A-3: Statistische Kenngrößen des Scher-Relaxationsversuches der Hauptuntersuchung (Fortsetzung)

Bindemittel	Prüftemperaturen [°C]			
	-25	-15	-5	5
	Log (Zugviskosität) [Mpa s]			
20/30 (BASt 04)	7,153	5,917	4,7135	3,522
20/30 + 2% FAD (BASt 10)		6,020	5,002	4,001
25/55-55A (BASt 49)		5,886	4,645	3,484
25/55-55A RTFOT (BASt 50)		6,191	5,160	4,071
25/55-55A RTFOT+PAV (BASt 51)		6,386	5,539	4,637
25/55-55A + 3 % FTP (BASt 52)		6,247	5,230	4,328
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT (BASt 53)			5,699	4,875
25/55-55A + 3 % FTP RTFOT+PAV (BASt 54)		6,840	5,988	5,442
25/55-55A + 3 % PEW (BASt 55)		6,057	4,970	3,925
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT (BASt 56)		6,321	5,380	4,484
25/55-55A + 3 % PEW RTFOT+PAV (BASt 57)		6,593	5,750	4,977
rückgewonnenes BM2016 (BASt 40)		6,352	5,328	4,334
10/40-65A D (BASt 31)	7,317	5,990	4,601	3,296
10/40-65A B (BASt 30)		6,273	5,115	3,963
50/70 B-2	6,707	5,257	3,935	2,591
40/100-65A B	6,639	5,351	4,045	2,903

Tab. A-4: Ergebnisse der einzelnen Zug-Retardationsversuche durchgeführt von der BASt

Bindemittelsorte	$\bar{\sigma} \text{REL}_{\text{SRV}}$ [%]	$\Delta \text{REL}_{\text{SRV}}$ [%]	$\bar{\sigma} \lambda \text{Rel}$ [kPa min]	$\Delta \lambda \text{Rel}$ [%]
20/30	3,49	10,4	640,8	0,3
50/70	0,62	2,0	131,0	15,1
160/220	0,11	1,0	12,5	21,5
40/100-65 A	0,74	11,6	52,0	19,7
10/40-65A	2,31	10,0	301,5	10,2
15/25 VL	2,95	28,3	512,6	22,9
15/25 VH	3,25	1,0	446,3	6,3
PmB 10/25 VL	3,17	13,4	386,6	6,3
50/70 (RTFOT+ 2x PAV)	4,65	5,2	688,9	6,5
40/100-65 A (RTFOT+ 2x PAV)	4,63	6,2	307,9	1,5
Gerichtsgutachten 1-1	4,88	19,8	693,4	15,5
Gerichtsgutachten 1-2	4,12	11,4	591,0	1,9
Gerichtsgutachten 1-3	4,96	1,9	650,5	25,2
Gerichtsgutachten 1-4	5,87	7,1	792,0	14,8
Gerichtsgutachten 1-5	4,21	18,4	660,7	19,3
Gerichtsgutachten 2-1	12,83	5,1	1.293,8	12,6
Gerichtsgutachten 2-2	13,20	1,9	1.163,3	8,4
Gerichtsgutachten 2-3	6,99	6,8	689,8	11,9
Gerichtsgutachten 2-4	13,90	9,2	1.610,3	7,4
Gerichtsgutachten 2-5	7,81	18,0	700,4	1,9
Gerichtsgutachten 3-1	3,08	0,1	415,0	11,6
Gerichtsgutachten 3-2	5,42	4,4	764,2	1,5
Gerichtsgutachten 3-3	8,95	9,6	1.130,8	3,6
Gerichtsgutachten 3-4	2,44	10,4	320,9	4,2
Gerichtsgutachten 3-5	5,70	10,9	670,3	4,9
50/70 D	0,35	37,9	97,9	4,5
50/70 B	0,90	9,7	164,0	22,7
Praxisstrecke 01	1,28	5,0	165,1	1,9
Praxisstrecke 02	2,94	2,7	409,4	9,2
Praxisstrecke 03	3,30	8,7	446,6	5,7
Praxisstrecke 04	3,16	2,1	391,5	5,7
Praxisstrecke 05	4,64	2,7	606,4	6,5
Praxisstrecke 06	5,13	2,7	720,4	1,2
25/55-55A frisch	0,78	5,2	123,6	2,1
25/55-55A RTFOT	1,19	2,0	160,6	2,4
25/55-55A 2xRTFOT	1,38	17,2	208,2	4,9
25/55-55A RTFOT+PAV	2,60	1,3	338,2	10,0
25/55-55A RTFOT+2xPAV	3,69	5,2	394,3	27,0
30/45 frisch	0,90	18,9	148,4	23,2
30/45 RTFOT	1,54	42,8	285,3	4,0
30/45 2xRTFOT	2,74	21,4	339,9	5,2

Tab. A-5: Statistische Kenngrößen des SRVs aller 72 untersuchten Bindemittel

Bindemittelsorte	$\emptyset \text{REL}_{\text{SRV}}$ [%]	$\Delta \text{REL}_{\text{SRV}}$ [%]	$\emptyset \lambda \text{Rel}$ [kPa min]	$\Delta \lambda \text{Rel}$ [%]
30/45 RTFOT+PAV	3,25	18,8	494,1	4,7
30/45 RTFOT+2xPAV	4,73	41,4	665,9	9,5
Praxisstrecke 07-1	3,36	1,2	211,6	9,7
Praxisstrecke 08-1	4,53	8,3	489,2	3,0
15/25 VL RTFOT+2xPAV	7,55	36,9	1.180,3	2,6
15/25 VH RTFOT+2xPAV	8,97	4,8	1.148,0	14,8
Praxisstrecke 09-1	3,27	3,6	443,5	24,8
Praxisstrecke 09-2	11,21	9,1	1.530,5	1,9
Praxisstrecke 09-3	19,93	54,8	2.383,2	3,2
20/30 (BASt 04)	1,96	2,8	354,0	1,7
25/55-55A C	1,58	9,6	285,5	4,0
25/55-55A B	0,59	21,2	93,2	4,1
30/45 B	1,13	18,8	189,7	7,6
40/100-64A E	0,89	14,4	81,0	5,9
40/100-65A B	0,69	20,5	73,2	21,4
50/70 B	0,60	19,8	93,9	23,6
70/100 B	0,41	1,4	60,1	4,3
20/30 B	1,65	8,8	308,8	1,6
20/30 + 2% FAD (BASt 10)	2,95	2,2	416,0	1,9
25/55-55A (BASt 49)	3,34	6,7	405,8	9,5
25/55-55A RTFOT (BASt 50)	3,77	3,7	484,3	5,1
25/55-55A RTFOT+PAV (BASt 51)	6,40	0,7	649,3	4,3
25/55-55A +3% FTP (BASt 52)	6,26	3,6	687,9	1,5
25/55-55A +3% FTP RTFOT (BASt 53)	7,10	2,1	790,0	5,5
25/55-55A +3% FTP RTFOT+PAV (BASt 54)	9,14	1,6	977,3	2,7
25/55-55A +3% PEW (BASt 55)	4,80	8,3	512,5	1,0
25/55-55A +3% PEW RTFOT (BASt 56)	5,20	1,2	552,6	2,6
25/55-55A +3% PEW RTFOT+PAV (BASt 57)	8,64	14,9	864,2	5,6
rückgewonnenes BM2016 (BASt 40)	5,01	9,1	686,4	4,2
10/40-65A D (BASt 31)	1,98	12,3	368,1	2,8
10/40-65A B (BASt 30)	3,42	11,0	518,4	8,0
Mittelwert	4,32	10,9	536,5	8,3

Tab. A-5: Statistische Kenngrößen des SRVs aller 72 untersuchten Bindemittel (Fortsetzung)

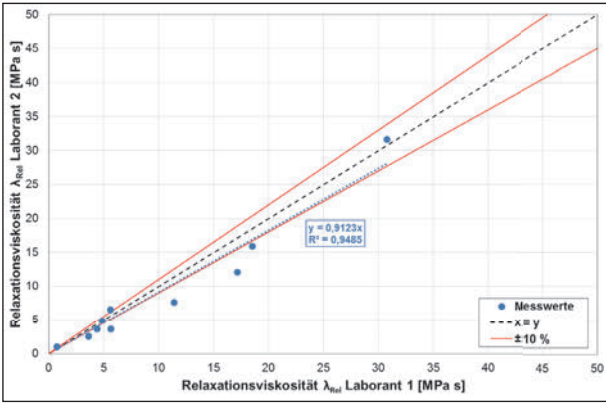


Bild A-30: Korrelation der Relaxationsviskosität zwischen den beiden Laboranten

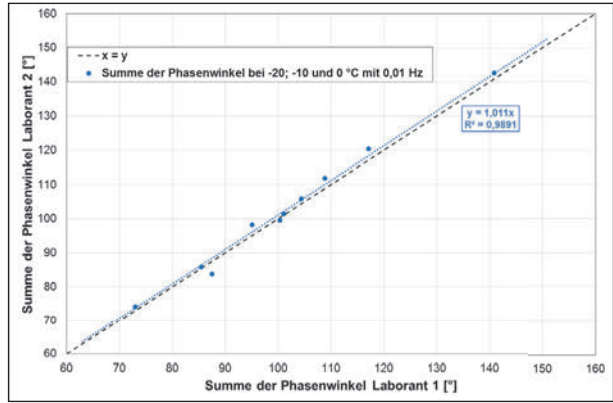


Bild A-33: Korrelation zwischen den beiden Laboranten bei der Summe der Phasenwinkel gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20; -10 und 0 °C

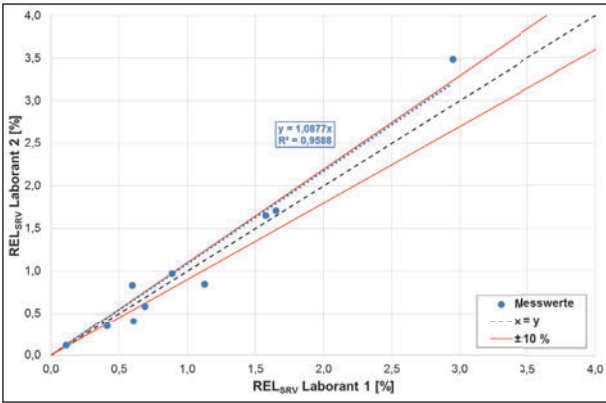


Bild A-31: Korrelation von REL_{SRV} zwischen den beiden Laboranten

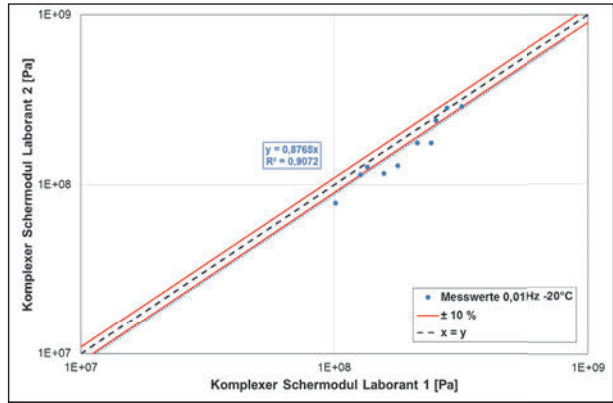


Bild A-34: Korrelation zwischen den beiden Laboranten beim komplexen Schermodul gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20°C

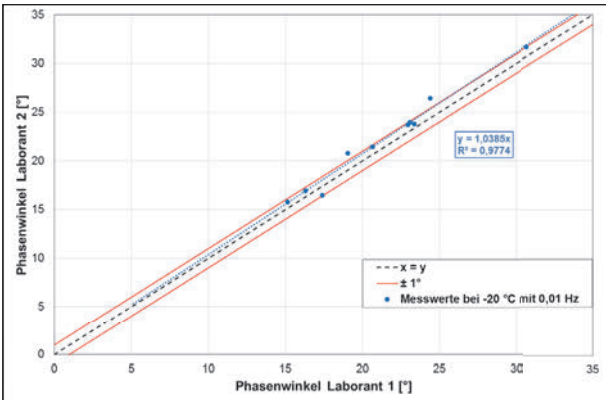


Bild A-32: Korrelation zwischen den beiden Laboranten beim Phasenwinkel gemessen mittels PP04 bei 0,01 Hz und -20°C

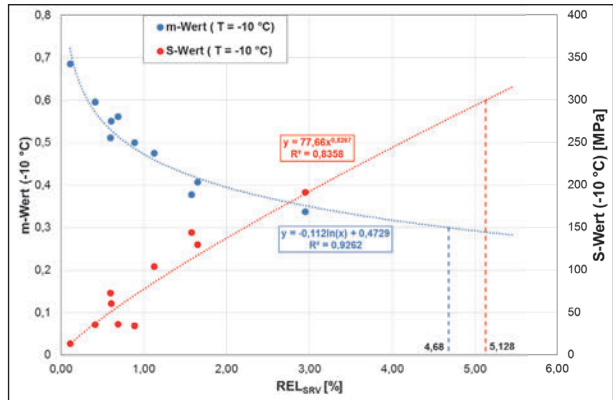


Bild A-35: Korrelation zwischen dem REL_{SRV} und den Ergebnissen der BBR-Untersuchungen

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

Radenberg, Nytus, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

Alisov, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungsrolle von Asphalt

Zander, Buch, Birbaum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

Schellenberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

Mollenhauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

Wistuba, Isailović

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

Radenberg, Nytus, Boetcher, Diedel, Miehlung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphaltbau

Böhm, Tielmann, Ulrich, Verges, Muschalla

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

Renken, Wistuba

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 119: Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels

Durner

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 120: Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme

Wacker, Scherckenbach, Jansen

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 121: Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen

Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler

Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 122: Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine

Möller, Bundschuh, Birle, Heyer

€ 18,50

S 123: Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils

Stephan, Weigel

€ 19,00

S 124: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte

Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 125: Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie

Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 126: Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke

Freudenstein, Neudert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**

Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**

Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**

Radenberg, Holzwarth

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**

Radenberg, Gehrke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**

Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler,

Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50

S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**

Wolf, Uhlig

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**

Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**

Botor, Tost € 15,50

S 136: **KIST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**
Augter, Kayser € 16,50

S 137: **Ressourcenschonung Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**

Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr € 22,50

S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**

Groschup, Große, Eger, Freudenstein

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 139: **Unterhaltung und Sanierung des Straßennetzes – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 17. und 18. September 2018 in Bonn**

Dumer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 140: **Erfahrungssammlung Bitumendaten – Frischbitumen**

Radenberg, Flottmann, Drewes

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 141: **Ermittlung des Bindemittelgehaltes von Asphalt mit gummimodifiziertem Bindemittel**

Radenberg, Manke

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

S 142: **Untersuchungen zur Verbesserung der Methode zum fachgerechten Schließen von Bohrkernentnahmestellen**

Beckedahl, Koppers, Schrödter € 15,50

S 143: **s/v-Wert beim dynamischen Plattendruckversuch**

Bräu, Vogt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 144: **Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Kälteverhaltens von Bitumen**

Radenberg, Staschkiewicz € 17,50

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.