

Dr.-Ing. Tobias Hagner

# Verfahren zur Festlegung geeigneter Beanspruchungen im Dynamischen Scherrheometer (DSR)

## 1 Einleitung

Zu Beginn der 90er Jahre wurde in den USA mit erheblichem finanziellem Aufwand ein Forschungsprogramm umgesetzt, welches unter anderem das Ziel verfolgte, das Gebrauchsverhalten von bitumenhaltigen Bindemitteln in Straßenbefestigungen aus Asphalt besser zu beschreiben. Wissend, dass die Eigenschaften modifizierter Bindemittel mit einigen der herkömmlichen Prüfverfahren nur unzureichend anzusprechen sind, war es Bestandteil der Forschungsaktivität, Prüfmethoden zu entwickeln, die allgemein das rheologische Verhalten besser beurteilen lassen. Die performanceorientierten Prüfverfahren sollten dabei die Eigenschaften des Baustoffes Bitumen prüftechnisch physikalisch eindeutig zu erfassen. Eine der aus dem Strategic Highway Research Program (SHRP) hervorgegangenen Prüfungen ist die mittels Dynamischem Scherrheometer (DSR).

Mit dem Abschluss erster nationaler Forschungsarbeiten [1][2] hielt die Prüfmethode im Jahre 2001 erstmals Einzug in das deutsche Regelwerk. In den Technischen Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen (TL PmB), Ausgabe 2001, wurden zusätzliche Anforderungen und Prüfverfahren zur Erfahrungssammlung für diese Bindemittel formuliert. Die Prüfung im Dynamischen Scherrheometer erfolgte in Anlehnung an die amerikanische Prüfvorschrift zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen AASHTO TP 5-97. Zusätzlich lieferte der Anhang C des Regelwerkes der FGSV eine Arbeitsanleitung zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen mittels Dynamischem Scherrheometer mit Änderungen und Ergänzungen zur AASHTO TP 5-97. Eine wesentliche Einschränkung der amerikanischen Norm bestand darin, die Messungen im verformungskontrollierten Modus zu betreiben. Obgleich mit der Erarbeitung der Europäischen Norm EN 14770, Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels — Dynamisches Scherrheometer (DSR), und der Überführung der TL PmB Ausgabe 2001 in die TL Bitumen-StB 07 diese Beschränkung entfiel, werden die Kennwerte national aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse [3] und Erfahrungen überwiegend weiterhin

durch Prüfmodalitäten mit einer vorgegebenen Verformung bestimmt.

## 2 Problemstellung

Bei der Bestimmung der Eigenschaften von Fluiden ist im Sinne vergleichbarer Prüfergebnisse sicherzustellen, dass die gewählten Prüfmodalitäten die Messwerte nicht beeinflussen. Im Falle der Prüfung einer Newtonschen Flüssigkeit ist die Schergeschwindigkeit proportional zur einwirkenden Schubspannung und umgekehrt. Neben den Newtonschen Flüssigkeiten existieren auch nicht-Newtonsche Fluide. Zu ihnen zählen u.a. strukturviskose Stoffe wie Bitumen, die dadurch gekennzeichnet sind, dass die zur Erhaltung des Fließprozesses erforderliche Zunahme der Schubspannung mit steigender Schergeschwindigkeit geringer wird (Abb. 1a). Bei strukturviskosen Flüssigkeiten nimmt die Viskosität in einem mittleren Bereich mit zunehmender Schergeschwindigkeit ab, während sie im Bereich sehr geringer Schergeschwindigkeiten bei noch nicht durch den Prüfvorgang gestörter Struktur einen vergleichsweise hohen konstanten Wert (erster Newtonscher Bereich) und im Bereich sehr großer Schergeschwindigkeiten bei vollständig zerstörter Struktur wieder einen nicht mehr von der Schergeschwindigkeit abhängigen, relativ kleinen Wert (zweiter Newtonscher Bereich) besitzt (Abb. 1b) [4].

Für Untersuchungen hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften von Bitumen liefert nur die Prüfung im ersten Newtonschen Bereich zielführende Ergebnisse. Es bedarf folglich jeweils Optimierungsversuche im DSR auf allen erforderlichen Temperaturniveaus mit variierender Beanspruchung zur Bestimmung geeigneter Festlegungen für die nachfolgende Ermittlung der maßgeblichen Eigenschaften komplexer Schermodul und Phasenwinkel. Festzulegen sind entweder bei verformungskontrollierten Prüfungen die Größe der vorzugebenden Verformung — ausgedrückt in Prozent der Probekörperdicke — oder bei spannungskontrollierten Prüfungen die Schubspannung, die die zwischen einer starren und einer beweglichen Platte kraftschlüssig aufgebrachte Bitumenprobe oszillierend auf Scherung beansprucht.

Im Folgenden wird eine Verfahrensweise beschrieben, die die Wahl geeigneter Prüfbedingungen ohne die Bestimmung des linear-viskoelastischen Bereiches in zusätzlichen Optimierungsversuchen ermöglicht.

## 3 Lösungsansatz

Entsprechend den Regelungen in den TL Bitumen-StB 07 sind die Messungen zum Verformungsverhalten mittels DSR in Form eines Temperaturweeps bei einer Frequenz von 1,59 Hz in einem Temperaturbereich

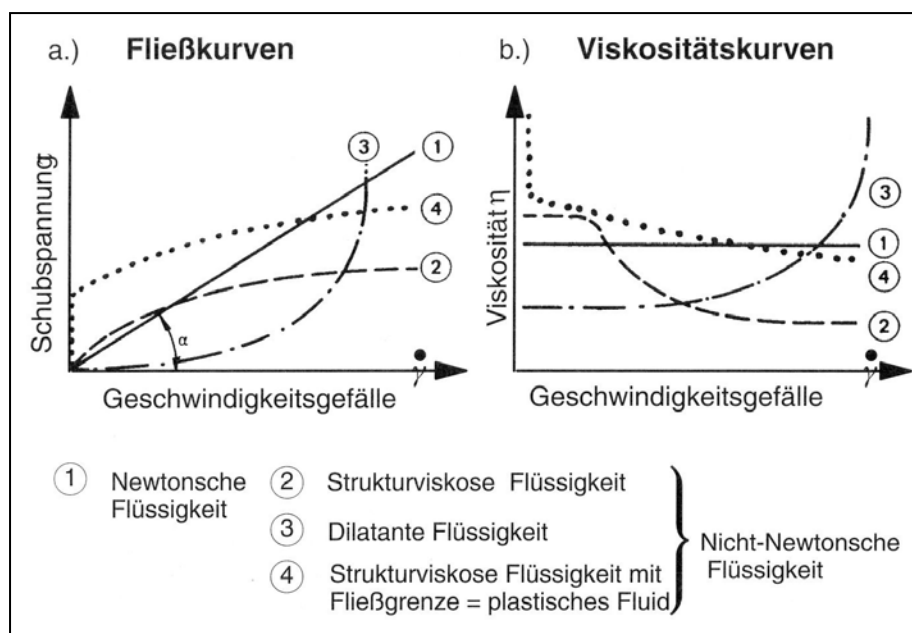


Abb. 1: Verschiedene Arten von häufig vorkommenden Fließverhalten [5]

zwischen 30 °C und 90 °C durchzuführen. Die TL Bitumen-StB 07 beziehen sich hierbei auf die DIN EN 14770, in deren Anhang C die Bestimmung des Bereichs linearen viskoelastischen Verhaltens beschrieben wird. Demnach sind mindestens die Verformungs- bzw. Spannungsverläufe bei der tiefsten und der höchsten Messtemperatur zu prüfen.

In den amerikanischen Prüfvorschriften zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen, den AASHTO TP 5-97, ist ein Vertrauensbereich in Abhängigkeit des komplexen Schermoduls beschrieben, der die Prüfung im linear-viskoelastischen Bereich der Bindemittel gewährleistet. Die Größe der zulässigen Beanspruchungen ist unter Berücksichtigung einer 20 %igen Toleranz zu berechnen. Es gilt:

$$\gamma \text{ [%]} = 12,0 / (G^* \text{ [kPa]})^{0,29} \quad (1)$$

für den verformungskontrollierten und

$$\tau \text{ [kPa]} = 0,12 \cdot (G^* \text{ [kPa]})^{0,71} \quad (2)$$

für den spannungskontrollierten Modus.

Werden der weiteren Betrachtung die Erkenntnisse zahlreicher Untersuchungen [6][7] zu Grunde gelegt, in denen sowohl konventionelle Bitumenprüfungen durchgeführt wurden als auch Messergebnisse aus dem dynamischen Scherrheometer vorliegen, bestehen zwischen den Werten der Nadelpenetration und dem komplexen Schermodul Korrelationen mit hohen Bestimmtheitsmaßen. Die Kenntnis dieses Zusammenhanges lässt sich nutzen, um die vorzugebene Verformung bzw. Schubspannung in Abhängigkeit der Nadelpenetration zu beschreiben.

Auf Basis der in der Eurobitume Data Collection in 2006/07 zusammengetragenen Bitumenkennwerte von 60 Straßenbaubitumen und 55 polymermodifizierten Bitumen unterschiedlicher Viskositäten, Modifikationsgrade und Alterungszuständen (Original, RTFOT) für die Nadelpenetration und den komplexen Schermodul wurden die Regressionsgleichungen der Korrelationen bei acht Temperaturen berechnet (Abb. 2).

Mit diesen gewonnenen statistischen Zusammenhängen zwischen der Nadelpenetration und dem komplexen Schermodul wurden anschließend die nach AASHTO TP 5-97 geeigneten Verformungen zur Prüfung der Bindemittel im linear-viskoelastischen Bereich für die jeweilige Temperaturstufe in Abhängigkeit der Nadelpenetration nach Gleichung (1) errechnet (Abb. 3).

Bezüglich der vorzugebenen Schub-

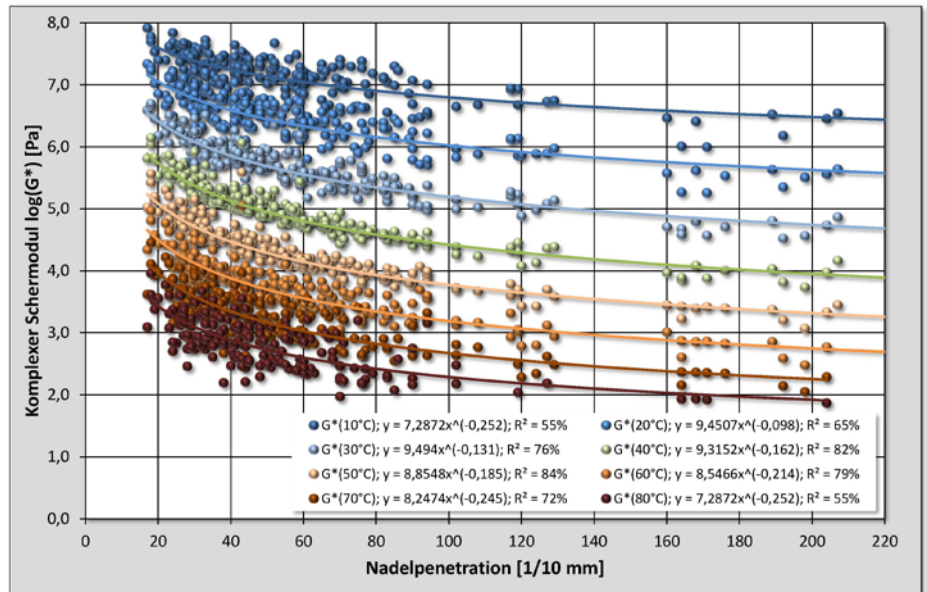
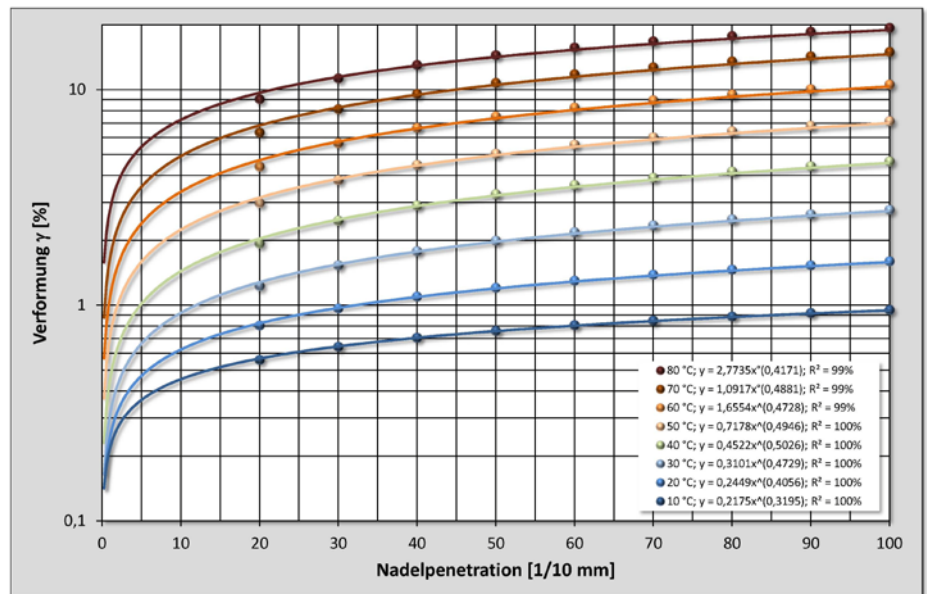


Abb. 2: Komplexer Schermodul log(G\*(T)) in Abhängigkeit der Nadelpenetration



		Nadelpenetration [1/10 mm] DIN EN 1426															
Verformung gamma [%]		20	30	40	50	60	70	80	90	100	160	170	180	190	200	210	220
Prüf- temperatur [°C]	10	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
	20	0,8	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,2
	30	1,3	1,5	1,8	2,0	2,1	2,3	2,5	2,6	2,7	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0
	40	2,0	2,5	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,3	4,6	5,8	6,0	6,1	6,3	6,5	6,6	6,8
	50	3,2	3,9	4,5	5,0	5,4	5,9	6,3	6,6	7,0	8,8	9,1	9,4	9,6	9,9	10,1	10,3
	60	4,7	5,7	6,6	7,4	8,1	8,7	9,3	9,8	10,3	13,0	13,4	13,8	14,1	14,5	14,8	15,2
	70	6,8	8,3	9,5	10,5	11,5	12,3	13,1	13,9	14,6	18,2	18,8	19,3	19,8	20,3	20,7	21,2
	80	9,7	11,5	12,9	14,2	15,3	16,3	17,3	18,1	18,9	23,0	23,6	24,2	24,7	25,3	25,8	26,3

Abb. 3: Einzustellende Verformung gamma(T) für verformungskontrollierte Prüfungen in Abhängigkeit der Nadelpenetration

spannung für die spannungskontrollierte Prüfung wurde analog nach Gleichung (2) verfahren (Abb. 4).

Wird davon ausgegangen, dass die Werte der Nadelpenetration dem Prüfenden bereits durch Vorinformationen vorliegen, die aus den Dokumenten des Lieferanten, den Daten der werkseigenen Produktionskontrolle oder der laufenden Bindemitteluntersuchung stammen können, sind aus den Zusammenhängen die aufzubringende Verformung aus Abbildung 3 oder

Schubspannung aus Abbildung 4 direkt ablesbar.

In der Forschungsarbeit über die Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen [3] wurde für die Prüfung bei der Prüftemperatur 50 °C eine geeignete Verformung von 6 % ermittelt. Die Untersuchungen basierten auf mehreren Bindemitteln unterschiedlicher Art und Sorte. Aus Abbildung 3 kann entnommen werden, dass diese allgemeingültige Festlegung für die Prüfung eines Straßenbaubitumens

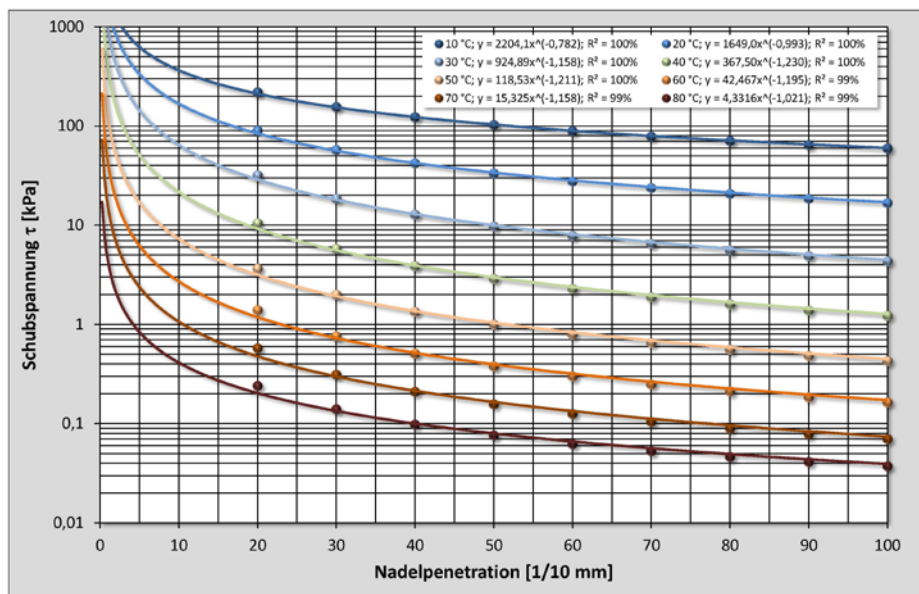
70/100 oder von polymermodifizierten Bitumen der Sorte 40/100-65 A zielführend gewesen ist. Für Messungen von beispielsweise polymermodifiziertem Bitumen 25/55-55 A ist nach den neuen Erkenntnissen bei der Prüftemperatur 50 °C gemäß Abbildung 3 eine Verformung von 3,5 % bis 5,2 % besser geeignet, um die Prüfung im linear-viskoelastischen Bereich der Bindemittel sicherzustellen.

### 4 Fazit

Mit der dargestellten Methode zur Ermittlung der Belastungsgrößen im DSR zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen kann im Sinne der Laborökonomie weitestgehend auf die Durchführung von Vorversuchen zur Abgrenzung des linear-viskoelastischen Bereiches verzichtet werden. Es stellt somit eine wesentliche Vereinfachung für die Prüfung im DSR unter oszillierender Beanspruchung dar.

Aufgrund der spezifischen Angaben der Belastungsgrößen in Abhängigkeit der Prüftemperatur und der Eigenschaften des zu prüfenden Probenmaterials kann davon ausgegangen werden, dass unter Anwendung dieser Verfahrensweise eine Verbesserung der Präzision des Prüfverfahrens zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Bitumen zu erzielen ist.

Es ist anzumerken, dass die beschriebene Vorgehensweise nur auf Erkenntnissen über die Eigenschaften von Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen beruhen. Die Anwendung für viskositätsveränderte Bindemittel bedarf der Überprüfung. Auch gibt das verwendete Datenmaterial keinen Aufschluss über das Verhalten der Bitumen bei einer Prüftemperatur von 90 °C.



Schubspannung $\tau$ [kPa]	Nadelpenetration [1/10 mm] DIN EN 1426															
	20	30	40	50	60	70	80	90	100	160	170	180	190	200	210	220
10	212	154	123	103	89,7	79,5	71,6	65,3	60,1	41,6	39,7	38,0	36,4	35,0	33,7	32,5
20	84,2	56,3	42,3	33,9	28,3	24,3	21,3	18,9	17,0	10,7	10,1	9,50	9,00	8,56	8,15	7,78
30	28,8	18,0	12,9	10,0	8,07	6,75	5,79	5,05	4,47	2,59	2,42	2,26	2,12	2,00	1,89	1,79
40	9,23	5,60	3,93	2,99	2,39	1,98	1,68	1,45	1,27	0,715	0,663	0,618	0,579	0,543	0,512	0,483
50	3,15	1,93	1,36	1,04	0,833	0,691	0,588	0,510	0,449	0,254	0,236	0,220	0,206	0,194	0,183	0,173
60	1,18	0,729	0,517	0,396	0,319	0,265	0,226	0,196	0,173	0,099	0,092	0,086	0,080	0,076	0,071	0,067
70	0,477	0,298	0,214	0,165	0,134	0,112	0,096	0,084	0,074	0,043	0,040	0,037	0,035	0,033	0,031	0,030
80	0,203	0,134	0,100	0,080	0,066	0,057	0,049	0,044	0,039	0,024	0,023	0,022	0,020	0,019	0,018	0,018

Abb. 4: Einzustellende Schubspannung  $\tau(T)$  für spannungskontrollierte Prüfungen in Abhängigkeit der Nadelpenetration

#### Literatur

- ARAND, W.; ZANDER, U.: Einfluß von Temperatur und Temperaturrate auf den Verformungswiderstand frisch verlegter Asphaltdeckschichten während Abkühlung und Wiedererwärmung. AIF-Forschungsvorhaben Nr. 9.975, Braunschweig 1998
- RENKEN, P.; HAGNER, T.; FEßER, A.: Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bindemittel während Herstellung, Lagerung, Transport und Einbau von Asphaltmischgut. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 809, Bonn 2001
- Manfred HASE, M.; OELKERS, C.: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen: Optimierung der versuchstechnischen Rahmenbedingungen für die Durchführung und Auswertung performance-orientierter Bitumenuntersuchungen mittels Dynamischem Scher-Rheometer. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau Heft S 47, Bergisch Gladbach 2006
- ARAND, W.: Zur Strukturviskosität von Bitumen. Bitumen 60 (1998) 3, 82-90
- SCHRAMM, G.: Einführung in Rheologie und Rheometrie. Gebrüder HAAKE GmbH, Karlsruhe 1995
- HAGNER, T.: Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels dynamischem Scher-Rheometer. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2003
- Eurobitume TF Data Collection: Position Paper on Test Methods used during the Data Collection. Eurobitume; Brüssel 2009.