

# Bewertung der Ergebnisse performance-orientierter Prüfungen an Bindemitteln im Vergleich mit konventionellen Bindemittel-Kennwerten und Asphalteeigenschaften

FA FGSV 5/1999

Forschungsstelle: Technische Universität Braunschweig, Institut für Straßenwesen (Prof. Dr.-Ing. R. Leutner)

Bearbeiter: Hagner, T. / Lüthje, U. / Schmoeckel, K.

Auftraggeber: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln

Abschluss: Februar 2003

## 1. Aufgabenstellung

Straßenbaubitumen wurde seit Jahrzehnten erfolgreich nach den in DIN 1995 genannten Prüfverfahren eingeordnet. Mit der Verbreitung modifizierter Bindemittel wurden die TL PmB geschaffen. Beide Regelwerke schreiben Prüfverfahren zur Spezifikation von Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen vor, mit welchen nur empirisch auf Bindemittelleigenschaften geschlossen werden kann.

Dieses Dilemma wurde international erkannt, sodass bereits Anfang der 1990-er Jahre in den USA ein umfangreiches Forschungsprogramm (SHRP) initiiert wurde, um neue Wege zur direkten Ansprache der Gebrauchseigenschaften von Bindemitteln, Straßenbaubitumen und polymermodifizierten Bitumen zu eröffnen. Als Ergebnis wurden Tests zur Simulation der Bindemittelalterung (PAV, RTFOT) und so genannte performance-orientierte Prüfungen an Bindemitteln – Prüfungen mittels dynamischem Scherrheometer (DSR), Kraftduktilität (KD), Bending Beam Rheometer (BBR) – entwickelt sowie Zusammenhänge mit konventionell gemessenen Bindemittelkennwerten und mit Asphalteeigenschaften aufgezeigt.

Seitdem wird über dieses Thema international auf Workshops, Kongressen und in Einzelveröffentlichungen intensiv und teilweise kontrovers diskutiert.

Ziel der Forschungsarbeit war es, kurzfristig einen aktuellen Stand der internationalen Diskussion zu diesem Thema zu dokumentieren und wissenschaftlich auszuwerten. Hierauf können dann die deutschen Forschungsarbeiten und die Aktivitäten in den Gremien der FGSV effektiv aufbauen.

## 2. Untersuchungsmethodik

In einer umfassenden Literaturanalyse wurden die Veröffentlichungen der europäischen Fachkongresse und Workshops Eurobitume und Eurasphalt aus den Jahren 1996,1999 und 2000 gesichtet und auf Relevanz zur Aufgabenstellung überprüft. Die als wichtig befundenen Veröffentlichungen wurden hinsichtlich der verwendeten Prüfmodalitäten – Versuchsart, Prüfmaterial, Modifizierung und Alterungszustand des Prüf gutes, Prüfungseinstellungen wie Temperatur, Frequenzbereich und Beanspruchung sowie Auswerteverfahren – untersucht, um die festgestellten Forschungsergebnisse vergleichend beurteilen zu können. Da mit weiteren aktuellen Forschungsarbeiten in der nahen Zukunft gerechnet werden musste, konnten diese nur durch eine erhebliche Überschreitung der angesetzten Bearbeitungszeit von 6 Monaten mit zur Auswertung gebracht werden. Des Weiteren konnten Ergebnisse der Literaturanalyse durch weitere inzwischen veröffentlichte Forschungsergebnisse des Forschungsnehmers sowie durch eine fertig gestellte Dissertation ergänzt werden.

Im Folgenden werden zunächst die performance-orientierten Prüfverfahren DSR, BBR und KD kurz vorgestellt sowie die aus den Versuchen ermittelbaren Kenngrößen und ihre Verwendung im SHRP-Bemessungsverfahren genannt. Nach der Beurteilung der Einflüsse aus der Probekörperherstellung werden die Versuchsergebnisse der verschiedenen Bindemittelsorten und -arten sowie der Testresultate nach verschiedenen Alterungsstufen miteinander verglichen. Abschließend werden gefundene Korrelationen zwischen den Ergebnissen aus performance-orientierten Prüfungen und traditionellen Testmethoden verglichen.

## 3. Untersuchungsergebnisse

### 3.1 Performance-orientierte Prüfverfahren

#### 3.1.1 Versuche im Dynamischen Scherrheometer DSR

Mit Hilfe des Dynamischen Scher-Versuchs wird das viskoelastische Verhalten von Bitumen geprüft. Dabei wird eine Bindemittelprobe zwischen zwei parallele Metallplatten geklebt und einer oszillierenden Spannungs- oder Verformungs-geregelten Scherbeanspruchung ausgesetzt.

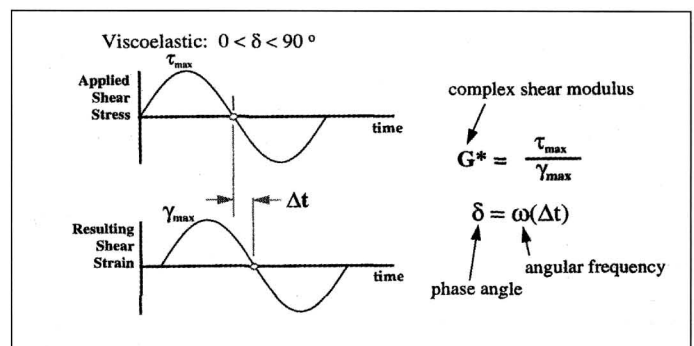
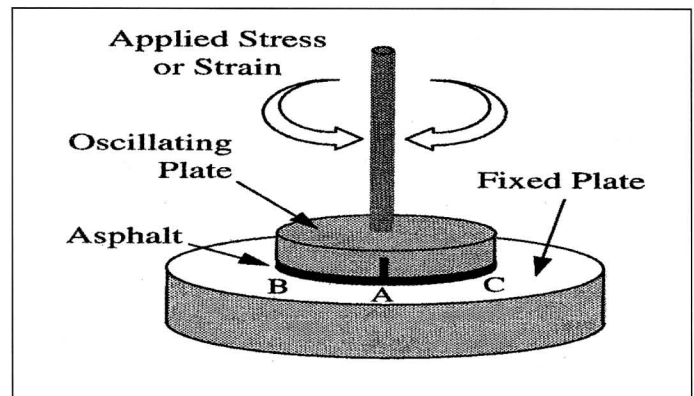


Bild 1: Funktionsprinzip des Dynamischen Scher-Rheometers DSR

Neben Spannung und Dehnung haben die Prüftemperatur und die Belastungsdauer Einfluss auf die Prüfergebnisse. Als Ergebnisse des DSR-Versuchs werden der Komplexe Scher-Modul  $G^*$  sowie der Phasenwinkel  $\delta$  zwischen aufgebrachtener Beanspruchung (Schubspannung  $\tau$  oder Scherverformung  $\gamma$ ) und

der gemessenen Reaktion ( $\gamma$  oder  $\tau$ ) gemessen. Daraus lassen sich die elastische Komponente (Speichermodul  $G'$ ) und die viskose Komponente (Verlustmodul  $G''$ ) des Stoffverhaltens berechnen:

$$G' = G^* \cdot \cos \delta \text{ [Pa]}$$

$$G'' = G^* \cdot \sin \delta \text{ [Pa]}$$

Zur direkten Beurteilung der Verformungsresistenz eines Bindemittels kann nach SHRP der so genannte rutting parameter R errechnet werden:

$$R = \frac{G^*}{\sin \delta} \quad (1)$$

In den ausgewerteten Forschungsberichten wird beschrieben, dass sich der rutting parameter R gut zur Beurteilung des Verformungswiderstandes eignet. Auch anschaulich ist dies einleuchtend, da hohe Steifigkeiten in Kombination mit elastischem Verhalten (beschrieben durch kleine Phasenwinkel und somit kleine Nenner in obiger Gleichung) zu hohen Werten von R führen. HAGNER weist darauf hin, dass R, bei Temperaturen im unteren Gebrauchsbereich bestimmt, auch dazu geeignet ist, die Kälteeigenschaften des Bindemittels zu beschreiben. Da Bindemittel mit geringer Steifigkeit in Verbindung mit viskosem Verhalten (großes  $\delta$ ) Spannungen schnell durch Relaxation abbauen können, weist ein geringer Wert von R auf gutes Kälteverhalten hin. Daher wird vorgeschlagen [6], das Bindemittelverhalten über den gesamten Temperaturbereich mit dem Quotienten aus modifizierten R bei hoher Prüftemperatur und aus niedriger Temperatur zahlenmäßig zu bestimmen, wobei ein kleiner Wert für allgemein gutes Verhalten des Bindemittels gewertet werden kann:

$$\frac{\log(G^*_{T=20^\circ\text{C}})}{\sin d(\delta_{T=20^\circ\text{C}})} = \frac{\log(G^*_{T=20^\circ\text{C}}) \cdot \sin d(\delta_{T=60^\circ\text{C}})}{\log(G^*_{T=60^\circ\text{C}}) \cdot \sin d(\delta_{T=20^\circ\text{C}})} \quad (2)$$

Es bleibt zu prüfen, ob dieser Bitumenkennwert durch die Verwendung der Temperaturgrenzen des Einsatzbereichs anwendbar bleibt, wobei DSR-Versuche bei niedrigen Temperaturen bislang nicht ausreichend durchgeführt wurden.

Im SHRP-Forschungsprogramm wird der Speichermodul zur Beurteilung des Ermüdungsverhaltens vorgeschlagen. Demgegenüber weisen mehrere Autoren darauf hin, dass dadurch Aussagen getroffen werden, die Beobachtungen aus der Praxis widersprechen. Vor allem bei der Prüfung von polymermodifizierten Bindemitteln kann keine Korrelation zwischen dem Speichermodul und den durch dynamische Langzeitversuche ermittelten Ermüdungskennwerten festgestellt werden.

Durch die gestaffelte Prüfung (sweep) einer Bindemittelprobe im DSR bei mehreren Frequenzen kann die Null-Scher-Viskosität (Zero Shear Viscosity ZSV) ermittelt werden. Dazu wird für jede Frequenz ein Viskositätswert aus Verlustmodul und Kreisfrequenz berechnet ( $G''/\omega$ ) und in Abhängigkeit der Frequenz aufgezeichnet. Die Frequenz ist solange zu verringern, bis ein linearer Verlauf des Wertes  $G''/\omega$  erzielt wird. Aus dem linearen Verlauf erfolgt eine Extrapolation des Wertes  $G''/\omega$  auf die Frequenz Null. Die damit ermittelte Null-Scher-Viskosität erlaubt eine Beurteilung des Kriechverhaltens unter einer statischen Belastung.

### 3.1.2 Versuch im Bending Beam Rheometer BBR

Ein an beiden Enden aufgelagerter Bitumenbalken wird bei einer Prüftemperatur mittig von einer konstanten Einzellast von

$P = 980 \text{ mN}$  für eine festgelegte Zeitdauer belastet. Im Verlauf der Prüfung stellt sich unter der Einwirkung der äußeren Last eine ständig ansteigende viskoelastische Durchbiegung ein. Aus der während des Versuchs aufgezeichneten Durchbiegung  $\delta(t)$  [mm], der aufgetragenen Belastung  $P$  [N] sowie den Probekörperabmessungen (Länge zwischen den Auflagern  $l$ , Breite  $b$  und Höhe  $h$  [mm]) kann die zeitabhängige Kriechsteifigkeit  $S(t)$  [MPa] berechnet werden:

$$S(t) = \frac{P \cdot l^3}{4 \cdot \delta(t) \cdot b \cdot h^3} \quad (3)$$

Die Tangentensteigung des Kriechsteifigkeitsverlaufs stellt die zum betrachteten Zeitpunkt vorhandene Relaxationsfähigkeit des Bindemittels, die Kriechnachgiebigkeit  $m$ , dar.

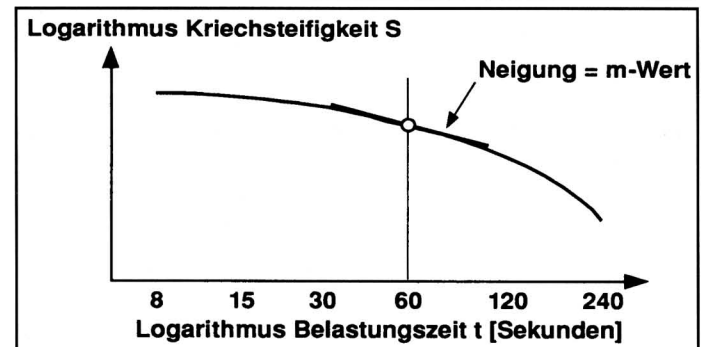
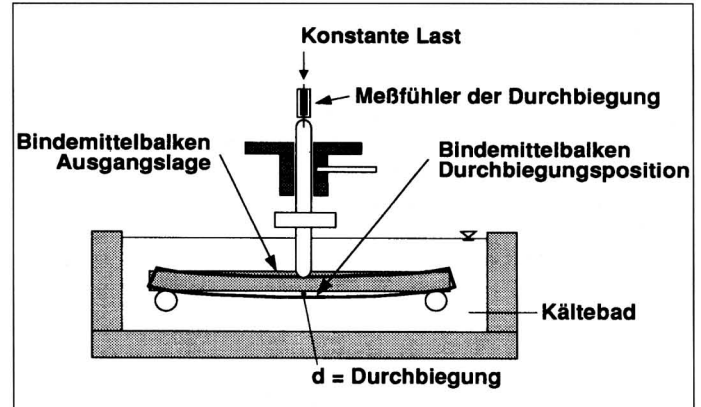


Bild 2: Bending Beam Rheometer (schematisch) [19]

Anschaulich deuten hohe Werte von  $m$  auf einen schnellen Spannungsabbau im Material hin, was auf eine gute Relaxationsfähigkeit schließen lässt.

### 3.1.3 Kraftduktilität KD

An Stelle des im SHRP-Programm entwickelten Direct Tension Test wurde in Europa die Duktilitätsprüfung durch die Ergänzung der Versuchseinrichtung durch Kraft- und Wegmessvorrichtungen zur Bestimmung der Kraftduktilität KD entwickelt. Im Wasserbad wird eine Bindemittelprobe bei einer Prüftemperatur zwischen  $+5^\circ\text{C}$  und  $+20^\circ\text{C}$  mit einer Geschwindigkeit von  $50 \text{ mm/min}$  bis zum Versagen oder bis zur maximalen Länge von  $100 \text{ cm}$  gezogen, wobei der Ausziehweg und die benötigte Zugkraft kontinuierlich gemessen werden.

Aus dem KD-Versuch können verschiedene Kennwerte ermittelt werden, die das Verhalten des geprüften Bindemittels beschreiben. Die während des Versuchs maximal auftretende Kraft  $F_{\text{max}}$  erlaubt Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Bitumens. Steife Bindemittel erreichen höhere Werte als weiche Bitumen. Weiterhin kann die Formänderungsarbeit  $E$  berechnet werden, die sich anschaulich als Fläche unter der Kraft-Verformungs-Kurve verdeutlicht. So lassen sich vor allem mo

diffizierte Bindemittel mit elastischeren Eigenschaften deutlich von Straßenbaubitumen unterscheiden. Vor allem die bereichsweise berechnete Formänderungsarbeit (z. B. zwischen einem Ausziehweg von 200–400 mm) erlaubt eine Unterscheidung der Bitumenarten, da der Anfangsbereich, bei dem bei allen Bindemitteln hohe Dehnungen erreicht werden, ausgespart wird.

### 3.2 Einflüsse der Probenkörperherstellung auf die Versuchsergebnisse

Die Präzision und Vorgehensweise während der Probekörperherstellung für DSR und BBR birgt große Fehlerquellen bei den performance-orientierten Prüfungen, da die Abmessungen meist mit in die Gleichungen zur Berechnung der Ausgabeparameter eingehen. Vor allem beim DSR-Versuch geht der Radius der Bitumenprobe mit der 4. Potenz in die Berechnung des Schermoduls ein, sodass bereits leichte Abweichungen vom Sollwert zu großen Fehlern führen.

Untersuchungen haben gezeigt [7], dass das direkte Vergießen des Prüfgutes auf die untere DSR-Platte mit anschließender Trimmung zu den besten Wiederholbarkeiten führt. Besonders die Benutzung von Silikon-Formen und das genaue Abwiegen der Bindemittelmenge erweisen sich als unvorteilhaft. Hohe Präzisionen konnten durch die Verwendung von DSR-Probekörpern erzielt werden, die aus zuvor in Probendicke hergestellten Bindemittelplatten gestanzt wurden [6].

Auch beim BBR-Versuch erwies sich die Benutzung von Silikon-Formen gegenüber den Formen aus Aluminium als unvorteilhaft. Die Probekörper sollten zügig nach der Herstellung der Prüfung unterzogen werden, da durch eine Lagerung zwangsläufig Kriechverformungen auftreten. Deshalb wird eine gegenüber der Prüfungsrichtung um 90° gedrehte Lagerungsposition der BBR-Prüfkörper empfohlen [4].

### 3.3 Ansprache der unterschiedlichen Bindemittelarten

Die konventionellen Prüfverfahren stehen vor der Problematik, dass sie modifizierte und gealterte Bindemittel nur unzureichend ansprechen, wodurch eine klare Unterscheidung dieser in Bitumenprüfungen häufig schwer fällt. Die hier betrachteten performance-orientierten Prüfverfahren differenzieren hingegen klar zwischen den einzelnen Bitumenarten.

Die Darstellung von Prüfungsergebnissen des DSR-Versuchs in Form eines Black-Diagramms eignet sich zur qualitativen Zuordnung von ungealterten Bindemitteln zu normalem oder polymermodifiziertem Bitumen (Bild 3). Auch wenn durch die bei unterschiedlichen Prüfbedingungen (Temperaturen, Frequenzen) gefundenen Wertepaare keine eindeutige Beschreibung des Materialverhaltens möglich ist, so weicht der stetige Verlauf der Prüfwerte von Normalbitumen deutlich von den geschwungenen Linien der polymermodifizierten Bindemittel ab.

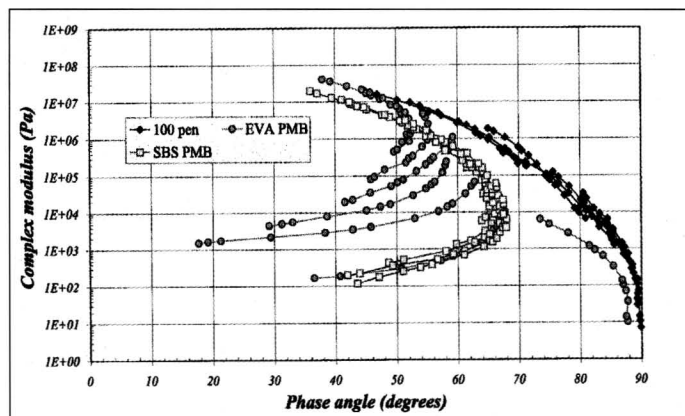


Bild 3: Black-Diagramm eines unmodifizierten Bitumens und zweier PMB [1]

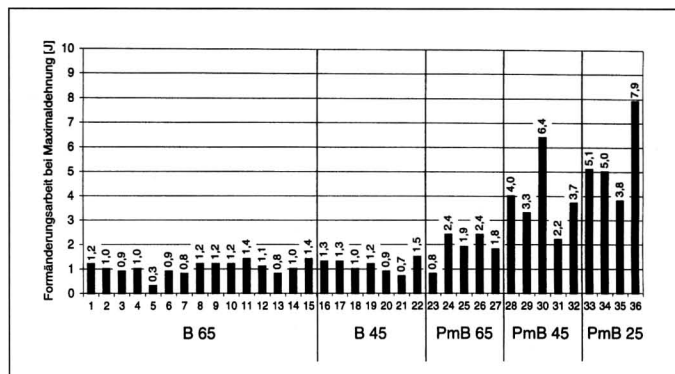
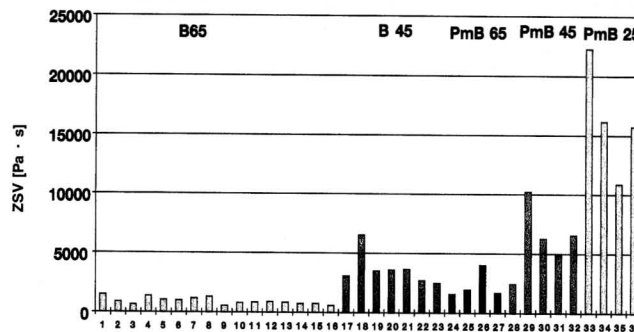


Bild 4: Unterscheidung zwischen PmB und Normalbitumen mittels ZSV und Formänderungsarbeit [5]

GUERICKE konnte mit Hilfe der Null-Scher-Viskosität ZSV und der Formänderungsarbeit E klar zwischen normalen und polymermodifizierten Bindemitteln differenzieren.

### 3.4 Alterung des Bindemittels

Durch die im Labor simulierte Kurz- und Langzeitalterung werden die verschiedenen Bindemittel unterschiedlich stark beeinträchtigt. An Hand von Black-Diagrammen können die unterschiedlichen Alterungsprozesse von Normalbitumen und PmB verdeutlicht werden [1]. Während unmodifiziertes Bitumen mit zunehmender Alterung versprödet, verdeutlicht durch kleinere Phasenwinkel und höhere Schubmoduln, gehen die elastizitätsfördernden Eigenschaften vom untersuchten PmB schon nach der Kurzzeitalterung verloren.

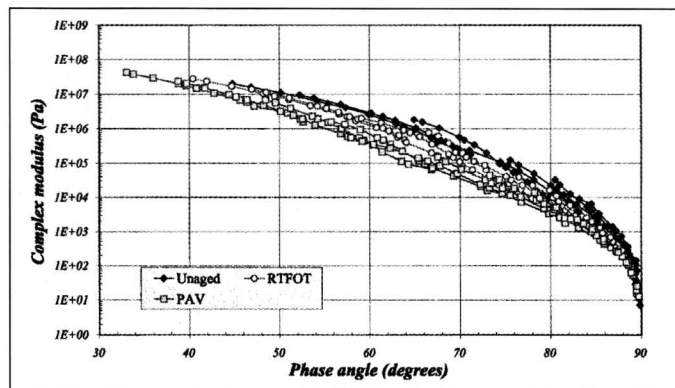


Bild 5 a: Black-Diagramme von einem Normalbitumen

### 3.5 Korrelationen zwischen performance-orientierten Prüfungen und konventionellen Testmethoden

In verschiedenen Forschungsarbeiten werden gute Korrelationsergebnisse zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel

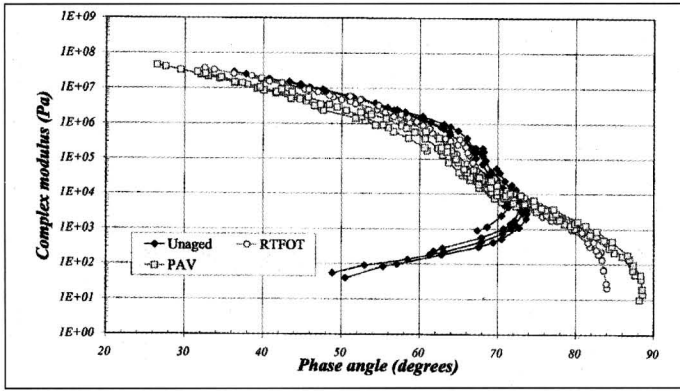


Bild 5 b: Black-Diagramme von einem PmB im Originalzustand sowie nach Kurz- und Langzeitalterung [1]

und den Ergebnissen des DSR-Versuchs erzielt. Bild 6 zeigt lineare Zusammenhänge der konventionellen Prüfgröße zur mittels DSR-Versuchen festgestellten oberen Gebrauchstemperatur nach SHRP 83 [8]. Beim Vergleich der Erweichungspunkte direkt mit dem rutting parameter R wird eine gute Korrelation durch eine Potenzfunktion gefunden [6].

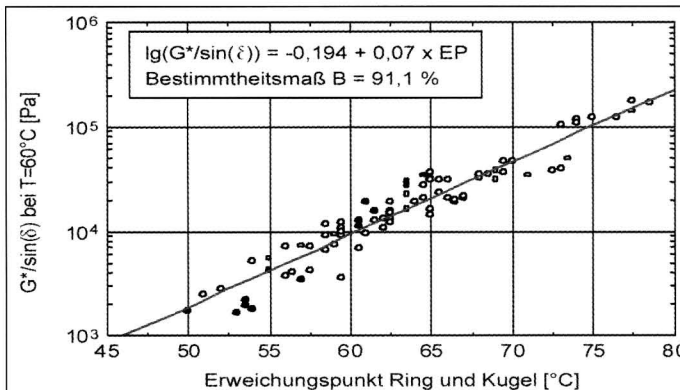
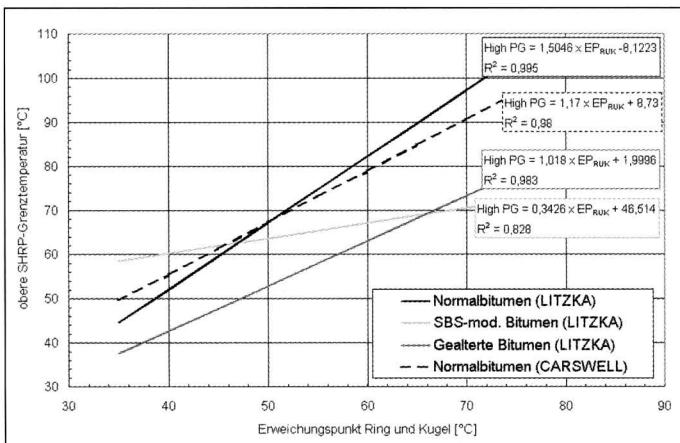


Bild 6: Lineare (oben) und potenzielle (unten) Korrelationen zwischen Erweichungspunkt Ring und Kugel und DSR-Ergebnissen [3, 6, 8]

Weiterhin wurde in einem Forschungsprogramm der ARBIT untersucht, ob die Prüfungsergebnisse von kurzzeitgealterten Bitumen mit Verformungsmessungen an Asphaltprobekörpern im Spurbildungsgerät in Zusammenhang gebracht werden können. Die beste Korrelation mit der Spurrinntentiefe bei 60 °C wird dabei von der Null-Scher-Viskosität ( $R^2 = 0,91$ ) erreicht. Die Korrelation der Spurrinntentiefe mit dem Erweichungspunkt RuK liegt etwas niedriger ( $R^2 = 0,84$ ). Die Korrelation mit der SHRP-Grenztemperatur ist mit ( $R^2 = 0,77$ ) am schwächsten.

Beim Vergleich zwischen den Ergebnissen aus dem BBR-Versuch und der herkömmlichen, das Kälteverhalten beschreibenden, Prüfgröße "Brechpunkt nach Fraaß" wurden voneinander abweichende Aussagen getroffen. Während LITZKA ( $R^2 = 0,912$ ) [8] und MIGLORI ( $R^2 = 0,911$ ) [9] gute lineare Zusammenhänge zwischen Brechpunkt nach Fraaß und der Temperatur, bei der die Messgrößen aus dem BBR-Versuch die SHRP-Grenzwerte erreichen, feststellten, konnte in Untersuchungen der ARBIT nur ein Korrelationskoeffizient von 0,22 erreicht werden. In Bezug zum Tieftemperaturverhalten von Asphalt stellte die ARBIT einen besseren Zusammenhang der Bruchtemperatur im Abkühlversuch zu der unteren Temperaturgrenze im BBR-Versuch fest als zum Brechpunkt nach Fraaß. Weitere Untersuchungen [3] ermittelten gute Übereinstimmungen zwischen der Temperatur, bei dem die Kriechnachgiebigkeit m den Grenzwert nach SHRP erreicht und der Temperatur bei maximaler Zugfestigkeitsreserve des Asphaltes.

WALLNER und WÖRNER korrelierten die maximal erreichte Kraft bei der Kraftduktilität mit anderen Bitumenkonstanzgrößen und stellten einen guten, durch eine Potenzfunktion beschriebenen Zusammenhang ( $R^2 = 0,97$ ) zur Nadelpenetration fest. Weiterhin fanden sie eine gute lineare Korrelation zur Viskosität bei 0 °C ( $R^2 = 0,98$ ) und zum rutting parameter aus dem DSR-Versuch ( $R^2 = 0,90$ ).

#### 4. Schlussfolgerungen

Die Auswertung von insgesamt 118 Literaturstellen erlaubt die Feststellung, dass die performance-orientierten Prüfverfahren auch zur Bestimmung der in Europa gebräuchlichen Bindemittel anwendbar sind. Auch können traditionelle Prüfverfahren und Asphaltprüfungen zu den neuen Tests in Korrelation gebracht werden, wobei hier aber der große Einfluss der gewählten Untersuchungsparameter auf Prüfungsergebnisse beachtet werden muss. PmB können mittels DSR oder KD von Normalbitumen unterschieden werden. Bei der Literaturanalyse wurde deutlich, dass viele Ergebnistrends bisher gefunden wurden. Es fehlt doch bei allen drei betrachteten Prüfverfahren noch ein einheitlicher Bewertungshintergrund, der eine eindeutige und übertragbare Interpretation von Prüfungsergebnissen möglich macht. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

#### Literaturverzeichnis

- [1] AIREY: Use of Black Diagrams to Identify Inconsistencies in Rheological Data, Road Material and Pavement Design, Vol. 3 – No. 4/2002
- [2] BELLIN: Die Ergebnisse der Bitumen- und Asphaltforschung des Strategic Highway Research Program SHRP, Bitumen; (1995)02
- [3] CARSWELL: The classification of bitumens and polymer modified bitumens within the SHRP performance grading system, 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000
- [4] DE BAST THIERS: Exploring low temperature properties of bituminous binders with the bending beam rheometer, 1<sup>st</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, 1996, Paper 5.106
- [5] GUERICKE: ARBIT-Untersuchungsprogramm 1998/99 an 36 Bindemitteln, Bitumen, 63(2001)1
- [6] HAGNER: Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Scher-Rheometer, Dissertation, Braunschweig 2003
- [7] HUNTER & AIREY: "Sensitivity Analysis of Dynamic Shear Rheometer Sample Preparation Methods", 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000
- [8] LITZKA: Erfahrungen mit "performance-related" Bindemitteluntersuchungen in Österreich: Der Zusammenhang von Standard-Tests mit den SHRP-Prüfungen, 2<sup>nd</sup> Eurasphalt & Eurobitume Congress, Barcelona 2000
- [9] MIGLORI: Étude du comportement à basse température des bitumes routiers, Application du Bending Beam Rheometer, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées (1996)03/04