



Sven Hahn

# **Auswertung der dissipierten Energie zur Bestimmung der Ermüdung von Straßenbauasphalt bei verschiedenen Prüfungsarten**

---

Johannes Schrader

# **Erweiterte Untersuchungen auf den Einfluss der Probenvorbereitung und Regelungsvorgaben auf Ergebnisse von Oszillationsmessungen mittels Dynamischen Scher-Rheometer**

2015

## **Vorwort**

Dieses Heft der ISBS Schriftenreihe beinhaltet zwei herausragende studentische Arbeiten zur prüftechnischen Ansprache von Straßenbaustoffen.

Sven Hahn widmet seine Masterarbeit der Laborprüfung von Asphalt mit Hilfe von zyklischen Prüfverfahren. Er zeigt auf, wie in verschiedenen Prüfungsarten das Asphaltverhalten unter Dauerbelastung mit Hilfe der dissipierten Energie treffend beschrieben werden kann. Auf dieser Grundlage ist es möglich, die Aussagekraft unterschiedlicher Prüfungsarten hinsichtlich definierter Schadenskriterien zu bewerten. Damit leistet Sven Hahn einen wertvollen Beitrag zu einer verbesserten Interpretation von zyklischen Laborprüfungen. Die Arbeit wurde mit dem KEMNA Preis 2014 ausgezeichnet.

Johannes Schrader widmet seine Bachelorarbeit der Ansprache der Bitumeneigenschaften mittels Dynamischem Scherrheometer. Mit Hilfe von Reihenuntersuchungen an unterschiedlichen Bitumenarten und -sorten studiert er den Einfluss von Probenvorbereitung und Regelungsvorgaben auf die Ergebnisse von Oszillationsmessungen. Er identifiziert ausgiebig die spezifischen rheologischen Bitumeneigenschaften und schafft notwendige Grundlagen zur Weiterentwicklung der Prüfsystematik. Für seine Arbeit erhielt Johannes Schrader 2014 den EUROVIA Straßenbaupreis.

Zu diesen Arbeiten und zu den erzielten Preisen gratuliere ich Sven Hahn und Johannes Schrader sehr herzlich und wünsche den beiden Straßenbauingenieuren für ihre weiteren Tätigkeiten viel Erfolg!

Braunschweig, im Juni 2015

Michael P. Wistuba

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Sven Hahn: Auswertung der dissipierten Energie zur Bestimmung der Ermüdung von Straßenbauasphalt bei verschiedenen Prüfungsarten**

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Stand des Wissens .....</b>	<b>7</b>
2.1 Untersuchung der Ermüdungseigenschaften von Asphalt .....	7
2.1.1 Definition der Materialermüdung .....	7
2.1.2 Ermüdungskriterien.....	10
2.2 Selbstheilungsverhalten (Healing) von Asphalt.....	16
2.2.1 Versuchstechnische Ansprache des Healing-Verhaltens .....	16
2.2.2 Kenngrößen zur Quantifizierung der Selbstheilung .....	17
<b>3 Prüfmethodik .....</b>	<b>23</b>
3.1 Spaltzug-Schwellversuch .....	23
3.1.1 Prüfeinrichtung .....	24
3.1.2 Versuchsdurchführung.....	25
3.1.3 Versuchsauswertung .....	26
3.2 Zug-Schwellversuch.....	29
3.2.1 Prüfeinrichtung .....	30
3.2.2 Versuchsdurchführung.....	31
3.2.3 Versuchsauswertung .....	31
3.3 Zug-Druck-Wechselversuch.....	31
3.4 Prüfbedingungen .....	33
3.4.1 Ermüdungsversuche.....	33
3.4.2 Healing-Versuche .....	33
3.5 Eingesetzter Asphalt.....	34
<b>4 Programm zur Auswertung von Ermüdungs- und Healing-Versuchen.....</b>	<b>35</b>
4.1 Auswertung von Ermüdungsversuchen.....	36

4.1.1	Neue Berechnung starten .....	36
4.1.2	Berechnungsergebnisse und Ermüdungskriterien.....	37
4.1.3	Speichern der Berechnungsergebnisse.....	39
4.1.4	Visualisierung der Rohdaten.....	39
4.1.5	Darstellung von Lissajous-Figuren .....	40
4.2	Auswertung von Healing-Versuchen .....	41
4.2.1	Neue Berechnung starten .....	42
4.2.2	Berechnungsergebnisse und Ermüdungskriterien.....	42
4.2.3	Berechnung der Healing-Indizes.....	43
4.2.4	Darstellung von Lissajous-Figuren .....	46
<b>5</b>	<b>Versuchsauswertung und Ergebnisdarstellung .....</b>	<b>48</b>
5.1	Ermüdungsversuche .....	48
5.1.1	Vergleich der Ermüdungskriterien.....	48
5.1.2	Vergleich der Versuchstypen.....	56
5.2	Healing-Versuche.....	62
5.2.1	Vergleich der Ermüdungskriterien.....	62
5.2.2	Vergleich der dissipierten Energie.....	65
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>67</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>69</b>
<b>8</b>	<b>Anhang A – Ermüdungsversuche.....</b>	<b>71</b>
<b>9</b>	<b>Anhang B – Healing-Versuche.....</b>	<b>90</b>

## Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Ermüdungs- und Healing-Verhalten von einem Asphaltmischgut der Sorte AC 11 D S untersucht. Dazu wurden vorliegende Rohdatensätze ausgewertet, welche im Rahmen vorangegangener Forschungsprojekte am Institut für Straßenwesen (ISBS) erzeugt worden sind. Zum Einsatz kamen dabei der Spaltzug-Schwellversuch an zylindrischen Probekörpern, der Zug-Schwellversuch sowie der Zug-Druck-Wechselversuch an prismatischen Probekörpern. Der wesentliche Teil dieser Arbeit besteht in der Implementierung eines Auswertungsprogramms für Ermüdungs- und Healing-Versuche mit der kommerziellen Software MATLAB. Es wurde ein eigenständiges Programm mit grafischer Benutzeroberfläche entwickelt, mit welchem die Berechnung und Visualisierung von Ermüdungs- und Healing-Kenngrößen durchgeführt werden kann. Darüber hinaus kann auf die berechneten Verläufe des Steifigkeitsmoduls  $|E^*|$  und der Energy Ratio ER wahlweise das konventionelle Ermüdungskriterium oder das Ermüdungskriterium Makroriss angewendet werden. Die Berechnung der Energy Ratio kann mit der vereinfachten Form von Rowe oder der ursprünglichen Methode von Hopman durchgeführt werden. Vor diesem Hintergrund wurden die eingesetzten Prüfverfahren auch hinsichtlich ihrer Eignung zur Ermittlung von Ermüdungskenngrößen miteinander verglichen. Weiterhin wurde ein Vergleich der Ermüdungskriterien durchgeführt. Zur Charakterisierung des Selbstheilungsverhaltens wurden Healing-Indizes berechnet, welche ebenfalls auf Grundlage der Energy Ratio nach Hopman und nach Rowe ermittelt worden sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- der Zug-Druck-Wechselversuch erweist sich zur Ansprache des Ermüdungsverhaltens als vorteilhaft,
- die von Rowe getroffene Annahme eines konstanten Phasenwinkels während der Spaltzug-Schwellprüfung kann bestätigt werden, sodass die vereinfachte Berechnung der Energy Ratio zu hinreichend genauen Ergebnissen führt,
- für Zug-Schwellversuche und Zug-Druck-Wechselversuche sollte die Auswertung auf Grundlage der Energy Ratio nach Hopman erfolgen, da die Abweichungen in den Lastwechselzahlen im Mittel 6 % betragen,
- die Berechnung nach Hopman führt somit immer zu geringeren Lastwechselzahlen,
- die Berechnung der Healing-Indizes unter Zugrundelegung der beiden Berechnungsvarianten der Energy Ratio führt tendenziell zu einer qualitativ gleichwertigen Bewertung des Selbstheilungsverhaltens.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Berechnungsergebnisse des Programms validiert werden konnten. Darüber hinaus stellt die Wahl der Methode zur Berechnung der Energy Ratio einen Einflussfaktor auf die Qualität der Ergebnisse und die Beurteilung des Ermüdungs- und Healing-Verhaltens dar.

## Abstract

Within this master thesis, the fatigue and healing behaviour of an asphalt AC 11 D S is investigated. Therefore, raw data sets, obtained from previous research projects at the Braunschweig Pavement Engineering Centre (ISBS), have been evaluated and analysed. To obtain the data, the dynamic tensile test on cylindrical specimen (ITT-CY), the tension-tension and the tension-compression test on prismatic specimen had been employed. The key part of this thesis includes the implementation of an analysis program for fatigue and healing tests in the commercial MATLAB computing environment. A stand-alone program with graphical user interface for the computation and visualisation of fatigue and healing parameters has been developed.

Furthermore, either the conventional fatigue criterion or the macrocrack-based criterion can be applied to the calculated behaviour of the dynamic complex modulus  $|E^*|$  and the energy ratio ER. The energy ratio can be computed both with the simplified concept of Rowe and the original method according to Hopman. With that in mind, the test methods used have also been compared with regard to their ability to identify fatigue parameters. Another main point was the comparison of the different fatigue criteria. To characterise the self-healing capability, healing indices, have been calculated. These are again based on the energy ratio according to Hopman and Rowe respectively. Within the present work, the following conclusions can be drawn:

- the tension-compression test proves to be favourable for addressing the fatigue behaviour,
- Rowe's assumption of a constant phase angle during dynamic tensile testing can be confirmed, so that the simplified calculation of the energy ratio yields sufficiently accurate results,
- when using tension-tension and tension-compression tests, the analysis should be performed based on Hopman's energy ratio, because the deviations in load cycle numbers are 6 % mean,
- hence, the Hopman-based calculation always leads to lower load cycle numbers,
- the calculation of the healing indices using the two computation methods for the energy ratio leads by tendency to a qualitatively equal rating of the self-healing capability.

In summary, the calculative results of the program could be validated. Moreover, the choice of the method for calculating the energy ratio is a factor influencing the quality of the results and the assessment of the fatigue and healing behavior.

## **Inhaltsverzeichnis**

### **Johannes Schrader: Erweiterte Untersuchungen auf den Einfluss der Probenvorbereitung und Regelungsvorgaben auf Ergebnisse von Oszillationsmessungen mittels Dynamischen Scher-Rheometer**

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>115</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>116</b>
<b>1 Einleitung und Problemstellung.....</b>	<b>117</b>
<b>2 Studie zur Ansprache rheologischer Eigenschaften .....</b>	<b>119</b>
2.1 Grundlagen der Rheologie .....	119
2.2 Messverfahren zur Ansprache rheologischer Eigenschaften .....	122
2.3 Funktionsweise des Dynamischen Scher-Rheometers bei Oszillationsmessung..	127
2.4 Vorgaben und Schwächen der DIN EN 14770 .....	131
2.4.1 Versuchsdurchführung.....	132
2.4.2 Regelparameter .....	132
2.4.3 Applikation der Probe.....	133
2.4.4 Wiederholbarkeit .....	134
<b>3 Vorgehensweise.....</b>	<b>135</b>
3.1 Prüfgerät.....	135
3.2 Materialien .....	135
3.3 Versuchsvorbereitung .....	137
3.4 Untersuchungsprogramm .....	137
3.4.1 Bestimmung LVE-Bereich .....	137
3.4.2 Regenerationsverhalten nach Schädigung der Probe.....	138
3.4.3 Applikation der Probe.....	139
3.4.4 Konditionierungsdauer .....	139
3.4.5 Prüfzeitpunkt .....	141
<b>4 Prüfergebnisse.....</b>	<b>142</b>
4.1 Bestimmung LVE Bereich.....	142
4.2 Regenerationsverhalten nach Schädigung der Probe .....	145

4.3	Applikation der Probe .....	148
4.4	Konditionierungsdauer .....	150
4.4.1	Stabilisierungszeit für das Straßenbaubitumen 50/70 .....	150
4.4.2	Stabilisierungszeit für das Polymermodifizierte Bitumen 25/55-55 A .....	151
4.4.3	Gleichgewichtseinstellungsdauer .....	152
4.4.4	Stabilisierungszeit von Gussformen mit unterschiedlichen Lagedauern....	153
4.5	Prüfzeitpunkt.....	155
4.6	Prüfreihefolge.....	156
<b>5</b>	<b>Bewertung der Prüfergebnisse .....</b>	<b>158</b>
5.1	Statistische Auswertung.....	159
5.2	Empfehlungen zur Überarbeitung des Regelwerkes .....	161
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>163</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>165</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>167</b>
8.1	Amplitudensweeps des Straßenbaubitumens 50/70 bei 1,59 Hz .....	167
8.2	Amplitudensweeps des Straßenbaubitumens 50/70 bei 10 Hz .....	168
8.3	Amplitudensweeps des Polymermodifizierten Bitumens 25/55-55 A.....	170



## **Kurzfassung**

Die mechanischen Eigenschaften von Bitumen sind stark temperaturabhängig. Durch unterschiedliche Prüfverfahren lassen sich diese für verschiedene Temperaturbereiche bestimmen. Durch die Entwicklung leistungsfähigerer Bitumen wurde das Materialverhalten komplexer und ist nicht mehr durch einfache konventionelle Methoden ansprechbar. Ein geeignetes Verfahren zur Ansprache rheologischer Materialeigenschaften über einen weiten Temperaturbereich stellt das dynamische Scher-Rheometer dar. Durch die oszillierende (schwingende) Beanspruchung einer Bitumenprobe zwischen zwei parallelen Platten können physikalische Kenngrößen bestimmt werden.

Die Probenvorbereitung und die Regelungsvorgaben für die Prüfung von Bitumenproben im dynamischen Scher-Rheometer sind in der DIN EN 14770 geregelt. Da die Messergebnisse durch die hohe Empfindlichkeit des dynamischen Scher-Rheometers bereits von kleinsten Variationen in der Durchführung beeinflusst werden, ist es wichtig, geeignete Regelungsparameter zu verwenden.

Die Vorgaben der DIN EN 14770 sind jedoch teilweise sehr rudimentär und lassen einen großen Interpretationsspielraum zu. In dieser Arbeit werden unter anderem die möglichen Variationen und Schwächen der DIN EN 14770 identifiziert und diskutiert. Um den Einfluss der Variationen auf das Messergebnis festzustellen, werden verschiedene Untersuchungen im dynamischen Scher-Rheometer durchgeführt. Die angegebenen Grenzen der DIN EN 14770 für Regelungsparameter werden dabei teilweise bewusst über- und unterschritten, um deren Einfluss auf die Messergebnisse zu beurteilen.

Es werden Einflüsse aus der

- Wahl der Solldeformation,
- Probenapplikation (direkt oder unter Verwendung von Gussformen),
- Konditionierungsdauer,
- Probenschädigung (durch Messungen außerhalb des LVE-Bereichs) auf Folgemessungen sowie
- Zeitliche Differenz zwischen Wiederholungsmessungen untersucht.

Die Ergebnisse der Prüfungen werden ausgewertet und daraus Empfehlungen zur Anpassung der DIN EN 14770 angegeben.

## **Abstract**

The mechanical properties of bitumen are strongly temperature dependent. They can be determined by different testing methods for different temperature ranges. With the development of more efficient bitumen the material behavior was getting more complex and cannot be examined by simple conventional testing methods anymore. A suitable method to examine rheological material properties over a wide temperature range is the Dynamic Shear-Rheometer. In this measuring system a bitumen sample between two parallel plates is burdened with an oscillating stress to determine the physical characteristics.

The sample preparation and the control input to analyze bitumen samples in the Dynamic Shear-Rheometer is regulated in the DIN EN 14770. Because of the high sensitivity of the Dynamic Shear-Rheometer the results are already affected by smallest variations in the execution. Therefore it is important to use appropriate control parameters.

However, the standards of the DIN EN 14770 are partially obsolete and allow room for interpretation. In the present study, among other things, the possible variations and weaknesses of the standards will be identified and discussed. To determine the influence of variations on the measurement result, various studies will be performed in the Dynamic Shear-Rheometer. The limits of the DIN EN 14770 for control parameters will deliberately be exceeded in order to assess their influence on the measurement results.

The influence of

- choice of target deformation,
- sample application (directly or through use of molds),
- conditioning period,
- sample damage (by measurements outside of the LVE-range) on following measurements and
- temporal differences between repetitive measurements will be examined.

The results of the tests are evaluated to provide recommendations for adapting the DIN EN 14770.