Kurzfassung der Diplomarbeit

Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten verfasst von

Dipl. Ing. Bernhard Hofko[†]

In den letzten Jahren haben so genannte Gebrauchverhaltensorientierte (GVO) Prüfverfahren in den Alltag der Bitumen- und Asphaltprüfung Eingang gefunden und sind inzwischen zum Großteil in europäischen Normen geregelt. Durch diese Verfahren erhält man physikalisch fundierte, vergleichbare und damit auch naturwissenschaftlich anerkannte Parameter für Asphalte.

Ein weiterer Schritt ist die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Asphalten mit Hilfe rheologischer Modelle. Erste brauchbare Modelle lieferten Huet und Sayegh in den Sechzigerjahren des letzten Jahrhunderts, die seither weiterentwickelt und verfeinert wurden. So lassen sich zu einem bestimmten Modell Parameter für verschiedene Asphalte/Bitumen ableiten, die dann unter anderem zur numerischen Simulation mit Finite-Elemente-Methoden (FEM) verwendet werden können.

Grundlagen

Asphalte weisen ein viskoelastisches, bei hohen Temperaturen auch viskoplastisches Verhalten auf. **Viskoelastizität** kennzeichnet ein unter anderem von Spannung, Zeit, Temperatur und Belastungsfrequenz abhängiges Verformungsverhalten. Der Spannungs- und Verzerrungszustand eines Körpers ist nicht mehr eindeutig definiert, wenn allein der Belastungszustand zu einem Zeitpunkt t bekannt ist. Zusätzlich muss ein Parameter eingeführt werden, der die Belastungsgeschichte kennzeichnet.

Grundelemente rheologischer Modelle beschreiben die verschiedenen Arten des Verformungsverhaltens in einem Modell. Es sind Repräsentanten für elastisches, linear und nichtlinear viskoses und plastisches Verhalten - Abb. 2 zeigt eine Darstellung der üblich verwendeten Symbole.

Von Bedeutung für das rheologische Verhalten von Asphalten ist der parabolische Dämpfer. Die allgemeine Formel der Kriechnachgiebigkeit eines parabolischen Dämpfers lautet:

$$J_{par}(t) = J_a(\frac{t}{\tau})^k \tag{1}$$

Während die Kriechnachgiebigkeit des linearen Dämpfers nur durch einen Parameter bestimmt wird, können beim parabolischen Dämpfer drei Parameter variiert werden. Mit dem dimensionslosen Exponenten k wird das zeitliche Verhalten beeinflusst. Gilt $0 \le k \le 1$, so steigt die Kriechnachgiebigkeit degressiv mit der Zeit, für $k \ge 1$ steigt sie progressiv. τ stellt die charakteristische Zeit des viskosen Verhaltens dar und lässt eine Temperaturkalibrierung zu. Das sind Vorraussetzungen um das rheologische Verhalten von Bitumen, das ebenfalls zeit- und temperaturabhängig ist, abbilden zu können.

Viskoelastisches Materialverhalten unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung

In der Diplomarbeit wurden die konstitutiven Beziehungen auch für dynamische Beanspruchung mit einer schwingenden Belastung $F = F^{(0)} cos(\omega t)$ hergeleitet. Dabei drückt $F^{(0)}$ die Amplitude und ω die Kreisfrequenz der Belastung aus. Diese äußere Kraft führt im Probekörper zu einer Spannung

$$\sigma = \sigma^{(0)} \cos \omega t \tag{2}$$

Hier stellt $\sigma^{(0)\square}$ die Amplitude und ω die Kreisfrequenz der erzwungenen Schwingung dar.

Besitzt nun der Probekörper linear viskoelastische Eigenschaften und wirkt eine schwingende Belastung auf ihn ein, so wird die Reaktion eine sinusförmig schwingende Verzerrung sein. Die Frequenz, die dabei auftritt ist dieselbe, jedoch um einen Phasen- oder Verlustwinkel δ verschoben. Damit ergibt sich die Verzerrung zu

$$\varepsilon = \varepsilon^{(0)} \cos(\omega t - \delta) \tag{3}$$

 $\varepsilon^{(0)}$ beschreibt in dieser Formel die Verzerrungsamplitude. Grafisch dargestellt ist der Sachverhalt in Abb. 1. Indem der komplexe Zahlenraum eingeführt und Umformungen durchgeführt werden, erhält

[†] Die Arbeit wurde am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung der TU Wien unter Leitung von Univ. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Ronald Blab und Dipl. Ing. Karl Kappl erstellt.

man schließlich die dynamischen Kennwerte. Sie werden analog zu den statischen als komplexe Nachgiebigkeit J^* und komplexer Modul E^* bezeichnet und sind wie folgt definiert:

$$E^* = \frac{\sigma^{(0)}}{\varepsilon^{(0)}} e^{i\delta} = \frac{\sigma^{(0)}}{\varepsilon^{(0)}} (\cos \delta + i \sin \delta) = E_1 + iE_2 = \left| E^* \right| e^{i\delta}$$

$$\tag{4}$$

$$J^* = \frac{\varepsilon^*}{\sigma^{(0)}} = (\frac{\varepsilon^{(0)}}{\sigma^{(0)}})e^{-i\delta} = (\frac{\varepsilon^{(0)}}{\sigma^{(0)}})(\cos \delta - i\sin \delta) = J_1 - iJ_2 = |J^*|e^{-i\delta}$$
 (5)

 E_1 und J_1 sind die realen Anteile der komplexen Kennwerte, sie werden auch als Speicheranteil bezeichnet. E_2 und J_2 sind die imaginären Anteile der dynamischen Kennwerte und werden als Verlustanteile bezeichnet.

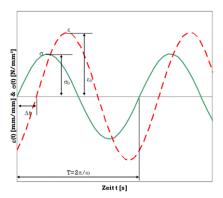


Abb. 1: Sinusförmig schwingende Belastung σ , Verzerrungsantwort ϵ und Phasenwinkel δ

Lineare rheologische Modelle

Zunächst beschäftigt sich die Diplomarbeit mit einfachen, rheologischen Modellen. Es sind dies das Maxwell-, das Kelvin-Voigt und das Burgers-Modell (siehe Abb. 2). Die statischen und dynamischen Modellkennwerte werden mathematisch hergeleitet und das daraus folgende Verformungsverhalten für den statischen und zyklisch-dynamischen Belastungsfall diskutiert.

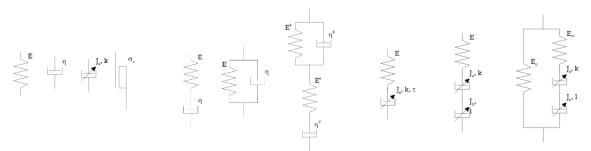


Abb. 2: v..l.n.r.: lineare Feder, linearer Dämpfer, parabolischer Dämpfer, Maxwell-Modell, Kelvin-Voigt-Modell, Burgers-Modell, Power-law-Modell, Huet-Modell, Huet-Sayegh-Modell

Beispielhaft seien der statische und dynamische Modul für den Kelvin-Voigt'schen Körper dargestellt.

$$R(t) = E + \eta \delta(t) \tag{6}$$

$$E^*(\omega) = E + i\omega\eta, \quad E_1(\omega) = E, \quad E_2(\omega) = \eta\omega$$
 (7)

Modelle mit parabolischen Elementen

Zeitlineare Modelle vermögen das komplexe Verformungsverhalten von Asphalten nicht ausreichend genau abzubilden. Daher werden in der Diplomarbeit Modelle mit parabolischen Dämpfern behandelt. Als einfachstes nichtlineares Modell ist das Power-law-Modell anzusehen. Es ist analog zum Maxwell-Modell aufgebaut, der lineare Dämpfer wird jedoch durch einen parabolischen ersetzt.

Fügt man diesem Modell einen weiteren parabolischen Dämpfer in Serie hinzu, so entsteht das Huet-Modell, das 1963 von C. Huet entwickelt wurde. Es ist das erste Modell, das eigens für die Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten entwickelt wurde.

Um auch das Rückkriechen adäquat beschreiben zu können, entwickelte G. Sayegh im Jahr 1965 das Huet'sche Modell weiter, indem er einen parallelen Ast mit einer linearen Feder hinzufügte. Einen Überblick über die Modelle zeigt Abb. 2

Für diese Modelle wurden wiederum die statischen und dynamischen Kennwerte - sofern analytisch möglich – hergeleitet und umfassend diskutiert. Die Herleitung ist aufgrund der parabolischen Dämpfer mathematisch nicht mehr trivial und bedarf einiger Hilfsinstrumente, wie etwa der Laplace Transformation.

Zur Anschauung ist hier der komplexe Modul des Huet-Sayegh'schen Modells aufgeführt.

$$E_{hs}^{*}(\omega) = E_{0} + E_{hu}^{*} = E_{0} + \frac{1}{\frac{1}{E_{\infty}} + J_{a}\tau^{-k}\Gamma(k+1)(i\omega)^{-k} + J_{b}\tau^{-l}\Gamma(l+1)(i\omega)^{-l}}$$
(8)

$$E_{0} = E_{0} + \frac{\frac{1}{E_{\infty}} + J_{a} \tau^{-k} \Gamma(1+k) \cos(\frac{k\pi}{2}) \omega^{-k} + J_{b} \tau^{-l} \Gamma(1+l) \cos(\frac{l\pi}{2}) \omega^{-l}}{N}$$

$$E_{1} = E_{0} + \frac{\frac{1}{E_{\infty}} + J_{a} \tau^{-k} \Gamma(1+k) \cos(\frac{k\pi}{2}) \omega^{-k} + J_{b} \tau^{-l} \Gamma(1+l) \sin(\frac{l\pi}{2}) \omega^{-l}}{N}$$
(9)
$$E_{2} = \frac{J_{a} \tau^{-k} \Gamma(1+k) \sin(\frac{k\pi}{2}) \omega^{-k} + J_{b} \tau^{-l} \Gamma(1+l) \sin(\frac{l\pi}{2}) \omega^{-l}}{N}$$
(10)

$$E_2 = \frac{J_a \tau^{-k} \Gamma(1+k) \sin(\frac{k\pi}{2}) \omega^{-k} + J_b \tau^{-l} \Gamma(1+l) \sin(\frac{l\pi}{2}) \omega^{-l}}{N}$$
(10)

wobei mit N der Nenner der Brüche bezeichnet wird. Er ist aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle nicht angeführt.

Interpretation von Ergebnissen

Das Cole-Cole-Diagramm, wie in Abb. 3 abgebildet, wird verwendet, um Ergebnisse von zyklischdynamischen Materialprüfungen darzustellen. Es bildet die imaginären, viskosen Anteile des dynamischen Models über den realen, elastischen Anteilen ab.

Verhält sich ein Material so, wie die rote Kurve in Abb. 3 zeigt, so liegt im hohen Temperaturbereich (am linken Teil der Kurve) stark viskoses Verhalten (mit großen Verformungen) vor, während auch im Tieftemperaturbereich (am rechten Teil der Kurve) noch Nachgiebigkeitsreserven vorhanden sind. Die grüne Kurve stellt eine Asphaltmischung dar, die bei hohen Temperaturen geringe Viskositäts- und damit bleibende Verformungsanteile aufweist. Dafür zeichnet sich ein solches Material durch Sprödigkeit im tiefen Temperaturbereich aus. Verschiebt sich der rechte Schnittpunkt mit der x-Achse, der E_{∞} -Wert, nach links, so wird das System bei tiefen Temperaturen weicher.

Für ausreichend elastisches Verhalten bei tiefen Temperaturen ist das Modellverhalten der roten Kurve günstig. Dafür ist die Verformungsanfälligkeit bei Temperaturen über 25 °C für dieses Modell erhöht, was sich negativ auf das Gebrauchsverhalten auswirkt. Daher ist für diesen Temperaturbereich die grüne Modellkurve besser geeignet, da die bleibenden Verformungen bei hohen Temperaturen geringer ausfallen.

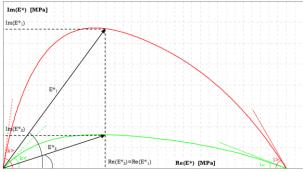


Abb. 3: Schematisches Cole-Cole-Diagramm

In Abb. 4 sind die Cole-Cole-Diagramme für vier zyklisch-dynamische Prüfverfahren von Asphalten zu sehen. Wirft man einen Blick auf die E∞-Werte, die gleichzeitig den Glasmodul bei tiefen Temperaturen und hohen Frequenzen repräsentieren, so ist eine Schwankungsbreite von 5.500 MPa bzw. 18 % erkennbar. Den höchsten Wert, die größte Steifigkeit also erhält man aus dem direkten Druckversuch, das Minimum kann dem Analogon im Zugbereich, dem direkten Zugversuch zugeordnet werden, lässt

man den 4-Punktbiegebalken außer Acht, dessen Ergebnisse nur indirekt mit den drei anderen vergleichbar sind. Für eine direkte Vergleichbarkeit sind zu große Unterschiede in der Geometrie und der Lage des Probekörpers in der Prüfmaschine, sowie in der Belastungsart vorhanden. Damit zeigen die Ergebnisse das Verhalten des Asphalts bei unterschiedlichen Belastungsarten (Zug, Druck, Zug/Druck, Biegung) sehr gut.

Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Versuchstypen lässt sich klar erkennen, dass bei der Verwendung von Parametern für computerunterstützte Modellierungen Rücksicht auf die Versuchsart, die Datengrundlage der Parameteridentifizierung war, genommen werden muss. In Abstimmung mit den Randbedingungen der Modellierung – etwa ob Zug-, Druck oder Biegebeanspruchung simuliert werden soll – müssen auch die dazugehörigen Parameter des richtigen Versuchstypus verwendet werden.

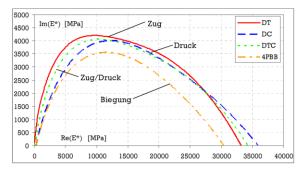


Abb. 4: Cole-Cole-Diagramme (Huet-Sayegh) bei Auswertung unterschiedlicher Prüfmethoden