

## DIPLOMARBEIT

# Methoden zur Bewertung der Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmischgut mittels 4-Punkt Biegebalken

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab  
und

Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko,  
E230/3 Institut für Verkehrswissenschaften  
Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien,  
Fakultät für Bauingenieurwesen,

von

**Atanas Petkov**

E610

Tschehovstrasse 74, 1113 Sofia

Sofia, Bulgarien, 09.02.2014

---

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 Zielsetzung der Diplomarbeit .....	2
<b>2. THEORETISCHER HINTERGRUND</b> .....	<b>3</b>
2.1 Asphaltermüdung und Ermüdungsbeständigkeit.....	3
2.2 Mechanische Materialeigenschaften von Asphaltmischgut .....	5
2.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen von Asphaltmischgut.....	19
<b>3. EINFLUSSNEHMENDE PARAMETER BEI DER ASPHALTERMÜDUNG</b> .....	<b>21</b>
3.1 Einfluss der Versuchssteuerung .....	21
3.2 Einfluss von Lastpausen .....	26
3.3 Einfluss von Mischgutparameter .....	28
<b>4. 4-PUNKT BIEGEPRÜFUNG</b> .....	<b>35</b>
4.1 Vierpunkt-Biegebalken Steifigkeitsprüfung – dynamischer $ E^* $ Modul .....	39
4.2 Vierpunkt-Biegebalken Ermüdungsprüfung – komplexer Steifigkeitsmodul $S$ .....	41
<b>5. ERMÜDUNGSKRITERIEN</b> .....	<b>46</b>
5.1 Konventionelles Ermüdungskriterium nach EN 12697-24.....	46
5.1.1 Darstellung des dreidimensionalen Spannungszustandes mittels eindimensionaler Vergleichsspannung .....	47
5.2 Klassisches Ermüdungskriterium (classic failure criterion).....	51
5.3 Schadensausfallskriterium (damage failure criterion).....	53
5.4 Bruchversagenskriterium (breakage failure criterion).....	54
5.5 Ermüdungskriterien gegründet auf die dissipierte Energie.....	55
5.5.1 Pronk und Hopman Verfahren .....	59
5.5.2 Pronk Verfahren.....	61
5.5.3 Rowe und Bouldin Verfahren .....	62
5.5.4 Ratio of Dissipated Energy Change Verfahren .....	65
5.5.5 Al Khateeb and Shenoy Verfahren .....	68
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>71</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>75</b>
<b>8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>78</b>
<b>9. TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>80</b>

# 1. EINLEITUNG

Das entwickelte Verkehrssystem und besonders das leistungsfähige Strassennetz sind von grundlegender Bedeutung für die wirtschaftliche Entwicklung der hoch entwickelten Länder. Dabei ist die Anwendung von Asphalt für die Strassenkonstruktionen vorrangig, weil der Grossteil des Strassennetzes (ungefähr 94% Prozent in den USA<sup>1</sup>, mehr als 90% in Europa<sup>2</sup>, 95% in Österreich<sup>3</sup>) aus Asphalt gebaut ist. Asphalt in seiner Natur ist wegen seiner temperatur- und bindemittelabhängigen Materialeigenschaften eine flexible Befestigung und das bedingt unter anderem seine Anfälligkeit für dauernde Verformungen infolge der Verkehrsbelastungen und Umwelteinwirkungen bei einer ungünstigen Materialenauswahl.

Deswegen ist die effiziente Dimensionierung von Strassenbaukonstruktionen aus technischer, als auch aus wirtschaftlicher Hinsicht eine der wichtigsten Aufgaben aus dem Bereich der Strassenplanung. Die Verkehrsbelastung ist eine Gesamtheit zeitveränderlicher Lastimpulse, deren Stärke, Dauer und Schadenfolge in der Zeit variiert und die Strassenbefestigung dynamisch beansprucht. Der ursprüngliche Konstruktionszustand wird durch den Strassenbetrieb schrittweise herabgesenkt und die Zustandsänderung, die die Benutzbarkeit der Strassenbefestigung beeinträchtigt, äussert sich als Schaden an der Oberfläche.

Die Vielfältigkeit der einflussnehmenden Faktoren und die aussergewöhnlich komplizierte Erfassung des Gesamtverhaltens der Strassenkonstruktionen ist heutzutage nicht mehr nur durch die traditionellen empirischen Verfahren zufriedenstellend zu bewältigen. Dazu trägt auch der Trend der ständig zunehmenden Verkehrsbelastung bei. Es setzt die Notwendigkeit von modellierten, theoretisch und wissenschaftlich begründeten Erfassungen des komplexen Tragverhaltens von Fahrbahnbefestigungen voraus.

---

<sup>1</sup> National Asphalt Pavement Association. Asphalt Pavement Overview. [http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14&Itemid=33](http://www.asphaltpavement.org/index.php?option=com_content&view=article&id=14&Itemid=33) (20.10.2013)

<sup>2</sup> European Asphalt Pavement Association. The Asphalt Paving Industry, A Global Perspective – Second Edition. In: <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/GL101-2nd-Edition.pdf> (20.10.2013)

<sup>3</sup> Gesellschaft zur Pflege der Strassenbau Technik mit Asphalt. In: [http://www.gestrata.at/publikationen/publ\\_archiv/GESTRATA\\_Image\\_Broschure.pdf](http://www.gestrata.at/publikationen/publ_archiv/GESTRATA_Image_Broschure.pdf) (20.10.2013)

Zu der ausreichenden Voraussage des Gebrauchsverhaltens der Strassenbefestigungen wurden daher Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode entwickelt, die das Verhalten der Fahrbahnbefestigungen unter Laborbedingungen realitätsnah simulieren.

## **1.1 Zielsetzung der Diplomarbeit**

Die vorliegende Diplomarbeit ist eine Literaturrecherche im Bereich der Methodik zur Beurteilung der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt unter Laborbedingungen, mit Hilfe der 4-Punkt Biegeprüfung. Die Diplomarbeit hat als Ziel den Ermüdungsprozess bei Asphalt zu beschreiben und die wichtigsten Einflussparameter darzustellen, die auf den Ermüdungsprozess einwirken. Es werden dabei die konventionellen Kriterien zur Ermittlung der Ermüdungsresistenz von Asphalt dargestellt, sowie auch moderne alternative Methoden zur Einschätzung des Ermüdungsprozesses.

In dem Einleitungskapitel werden kurz der Anwendungsbereich und die Bedeutung von Asphalt für den Strassenbau erwähnt, die Voraussetzungen für die Entwicklung und Anwendung von gebrauchsvorhaltensorientierten Prüfungen vorgestellt.

Innerhalb von dem zweiten Kapitel ist die Natur von Asphalt als Baustoff, sowie das mechanische Verhalten dieses Materials dargestellt. Schwerpunkt dieses Kapitels ist die analytische Herleitung der Materialparameter, die das Ermüdungsverhalten von Asphaltmischgütern charakterisieren und die Erklärung des Ermüdungsmechanismus bei Asphalt.

In dem dritten Kapitel werden die wichtigsten Material- und Versuchsparameter zusammengefasst, die auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt einwirken und die auf die Ermüdungsprüfung Einfluss nehmen.

In dem vierten Kapitel wird die theoretische Begründung und die praktische Anwendung der 4-Punkt Biegeprüfung als Prüfungsanordnung zu der Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Asphaltmischgüter unter Laborbedingungen dargestellt.

In dem fünften Kapitel werden die Kriterien zu der Beurteilung des Ermüdungseintritts behandelt. Es werden die Nachteile der Phänomenologischen Ermüdungskriterien erläutert und die Möglichkeiten zu der alternativen Einschätzung des Ermüdungsprozesses behandelt.

## 2. THEORETISCHER HINTERGRUND

### 2.1 Asphaltermüdung und Ermüdungsbeständigkeit

Die Ermüdung ist ein Prozess, bei dem der Asphaltüberbau sich durch die Rissbildung verschlechtert. Die wiederholte Belastung durch Verkehr erzeugt geringe, jedoch nicht umkehrbare Dehnungen, die sich wegen der rheologischen Eigenschaften der Asphalte akkumulieren. Wenn die angebrachten Belastungen entfernt werden, ist die Asphaltmischung bestrebt, ihren ursprünglichen Zustand zu erreichen. Wegen des zyklischen Charakters der Belastung aber sammeln sich die induzierten Dehnungen im Laufe der Zeit an und deshalb können sie sich nicht vollständig abbauen. Die Ermüdung und die davon bedingte Rissbildung beginnen am unteren Rande der Asphaltmischung, wo das Material infolge der Verkehrsbelastung Zugspannungen unterzogen wird. Nach der Rissinitiierung an der Unterkante der Asphaltmischung, breiten sich die Risse vertikal bis zum Erreichen der Fahrbahnoberfläche aus. Oft bilden sich als Folge der Ermüdungsrisse ganze Rissnetze, die auf der Fahrbahn zu bemerken sind. Die Risse erlauben den Wasserzulauf in die unteren Schichten der Fahrbahnbefestigung und das eindringende Wasser kann den Baugrund abschwächen. Infolge der Ermüdungsrisse können auch Schlaglöcher entstehen, die den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit kompromittieren.<sup>4</sup>

Ermüdungsrisse können auch von der Fahrbahnoberfläche herab anfangen (top-down cracking). Solche Risse entwickeln sich längs in Richtung der Reifenbahn. Der Mechanismus der Entstehung solcher Risse ist aber noch nicht tiefgründig untersucht worden. Die Entstehung von Rissen dieser Art wird der Spannungskonzentration in der Kontaktfläche zwischen den Reifen und der Fahrbahn beigemessen. Zu der Bildung solcher Risse können auch die schlechte Qualität der Produktion und der Einbautechnologie des Asphaltmischguts und die vorzeitige Härtezunahme durch die Alterung beitragen.<sup>5</sup>

Die Ermüdung von Asphalt und die dabei erzeugte Rissbildung kann sowohl auf mikroskopischer als auch auf makroskopischer Ebene betrachtet werden. Die Nachforschung der Rissbildung verlangt die Berücksichtigung von Asphalt als heterogener

---

<sup>4</sup> Diefenderfer, Stacey: Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009.

<sup>5</sup> Emery, John: Evaluation and Mitigation of Asphalt Pavement Top-Down Cracking. 2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. In: <http://www.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2006/docs/s010/emery.pdf>

Baustoff. Dabei betätigt sich die Grenzfläche der Bindung zwischen der Gesteinskörnung und dem Bindemittel als Konzentrador von Spannungen, woraus die Rissinitiierung stammt. Danach breiten sich die Risse durch diese Grenzflächen aus, weil diese Flächen die Schwachstellen des heterogenen Materials darstellen und in diesen erfährt die Rissausbreitung den kleinsten Widerstand. Die Behandlung der Rissbildung auf lokaler Ebene verlangt den Einsatz von komplizierten Methoden der Plastizitätstheorie.<sup>6</sup>

Zweckmässig für die Untersuchungen der Ermüdungsbeständigkeit im Labor zum Beispiel mit Hilfe des Vierpunkt-Biegebalkenversuchs (4PBB) ist die Betrachtung des Asphaltgemisches auf globalen Ebene. Auf makroskopischen Ebene wird Asphalt als inhomogenes Material aufgefasst, welchem homogene Eigenschaften zugeschrieben werden. In diesem Fall entwickeln sich die Risse in der Asphaltmischung unabhängig von der Zusammenarbeit ihrer Bestandteile. Dabei wird der Einfluss der Eigenschaften der einzelnen Komponenten im Vergleich zu dem Verhalten des ganzen Gemisches vernachlässigt. Die Rissverbreitungsanalyse wird mit Hilfe von bruchmechanischen Konzepten behandelt, wobei Asphalt als gleichartiges Material angenommen wird.<sup>7</sup>

Wichtige Aspekte bei der Ermüdungsuntersuchung ist die Berücksichtigung der Temperatur- und Belastungseinflüsse. Die viskoelastischen Eigenschaften von Asphaltmischungen bestimmen ihre Temperaturempfindlichkeit im Beanspruchungszustand. Bei höheren Temperaturen ähnelt das Bitumenverhalten dem Verhalten einer viskose Flüssigkeit und bei Tieftemperaturen dem Verhalten eines elastischen Festkörpers. Deswegen ist die Einwirkung der angebrachter Belastung stärker bei höheren Temperaturen. Die Belastungsdauer übt auch eine Einwirkung auf die Materialantwort aus. Die Asphaltermüdung wird durch die Ansammlung von Dehnungen verursacht. Im Laufe der Zeit jedoch kehren sich die Dehnungen im Asphalt teilweise um, wenn die Ruhepausen zwischen den Belastungen genug dauern. Im Gegenteil reichen die Ruhepausen bei im Labor geprüften Probekörper zum vollkommenen Spannungsabbau nicht aus und die Dehnungen werden akkumuliert. Deswegen tritt die Ermüdung bei laborgeprüften Probekörper viel schneller als die Ermüdung von Asphalt tatsächlich in situ.<sup>8</sup>

---

<sup>6</sup> Diefenderfer, Stacey: Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009.

<sup>7</sup> Diefenderfer, Stacey: Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009.

<sup>8</sup> Diefenderfer, Stacey: Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009.

## 2.2 Mechanische Materialeigenschaften von Asphaltmischgut

Asphalt ist ein Verbundbaustoff, der sich aus Gesteinskörnung, Bindemittel, Hohlraumgehalt und oftmals Zusatzmittel zusammensetzt. Jeder Bestandteil der Asphaltmischung weist ein spezifisches Verhalten im Beanspruchungszustand auf. Herkömmlich wird Zuschlagstoff als elastisches Material angenommen. Das Bindemittel wird andererseits als linear viskoelastisches Stoff anerkannt. Die letzte Annahme wird auf die Asphalteigenschaften übertragen<sup>9</sup>, um die Asphaltanalysen zu vereinfachen, obwohl sich Asphalt tatsächlich viel komplexer als das Bindemittel selbst verhält. Obwohl bei Tieftemperaturen unter 0°C eine Annahme von einem linear elastischen Verhalten akzeptabel ist, tritt das nichtlinearelastische und das viskoelastische Verhalten bei höheren Temperaturen für die Gebrauchsverhaltensanalyse als problematisch auf. In dem Bereich kleiner Dehnungen ( $100 * 10^{-6} = 10^{-4}$  m/m für Asphaltmischungen und  $10^{-2}$  m/m für Bitumen<sup>10</sup>) kann das Verhalten von Asphalt als linear angenommen werden. Die praktische Ableitung dieser Grenzwerte (im Rahmen des amerikanischen SHRP) ist von grosser Bedeutung, weil die viskoelastischen Parameter (Komplexer Steifigkeitsmodul, Phasenwinkel und das Zeit-Temperatur- Superpositionsprinzip) sich auf die Voraussetzung dieser viskoelastischen Linearität gründen. Die meisten rechnerischen Verfahren zur Bestimmung der Materialeigenschaften in der Vergangenheit wurden auf die Vermutung von linearer Elastizität gegründet, wegen der Erschwerungen bei dem Einsatz von nichtlinearelastischen oder viskoelastischen Konzepten. Der Vorsprung in den Computertechnologien aber fördert die Anwendung von linear viskoelastischen Modellen.<sup>11</sup>

Als Ergebnis von der Verkehrsbelastung und den Temperaturänderungen entstehen im Asphalt elastische, plastische, viskose, viskoelastische und viskoplastische Verformungsanteile. Damit man deren Charakter versteht, sollte sich man auch mit den Definitionen von Elastizität, Platizität, Viskosität, Viskoelastizität und Viskoplastizität vertraut machen:

- Unter dem Begriff **Elastizität** versteht man die Eigenschaft des festen Materials einer angebrachten Kraft zeitunabhängig zu widerstehen, wobei die durch die Kraft

---

<sup>9</sup> Read, J., Whiteoak, D. : The Shell Bitumen Handbook 5<sup>th</sup> edition. London. 2003.

<sup>10</sup> Airey, G. Rahimzadeh, B. Collop, A. : Viscoelastic linearity limits for bituminous materials. 6<sup>th</sup> International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Zürich. 2003

<sup>11</sup> Diefenderfer, Stacey: Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University. 2009.

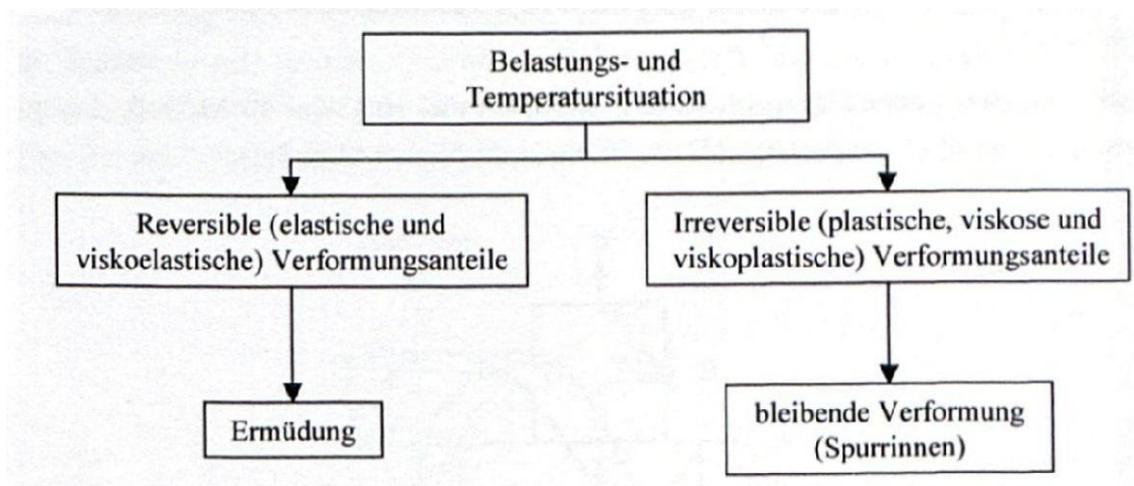
hervorgerufene Materialverformung nach der Kraftentfernung auf die Urform vollständig zurückkommt. Die für die elastische Verformung des Materials gebrauchte Energie wird während der Belastung als Verformungsenergie in dem Material gespeichert und bei der Entlastung wird diese abgegeben, wobei die Materialaufbauteilchen ihre Anfangslage erreichen. Wird die dem Material inhärente Elastizitätsgrenze überschritten, dann wird das Material dauernd verformt und kann nicht mehr in die Ausgangsform zurückkehren. Die **elastischen Deformationen** sind folgend spontane Verformungen des belasteten Materials, die sich unverzüglich nach der Entlastung vollständig rücksetzen.

- Im Gegenteil beschreibt die **Plastizität** die Fähigkeit des Werkstoffs, seine Form unter Kraffteinwirkung nach Überschreitung der Plastizitätsgrenze zu verändern und diese Form nach der Entlastung dauernd aufzubewahren. Die **plastischen Deformationen** sind auch spontane Deformationen. Die sind aber nicht unumkehrbar und bleibend.
- Mit dem Begriff **Viskosität** beschreibt man die Zähflüssigkeit eines Stoffs. Je grösser die Viskosität eines Materials, desto schwerflüssiger dieses ist und umgekehrt- je niedriger die Viskosität, desto fließfähiger dieses ist. Die Viskosität eines Materials ist auf die zu übermannende Verzahnung seiner Bestandteilchen zurückzuführen. Je längere Ketten zum Beispiel ein Alkan in seiner Zusammensetzung besitzt, desto grössere Reibung zwischen deren Ketten auftritt, das heisst das Material ist weniger fließfähig und hochviskos und es wird grössere Kraft benötigt, damit die Verzahnung überwunden wird. Folgend fließt ein niedrigviskoser Stoff schneller im Vergleich zu einem hochviskosen Stoff bei gleichen Bedingungen. Dabei sind die **viskosen Deformationen** zeitabhängige Deformationen des belasteten Materials, die einen unumkehrbaren Charakter aufweisen und nach der Entlastung bleiben. Die Zeitabhängigkeit stellt auch den wesentlichen Unterschied zwischen den plastischen und den viskosen Deformationen dar- die plastischen Verformungen treten unverzögert ein, während die zähflüssigen Verformungen zeitgebunden verlaufen. Die viskosen Verformungen sind abhängig nicht nur von der Belastungsdauer sondern auch von der Belastungsgeschwindigkeit.
- Die **Viskoelastizität** ist ein zeitgebundenes Verhalten des Materials, das von der Temperatur sowie von der Belastungsfrequenz stark empfindlich beeinflusst wird. Wie der Begriff selbst andeutet, weisen viskoelastische Materialien teilweise viskoses und zum Teil elastisches Verhalten auf, welches auf die umgebenden Faktoren und dem Belastungscharakter zurückzuführen sind. In Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur verhält sich der viskoelastische Stoff entweder ähnlich wie eine Flüssigkeit (bei höheren Temperaturen), oder wie ein Festkörper (bei

Tiefemperaturen). Zum Unterschied von dem rein elastischen Verhalten, wo sich die Belastung und die Materialantwort unverzüglich betätigen, tritt die Materialverformung bei dem viskoelastischen Material zeitverschoben nach der Belastung ein. Bei der Entlastung eines belasteten viskoelastischen Stoffes kehrt die elastische Verformungskomponente umgehend zurück, während die viskose Komponente sich dem Urzustand zeitversetzt nähert. **Viskoelastische Deformationen** sind umkehrbar und zeitabhängig. Diese Dehnungen setzen sich nach der Entlastung vollständig zurück.

- Die **Viskoplastizität** ist analog zu der Viskoelastizität ein zeitabhängiges Stoffverhalten, das sich in zwei Anteile unterteilen kann- viskoser und plastischer Anteil. Der plastische Anteil ist nicht zeitgebunden und tritt bei Belastung spontan ein, während der viskose Anteil verzögert eintritt. Im Gegensatz zu den viskoelastischen Verformungen sind die **viskoplastischen Deformationen** unumkehrbar und bleibend.<sup>12</sup>

Man kann die Verformungen grundsätzlich in rückstellbaren und unumkehrbaren gliedern [Abbildung 2-1]:



**Abbildung 2-1: Aufteilung auf reversible und irreversiblen Verformungsanteilen in Asphaltbefestigungen und die daraus langfristig entstehende Schädigung<sup>13</sup>**

Die auf [Abbildung 2-1] geschilderten rückstellbaren Verformungen im Asphalt sind auf seine elastische und viskoelastische Verformungsanteile zurückzuführen. Bei tiefen Temperaturen

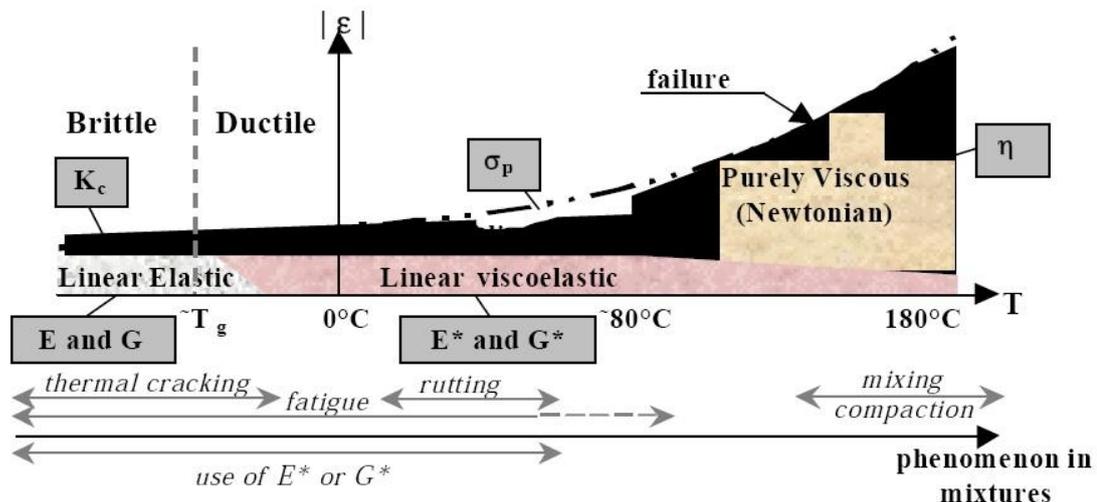
<sup>12</sup> Kappl, K: Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von Zyklischen Triaxialprüfungen. Dissertation. Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung an der TU Wien. 2007.

<sup>13</sup> Wistuba, M.:Klimaeinflüsse auf Asphaltstrassen. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2003

weisen die Asphaltmischgüter nahezu linear elastisches, zeitunabhängiges Verhalten auf. Infolge dessen entwickeln sich durch die Beanspruchung herforderufenen Verformungen nach der Entlastung vollständig zurück.<sup>14</sup>

Im Gegensatz verhält sich das Bitumen bei hohen Temperaturen viskos. Die plastischen, viskosen und viskoplastischen Eigenschaften des Asphalts sind verantwortlich für die irreversiblen Asphaltverformungen. Diese bleiben auch nach der Entlastung erhalten und rufen die Spurbildung auf der Fahrbahnoberfläche hervor.<sup>15</sup>

In dem mittleren Temperaturbereich zwischen den oben beschriebenen verhält sich das Bitumen nicht rein elastisch, sondern viskoelastisch. Das Bitumenverhalten in den drei beschriebenen Temperaturbereiche wird auf der folgenden Abbildung [Abbildung 2-2] dargestellt:



**Abbildung 2-2: Asphalt und Bitumenverhalten in den verschiedenen Temperaturbereichen<sup>16</sup>**

Zu der Untersuchung von den unterschiedlichen Bitumen- und Asphaltmechanischen Eigenschaften werden unterschiedliche Modelle eingesetzt. Das Zwei-Platten Modell [Abbildung 2-3] veranschaulicht die Deformation eines Stoffes, das zwischen zwei Platten

<sup>14</sup> Xiao, Shangzhi: Investigation of Performance Parameters for Hot-Mix Asphalt. Dissertation. Purdue University, Indiana, USA. 2006.

<sup>15</sup> Blab, R.: Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2001.

<sup>16</sup> Olard, F., Benedetto, H., Eckmann, B.: Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures. Road Materials and Pavement Desig. 2003

eingespannt wird. Während die untere Platte unbeweglich befestigt wird, oszilliert die obere Platte unter der Wirkung eines Kurbelantriebs. Die Deformation  $\gamma$  wird definiert als das Verhältnis der seitlichen Auslenkung  $s$  der oberen Platte zu der Stärke  $h$  des Stoffschichtes zwischen den beiden Platten:  $\gamma = \frac{s}{h} * 100$  (%). Eine seitliche Verschiebung der oberen Platte ergibt somit eine Deformation  $\gamma$  von 100 %.<sup>17</sup>

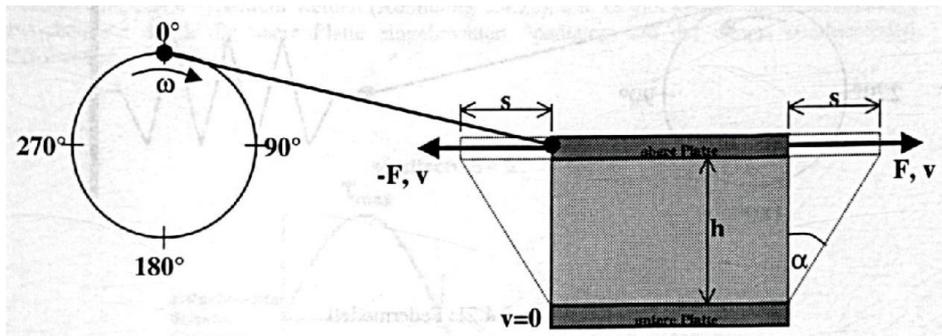


Abbildung 2-3 Zwei-Platten Modell<sup>18</sup>

Die rheologischen Modelle bestehen aus Spiralfedern, die das elastische Verhalten abbilden und aus Dämpfern, die für das viskose Verhalten stehen. Bei idealelastischen Materialien, wobei das elastische Anteil 100% beträgt wird ein Federmodell angewandt [Abbildung 2-4]. Dann kann das idealelastische Verhalten einer zwischen den zwei Platten eingespannte Substanz durch die Arbeit einer Feder erklärt werden. Nach dem Hooke'schen Gesetz gilt<sup>19</sup>:

$$\sigma = E * \varepsilon$$

$$\tau = G * \gamma$$

Gleichung 2.1

Bezeichnungen:  $\tau$ .....Scherspannung der Substanz im Zwei-Platten Modell [Pa]  
 $\sigma$ .....Spannung der Feder im Federmodell [Pa]  
 $\gamma$ .....Scherdeformation der Substanz im Zwei-Platten Modell [-]

<sup>17</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998

<sup>18</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998

<sup>19</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998

$\varepsilon$ .....Dehnung der Feder im Federmodell [-]

$G$ .....Schubmodul der Substanz im Zwei-Platten Modell [Pa]

$E$  .....Elastizitätsmodul der Feder im Federmodell [Pa]

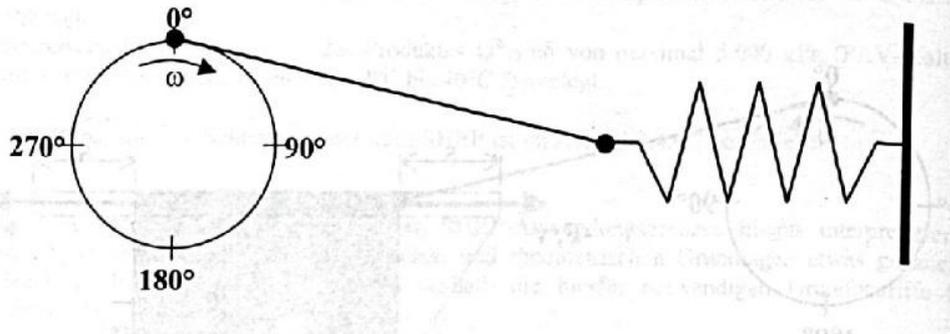


Abbildung 2-4 Federmodell für idealelastischen Substanzen<sup>20</sup>

In Tabelle [Tabelle 2-1] sind die maximalen und die minimalen Spannungs-, Dehnungs- und Verformungsgeschwindigkeitswerte des Federmodells [Abbildung 2-4] zusammengefasst. Man kann verallgemeinern, dass die Feder der Kraft widersteht, die sie verformen möchte. Je grösser die Deformation, desto grössere Kraft wird benötigt. In den Punkten bei 90° und 270°, wo die höchsten Federverformungen zu beobachten sind, ist die Spannung entsprechend am grössten. Dabei hängt die Verformungsamplitude der Feder nur von der Größe der angebrachten Kraft und nicht von der Belastungsgeschwindigkeit ab.<sup>21</sup>

Tabelle 2-1 Deformation und Spannung im Federmodell<sup>22</sup>:

Stellung des Kurbeltriebes	Deformation	Spannung	Verformungsgeschwindigkeit
0°	0	0	maximal
90°	maximal	maximal	0
180°	0	0	maximal
270°	maximal	maximal	0

<sup>20</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998

<sup>21</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998.

<sup>22</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998

Das idealviskose Materialverhalten wird mit Hilfe eines hydraulischen Dämpfers modelliert [Abbildung 2-5]. Das Gesetz von Newton besagt, dass die Schergeschwindigkeit  $D = \frac{\partial v}{\partial y}$  proportional der aufgetragenen Spannung  $\tau$  ist, wobei der Proportionalitätsfaktor die dynamische Viskosität  $\eta$  des Stoffes darstellt.

$$\tau = \eta * \frac{\partial v}{\partial y} = \eta * D$$

Gleichung 2.2

Bezeichnungen:  $\tau$ .....Scherspannung [Pa]

$\frac{\partial v}{\partial y}$ .....Geschwindigkeitsgradient senkrecht zu den parallelen

Strömungslinien [1/s]

$\eta$ .....dynamische Viskosität [Pa.s]

D.....Schergeschwindigkeit [1/s]

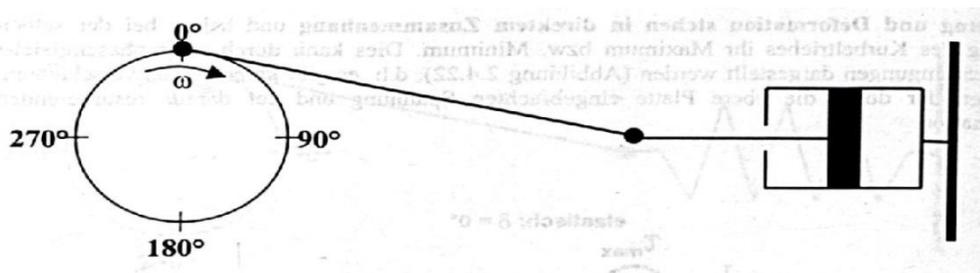


Abbildung 2-5 Dämpfermodell für idealviskose Substanzen<sup>23</sup>

Tabelle 2-2 Deformation und Spannung im Dämpfermodell<sup>24</sup>

Stellung des Kurbeltriebes	Deformation	Spannung	Verformungsgeschwindigkeit
0°	0	maximal	maximal
90°	maximal	0	0
180°	0	maximal	maximal
270°	maximal	0	0

<sup>23</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998.

<sup>24</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998.

Man kann den Prozess kurz so fassen, dass die viskose Substanzen dagegen kämpfen, schnell verformt zu werden. Je schneller sich man die Hand ins Wasser zum Beispiel bewegt, desto grösser die Spannung im Wasser und die erforderliche Kraft. Die notwendige Kraft ist dabei nur von der Verformungsgeschwindigkeit und nicht von der Verformungsamplitude abhängig. Aus der [Tabelle 2-2] kann man sehen, dass bei den  $0^\circ$  und  $180^\circ$  Punkten im Kurbelmodell, wo die Verformungsgeschwindigkeit ihre grösste Werte beträgt, ist auch die maximale Spannung zu betrachten. Verformung und Spannung hängen jedoch indirekt voneinander und ihre optimale Werte sind um  $90^\circ$  verschoben. Diese Versetzung kann auch mittels zweier Sinusschwingungen veranschaulicht werden [Abbildung 2-6]:<sup>25</sup>

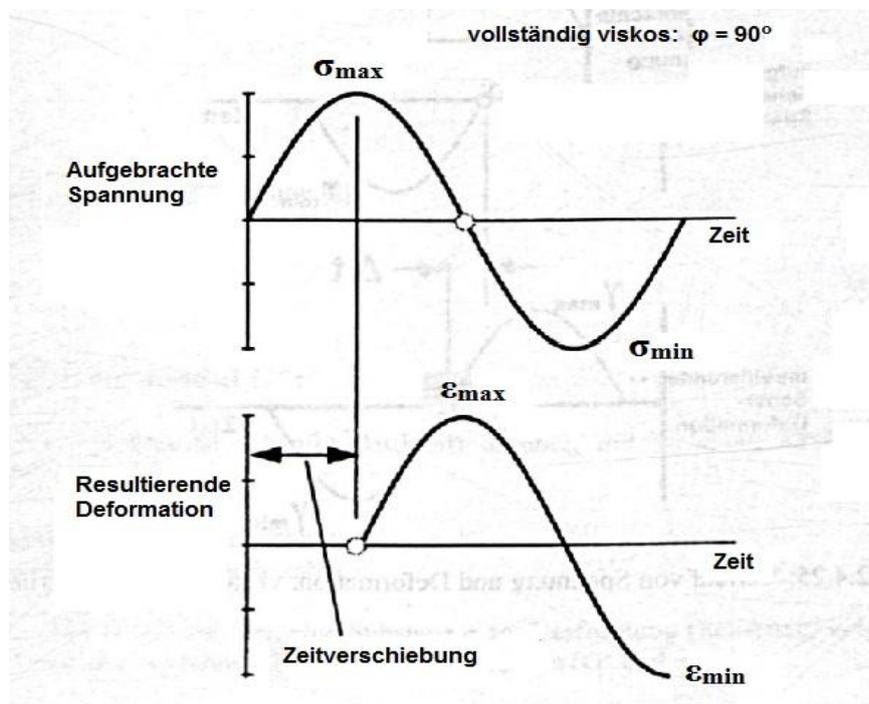


Abbildung 2-6: Rein Viskoses Verhalten<sup>26</sup>

<sup>25</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H.: Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998.

<sup>26</sup> National Highway Institute Course №131053: Superpave Fundamentals, Reference Manual. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.

### Maxwell Modell

Eine Feder und ein Dämpfer werden nacheinander angeordnet. Dabei ist die erzeugte Spannung in dem Dämpfer und in der Feder gleich  $\sigma^e = \sigma^v = \sigma$ . Die Gesamtverzerrung ist gleich der Summe des elastischen und des viskosen Anteils  $\varepsilon^e + \varepsilon^v = \varepsilon$ . Bei Belastung verhält sich dieses System spontan elastisch und bei kontinuierlicher Belastung löst sich die entstandene Spannung langsam auf. Es läuft eine viskose Verformung vor (Relaxation). Wird die aufgebrachte Kraft entfernt, dann federt der Gesamtkörper graduell in seine ursprüngliche Form zurück. Das Maxwell Modell wird schematisch auf [Abbildung 2-7] abgebildet.<sup>27</sup>

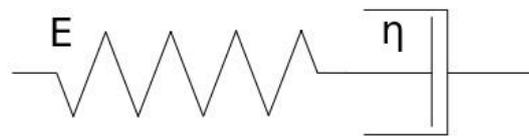


Abbildung 2-7: Maxwell Modell<sup>28</sup>

### Kelvin-Voigt Modell

Dieses Modell [Abbildung 2-8] besteht aus einer Feder und einem Dämpfer, die parallel betrieben werden. Die Verformungen in den beiden Bestandteilen des Systems sind zeitlich gleich- $\varepsilon^e = \varepsilon^v = \varepsilon$ . Die Gesamtspannung ist die Summe der Einzelspannungen-  $\sigma^e + \sigma^v = \sigma$ . Zufolge dieses Modells kriecht das Bitumen bei Belastung und bei Entlastung wird keine plötzliche Rückformung erlaubt, die Rückformung tritt verzögert auf.

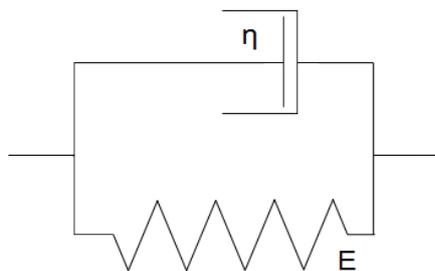


Abbildung 2-8: Kelvin-Voigt Modell<sup>29</sup>

<sup>27</sup> Mezger, T.: The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers. 2<sup>nd</sup> edition. Hannover. 2006.

<sup>28</sup> Mezger, T.: The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers. 2<sup>nd</sup> edition. Hannover. 2006

## Burgers Modell

Das Burgers Modell ist eine Kombination der zwei oben genannten Modellen, wobei diese in Reihenschaltung angeordnet werden. Dieses Modell setzt sich gut bei der Beschreibung des Asphaltverhaltens an und beschreibt das Bitumenverhalten genauer.

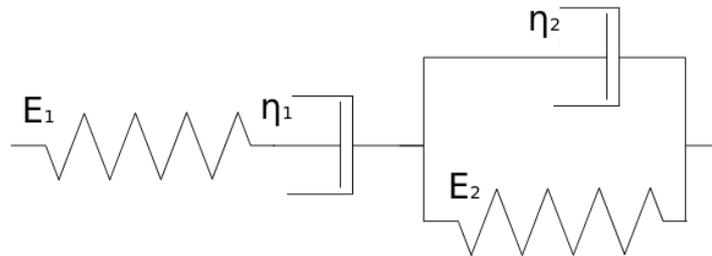


Abbildung 2-9: Burgersmodell<sup>30</sup>

Tatsächlich sind die Substanzen weder 100% elastisch, noch völlig viskos. Das Materialverhalten, das zwischen dem Verhalten idealer Festkörper und idealer Flüssigkeiten befindet, lässt sich als viskoelastisch beschreiben. Folgend werden die Sinusschwingungen der erzeugten Spannung  $\sigma(t)$  und der materialantwortenden Deformation  $\epsilon(t)$  bei viskoelastischen Stoffen immer um einen Phasenwinkel  $0^\circ < \varphi < 90^\circ$  verschoben. Die Größe des Phasenwinkels  $\varphi$  ergibt Information darüber, ob sich das Material eher viskos (geringer Wert von  $\varphi$ ) oder elastisch (hoher Wert von  $\varphi$ ) verhält.

<sup>29</sup> Bertram, A.: Vorlesungsmanuskript zur Festigkeitslehre. Otto von Guericke Universität Magdeburg.2006.

<sup>30</sup> Bertram, A.: Vorlesungsmanuskript zur Festigkeitslehre. Otto von Guericke Universität Magdeburg.2006.

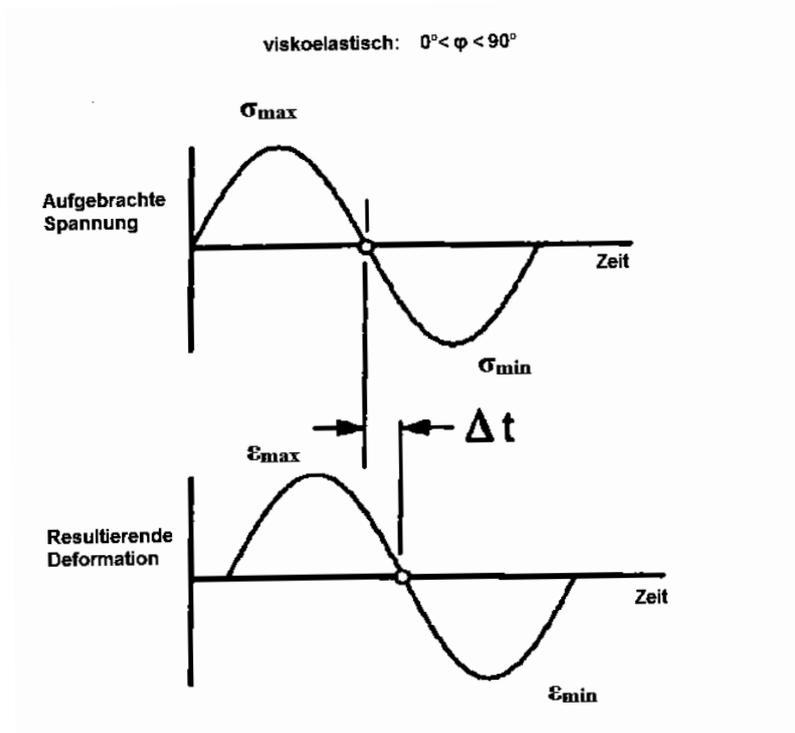


Abbildung 2-10: Viskoelastisches Verhalten, Spannungs- und Dehnungsverlauf<sup>31</sup>

Der Phasenwinkel  $\varphi$  kann in Grad aus der Zeitverschiebung zwischen dem Spannungs- und dem Dehnungsverlauf ermittelt werden:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} * 360^\circ \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Bezeichnungen:  $\varphi$ .....Phasenwinkel [°]

$\Delta t$ .....Zeitverschiebung zwischen Spannungs- und Dehnungsverlauf [s]

$T$ .....Schwingungsperiode [s]

Die viskoelastischen und zugleich viskoplastischen Eigenschaften des Asphalts erschweren die Ermittlung seiner Materialkonstanten im Vergleich zu den rein elastischen Materialien. Es entsteht zwischen der Kraft- und der Verformungsamplitude eine Phasenverzögerung, die eine Betrachtung der Kennwerte als komplexe Größen mit elastischem und viskosen Anteil erfordert.

Die Spannungs- und Dehnungsfunktionen werden [nach Huang]<sup>32</sup> mathematisch mittels komplexen Zahlen beschrieben:

<sup>31</sup> National Highway Institute Course №131053: Superpave Fundamentals, Reference Manual. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.

$$\sigma = \sigma_o \cdot \cos(\omega t) + i \cdot \sigma_o \cdot \sin(\omega t) = \sigma_o \cdot e^{i\omega t} \quad \text{Gleichung 2.4}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot \cos(\omega t - \varphi) + i \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \varepsilon_o \cdot e^{i(\omega t - \varphi)} \quad \text{Gleichung 2.5}$$

Bezeichnungen:  $\sigma_o$ .....Spannungsamplitude  
 $\varepsilon_o$ .....Dehnungsamplitude  
 $\varphi$ .....Phasenwinkel  
 $\omega$ .....Winkelgeschwindigkeit ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ )

Der komplexe Modul  $E^*$  ist eine komplexe Zahl, welche die Spannung mit der Dehnung bei viskoelastischen Materialien, die durch sinusförmige Belastung in einem Frequenzbereich fortlaufend beansprucht werden, in Beziehung bringt.<sup>33</sup> Der komplexe Modul wird [nach Huang]<sup>34</sup> durch die Gleichung 2.66 festgelegt:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \cdot e^{i\omega t}}{\varepsilon_o \cdot e^{i(\omega t - \varphi)}} \quad \text{Gleichung 2.6}$$

Nach Abwicklung und Umformung der Gleichung 2.6 erhält man Gleichungen 2.7, 2.9, 2.9 und 2.10:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \cdot \cos(\omega t) + i \cdot \sigma_o \cdot \sin(\omega t)}{\varepsilon_o \cdot \cos(\omega t - \varphi) + i \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t - \varphi)} =$$

$$= \left[ \frac{\sigma_o \cdot \cos(\omega t) + i \cdot \sigma_o \cdot \sin(\omega t)}{\varepsilon_o \cdot \cos(\omega t - \varphi) + i \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t - \varphi)} \right]$$

$$\times \left[ \frac{\varepsilon_o \cdot \cos(\omega t - \varphi) - i \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t - \varphi)}{\varepsilon_o \cdot \cos(\omega t - \varphi) - i \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t - \varphi)} \right] \quad \text{Gleichung 2.7}$$

<sup>32</sup> Huang, Y.: Pavement Analysis and Design, Second Edition. University of Kentucky. 2004

<sup>33</sup> Rahimzadeh, B: Linear and Non-Linear Viscoelastic Behaviour of Binders and Asphalts. Dissertation. University of Nottingham. 2002.

<sup>34</sup> Huang, Y.: Pavement Analysis and Design, Second Edition. University of Kentucky. 2004

Folgend werden der Zähler und der Nenner getrennt entwickelt:

Zähler:

$$\begin{aligned}
 & \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) - i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \\
 & + i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) - i^2 \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) = \\
 & = \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) - i^2 \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\
 & - i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) + i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) = \\
 & = \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot [\cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t - \varphi) + \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi)] + \\
 & + i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot [\cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin(\omega t) - \sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos(\omega t)] = \\
 & = \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\varphi) + i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\varphi)
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 2.8}$$

Nenner:

$$\begin{aligned}
 & E_o^2 \cdot \cos^2(\omega t - \varphi) + i \cdot \varepsilon_o^2 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin(\omega t - \varphi) - \\
 & - i \cdot \varepsilon_o^2 \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot \sin(\omega t - \varphi) - i^2 \cdot \varepsilon_o^2 \cdot \sin^2(\omega t - \varphi) = \\
 & = \varepsilon_o^2 \cdot \cos^2(\omega t - \varphi) - i^2 \cdot \varepsilon_o^2 \cdot \sin^2(\omega t - \varphi) = \\
 & = \varepsilon_o^2 \cdot \cos^2(\omega t - \varphi) + \varepsilon_o^2 \cdot \sin^2(\omega t - \varphi) = \\
 & = \varepsilon_o^2 \cdot [\cos^2(\omega t - \varphi) + \sin^2(\omega t - \varphi)] = \varepsilon_o^2
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 2.9}$$

Der Zähler (Gleichung 2.8) und der Nenner (Gleichung 2.9) werden in Gleichung 2.6 eingefügt, dann:

$$\begin{aligned}
 E^* & = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \cos(\varphi) + i \cdot \sigma_o \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\varphi)}{\varepsilon_o^2} \\
 & = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \cos(\varphi) + i \cdot \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \sin(\varphi) = \\
 & = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot [\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)]
 \end{aligned}
 \tag{Gleichung 2.10}$$

Gemäß EN 12697-26:2004 kann der komplexe Modul auch folgenderweise definiert werden:

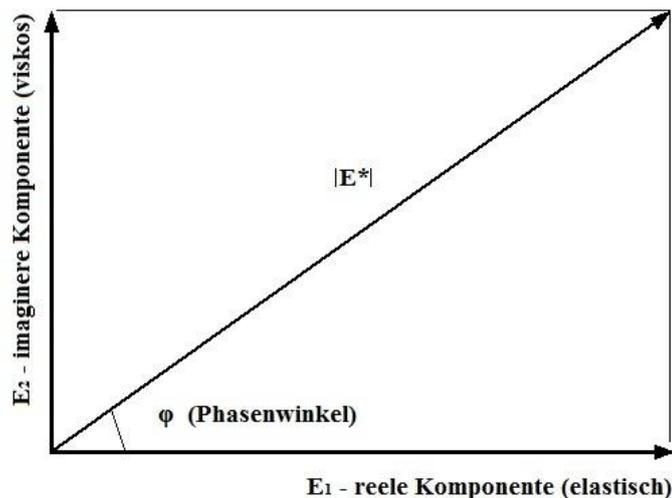
$$E^* = |E^*| \cdot [\cos(\varphi) + i \cdot \sin(\varphi)] = E_1 + i \cdot E_2 \tag{Gleichung 2.11}$$

Der dynamische Steifigkeitsmodul  $|E^*|$  wird [nach Huang]<sup>35</sup> als der Betrag des komplexen Moduls durch die Gleichung 2.12 festgelegt:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \cos(\varphi)\right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \sin(\varphi)\right)^2} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad \text{Gleichung 2.12}$$

Der komplexe Modul kann in eine reele ( $E_1$ ) und eine imaginäre ( $E_2$ ) Komponente gespalten werden. Die reelle Komponente  $E_1$  entspricht dem elastischen Anteil und die imaginäre Komponente  $E_2$  - dem viskosen Anteil der Materialsteifigkeit. Bei einem ideal elastischen Material (mit einem Phasenwinkel von  $0^\circ$ ) ist der viskose Anteil gleich 0. Im Gegensatz dazu beträgt das elastische Anteil bei einem rein viskosen Material 0.<sup>36</sup>

Der komplexe Modul kann durch seine zwei Komponenten grafisch folgenderweise dargestellt werden [Abbildung 2-11]:



**Abbildung 2-11 Aufteilung des dynamischen E-Moduls in elastischen und viskosen Anteil<sup>37</sup>**

<sup>35</sup> Huang, Y.: Pavement Analysis and Design, Second Edition. University of Kentucky. 2004

<sup>36</sup> Hofko, B.: Beiträge zur Beschreibung des Verhaltens von Asphalt unter Zyklisch-Dynamischer Druckschwellbeanspruchung. Dissertation. Wien. 2011.

<sup>37</sup> University of Aberdeen: <http://www.abdn.ac.uk/somc/dmta.hti> (27.10.2013)

## 2.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfungen von Asphaltmischgut

Der Trend zur ständigen Erhöhung der Beanspruchungen auf die Fahrbahnbefestigungen durch die Heraufsetzung der Achslasten und die Einführung neuer LKW-Typen wie die GigaLiner stellt immer höhere Anforderungen an die verwendeten Baumaterialien. Gleichzeitig bedingen die Erschöpfbarkeit des Bitumens als Erdölderivat<sup>38</sup> und der Sparkurs bei den öffentlichen Finanzmitteln für Instandhaltung der Strasseninfrastruktur eine Notwendigkeit zu der Erweiterung der wartungsfreien Gebrauchsspanne der Strassenbefestigungen und somit auch eine Optimierung des Rohstoffgebrauchs. Deswegen sind möglichst mehr Materialverhaltensparameter bei der Asphaltmischgutvorbereitung zu forschen und zu optimieren, so dass die zukunftsfähige Qualität neu gebauter Strasseninfrastruktur maximal vergrößert wird<sup>39</sup>. Die konventionellen Bindemittel- und Asphaltprüfungen reichen nicht mehr für die praxisnahe Voraussage der mechanischen Eigenschaften von den eingesetzten Asphaltmischungen aus. Es entstand in den letzten Jahrzehnten ein Bedarf zur Entwicklung von verbesserten Methoden zur Bestimmung von den optimalen Materialienzusammensetzung, die das Gebrauchsverhalten von den gebrauchten Materialien zuverlässig prognostizieren. Solche Prüfungsverfahren wurden in der Mitte der 1990er Jahren im Rahmen der EN 12697-xx zusammengefasst und zu Beginn der 2000er Jahren in ihrer aktuellen Form herausgegeben. Diese Prüfmethode geben die in situ verursachten Verkehr- und Klimaeinwirkungen möglichst realitätsnah wieder. Zweckmässig für die Untersuchung des Gebrauchsverhaltens von Strassenbauasphalten sind die GVO-Prüfungen in den folgenden Bereichen<sup>40</sup>:

- Prüfung von dem Tieftemperaturverhalten und Ermittlung der Beständigkeit gegen Kälterissbildung infolge Tieftemperaturen mit Hilfe von dem einachsigen Zugversuch (Uniaxial Tension Stress Test, UTST) und dem Abkühlversuch (Thermal Stress Retained Specimen Test, TSRST) gemäss EN 12697-46.

---

<sup>38</sup> Campbell, C.: Die Erschöpfung der Welterdölereserven. Presentation. TU Clausthal. 2002.

<sup>39</sup> Schindler, K. : Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. 2008.

<sup>40</sup> Kappl, K.: Prüftechnische Grundlagen Gebrauchsverhaltensorientierter Asphaltprüfungen. Funktionale Charakterisierung von Asphalt. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2009

- Steifigkeitsermittlung in dem gesamten Temperaturbereich und Ermüdungsverhalten in dem Temperaturbereich von 0 bis 30 °C infolge wiederholter kontinuierlichen Belastungen mit Hilfe des 4PBB entsprechend nach den EN 12697-26 und 12697-24.
- Prüfung des Widerstands von Asphalt gegen bleibende Verformung bei Temperaturen höher als 30°C mittels des Druckschwellversuchs nach der EN 12697-25.

In der folgenden Abbildung [Abbildung 2-12] sind die Asphaltsschichten gegeben, deren Betriebsverhalten mittels der obengenannten Versuchen modelliert wird.

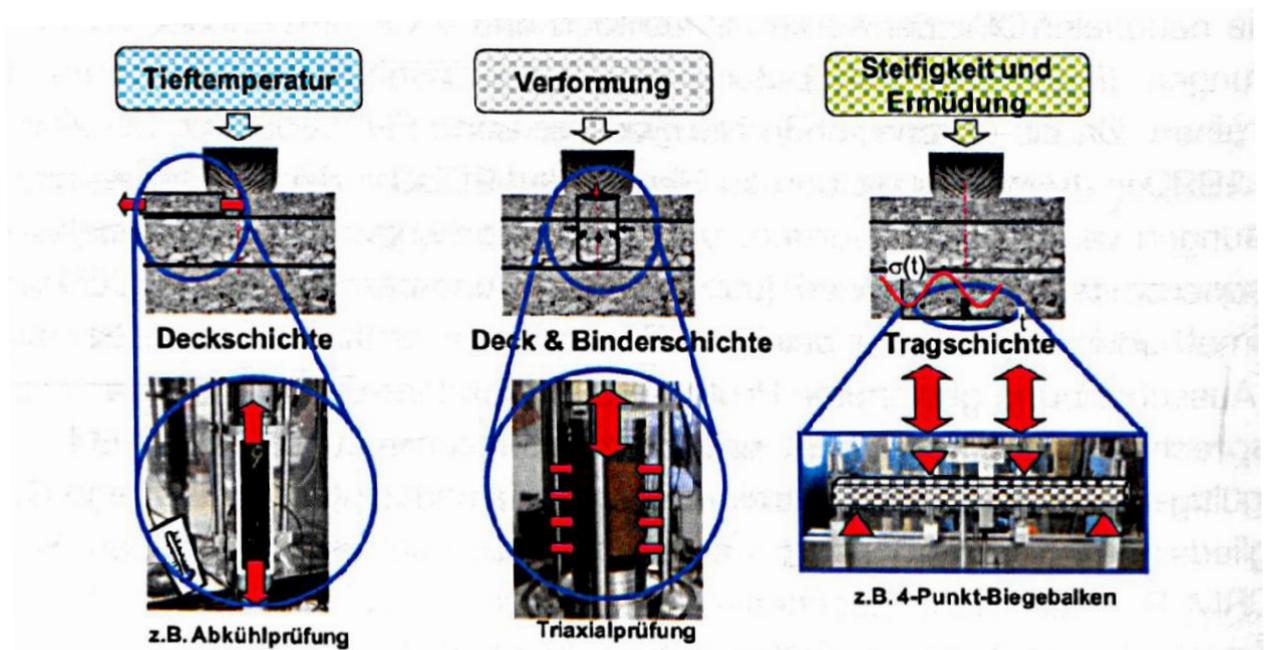


Abbildung 2-12: Schematische Darstellung der wesentlichen Gebrauchsverhalten und die korrespondierenden Laborprüfmethoden<sup>41</sup>

<sup>41</sup> Kappl, K.: Prüftechnische Grundlagen Gebrauchsverhaltensorientierter Asphaltprüfungen. Funktionale Charakterisierung von Asphalt. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2009.

### 3. EINFLUSSNEHMENDE PARAMETER BEI DER ASPHALTERMÜDUNG

#### 3.1 Einfluss der Versuchssteuerung

Der Belastungsmodus muss bei der laborgeprüften Ermüdungsbeständigkeit in Betracht genommen werden, weil dieser das Ermüdungsverhalten bei gleichen Anfangsbedingungen beeinflussen kann.

Man unterscheidet zwischen zwei Lademodi bei den Ermüdungsprüfungen im Labor: kraft geregelt und weggeregelt. Bei der kraftgesteuerten Lastaufbringung (constant stress, controlled stress) wird eine konstante Kraft während aller Zyklen der Lastaufbringung gehalten und dadurch entsteht eine konstante Spannungsamplitude in dem betrachteten Bereich des Probekörpers. Bei den kraftgesteuerten Versuchen wächst die Dehnung mit Zunahme der Lastwechselzahlen an. Es wurde empirisch festgestellt, dass die Ermüdung bei dem kraftgesteuerten Beanspruchungsmodus früher im Vergleich zu der weggesteuerten Beanspruchungsmodus bei gleichartigen Probekörper eintritt. Deshalb findet meistens der Einsatz von dem kraftgesteuerten Belastungsmodus eine Anwendung bei der Untersuchung von der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt Schichten, deren Stärke mehr als 100mm beträgt, weil die dickeren Asphalt Schichten im Allgemeinen zum Ertragen des Hauptanteils der Beanspruchung bemessen werden.<sup>42</sup>

Im Gegenteil wird bei den weggesteuerten Beanspruchungsweise der Probekörper einer zyklischen Verschiebung unterzogen, wobei die Wegamplitude konstant gehalten wird. Die Dehnungsamplitude wird dadurch konstant. Entsprechend nehmen die aufgebrachte Kraft und die Spannung im Probekörper durch das Wachstum der Lastwechselzahlen ab. Weggesteuerten Versuche werden normalerweise bei dünneren Asphalt Schichten mit einer Dicke kleiner als 100mm durchgeführt, in denen die Dehnungen vielmehr durch das Verhalten der darunterliegenden stärkeren Schichten und weniger durch den Steifigkeitsabfall geregelt/reguliert werden.<sup>43</sup>

---

<sup>42</sup> Romanoschi, Stefan: Resilient Modulus and the Fatigue Properties of Kansas Hot Mix Asphalt Mixes. Kansas Department of Transportation. Final Report. 2006.

<sup>43</sup> Carpenter, Samuel; Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Department of Civil and Environmental Engineering – University of Illinois. COE Report №29. 2007.

Die kraftgesteuerte Versuche verursachen eine übermäßige permanente Deformation in dem geprüften Probekörper und die weggesteuerten Versuche verhindern das Erreichen eines vollständigen Probekörperbruchs – in Abhängigkeit von dem Belastungsmodus werden also unterschiedliche Testergebnisse geleistet. Deswegen wurde in der Praxis auch ein kombinierter Beanspruchungsmodus vorgeschlagen. Dieser wird durch den Modusfaktor **MF** charakterisiert – der Modusfaktor beträgt -1 bei reiner Kraftsteuerung und +1 bei reiner Wegsteuerung. Während einer Versuchsdurchführung mit gemischter Beanspruchung ist die Wegsteuerung dominant, bis die Kraftabminderungsrate und die Durchbiegungszunahmerate stabil verlaufen. Erst in der späten Versuchsphase als eine rasche Durchbiegungszunahme zu betrachten ist, wird der Belastungsmodus auf Kraftsteuerung umgeschaltet<sup>44, 45</sup>:

$$MF = \frac{A - B}{A + B}$$

Gleichung 3.1

Bezeichnungen: A....Prozentuelle Veränderung der Beanspruchungskraft bei einer fixierten vorgegebenen Abminderung C (Prozent) der Komplexen Steifigkeit  
B....Prozentuelle Veränderung der Beanspruchungsdehnung bei einer fixierten vorgegebenen Abminderung C (Prozent) der Komplexen Steifigkeit

Ein Vergleich der Einflüsse von Kraft- und Wegsteuerung ist in der folgenden [Tabelle 3-1] zusammengefasst<sup>46</sup>:

---

<sup>44</sup> Hartman, A., Gilchrist, M.: Development of a Four-Point Bend Test System for Bituminous Mixtures. Artikel. Journal of Materials in Civil Engineering, 16 (1): 60-68. 2004.

<sup>45</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

<sup>46</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

**Tabelle 3-1      Auswirkung der Beanspruchungsart auf den Ermüdungsprozess<sup>47</sup>**

<b>Variable</b>	<b>Kraftsteuerung</b>	<b>Wegsteuerung</b>
Asphaltschichtstärke	Relativ starke Asphaltschichte	Dünne Asphaltschichte
Probekörperversagen- Lastwechselzahl	Stark ausgeprägter Probekörperbruch	Strittiger Versagenspunkt, der Versuch wird bei einer vorgegebenen Kraftabminderung unterbrochen
Streuung der Ermüdungstestergebnisse	Kleinere Streuung	Grössere Streuung
Erforderliche Probekörperanzahl	Kleinere Anzahl	Grössere Anzahl
Ermüdungsdauer- Lastwechselzahl	kürzere Ermüdungsdauer	Längere Ermüdungsdauer
Einfluss der Mischgutparameter	empfindlicher	Weniger empfindlich
Energiedissipationsrate	Schneller	Langsamer
Rissverbreitungsrate	Schneller als die in situ beobachtete Rate	Kennzeichnet die in situ Bedingungen genauer
Vorteilhafte Einflüsse der Lastpausen	Stärkerer Einfluss	Geringerer Einfluss

An die Ermüdungsbeständigkeit von Asphaltmischgüter gingen zuerst in den fünfziger Jahren Saal und Pell heran.<sup>48</sup> Diese Forscher nahmen kraft- und weggesteuerte Prüfungen an Asphaltproben, bei denen die Belastungsgrösse um den Nullpunkt schwankt und dementsprechend die Spannungen in dem Probekörper von Druck auf Zug periodisch übergeht. Saal und Pell behaupteten, dass die Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten temperaturabhängig ist. Ihre Versuche lieferten ein Diagramm, welches eine kontinuierliche Steigerung der Bruchlastwechselzahlen mit Abnahme der Temperatur darstellt [Abbildung 3-1]:

<sup>47</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

<sup>48</sup> Arand, W.: Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes, der Rissresistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten. Bitumen Heft 3, 1715. 1996

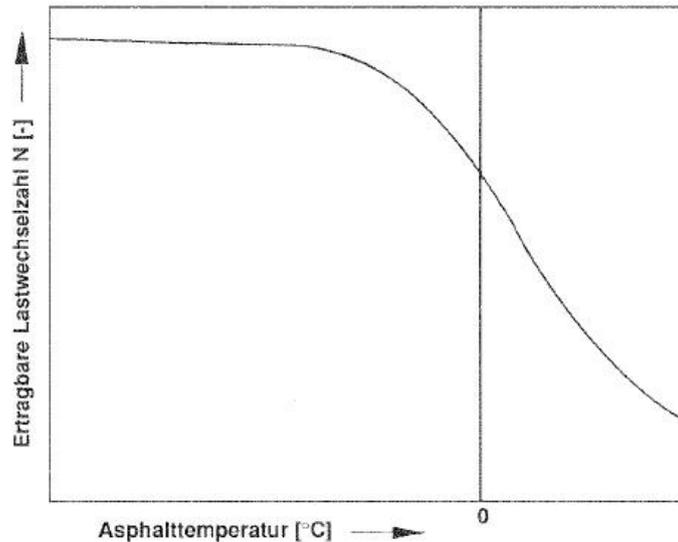


Abbildung 3-1: Ertragbare Lastwechselzahlen nach Saal und Pell<sup>49</sup>

Später wurde diese Aussage teilweise bestritten, weil diese nicht mit den praktischen Beobachtungen übereinstimmt. Tatsächlich können bei tiefen Temperaturen vorzeitige Ermüdungsrisse an der Fahrbahnoberfläche entstehen, die sich in der Form von Längsrissen neben den Radspuren äussern. Dieses Phänomen ist auf die Überlagerung von abkühlungsbedingten Zugspannungen mit den Verkehrslastbedingten Zugspannungen zurückzuführen. In Wirklichkeit erreichen die ertragbaren Lastwechselzahlen mit Temperaturabminderung einen Maximalwert, sinken jedoch bei weiterer Temperturabnahme deutlich ab<sup>50</sup>.

Die von Saal und Pell durchgeführten Wechselversuche können nicht ausreichend die Superposition von den temperaturbedingten und den verkehrsbedingten Spannungen umfassen. Deswegen wurden nachfolgend zur praxisrelevanten Behandlung der Asphaltermüdung Schwellversuchen anstelle der Wechselversuchen eingeführt. Bei den Schwellversuchen schwankt die von der Prüfmaschine angebrachte Belastung zwischen einem maximalen und einem minimalen Wert, wobei die Steuerlast immer im positiven Bereich der Zugspannung, bzw. Zugdehnung bleibt. Der Unterschied zwischen den

<sup>49</sup> Arand, W.: Zur Prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt – Teil 2. Bitumen Magazin Heft 2, 1855.2004

<sup>50</sup> Arand, W.: Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes, der Rissresistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt. Bitumen Magazin Heft 3, 1715. 1996

kraftgesteuerten und den weggesteuerten Schwell- und Wechselversuche ist auf der folgenden Abbildung [Abbildung 3-2] grafisch dargestellt<sup>51</sup>:

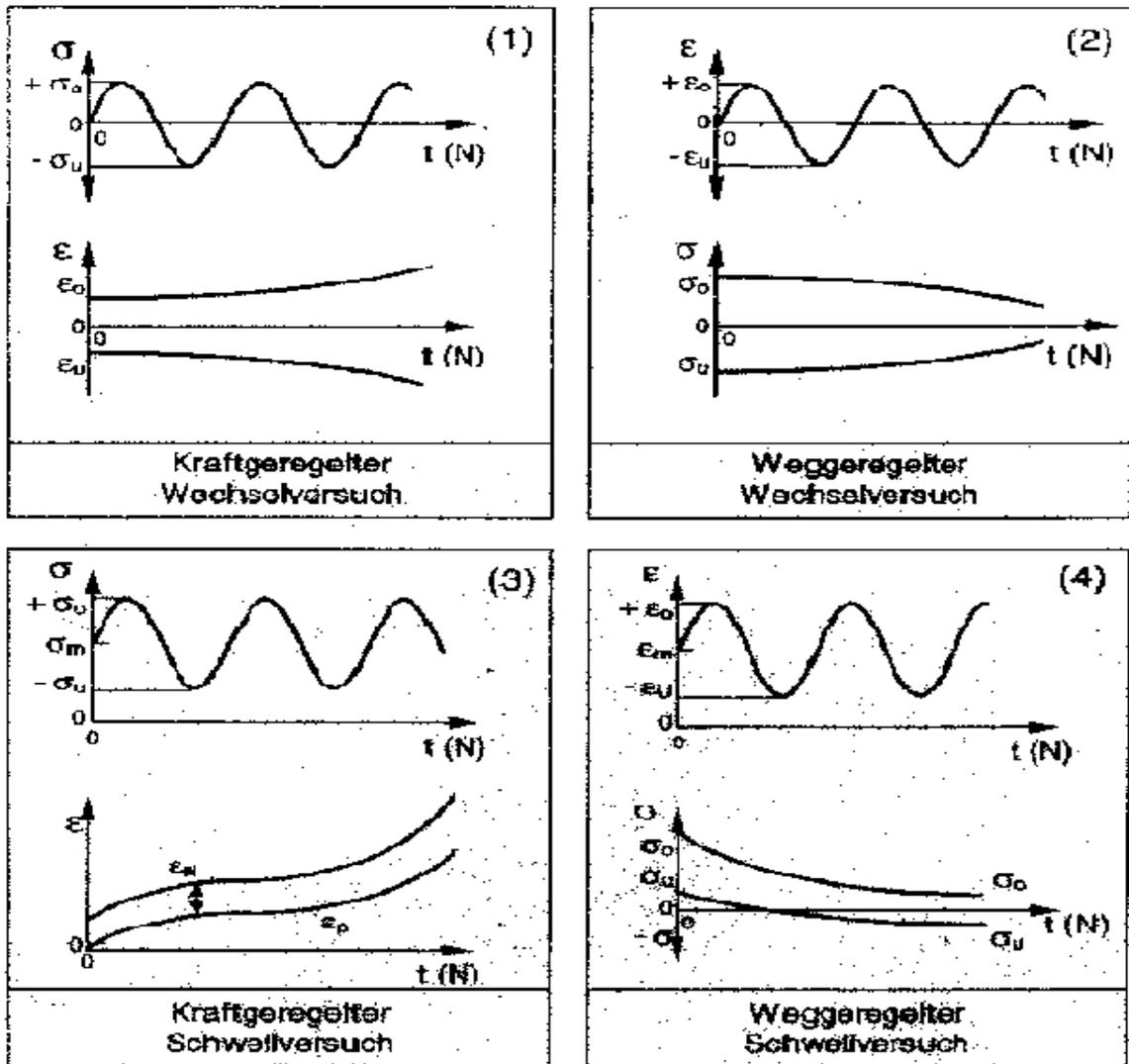


Abbildung 3-2: Kraftgeregelte und weggeregelte Wechsel- und Schwellversuchsanordnungen

<sup>51</sup> Arand, W.: Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes, der Rissresistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten. Bitumen Heft 3, 1715. 1996

### 3.2 Einfluss von Lastpausen

Die verschiedenen Verkehrsmittel üben unterschiedliche Achslasten bei unterschiedlichen Frequenzen und Geschwindigkeiten auf die Fahrbahnbefestigungen. Zu der Simulation dieser Beanspruchungen im Labor werden Belastungsimpulse mit verschiedener Form und Dauer angebracht [Abbildung 3-3]. Die Lastpausen dienen zu der Wiedergabe im Labor von Belastungsperioden und belastungsfreie Perioden erzeugt in dem Fahrbahnoberbau durch Verkehr. Wegen der Schwierigkeit in situ Lastpausen zwischen den Fahrzeugachslasten zu messen, werden die bei den Laboruntersuchungen gebrauchten Lastpausen als Produkt von der Belastungsperiode mal einem Faktor aus dem Bereich (1-100) verwendet. Man unterscheidet zwischen periodisch auftretenden Lastpausen, wobei nach jedem Belastungszyklus eine Lastpause folgt und ununterbrochener Belastung im Rahmen einer bestimmten Zeitperiode, nach der eine Lastpause folgt (das Probekörper bleibt unter den Testbedingungen, jedoch unbelastet). Dabei stellen die periodisch auftretenden Lastpausen den Betriebszustand realitätsnäher dar.

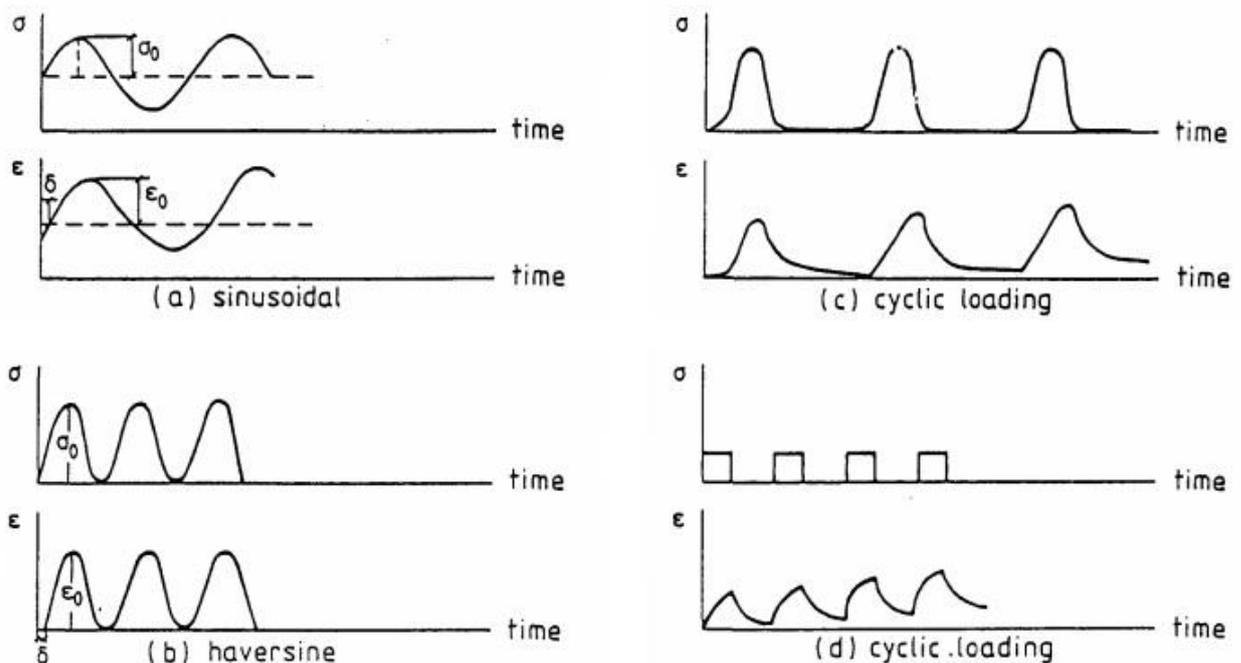


Abbildung 3-3 Lastimpulstypen<sup>52</sup>

<sup>52</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

Dabei können die Lastpausen zwischen den Belastungsperioden die Ermüdungsdauer erweitern. Dieses Phänomen ist auf die Heilungseigenschaft von Asphalt zurückzuführen. Durch die Anbringung von zyklischer Belastung werden im Asphaltgemisch Mikrorisse hervorgerufen. Falls die Beanspruchung entfernt wird, findet eine Relaxation der akumulierten Spannungen in dem Material statt, wobei sich das Material zu seinem unbelasteten Zustand nähert. Die Selbstheilung hängt von den viskoelastischen Eigenschaften des Mischgutes ab - weiche Bitumensorten und grosse Bindemittelanteile verbessern das Heilungsausmaß. Die Heilung ist ein temperaturempfindlicher Prozess, welcher bei höheren Temperaturen durch die thixotropischen Eigenschaften von Bitumen auf Mikroebene interpretiert wird und bei Tieftemperaturen durch Schaden in der Asphaltstruktur auf Makroebene erklärt wird. Bei kontinuierlicher zyklischer Belastung bei Temperaturen über 15°C wandelt sich die Gel-Struktur von Bitumen in Sol-Struktur um, wobei der Steifigkeitsmodul von Bitumen abnimmt. Nach Entfernung der Beanspruchung verläuft dieser Prozess in die umgekehrte Richtung und die Gel-Struktur stellt sich wieder her, wobei der Steifigkeitsmodul sich an seinem ursprünglichen Wert neigt. Bei Tieftemperaturen verläuft die Ermüdung in der Form von Schädigung in der Asphaltstruktur, welche meistens unumkehrbar ist. Deswegen ist bei Tieftemperaturen nur ein geringes Heilungsausmaß zu beobachten<sup>53</sup>

Damit die Belastungsdauer (Periode) die in situ hervorgerufenen Belastungsperioden im Labor adequat abbildet, ist diese in Abhängigkeit von der Stärke der Asphaltsschicht und von der Geschwindigkeit des Verkehrsmittels auszuwählen [Abbildung 3-4]. Es wird empfohlen, dass die Belastungsdauer im Bereich von 0.04-0.1s liegt.<sup>54</sup> Die EN 12697-24 schreibt eine Prüffrequenz von 30 Hz vor, was einer Belastungsdauer von 0.03 entspricht.

---

<sup>53</sup> Weise, C.: Auswirkungen von Lastpausen und Heilung auf die Ermüdungseigenschaften von Asphaltgemischen. Gestrata Journal. 2012

<sup>54</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

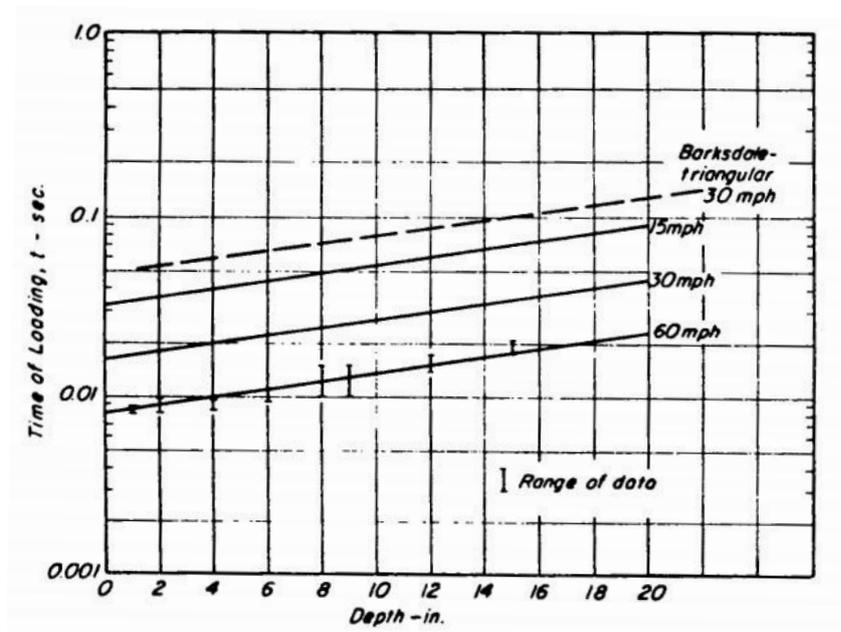


Abbildung 3-4 Zusammenhang von der Belastungsperiode und der Schichtstärke<sup>55</sup>

### 3.3 Einfluss von Mischgutparameter

Die gewählte Bitumensorte wirkt sich auf das Ermüdungsverhalten von dem Asphaltmischgut aus. Nach einer Untersuchung von zwei Asphaltmischgütern mit Bitumenpenetrationsindexen entsprechend 80/100 und 50/60 stellten [Madzlan und Ibrahim]<sup>56</sup> fest, dass die Bitumensorten mit höherem Penetrationsindex bei weggesteuerten Versuchen bessere Ermüdungsbeständigkeit aufweisen. Weichere Bitumensorten sammeln die Zugspannungen besser an und zeichnen sich als mehr resistent gegen Ermüdung im Vergleich zu härteren Bitumensorten. Der Einsatz von SBS polymermodifiziertem Bitumen hat auch eine positive Auswirkung auf die Ermüdungsbeständigkeit – die Zugabe von SBS verbessert die Flexibilität von Bitumen bei niedrigen Temperaturen (rubbery midblock) und die Elastizität entsprechend bei höheren Temperaturen (hard polystyrene end blocks). Die Ergebnisse aus weggesteuerten Vierpunkt- Biegeprüfung an Probekörper aus Feinzuschlag (Steinbruch) werden in der folgenden Tabelle [Tabelle 3-2] verglichen:

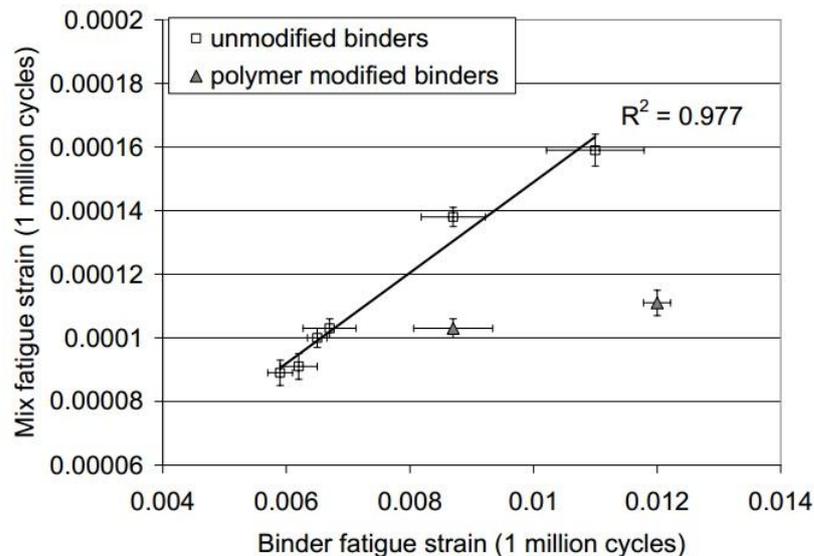
<sup>55</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

<sup>56</sup> Madzlan, N., Ibrahim, K.: The Effect of Fine Aggregate Properties on the Fatigue Behaviour of the Conventional and Polymer Modified Bituminous Mixtures Using Two Types of Sand as fine Aggregate. Article. World Academy of Science, Engineering and Technology 58. 2011

**Tabelle 3-2 Vergleich der Ermüdungsdauer von Bruchsteinasphaltgemische bei dem Einsatz unterschiedlicher Bindemittelsorten im 4PBB<sup>57</sup>**

Mischgut	Lastwechsel bis zu der Ermüdung
Feinzuschlag/PM1_76 (PEN76+SBS)	437610
Feinzuschlag/PM1_82 (PEN82+SBS)	328400
Feinzuschlag/PEN80/100	88000
Feinzuschlag/PEN50/60	51130

Moderne Forschungen schlagen sogar vor, dass das "Ermüdungsverhalten von Bitumen"<sup>58</sup> als Verhaltensindikator für das Ermüdungsverhalten von Asphaltmischgut dienen können. In einem Steifigkeitsbereich von Bitumen von 60-200MPa ist eine gute Relation zwischen der Bindemittelermüdung (geprüft durch einen Dynamischen Scherrheometer), und der Mischguteremüdung (geprüft mittels der Zweipunkt-Biegeprüfung an prismatischen Probekörper) zu beobachten [Abbildung 3-5]:



**Abbildung 3-5 Vergleich der Bindemitteldehnung  $\epsilon_6$  und der Asphaltmischgutdehnung  $\epsilon_6$ <sup>59</sup>**

<sup>57</sup> Madzlan, N., Ibrahim, K.: The Effect of Fine Aggregate Properties on the Fatigue Behaviour of the Conventional and Polymer Modified Bituminous Mixtures Using Two Types of Sand as fine Aggregate. Article. World Academy of Science, Engineering and Technology 58. 2011

<sup>58</sup> Soenen, H., De la Roche, C., Redelius, P.: Predict Mix Fatigue Tests from Binder Fatigue Properties, measured with a DSR. <http://www.nynas.com/Global/Bitumen%20for%20paving%20applications/UK/25363.pdf>

<sup>59</sup> Soenen, H., De la Roche, C., Redelius, P.: Predict Mix Fatigue Tests from Binder Fatigue Properties, measured with a DSR. <http://www.nynas.com/Global/Bitumen%20for%20paving%20applications/UK/25363.pdf>

Ein wichtiger Einflussfaktor, der sich auf das Ermüdungsverhalten von Asphalt auswirkt, ist der **Bitumenanteil**. Die Zunahme des Bitumenanteils begünstigt die Ermüdungsresistenz. Ein höherer Bitumenanteil ergibt eine Verstärkung der Bindemittelschicht, welche die Zuschlagskörner umhüllt. Die von der Beanspruchung induzierten Biegedehnungen werden in dem Bindemittel konzentriert, weil das Bindemittel viel nachgiebiger als die steifere Gesteinskörnung ist. Daraus folgt, dass bei einem höheren Bindemittelanteil die hervorgerufenen Zugkräfte sich durch eine grössere Bitumenfläche verteilen, wodurch die Zugspannungen kleiner werden. Der maximal zulässige Bitumengehalt wird durch Mischgutstabilitätsanforderungen begrenzt – der Überschuss von Bitumen vermindert die strukturelle Stabilität vom Asphalt und ergibt eine Bitumenblutung.<sup>60</sup> Jedoch sollte sich der Bitumenanteil an den maximal zulässigen Anteilwert nähern, damit die Ermüdungsbeständigkeit heraufgesetzt wird. In dem Fall hochbelastbarer Fahrbahnbefestigungen, welche sich aus dicken Asphaltsschichten zusammensetzen, wird die Anwendung Bitumensorten höher Steifigkeit und dichter Kornzusammensetzung empfohlen (dadurch wird eine hohe Mischgutsteifigkeit erreicht), solange der Einfluss von kryogenen Spannungen in Betracht genommen wird. Im Gegensatz dazu wird bei den Leichtlastbelagen einen Einsatz von möglichst flexiblen Asphaltmischungen empfohlen - solche Mischgüter bestehend aus Bindemittel niedriger Steifigkeit und offengradiger Kornzusammensetzung (mit begrenztem Feinkornanteil) weisen ein besseres Ermüdungsverhalten auf.<sup>61</sup>

Der verringerte Porenanteil beeinflusst auch positiv die Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt. Weil die Luftporen keine Zugspannungen übertragen können, trägt der Ersatz der Luftporen durch Zuschlagskörner oder Bindemittel zu einer Verminderung der Zugspannungen bei. Durch die Reduzierung des Porengehalts verbessert sich auch die Homogenität des Mischguts – es ist eine gleichmässigerere Verteilung der Luftporen zu beobachten.<sup>62</sup> Deswegen ist die ausreichende Verdichtung der Asphaltmischgüter von grosser Bedeutung für die Ermüdungsbeständigkeit. Von der [Abbildung 3-6] kann behauptet

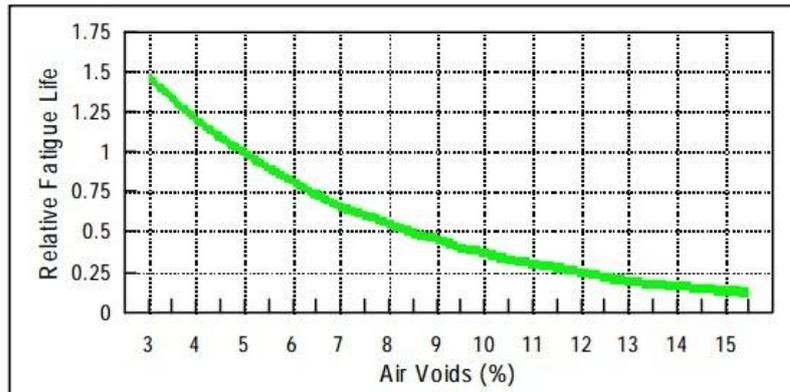
---

<sup>60</sup> Harvey, J., Deacon, J., Tsai, B., Monismith, C.: Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report. University of California, Berkley. 1995.

<sup>61</sup> Monismith, C., Deacon, J., Craus, J., Tangella, R.: Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.

<sup>62</sup> Harvey, J., Deacon, J., Tsai, B., Monismith, C.: Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report. University of California, Berkley. 1995.

werden dass die Erhöhung des Porengehaltes in dem Asphaltmischgut drastisch seine Ermüdungsdauer deutlich vermindert:

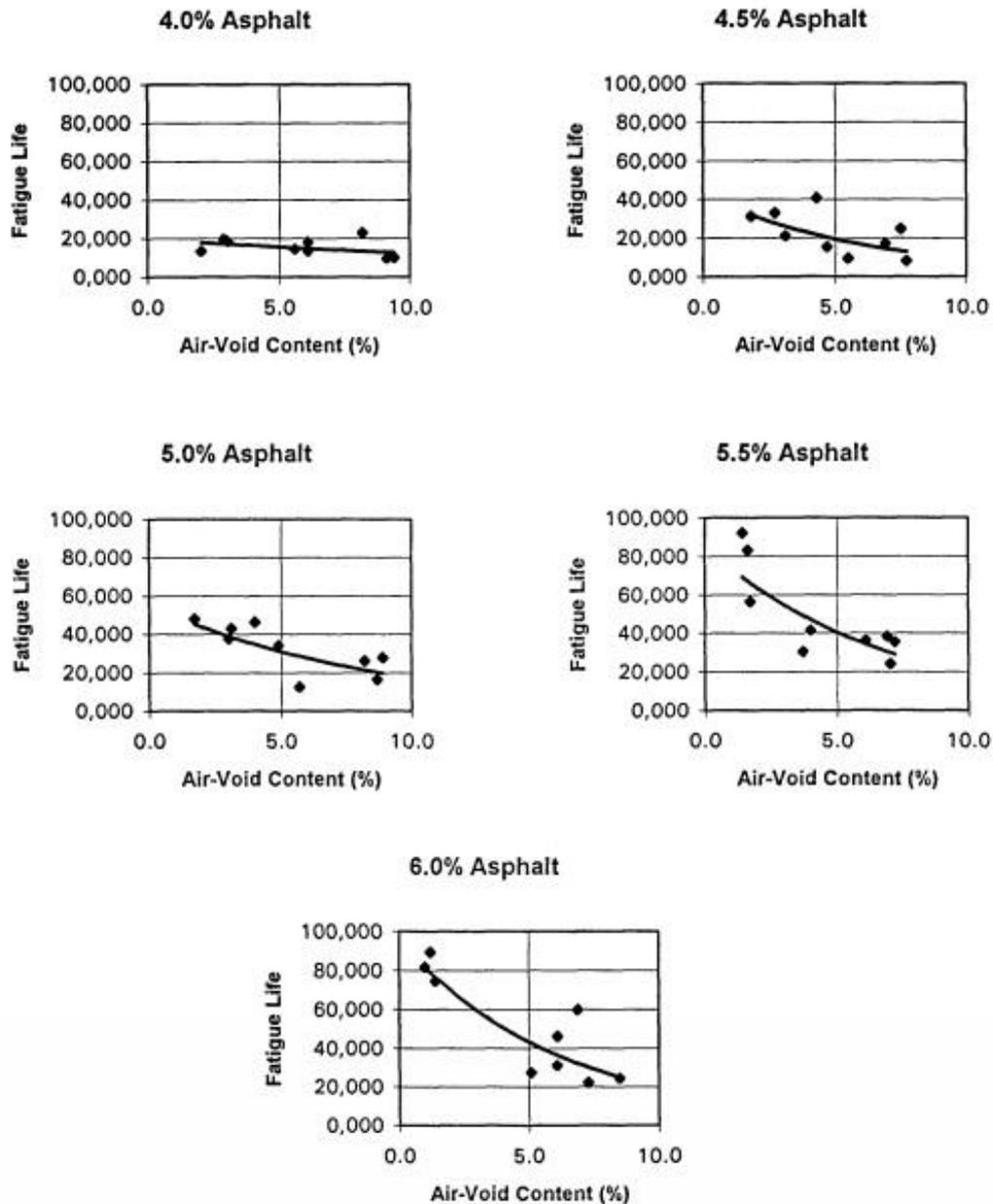


**Abbildung 3-6 Einfluss des Porengehaltes an die Ermüdungsdauer<sup>63</sup>**

Aus der Kombination von verringertem Porenanteil und gesteigertem Bitumenanteil erfolgt eine Verbesserung der Mischgutresistenz gegen Ermüdung, wobei die Zugkräfte durch verstärkte Bindemittelquerschnitte verlaufen und die Spannungskonzentrationen bei Luftporen und bei direkt verkeilten Zuschlagskörner minimiert werden. Deshalb verlaufen die Mikrorissbildung und die Mikrorissverbreitung in dem Asphaltmischgut bei zyklischer Beanspruchung langsamer und die Ermüdungsbeständigkeit wird heraufgesetzt. Der Einfluss vom Porenanteil und Bitumenanteil auf die Ermüdungsdauer bei einer weggesteuerten Beanspruchung durch 300  $\mu\text{m}/\text{m}$  wird graphisch auf [Abbildung 3-7] dargestellt.<sup>64</sup>

<sup>63</sup> Air Voids in Asphalt. Pavement Worktips – no. 17. June 1999. Abgelesen aus [http://aapa.asn.au/cms\\_files/worktips17.pdf](http://aapa.asn.au/cms_files/worktips17.pdf)

<sup>64</sup> Harvey, J., Deacon, J., Tsai, B., Monismith, C.: Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report. University of California, Berkley. 1995.



**Abbildung 3-7 Einfluss von Bitumenanteil und Porenanteil auf die Ermüdungsdauer in einer Vierpunkt Biegeprüfung<sup>65</sup>**

Die **Kantigkeit und die Korngrößenzusammensetzung** von dem Zuschlag üben auch einen Einfluss auf die Ermüdungsbeständigkeit. Die Verwendung von gebrochenen Körner führt zu einer längeren Ermüdungsdauer im Vergleich zu der ungebrochenen Gesteinskörnung aus Schottergrube [Tabelle 3-3]:

<sup>65</sup> Harvey, J., Deacon, J., Tsai, B., Monismith, C.: Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report. University of California, Berkley. 1995.

**Tabelle 3-3 Vergleich der Ermüdungsdauer bei dem Einsatz von Brechstein und ungebrochenem Gestein aus Schottergrube<sup>66</sup>**

Gesteinherkunft	Ermüdungsdauer LW
Feinzuschlag (gebrochen)/PM1_76 (PEN76+SBS)	437610
Gestein aus Schottergrube (ungebrochen)/ (PEN76+SBS)	122310
Feinzuschlag (gebrochen)/PM1_82 (PEN82+SBS)	328400
Gestein aus Schottergrube (ungebrochen)/ (PEN82+SBS)	111230
Feinzuschlag (gebrochen)/ PEN80/100	88000
Gestein aus Schottergrube (ungebrochen)/ PEN80/100	38930
Feinzuschlag (gebrochen)/ PEN50/60	51130
Gestein aus Schottergrube (ungebrochen)/ PEN50/60	11970

Der Grund dafür ist durch die bessere Kantigkeit und die Rauigkeit vom Bruchstein zu erklären – kantige Körner verzahnen sich besser und die Oberflächenrauheit leistet eine bessere Verbundenheit zwischen Bindemittel und Gestein.<sup>67</sup>

In einer Studie an der Minho Universität in Portugal wurde der Einfluss von **Korngrößenverteilung** auf das Ermüdungsverhalten mithilfe von der Vierpunkt-Biegeprüfung auf zehn Mischgutarten untersucht – fünf Mischgüter mit Deckschichtkorngrößenverteilung und fünf Mischgüter mit Tragschichtkorngrößenverteilung. Die Testergebnisse bei einer Dehnungsamplitude von 100 µm/m bei weggesteuerter Beanspruchungsart zeigen, dass Mischgüter mit grösserem Feinkornanteil zu einer kürzeren Ermüdungsdauer tendieren [Abbildung 3-8]:<sup>68</sup>

<sup>66</sup> Madzlan, N., Ibrahim, K.: The Effect of Fine Aggregate Properties on the Fatigue Behaviour of the Conventional and Polymer Modified Bituminous Mixtures Using Two Types of Sand as fine Aggregate. Article. World Academy of Science, Engineering and Technology 58. 2011

<sup>67</sup> Madzlan, N., Ibrahim, K.: The Effect of Fine Aggregate Properties on the Fatigue Behaviour of the Conventional and Polymer Modified Bituminous Mixtures Using Two Types of Sand as fine Aggregate. Article. World Academy of Science, Engineering and Technology 58. 2011

<sup>68</sup> Silva, H., Pais, J., Pereira, P.: Comparison Between Tensile, Stiffness and Fatigue Life Test Results.

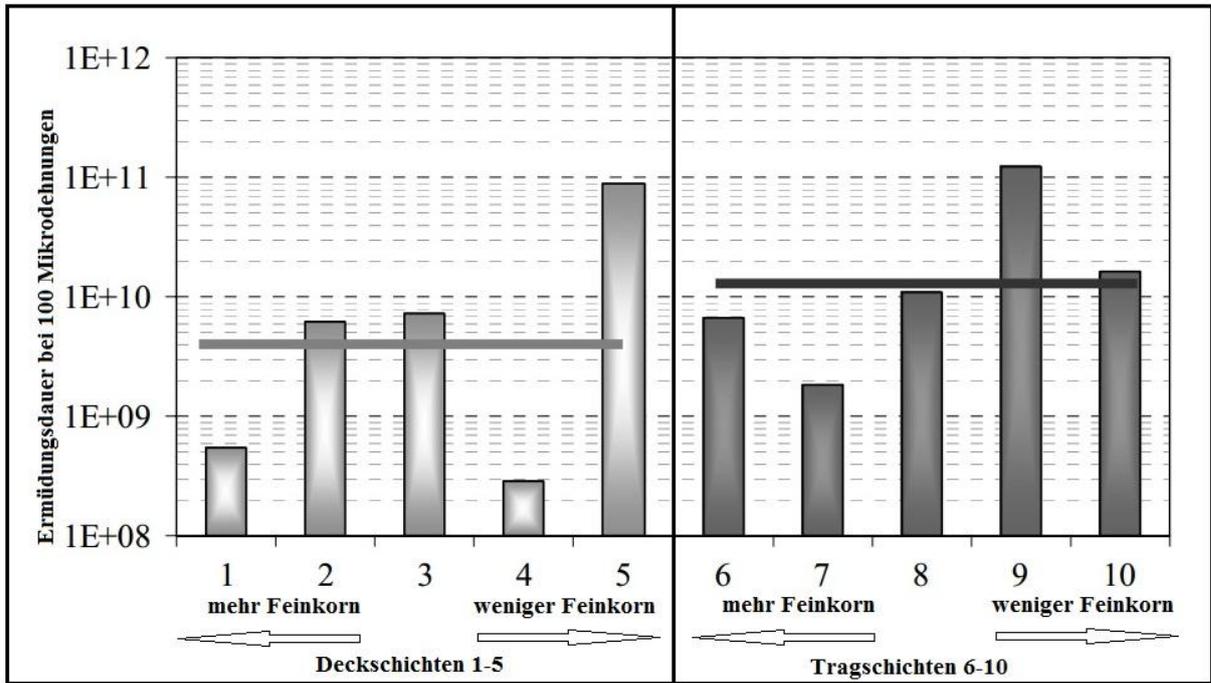


Abbildung 3-8 Feinkornauswirkung auf die Ermüdungsdauer<sup>69</sup>

<sup>69</sup> Silva, H., Pais, J., Pereira, P.: Comparison Between Tensile, Stiffness and Fatigue Life Test Results.

## 4. 4-PUNKT BIEGEPRÜFUNG

Der dynamische Steifigkeitsmodul kann prüftechnisch im Labor durch verschiedene Versuche ermittelt werden. In Österreich wird dieser mittels der 4-Punkt-Biegeprüfung (4PBB), der direkten Zug-Druck Prüfung (DTC-CY) und der Indirekten Zugprüfung(IT-CY) festgestellt. Die abgeleiteten Materialparameter sind dabei von der Mischguteigenschaften und den Temperatur- und Belastungsbedingungen abhängig.<sup>70</sup> Diese Versuche sind meistens zeit- und kostenaufwendig, und falls keine Testdateien vorhanden sind, werden von einigen Autoren auch Nomogrammen vorgeschlagen, die zu der schnellen und groben Vorbestimmung des komplexen E-Moduls dienen.

Bei dem Vierpunkt-Biegeversuch werden schlanke prismatische Asphaltprobekörper durch eine zyklische Vierpunkt-Biegebelastung beansprucht. Das Probestück wird durch vier Klemmen gehalten, die symmetrisch angeordnet sind. Die Klemmen werden so gelagert, dass eine freie Rotation und Translation während der Belastung in allen Reaktionspunkten erlaubt wird. Die Biegung wird erreicht durch die Aufbringung vertikaler Kräfte auf die beiden inneren Klemmen senkrecht zu der Längsachse des Probekörpers. Die auf die inneren Klemmen aufgebrachten Lasten sollten gleich sein. So erzeugt die beschriebene Belastungsanordnung ein konstantes Biegemoment und dadurch eine konstante Dehnung zwischen den beiden inneren Klemmen. Während der Prüfung werden die angebrachte Kraft und die Durchbiegung als Funktion der Zeit gemessen. Die Ermüdungsdaten des geprüften Materials sind danach mittels dieser Messungen zu bestimmen<sup>71</sup>. Der 4PBB Versuch ist schematisch auf [Abbildung 4-1] veranschaulicht:

---

<sup>70</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-26. Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 26: Steifigkeit Wien. 2012.

<sup>71</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-26, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 26: Steifigkeit. Wien. 2012.

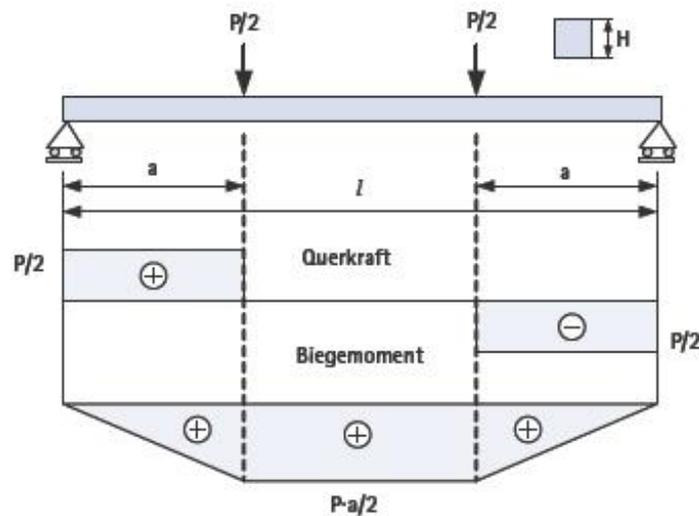


Abbildung 4-1: Aufbauskinne des Vierpunkt-Biegeversuchs<sup>72</sup>

Die Differentialgleichung der Biegelinie nach der Balkentheorie<sup>73</sup> lautet:

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

Bezeichnungen:  $w(x)$ ....Durchbiegung im Punkt  $x$  [mm]

$M$ .....Biegemoment [Nmm]

$EI$ .....Biegesteifigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

Das Biegemoment bei  $x < a$  ist gleich:  $M = x * \frac{P}{2}$  Gleichung 4.2

Bezeichnungen:  $M$ ...Biegemoment [Nmm]

$P$ ....Kraft [N]

<sup>72</sup> Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz. In <http://www.hbm.com/de/menu/anwendungen/technische-fachartikel/technische-fachartikel-details/datum/2008/08/27/analyse-der-eigenschaften-von-dms-messstellen-auf-holz-12/>

<sup>73</sup> Balkentheorie. Wikipedia. In <http://de.wikipedia.org/wiki/Balkentheorie>

Nach der Einsetzung von Gleichung 4.2 in Gleichung 4.1 und nach stufenweiser Integration, erhält man folgende Gleichungen:

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = -\frac{1}{EI} * \left(x * \frac{P}{2}\right) = -\frac{1}{2 * EI} * P * x \quad \text{Gleichung 4.3}$$

$$\frac{dw(x)}{dx} = -\frac{1}{2 * EI} * \left(P * \frac{x^2}{2} + C_1\right) \quad \text{Gleichung 4.4}$$

$$w(x) = -\frac{1}{2 * EI} * \left(P * \frac{x^3}{6} + C_1 * x + C_2\right) \quad \text{Gleichung 4.5}$$

Bezeichnungen:  $w(x)$ .....Durchbiegung im Punkt  $x$  [mm]  
 $EI$ .....Biegesteifigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $C_1$ .....Integrationskonstante [-]  
 $C_2$ .....Integrationskonstante [-]

Die Integrationskonstanten können durch die Randbedingungen berechnet werden:

$$w(x = 0) = 0: C_2 = 0 \quad \text{Gleichung 4.6}$$

$$\frac{dw}{dx} \left(x = \frac{L}{2}\right) = 0 \quad \frac{dw(x)}{dx} = -\frac{1}{2 * EI} * \left(\frac{1}{2} * P * \frac{L^2}{4} + C_1\right) = 0 \quad \text{Gleichung 4.7}$$

(Querkraft im  $L/2 = 0$ )

$$C_1 = -\frac{1}{8} * P * L^2 \quad \text{Gleichung 4.8}$$

Bezeichnungen:  $w(x)$ .....Durchbiegung im Punkt  $x$  [mm]  
 $w(x)$ .....Durchbiegung im Punkt  $x$  [mm]  
 $M$ .....Biegemoment [Nmm]  
 $EI$ .....Biegesteifigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $P$ .....Kraft [N]  
 $L$ .....Abstand zwischen den äusseren Klemmen [mm]  
 $C_1$ .....Integrationskonstante [-]  
 $C_2$ .....Integrationskonstante [-]

Durch die Einfügung der Integrationskonstanten in Gleichung 4.5, die Biegelinie wird erhalten in Gleichung 4.9:

$$\begin{aligned}
 w(x) &= -\frac{1}{2 * EI} * \left( P * \frac{x^3}{6} + \left( -P * \frac{1}{8} * L^2 \right) * x + 0 \right) = \\
 &= -\frac{x}{2 * EI} * P \left( \frac{x^2}{6} - \frac{L^2}{8} \right) = -\frac{x}{2 * EI} * P * \left( \frac{4x^2}{24} - \frac{3L^2}{24} \right) = \\
 &= \frac{x}{2 * EI} * P * \left( \frac{3L^2}{24} - \frac{4x^2}{24} \right) = \frac{x}{2 * 24 * EI} * P(3L^2 - 4x^2) \\
 w(x) &= \frac{x}{48 * EI} * P(3L^2 - 4x^2)
 \end{aligned}$$

Gleichung 4.9

Bei  $x = a$ :  $w = \frac{a * P}{48 * EI} (3L^2 - 4a^2)$

Gleichung 4.10

Nach Umformung der Biegelinie:

$$E = \frac{a * P}{48 * w * I} * (3L^2 - 4a^2)$$

Gleichung 4.11

Bezeichnungen:  $w$ ...Durchbiegung [mm]

$E$ .....Steifigkeitsmodul [N/mm<sup>2</sup>]

$P$ .....Kraft [N]

$L$ .....Abstand zwischen den äusseren Klemmen [mm]

$I$ .....Trägheitsmoment [mm<sup>4</sup>]

$a$ .....Abstand zwischen der äusseren und der inneren Klemme [mm]

Das Trägheitsmoment ist nach der Balkentheorie gleich:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

Gleichung 4.12

Bezeichnungen:  $I$ .....Trägheitsmoment [mm<sup>4</sup>]

$b$ .....Breite des Probekörpers [mm]

$h$ .....Höhe des Probekörpers [mm]

Durch die Einsetzung des Trägheitsmoments in Gleichung 4.11 wird der Steifigkeitsmodul in der folgenden Gleichung [nach Pronk]<sup>74</sup> abgeleitet:

$$E = \frac{a * P}{48 * w * \frac{b * h^3}{12}} * (3L^2 - 4a^2) = \frac{a * P * (3L^2 - 4a^2)}{4 * w * b * h^3} \quad \text{Gleichung 4.13}$$

Bezeichnungen: E.....Steifigkeitsmodul [N/mm<sup>2</sup>]  
 w....Durchbiegung [mm]  
 P.....Kraft [N]  
 L.....Abstand zwischen den äusseren Klemmen [mm]  
 a.....Abstand zwischen der äusseren und der inneren Klemme [mm]  
 b.....Breite des Probekörpers [mm]  
 h.....Höhe des Probekörpers [mm]

#### 4.1 Vierpunkt-Biegebalken Steifigkeitsprüfung – dynamischer |E\*| Modul

Die Steifigkeitsprüfungen werden benötigt, damit Asphalt aufgrund seiner Steifigkeitswerte klassifiziert werden kann. Der dynamische Modul |E\*| und seine elastische und viskose Komponenten E<sub>1</sub> und E<sub>2</sub> zusammen mit der Phasenverschiebung φ sind die wichtigsten Materialeigenschaften, die die Vierpunkt-Biegebalkensteifigkeitsprüfung ergibt. Diese werden nach der EN 12697-26 gegeben:<sup>75</sup>

$$E_1 = \gamma * \left( \frac{F}{D} * \cos\varphi + \frac{\mu}{10^3} * f^2 \right) \quad \text{Gleichung 4.14}$$

$$E_2 = \gamma * \left( \frac{F}{D} * \sin\varphi \right) \quad \text{Gleichung 4.15}$$

<sup>74</sup> Pais, J., Harvey, T.: Four Point Bending. Proceedings of the Third Conference on Four-Point Bending. Davis, USA. 2012

<sup>75</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-26, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 26: Steifigkeit. Wien. 2012

Bezeichnungen:  $E_1$ .....elastische Komponente des Steifigkeitsmoduls [MPa]  
 $E_2$ .....viskose Komponente des dynamischen Steifigkeitmoduls [MPa]  
 $F$ .....Kraftamplitude [N]  
 $D$ .....Durchbiegungsamplitude [mm]  
 $\varphi$ .....Phasenverschiebung [°]  
 $f$ .....Prüffrequenz [Hz]  
 $\gamma$ .....Formfaktor [-]  
 $\mu$ ..... Massenfaktor[-]

Der Massenfaktor und der Formfaktor begründen den Einfluss der Probekörperabmessungen und den Trägheitsauswirkungen der Prüfeinrichtung:

$$\gamma = \frac{L^2 * a}{b * h^3} * \left( \frac{3}{4} - \frac{a^2}{L^2} \right) \quad \text{Gleichung 4.16}$$

Der Massenfaktor  $\mu$  wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$\mu = R(X) * \left( \frac{M}{\pi^4} + \frac{m}{R(a)} \right) \quad \text{Gleichung 4.17}$$

$$R(X_s) = \frac{12 * L}{a} * \left[ \frac{1}{\left( 3 * \frac{X}{L} - 3 * \frac{X^2}{L^2} - \frac{a^2}{L^2} \right)} \right] \quad \text{Gleichung 4.18}$$

$$X_s = \frac{L}{2}$$

$$R(a) = \frac{12 * L}{a} * \left[ \frac{1}{\left( 3 * \frac{a}{L} - 3 * \frac{a^2}{L^2} - \frac{a^2}{L^2} \right)} \right] \quad \text{Gleichung 4.19}$$

Bezeichnungen:  $b$ .....Breite des Probekörpers [mm]  
 $h$ .....Höhe des Probekörpers [mm]  
 $L$ .....Abstand zwischen den äusseren Klemmen [mm]  
 $a$ .....Abstand zwischen der äusseren und der inneren Klemme [mm]  
 $X_s$ ...Koordinate des Punktes, wo die Durchbiegung gemessen wird [mm]  
 $M$ ....Masse ds Probekörpers [kg]  
 $m$ ....Masse der beweglichen Teilen, die die Resultierende mittels Trägheitseinwirkungen beeinflussen [kg]

Der eventuelle Auftritt von Ermüdungsschaden kann die richtige Bestimmung des Steifigkeitsmoduls beeinflussen. Deswegen ist es wichtig, dass keine vorzeitige Ermüdung in dem Probekörper provoziert wird. Aus Erfahrung ist es bekannt, dass bei den meisten

Asphaltmischgüter Dehnungsamplituden kleiner als 50  $\mu\text{m/m}$  keine Ermüdungsschaden hervorrufen, weil die Dehnungen in dieser Grössenordnung in dem linear-viskoelastischen Bereich liegen und reversibel sind. Eine Abweichung von dem gegebenen Wert innerhalb von  $\pm 3$  Mikrostrain ist gemäss der Norm zulässig.<sup>76</sup>

Die Umfeldtemperatur in der Prüfkammer muss während der Prüfung konstant gehalten werden und die Temperaturmessung ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.5^\circ\text{C}$

## 4.2 Vierpunkt-Biegebalken Ermüdungsprüfung – komplexer Steifigkeitsmodul S

Die Ermüdungsprüfungen werden darum verwendet, Asphalt nach seiner Ermüdungsbeständigkeit einzustufen. Zusätzlich werden durch die Ermüdungsprüfungen auch Daten zur Beurteilung des Tragverhaltens von Asphalt gewonnen. Damit die Ermüdungsrisse in Asphalt beschränkt werden, sollen möglichst leicht verformbaren und gleichzeitig elastische Bitumensorten verwendet werden. Die Verformbarkeit von Bitumen entspricht einem niedrigen komplexen Schubmodul  $G^*$  und die hohe Elastizität von Bitumen stimmt mit einem niedrigen Phasenverschiebungswinkel  $\delta$  überein. Folgend soll zur bestmöglichen Beständigkeit gegen Ermüdung des Bitumens, bzw des daraus hergestellten Asphalts, das Produkt  $G^* \cdot \sin(\delta)$  möglichst kleinere Werte betragen. Dabei kann ein hohes  $\delta$  durch ein geringes  $G^*$  ausgeglichen werden und umgekehrt.<sup>77</sup>

Die Beanspruchungsweise und die Prüfungsanordnung bei dem Ermüdungsversuch sind analog zu der oben beschriebenen Methode zur Steifigkeitsermittlung. Entscheidend bei dem Ermüdungsversuch ist die Lastwechselzahl, bei der der untersuchte Probekörper den Ermüdungsausfall nach dem entsprechenden Kriterium erreicht. Diese Lastwechselzahl, wird als  $N_{f,50}$  angegeben. Der wichtigste Parameter in der Vierpunkt-Biegebalkenermüdungsprüfung ist der komplexe Steifigkeitsmodul S, der gemäss EN 12697-24 folgendermaßen ermittelt wird:<sup>78</sup>

---

<sup>76</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-26, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 26: Steifigkeit. Wien. 2012.

<sup>77</sup> Litzka, J., Strobl, R., Pass, F., Augustin, H. :Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998.

<sup>78</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-24, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Wien. 2012.

$$S = \frac{12 * F * L^3}{D * R(x_s) * b * h^3} * \sqrt{1 + 2[\cos\varphi * I - \sin\varphi * J] + [I^2 + J^2]} \quad \text{Gleichung 4.20}$$

- Bezeichnungen: S.....Komplexer Steifigkeitsmodul [MPa]  
 F.....Kraftamplitude [N]  
 D.....Durchbiegungsamplitude gemessen im Punkt  $x_s = \frac{L}{2}$  [mm]  
 R(x<sub>s</sub>)..dimensionslose Gewichtsfunktion  
 b.....Breite des Probekörpers [mm]  
 h.....Höhe des Probekörpers [mm]  
 φ.....Phasenwinkel [°]  
 I.....Trägheitsfunktion [-]  
 J.....Dämpfungsfunktion[-]

Der Anfangswert des komplexen Steifigkeitsmoduls wird als der bei dem hundertsten Lastwechsel berechnete Wert des Steifigkeitmoduls angenommen und wird als  $S_{\text{mix},0}$  bezeichnet.

Die Dämpfungsfunktion J ist eine dimensionslose Funktion des Abstandes  $x_s = \frac{L}{2}$ , die die Dämpfungseinwirkung des Systems berücksichtigt. In unserem Fall wird der Anteil der Dämpfungsfunktion vernachlässigt. Das ist möglich wegen der regelmässigen Kalibrierung der Prüfeinrichtungen mit Hilfe eines normierten Balkens (z. B. Aluminium, 71.3 Gpa)<sup>79</sup>, dessen Steifigkeitsmodul normiert und bekannt sind.

Die Trägheitsfunktion  $I_{x_s}$  ist auch eine dimensionslose Funktion des Abstandes  $x_s = \frac{L}{2}$ , die den Massenträgheitseinfluss des Systems in Betracht nimmt.

$$I_{x_s} = M_{\text{äq}} * \frac{D}{P} * \omega^2 * 10^{-3} \quad \text{Gleichung 4.21}$$

- Bezeichnungen:  $M_{\text{äq}}$ ..... äquivalente Masse [kg]  
 ω.....Kreisfrequenz [rad/s]  
 D.....Durchbiegungsamplitude gemessen im Punkt  $x_s = \frac{L}{2}$  [mm]  
 P.....Amplitude der Gesamtast, die auf den beiden inneren Klemmen angebracht wird [N]

<sup>79</sup> Pronk, Ad: Four Point Bending From Theory to Practice and Standards. 2<sup>nd</sup> European \$PB Workshop. University of Minho. 2009.

Der Zusammenhang zwischen der Kreisfrequenz  $\omega$  und der Frequenz  $f$  ist gleich:

$$\omega = 2\pi * f \quad \text{Gleichung 4.22}$$

Die äquivalente Masse  $M_{\text{äq}}$  stellt die Summe der gemessenen Massen des Probekörpers, des Messensors und der Klemmen dar:

$$M_{\text{äq}} = \frac{R(x_s)}{\pi^4} * M_{\text{Balken}} + \frac{R(x_s)}{R(A)} * M_{\text{Klemmen}} + M_{\text{Messfühler}} \quad \text{Gleichung 4.23}$$

Bezeichnungen:  $M_{\text{äq}}$ ..... äquivalente Masse [kg]

$M_{\text{Balken}}$ .. Masse des Prismatischen Probekörpers[kg]

$M_{\text{Klemmen}}$ .Masse aller beweglichen Teile des servohydraulischen Prüfgeräts[kg]

$M_{\text{sensor}}=0$

$R(x)$ ...dimensionslose Gewichtsfunktion

$x_s$ ..... Koordinate von  $x$ , in der die Durbiegung gemessen wird [mm]

$L$ .... Abstand zwischen den äusseren Klemmen [mm]

$\omega$ ....Kreisfrequenz [rad/s]

$f$ .....Testfrequenz [Hz]

Die Gewichtsfunktion  $R(x)$  ist eine dimensionslose Funktion, die den Abstand  $x$  zu der linken äusseren Klemme ( $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ ), den Abstand  $A$  zwischen der linken inneren und der linken äusseren Klemme und die effektive Länge  $L$  zwischen den beiden äusseren Klemmen umfasst.

$$R(x) = \frac{12 * L^3}{A * (3L * x - 3x^2 - A)} \quad \text{Gleichung 4.24}$$

Bezeichnungen:  $x$ .....zu der linken äusseren Klemme [mm]

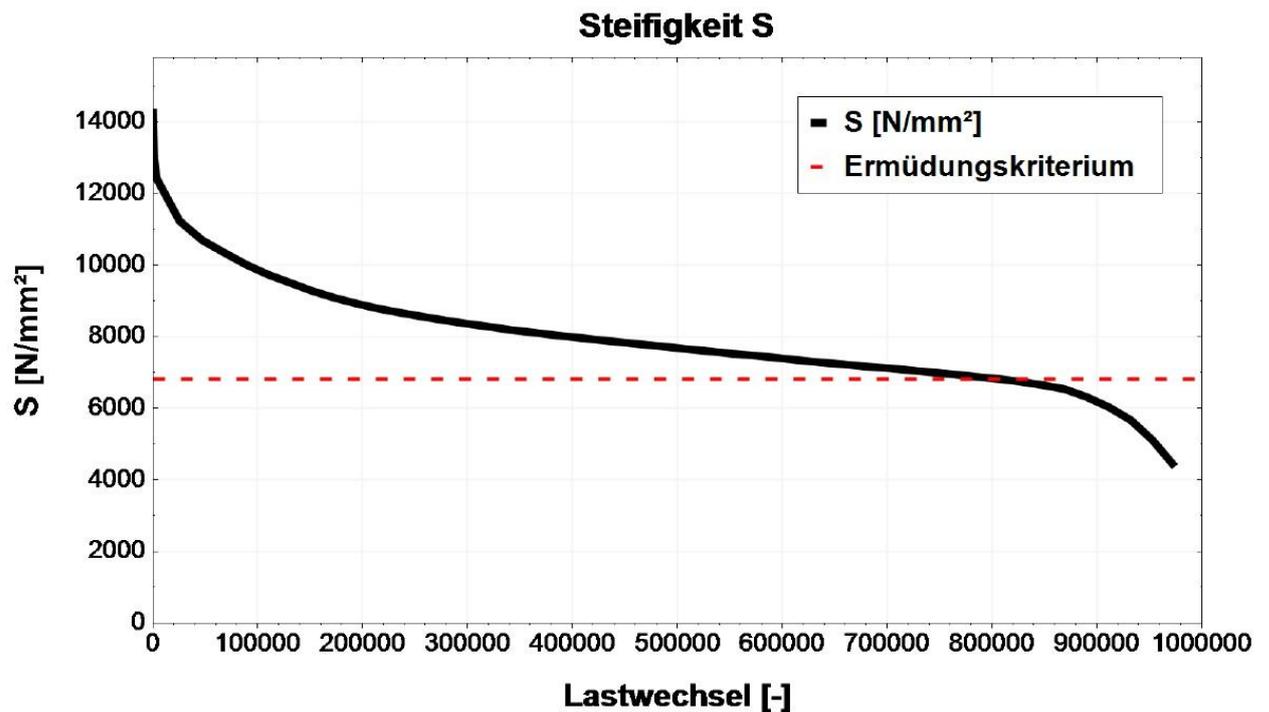
$A$ ....Abstand zwischen der linken äusseren und der linken inneren Klemme [mm]

$L$ .....Abstand zwischen den beiden äusseren Klemmen (effektive Länge) [mm]

Der Ermüdungsversuch wird gemäss EN 12697-24 bei 20 °C durchgeführt und alle Probekörper werden einer Beanspruchung mit einer Frequenz von 30 Hz unterzogen. Es werden mindestens 18 Probekörper von jedem Mischgut hergestellt, die in drei Gruppen je

nach der ausgeübten Dehnungsamplitude unterteilt werden. Die Dehnungsamplituden werden so ausgewählt, dass der Ermüdungsausfall der Probekörper in einem Lastwechselbereich von  $10^4$  bis  $2 \cdot 10^6$  eintritt.

Auf der folgenden [Abbildung 4-2] ist der Ermüdungsverlauf eines Probekörpers bei 20 °C im weggesteuerten 4PBB Ermüdungsversuch mit einer sinusförmigen Belastung von 140  $\mu\text{m/m}$  und einer Prüffrequenz von 30 Hz zu sehen:



**Abbildung 4-2: Ermüdungsverlauf eines Probekörpers (E482C) aus AC 32 binder PmB 45/80 RA10 (Projektnummer 12418)**

Nach der statistischen Verarbeitung und der Störungsentfernung werden die Ermüdungspunkte aus den einzelnen Ermüdungsverläufe in einen Punktdiagramm eingetragen, wobei die X-Achse und Y-Achse entsprechend die Lastwechselzahlen und und die ausgeübten Dehnungsamplituden in logarithmischen Maßstab dargestellt werden [Abbildung 4-3]:

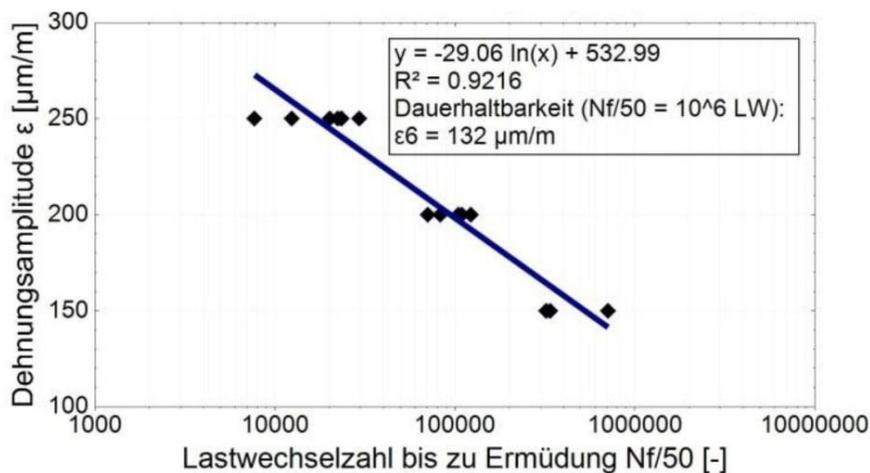


Abbildung 4-3: Wöhlerkurve von AC 22 binder PmB 45/80-65 (Projekt 12418)

Der aus der Regressionslinie abgelesene Wert  $\varepsilon_6$  bei dem  $10^6$ sten Lastwechsel dient danach zu der Einstufung der Beständigkeit gegen Ermüdung in Kategorien [Tabelle 4.1] gemäss EN 13108-1:2006:

Tabelle 4-1: Kategorien der Ermüdungsbeständigkeit <sup>80</sup>

Beständigkeit gegen Ermüdung Mikrodehnung	Kategorie $\varepsilon_6$
310	$\varepsilon_6$ -310
260	$\varepsilon_6$ -260
220	$\varepsilon_6$ -220
190	$\varepsilon_6$ -190
160	$\varepsilon_6$ -160
130	$\varepsilon_6$ -130
115	$\varepsilon_6$ -115
100	$\varepsilon_6$ -100
90	$\varepsilon_6$ -90
80	$\varepsilon_6$ -80
70	$\varepsilon_6$ -70
60	$\varepsilon_6$ -60
50	$\varepsilon_6$ -50
Keine Anforderung	$\varepsilon_6$ -NR

<sup>80</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 13108-1, Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen, Teil 1: Asphaltbeton. Wien. 2006.

## 5. ERMÜDUNGSKRITERIEN

Wie erwähnt sind die Zugspannungen und entsprechend die Zugdehnungen, die an der Unterkante der bituminös gebundenen Schichten auftreten, maßgebend für die Bemessung der Oberbaukonstruktion. Die wiederholten Beanspruchungen verursachen Materialermüdung und dadurch eine Abnahme der Tragfähigkeit der Asphalt-schichteneinheit. Deswegen stellt die Ermüdung das entscheidende Kriterium bei der Bemessung der Asphalt-schichten dar.

### 5.1 Konventionelles Ermüdungskriterium nach EN 12697-24<sup>81</sup>

Als konventionelles Kriterium für die Ermüdung von Asphaltmischgütern wird die Bruchlastwechselzahl  $N_{BR}$  angenommen, bei der die Abnahme des komplexen Steifigkeitsmoduls  $S$  die Hälfte seines Ursprungwertes  $S_{mix,0}$  erreicht. Die Ermüdungskurve wird als eine Regressionskurve zwischen den Lastwechselzahlen und den Anfangsdehnungsamplituden gebaut.<sup>82</sup> Die Ermüdungshaltbarkeit ist die Dehnungsamplitude  $\varepsilon_6$ , bei der ein Asphaltprobekörper einer Million Lastwechsel unterzogen werden kann. Auf [Abbildung 4-3] sind die erworbenen Ermüdungsstellen von Probekörper aus einem AC 22 binder PmB 45/80-65 als Punkte für die drei verwendeten Dehnungsstufen (150  $\mu\text{m}/\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}/\text{m}$  und 250  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) zu sehen. Aus der Regressionskurve ist bei einer Million Lastwechsel eine Dehnungsamplitude von  $\varepsilon_6 = 132 \mu\text{m}/\text{m}$  abzulesen. Daraus kann man das Asphaltmischgut gemäss EN 13108-1:2006 [Tabelle 4-1] als  $\varepsilon_{6-130}$  klassifizieren. Das konventionelle Kriterium berücksichtigt jedoch nur den Steifigkeitsmodul, wobei andere Materialparameter wie zum Beispiel die pro Lastwechsel abgegebene Energie vernachlässigt werden.<sup>83</sup>

**Das Ermüdungsgesetz** stellt den Schaden dar, der in dem Strassenoberbau infolge der einwirkenden Belastungen erscheinen und ermöglicht eine Voraussage der Lebensdauer von Asphaltfestigungen. Das Ermüdungsgesetz wird durch die Untersuchung von

---

<sup>81</sup> Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORM EN 12697-24, Asphalt – Prüfverfahren für Heissasphalt, Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung. Wien. 2012.

<sup>82</sup> Hauser, E.: Funktionale Charakterisierung von Asphalt. Von den wissenschaftlichen Grundlagen zur baupraktischen Anwendung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2009.

<sup>83</sup> RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer Dordrecht Heidelberg. 2013

Asphaltverhalten in Laborbedingungen mit Hilfe von dynamischen Versuchen hergeleitet. Das Ausfallkriterium wird bei Kraftgeregelten Versuchen als eine Zunahme der Dehnung  $\varepsilon$  um 100% und bei weggesteuerten Prüfungen- als eine Herabsetzung der Spannung um 50% definiert. Wichtig ist zu bemerken, dass die Laborprüfungen nicht im Stande sind alle in der Realität auftretenden Klima- und Einwirkungsbedingungen nachzubilden und folglich ergeben die Ermüdungsversuche keine exakte Evaluierung der Lebensdauer, sondern eine rechnerische Lebensdauer. Die Beurteilung der rechnerischen Lebensdauer wird durch die Berechnung der zulässigen Lastwechsel ermittelt:<sup>84</sup>

$$N_{zul} = k_1(T) * \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^{k_2(T)} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

$$\text{bzw. } N_{zul} = k_3(T) * \left(\frac{1}{\sigma}\right)^{k_4(T)} \quad \text{Gleichung 5.2}$$

Bezeichnungen:  $N_{zul}$ .....Anzahl der zulässigen Lastwechsel  
 $\varepsilon$ .....Dehnung an der Schichtunterseite [ $\mu\text{m/m}$ ]  
 $\sigma$ .....Biegezugspannung an der Schichtunterseite [ $\text{N/mm}^2$ ]  
 $k_1, k_2, k_3, k_4$ ... Temperaturabhängige Parameter zur Beschreibung der Ermüdungsfunktion, die von der Datafitting abgeleitet werden

In Österreich wird die Anzahl der Zulässigen Lastwechsel mittels der ersten Gleichung kalkuliert, wobei die Dehnung  $\varepsilon$  durch die Vergleichsdehnung  $\varepsilon_v$  ersetzt wird. Die theoretische Herleitung der Vergleichsdehnung  $\varepsilon_v$  wird in den folgenden Absätzen beschrieben.

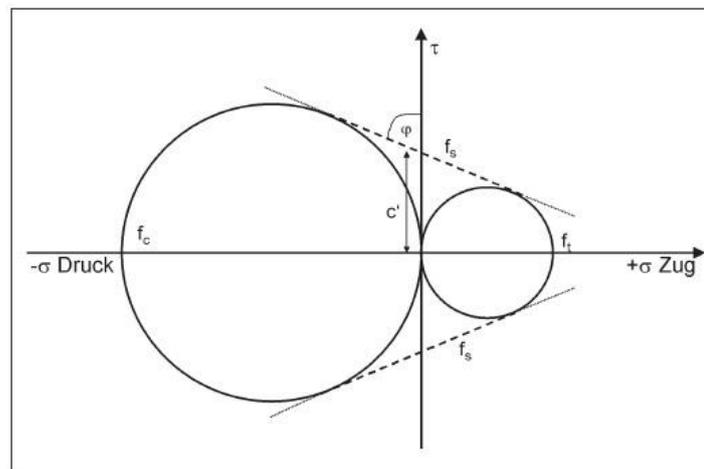
### 5.1.1 Darstellung des dreidimensionalen Spannungszustandes mittels eindimensionaler Vergleichsspannung

Die unterschiedlichen Beanspruchungen der Fahrbahnbefestigung ergeben in Wirklichkeit unterschiedliche dreidimensionale Spannungszustände. Damit man die verschiedenen Spannungszustände miteinander vergleichen kann, wird das Konzept der eindimensionalen Vergleichsspannung angewandt, wobei der tatsächliche dreidimensionale Spannungszustand durch einen äquivalenten maßgebenden einachsialen

<sup>84</sup> Wistuba, M.:Klimaeinflüsse auf Asphaltstrassen. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2003

Spannungszustand eingesetzt wird. Diese Ersetzung stützt sich auf die verbesserten Schubspannungshypothese nach Mohr. <sup>85</sup>

Die erweiterte Schubspannungshypothese wird auf der Überlegung gegründet, dass der Ausfall eines Materials infolge der Grenzwertüberschreitung der Schubfestigkeit  $f_s$  oder der Zugfestigkeit  $f_t$  eintritt. Es wird auch angenommen, dass die Zugfestigkeit des Materials kleiner als die Druckfestigkeit ist. Die Beobachtung, dass der hydrostatische Druck bei durchgeführten Prüfungen nicht zum Materialversagen führt, erklärt den Schnittpunkt der umhüllenden Grenzlinie nur in dem Zugbereich und nicht in dem Druckbereich. Deswegen fällt die Grenzlinie mit Vergrößerung der Normalspannungen ab. Auf der folgenden Abbildung [Abbildung 5-1] ist der Spannungsbereich zwischen den beiden am meisten untersuchten Zuständen (reinem Druck und reinem Zug) zur Vereinfachung nach Mohr linear dargestellt. <sup>86</sup>



**Abbildung 5-1: Vereinfachte Darstellung der Grenzlinie im Bereich Zwischen axialem Druck und axialem Zug<sup>87</sup>**

$$\pm f_s = c' - \sigma * \tan\varphi = \frac{\sqrt{f_t} * f_c}{2} - \sigma * \frac{f_c - f_t}{2 * \sqrt{f_t} * f_c} \quad \text{Gleichung 5.3}$$

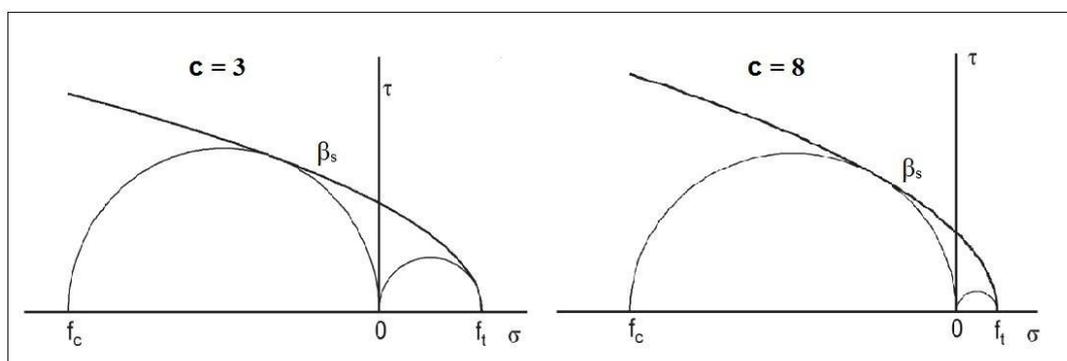
<sup>85</sup> Wistuba, Michael: Klimateinflüsse auf Asphaltstrassen. Mitteilung des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Technische Universität Wien. 2003.

<sup>86</sup> Lorenzl, H.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.

<sup>87</sup> Lorenzl, H.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.

Bezeichnungen:  $f_s$ .....Schubfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\sigma$ .....Spannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_c$ ....Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]  
 $f_t$ ....Zugfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]

Die geschilderte Darstellung des Grenzzustandes [Abbildung 5-1] sollte einen Schubbruch im Falle reiner Zugbelastung ergeben. Das entspricht jedoch nicht den praktischen Beobachtungen. Damit der bei reinem Zug beobachtete Ausfall beim Eintreffen der Materialzugfestigkeit durch die erweiterte Mohr'sche Schubspannungshypothese erklärt werden kann, führt Leon eine Parabel [Abbildung 5-2] als umhüllende Kurve ein. Die Form der Leon'schen Parabel wird durch einen Parameter  $c$  vorbestimmt, der das Verhältnis von der Druckfestigkeit  $f_c$  zu der Zugfestigkeit  $f_t$  beschreibt und dadurch auf das Bruchverhalten des Materials einwirkt. Für  $1 \leq c < 3$  befindet sich der Schnittpunkt der Leon'schen Parabel mit dem Zugbereich der Normalspannungsachse  $\sigma$  ausserhalb des Spannungskreises für reinen axialen Zug. Dabei berühren sich die Parabel und der kleinere Spannungskreis in Punkten, wo  $\tau \neq 0$  ist, d.h. es entsteht ein Gleitbruch (Überschreitung der Schubfestigkeit). Andererseits für  $c \geq 3$  schneiden sich die Parabel und die Normalspannungsachse im Punkt  $f_t$ , wo die tangentiellen Spannungen gleich Null sind – es entsteht also ein Trennbruch (Überschreitung der Zugfestigkeit).<sup>88</sup>



**Abbildung 5-2: Leon'sche Parabel – Grenzkurven: links für Schubbruch ohne Möglichkeit des Trennbruchs ( $1 \leq c \leq 3$ ); rechts mit Möglichkeit des Trennbruchs ( $c \geq 3$ )** <sup>89</sup>

<sup>88</sup> Lorenzl, H.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.

<sup>89</sup> Lorenzl, H.: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.

Die Gleichung der Leon'schen Parabel lautet:

$$\beta_s(\sigma) = \sqrt{2 * p * (f_t - \sigma)} \quad \text{Gleichung 5.4}$$

$$\text{Wobei } p = 0.5 * \left( (c + 2) - 2 * \sqrt{(c + 1)} \right) * f_t$$

Der Parameter c hängt bei Asphalten von der Temperatur ab. Hothan leitete nach Prüfungen mit Asphalttragschichten für  $T < 40 \text{ °C}$  den folgenden Zusammenhang zur Ermittlung von c ab:

$$c = \frac{f_c}{f_t} = \left( \frac{72,7749 - T}{32,8565} \right)^{1,923} \quad \text{Gleichung 5.5}$$

Bezeichnungen: c.....Formparameter der Leon'schen Parabel[-]

$\sigma_D$ ...Einachsiale Druckfestigkeit

$\sigma_Z$ ...einachsiale Zugfestigkeit

T.....Versuchstemperatur

Die maßgebliche Vergleichsspannung  $\sigma_V$  wird nach den folgenden Gleichungen in Abhängigkeit von den Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  und dem Formparameter c ermittelt:

$$\sigma_V = \frac{(c - 1)}{2 * c} * (\sigma_1 + \sigma_3) \mp \sqrt{\frac{(c - 1)^2}{4 * c^2} * (\sigma_1 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{c} (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad \text{Gleichung 5.6}$$

bei  $1 \leq c \leq 3$

$$\sigma_V = -\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2 * (p_c - 2)} \mp \sqrt{\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)^2}{4 * (p_c - 2)^2} - \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2}{4 * p_c (p_c - 2)}} \quad \text{Gleichung 5.7}$$

bei  $c \geq 3$  und  $p_c = 0,5 * [(c + 2) - 2 * \sqrt{c + 1}]$

Bezeichnungen:  $c$ .....temperaturbedingter Formparameter der Leon'schen Parabel  
 $\sigma_v$ .....einachsiale Vergleichsspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\sigma_1, \sigma_3$ ...Hauptnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>]

Diese Vergleichsdehnung kann aus der einachsialen Vergleichsspannung abgeleitet werden:

$$\varepsilon_v = \frac{\sigma_v}{E_{\text{dyn}}} \quad \text{Gleichung 5.8}$$

So lautet das in Österreich verwendete Ermüdungsgesetz:

$$N_{\text{zul}} = k_1(T) * \left( \frac{E_{\text{dyn}}}{\sigma_v} \right)^{k_2(T)} \quad \text{Gleichung 5.9}$$

Bezeichnungen:  $N_{\text{zul}}$ ..... Anzahl der zulässigen Lastwechsel  
 $E_{\text{dyn}}$ .....dynamischer E-Modul von Asphalt [MPa]  
 $\sigma_v$ .....einachsiale Vergleichsspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $k_1, k_2$ ....temperaturabhängige Parameter zur Beschreibung der Ermüdungsfunktion

## 5.2 Klassisches Ermüdungskriterium (classic failure criterion)

Ein klassisches Kriterium zu der Bestimmung des Ermüdungsausfalls wurde im Jahr 1969 von Carl Monismith festgelegt. Dieses Kriterium ist sowohl bei kraft- als auch bei weggeregelten Versuchsanordnungen anwendbar. Dabei wird der Kraft- und der Dehnungsverlauf entsprechend während der weggeregelten und bei der kraftgeregelten Beanspruchungsart berücksichtigt. Nach diesem Kriterium wird der Ermüdungszustand von einem Probekörper im weggesteuerten Versuch bei der Lastwechselzahl erreicht, bei der die Kraftamplitude die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes erreicht [Abbildung 5-3]:<sup>90</sup>

<sup>90</sup> Reyes-Oritz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfálticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

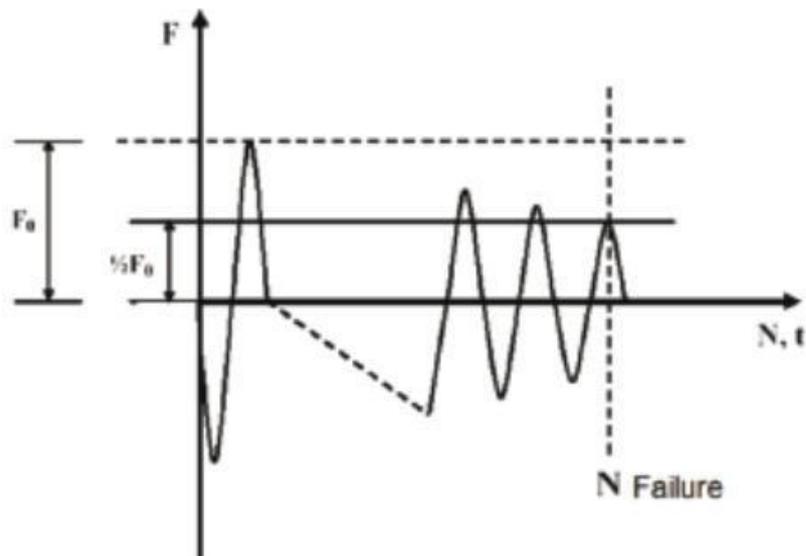


Abbildung 5-3 Kraftabminderung im weggeregelten Versuch<sup>91</sup>

Analog wird der Ermüdungsausfall bei dem kraftgeregelten Ermüdungsversuch als die Lastwechselzahl definiert, bei der die Dehnungsamplitude einen Wert, doppelt so gross wie den ursprünglichen Wert erreicht [Abbildung 5-4]:

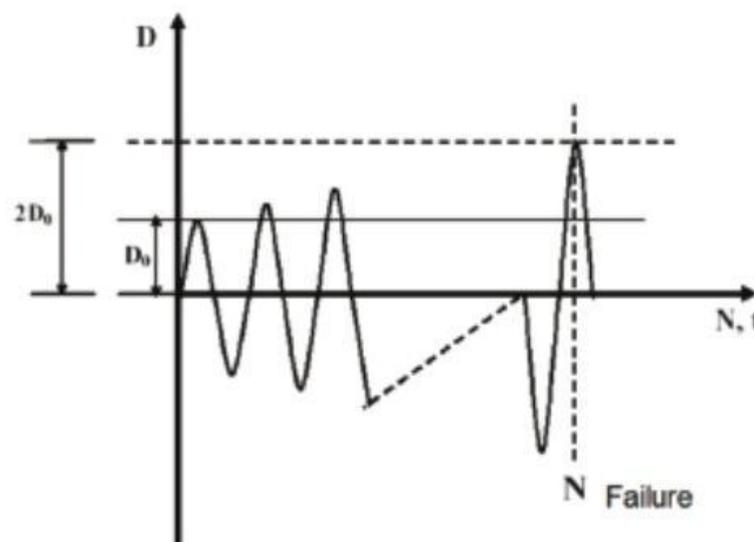


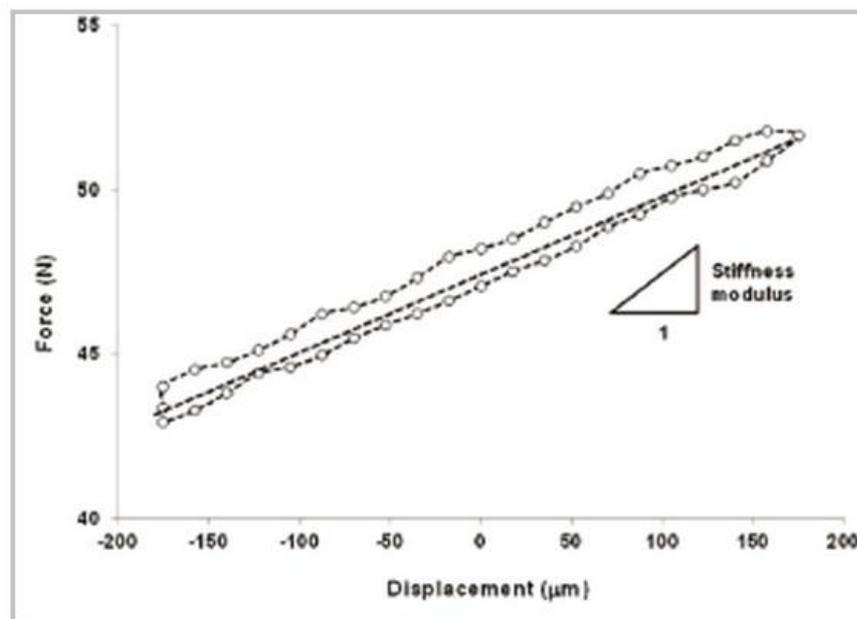
Abbildung 5-4 Anstieg der Dehnungsamplitude im kraftgeregelten Versuch<sup>92</sup>

<sup>91</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

<sup>92</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

### 5.3 Schadensausfallskriterium (damage failure criterion)

Zu den klassischen Ermüdungskriterien ist auch das „Schadensausfallskriterium“ zu rechnen. Dieses Kriterium ist auf die Beobachtung der Steifigkeitsmodulabminderung gegründet. Für jeden Lastwechsel wird der Steifigkeitsmodul als die Neigung der entsprechenden Hystereseurve berechnet [Abbildung 5-5]:



**Abbildung 5-5** Belastung und Materialantwort – Hystereseurve zur Bestimmung der Steifigkeitsmodulneigung pro Lastwechsel<sup>93</sup>

Aus den einzelnen berechneten Steifigkeitsmodulwerten wird dann die Steifigkeitsverlaufskurve gebaut [Abbildung 5-6]. Dieses Diagramm kann grundsätzlich in drei Abschnitten gegliedert werden. In der ersten Phase nimmt der Steifigkeitsverlauf drastisch ab. Dieses Phänomen ist auf die ursprüngliche Erwärmung des Probekörpers und auf die Anpassung der Asphaltbestandteile zurückzuführen. Die zweite Phase stellt einen linearen Bereich in der Steifigkeitsabnahme dar - dieser Bereich charakterisiert den Ermüdungsfortschritt und die Akkumulation von Mikrodehnungen. In der dritten Phase setzt sich die Steifigkeit wieder drastisch herab – dieser Abfall stellt die rasche Rissbildung und Rissverbreitung in dem Probekörper dar. Als Ermüdungseintritt dient die

<sup>93</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

Grenzlastwechselzahl zwischen der zweiten und dem dritten Bereich, wobei ein Knick in dem Neigungsverlauf zu beobachten ist:<sup>94</sup>

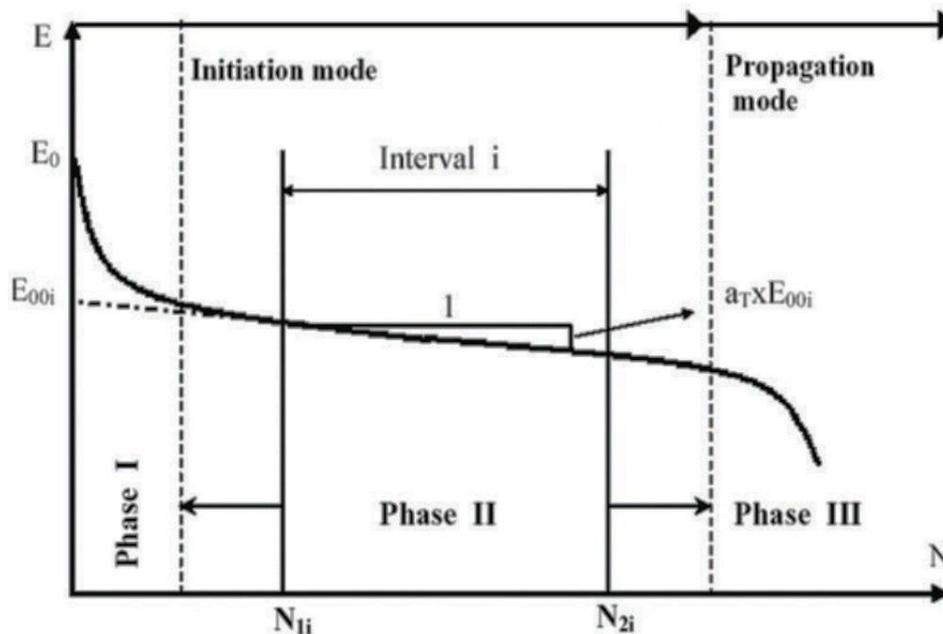


Abbildung 5-6 Steifigkeitsverlauf nach dem Schadensausfallskriterium<sup>95</sup>

## 5.4 Bruchversagenskriterium (breakage failure criterion)

Das Bruchversagenskriterium stützt sich auf die Veränderung der Wegamplitude (bei kraftgesteuerten Versuchen) und auf die Veränderung der Kraftamplitude (entsprechend bei weggesteuerten Versuchen). Nach diesem Kriterium erreicht der Probekörper den Ermüdungsausfall bei der Lastwechselzahl, wobei der Kraft- bzw. der Wegamplitudenverlauf eine rasche Neigungsveränderung erfährt [Abbildung 5-7].

<sup>94</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

<sup>95</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

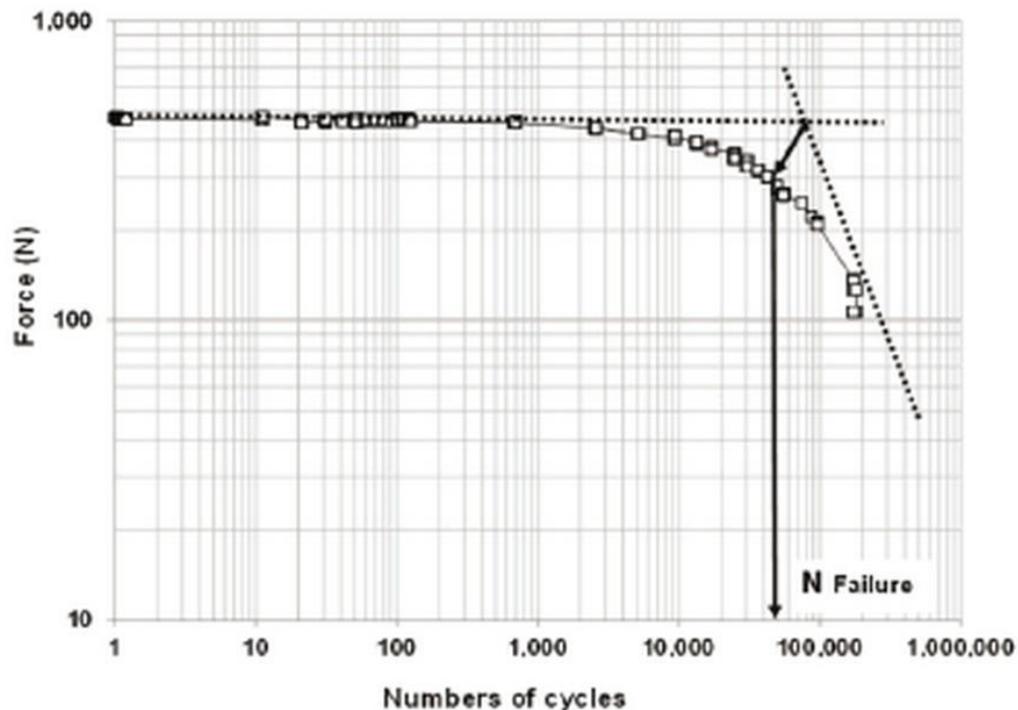


Abbildung 5-7 Kraftverlauf bei dem Bruchversagenskriterium<sup>96</sup>

## 5.5 Ermüdungskriterien gegründet auf die dissipierte Energie

Das konventionelle Ermüdungskriterium, das sich auf die 50% Steifigkeitsabminderung gründet, wird als weitverbreitete Definition für Ermüdungsversagen verwendet. Allerdings wurde diese Zahl beliebig als Kriterium eingeführt und die kann den tatsächlichen Ermüdungsausfall nicht in allen Fällen begründen. Daraus stammt die Notwendigkeit für die Suche und Forschung nach alternativen Ermüdungskriterien. Einige davon gründen sich auf dem Prinzip der dissipierten Energie. Wird ein Material beansprucht, dann stellt die Fläche unter der Spannungs- Dehnungskurve den Energie-Input in das Material dar. Falls die Belastungskurve und die Entlastungskurve ein und dieselbe Bahn beschreiben, dann wird die ganze angebrachte Energie vollständig von dem Material abgegeben. Wenn die Belastungs- und die Entlastungskurven nicht übereinstimmen, dann wird ein Teil der angebrachten Energie in dem Material dissipiert. Ein Teil der Energie, die während des Ermüdungsversuchs dissipiert wird, wird in mechanische Arbeit und Wärme umgewandelt. Trotzdem ist die davon resultierende Temperatursteigerung unwesentlich und kann nicht für Hauptgrund zu der Steifigkeitsabminderung gehalten werden. Ein Teil der im Probekörper dissipierten Energie verursacht die Asphalt ermüdung. Das Phänomen der Dissipation von

<sup>96</sup> Reyes-Ortiz, O.: Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012.

Energie in einem Material wird als Hysterese bezeichnet und die Fläche der Hysteresekurve [Abbildung 5-14] entspricht der Energiemenge, die im Material während eines Belastungszyklus dissipiert wird. Während der Ermüdungsprüfung kann eine drastische Änderung der dissipierten Energie beobachtet werden, welche auf eine plötzliche Schädigung des Probekörpers hinweist.<sup>97 98</sup>

In dem Fall einer sinusförmigen Belastung  $a * (\sin \omega t)$  ergibt sich eine Materialantwort  $b * (\sin \omega t + \varphi)$  mit der selben Frequenz, jedoch verschoben durch den Phasenwinkel  $\varphi$ <sup>99</sup>. Sei :

$$x = a * \sin(\omega t)$$

$$\sin(\omega t) = \frac{x}{a}$$

Gleichung 5.10

$$y = b * \sin(\omega t + \varphi) = b * (\sin(\omega t) * \cos(\varphi) + \cos(\omega t) * \sin(\varphi))$$

Gleichung 5.11

Setzt man  $\sin(\omega t) = \frac{x}{a}$  aus Gl. 5.10 in Gl. 5.11 dann:

$$y = b * \left( \frac{x}{a} * \cos(\varphi) + \cos(\omega t) * \sin(\varphi) \right), \text{ woraus}$$

Gleichung 5.12

$$\cos(\omega t) = \frac{y}{b * \sin(\varphi)} - \frac{x * \cos(\varphi)}{a * \sin(\varphi)}$$

Quadrieren wir Gl. 5.10 und Gl. 5.12 und addieren wir diese Gleichungen gliedweise dann erhalten wir die Gleichung der Hysteresekurve:<sup>100</sup>

---

<sup>97</sup> RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer Dordrecht Heidelberg. 2013

<sup>98</sup> Carpenter, S. Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Report. Department of Civil Engineering at the University of Illinois. 2007.

<sup>99</sup> Miao-Miao, Y., Xiao-Ning, Z.: Ratio of Dissipated Energy Change-based Failure Criteria of Asphalt Mixtures. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013

<sup>100</sup> Miao-Miao, Y., Xiao-Ning, Z.: Ratio of Dissipated Energy Change-based Failure Criteria of Asphalt Mixtures. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013

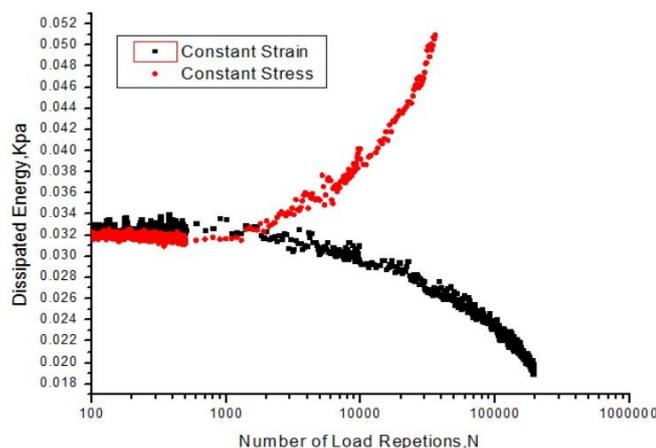
$$\begin{aligned} \sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) &= \\ &= \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2 * \sin^2(\varphi)} - 2 \frac{y * x * \cos(\varphi)}{b * \sin(\varphi) * a * \sin(\varphi)} + \frac{x^2}{a^2 * \sin^2(\varphi)} \\ 1 &= \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2 * \sin^2(\varphi)} - 2 \frac{y * x * \cos(\varphi)}{b * \sin^2(\varphi) * a} + \frac{x^2 * \cos^2(\varphi)}{a^2 * \sin^2(\varphi)} \\ 1 &= \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2 * \sin^2(\varphi)} - 2 \frac{y * x * \cos(\varphi)}{b * \sin^2(\varphi) * a} + \frac{x^2 * \cos^2(\varphi)}{a^2 * \sin^2(\varphi)} \end{aligned}$$

Multiplizieren mit  $\sin^2(\varphi)$ , dann:

$$\sin^2(\varphi) = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - 2 \frac{y * x * \cos(\varphi)}{b * a}$$

Gleichung 5.13

Der weg- oder kraftgeregelter Vierpunkt-Biegebalken Versuch wird bei der Anwendung dieses Konzeptes gebraucht, jedoch ist die Anwendbarkeit des Konzeptes auch bei anderen Versuchsanordnungen möglich. Wichtig ist zu bemerken, dass die dissipierte Energiemenge pro Lastwechsel von dem Belastungsmodus abhängt. Bei kraftgeregelter Versuche wächst die dissipierte Energie im Laufe des Versuchs, während bei weggeregelten Versuche nimmt diese ab [Abbildung 5-8]. Deswegen sind die Ergebnisdateien aus kraft- und weggeregelten Ermüdungsversuchen getrennt zu interpretieren.<sup>101</sup>



**Abbildung 5-8** Dissipierte Energie im weg- und kraftgesteuertem 4PBB Versuch<sup>102</sup>

<sup>101</sup> Carpenter, S. Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Report. Department of Civil Engineering at the University of Illinois. 2007.

<sup>102</sup> Miao-Miao, Y., Xiao-Ning, Z.: Ratio of Dissipated Energy Change-based Failure Criteria of Asphalt Mixtures. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013

Während der Ermüdungsprüfung werden bei jedem Lastwechsel die Dehnung, der Steifigkeitsmodul und die Phasenverzögerung mit Hilfe einer Software festgestellt. Für die Berechnung der dissipierten Energie wird die folgende Gleichung eingesetzt:

$$w_i = \pi * \varepsilon_i^2 * S_i * \sin\varphi_i = \pi * \varepsilon_i * \sigma_i * \sin\varphi_i \quad \text{Gleichung 5.14}$$

Bezeichnungen:  $w_i$ .....Dissipierte Energie beim Lastwechsel i [KPa]  
 $\varepsilon_i$ .....Dehnungsamplitude beim Lastwechsel i [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]  
 $S_i$ .....Steifigkeitsmodul beim Lastwechsel i [MPa]  
 $\varphi_i$ .....Phasenwinkel zwischen der Spannung und der Dehnung beim Lastwechsel i [ $^\circ$ ]  
 $\sigma_i$ .....Spannungsamplitude beim Lastwechsel i [MPa]

Das Produkt  $S_i * \sin\varphi_i$  stellt dabei den imaginären (viskosen) Anteil des Steifigkeitsmoduls dar.

Die kumulative dissipierte Energie  $W_N$  wird danach als Summe der einzelnen Energiewerte pro Lastwechsel dargestellt:

$$W_N = \sum_i^{N_f} w_i \quad \text{Gleichung 5.15}$$

Ein eindeutiger Zusammenhang ist zwischen den Lastwechselzahlen und der kumulativen dissipierten Energie zu beobachten:**103**

$$W_N = A(N_f)^z \quad \text{Gleichung 5.16}$$

Bezeichnungen: A.....empirisch bestimmter Koeffizient  
z..... empirisch bestimmter Koeffizient

Bei der weggesteuerten Ermüdungsprüfung nimmt die pro Lastwechsel dissipierte Energie mit der Zunahme der Lastwechselzahlen ab. Im Gegenteil wächst die dissipierte Energie bei dem kraftgeesteuerten Ermüdungsversuch mit Erhöhung der Lastwechselzahlen an. Im Allgemeinen entspricht die höhere kumulative Energie einer höheren Ermüdungsbeständigkeit.

### 5.5.1 Pronk und Hopman Verfahren

Pronk und Hopman führten die Idee ein, das Verhältnis der dissipierten Energie am Lastwechsel  $i$  zu dieser am anfänglichen Lastwechsel als Ermüdungskriterium bei Ermüdungsversuchen einzusetzen.<sup>104</sup> Das Energieverhältnis (Dissipated Energy Ratio- DER) im Fall einer weggeregelten Belastungsart wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$\text{Energieverhältnis DER} = n * \left( \frac{w_0}{w_i} \right) \quad \text{Gleichung 5.17}$$

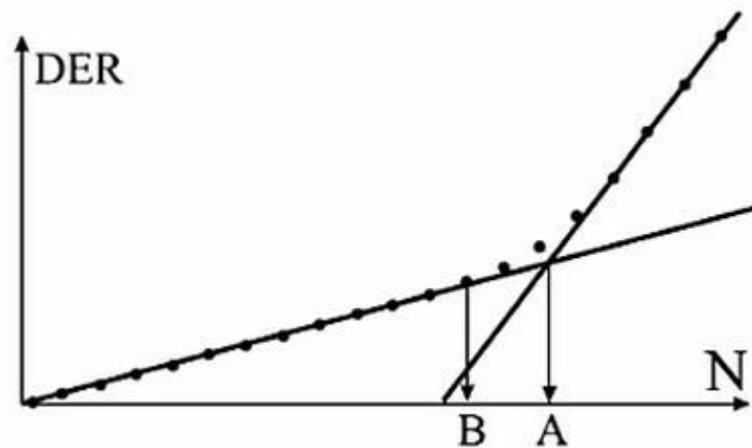
Bezeichnungen:  $w_0$ .....Dissipierte Energie beim anfänglichen Lastwechsel [KPa]  
 $w_i$ .....Dissipierte Energie beim Lastwechsel  $i$  [KPa]  
 $n$ .....Lastwechselzahl [LW]

Das Energieverhältnisverlauf erlebt eine Änderung bei einer Lastwechselzahl, die einer Steifigkeitsabminderung von ungefähr 40 % entspricht. Es wird angenommen, dass bei dieser Lastwechselzahl ein scharfer Riss entsteht.<sup>105</sup>

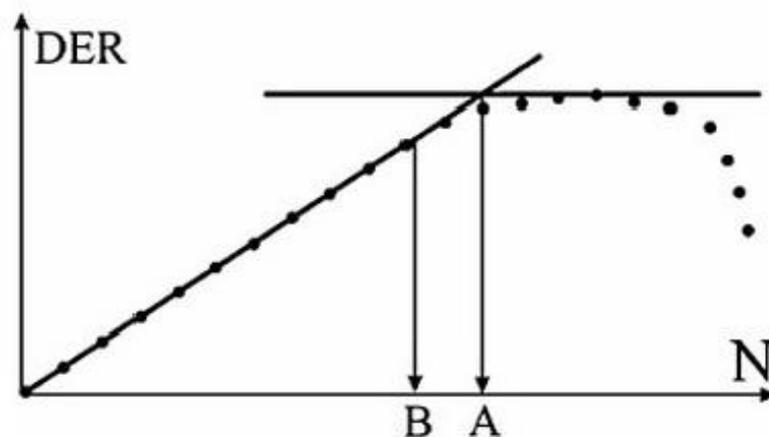
Das Energieverhältnis  $n * \left( \frac{w_0}{w_i} \right)$  kann in einem Diagramm als Funktion der Lastwechselzahlen veranschaulicht werden [Abbildung 5-9], [Abbildung 5-10].

<sup>104</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

<sup>105</sup> Rowe, G. :Performance of Asphalt mixtures in the trapezoidal Fatigue Test.



**Abbildung 5-9: Verhältnis der dissipierten Energie als Funktion der Lastwechselzahl im weggesteuerten Versuch (Dissipated Energy Ratio –DER) nach Pronk<sup>106</sup>**



**Abbildung 5-10 Verhältnis der dissipierten Energie als Funktion der Lastwechselzahl im kraftgesteuerten Versuch (Dissipated Energy Ratio –DER) nach Pronk<sup>107</sup>**

Die Beobachtungen zeigen, dass der Übergang von Mikro- zu Makrorissbildung bei der Lastwechselzahl eintritt, wo sich der Graph von seinem geradlinignahen Verlauf abweicht. Bei dem weggesteuerten Versuch [Abbildung 5-9] fällt der Ermüdungsausfall mit dem Maximum der Kurve zusammen. Jedoch ist bei der weggesteuerten Prüfung der Ausfallpunkt auf dem Graph strittig, weil der Graph seiner ganzen Länge entlang gekrümmt ist und ein

<sup>106</sup> RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer Dordrecht Heidelberg. 2013

<sup>107</sup> RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer Dordrecht Heidelberg. 2013

geradeliniger Abschnitt ist schwer zu erkennen. Ausserdem kann das beschriebene Verfahren keine gemeinsame Kurve bei den zwei unterschiedlichen Steuerungsarten leisten. Zwei grafische Verfahren werden zu der Ermittlung des Ausfallpunktes vorgeschlagen. Bei der ersten Variante wird der Schnittpunkt (A) der zwei Tangenten [Abbildung 5-9] als Ausfallpunkt vorgeschlagen. In diesem Punkt wird jedoch die Ermüdungsbeständigkeit überwertet. Bei dem zweiten Verfahren wird als Ermüdungspunkt dieser Punkt (B) angenommen, wo der Graph von seinem geradelinigen Verlauf zu einer gekrümmten Linie übergeht. Ein Nachteil dieser grafischen Lösungen ist, dass ihre Ergebnisse subjektiv von dem Prüfer interpretiert werden können, worauf auch die Dichte der Punktmessungen und der Darstellungsmaßstab einen Einfluss ausüben. Analog wird der Übergang von Mikro- zu Makrorissbildung bei den kraftgesteuerten Versuchen gefunden [Abbildung 5-10]. Deswegen war die Entwicklung eines neuen Verfahrens notwendig, damit der Ermüdungseintritt eindeutig und objektiv festgelegt wird.<sup>108</sup>

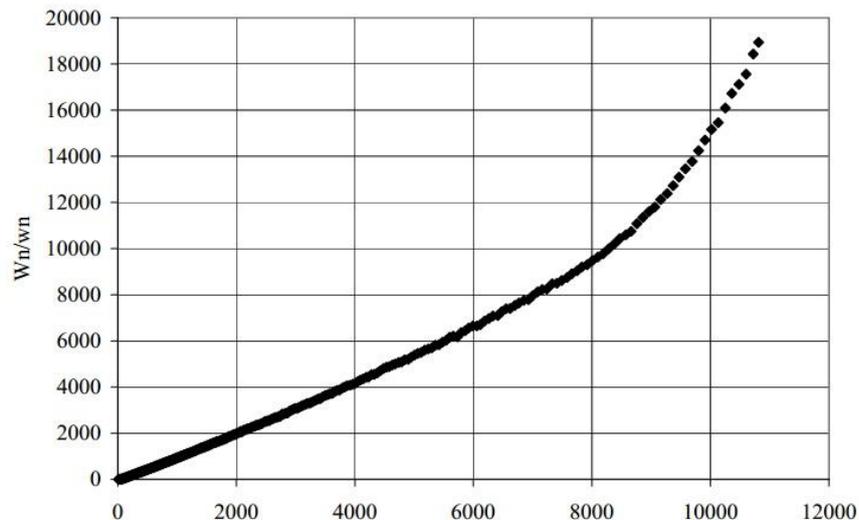
### 5.5.2 Pronk Verfahren

Später schlug Pronk eine zusätzliche Definition vor, die für die Bestimmung des Ermüdungspunktes bei dem weggesteuerten Versuch passend ist. Dabei wird die kumulative dissipierte Energie bis zum n-ten Lastwechsel ( $W_n$ ) auf die im n-ten Lastwechsel dissipierte Energie ( $w_n$ ) bezogen-  $\frac{W_n}{w_n}$ . Der Versagenspunkt wird als die Lastwechselzahl  $N_f$  definiert, wobei das Energieverhältnisverlauf auf dem Punktdiagramm von seiner geradlinigen Form abweicht. Der Graph von dem Energieverhältnis als Funktion der Lastwechsel in einem weggesteuerten Versuch ist auf der Abbildung [Abbildung 5-11] veranschaulicht.<sup>109</sup>

---

<sup>108</sup> RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer Dordrecht Heidelberg. 2013

<sup>109</sup> Harvey, J., Pais, J.: Four-Point Bending. Davis, USA. 2012.



**Abbildung 5-11 Energieverhältnis im weggesteuerten Versuch nach dem Pronk Verfahren<sup>110</sup>**

Genau so wie bei dem Pronk und Hopman Verfahren ergeben sich nach dem Pronk Verfahren zwei unterschiedliche Kurven in Abhängigkeit von der Steuerungsart. Der Punkt, in dem der geradelinige Abschnitt in eine Kurve übergeht [Abbildung 5-11] ist jedoch strittig.<sup>111</sup>

### 5.5.3 Rowe und Bouldin Verfahren

Rowe und Bouldin (2000) legten eine Gleichung fest, die sowohl für die weggeregelterte Prüfung, als auch für die kraftgesteuerte sinnvolle und leicht erkennbare Graphmaxima [Abbildung 5.12], [Abbildung 5.13] leisten. Dabei ist das Energieverhältnis als ein Produkt von der Steifigkeit  $S_i$  und der Lastwechselzahl  $n$  in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl vorgelegt<sup>112</sup>:

$$\text{Energieverhältnis} = n * S_i$$

Gleichung 5.18

<sup>110</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

<sup>111</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

<sup>112</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

Bezeichnungen:  $n$ .....Lastwechselzahl [LW]

$S_i$ .....Steifigkeitswert im Punkt  $i$  [MPa]

Diese Definition ist eigentlich eine Vereinfachung des von Pronk und Hopman definierten Energieverhältnisses. Diese Vereinfachung wird auf die Tatsache gegründet, dass in der ursprünglichen Schreibweise von Pronk und Hopman die meisten Grössen konstant sind und diese zu einer einzigen Konstante reduziert werden können. Definitionsgemäss ist die Dehnungsamplitude  $\varepsilon_i$  bei dem weggeregelten Versuch konstant. Andererseits kann die Spannungsamplitude  $\sigma_i$  durch die Dehnungsamplitude  $\varepsilon_i$  und des dynamischen Moduls  $E_i^*$  ausgedrückt werden. Rowe und Bouldin schätzen ein, dass die Phasenwinkelveränderung während des Ermüdungsversuchs viel geringer im Vergleich zu der Abminderung des dynamischen Moduls ist und das Verhältnis  $\frac{\sin\varphi_0}{\sin\varphi_i}$  zu einer Eins reduziert werden kann. Das von Pronk und Hopman festgelegte Energieverhältnis  $R_n^\varepsilon$  im weggeregelten Versuch kann folgend in die Gleichung 5.19 umformuliert werden:<sup>113</sup>

$$\begin{aligned} \text{Energieverhältnis } R_n^\varepsilon &= n * \left( \frac{W_0}{W_i} \right) = n * \left( \frac{\pi * \sigma_0 * \varepsilon_0 * \sin\varphi_0}{\pi * \sigma_i * \varepsilon_i * \sin\varphi_i} \right) = & \text{Gleichung 5.19} \\ &= n * \left( \frac{\pi * \varepsilon_0 * \varepsilon_0 * E_0^* * \sin\varphi_0}{\pi * \varepsilon_n * \varepsilon_n * E_n^* * \sin\varphi_n} \right) = \frac{n}{E_n^*} \end{aligned}$$

Die Definition des Energieverhältnisses in dem Fall einer kraftgesteuerten Beanspruchungsweise kann dann analog zu der weggesteuerten Vereinfachung umformuliert werden. Die Definition des Energieverhältnisses ist in der folgenden Gleichung 5.20 zu finden:<sup>114</sup>

$$\begin{aligned} \text{Energieverhältnis } R_n^\sigma &= n * \left( \frac{W_0}{W_i} \right) = n * \left( \frac{\pi * \sigma_0 * \varepsilon_0 * \sin\varphi_0}{\pi * \sigma_i * \varepsilon_i * \sin\varphi_i} \right) = \\ &= n * \left( \frac{\pi * \sigma_0 * \frac{\sigma_0}{E_0^*} * \sin\varphi_0}{\pi * \sigma_n * \frac{\sigma_n}{E_n^*} * \sin\varphi_n} \right) = n * E_n^* \end{aligned} \quad \text{Gleichung 5.20}$$

<sup>113</sup> Rowe, G., Bouldin M.:Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures. Presentation. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt Eurobitume Congress. Barcelona. 2000.

<sup>114</sup> Rowe, G., Bouldin M.:Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures. Presentation. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt Eurobitume Congress. Barcelona. 2000.

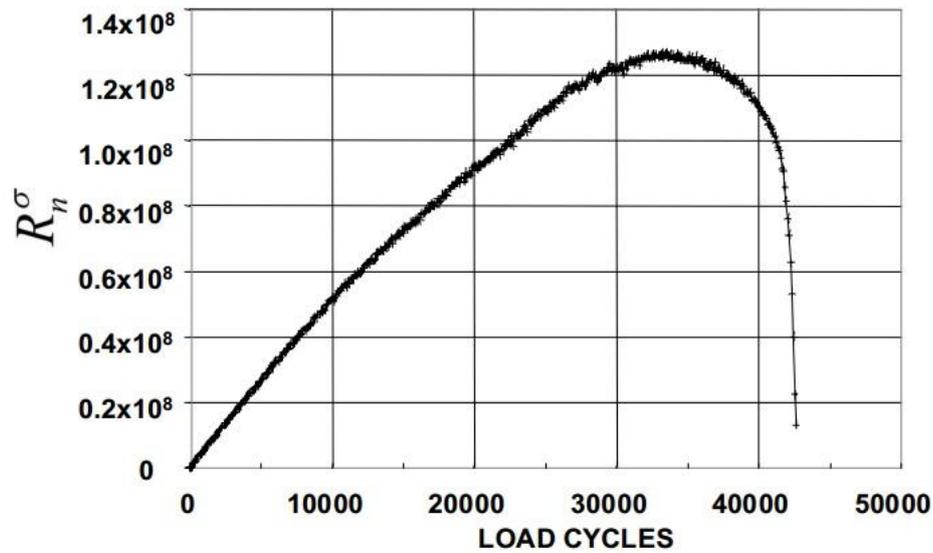


Abbildung 5-12 Darstellung des Verlaufes des Energieverhältnisses  $R_n^\sigma$  bei Kraftsteuerung nach Rowe und Bouldin<sup>115</sup>

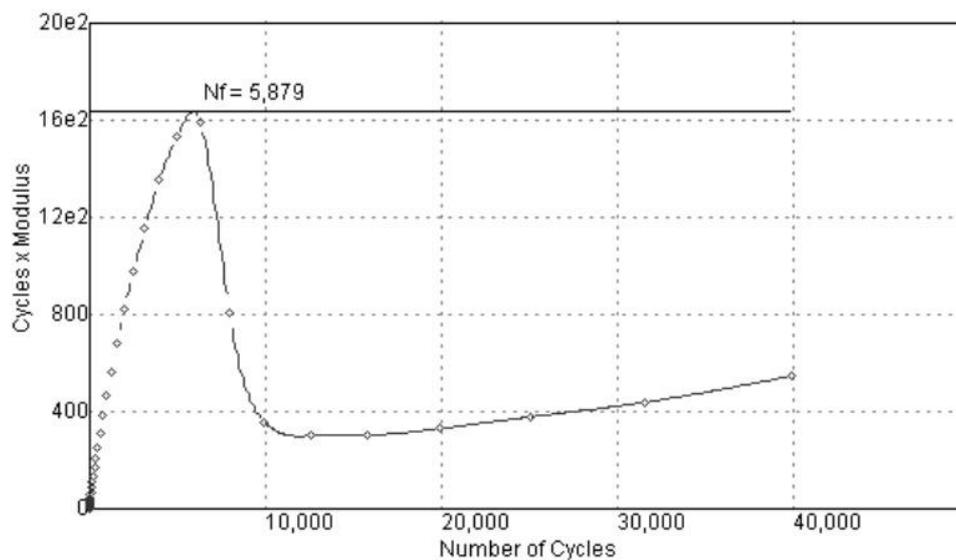


Abbildung 5-13 Darstellung des Verlaufes des Energieverhältnisses  $R_n^\epsilon$  bei Wegsteuerung nach Rowe und Bouldin<sup>116</sup>

<sup>115</sup> Rowe, G., Bouldin M.: Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures. Presentation. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt Eurobitume Congress. Barcelona. 2000.

Das Funktionsextremum in [Abbildung 5-12], [Abbildung 5-13] zeigt die Makrorissbildungslastwechselzahl und dadurch den Ermüdungsausfall sowohl bei kraft- als auch bei weggeregelten Prüfungen. Ein Vorteil dieses Konzepts ist, dass der Maximumwert von  $n * S$  durch die Anpassung eines Polynoms höher Ordnung und seiner Ableitung leicht ermittelt werden kann. Der Ermüdungsausfall wird definiert als der Punkt wo die Mikrorissbildung zu Makrorissbildung übergeht. Die Betrachtungen ergeben, dass dieser Punkt nicht mit der 50% Steifigkeitsabminderungspunkt übereinstimmt sondern zwischen 35 % und 65 % des ursprünglichen Steifigkeitsmoduls schwankt. Deswegen wird empfohlen, dass die Ermüdungsanalyse zur Ermittlung eines Probekörperversagens auf dem  $n * S$  Parameter basiert wird<sup>117</sup>.

#### 5.5.4 Ratio of Dissipated Energy Change Verfahren

Ein anderes Energieverfahren wurde 2001 von [Ghuzlan und Carpenter]<sup>118</sup> vorgeschlagen. Im Allgemeinen finden die Autoren eine Verbindung zwischen der dissipierten Energie pro Lastwechsel und der dissipierten Energie im vorherigen Lastwechsel. Während des Verlaufes einer zyklischen Prüfung verändert sich die von der Hystereseurve geschlossene Fläche, wobei sich die nachfolgenden Hystereseurven nicht mit den vorherigen überlappen [Abbildung 5-14]. Der Wert der relative Veränderung der dissipierten Energie ist direkt mit der Schadensakkumulation verbunden – je kleiner die Veränderung in der Dissipation, desto grösser die Ermüdungsbeständigkeit des Materials. Dieses Verfahren kann unabhängig von dem Belastungsmodus angewandt werden und seine Anwendung ist nicht nur mit der Untersuchung von Asphaltmischgüter begrenzt- dieses kann auch bei anderen Materialien angewandt werden.

---

<sup>116</sup> Rowe, G., Bouldin M.: Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures. Presentation. 2<sup>nd</sup> Eurasphalt Eurobitume Congress. Barcelona. 2000.

<sup>117</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

<sup>118</sup> Carpenter, S. Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Report. Department of Civil Engineering at the University of Illinois. 2007.

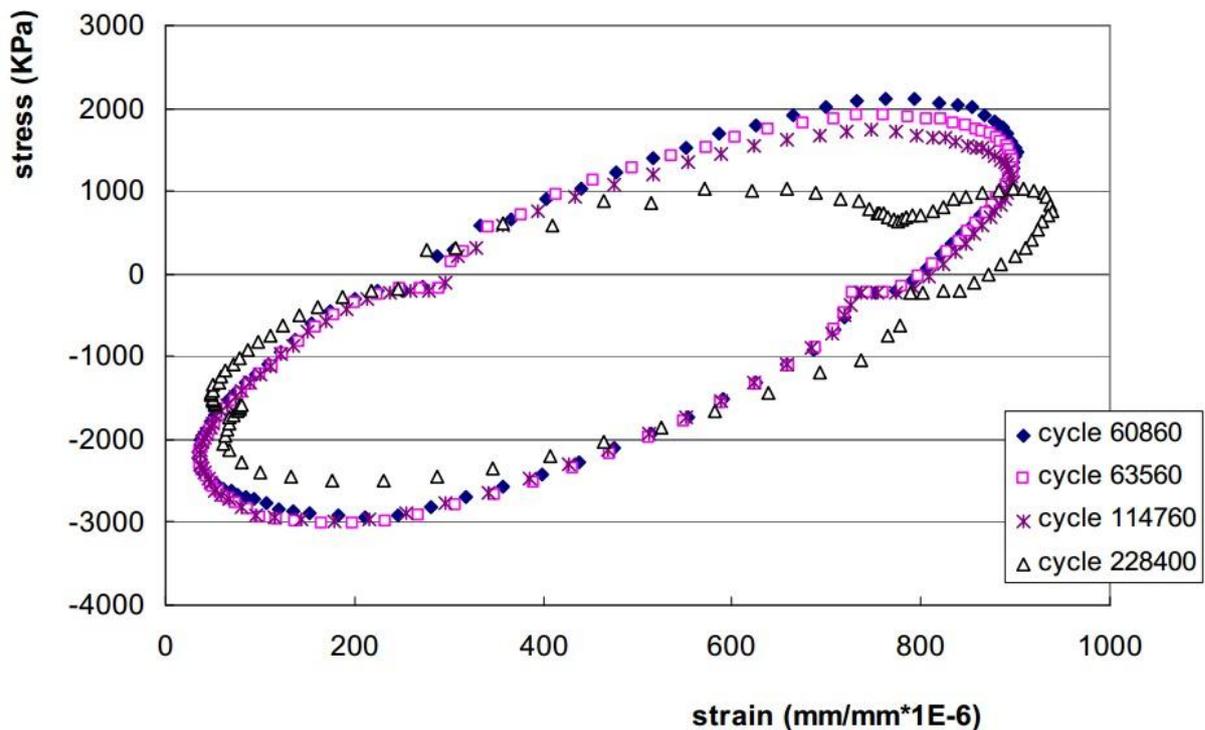


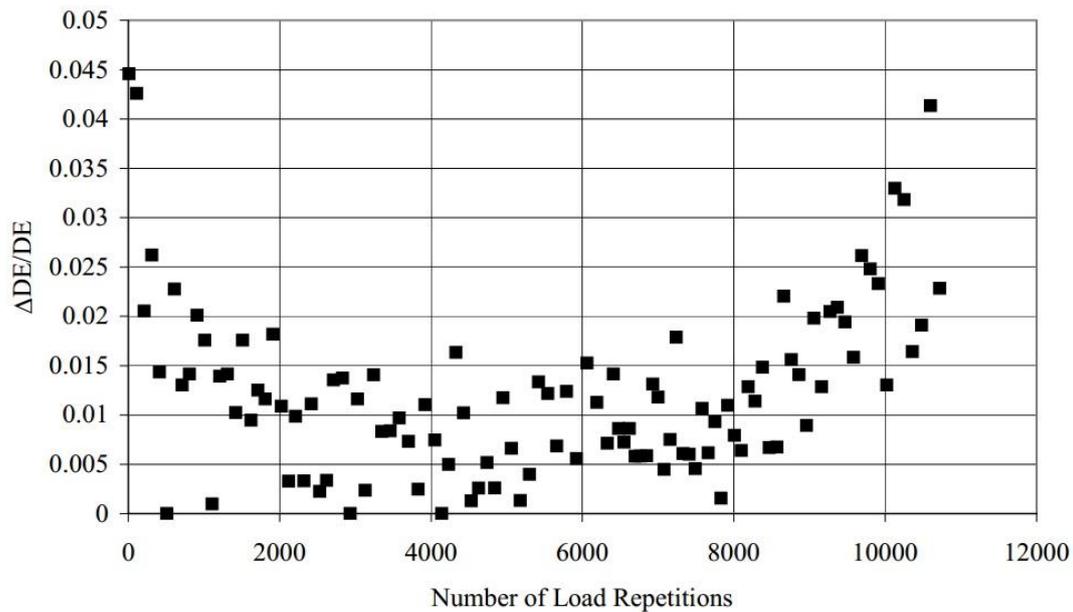
Abbildung 5-14 Hysteresekurvenveränderung<sup>119</sup>

Die relative Veränderung in der dissipierten Energie deutet die Materialbeschädigung an. Ein Ermüdungsparameter RDEC (ratio of dissipated energy change per cycle) wird eingeführt, welches die Differenz der dissipierten Energie zwischen Lastwechsel n+1 und Lastwechsel n (auch als  $\Delta DE$  bezeichnet) dividiert durch die im Lastwechsel n dissipierten Energie (DE) darstellt:

$$RDEC = \frac{DE_{n+1} - DE_n}{DE_n} = \frac{\Delta DE}{DE_n} \quad \text{Gleichung 5.21}$$

Die Beziehung  $\frac{\Delta DE}{DE}$  gegen die Lastwechselzahl n stellt den folgenden Punktdiagramm dar:

<sup>119</sup> Carpenter, S. Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Report. Department of Civil Engineering at the University of Illinois. 2007.



**Abbildung 5-15 RDEC als Funktion der Lastwechselzahlen<sup>120</sup>**

Die geschilderte Punktwolke [Abbildung 5.15] fällt am Anfang rasch, hat danach einen langen flachen Verlauf und wächst letztendlich schnell an. Die Tendenz ist nicht nur bei den kraftgeregelten, aber auch bei den weggeregelten Versuchen zu betrachten<sup>121</sup>. Eine schematische Kurvenanpassung der Punktwolke ist in [Abbildung 5.16] zu finden. Die Schadenskurve kann in drei ausgeprägten Bereichen aufgeteilt werden. Ein grosser Vorteil dieses Verfahrens ist, dass dieses Verfahren die restlichen Formen von Energiedissipation beseitigt, die keine Ermüdungsschäden verursachen - zum Beispiel der Energieanteil, der durch die Erhitzung des Probekörpers abgegeben wird. Ermüdungsschäden stammen nur von der relativen dissipierten Energiemenge, die durch jeden nachfolgenden Lastwechsel zugegeben wird. Maßgebend für die Materialermüdung ist die Untersuchung des zweiten Bereichs, wo das RDEC einen annähernd flachen Verlauf aufweist. Dieser ebene Verlauf stellt einen Zeitraum dar, in dem ein konstanter Anteil der eingegebenen Energie in Ermüdungsschaden umgewandelt wird. Das Erreichen eines Wendepunktes des RDEC-Verlaufes, wobei ein rascher Anstieg zu beobachten ist, kennzeichnet den Eintritt des Ermüdungsausfalls. Es ist auch wichtig zu bemerken, dass der konventionelle

<sup>120</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

<sup>121</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

Ausfallkriterium  $N_{f,50}$  innerhalb der ebenen RDEC–Regions liegt, aber bei den verschiedenen Prüfungen deutlich variiert.<sup>122</sup>

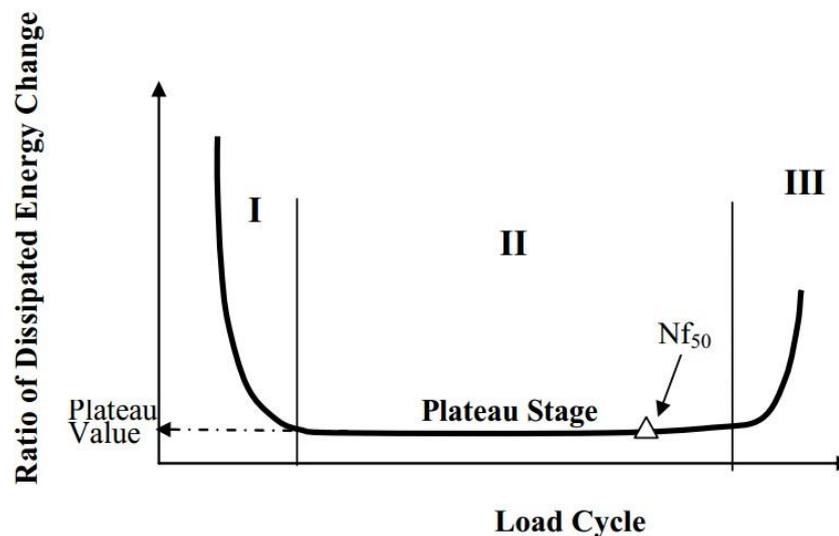


Abbildung 5-16 RDEC Phasenaufteilung<sup>123</sup>

Als Endergebnis weist die Veränderung der dissipierten Energie den Punkt auf, wo die Schadensakkumulation in dem Mischgut keine weitere Schadensaufnahme ermöglicht. Ghuzlan and Carpenter behaupten, dass die Differenz in der dissipierten Energie zwischen zwei nacheinanderfolgenden Lastwechseln genauer den Schaden pro Lastwechsel darstellt als das Verfahren der kumulativen dissipierten Energie. Jedoch kann dieses Verfahren nicht den Versagenspunkt genau und eindeutig angeben.<sup>124</sup>

### 5.5.5 Al Khateeb and Shenoy Verfahren

Al Khateeb und Shenoy schlagen ein empirisches Ermüdungskriterium, wobei keine Berechnungen zur Ermittlung des Ermüdungszustandes notwendig sind. Das Ermüdungsversagen kann direkt aus den Rohdateien eines Ermüdungsversuchs bestimmt werden. Dabei wird der Zusammenhang zwischen dem Spannungsverlauf und dem Dehnungsverlauf betrachtet. Vor der Ermüdung ist ein starker Zusammenhang zwischen der Spannung und der Dehnung als Schwingungsverläufe zu beobachten und nach dem

<sup>122</sup> Carpenter, S. Shen, Shihui: Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Report. Department of Civil Engineering at the University of Illinois. 2007.

<sup>123</sup> Pais, J., Minhoto, M., Fontes, L., Kumar, D., Silva, B.: Application of plateau value to predict fatigue life. 2<sup>nd</sup> Workshop on Four Point Bending. University of Minho. 2009.

<sup>124</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

Ermüdungseintritt stehen die beiden Verläufe nicht mehr in gegenseitiger Beziehung. Dadurch wird eine eindeutige und hochwertige Definition des Ermüdungspunktes definiert. Der Punkt des Ermüdungseintritts ist durch die Verschlechterung der Spannungs-Dehnungs Hystereseurve (hysteresis loop) als eine Distorsion zu erkennen- die Form der Kurve weicht sich von der ursprünglichen ovalen Form ab. Dieses Phänomen wird durch die Vermehrung der Mikrorisse begründet – die Verbreitung der Mikrorisse verursacht Fehlstellen in dem ursprünglichen Spannungsverlauf. Deswegen verzerrt sich die Spannungsantwort und dadurch auch die Form der Hystereseurve. Der Verlauf einer Hystereseverzerrung ist in [Abbildung 5.17] zu beobachten.<sup>125</sup>

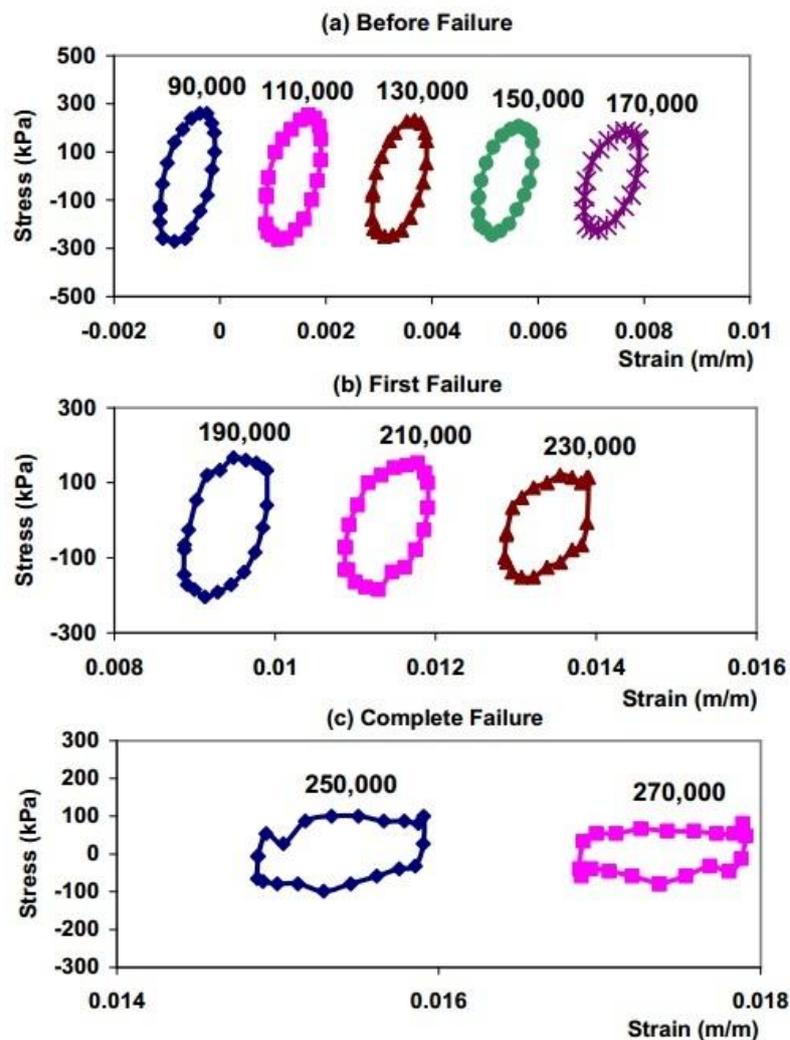


Abbildung 5-17 Hysteresekurvenverschlechterung<sup>126</sup>

<sup>125</sup> Al-Khateeb, G., Shenoy, A.: A Distinctive Failure Criterion. Journal of the AAPT. 2004.

<sup>126</sup> Al-Khateeb, G., Shenoy, A.: A Distinctive Failure Criterion. Journal of the AAPT. 2004.

Zu Beginn der Prüfung ist die Hystereseverformung kaum zu bemerken. Jedoch knickt sich die Hysterese zuerst leicht durch die fortschreitende Ermüdung. Als erster Ermüdungspunkt wird die Lastwechselzahl definiert, bei der die ursprüngliche elliptische Form der Hysteresekurve erste Verzerrungen erfährt. Die so deformierte Form der Hysterese bleibt relativ lang erhalten, bis diese endlich eine unregelmässige Form einnimmt – in diesem Punkt wird die vollständige Ermüdung und das Materialversagen erreicht<sup>127</sup>.

Obwohl die von Al Khateeb und Shenoy gesammelten Ermüdungsdateien nur aus weggeregelten Ermüdungsprüfungen im 4PBB stammen, ist das Konzept dieses Ermüdungskriteriums nicht nur auf den 4PBB begrenzt und kann bei Ermüdungsprüfungen mit unterschiedlichen Anordnungen beantragt werden. Quantitativ wird der Ermüdungspunkt mittels des  $R^2$  Wertes beschrieben. Der erste Indikator eines Ermüdungsbruchs ist die rasche Herabsetzung des  $R^2$  Wertes. Letztendlich als der  $R^2$  den Nullwert erreicht, ist auch die vollständige Ermüdung erreicht.<sup>128</sup>

---

<sup>127</sup> Al-Khateeb, G., Shenoy,A.: A Distinctive Failure Criterion. Journal of the AAPT. 2004.

<sup>128</sup> Abojaradeh, M.: Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013

## 6. ZUSAMMENFASSUNG

Der Trend zum Verkehrsaufkommen und die ständige Erhöhung der Beanspruchungen auf die Fahrbahnbefestigungen durch die Heraufsetzung der Achslasten stellt immer höhere Anforderungen an die verwendeten Baumaterialien. Die Erschöpfbarkeit und die Preissteigerung der Erdölderivate, sowie der Bedarf an kostengünstiger Bauweise und Infrastrukturerhaltung verlangen die Erweiterung der Gebrauchsdauer der Strassenbefestigungen. Wichtig für die effiziente Dimensionierung der Strassenkonstruktionen ist die gründliche Untersuchung des Materialverhaltens und der Materialparameter der eingebauten Stoffe. Dadurch können die Asphaltmischgutparameter optimiert werden und die Lebensdauer erweitert und prognostiziert werden. Die herkömmlichen Bindemittel- und Asphaltprüfungen reichen nicht aus zu der praxisgerechten Voraussage der mechanischen Eigenschaften von den eingebauten Asphaltmischgüter. Es wurden in den letzten Jahrzehnten eine Reihe neuer Prüfmethode zur Untersuchung des Gebrauchsverhaltens von Asphalt und zur Optimierung der Materialienzusammensetzung entwickelt, die in in der Mitte der 1990er Jahren im Rahmen der EN 12697-xx zusammengefasst und zu Beginn der 2000er Jahren in ihren aktuellen Form herausgegeben wurden. Diese Prüfverfahren geben die in situ verursachten Verkehrs- und Klimaeinwirkungen möglichst realitätsnah in Laborbedingungen wieder. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Literaturübersicht der Asphaltermüdung mithilfe der 4-Punkt Biegeprüfung gemäss EN 12697-24.

Der Asphalt ist ein Verbundbaustoff, der sich aus Gesteinskörnung, Bitumen, Hohlraumgehalt und Zusatzmittel zusammensetzt. Sein Verhalten ist komplex, temperatur- und umgebungsempfindlich und wird grundsätzlich von den Eigenschaften von dem Bindemittel vorbestimmt. Zu der vereinfachten Analyse seines Ermüdungsverhaltens wird Asphalt als linear viskoelastischer Stoff in dem Bereich kleiner Dehnungen ( $100 * 10^{-6} = 10^{-4}$  m/m für Asphaltmischungen und  $10^{-2}$  m/m für Bitumen) betrachtet, obwohl tatsächlich sein Verhalten auch rein elastische, plastische, viskose und viskoplastische Anteile einschließt.

Die Asphaltermüdung ist ein Prozess, der von der viskoelastischen Natur von Asphalt vorbestimmt wird. Die kontinuierliche Beanspruchung von dem Verkehr verursacht in dem Asphaltmischgut Zugdehnungen, die sich wegen der unzureichenden Lastpausen nicht vollständig abbauen können und deren Akkumulation in einer Makrorissinitiierung und -verbreitung übergeht. Als Folge wird die gesamte Strassenkonstruktion durch das von der

Oberfläche eindringende Wasser schrittweise geschädigt und die Fahrsicherheit und der Fahrkomfort werden durch die Oberflächenschaden beeinträchtigt.

Eine Reihe von Parameter beeinflussen den Verlauf der Asphaltermüdung unter Labor Bedingungen. Die wichtigsten davon sind der Belastungsmodus, die Lastpausen und die Mischgutparameter. Der Belastungsmodus ist von größeren Bedeutung. Zweckmässig für die Untersuchung von dem Ermüdungsverhalten von Asphalt ist das Ersetzen der Wechselversuche durch Schwellversuche, wobei der Einfluss von Temperatureinwirkungen berücksichtigt wird und das Ermüdungsverhalten von Asphalt realitätsnäher beschrieben wird. Man unterteilt die Versuchssteuerung in Kraftsteuerung und Wegsteuerung. Bei der Kraftsteuerung wird die Belastungsamplitude im Laufe der Prüfung konstant– die Dehnungen im Probekörper nehmen an, bis der Probekörper zum Bruch kommt. Bei der Wegsteuerung wird eine Wegamplitude vorgegeben, wodurch der Probekörper im Laufe des Versuchs beansprucht wird. Die Spannungen im Probekörper nehmen ab und ein Probekörperversagen wird nicht erreicht. Die Kraftsteuerung wird bei solchen Asphaltmischgüter angewandt, die in stärkeren Asphaltsschichten eingebaut werden und umgekehrt- die Wegsteuerung ist passend für die Untersuchung von dünneren Asphaltsschichten. Die Lastpausen bilden die Ruhezeit zwischen den in situ durch Verkehr aufgebrachten Achslasten ab, in der das Asphaltmischgut sich von den erzeugten Spannungen entspannen lässt. Die für die Ermüdungsprüfung zugeordneten Lastpausen werden mit Rücksicht auf die Verkehrsgeschwindigkeit und die Asphaltsschichtstärke gewählt. Durch die Lastpausen wird die Ermüdungsdauer des Asphaltmischguts erweitert.

Einige Mischgutparameter beeinflussen stark das Ermüdungsverhalten von Asphalt. Die eingesetzte Bitumensorte wirkt sich stark auf die Ermüdungsdauer aus– Mischgüter mit weicheren Bitumensorten (höher Penetrationsindex) und polymermodifizierten Bitumen weisen eine längere Ermüdungsdauer auf. Zu der Erhöhung der Ermüdungsresistenz wird der Einsatz von möglichst verformbarem (niedriger komplexer Schubmodul  $G^*$ ) und zugleich elastischem (niedriger Phasenwinkel  $\delta$ ) Bitumen empfohlen. Der höhere Bitumengehalt begünstigt die Ermüdungsresistenz so, dass die Körnerumhüllung in dem Asphaltmischgut stärker wird, und dadurch die entstandenen Zugkräfte, verteilt auf grössere Bindemittelfläche, niedrige Spannungswerte verursachen und eine höhere Spannungsakkumulation bis zur Rissentstehung zulassen. Die Verringerung des Porenanteil trägt auch zur Verminderung der Zugspannungen im Asphalt bei, durch die Homogenisierung des Mischguts (Luftporen übertragen keine Zugspannungen). Sowohl die Zuschlagseigenschaften betroffen werden, wird die Einsetzung von gebrochenen Körner empfohlen, deren kantige Oberfläche eine bessere Verzahnung zwischen den Körner und eine bessere Oberflächenverbundenheit mit dem Bindemittel leistet.

Die Ermüdungsprüfungen von Asphaltmischgüter dienen zu der Beurteilung von dem Ermüdungsverhalten und zu der Einstufung von Asphalt nach seiner Ermüdungsbeständigkeit. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Ermüdungsverhalten mittels des 4-Punkt Biegeversuchs behandelt. Bei dieser Prüfungsanordnung werden schlanke prismatische Asphaltprobekörper mit rechteckigem Querschnitt in den Endpunkten und in den Drittpunkten durch Klemmen gehalten. Die Klemmen werden in der Prüfmaschine so gelagert, dass bei der Aufbringung der Belastung auf die zwei inneren Klemmen ein konstantes Biegemoment zwischen diesen herrscht. Als Maß für die Ermüdungsbeständigkeit dient der komplexe Steifigkeitsmodul  $S$ , der als Funktion von der gemessenen Durchbiegung in dem Mittelpunkt des Balkens, der Probekörperabmessungen und der voreingestellten Kraft- bzw. Wegamplitude abgeleitet wird. Durch die Ermüdungslastwechselzahlen (bei verschiedenen Belastungsamplituden) der geprüften Probekörper eines Mischguts, wird letztendlich durch eine Regression der Kategorisierungswerte der Ermüdungsbeständigkeit des geprüften Mischguts ermittelt.

Die ursprünglichen phänomenologischen Kriterien zu der Ermittlung des Ermüdungseintritts beruhen auf die Kraftabminderung durch 50% (im Fall von Wegsteuerung) bzw. auf die Verdoppelung der Durchbiegung (im Fall von Kraftsteuerung). Als konventionelles Kriterium für den Ermüdungseintritt, worauf auch die laufende harmonisierte Norm EN 12697-24 sich stützt, dient die Abnahme der komplexen Steifigkeit  $S$  auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes  $S_{mix,0}$ . Die 50% Kriterien sind willkürlich aufgestellt und theoretisch unbegründet. Daraus stammt die Notwendigkeit auf die Suche nach Alternativen zu der Untersuchung und Einschätzung der Ermüdungsresistenz.

Ein alternatives Konzept, gegründet auf die Energiedissipation in dem Probekörper während der Ermüdungsprüfung, leistet analytisch begründeten Kriterien zu der Beurteilung des Ermüdungsbeständigkeit von Asphalt. Als Maß zu der Beschreibung des Ermüdungsverlaufs dient die im Probekörper dissipierte Energie, deren Verlaufsänderung auf die Schadensakkumulation im Probekörper durch Rissbildung und entsprechend auf die Materialermüdung hinweist. Die dissipierte Energie ist eine Funktion der von der Prüfeinrichtung gemessenen Dehnungsamplitude, komplexen Steifigkeit und Phasenwinkels. Vorteilhaft findet dieses Konzept Anwendung bei verschiedenen Versuchsanordnungen und wird nicht nur auf die 4-Punkt Biegeprüfung begrenzt. Die Ergebnisdateien sind jedoch je nach Versuchssteuerung getrennt zu interpretieren- die dissipierte Energie nimmt bei Kraftregelung zu, und bei Wegregelung ab. Als Ermüdungskriterien bei der Beantragung des Energiedissipationskonzeptes dienen die Punkten in den Graphen der Energiedissipationsverläufe, wo eine drastische Änderung des Verlaufes zu beobachten ist. Verschiedene Forscher schlagen unterschiedliche Schreibweisen des

Energiedissipationverlaufes vor, mit dem Ziel möglichst leicht erkennbare Energieverlaufsänderungspunkte zu erhalten.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- [Abojaradeh, M] Development of Fatigue Failure Criterion for Hot-Mix Asphalt Based on Dissipated Energy and Stiffness Ratio. Jordan Journal of Civil Engineering. Volume 7, No. 1. 2013
- [Airey, G] Viscoelastic linearity limits for bituminous materials. 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Zürich. 2003
- [Al-Khateeb, G. 2004] A Distinctive Failure Criterion. Journal of the AAPT. 2004.
- [Anrade J., 1984] Zum Einfluss des ermüdungsbedingten Steifigkeitsabfalls von Asphalt auf die Beanspruchung und Nutzungsdauer von Fahrbahnschichten. Dissertation
- [Arand W, 2004] Zur Prüftechnischen Ansprache der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten – Teil 2. Bitumen Magazin Heft 2, 1855.2004
- [Arand W, 1996] Funktionelle Anforderungen an Bitumen und Asphalt – Prüftechnische Ansprache des Verformungswiderstandes, der Rissresistenz und der Ermüdungsbeständigkeit von Asphalten. Bitumen Magazin Heft 3, 1715. 1996
- [Benedetto H 2003] Fatigue of bituminous mixtures: Different Approaches and RILEM group contribution, Zürich Symposium
- [Bertram, A, 2006] Vorlesungsmanuskript zur Festigkeitslehre. Otto von Guericke Universität Magdeburg.2006.
- [Blab R, 2001] Analytische Methoden zur Modellierung der Verformungseigenschaften flexibler Fahrbahnaufbauten, Mitteilungen des Instituts für Verkehrswissenschaften. Wien.2001
- [Campbell, C, 2002] Die Erschöpfung der Welterdölereserven. Presentation. TU Clausthal. 2002.
- [Carpenter, S, 2007] Dissipated Energy Concepts for HMA Performance: Fatigue and Healing. Department of Civil and Environmental Engineering – University of Illinois. COE Report №29. 2007.
- [Emery, John] Evaluation and Mitigation of Asphalt Pavement Top-Down Cracking. 2006 Annual Conference of the transportation Assosiation of Canada.
- [Diefenderfer S, 2009] Investigation of Fatigue Properties of Superpave HMA at the Virginia Smart Road. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University
- [Hartman, A,2004] Development of a Four-Point Bend Test System for Bituminous Mixtures. Artikel. Journal of Materials in Civil Engineering, 16 (1): 60-68. 2004.
- [Harvey, J, 1995] Fatigue Performance of Asphalt Concrete Mixes and its Relationship to Asphalt Concrete Pavement Performance in California. Report. University of California, Berkley. 1995.
- [Harvey, J] Four-Point Bending. Davis, USA. 2012.
- [Hauser E, 2009] Funktionale Charakterisierung von Asphalt , Mitteilungen des Instituts für Verkehrswissenschaften. TU Wien.2009.
- [Hofko B, 2011] Beiträge zur Beschreibung des Verhaltens von Asphalt unter Zyklisch-Dynamischer Druckschwellbeanspruchung. Dissertation. Wien. 2011.
- [Huang, Y, 2004] Pavement Analysis and Design, Second Edition. University of Kentucky. 2004
- [Kappl K, 2007] Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von Zyklischen Triaxialversuchen. Dissertation. Institut für Strassenbau und Strassenerhaltung an der TU Wien. 2007.
- [Kappl K, 2009] Prüftechnische Grundlagen Gebrauchsverhaltensorientierter

- 
- Asphaltprüfungen. Funktionale Charakterisierung von Asphalt. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2009
- [Litzka J, 1998] Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung. Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 1998
- [Lorenzl H, 2003] Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen. Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.
- [Madzlan, N, 2011] The Effect of Fine Aggregate Properties on the Fatigue Behaviour of the Conventional and Polymer Modified Bituminous Mixtures Using Two Types of Sand as fine Aggregate. Article. World Academy of Science, Engineering and Technology 58. 2011
- [Mezger, T, 2006] The Rheology Handbook for users of rotational and oscillatory rheometers. 2nd edition. Hannover. 2006
- [Miao-Miao, Y] Ratio of Dissipated Energy Change-based Failure Criteria of Asphalt Mixtures. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013
- [Monismith, C, 1990] Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures. University of California. Berkeley. 1990.
- [Olard, F, 2003] Linear Viscoelastic Properties of Bituminous Binders and Mixtures at Low and Intermediate Temperatures. Road Materials and Pavement Design. 2003
- [Pais, J, 2009] Application of plateau value to predict fatigue life. 2nd Workshop on Four Point Bending. University of Minho. 2009.
- [Pais, J] Proceedings of the Third Conference on Four-Point Bending. Davis, USA. 2012
- [Pronk, A] Four Point Bending From Theory to Practice and Standards. 2nd European 4PB Workshop. University of Minho. 2009.
- [Read, J. , 2006] The Shell Bitumen Handbook 5<sup>th</sup> edition. London. 2003
- [Reyes-Oritz, O. 2012] Efecto del Criterio de Fallo Sobre la Prediccion de la Respuesta a Fatiga en Laboratorio de Mezclas Asfalticas. Publikation. Universidad Nacional de Colombia. 2012
- [Rahimzadeh, B, 2002] Linear and Non-Linear Viscoelastic Behaviour of Binders and Asphalts. Dissertation. University of Nottingham. 2002.
- [Romanoschi ,S. 2006] Reselient Modulus and the Fatigue Properties of Kansas Hot Mix Asphalt Mixes. Kansas Department of Transportation. Final Report. 2006.
- [Rowe, G] Performance of Asphalt mixtures in the trapezoidal Fatigue Test. Improved Techniques to Evaluate the Fatigue Resistance of Asphaltic Mixtures. Presentation. 2nd Eurasphalt Eurobitume Congress. Barcelona. 2000.
- [Silva, H] Comparison Between Tensile, Stiffness and Fatigue Life Test Results
- [Schindler, K. 2008] Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung. Dissertation. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. 2008.
- [Soenen, H] Predict Mix Fatigue Tests from Binder Fatigue Properties, measured with a DSR.
- [Weise, C, 2012] Auswirkungen von Lastpausen und Heilung auf die Ermüdungseigenschaften von Asphaltgemischen. Gestrata Journal. 2012
- [Wistuba M., 1996] Klimaeinflüsse auf Asphaltstrassen, Mitteilungen des Instituts für Strassenbau und Strassenerhaltung. Wien. 2003
- [Xiao, Shangzhi] Investigation of Performance Parameters for Hot-Mix Asphalt. Dissertation. Purdue University, Indiana, USA. 2006. National Highway Institute Course №131053: Superpave Fundamentals, Reference Manual. Federal Highway
-

Administration. U.S. Department of Transportation  
RILEM State-of-the-Art Reports: Advances in Interlaboratory  
Testing and Evaluation of Bituminous Materials. Springer  
Dordrecht Heidelberg. 2013

**Normen:**

EN 12697-24

EN 12697-26

EN 13108-1

Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung

Prüfverfahren für Heissasphalt – Teil 26: Steifigkeit

Asphaltnischgut – Mischgutanforderungen, Teil 1: Asphaltbeton

**www:**

Pavement Interactive (2013): Flexural Fatigue. Abgerufen am 12.09.2013:

<http://www.pavementinteractive.org/article/flexural-fatigue/>

Wikipedia: Rheologisches Modell. Abgerufen am 10.07.2013:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Burgers-Modell#Viskoelastizit.C3.A4t>

University of Aberdeen. Abgerufen am 27.10.2013

<http://www.abdn.ac.uk/somc/dmta.hti>Pavement Worktips – no. 17. June 1999: Air Voids in Asphalt. Abgerufen  
am 02.11.2013:[http://aapa.asn.au/cms\\_files/worktips17.pdf](http://aapa.asn.au/cms_files/worktips17.pdf)Analyse der Eigenschaften von DMS-Messstellen auf Holz. Abgerufen am  
25.09.2013:<http://www.hbm.com/de/menu/anwendungen/technische-fachartikel/technische-fachartikel-details/datum/2008/08/27/analyse-der-eigenschaften-von-dms-messstellen-auf-holz-12/>

Wikipedia: Balkentheorie. Abgerufen am 19.10.2013:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Balkentheorie>

## 8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Aufteilung auf reversible und irreversible Verformungsanteile in Asphaltbefestigungen und die daraus langfristig entstehende Schädigung .....	7
Abbildung 2-2:	Asphalt und Bitumenverhalten in den verschiedenen Temperaturbereiche .....	8
Abbildung 2-3	Zwei-Platten Modell .....	9
Abbildung 2-4	Federmodell für idealelastischen Substanzen.....	10
Abbildung 2-5	Dämpfermodell für idealviskose Substanzen .....	11
Abbildung 2-6:	Rein Viskoses Verhalten .....	12
Abbildung 2-7:	Maxwell Modell .....	13
Abbildung 2-8:	Kelvin-Voigt Modell.....	13
Abbildung 2-9:	Burgersmodell.....	14
Abbildung 2-10:	Viskoelastisches Verhalten, Spannungs- und Dehnungsverlauf.....	15
Abbildung 2-11	Aufteilung des dynamischen E-Moduls in elastischen und viskosen Anteil .....	18
Abbildung 2-12:	Schematische Darstellung der wesentlichen Gebrauchsverhalten und die korrespondierenden Laborprüfmethode .....	20
Abbildung 3-1:	Ertragbare Lastwechselzahlen nach Saal und Pell .....	24
Abbildung 3-2:	Kraftgeregelte und weggeregelte Wechsel- und Schwellversuchsanordnungen .....	25
Abbildung 3-3	Lastimpulstypen.....	26
Abbildung 3-4	Zusammenhang von der Belastungsperiode und der Schichtstärke.....	28
Abbildung 3-5	Vergleich der Bindemitteldehnung $\epsilon_6$ und der Asphaltmischgutdehnung $\epsilon_6$ .....	29
Abbildung 3-6	Einfluss des Porengehaltes an die Ermüdungsdauer .....	31
Abbildung 3-7	Einfluss von Bitumenanteil und Porenanteil auf die Ermüdungsdauer in einer Vierpunkt Biegeprüfung .....	32
Abbildung 3-8	Feinkornauswirkung auf die Ermüdungsdauer.....	34
Abbildung 4-1:	Aufbauskizze des Vierpunkt-Biegeversuchs .....	36
Abbildung 4-2:	Ermüdungsverlauf eines Probekörpers (E482C) aus AC 32 binder PmB 45/80 RA10 (Projektnummer 12418).....	44
Abbildung 4-3:	Wöhlerkurve von AC 22 binder PmB 45/80-65 (Projekt 12418).....	45
Abbildung 5-1:	Vereinfachte Darstellung der Grenzlinie im Bereich Zwischen axialem Druck und axialem Zug .....	48
Abbildung 5-2:	Leon'sche Parabel – Grenzkurven: links für Schubbruch ohne Möglichkeit des Trennbruchs ( $1 \leq c \leq 3$ ); rechts mit Möglichkeit des Trennbruchs ( $c \geq 3$ ) .....	49

---

Abbildung 5-3	Kraftabminderung im weggeregelten Versuch .....	52
Abbildung 5-4	Anstieg der Dehnungsamplitude im kraftgeregelten Versuch .....	52
Abbildung 5-5	Belastung und Materialantwort – Hysteresekurve zur Bestimmung der Steifigkeitsmodulneigung pro Lastwechsel .....	53
Abbildung 5-6	Steifigkeitsverlauf nach dem Schadensausfallskriterium .....	54
Abbildung 5-7	Kraftverlauf bei dem Bruchversagenskriterium .....	55
Abbildung 5-8	Dissipierte Energie im weg- und kraftgesteuertem 4PBB Versuch .....	57
Abbildung 5-9:	Verhältnis der dissipierten Energie als Funktion der Lastwechselzahl im weggesteuerten Versuch (Dissipated Energy Ratio –DER) nach Pronk .....	60
Abbildung 5-10	Verhältnis der dissipierten Energie als Funktion der Lastwechselzahl im kraftgesteuerten Versuch (Dissipated Energy Ratio –DER) nach Pronk .....	60
Abbildung 5-11	Energieverhältnis im weggesteuerten Versuch nach dem Pronk Verfahren.....	62
Abbildung 5-12	Darstellung des Verlaufes des Energieverhältnisses $Rn\sigma$ bei Kraftsteuerung nach Rowe und Bouldin.....	64
Abbildung 5-13	Darstellung des Verlaufes des Energieverhältnisses $Rn\varepsilon$ bei Wegsteuerung nach Rowe und Bouldin.....	64
Abbildung 5-14	Hysteresekurvenveränderung.....	66
Abbildung 5-15	RDEC als Funktion der Lastwechselzahlen .....	67
Abbildung 5-16	RDEC Phasenaufteilung.....	68
Abbildung 5-17	Hysteresekurveverschlechterung .....	69

## 9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1	Deformation und Spannung im Federmodell:.....	10
Tabelle 2-2	Deformation und Spannung im Dämpfermodell .....	11
Tabelle 3-1	Auswirkung der Beanspruchungsart auf den Ermüdungsprozess .....	23
Tabelle 3-2	Vergleich der Ermüdungsdauer von Bruchsteinasphaltgemische bei dem Einsatz unterschiedlicher Bindemittelsorten im 4PBB .....	29
Tabelle 3-3	Vergleich der Ermüdungsdauer bei dem Einsatz von Brechstein und ungebrochenem Gestein aus Schottergrube.....	33
Tabelle 4-1:	Kategorien der Ermüdungsbeständigkeit .....	45