

Energetische Schädigungsanalyse der Betonermüdung

Matthias Bode¹, Steffen Marx¹

¹*Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland*

KURZFASSUNG:

Aufgrund des visko-elasto-plastischen Materialverhaltens wird während Ermüdungsversuchen die den Betonprobekörpern zugeführte Energie in eine andere Energieform umgewandelt. Neben der Beschreibung des energetischen Materialverhaltens von Beton werden in diesem Beitrag die elastischen und plastischen Energieanteile sowie der Anteil der Dissipationsenergie von Beton unter Ermüdungsbeanspruchungen ausgewertet. Dabei zeigt insbesondere die Dissipationsenergie einen deutlichen Zusammenhang zur Schädigungsentwicklung infolge der zyklischen Beanspruchung. Mithilfe des entwickelten und auf dieser Erkenntnis aufbauenden energetischen Schädigungsmodells können während zyklischer Versuche der aktuelle Schädigungsgrad abgeschätzt sowie Schädigungsverläufe über die Versuchslaufzeit dargestellt werden. Die ersten Anwendungen des Schädigungsmodells zeigen gute und plausible Ergebnisse.

Keywords: Ermüdung, Schädigung, Dissipationsenergie, Hysterese, Erwärmung

ABSTRACT:

Due to the visco-elastoplastic material behaviour the added energy to the concrete specimens during fatigue tests is transformed into another form of energy. Besides the description of the energetic material behaviour of concrete, the elastic and the plastic part of the energy as well as the dissipation energy was analysed for different fatigue tests. Especially the dissipation energy shows a correlation to the damage process as a result of the cyclic loading. Regarding this correlation, a new energetic damage model is introduced. With this model a degree of damage during the tests and the development of the damage parameter over the load cycles can be determined. First tests of the developed model show good and plausible results.

Keywords: fatigue, damage, dissipation energy, hysteresis, warming

1 EINLEITUNG

In verschiedenen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es im Beton sowie bei anderen Materialien aufgrund von zyklisch-mechanischen Beanspruchungen zu Deformations- und Schädigungsprozessen kommt. Diese Prozesse können bis zum Versagen führen, selbst wenn die mechanischen Beanspruchungen unterhalb der Materialfestigkeiten liegen, und werden als Ermüdung bezeichnet (Marx et al. 2017).

Neben den zahlreichen untersuchten Dehnungsentwicklungen sowie der Steifigkeitsdegradation ist die während der Ermüdungsversuche auftretende Probekörpererwärmung in der Vergangenheit verstärkt in den Fokus gerückt (von der Haar et al. 2016), (Elsmeier 2015), (Bode et al. 2019a). Es konnte gezeigt werden, dass sich die Betonprobekörper in Abhängigkeit von der Spannungsamplitude, des Oberspannungsniveaus sowie der Prüffrequenz erwärmen. Auch konnte eine Korrelation zwischen der Schädigung und der Probekörpererwärmung festgestellt werden (Bode et al. 2019b).

Im Rahmen dieser Publikation wird daher zunächst das energetische Materialverhalten von Beton bei Ermüdungsuntersuchungen erläutert und anschließend Ermüdungsversuche energetisch ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die Dissipationsenergie offensichtlich im Zusammenhang mit der Schädigungsentwicklung steht. Auf Grundlage dieser Erkenntnis, wird abschließend ein energetisches Schädigungsmodell entwickelt und im Rahmen einer Versuchsserie angewendet.

2 ENERGETISCHES MATERIALVERHALTEN

Probekörpern oder auch Bauteilen wird infolge mechanischer Beanspruchung und der damit verbundenen Verformung Energie hinzugefügt. Dabei handelt es sich entsprechend um mechanische Arbeit, welche physikalisch durch das Produkt aus Kraft und Weg beschrieben wird. Der Verlauf einer Spannungs-Dehnungslinie während der Be- sowie der Entlastung beschreibt neben dem Verformungsverhalten somit auch das energetische Materialverhalten. Bei einem ideal-elastischen Materialverhalten liegen die Spannungs-Dehnungslinien des Be- und Entlastungsastes übereinander und der Bereich unter der Linie entspricht nach Wischers (1978) der elastischen Energie E_{el} (Bild 1). Liegt hingegen ein elasto-plastisches Materialverhalten vor, ist ein Teil der Verformung irreversibel, sodass der Entlastungsast der Spannungs-Dehnungslinie nicht mehr mit dem Belastungsast übereinander liegt. Während der Bereich unterhalb des Entlastungsastes weiterhin der elastischen Energie E_{el} entspricht, wird der Bereich zwischen dem Be- und dem Entlastungsast als plastische Energie E_{pl} beschrieben (Bild 2).

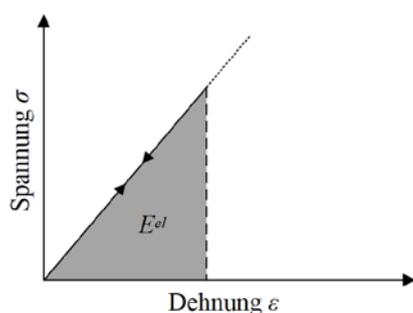


Bild 1: Elastisches Materialverhalten nach Wischers (1978)

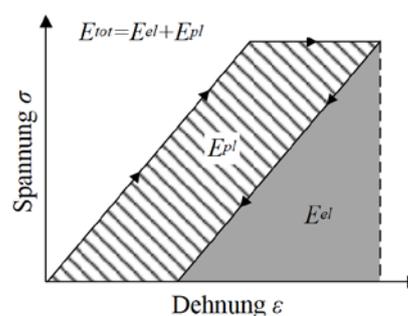


Bild 2: Elasto-plastisches Materialverhalten nach Wischers (1978)

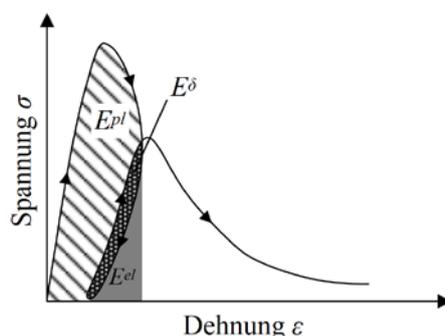


Bild 3: Verformungsverhalten von Beton nach Wischers (1978)

Neben den elastischen und plastischen Verformungsanteilen besitzt Beton zusätzlich noch ein viskoses Verformungsverhalten. Dieses viskose Verformungsverhalten wird in Bild 3 durch den zweiten Belastungszyklus ersichtlich. Dort ist die Verformung zunächst geringer als beim vorangegangenen Entlastungsast. Der eingeschlossene Bereich, die Hysterese, beschreibt mit der Dissipationsenergie E_{δ} einen weiteren Energieanteil, welcher im Folgenden näher erläutert wird.

3 DISSIPATIONSENERGIE

Bei der Dissipationsenergie handelt es sich entsprechend Bild 3 um die Energie, welche während eines Lastzyklus vom Bauteil oder Probekörper aufgenommen und umgewandelt wird. In der Literatur wird diese Energie teilweise auch als Dämpfungsenergie bezeichnet (Spooner et al. 1975). Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Hypothesen, wofür die dissipierte Energie aufgebraucht wird. Ban (1933) macht die sich über die Lastwechsel kumulierte Dissipationsenergie für die Ermüdungsschädigung verantwortlich, während Spooner et al. (1976) die dissipierte Energie der ersten Lastwechsel ebenfalls für die Schädigung und bei den nachfolgenden Lastwechseln für die Dämpfung verantwortlich machen. Eine weitere Hypothese stellt Teichen (1968) auf. Aus seinen Untersuchungen schlussfolgert er, dass ein Großteil der dissipierten Energie in Wärme umgewandelt wird. Diese Hypothese passt zu der mehrfach festgestellten Erwärmung von Betonprobekörpern infolge zyklischer Beanspruchungen (Bode et al. 2019b, Elsmeier 2015, Schneider et al. 2018). Ein Vergleich der gemessenen Probekörpertemperaturen mit einer numerischen Simulation der Wärmeentwicklung mit der Dissipationsenergie als Eingangsparameter bei von der Haar et al. (2016) zeigte sehr gute Übereinstimmungen und bestätigte somit die Hypothese von Teichen (1968).

Ferner zeigten eigene Untersuchungen (Bode et al. 2019b) eine signifikante Korrelation zwischen der Probekörpererwärmung und dem Schädigungsprozess bei Ermüdungsuntersuchungen an Betonzylindern. Diese Korrelation bezieht sich auf den Vergleich des Schädigungsprozesses mit der zeitlichen Entwicklung der Temperatur, mit der Temperaturverteilung über den Probekörper und mit der Größe der Erwärmung zu Versuchsbeginn.

Aufgrund der während der Ermüdungsuntersuchungen entstehenden Temperaturunterschiede zwischen den Probekörpern und deren Umgebung, kommt es ebenfalls zur Abgabe von thermischer Energie an die Umgebung. Da diese Wärmeabgabe von zahlreichen Randbedingungen wie der Luftzufuhr und dem Prüfmaschinenaufbau abhängig ist, wird im Folgenden nicht die Probekörpertemperatur sondern direkt der Zusammenhang zwischen der Dissipationsenergie und der Schädigung untersucht, wobei die Dissipationsenergie die von der Wärmeabgabe unabhängige Wärmeerzeugung im Probekörper beschreibt.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Versuchsprogramm

Für die zyklischen Versuche wurden 27 Betonprobekörper mit einem Durchmesser von $d = 100$ mm und einer Höhe von $h = 300$ mm hergestellt. Für den Beton wurde ein Portlandzement CEM I 52,5 R und eine quarzische Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von $d_g = 8$ mm verwendet. Die Probekörper wurden nach einem Tag ausgeschalt, anschließend für sechs Tage unter Wasser gelagert und danach unter Normbedingungen bei einer Temperatur von $T_L = 20$ °C und einer Luftfeuchtigkeit von $\rho_L = 65$ % gelagert. Nach 28 Tagen ergab sich eine Zuordnung in die Druckfestigkeitsklasse C55/67. Um während der Ermüdungsversuche Materialumwandlungen infolge der Probekörpererwärmung zu verhindern, wurden die Probekörper für mehrere Tage, beginnend nach 28 Tagen, im Trocknungsofen bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet. Nachdem die Referenzfestigkeit an weiteren Betonzylindern unmittelbar vor Beginn der zyklischen Versuche ermittelt wurde, wurden einstufige kraftgeregelt zyklische Druckschwellversuche an einer 2,5-MN-Universalprüfmaschine durchgeführt. Die Versuche wurden mit einer sinusförmigen Belastungsfunktion zwischen dem auf die Referenzfestigkeit bezogenen Oberspannungsniveau S_O und dem Unterspannungsniveau S_U mit den Prüffrequenzen $f_p = 8$ Hz und $f_p = 2$ Hz entsprechend Tab. 1 durchgeführt.

Tabelle 1: Versuchsprogramm

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_O	0,80	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60
S_U	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
f_p	8 Hz	2 Hz	8 Hz						
Anzahl	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Während die Kraft bei den Versuchen mit einem Kraftaufnehmer aufgezeichnet wurde, wurde die Probekörperverformung in Längsrichtung mit drei in Umfangsrichtung um jeweils 120° versetzten Laserdistanzsensoren aufgezeichnet. Die verwendete Messfrequenz betrug 300 Hz. Darüber hinaus wurden mit Thermoelementen des Typs T sowie mit einer Thermografiekamera die Probekörpertemperaturen aufgezeichnet.

4.2 Ergebnisse

Eine Wöhler-Darstellung mit den Bruchlastwechselzahlen ist in Bild 4 dargestellt. Insgesamt zeigen die Ergebnisse die erwartete Tendenz, dass bei größerer aufgebrachter Oberspannung die resultierenden Bruchlastwechselzahlen geringer sind. Allerdings weisen die resultierenden Bruchlastwechselzahlen der verschiedenen Oberspannungsniveaus S_O relativ große Streuungen auf. Diese Streuungen lassen sich entsprechend der Ausführungen in (Bode et al. 2019b) mit Vorschädigungen, welche durch den vorangegangenen Trocknungsprozess induziert wurden, erklären.

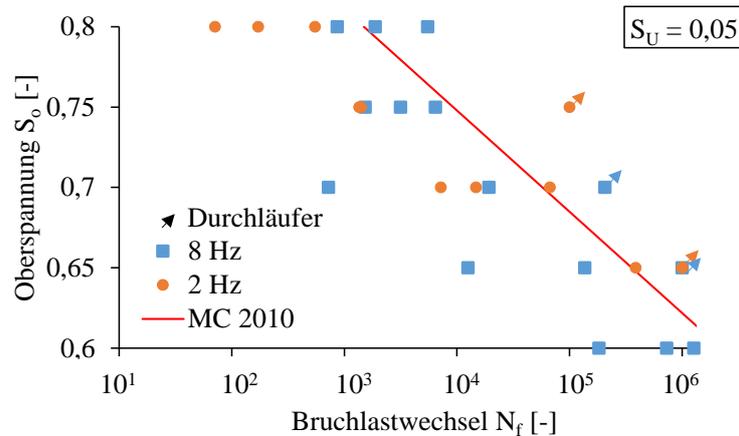


Bild 4: Wöhler-Darstellung der Bruchlastwechselzahlen

Mithilfe des in (Bode et al. 2019a) entwickelten Algorithmus wurden für die Versuche die Hystereseflächen sämtlicher Lastwechsel ausgewertet. In Bild 5 sowie Bild 6 sind die entsprechenden Dissipationsenergien je Lastwechsel E_δ für ausgewählte Probekörper bezogen auf die zur jeweiligen Bruchlastwechselzahl N_f bezogenen Lastwechselzahl N_i aufgeführt. Um eine bessere Übersicht zu erhalten, handelt es sich dabei um bereits geglättete Werte. Die Auswertung erfolgt aufgrund der bereits erläuterten Streuungen der Bruchlastwechselzahlen hier unabhängig des Oberspannungsniveaus. Stattdessen dient die erreichte Bruchlastwechselzahl zur Bewertung für die Größe der Beanspruchung. Versuche mit einer geringen Bruchlastwechselzahl wurden in Bezug auf ihre tatsächliche Druckfestigkeit offensichtlich auf einem hohen Oberspannungsniveau und Versuche mit hohen Bruchlastwechselzahlen offensichtlich auf einem geringeren Oberspannungsniveau getestet.

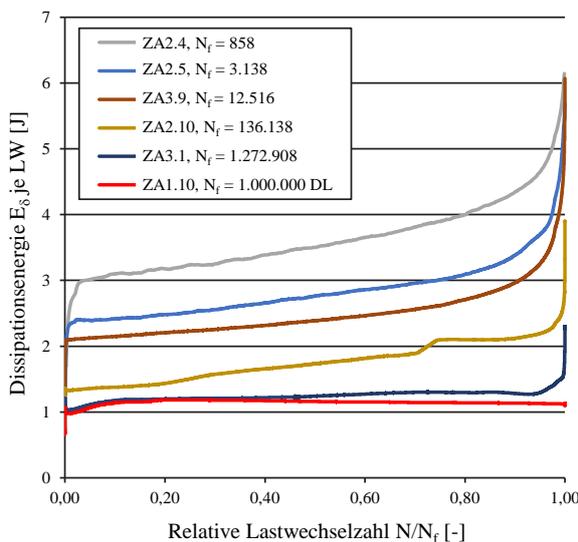


Bild 5: Dissipationsenergie E_δ je LW, $f_p = 8$ Hz

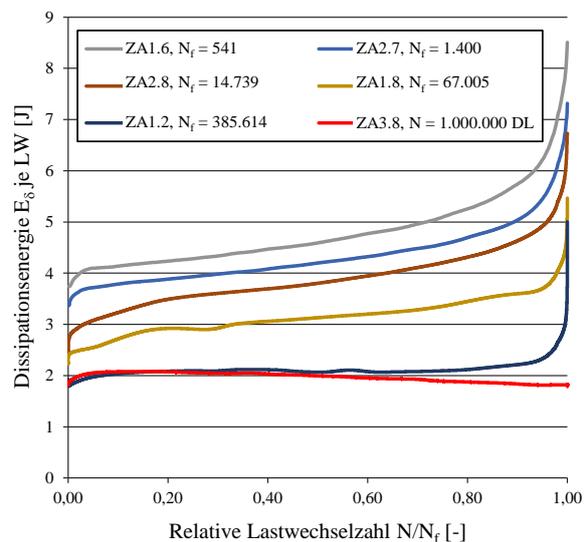


Bild 6: Dissipationsenergie E_δ je LW, $f_p = 2$ Hz

Aus den Verläufen geht hervor, dass Versuche mit größerer Dissipationsenergie je Lastwechsel E_δ sowie mit einem schnelleren Anstieg der Verläufe früher versagen als Versuche mit geringerer Dissipationsenergie. Darüber hinaus sind bei annähernd vergleichbaren Bruchlastwechselzahlen die

Werte der Versuche mit einer Prüffrequenz von $f_p = 8$ Hz geringer als für Versuche mit einer Prüffrequenz von $f_p = 2$ Hz. Der aus der Dehnungsentwicklung sowie der Steifigkeitsdegradation bekannte dreiphasige Verlauf ergibt sich auch für die Verläufe der Dissipationsenergie. Einer deutlichen Zunahme zu Beginn folgt ein linearer Verlauf in Phase 2 sowie ein überproportionaler Anstieg in Phase 3 unmittelbar vor dem Versagen des Probekörpers. Bei den Probekörpern ZA1.10 sowie ZA3.8 ist es zu keinem Versagen gekommen. Beide Versuche wurden nach einer Million Lastwechseln gestoppt. Die entsprechenden Dissipationsenergiewerte verlaufen nach einem anfänglichen Anstieg zunächst konstant und nehmen anschließend sogar ab.

Ein Vergleich der Energieanteile für drei ausgewählte Probekörper mit deutlich unterschiedlichen Bruchlastwechselzahlen in Tab. 2 zeigt die besondere Signifikanz der Dissipationsenergie. Dargestellt ist die elastische Energie E_{el} entsprechend den Erläuterungen aus Bild 1 - Bild 3, jeweils für einen Lastwechsel am Ende des Versuchs. Die plastische Energie E_{pl} entspricht dem Energieanteil, welcher sich entsprechend Bild 2 und Bild 3 in Form von irreversibler Verformung des Probekörpers darstellt. Bei den entsprechenden Werten handelt es sich um die plastische Energie über die gesamte Versuchsdauer. Darüber hinaus sind die in Bild 5 dargestellten Werte der Dissipationsenergie E_δ je Lastwechsel über die Versuchsdauer sowie die über die Versuchsdauer kumulierte Dissipationsenergie ΣE_δ aufgeführt.

Tabelle 2: Auswertung der Energieanteile für drei ausgewählte Probekörper

Probekörper	N_f [-]	S_o [-]	S_U [-]	f_p [Hz]	E_{el} [J/LW]	E_{pl} [J]	E_δ [J/LW]	ΣE_δ [J]
ZA2.4	858	0,80	0,05	8	131	82	2,0 - 6,2	3.107
ZA3.9	12.516	0,65	0,05	8	100	95	1,2 - 6,1	31.203
ZA3.1	1.272.908	0,60	0,05	8	76	68	1,0 - 2,3	1.580.455

Während die elastischen Energieanteile E_{el} mit steigender Bruchlastwechselzahl abzunehmen scheinen, ist eine solche Tendenz bei den plastischen Energieanteilen E_{pl} nicht erkennbar. Wie bereits zuvor erläutert ist die Dissipationsenergie je Lastwechsel bei Probekörpern mit geringen Bruchlastwechselzahlen größer als bei Probekörpern mit größeren Bruchlastwechselzahlen. Außerdem steigt die Dissipationsenergie je Lastwechsel über die Versuchsdauer an. Während der elastische Energieanteil E_{el} mit jeder Entlastung wieder vom Probekörper abgegeben wird und der plastische Energieanteil E_{pl} mit jedem Lastwechsel nur gering zunimmt, nimmt der Probekörper mit jedem Lastwechsel zusätzliche Dissipationsenergie auf. Entsprechend sind die Werte der kumulierten Dissipationsenergie ΣE_δ im Vergleich zu den anderen Energieanteilen deutlich größer. Probekörper mit vielen Lastwechseln nehmen über die gesamte Versuchsdauer entsprechend mehr Dissipationsenergie auf als kurzlaufende Versuche. Dieser Vergleich der Energiegrößen bestätigt die Hypothese von Teichen (1968) sowie die Ergebnisse von von der Haar (2016), dass die Dissipationsenergie für die Erwärmung der Probekörper verantwortlich ist. In Verbindung mit der bereits erläuterten Korrelation zwischen der Probekörpererwärmung und der Schädigung (Bode et al. 2019b) wird deshalb im folgenden Abschnitt die Dissipationsenergie in Bezug zur Schädigungsentwicklung analysiert.

5 ANALYSE DER DISSIPATIONSENERGIE

Zur Überprüfung, ob es eine kritische Energiemenge gibt, dessen Dissipation ein Versagen ankündigt, werden in Bild 7 für fünf ausgewählte Probekörper die Verläufe der Dissipationsenergie je Lastwechsel E_{δ} für die jeweils letzten 1.000 Lastwechsel vor dem Versagen dargestellt.

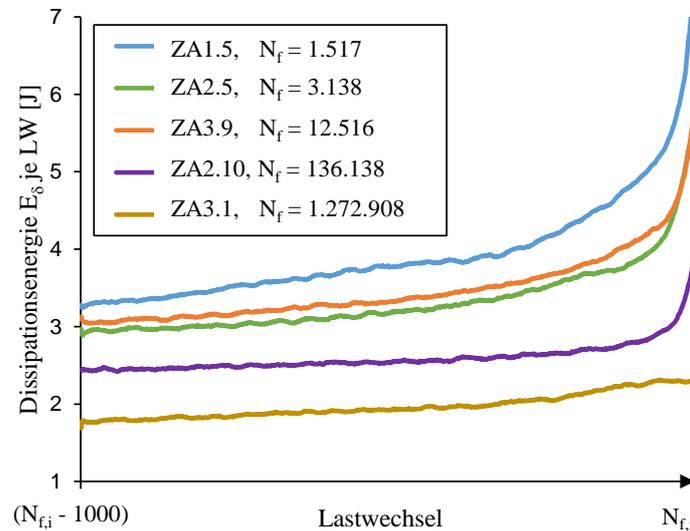


Bild 7: Verlauf der Dissipationsenergien je Lastwechsel während der letzten 1.000 Lastwechsel vor dem Versagen, $f_p = 8$ Hz

Auch unmittelbar vor dem Versuchsende sind die Werte der unterschiedlichen Versuche weder gleich noch verlaufen die Kurven parallel. Je geringer die Bruchlastwechsel, desto größer sind die Werte der Dissipationsenergie je Lastwechsel E_{δ} und desto steiler sind die Verläufe. Es kann somit weder ein kritischer Wert noch eine kritische Steigung des Verlaufs festgestellt werden, welche ein Versagen ankündigen.

Im Folgenden wird die über die Versuchslaufzeit kumulierte Dissipationsenergie ΣE_{δ} ausgewertet. In Bild 8 sind für alle Versuche mit der Prüffrequenz $f_p = 8$ Hz die kumulierten Dissipationsenergien ΣE_{δ} gegenüber den Bruchlastwechselzahlen N_f dargestellt. Es zeigt sich, dass die entsprechenden Punkte annähernd auf einer Kurve liegen. Die entsprechende Kurve wird durch die in Gl. (1) angegebene Potenzfunktion, welche über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt wurde, beschrieben und ist in Bild 9 als Versagenskurve eingezeichnet. Eine Auswertung der Versuche mit einer Prüffrequenz von $f_p = 2$ Hz zeigten einen ähnlichen funktionalen Zusammenhang. Auch hier können die Werte der kumulierten Dissipationsenergie beim Versagen der einzelnen Probekörper über eine von der Bruchlastwechselzahl abhängigen Potenzfunktion (Gl. (2)) angenähert werden. Sowohl der Koeffizient als auch der Exponent unterscheiden sich bei beiden Funktionen.

$$\Sigma E_{\delta, \text{Vers}, 8\text{Hz}}(N) = 0,0107 \text{ kJ} \cdot N^{0,844} \quad (1)$$

$$\Sigma E_{\delta, \text{Vers}, 2\text{Hz}}(N) = 0,0090 \text{ kJ} \cdot N^{0,897} \quad (2)$$

In dieser Publikation werden die weiteren Auswertungen sowie die Modellentwicklung lediglich für die Prüffrequenz $f_p = 8$ Hz dargestellt. Die Untersuchungen mit einer Prüffrequenz von $f_p = 2$ Hz führten zu gleichartigen Ergebnissen.

Wie die drei in Bild 9 dargestellten Verläufe der kumulierten Dissipationsenergie ΣE_{δ} des jeweiligen Probekörpers zeigen, liegt die kumulierte Dissipationsenergie während der Versuchslaufzeit unterhalb

der zuvor beschriebenen Versagenskurve. Erst wenn der Wert der kumulierten Dissipationsenergie dem Funktionswert der Versagenskurve für die jeweilige Lastwechselzahl entspricht, kommt es offensichtlich zum Versagen der einzelnen Probekörper.

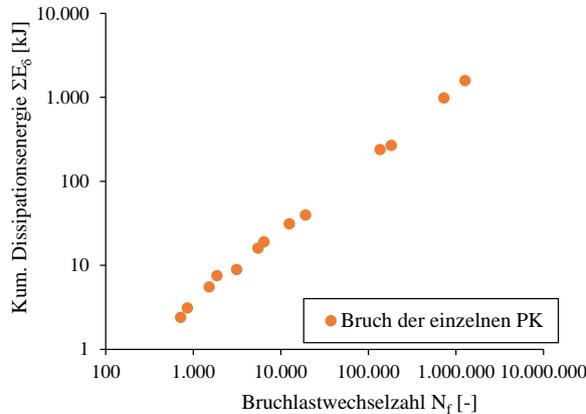


Bild 8: Kumulierte Dissipationsenergie ΣE_{δ} zum Zeitpunkt des Versagens der einzelnen Probekörper, $f_p = 8$ Hz

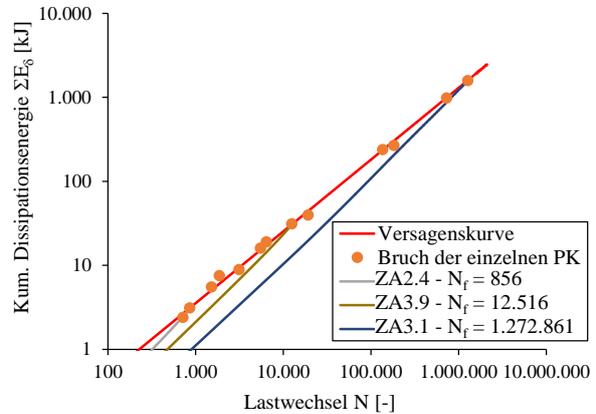


Bild 9: Resultierende „Versagenskurve“ und der Verlauf der Dissipationsenergie für drei ausgewählte Probekörper, $f_p = 8$ Hz

Da die Versagenskurve durch eine Potenzfunktion mit einem Exponenten, welcher kleiner als 1,0 ist, beschrieben wird, nimmt die Steigung mit zunehmender Lastwechselzahl ab. Dadurch ergibt sich, dass es auch bei Versuchen, bei denen der Verlauf der dissipierten Energie je Lastwechsel über die Versuchsdauer nahezu konstant ist, zu einem Versagen kommen kann. Dies zeigt auch der Verlauf in Dissipationsenergie je Lastwechsel des Probekörpers ZA3.1 in Bild 5. Die Werte verlaufen zwar konstant, trotzdem kommt es zu einem Versagen. Beim Probekörper ZA1.10 tritt hingegen kein Versagen ein, obwohl der Verlauf der Dissipationsenergie je Lastwechsel ebenfalls teilweise konstant verläuft. Auch hier zeigt sich, dass nicht direkt von der Dissipationsenergie je Lastwechsel auf den Schädigungsgrad der Probekörper geschlossen werden kann. Stattdessen wird im folgenden Abschnitt der Schädigungsgrad über die kumulierte Dissipationsenergie analysiert.

6 ENERGETISCHES SCHÄDIGUNGSMODELL

Wie zuvor erläutert kommt es zum Versagen eines Probekörpers, wenn die kumulierte Dissipationsenergie den Wert der Versagenskurve für die entsprechende Lastwechselzahl erreicht (Bild 9). Basierend auf dieser Erkenntnis wird mit der Gl. 3 der Schädigungsparameter $D(N)$ beschrieben.

$$D(N) = \frac{\sum E_{\delta, \text{vorh}}(N)}{\sum E_{\delta, \text{Vers}}(N)} \leq 1,0 \tag{3}$$

Dabei wird die Schädigung $D(N)$ in jedem Lastwechsel durch das Verhältnis zwischen der kumulierten Dissipationsenergie $\Sigma E_{\delta, \text{vorh}}(N)$ und der Energie der Versagenskurve $\Sigma E_{\delta, \text{Vers}}(N)$ beschrieben.

Dieses Modell wurde für die Versuche mit der Prüffrequenz $f_p = 8$ Hz angewendet. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Bild 10 gegenüber der Lastwechselzahl N und in Bild 11 gegenüber der auf die Bruchlastwechselzahl bezogenen Lastwechselzahl N/N_f aufgezeigt. Bei den

gestrichelt dargestellten Verläufen der Probekörper ZA4.5 und ZA1.10 handelt es sich um Durchläufer. Diese Versuche wurden nach 100.000 beziehungsweise 1.000.000 Lastwechseln gestoppt, ohne dass es zum Versagen der Probekörper kam.

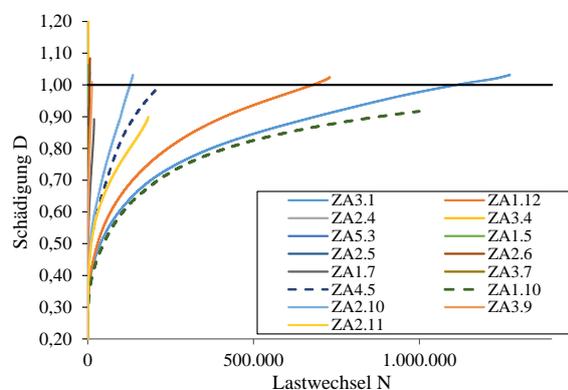


Bild 10: Schädigungsverläufe bezogen auf die Lastwechselzahl N , $f_p = 8$ Hz

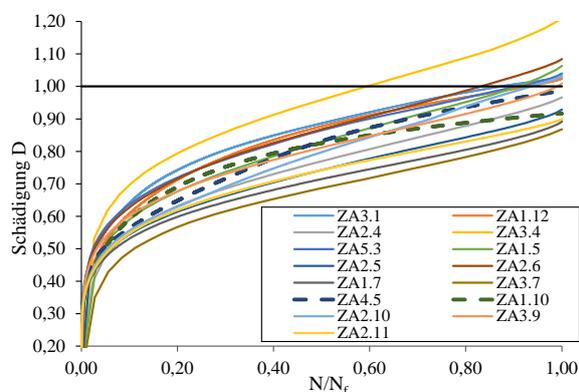


Bild 11: Schädigungsverläufe bezogen auf die relative Lastwechselzahl N/N_f , $f_p = 8$ Hz

Während sich die Verläufe in Bild 10 stark unterscheiden, ist in den auf die relative Lastwechselzahl bezogenen Verläufe in Bild 11 eine deutliche Systematik erkennbar. Analog zu den bekannten Verläufen der Steifigkeitsdegradation sowie der Dehnungsentwicklung bei Ermüdungsversuchen ist ein dreiphasiger Verlauf erkennbar. Nachdem der Schädigungsparameter $D(N)$ zunächst deutlich in der ersten Phase ansteigt, verringert sich die Steigung kontinuierlich bis zu einem konstanten Wachstum in Phase 2. Ab einer relativen Lastwechselzahl von $N/N_f \approx 0,80$ nimmt die Steigung der Verläufe erneut zu. Gemäß dem beschriebenen Modell betragen die Werte des Schädigungsparameters $D(N_f)$ zum Zeitpunkt des Versagens zwischen $D(N_f) = 0,87$ und $D(N_f) = 1,21$, wobei es sich bei dem Maximalwert um einen einzelnen Ausreißer handelt. Die beiden Durchläufer ZA4.5 und ZA1.10 erreichen lediglich Schädigungswerte $D(N) < 1,0$. Insbesondere die geringe Steigung des Probekörpers ZA1.10 zum Versuchsende in Bild 11 unterscheidet sich deutlich von den anderen Verläufen und deutet entsprechend nicht auf ein unmittelbar bevorstehendes Versagen hin.

Im Unterschied zu der Schädigungsakkumulationshypothese von Palmgren (1924) und Miner (1945), welche während der zyklischen Belastung auf einem Beanspruchungsniveau von einem linearen Schädigungsanstieg ausgeht, unterscheiden sich die Verläufe des hier dargestellten energetischen Schädigungsmodells. Der starke Anstieg zu Beginn, sodass bereits nach 10 % der Versuchsdauer die Schädigungswerte $D(N)$ mehr als 50 % betragen, ist dabei der signifikanteste Unterschied. Allerdings sind in der Literatur verschiedene Untersuchungsergebnisse zu finden, welche diesen starken Anstieg zu Versuchsbeginn bestätigen. So zeigen die Schallemissionsergebnisse von wegeregulierten Ermüdungsversuchen von Spooner (1975), dass die Signale immer dann verstärkt auftreten, sobald die Längsdehnung während des aktuellen Lastwechsels die maximale Dehnung des vorangegangenen Lastwechsels überschreitet. Entsprechend kommt es bei kraftgeregelten zyklischen Versuchen aufgrund der starken Dehnungsentwicklung zu Versuchsbeginn auch zu einem schnellen Anstieg der Schädigung. Ebenfalls wird dies durch den Verlauf des schädigungsinduzierten Dehnungsanteils des mechanisch basierten Schädigungsmodells nach von der Haar (2017) unterstützt. Auch diese Verläufe weisen einen starken Anstieg des schädigungsinduzierten Dehnungsanteils zu Versuchsbeginn auf, welcher von einem konstanten Wachstum gefolgt wird.

7 FAZIT UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Publikation konnte auf Grundlage der energetischen Auswertung der Ermüdungsversuche der Zusammenhang zwischen der Dissipationsenergie und der Schädigungsentwicklung aufgezeigt werden. Das entwickelte Schädigungsmodell kann sowohl zur Bewertung aktueller Schädigungszustände während eines Versuchs als auch zur Auswertung der Schädigungsverläufe über die gesamte Versuchslaufzeit verwendet werden. Insbesondere die geringe Streuung der Schädigungswerte beim Versagen der verschiedenen Probekörper sowie der Unterschied zu dem Verlauf des Probekörpers ZA1.10, bei dem es nicht zum Versagen kam, bestätigen die Eignung des Modells. Auch der Vergleich zu den Schallemissionsmessungen von Spooner (1975) sowie die Auswertung der schädigungsinduzierten Dehnungsanteile von von der Haar (2017) bestätigen die Modellentwicklung.

Durch die Abhängigkeit des Schädigungsparameters $D(N)$ von der jeweiligen Versagensfunktion müssen diese zunächst für jede Versuchsserie neu bestimmt werden. Weiterführende Untersuchungen zeigen, dass diese neben der Prüffrequenz auch von der verwendeten Unterspannung sowie vom verwendeten Material abhängig sind. Den genauen Einfluss der einzelnen Parameter gilt es weiter zu untersuchen. Außerdem wird im Rahmen derzeitiger Forschungsarbeiten das bisher auf einstufige Wöhlerversuche beschränkte Modell auch für mehrstufige Beanspruchungszustände erweitert.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts "Ursachen und Modellierung der Erwärmung von ermüdungsbeanspruchten Betonproben" (MA 5296/8-1).

LITERATUR

- Ban, S. (1933): Der Ermüdungsvorgang von Beton, *Der Bauingenieur*, S. 188-192
- Bode, M., Marx, S., Vogel, A. & Völker, C. (2019a): Dissipationsenergie bei Ermüdungsversuchen an Betonprobekörpern, *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 8, S. 548-556
- Bode, M. & Marx, S. (2019b): Heat Generation during fatigue tests on concrete specimens, *Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures, Proceedings of the fib Symposium 2019 held in Kraków, Poland, 27-29 May 2019*
- Elsmeier, K. (2015): Influence of temperature on the fatigue behavior of concrete, *Proceedings of the fib Symposium 2015 held in Copenhagen, Denmark, 18-20 May 2015*
- Marx, S., Grünberg, J., Hansen, M. & Schneider, S. (2017): Sachstandbericht Grenzzustände der Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Tragwerken aus Beton, *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Heft 618
- Miner, M. A. (1945): Cumulative Damage in Fatigue, *Journal of Applied Mechanics*, S. A159-A164
- Palmgren, A. (1924): Die Lebensdauer von Kugellagern, *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, Heft 68, S. 339-341
- Schneider, S., Hümme, J., Marx, S. & Lohaus, L. (2018): Untersuchungen zum Einfluss der Probekörpergröße auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Beton, *Beton- und Stahlbetonbau*, Heft 1, S. 58-67
- Spooner, D. C. & Dougill, J. W. (1975): A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading, *Magazine of Concrete Research*, 27, S. 151-160

- Spooner, D. C., Pomeroy & C. D., Dougill, J. W. (1976): Damage and energy dissipation in cement pasts in compression, *Magazine of Concrete Research*, 28, S. 21-29
- Teichen, K.-T. (1968): Über die innere Dämpfung von Beton, Dissertation, Stuttgart
- von der Haar, C., Wedel, F. & Marx, S. (2016): Numerical and Experimental Investigations of the Warming of fatigue-loaded Concrete, Performance-based approaches for concrete structures, Proceedings of the fib Symposium 2016 held in Cape Town, South Africa, 21-23 November 2016
- von der Haar, C. (2017): Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- Wischers, G. (1978): Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchungen auf Beton, *Betontechnische Berichte*, Forschungsinstitut der Zementindustrie, 2/78, S. 63-67.