Matthias Bode
Steffen Marx
Albert Vogel
Conrad Völker

Dissipationsenergie bei Ermüdungsversuchen an Betonprobekörpern

Aufgrund des visko-elastoplastischen Materialverhaltens von Beton wird Probekörpern und Bauteilen infolge zyklischer Beanspruchungen Energie zugeführt. Die entsprechenden Energiegrößen werden durch Hystereseflächen der Spannungs-Dehnungslinien beschrieben. In der Literatur finden sich dabei unterschiedliche Ansätze, wofür diese Energie verwendet wird. Erste Untersuchungen zeigen, dass zumindest ein Teil dieser dissipierten Energie in thermische Energie umgewandelt wird. Mithilfe der in diesem Beitrag beschriebenen Methodik lassen sich diese Energiegrößen für jeden Lastwechsel eines Ermüdungsversuches schnell und zuverlässig bestimmen. Anschließend wurden mit dem implementierten Algorithmus die dissipierten Energien von insgesamt 27 zyklischen Versuchen ausgewertet. Analog zu der Dehnungsentwicklung und der Steifigkeitsdegradation weisen auch die Verläufe der dissipierten Energie über die Lastwechselzahl einen dreiphasigen Verlauf auf. Die Auswertung zeigt außerdem eine Korrelation zwischen der Bruchlastwechselzahl und der dissipierten Energie. Auch der Zusammenhang zwischen Probekörpererwärmung und dissipierter Energie konnte bestätigt werden.

Keywords Ermüdung, Beton, Dissipationsenergie, Dämpfung, Probekörpererwärmung

1 Motivation

Zahlreiche Untersuchungen zeigen, dass es im Beton, wie auch bei anderen Materialien, durch zyklisch-mechanische Beanspruchungen zu Deformations- und Schädigungsprozessen kommt, welche zum Versagen des Bauteils oder Probekörpers führen können. Dieser Versagenszustand tritt selbst bei Beanspruchungszuständen weit unterhalb der Materialfestigkeitsgrenze ein und wird als Ermüdung bezeichnet [1].

Während die Dehnungsentwicklung sowie die Steifigkeitsdegradation bei Ermüdungsversuchen an Betonprobekörpern hinreichend bekannt sind [2], sind die Schädigungsprozesse in der Meso- und der Mikroebene im Inneren der Probekörper noch nicht ausreichend untersucht. Ein Hinweis auf innere Reibvorgänge liefern die von VON DER HAAR, ET AL. [3] sowie ELSMEIER [4] dokumentierten Probekörpererwärmungen infolge zyklischer Beanspruchungen. Um diese Probekörpererwärmung energetisch untersuchen zu können, wird in dieser Publikation eine Methodik beschrieben und in einem Algorithmus umgesetzt, mit dem die vom Probekörper dissipierte Energie bestimmt werden kann. Anschließend werden für durchgeführte Ermüdungsversuche an Betonprobekörpern die Entwicklungen

Dissipation energy during fatigue tests on concrete specimens

Due to the visco-elastoplastic material behaviour of concrete, energy is supplied to specimens and components as a result of cyclic loading. Hysteresis areas of stress-strain curves describe the corresponding energy quantities. There are different approaches in the literature for what this dissipated energy is used. First studies indicate that at least a part of this energy is transformed into thermal energy. Using the described algorithm, the dissipated energy quantities for every load cycle of a fatigue test can be calculated quickly and reliably. The analysis of fatigue tests of 27 concrete specimens shows similarities of the development of the dissipated energy per load cycle with the strain development and the degradation of the stiffness during fatigue tests. Furthermore, a correlation between the number of load cycles to failure and the quantity of dissipated energy per load cycle was determined. In particular, the connection between the dissipated energy and the warming of the concrete specimens was verified.

Keywords fatigue, concrete, dissipation energy, damping, heating of specimens

der mit jedem Lastzyklus dissipierten Energie über die Versuchslaufzeit dargestellt und mit der Probekörpererwärmung verglichen.

2 Dissipationsenergie bei zyklischen Versuchen

Sowohl bei Versuchen mit monoton steigenden als auch bei zyklischen Belastungen, wird dem untersuchten Probekörper Energie in Form von mechanischer Arbeit hinzugefügt. Da Arbeit physikalisch durch das Produkt aus Kraft und Weg beschrieben wird, geben die Spannungs-Dehnungslinien die zugeführte Energie wieder. WIECHERS stellt in [5] die Spannungs-Dehnungslinie eines ideal-elastischen, sowie eines elasto-plastischen Werkstoffs dar und beschreibt damit die einzelnen Energieanteile einer Spannungs-Dehnungskurve von Beton. Bei einem ideal-elastischen Werkstoff nimmt der Probekörper die zugeführte Arbeit in Form von elastischer Energie E_{el} auf und gibt diese bei Entlastung wieder vollständig ab (Bild 1). Hingegen verbleibt bei einem elasto-plastischen Werkstoff auch nach der Entlastung ein Teil der Energie im Probekörper. Diese verbleibende plastische Energie wird in Bild 2 mit E_{pl} beschrieben. Bei einer wiederkehrenden Belastung eines Betonprobekörpers ergibt sich neben der elastischen und der plas-

tischen Energie noch ein dritter Energieanteil. Da der Probekörper bei der Wiederbelastung zunächst eine geringere Verformung aufweist als bei gleicher Spannung während der vorangegangenen Entlastung, entsteht im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eine Hystereseffläche (Bild 3). Der durch die Hystereseffläche beschriebene Energieanteil E_δ wird in der Literatur als Dämpfungsenergie [5] beziehungsweise als Dissipationsenergie [6] bezeichnet. Im Folgenden wird der übergeordnete Begriff Dissipationsenergie verwendet. BAN [7] macht diese Energie-Aufspeicherung für die Ermüdungsschädigung verantwortlich. Auch SPOONER ET. AL. [8] sehen die dissipierte Energie während der ersten Lastwechsel für die Schädigung verantwortlich, während im weiteren Versuchsverlauf diese Energie mit einem Dämpfungsprozess einhergeht. TEICHEN [9] wiederum schlussfolgert, dass der Großteil der dissipierten Energie, welche er ebenfalls als Dämpfung beschreibt, in Wärme umgewandelt wird. Diese dem Probekörper zugefügte thermische Energie muss folglich bei zyklischen Versuchen zu einer Erwärmung der Betonprobekörper führen. Eine solche Probekörpererwärmung wurde bei zahlreichen Ermüdungsversuchen festgestellt [3], [4], [10], [11]. Die Darstellung der Spannungs-Dehnungslinie mit den Hysteresefflächen für aufeinanderfolgende Lastwechsel in Bild 4 zeigt die dafür verantwortliche Dissipationsenergie eines kraftgeregelten zyklischen Druckschwellversuchs. Es ist zu beachten, dass es sich um eine schematische Darstellung mit horizontal stark auseinandergezogener Achsenskalierung handelt. Tatsächlich überlagern sich die Darstellungen der Spannungs-Dehnungslinien von aufeinanderfolgenden Lastwechseln. Der Zusammenhang zwischen Probekörpererwärmung und der Dissipationsenergie wurde in [3] erstmalig untersucht. Es wurde die dissipierte Energie einzelner Lastwechsel ausgewertet und einem numerischen Modell des Betonprobekörpers zugeführt. Die resultierende Wärmeverteilung des numerischen Modells zeigte dabei gute Übereinstimmungen mit den gemessenen Temperaturverläufen während der entsprechenden Ermüdungsversuche. Da die Auswertung der Hysteresefflächen nur punktuell und manuell erfolgte, wurde im Rahmen der aktuellen Untersuchungen ein Algorithmus entwickelt, um die tatsächlich dissipierte Energie für jeden einzelnen Lastwechsel zu bestimmen.

Bild 1 Ideal-elastischer Werkstoff (aus [5])
Ideal elastic material (acc. to [5])

Bild 2 Elasto-plastischer Werkstoff (aus [5])
Elasto-plastic material (acc. to [5])

Bild 3 Spannungs-Dehnungslinie von Beton (aus [5])
Stress-strain curve of concrete (acc. to [5])

Bild 4 Dissipationsenergie bei zyklischen Versuchen (schematische Darstellung) [3]
Dissipation energy of cyclic tests (schematic diagram) [3]

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Probekörper

Die in diesem Beitrag beschriebene Versuchsreihe besteht aus 33 zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von $d = 100$ mm und einer Höhe von $h = 300$ mm. Es wurde ein schnell erhärtender Portlandzement CEM I 52,5 R sowie eine quarzitisches Gesteinskörnung entsprechend der Regelsieblinie B8 nach [12] verwendet. Zusatzstoffe und Zusatzmittel wurden nicht verwendet. Mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ ergab sich entsprechend des Ausbreitmaßes eine Einordnung des Frischbetons in Konsistenzklasse F3 nach [13]. Nach

24 Stunden wurden die Probekörper ausgeschalt und anschließend für weitere 6 Tage unter Wasser gelagert. Daran anschließend lagerten die Probekörper bis zur Beprobung unter Normbedingungen bei einer Temperatur von $T_L = 20^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $\rho_L = 65\%$. Um auszuschließen, dass aufgrund der zu erwartenden Probekörpererwärmungen während der Ermüdungsversuche Materialumwandlungen und Zersetzungsprozesse stattfinden, wurden die Probekörper getrocknet. Analog zu dem Vorgehen von WEFER [14] wurden die Proben in einem Trocknungsofen stufenweise auf 105°C erwärmt und nach 3,5 Tagen wieder langsam abgekühlt. Mit der Probekörpertrocknung wurde nach 28 Tagen begonnen.

Neben den oben beschriebenen Probekörpern wurden fünf weitere zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von $d = 150\text{ mm}$ und einer Höhe von $h = 300\text{ mm}$ zur Überprüfung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen hergestellt. Die Verweildauer in der Schalung sowie die Lagerungsbedingungen waren identisch zu den oben beschriebenen Probekörpern. Eine gesonderte Trocknung dieser Probekörper fand nicht statt. Nach 28 Tagen wurde die statische Druckfestigkeit mit einer servohydraulischen 2,5 MN-Universalprüfmaschine ermittelt. Bei einer sehr geringen Streuung ergab sich eine Zuordnung in die Druckfestigkeitsklasse C55/67.

3.2 Versuchsprogramm

Die zyklischen Druckschwellversuche wurden an 27 Probekörpern auf unterschiedlichen Lastniveaus entsprechend Tab. 1. durchgeführt. Um die entsprechenden Unter- und Spannungsniveaus zu bestimmen, wurde im Probenalter von 140 Tagen unmittelbar vor Beginn der zyklischen Versuche die Referenzfestigkeit f_{ref} als Mittelwert der statischen Druckfestigkeit f_{ci} von sechs Probekörpern ermittelt.

$$f_{ref} = \frac{1}{6} \cdot \sum_{i=1}^6 f_{ci} \quad (1)$$

$$S_{max} = \frac{\sigma_{max}}{f_{ref}} \quad (2)$$

$$S_{min} = \frac{\sigma_{min}}{f_{ref}} \quad (3)$$

Tab. 1 Versuchsprogramm der zyklischen Versuche
Testing programme of the cyclic tests

Serie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S_{max}	0,80	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,65	0,65	0,60
S_{min}	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	2 Hz	8 Hz	2 Hz	8 Hz	2 Hz	8 Hz
Anz.	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk	3 Stk

Sowohl die statischen als auch die anschließenden zyklischen Versuche wurden an einer servohydraulischen 2,5 MN-Universalprüfmaschine durchgeführt. Bei den kraftgesteuerten

zyklischen Versuchen wurden die einzelnen Probekörper mit einer sinusförmigen Belastung zwischen dem festgelegten Oberspannungsniveau S_{max} und dem festgelegten Unterspannungsniveau S_{min} beansprucht. Die verwendeten Prüffrequenzen f_p betrugen 2 Hz und 8 Hz. Jede in Tab. 1 beschriebene Serie bestand aus drei Probekörpern.

3.3 Messprogramm

Mithilfe eines Kraftaufnehmers wurden die aufgebrachten Kräfte mit einer Messfrequenz von 300 Hz während der gesamten Versuchsdauer aufgezeichnet. Neben der Kraft wurde mit der gleichen Messfrequenz die Längenänderung des Probekörpers über drei Laserdistanzsensoren, welche jeweils um 120° versetzt um den Probekörper herum angeordnet waren, gemessen.

Bild 5 Schematischer Versuchsaufbau
Schematic test setup

Außerdem wurden mit Thermoelementen vom Typ T an fünf über die Probekörperhöhe verteilten Punkten auf der Oberfläche sowie an bis zu drei Stellen im Probekörperkern die Temperaturen aufgezeichnet. Für die Temperaturmessung im Kern wurden Öffnungen mit einem Durchmesser von $d = 1,5\text{ mm}$ gebohrt, in denen die Thermoelemente eingeführt wurden. Mithilfe von schnellhärtendem Klebstoff wurden die Bohrlöcher anschließend vollständig verschlossen. Bei der Begutachtung der Bruchbilder nach den Versuchen wurden keine Häufung von Rissinitiationen oder sonstige Auffälligkeiten im Bereich der Bohrlöcher festgestellt.

Zusätzlich zu den in Bild 5 dargestellten Messstellen wurden mit 6 weiteren Thermoelementen die Umgebungstemperaturen in unmittelbarer Nähe zum Probekörper gemessen. Mithilfe von zwei Thermoanemometern konnten die laminare Strömung direkt am Probekörper und die turbulente Strömung im Abstand von 3 cm zum Probekörper bestimmt werden. Diese zusätzlichen Messungen dienen der Anpassung sowie Validierung eines numerischen Modells, welches die Temperaturentwicklung der Probekörper während der dynamischen Versuche beschreibt.

3.4 Ergebnisse

Trotz höheren Probenalters verringerte sich der Mittelwert der statischen Druckfestigkeit vor Beginn der zyklischen Versuche gegenüber dem Mittelwert nach 28 Tagen um 14 %. Ebenfalls variierten die einzelnen Festigkeiten deutlich stärker als bei den Versuchen nach 28 Tagen. Als Grund hierfür wird eine durch die Trocknung verursachte Schädigung des Betongefüges vermutet.

Bild 6 Wöhler-Darstellung der Bruchlastwechselzahlen für $S_{\min} = 0,05$
S-N-curve for $S_{\min} = 0,05$

Die in Bild 6 dargestellten Bruchlastwechselzahlen N_f der einzelnen Probekörper für die verschiedenen Oberspannungsniveaus weisen ebenfalls eine starke Streuung auf. Diese Streuung war aufgrund der Varianz in den Festigkeitswerten nach der Trocknung zu erwarten. Demnach wurden die einzelnen Probekörper eines Lastniveaus tatsächlich auf unterschiedlichen, von ihrer individuellen (unbekannten) Druckfestigkeit f_{ci} abhängigen, Lastniveaus getestet. Bei den als Durchläufer deklarierten Probekörpern wurde der Versuch beendet, bevor es zum Versagen kam. Sie sind entsprechend ihrer bis zum Versuchsende ertragenen Lastwechselzahl im Diagramm darge-

stellt. Insgesamt fällt jedoch auf, dass ein Großteil der Probekörper eine geringere ertragbare Lastwechselzahl aufwies als gemäß Model Code 2010 [15] prognostiziert. Während bei den 8 Hz-Versuchen insbesondere bei den geringeren Oberspannungsniveaus die Bruchlastwechselzahlen unterhalb der Wöhlerlinie aus dem Model Code 2010 lagen, trifft dies umgekehrt bei den 2 Hz-Versuchen insbesondere bei den höheren Oberspannungsniveaus zu.

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, ergeben sich die Hysteresen aus den einzelnen Be- und Entlastungspfaden der zyklischen Versuche. In Bild 7 sind für verschiedene Lastwechsel die Hysteresen eines Probekörpers in einem Kraft-Längenänderungs-Diagramm dargestellt. Demnach beschreiben die eingeschlossenen Flächeninhalte jeweils die Größe der Dissipationsenergie für den jeweiligen Lastwechsel. Bei den dargestellten Punkten handelt es sich um die tatsächlichen Messwerte, welche jeweils linear miteinander verbunden wurden. Sowohl die Entlastungs- als auch die Belastungsäste haben über die gesamte Versuchsdauer eine konvexe Form. Die Probekörperstauchung erhöht sich mit steigender Lastwechselzahl. Dabei ist auffällig, dass sich die Stauchungswerte der Kräfte maxima deutlich stärker erhöhen als die der Kräfte minima. Demnach erhöht sich die elastische Dehnung und somit verringert sich der Sekantenmodul zwischen den Extremwerten mit steigender Lastwechselzahl. Eine weitere Folge aus der Vergrößerung der elastischen Dehnung ist die Vergrößerung der Hysterese. Die dargestellte Hysterese kurz vor Versuchsende weist darüber hinaus im Vergleich zu den vorangegangenen Hysteresen eine Verbreiterung auf. Der Abstand zwischen dem Be- und dem Entlastungsast ist größer. Somit scheint sich die Dissipationsenergie je Lastwechsel über die Versuchslaufzeit zu erhöhen, welches in Abschnitt 4 näher untersucht wird.

Entsprechend des in [3] beschriebenen Zusammenhangs zwischen der Dissipationsenergie und der Probekörpertemperatur

Bild 7 Darstellung von Hystereseflächen verschiedener Lastwechsel eines Probekörpers ($f_p = 8 \text{ Hz}$, $S_{\max} = 0,60$, $S_{\min} = 0,05$, $N_f = 1.272.861$)
Hysteresis areas for different load cycles of a specimen ($f_p = 8 \text{ Hz}$, $S_{\max} = 0,60$, $S_{\min} = 0,05$, $N_f = 1.272.861$)

ist in Bild 8 die Erhöhung der Kerntemperatur in mittlerer Probekörperhöhe für drei ausgewählte Probekörper bezogen auf die relative Lastwechselzahl bis zum Versagen des Probekörpers dargestellt. Die Probekörper wurden zyklisch zwischen der bezogenen Unterspannung $S_{\min} = 0,05$ und des bezogenen Oberspannungsniveaus $S_{\max} = 0,65$ beansprucht. Während bei Probekörper ZA3.9 die Temperatur bis zum Versuchsende um $\Delta T = 10$ K linear ansteigt, befindet sich der Probekörper ZA1.2 über weite Strecken im stationären Zustand. Bereits ab ca. 10 % seiner Bruchlastwechselzahl bleibt die Kerntemperatur bis kurz vor Versuchsende annähernd konstant. Die zugeführte thermische Energie steht in diesem Zeitraum im Gleichgewicht zur vom Probekörper an seine Umgebung abgegebenen thermischen Energie. Die abgegebene thermische Energie hat bei dem mit der Frequenz $f_p = 2$ Hz belasteten Probekörper ZA1.2 aufgrund der frequenzbedingten längeren Versuchsdauer einen größeren Einfluss als bei den anderen beiden Probekörpern. Bei dem Probekörper ZA2.10 stellt sich das Versagen offenbar kurz vor Erreichen eines stationären Temperaturzustands ein.

Bild 8 Temperaturerhöhung im Kern in mittlerer Probekörperhöhe in Bezug zur Temperatur zu Beginn des Versuchs
Increase in the core temperature at the middle of the specimen's height referred to the initial temperature

4 Auswertung der Dissipationsenergie

4.1 Allgemeines

Um die Dissipationsenergien der einzelnen Lastwechsel zu erhalten, müssen die Flächeninhalte der im Kraft-Weg-Diagramm (Bild 7) dargestellten Hysteresen berechnet werden. Entsprechend der schematischen Darstellung in Bild 4 sind die Hysteresen auf der einen Seite durch das Kurvenminimum und auf der anderen Seite durch den Schnittpunkt des Be- und des Entlastungsastes begrenzt. Zu beachten ist, dass einzelne Messpunkte und keine kontinuierlichen Messkurven vorhanden sind. Bei der verwendeten Messfrequenz von 300 Hz wird bei einer Prüffrequenz von 2 Hz jeder Lastwechsel durch 150 Messpunkte beschrieben, während bei einer Prüffrequenz von 8 Hz nur 37-38 Messpunkte zur Verfügung stehen. Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie aus einzelnen Messpunkten ein Schnittpunkt der Kurven berechnet werden kann. Anschließend wird in Abschnitt 4.3 das Vorgehen bei der Bestimmung der Dissipationsenergie beschrieben.

4.2 Schnittpunktbestimmung

Um den Schnittpunkt zu bestimmen, werden schrittweise zwei aufeinanderfolgende Messpunkte des Belastungsastes mit zwei aufeinanderfolgende Messpunkte des Entlastungsastes verglichen. Dafür wird gedanklich jeweils eine Gerade zwischen den beiden Messpunkten i und $i+1$ sowie zwischen j und $j+1$ gezeichnet (Bild 9). Anschließend wird überprüft, ob es einen gemeinsamen Schnittpunkt der beiden Geraden zwischen den Messpunkten gibt.

Bild 9 Schrittweise Überprüfung der Geradenabschnitte auf einen gemeinsamen Schnittpunkt
Stepwise check of the straight sections of a joint point of intersection

Bild 10 Definition der Streckenabschnitte zur Schnittpunktsuche
Definition of the straight sections for the search for a point of intersection

Die in Bild 10 definierten Abstände lassen sich wie folgt darstellen:

$$L_{i,s} = L_i \times a_i \quad (4)$$

$$L_{j,s} = L_j \times a_j \quad (5)$$

Der Wertebereich der Faktoren a_i und a_j liegt dabei zwischen 0 und 1. Bezieht man die Gl. (4) und (5) auf die Messwerte der Kraft F und des Weges Δl , ergibt sich ein Gleichungssystem (Gl. (6) bis Gl. (9)) mit den vier Unbekannten $F(s)$, $\Delta l(s)$, a_i und a_j . Damit es sich tatsächlich um einen Schnittpunkt der beiden Geradenabschnitte handelt, müssen bei der Lösung die beiden Faktoren a_i und a_j zwischen 0 und 1 liegen. Die zwei weiteren Unbekannten $F(s)$ und $\Delta l(s)$ beschreiben dann die Kraftgröße und die Weggröße des Schnittpunkts. Liegt mindestens einer der beiden Faktoren a_i und a_j nicht zwischen 0 und 1, gibt es zwischen den beiden betrachteten Messpunktpaaren keinen Schnittpunkt und zwei weitere Messpunktpaare müssen hinsichtlich eines Schnittpunkts der Geradenabschnitte untersucht werden.

$$\Delta l(s) - \Delta l(i) = [\Delta l(i+1) - \Delta l(i)] \cdot a_i \quad (6)$$

$$F(s) - F(i) = [F(i+1) - F(i)] \cdot a_i \quad (7)$$

$$\Delta l(s) - \Delta l(j) = [\Delta l(j+1) - \Delta l(j)] \cdot a_j \quad (8)$$

$$F(s) - F(j) = [F(j+1) - F(j)] \cdot a_j \quad (9)$$

4.3 Ermittlung der Hystereseflächeninhalte

Für die Ermittlung der Dissipationsenergie der einzelnen Lastwechsel wurden die Messdaten der Kraft sowie die Mittelwerte der drei Laserdistanzsensoren mit einem im Programm MATLAB implementierten Algorithmus ausgewertet. Ein Flussdiagramm zur Beschreibung des Algorithmus ist in Bild 11 dargestellt. Zu Beginn werden das erste Kraftmaximum und der dazugehörige Mittelwert der Verschiebung als Startpunkt für den gesamten Algorithmus ermittelt. Anschließend wird der darauffolgende minimale Verschiebungswert und die dazugehörige Kraftgröße bestimmt. Nachdem auch der Messpunkt mit dem Kraftmaximum des darauffolgenden Lastwechsels ermittelt wurde, wird mithilfe des in Abschnitt 4.2 beschriebenen Gleichungssystems der gemeinsame Schnittpunkt des Be- und Entlastungsastes zwischen den beiden Kraftmaxima berechnet. Der Messpunkt mit der minimalen Verschiebung sowie der Schnittpunkt stellen die Grenzpunkte der Hysteresefläche dar. Zwischen diesen beiden Punkten wird jeweils der Flächeninhalt unterhalb des Be- und des Entlastungsastes berechnet. Die Berechnung der beiden Flächeninhalte ergibt sich aus der Summe der mit der Trapezregel angenäherten Einzelflächeninhalte zwischen jeweils zwei benachbarten Messpunkten in diesem Bereich. Aus der Differenz der beiden Flächeninhalte lässt

Bild 11 Ablaufschema zur Bestimmung der Dissipationsenergie für jeden Lastwechsel
Process description for the calculation of the dissipation energy of every load cycle

sich dann der Hystereseflächeninhalt und somit die Dissipationsenergie für den betrachteten Lastwechsel ermitteln. Nachdem die Dissipationsenergie eines Lastwechsels ermittelt und gespeichert wurde, wird der nächste Messpunkt mit einem Kraftmaximum ermittelt und der Algorithmus erneut durchlaufen, um die Dissipationsenergie des nächsten Lastwechsels zu ermitteln. Der Algorithmus wird so oft durchlaufen bis das Ende der Messdaten und somit auch das Versuchsende erreicht ist. Ausgegeben werden die Werte der dissipierten Energie für jeden Lastwechsel des betrachteten Probekörpers.

4.4 Entwicklung der Dissipationsenergien über die Versuchsdauer

Da die Hystereseflächen durch einzelne Messpunkte und nicht durch kontinuierliche Linien begrenzt sind, weisen die mit Hilfe der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Methodik ausgewerteten Dissipationsenergiewerte geringfügige Streuungen auf (Bild 12). Daher wurde für die Darstellung der Entwicklung der Dissipationsenergie der einzelnen Probekörper eine Glättung der Werte vorgenommen.

Bild 12 Vergleich der Rohdaten mit den geglätteten Werten der Dissipationsenergie je Lastwechsel
Comparison of the original data and the smoothed curve of the dissipation energy per load cycle

Die geglätteten Werte einzelner Probekörper sind in Bild 13 und Bild 14 gegenübergestellt. Zu erkennen ist, dass sich analog zu den in [2] beschriebenen Dehnungs- und Steifigkeitsreduktionen ein dreiphasiger Verlauf einstellt. Dieser dreiphasige Verlauf ist durch einen starken Anstieg der Werte zu Beginn, einen linearen Zuwachs in der Folge und einen erneut starken Anstieg kurz vor Eintreten des Versagens gekennzeichnet. Hingegen stellt sich bei den Probekörpern ZA1.10 und ZA3.8, welche nach 10^6 Lastwechseln ohne Versagen gestoppt wurden, die dritte Phase nicht ein. Diese Probekörper verzeichneten sogar einen geringen Rückgang der dissipierten Energie pro Lastwechsel über die Versuchslaufzeit. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die Größe der dissipierten Energie je Lastwechsel einen Einfluss auf die Bruchlastwechsel hat. Probekörper mit einer geringeren Bruchlastwechselzahl dissipieren mit jedem Lastwechsel mehr Energie als Probekörper mit einer größeren Bruchlastwechselzahl. Weiterhin ist festzustellen, dass bei Versuchen mit einer großen Bruchlastwechselzahl (ZA3.1, ZA1.2) die dissipierte Energie je Lastwechsel nach

dem starken Anstieg zu Beginn, einen nahezu konstanten Verlauf über die Versuchsdauer aufweist. Erst kurz vor dem Bruch steigen die Werte wieder an. Des Weiteren zeigen die dargestellten Verläufe einen Frequenzeinfluss. Bei geringerer Prüffrequenz ist die dissipierte Energiemenge pro Lastwechsel größer als bei den Versuchen mit höherer Prüffrequenz.

Bild 13 Entwicklung der Dissipationsenergien je Lastwechsel, $f_p = 8$ Hz
Development of the dissipation energy per load cycle, $f_p = 8$ Hz

Bild 14 Entwicklung der Dissipationsenergien je Lastwechsel, $f_p = 2$ Hz
Development of the dissipation energy per load cycle, $f_p = 2$ Hz

4.5 Vergleich der Temperaturentwicklung mit der Dissipationsenergie

Der in Bild 15 dargestellte exemplarische Vergleich der Temperaturentwicklung mit dem Verlauf der Dissipationsenergie

für einen Probekörper bestätigt die Ergebnisse aus [3]. Dargestellt ist die Erhöhung der Kerntemperatur in mittlerer Probekörperhöhe. Zunächst sorgt die dissipierte Energie offensichtlich für eine Temperaturerhöhung. Nachdem die dissipierte Energie pro Lastwechsel nicht weiter steigt, erreicht die Temperaturkurve ihr erstes Plateau. Der Probekörper befindet sich diesbezüglich in einem stationären Zustand, bei dem die zugeführte thermische Energie genauso groß ist wie die an die Umgebung abgegebene thermische Energie. Erst mit fortlaufender Zeit und erneuter Steigerung der Energiemenge ergibt sich eine weitere Temperaturerhöhung. Kurz vor dem Bruch, wenn die Dissipationsenergie deutlich ansteigt, ergibt sich ebenfalls nochmals ein deutlicher Temperaturanstieg.

Bild 15 Gegenüberstellung der Verläufe der Temperaturerhöhung im Kern sowie der Dissipationsenergie je Lastwechsel eines Probekörpers
Comparison of the dissipation energy per load cycle and the temperature development of one specimen

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch das visko-elastoplastische Materialverhalten des Betons wird im Probekörper mit jedem Lastwechsel Energie irreversibel umgewandelt, deren Größe durch die in Bild 4 und Bild 7 dargestellten Hystereseflächen beschrieben wird. Es wird angenommen, dass diese Dissipationsenergie hauptsächlich in Wärmeenergie umgewandelt wird. Mit dem in Abschnitt 4 beschriebenen numerisch robusten Algorithmus kann diese dissipierte Energie für jeden Lastwechsel schnell und zuverlässig bestimmt werden. Die Autoren schlagen vor, die beschriebene Methodik zukünftig für die Auswertung von Hysteresen zu verwenden, um einen Einfluss der Auswertemethodik auszuschließen und somit die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Versuche zu gewährleisten. Entsprechend lassen sich neue, sowie bereits in der Vergangenheit durchgeführte Versuche, hinsichtlich der Dissipationsenergie auswerten. Die Messfrequenz für die Kraft und die Längenänderung sollte bei neuen Versuchen so gewählt werden, dass pro Lastwechsel mindestens 20 Messwerte aufgezeichnet werden. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit steigender dissipierter Energie je Lastwechsel die Bruchlastwechselzahl abnimmt und das bei einer geringeren Prüffrequenz mehr Energie pro Lastwechsel dissipiert wird als bei einer höheren Prüffrequenz.

Ein Vergleich der Probekörpertemperatur und der dissipierten Energie über die Versuchslaufzeit zeigt eine deutliche Korrelation zueinander. Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts soll dieser Zusammenhang zwischen dissipierter Energie und Probekörpererwärmung numerisch untersucht werden.

Diese numerischen Simulationen der Wärmeentwicklung im Probekörper werden derzeit mit der Software Ansys durchgeführt. Basis dafür ist ein FEM-Model bestehend aus einem Probekörper sowie dessen Umgebung mit Teilen der Prüfmaschine, sodass eine detaillierte Simulation der Wärmetransportvorgänge möglich wird. Die Grundlage für die Simulation bzw. Berechnung der Temperaturentwicklung bilden die zeitabhängigen Energiedissipationsverläufe (siehe Bild 12 - Bild 14). Weiterhin im Labor ermittelt wurden die (Oberflächen-)Temperaturen des Probekörpers sowie des umgebenden „Mikroklimas“ (Thermografie, Temperatursensoren, Anemometrie). Mit diesen Messergebnissen sollen die derzeit laufenden numerischen Simulationen zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten validiert werden.

Anhand des Vergleiches von gemessenen Oberflächen- und Kerntemperaturen mit den berechneten Werten wird zum einen die Überprüfung der Hypothese möglich, dass der Großteil der dissipierten Energie in Wärme umgesetzt wird. Zum anderen ermöglicht die numerische Berechnung bei überwiegender Übereinstimmung mit den Messungen eine Übertragbarkeit, sodass in Abhängigkeit des Belastungsregimes eine Prognose der zu erwartenden Betontemperaturentwicklung während der dynamischen Prüfung möglich wird.

Neben der Berechnung der Wärmeentwicklung des Probekörpers aus dieser Studie sollen weitere Probekörperformen und Betonzusammensetzungen hinsichtlich der zu erwartenden Temperaturentwicklung numerisch untersucht und Parameterstudien durchgeführt werden. Weiterhin sind Berechnungen zur Wirkung künstlicher Temperaturregulierung an der Betonoberfläche auf die Kerntemperaturentwicklung geplant.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projekts „Ursachen und Modellierung der Erwärmung von ermüdungsbeanspruchten Betonproben“.

Literatur

- [1] Marx, S., Grünberg, J., Hansen, M., Schneider, S.: Sachstandbericht Grenzzustände der Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Tragwerken aus Beton. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 618 2017.
- [2] Holmen, J. O.: Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. Dissertation. Trondheim 1979.
- [3] von der Haar, C., Wedel, F., Marx, S.: Numerical and Experimental Investigations of the Warming of fatigue-loaded Concrete. fib Symposium Cape Town 21.-23.11.2016.

- [4] *Elsmeier, K.*: Influence of temperature on the fatigue behaviour of concrete. fib Symposium Copenhagen 18.-20.5.2015.
- [5] *Wischers, G.*: Aufnahme und Auswirkungen von Druckbeanspruchung auf Beton. Beton (1978), S. 63–67.
- [6] *Spooner, D. C., Dougill, J. W.*: A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compressive loading. Magazine of Concrete Research 27 (1975), S. 151–160.
- [7] *Ban, S.*: Der Ermüdungsvorgang von Beton. Der Bauingenieur (1933), S. 188–192.
- [8] *Spooner, D. C., Pomeroy, C. D., Dougill, J. W.*: Damage and energy dissipation in cement pasts in compression. Magazine of Concrete Research 28 (1976), S. 21–29.
- [9] *Teichen, K.-T.*: Über die innere Dämpfung von Beton. Dissertation. Stuttgart 1968.
- [10] *Schneider, S., Hümme, J., Marx, S., Lohaus, L.*: Untersuchungen zum Einfluss der Probekörpergröße auf den Ermüdungswiderstand von hochfestem Beton. Beton- und Stahlbetonbau (2018), S. 58–67.
- [11] *Karr, U., Schuller, R., Fitzka, M., Denk, A., Strauss, A., Mayer, H.*: Very high cycle fatigue testing of concrete using ultrasonic cycling. Materials Testing 59 (2017), S. 438–444.
- [12] *Deutsches Institut für Normung*: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. DIN 1045-2 (August 2008).
- [13] *Deutsches Institut für Normung*: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. DIN EN 12350-2 (August 2009).
- [14] *Wefer, M.*: Materialverhalten und Bemessungswerte von ultrahochfestem Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung. Dissertation. Hannover 2010.
- [15] *FIB - Fédération internationale du béton*: fib Model Code for Concrete Structures 2010. Berlin: Ernst & Sohn (2013).

Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Bode
Institut für Massivbau
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9a
30167 Hannover
bode@ifma.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx
Institut für Massivbau
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9a
30167 Hannover
marx@ifma.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Albert Vogel
Professur für Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystrasse 11A
99423 Weimar
albert.vogel@uni-weimar.de

Prof. Dr.-Ing. Conrad Völker
Professur für Bauphysik
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystrasse 11A
99423 Weimar
conrad.voelker@uni-weimar.de