

Untersuchung der Schädigungsevolution in Beton unter Ermüdungsbeanspruchung mit Hilfe der Schallemissionsanalyse

Marc THIELE, Stephan PIRSKAWETZ, Matthias BAEßLER, Andreas ROGGE
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung. Unter zyklischen Belastungen findet im Beton, wie bei anderen Materialien auch, ein Ermüdungsprozess statt, der letztlich im Versagen des Materials enden kann. Im derzeitigen Erkenntnisstand zum Materialverhalten des Betons gibt es gerade bei dessen Ermüdungsverhalten noch viele nicht oder nicht ausreichend geklärte Fragestellungen. Deshalb wurde in Laborversuchen das Ermüdungsverhalten von Beton unter Druckschwellbeanspruchungen untersucht. Im Fokus dieser Untersuchungen standen dabei die während der Lebensdauer im Materialgefüge ablaufenden Prozesse, die zur Schädigung des Gefüges und schließlich auch zum Ermüdungsversagen führen können.

In den Ermüdungsversuchen wurden versuchsbegleitend Dehnungsmessungen, Ultraschall-Laufzeitmessungen und Schallemissionsmessungen an den Proben zur Erfassung der Schädigungsevolution eingesetzt. Die Schallemissionsmessung ist dabei ein wichtiges Instrument, da sie die Rissentwicklungsprozesse detektiert, die die Ursache für die Materialschädigung sind. Mit ihr konnten die unterschiedlichen Phasen der Rissentwicklungen über die gesamte Lebensdauer der Betonproben festgestellt werden. Diese Phasen sind gekennzeichnet durch sich stabilisierende, stabile und instabile Rissprozesse, die entsprechende Auswirkungen auf das Materialverhalten haben. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der anderen Messtechniken zeigt den entsprechenden Einfluss der Rissentwicklungen auf die Materialeigenschaften des Betons.

1. Einführung

Der Baustoff Beton ist heute der mengenmäßig am meisten eingesetzte Werkstoff im Bauwesen und wird nahezu in allen Ingenieurbauwerken verbaut. Sein Ermüdungsverhalten ist bereits seit langem Gegenstand der Forschung, in der mit den ersten Untersuchungen schon vor gut 100 Jahren begonnen wurde. Trotzdem gibt es aufgrund des sehr komplexen Materialverhaltens des Betons, welches im Wesentlichen aus seiner stark heterogenen Gefügestruktur resultiert, nach wie vor zahlreiche offene Fragestellungen gerade zu seinem Verhalten unter Ermüdungsbeanspruchungen.

Im Laufe der Zeit haben sich die Anwendungsbereiche und die Anforderungen an den Beton stetig weiterentwickelt. Tragwerke werden aus wirtschaftlichen und architektonischen Gründen immer filigraner und führen so zu stärkeren Ausnutzungen von Querschnitten und Materialien. Daneben nehmen auf der Beanspruchungsseite Lasten mit zyklischem und dynamischem Charakter zu. All dies stellt steigende Anforderungen an die Bemessung der Tragwerke dar und führt dazu, dass die Ermüdungsthematik weiter an Bedeutung gewinnt. Ein aktuelles Beispiel dafür sind Offshore-Windkraftanlagen, deren Tragstrukturen durch Wind und Wellen zyklischen Belastungen mit sehr hohen Lastwechselzahlen und -amplituden ausgesetzt sind.



Um entsprechend sichere und wirtschaftliche Bemessungen sowie Bewertungen zu ermöglichen, sind detaillierte Kenntnisse über das jeweilige Materialverhalten und die zugehörigen Vorgänge im Material erforderlich. Daher ist das Ziel des Vorhabens, über das hier berichtet wird, anhand experimenteller Untersuchungen an Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen neue Erkenntnisse über die Schädigungsevolution im Beton zu gewinnen. Es sollen vor allem die im Materialgefüge ablaufenden Veränderungen während des Ermüdungsprozesses beobachtet und analysiert werden. Dazu werden Ermüdungsversuche an Beton durchgeführt, begleitet durch den Einsatz verschiedener zerstörungsfreier Prüftechniken wie der Schallemissionsanalyse (SEA), Dehnungsmessungen und Ultraschall-Laufzeitmessungen (US). Das sich in verschiedenen Stadien einstellende Rissbild wird durch Mikroskopie dokumentiert. Der SEA kommt dabei eine entscheidende Rolle zu, weil sie die konkrete Detektion von Rissaktivitäten ermöglicht, während die anderen Messtechniken nur die resultierenden Änderungen in den Materialeigenschaften erfassen. Die SEA wurde z.B. bereits von Spooner [6] und Klausen [5] erfolgreich für Untersuchungen an zyklisch beanspruchten Betonen eingesetzt.

2. Grundlagen zur Ermüdung

Werden Materialien, wie zum Beispiel Stahl, einer zyklisch veränderlichen Belastung ausgesetzt, kann nach einer ausreichend hohen Anzahl von Lastzyklen ein Materialversagen eintreten, obwohl die aufgebrachte Belastung deutlich unterhalb der statischen Bruchfestigkeit des Materials liegt. Dieser Vorgang wird als Materialermüdung bezeichnet. Je nachdem, wie groß die Amplitude der zyklischen Belastung ist, erträgt das Material mehr oder weniger Lastzyklen bis zu seinem Ermüdungsversagen. Beim Beton spielt, im Vergleich zu Metallen, neben der Größe der Amplitude zusätzlich auch die Höhe der Mittellast, um die die zyklische Beanspruchung schwingt, eine große Rolle. Die in vielen Untersuchungen für Betone bis zum Ermüdungsversagen ermittelten Lastspielzahlen, werden in den sogenannten Wöhlerlinien dargestellt, z.B. Holmen [2], Kim [4] oder Klausen [5].

Während des gesamten Ermüdungsprozesses (Lebensdauer) finden im Beton Degradationsprozesse statt, die das Materialgefüge verändern und infolge dessen zu signifikanten Veränderungen in den Materialeigenschaften führen. Allerdings sind das Ermüdungsverhalten und speziell die ertragbaren Lastspielzahlen von Beton sehr starken Streuungen unterworfen, die sich um bis zu vier Zehnerpotenzen für ein Belastungsniveau unterscheiden können, vgl. Hsu [3] oder Holmen [2]. Dies erschwert die experimentelle Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Beton deutlich und gestaltet sie vor allem sehr aufwendig. Ausschlaggebend für diese Streuungen ist im Wesentlichen die stark heterogene Struktur des Betons. Sie führt bereits im unbelasteten Ausgangszustand dazu, dass der Beton im Vergleich zu Metallen relativ hohe Streuungen in seinen Eigenschaften aufweist.

3. Versuchskonzeption und Versuchsaufbau

Die experimentellen Untersuchungen fanden auf der Materialebene statt, wobei nur eine Betonrezeptur verwendet wurde, da der Schwerpunkt auf der Untersuchung der Ermüdungsprozesse als solche lag. Durchgeführt wurden in diesem Zusammenhang sowohl niederzyklische als auch hochzyklische Ermüdungsversuche unter Druckschwellbelastung.

Die grundlegenden Größen zur Beschreibung der Ermüdungsversuche sind die Oberlast S_{\max} und die Unterlast S_{\min} bzw. die Mittellast S_m und die Schwingbreite der zyklischen Belastung, vgl. Abbildung 1. Das in den Ermüdungsversuchen verwendete Lastprogramm, schematisch veranschaulicht in Abbildung 1, besteht zunächst aus einer

sinusförmigen Ermüdungsbeanspruchung, die sich zwischen S_{\min} und S_{\max} bewegt und mit einer Frequenz von 5 Hz aufgebracht wird. Diese wird in regelmäßigen Intervallen durch die dargestellten linearen Lastrampen unterbrochen, die der Ermittlung der aktuellen Materialeigenschaften dienen.

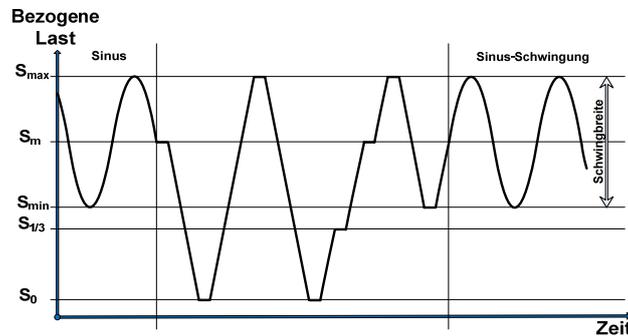


Abbildung 1: Schematische Darstellung des verwendeten Lastprogramms

Die Länge des Sinusintervalls variiert zwischen den verschiedenen Versuchsserien in Abhängigkeit der zu erwartenden Ermüdungslastspielzahlen. Die Lastniveaus für die nieder- und hochzyklischen Versuche wurden so gewählt, dass bis zum Ermüdungsversagen einmal Lastspielzahlen zwischen 10^4 und 10^5 sowie zwischen 10^6 und 10^7 zu erwarten waren.

Für die experimentellen Untersuchungen wurden Betonzylinder mit 100 mm Durchmesser und 300 mm Höhe verwendet. Diese bestanden aus einem Normalbeton, der einer Druckfestigkeitsklasse von C40/50, also einer Zylinderdruckfestigkeit von min. -40 N/mm^2 , entspricht. Zur Messung während der Versuche kamen neben der Schallemissionsmessung (SE) auch Dehnungsmessstreifen (DMS), Ultraschall-Laufzeitmessungen (US) und das optische Messsystem ARAMIS der Firma GOM zum Einsatz. Aus technischen Gründen war es nicht möglich, alle Messverfahren zusammen an den Proben einzusetzen, so dass immer nur bestimmte Kombinationen in den einzelnen Versuchen verwendet wurden.

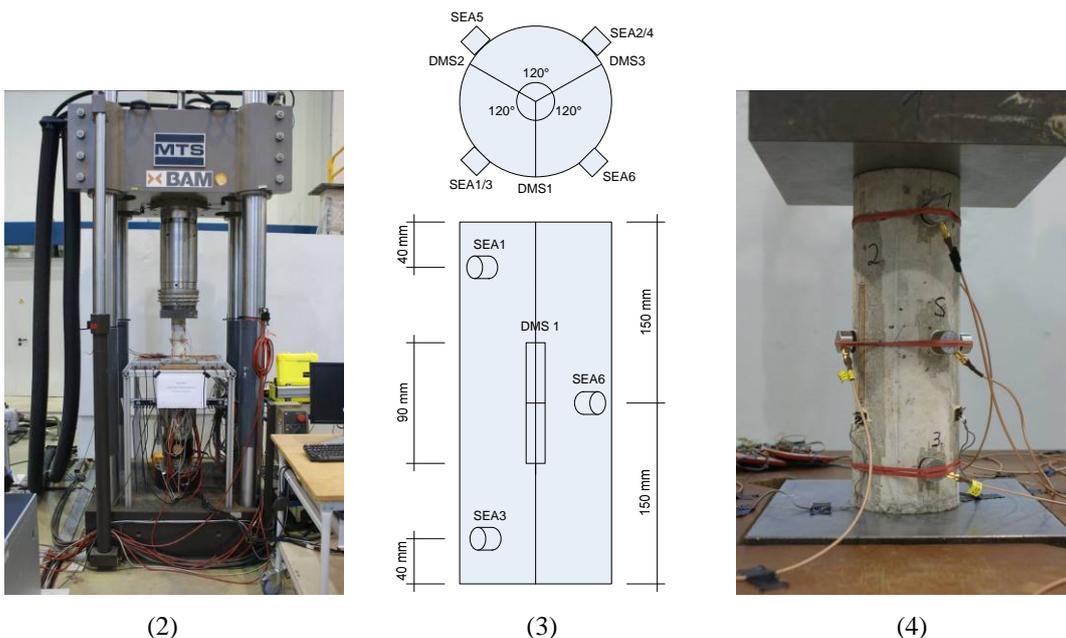


Abbildung 2 bis 4: (2) Für die Ermüdungsversuche verwendete servo-hydraulische Prüfmaschine, (3) Skizze zur Anordnung der DMS und der SE-Sensoren an der Betonprobe, (4) mit DMS, SE- und US-Sensoren applizierte Betonprobe in der Prüfmaschine

Die Messung der Schallemissionen erfolgte in den Versuchen über 6 Sensoren, die entsprechend der Skizze in Abbildung 3 auf der Betonprobe angeordnet waren. Daneben befanden sich, entsprechend Abbildung 3, prinzipiell immer auch 3 DMS auf den untersuchten Proben. Die Ankopplung der SE-Sensoren erfolgte mit Koppelmittel und gestaltete sich für die verhältnismäßig kurz andauernden niederzyklischen Versuche unproblematisch. Dagegen stellte die zuverlässige Ankopplung an die sich verformenden und reißenen Betonproben während der jeweils ca. 2 Wochen andauernden hochzyklischen Versuche eine Herausforderung dar. Während dieser Versuche wurden die Sensoren zusätzlich mit Gummibändern fixiert. In der Abbildung 4 ist eine solche mit Sensoren bestückte Probe in der Prüfmaschine zu sehen.

Die Durchführung der Ermüdungsversuche erfolgte in der in Abbildung 2 dargestellten, servo-hydraulischen 4-Säulen-Prüfmaschine der Firma MTS, deren obere Lasteinleitungsplatte sphärisch gelagert ist. Aufgebracht wurde die Last in den Versuchen kraft geregelt und mit einer Prüffrequenz von 5 Hz für die Sinuslast. Die begleitenden Messungen erfolgten mit der Schallemission kontinuierlich jeweils über den gesamten Versuch, während mit den DMS, der US und ARAMIS in bestimmten Intervallen gemessen wurde. Alle Betonprobekörper haben vor Beginn der Messungen in den Versuchen eine maximale Vorbelastung von $-0,65 \text{ N/mm}^2$ erfahren, was dem Lastniveau S_0 im Lastprogramm und damit ca. 1% der Bruchlast der Probekörper entspricht.

4. Versuchsdurchführung und Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Untersuchungen wurden als erstes niederzyklische Versuche durchgeführt, in denen sich Bruchlastspielzahlen zwischen 2.100 und 21.000 Zyklen ergeben haben. Im Anschluss daran ist mit der Durchführung der hochzyklischen Versuche begonnen worden, bei denen sich bisher Bruchlastspielzahlen zwischen 1.7 Mio. und 8.4 Mio. eingestellt haben. Da die hochzyklischen Versuche noch nicht abgeschlossen sind und die hierbei anfallenden Datenmengen sehr groß sind, liegen derzeit noch keine vollständigen Auswertungen der Messergebnisse vor. Im Folgenden werden deshalb vorwiegend die Ergebnisse der niederzyklischen Versuche dargestellt.

Der typische Verlauf der gemessenen Schallemissionsaktivitäten während eines Ermüdungsversuches ist in Abbildung 5 wiedergegeben. Die gemessenen Schallemissionen können im Wesentlichen als das Resultat von Rissbildung, Risswachstum sowie aus Reibung von Rissufern während der zyklischen Belastungen gedeutet werden. Der gemessene Verlauf zeigt deutlich die charakteristischen 3 Phasen des Ermüdungsprozesses. Zu Beginn der Lebensdauer wird eine erhöhte Schallemissionsaktivität gemessen, die im weiteren Verlauf sehr schnell abklingt. In dieser Phase I, bis ca. 10% der Lebensdauer, werden vermutlich anfängliche Spannungskonzentrationen im Betongefüge durch die Bildung von Mikrorissen abgebaut und so die Beanspruchung in weniger belastete Gefügebereiche umgelagert. Nachdem durch diesen Prozess die Beanspruchungen einigermaßen gleichmäßig im Materialgefüge verteilt sind, stellt sich nur noch eine sehr geringe Schallemissionsaktivität ein. Diese Phase II, von ca. 10% bis ca. 80% der Lebensdauer, macht den größten Teil der Lebensdauer aus, in der offenbar ein relativ stabiler Gefügestand mit einem stabilen Rissentwicklungsprozess erreicht ist. Ab einem gewissen Zeitpunkt nehmen zum Ende hin die Schallemissionsaktivitäten wieder deutlich zu, wodurch der Übergang in die letzte Phase III der Lebensdauer gekennzeichnet ist. Die Schallemissionsaktivitäten steigen in dieser Phase schließlich bis zum Versagen der Betonprobe extrem stark an und überschreiten deutlich das zum Versuchsbeginn erreichte Niveau. Ursache ist vermutlich ein am Ende der Phase II erreichter Grad der Gefügeschädigung, bei dem die Mikrorisse soweit gewachsen sind bzw. eine so hohe

Dichte erreicht haben, dass sie zu größeren Rissen zusammenwachsen, wodurch ein instabiles Risswachstum ausgelöst wird. In bestimmten Bereichen des Betongefüges kommt es in Abhängigkeit der Beanspruchung, der Randbedingungen, der Probenform und des Materialgefüges selbst schließlich zu sehr starken Lokalisierungen der Rissbildung, die zur Ausbildung von Makrorissen und damit zum Bruch des Betonkörpers führen.

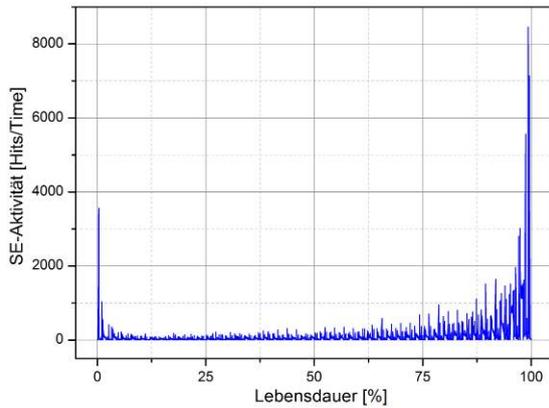


Abbildung 5: Gemessene Schallemissionsaktivität über die Probenlebensdauer

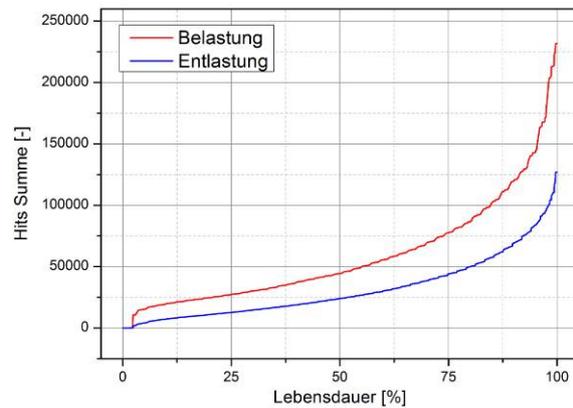


Abbildung 6: Summenverläufe der Ereignisse getrennt für Belastungen und Entlastungen

Der zugehörige Verlauf der Summenkurve für die gemessenen Ereignisse ist in der Abbildung 6 dargestellt. Anhand des bei der SE-Messung mit eingespeisten Kraftsignals, konnten bei der Ermittlung der Summenkurve die Ereignisse, die während einer Laststeigerungs- bzw. einer Lastverringerungsphase aufgetreten sind, unterschieden werden. Das Ergebnis sind die beiden Kurven in Abbildung 6. Die gemessene Belastungskurve zeigt erwartungsgemäß eine deutlich höhere Anzahl von Schallereignissen als die Entlastungskurve. Das Risswachstum und die Rissneubildung erfolgen vorrangig in der Belastungsphase. Trotzdem zeigt die Entlastungsphase auch einen beträchtlichen Anteil an Schallereignissen, der vermutlich aus Reibung von Rissufer, aber auch aus Rissentwicklung resultiert. Im heterogenen Materialgefüge des Betons entstehen unter der Druckbeanspruchung sehr komplexe, lokale mehraxiale Spannungszustände. Diese Spannungszustände und das ebenfalls komplexe nichtlineare Materialverhalten der Einzelkomponenten führen dazu, dass an bestimmten Stellen des Materialgefüges vermutlich Rissentwicklung auch während der Entlastung erfolgt, vgl. Hohberg [1].

Das in den Versuchen verwendete Lastprogramm, vgl. Abbildung 1, enthält neben der Sinuslast in regelmäßigen Abständen lineare Lastrampen. In diesen Belastungsphasen erfolgen zwei fast vollständige Entlastungen auf S_0 ($-0,65 \text{ N/mm}^2$), jeweils gefolgt von einer Belastung auf S_{max} (-47 N/mm^2). Die während dieser Belastungsphasen gemessenen Schallemissionen sind mit den zugehörigen Kraftverläufen für verschiedene Zeitpunkte der Lebensdauer in den Abbildungen 7 bis 9 dargestellt.

Abbildung 7 zeigt die ersten Belastungen zum Beginn des Versuches direkt nach der Bestimmung des Anfangs-E-Moduls. Nach Überschreiten der E-Modul-Last (-19 N/mm^2) setzt eine stark steigende SE-Aktivität ein, die mit Beginn der Entlastung sofort wieder auf fast Null zurückgeht. Bei erreichter Entlastung ist nur eine gering erhöhte SE-Aktivität auszumachen und auch die nachfolgende zweite Belastung führt nur noch im obersten Lastbereich zu einer erhöhten SE-Aktivität. Diese ist deutlich geringer als bei der ersten Belastung, spiegelt somit den abklingenden Prozess in der Phase I wieder, zeugt aber auch vom weiter fortschreitenden Schädigungsprozess im Material.

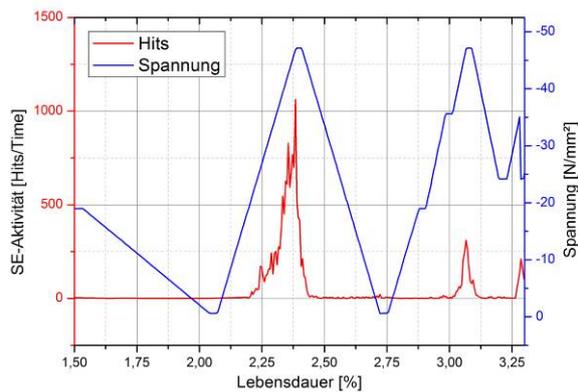


Abbildung 7: SE-Aktivitäten zum Beginn der Lebensdauer

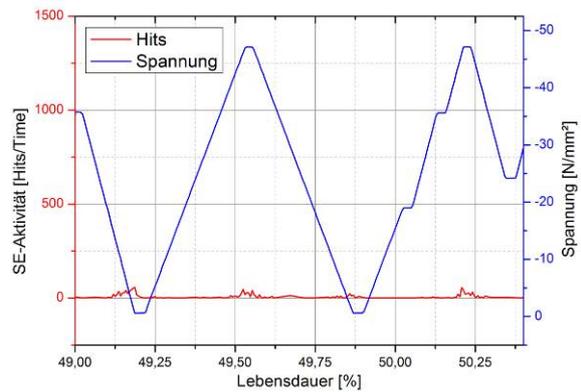


Abbildung 8: SE-Aktivitäten in der stabilen Phase II in der Mitte der Lebensdauer

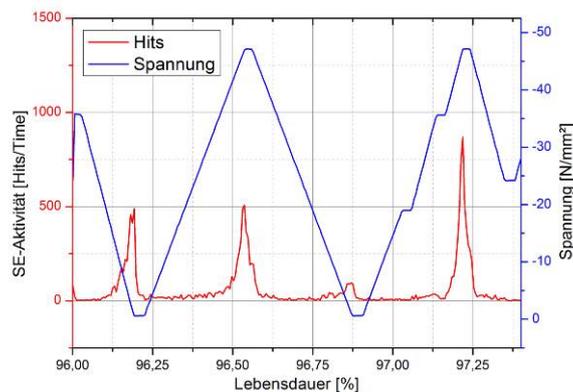
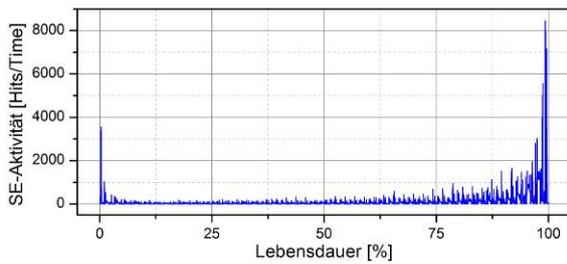


Abbildung 9: SE-Aktivitäten in der instabilen Endphase zum Ende der Lebensdauer

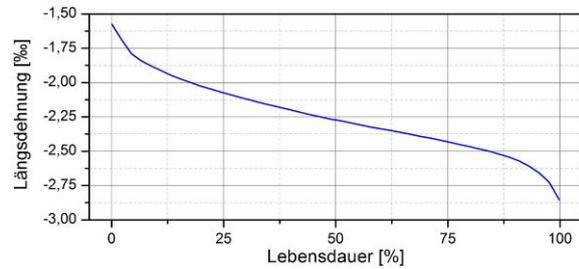
Die Messergebnisse während der linearen Belastungsphase bei 50% der Lebensdauer sind in Abbildung 8 wiedergegeben. Sie zeigen, dass nach wie vor Schallemissionen sowohl bei Be- als auch bei Entlastung entstehen, welche jedoch auf einem sehr geringen Niveau liegen. Es zeigt sich aber auch, dass die SE-Aktivität bei der ersten und zweiten Belastung annähernd gleich groß ist, was Ausdruck für die stabile Rissentwicklungsphase mit einer kontinuierlich fortschreitenden Schädigungsentwicklung ist.

In Abbildung 9 sind schließlich die Messergebnisse aus der Endphase des Ermüdungsversuches dargestellt. Hier stellt sich ein gänzlich anderes Bild dar. Generell liegen hier die SE-Aktivitäten wieder auf einem hohen Niveau. Nur nehmen jetzt die SE-Aktivitäten von der ersten zur zweiten Belastung hin deutlich zu und zeigen so den nun erreichten instabilen Charakter der Rissentwicklungsprozesse in dieser Phase III. Die anhaltende Steigerung in der Schädigungsentwicklung führt letztendlich, trotz gleich bleibender Belastung, bis zum Versagen der Betonprobe.

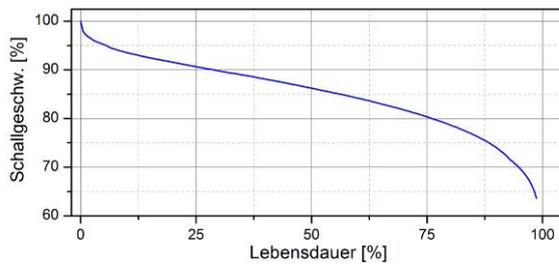
Einen Vergleich mit den Ergebnissen aus den Messungen der Dehnungen, des E-Moduls und der Ultraschall-Laufzeiten während der Ermüdungsversuche stellen die Abbildungen 10 bis 13 dar. Alle drei Messverläufe zeigen den in den SE-Messungen festgestellten, charakteristischen 3-phasigen Verlauf, bei dem größere Veränderungen in den Messkurven mit den Phasen erhöhter SE-Aktivität zusammenfallen.



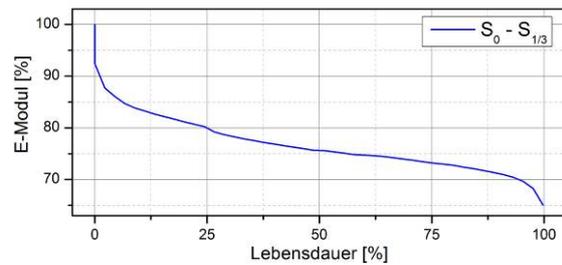
(10)



(11)



(12)



(13)

Abbildungen 10 bis 13: Vergleich der (10) Schallemissionsaktivität über die Lebensdauer mit (11) Längsdehnungsentwicklung des Betons, (12) Entwicklung der Ultraschall-Laufzeiten im Beton und (13) Entwicklung des E-Moduls des Betons zwischen S_0 und $S_{1/3}$ über die Lebensdauer.

Abbildung 11 gibt die Dehnungsentwicklung unter Maximallast S_{\max} wieder. Hier führen reine plastische Verformungen und die Schädigungen des Materialgefüges durch Mikrorisse zu einer fortlaufenden Zunahme in der Probenstauchung. Dies zeigt sich sowohl in den Dehnungen unter S_{\max} als auch in den bleibenden Dehnungen, die sich unter S_0 einstellen.

Der Verlauf des ermittelten E-Moduls über die Lebensdauer ist in der Abbildung 13 wiedergegeben. Dieser wird vor allem durch die Gefügeflockerung infolge der fortschreitenden Mikrorissbildung beeinflusst, die so zu einer fortlaufenden Reduzierung des E-Moduls führt. Bemerkenswert ist hier nur, dass die größte Reduzierung des E-Moduls in der Phase I erfolgt, obwohl die größte SE-Aktivität in der Phase III am Versuchsende gemessen wird. Hierzu stehen genauere Auswertungen noch aus.

Der in Abbildung 12 dargestellte Verlauf der Ultraschall-Laufzeiten stammt im Gegensatz zu den anderen Messergebnissen aus einem hochzyklischen Versuch, da die geringe Datenmenge in den niederzyklischen Versuchen keine vergleichbare Auswertung ermöglichte. Prinzipiell spiegelt der dargestellte Verlauf aber auch das Verhalten in den niederzyklischen Versuchen wieder. Die Ultraschall-Laufzeit im Beton wird direkt vom Zustand der Gefügestruktur beeinflusst, so dass entstehende Mikrorisse und Gefügeflockerungen zu Reduzierungen in den Schallgeschwindigkeiten führen. Über die Lebensdauer zeigt der Verlauf der Schallgeschwindigkeiten, wie die anderen Messergebnisse auch, eine fortschreitende Reduzierung, die auf die zunehmende Gefügeschädigung hindeutet. Im Gegensatz zu den Dehnungen und dem E-Modul weist die Entwicklung der US-Geschwindigkeit einen direkten Zusammenhang zwischen der Höhe ihrer Änderung und der Höhe der SE-Aktivitäten auf.

Prinzipiell zeigen die Verläufe der verschiedenen Messungen in allen durchgeführten Ermüdungsversuchen qualitativ die gleichen Formen wie die hier beispielhaft dargestellten Messergebnisse. Die bis zum Ermüdungsversagen erreichbaren Lastwechselzahlen streuen beim Beton allerdings sehr stark und können sich für gleiche Randbedingungen um bis zu vier Zehnerpotenzen unterscheiden. Daher ziehen sich die einzelnen Phasen des Ermüdungsprozesses jeweils über sehr unterschiedliche Zeitspannen in den verschiedenen Versuchen hin. Detailliertere Darstellungen speziell zu den Messergebnissen neben den SE-Messungen finden sich in Thiele [7].

5. Zusammenfassung und Ausblick

In den durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde der im Beton während nieder- und hochzyklischer Belastungen ablaufende Ermüdungsprozess mit verschiedenen Messtechniken, darunter auch mit Schallemissionsmessungen, untersucht. Während der zyklischen Beanspruchung findet im Beton eine fortschreitende Degradation der Materialeigenschaften statt, die einem nichtlinearen Evolutionsprozess unterworfen ist. Die SE-Messung hat in den Versuchen die Beobachtung der ablaufenden Rissentwicklungsprozesse im Betongefüge ermöglicht. Diese sind die wesentliche Ursache für die Schädigungsentwicklung im Materialgefüge und die damit einhergehende Degradation der Materialeigenschaften. Im Vergleich zu den anderen eingesetzten Messtechniken erlaubt die SE-Messung als einzige die direkte Verfolgung der ablaufenden Schädigungsprozesse über die Detektion der Rissaktivitäten. Somit kommt der SEA hierbei eine bedeutende Rolle zu, da die anderen Messtechniken nur die resultierenden Änderungen in den Materialeigenschaften erfassen.

Um schließlich eine genauere Beschreibung der über die Lebensdauer im Materialgefüge ablaufenden Veränderungen zu ermöglichen, sind weiterführende experimentelle Untersuchungen geplant. Darin sollen zusätzlich mit Hilfe der Mikroskopie und der Computertomographie die Gefügeschädigungen durch die Mikrorisse sichtbar gemacht werden.

Zum einen soll damit die Grundlage für ein Konzept geschaffen werden, zur Erfassung und Bewertung von Ist-Zuständen bestehender Betonstrukturen im Hinblick auf ermüdungsinduzierte Schädigungen mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüftechniken. Zum anderen ist die Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Ermüdungsprozesses im Beton vorgesehen um diesbezügliche numerischen Betrachtungen zu ermöglichen.

6. Referenzen

- [1] Hohberg, R.: Zum Ermüdungsverhalten von Beton. Dissertation, Technische Universität Berlin 2004.
- [2] Holmen, J.O.: Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. PhD Thesis, Division of concrete structures, Trondheim: The Norwegian Institute of Technology, 1979.
- [3] Hsu, T.T.C.: Fatigue of plain concrete. ACI J. 78(4), S. 292-305, 1981.
- [4] Kim, J.K., Kim, Y.Y.: Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. Cem. Conc. Res. 26(19), S. 1513-1523, 1996.
- [5] Klausen, D.: Festigkeit und Schädigung von Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung, Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1978.
- [6] Spooner, D.C., Dougill, J.W.: A quantitative assessment of damage sustained in concrete during compression. Mag. Conc. Res. 27(92), S. 151-160, 1975.
- [7] Thiele, M., Baeßler, M., Rogge, A.: Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen. In: Tagungsband des 52. Forschungskolloquium des DAfStb, Berlin, 2011.