

Ermüdungsversuche an großformatigen vorgespannten Betonbalken

Dennis Birkner¹ und Steffen Marx¹

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

KURZFASSUNG:

Zur besseren Einschätzung des Ermüdungsverhaltens realer Bauteile sind großformatige Ermüdungsversuche gegenüber Zylinderdruckversuchen geeigneter, da in ihnen Prozesse wie lokale Steifigkeitsänderungen und Spannungumlagerungen realitätsnäher berücksichtigt werden. In diesem Beitrag wird ein Versuchskonzept für großformatige Betonbalken unter Ermüdungsbeanspruchung vorgestellt. Die geplanten Ermüdungsversuche werden zudem in einem numerischen Modell simuliert. Als Ergebnis der Berechnungen lässt sich ein sukzessiver Schädigungsfortschritt erkennen, der von den Randzonen des Querschnitts in Balkenmitte mit zunehmender Beanspruchungsdauer in das Querschnittsinnere fortschreitet. Infolge der ermüdungsbedingten lokalen Steifigkeitsänderungen kommt es zu Spannungumlagerungen, sodass die ursprünglich stark beanspruchten Randzonen entlastet werden und sich die Lebensdauer des Bauteils verlängert.

Keywords: Betonermüdung, Lebensdauer, Resonanz, Schädigung, Spannungumlagerungen

ABSTRACT:

For a better assessment of the fatigue behaviour of real structures, large-scale fatigue tests are more suitable than cylinder compression tests, since effects such as local stiffness changes and stress redistributions can be reproduced more realistically. This article presents an experimental setup for large-scale concrete beams subjected to fatigue loading. Additionally, the planned fatigue tests are simulated with a numerical model. The results of the numerical investigations show a successively increasing damage propagating with increasing load cycles from the edges in the middle of the beam into the centre of the cross-section. Stress redistributions occur as a result of local stiffness changes. The initially high stressed edges are relieved and the stresses in the centre of the beam increase, which extends the lifetime of the component.

Keywords: Concrete fatigue, Lifetime, Resonance, Damage, Stress redistributions

1 EINLEITUNG

Das Ermüdungsverhalten von Beton wird bisher überwiegend an zylindrischen Prüfkörpern erforscht. Hierbei stehen besonders die Einflüsse aus Beanspruchungsniveau, Belastungsfrequenz und Umweltbedingungen auf die Lebensdauer im Fokus der Untersuchungen (Marx et al. 2017). Die bisherigen Erkenntnisse sind jedoch nur bedingt auf reale Bauteilgeometrien übertragbar, da diese nicht nur einaxiale zentrische Beanspruchungen erfahren. Bei zyklisch beanspruchten Bauwerken wie Brücken und Windenergieanlagen treten die Ermüdungsbeanspruchungen meist in Form von Biegemomenten auf, die im Querschnitt eine linear veränderliche Spannungsverteilung hervorrufen. Dies führt in den stärker beanspruchten Randbereichen zu einer stärkeren Materialdegradation und damit lokalen Steifigkeitsänderung. Als Folge lagern sich die Spannungen in die weniger beanspruchten Querschnittsbereiche im Bauteilinneren um und vergrößern somit die globale Lebensdauer der Bauteile. Dieses Phänomen kann nur in großformatigen Ermüdungsuntersuchungen beobachtet werden. Nachfolgend wird das Versuchskonzept und eine numerische Modellierung der am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover durchgeführten Untersuchungen vorgestellt.

2 ERMÜDUNGSUNTERSUCHUNGEN AN BETON

2.1 Ermüdungsuntersuchungen an kleinformatischen Prüfkörpern

Die Mehrheit der bisher durchgeführten Ermüdungsuntersuchungen an Betonprüfkörpern zielte auf die Lebensdauerabschätzung mit ertragbaren Lastwechselzahlen ab. Hierfür wurden in unterschiedlichen Versuchsreihen (Holmen 1979, Zhao et al. 1996, Lohaus et al. 2012) an zylindrischen Prüfkörpern Wöhlerversuche durchgeführt, auf denen u. a. die im Model Code 2010 (FIB 2013) beschriebenen Wöhlerkurven basieren. Bei diesen einstufigen einaxialen Ermüdungsuntersuchungen wurde in den Betonprüfkörpern ein charakteristischer S-förmiger Dehnungsverlauf über die Beanspruchungsdauer festgestellt, vgl. Bild 1. Dieser resultiert aus einer sukzessiven Steifigkeitsdegradation infolge einer Materialzermürbung (Hohberg 2004). Gemessene Prüfkörpererwärmungen lassen vermuten, dass durch die Reibung der Mikrorissflanken ein Teil der zugeführten Energie in Wärme umgewandelt wird. Infolge dieser Erwärmung kommt es zu einer inhomogenen Ausdehnung im Gefüge der Prüfkörper, die ebenfalls einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten nimmt (Bode 2019).

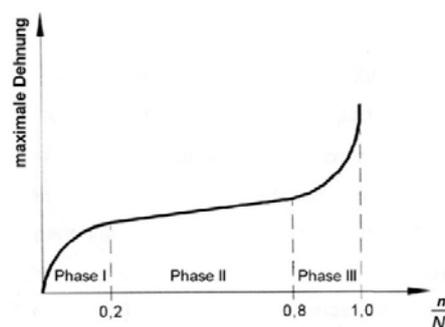


Bild 1: Dreiphasiger Dehnungsverlauf von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung (Bazant et al. 1993)

Die Ermüdungsuntersuchungen an kleinformatischen Prüfkörpern sind gut geeignet um die beschriebenen Phänomene zu erforschen und die Lebensdauer von Beton unter einaxialer Ermüdungsbeanspruchung quantifizieren zu können. Zur Übertragung der Erkenntnisse auf reale biegebeanspruchte Bauteile sind jedoch gesonderte Untersuchungen notwendig, da hierbei weitere Effekte die Ermüdungslebensdauer des Betons beeinflussen.

2.2 Ermüdungsuntersuchungen an großformatigen Prüfkörpern

Im Gegensatz zu axial beanspruchten Prüfkörpern kommt es bei einer Biegebeanspruchung zu einem linearen Dehnungs- und Spannungsgradienten im Querschnitt. Je nach Größe der einwirkenden Normalkraft können auch zugbeanspruchte Bereiche entstehen. Diese ungleichmäßige Dehnungs- und Spannungsverteilung hat zur Folge, dass die stärker beanspruchten Randbereiche eine größere Materialdegradation erfahren. Hierdurch kommt es bei weiterhin linearem Dehnungsverlauf zu Spannungsumlagerungen in die weniger beanspruchten Querschnittsbereiche der Prüfkörper. Die bereits geschädigten Bereiche werden teilweise entlastet, so dass das Bauteil insgesamt eine größere Anzahl an Lastwechseln aufnehmen kann. Dies führt zu einer Erhöhung der Gesamtlebensdauer der untersuchten Prüfkörper.

Dieser Effekt wurde zuerst in Versuchen an exzentrisch beanspruchten Betonprismen von Ople & Hulsbos (1966) beobachtet, bei denen die Bruchlastwechselzahl der Prüfkörper mit zunehmender Exzentrizität der Axialbeanspruchung anstieg. Darauf aufbauend führte Dillmann (1981) exzentrische Ermüdungsversuche an Betonprismen durch, die der isolierten Betondruckzone eines biegebeanspruchten Stahlbetonbalkens entsprechen, vgl. Bild 2 (links).

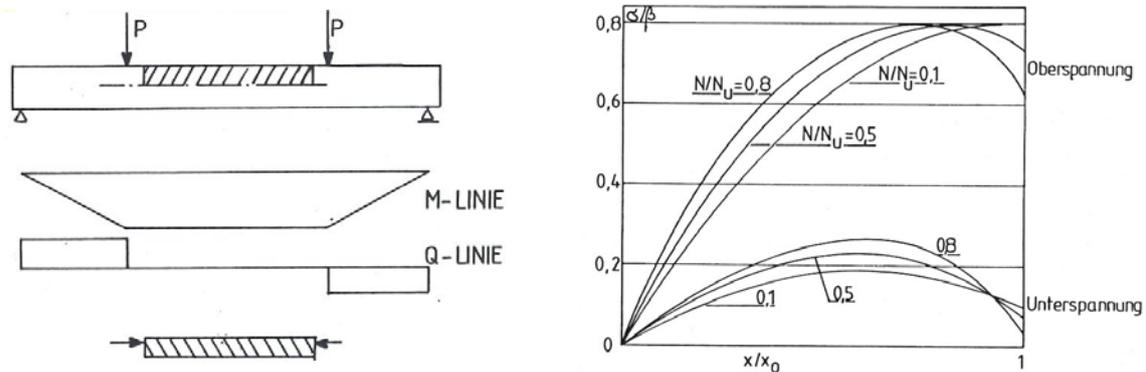


Bild 2: Ableitung der Betonprismen (links) und Auswertung der Spannungsverteilung im Querschnitt über die Beanspruchungsdauer (rechts) (Dillmann 1981)

Da die Spannungen messtechnisch nicht direkt bestimmt werden konnten, wurde die Versuchsreihe zweigeteilt durchgeführt. Im ersten Teil wurden zunächst kraftgeregelte exzentrische Versuche an den Prismen durchgeführt, um die Verformungsgeschichte der einzelnen Betonprismen aufzuzeichnen. Im zweiten Teil wurden Betonprismen weggeregelt zentrisch mit den zuvor ermittelten Verformungsgeschichten beansprucht und die hierfür notwendige Kraft der Prüfmaschine aufgezeichnet. Daraus konnte hergeleitet werden, dass sich die Spannungen der stärker beanspruchten Randfasern mit zunehmender Lastwechselzahl verringern und in den Querschnitt hinein wandern, vgl. Bild 2 (rechts).

Dieses Phänomen wurde in Ermüdungsversuchen an großformatigen Balkenprüfkörpern von Diederley et al. (2018) untersucht. In diesen Versuchen konnte mit Hilfe von Ultraschallmessungen eine Steifigkeitsabnahme am oberen und unteren Querschnittsrand festgestellt werden. In einer numerischen Nachrechnung konnte dieser Effekt bestätigt und zudem die daraus resultierenden Spannungsumlagerungen analysiert werden (Birkner 2019), vgl. Bild 3.

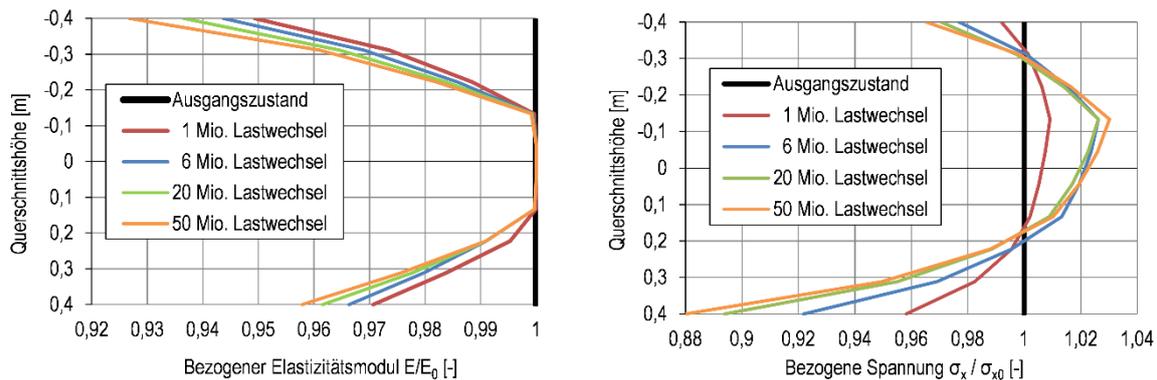


Bild 3: Verlauf des bezogenen Elastizitätsmoduls (links) und der bezogenen Spannung (rechts) über die Querschnittshöhe (Birkner 2019)

Durch die Entlastung der Randfasern ist der Betonprüfkörper in der Lage, zusätzliche Lastwechsel zu ertragen, wodurch die Lebensdauer des Bauteils erhöht wird. Die Erkenntnisse dieser Versuchsreihe sollen in weiterführenden Untersuchungen an einer neuen Querschnittsgeometrie angewendet und bestätigt werden. Diese Untersuchungen werden nachfolgend beschrieben.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT DEM RESONANZGROßPRÜFGERÄT

3.1 Resonanzprüfverfahren

Die Ermüdungsuntersuchungen an den großformatigen Betonbalken werden mit dem Resonanzgroßprüfgerät des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Bei den Untersuchungen wird das Resonanzphänomen ausgenutzt um die erforderlichen Beanspruchungsniveaus zu erreichen. Vier paarweise gegenläufig ausgerichtete Unwuchtmotoren werden nahe der ersten Biegeeigenfrequenz des Prüfkörpers betrieben und bringen diesen in den Resonanzbereich. Infolge der dynamischen Vergrößerung der Beanspruchung können die notwendigen großen Spannungen an den Prüfkörperändern mit vergleichsweise geringen Unwuchtkräften erzeugt werden. Während des Versuchs werden die Auflagerkräfte kontinuierlich aufgezeichnet. Die Regelung der Unwuchtmotoren basiert auf diesen Messdaten, sodass die Beanspruchung über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten werden kann. Aufgrund einer hohen Erregerfrequenz von bis zu 25 Hz lassen sich mit dieser Prüftechnik bei gleicher Versuchsdauer mit deutlich geringerem Energieaufwand wesentlich größere Lastwechselzahlen realisieren als dies mit einer üblichen hydraulischen Prüftechnik möglich wäre. Das Resonanzprüfsystem ist in (Herrmann 2018) ausführlich beschrieben.

3.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau entspricht einem Vier-Punkt-Biegeversuch. Der Betonbalken ist an beiden Enden gelenkig auf Stahlrollen gelagert und konstruktiv gegen eine Längsverschiebung gesichert. Der Fixpunkt liegt in Balkenmitte wodurch die Längsverformungen minimiert werden. Über zwei in Balkenmitte mit einem gegenseitigen Abstand von 1,40 m angeordnete Querhäupter werden die vertikalen Einwirkungen in Form von vertikalen Spannstäben aufgebracht. Diese werden im Spannkeller unterhalb des Versuchsstands mit Federn vorgespannt. Darüber hinaus sind die Querhäupter mit Stahlgewichten ballastiert. Mit der vertikalen Federvorspannung wird das Spannungsniveau im Balkenprüfkörper eingestellt. Die Ballastierung dient zur Justierung der

Eigenfrequenz des Schwingsystems. In Balkenlängsrichtung werden die Betonprüfkörper über Gewindestangen ohne Verbund vorgespannt, um Zugspannungen an der Unterseite des Querschnitts zu vermeiden. Hierzu werden die Spannglieder exzentrisch unterhalb des Schwerpunkts angeordnet. Gemeinsam mit dem Eigengewicht des Prüfkörpers entsprechen diese Beanspruchungen den statischen Beanspruchungen während des Versuchs. Die dynamischen Beanspruchungen werden während der Versuchsdurchführung durch vier Unwuchtmotoren erzeugt. Diese sind paarweise an den beiden Querhäuptern angebracht.

3.3 *Versuchsstand- und Prüfkörperauslegung*

Ziel der Ermüdungsuntersuchungen an dem Biegebalken ist ein Betondruckversagen infolge der zyklischen Beanspruchung. Die Dauer bis zum Versagen des Prüfkörpers hängt von der Wahl des Ober- und Unterspannungsniveaus des am stärksten beanspruchten Querschnittsbereichs ab. Basierend auf den Erkenntnissen aus vorherigen Forschungsprojekten muss das Beanspruchungsniveau bei großformatigen Ermüdungsuntersuchungen ausreichend groß sein, damit es trotz der Spannungumlagerungen zu einem Betonversagen kommt. Daher wird eine bezogene Oberspannung $S_o = \sigma_o/f_{cm} = 0,75$ und eine bezogene Unterspannung $S_u = \sigma_u/f_{cm} = 0,05$ gewählt, die an dem untersuchten oberen Querschnittsrand anvisiert werden. Als Prüfkörperquerschnitt wird ein T-Querschnitt gewählt, da dieser im Vergleich zum Rechteckquerschnitt bei gleicher Beanspruchung und Querschnittshöhe eine größere Randspannung des Steges aufweist. Da ein Betondruckversagen untersucht werden soll, muss die maximal beanspruchte Randfaser im Druckbereich liegen. Daher wird der Balken als umgedrehter T-Querschnitt mit einer Querschnittshöhe von 0,40 m ausgeführt. Zur effektiven Ausnutzung des Resonanzprinzips soll die erste Biegeeigenfrequenz des Balkens im oberen Frequenzspektrum der Unwuchtmotoren zwischen 0 Hz bis 25 Hz liegen. Dabei beeinflussen auch die übrigen Querschnittsabmessungen, die Prüfkörperlänge und die Ballastierung die Biegeeigenfrequenz des Prüfkörpers. Für eine Stützweite von 4,00 m und ein zusätzliches Gesamtgewicht der Ballastierung von etwa 760 kg je Querhaupt beträgt die Biegeeigenfrequenz des Balkens etwa 18,3 Hz. Da während der gesamten Versuchsdauer an der Balkenunterseite keine Zugspannungen auftreten sollen, müssen diese durch eine Längsvorspannung überdrückt werden. Gleichzeitig darf die Druckspannung an der Balkenoberseite nicht zu groß werden, sodass eine exzentrische Anordnung der Spannkraft notwendig ist. Zur Einleitung der gewählten Vorspannkraft von 2,4 MN wird an beiden Balkenenden ein rechteckiger, bewehrter Vollquerschnitt ausgebildet. Zwischen den Vollquerschnitten über den Auflagern und den Querhäuptern wird eine Querkraftbewehrung im Steg angeordnet. Der Bereich in Balkenmitte wird hingegen ohne Längs- und Querbewehrung ausgeführt, um ein reines Betonermüdungsversagen zu erzielen. Bild 4 zeigt die Querschnittsgeometrie und Bild 7 den zugehörigen Versuchsaufbau.

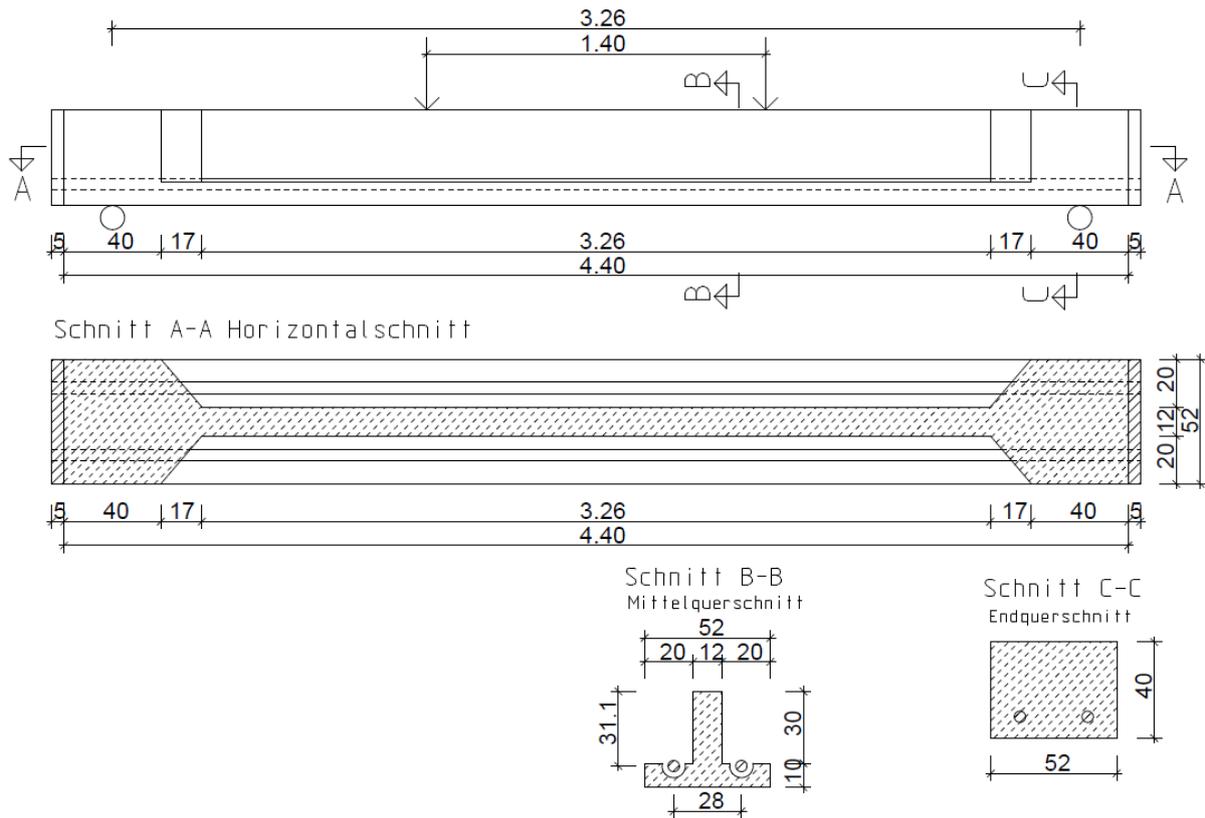


Bild 4: Geometrie der Balkenprüfkörper

Alle Beanspruchungen werden derart gewählt, dass am oberen Querschnittsrand in Feldmitte die zuvor genannten Ober- und Unterspannungsniveaus erreicht werden. Mit der Summe aller statischen Einwirkungen wird das bezogene Mittelspannungsniveau $S_m = 0,40$ bestimmt (Bild 5). Die dynamische Beanspruchung entspricht der Differenz zwischen diesen Größen (Bild 6).

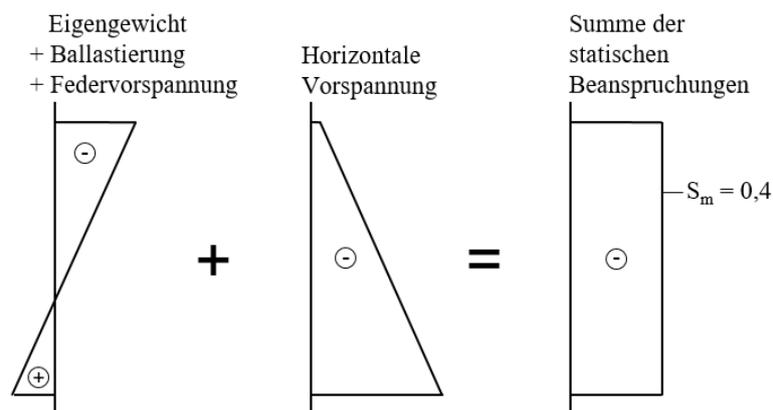


Bild 5: Zusammensetzung der statischen Beanspruchungen

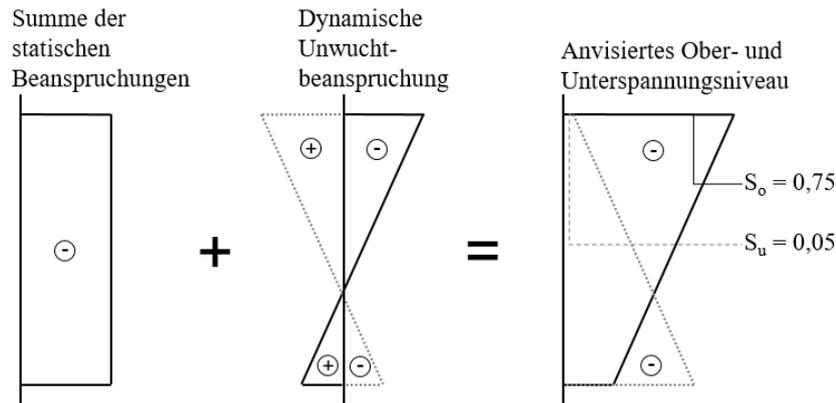


Bild 6: Zusammensetzung des Ober- und Unterspannungsniveaus

Die dynamische Beanspruchung hängt von zwei Größen ab: zum einen von der durch die Unwuchtmotoren erzeugten Zentrifugalkraft $F_{Unwucht}$, die wiederum nach Gl. (1) von der Unwuchtmasse m , dem Drehradius des Unwuchtmotors e und der Kreisfrequenz Ω beeinflusst wird. Zum anderen von der dynamischen Vergrößerung V , die nach Gl. (2) eine Funktion der Bauteileigenfrequenz ω_d , der Dämpfung ζ und wiederum von der Kreisfrequenz der Unwuchterregung ist.

$$F_{Unwucht} = m \cdot e \cdot \Omega^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{\left(\frac{\Omega}{\omega_d}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_d}\right)^2\right)^2 + 4\zeta^2 \cdot \left(\frac{\Omega}{\omega_d}\right)^2}} \quad (2)$$

Die Dämpfung wird mit $\zeta = 0,015$ angenommen, die Unwuchtmasse und der Drehradius sind durch den Unwuchtmotor vorgegeben. Mit diesen Werten ergibt sich für die betrachtete Konfiguration eine notwendige Erregerfrequenz $\omega_d = 18,07$ Hz, die am oberen Querschnittsrand unter Berücksichtigung der dynamischen Vergrößerung das gewünschte Beanspruchungsniveau erzeugt. Bild 7 veranschaulicht die Wirkungsweise am Prüfkörper.

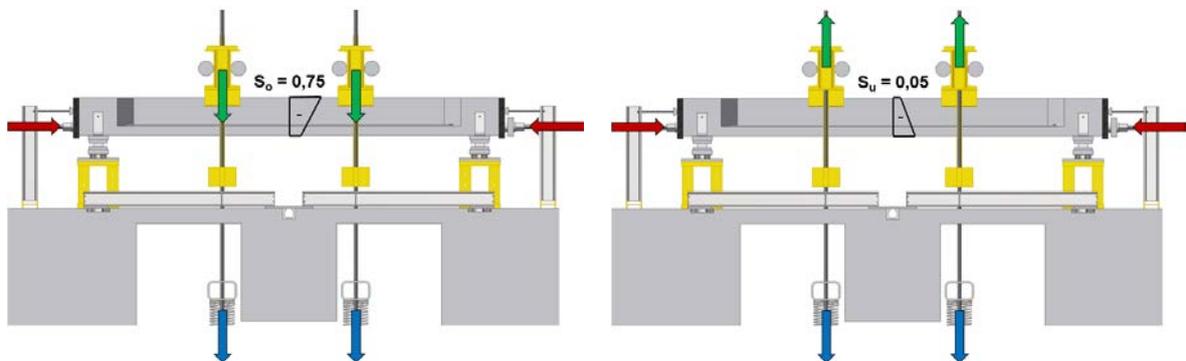


Bild 7: Schematische Darstellung der Belastungen auf dem Oberspannungsniveau (links) und dem Unterspannungsniveau (rechts): Längsvorspannung (rot), vertikale Federvorspannung (blau) und dynamische Unwuchtlast (grün)

3.4 Messtechnik

Die Auflagerkräfte werden mit Kraftaufnehmern gemessen und als Regelgröße für die Unwuchtmotoren verwendet. Die Kräfte in den vertikalen Spannstrangen werden mit kalibrierten Dehnungsmessstreifen (DMS) in Vollbrückenschaltung und die Kräfte in den horizontalen Spannstrangen mit Ringkraftaufnehmern aufgezeichnet. In Balkenmitte werden die Betondehnungen mit DMS, die Oberflächentemperatur mit Thermoelementen und die Veränderung des Betongefüges mit Ultraschallsensoren gemessen. Die Anordnung der einzelnen Sensoren ist in Bild 8 dargestellt.

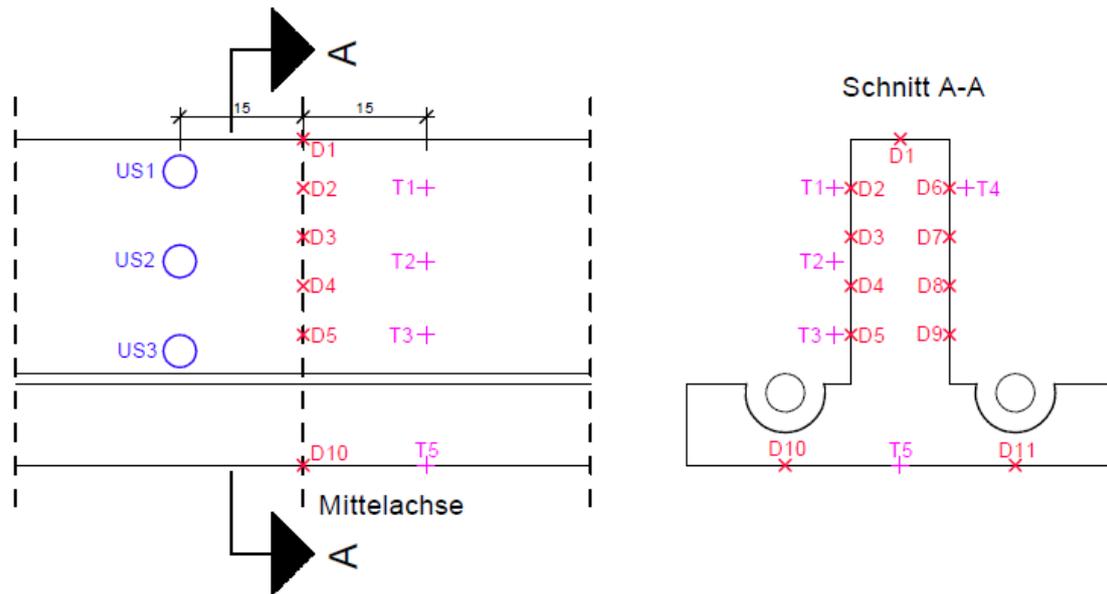


Bild 8: Anordnung der Sensoren in Balkenmitte:
DMS (D), Thermoelemente (T) und Ultraschallsensoren (US)

Die gemessenen Betondehnungen ermöglichen einen Rückschluss auf die Verformungen des Prüfkörpers und auf eine eintretende Schädigung, die durch eine Dehnungszunahme über die Beanspruchungsdauer erkennbar wird. Infolge der hochfrequenten Beanspruchung kommt es zu einer Erwärmung des Prüfkörpers, wodurch zusätzliche Dehnungen resultieren. Um diese quantifizieren zu können, werden die Temperaturen über die Steghöhe erfasst. Das Ultraschallmesssystem besteht aus Sendeköpfen auf der einen Stegseite und Empfängerköpfen auf der gegenüberliegenden Seite. In regelmäßigen Abständen wird ein Ultraschallsignal durch den Steg gesendet und auf der anderen Seite aufgezeichnet. Aus den Messdaten der Ultraschalllaufzeit soll auf eine Veränderung des dynamischen Elastizitätsmoduls geschlossen werden (von der Haar et al. 2016).

4 NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN

4.1 Numerisches Modell

Die Versuche werden mit dem Finite-Elemente-Programm ANSYS Mechanical analysiert. Dem numerischen Modell liegt das additive Dehnungsmodell nach von der Haar et al. (2017) zu Grunde. Die Betondehnungen unter Ermüdungsbeanspruchung setzen sich hierbei aus vier Anteilen zusammen: einem elastischen, einem plastischen, einem viskosen und einem temperaturbedingten Dehnungsanteil. Die einzelnen Lastwechsel werden zu Lastkollektiven zusammengefasst und in einem iterativen Prozess auf das System aufgebracht. Nach jedem Iterationsdurchlauf erfolgt eine schädigungstheoretisch basierte Steifigkeitsanpassung der einzelnen Elemente, in der die Schädigung nach der Palmgren-Miner-Hypothese akkumuliert wird. Die Schädigung wird anschließend über eine aus Versuchsdaten ermittelte Degradationsfunktion in eine Elastizitätsmodulverringerung umgerechnet, mit der die Materialdegradation modelliert werden kann. Die einzelnen Elemente sind mit einem linear elastischen Materialgesetz implementiert, allerdings lässt sich aufgrund der ergänzten Schädigungsberechnung ein nichtlineares Bauteilverhalten simulieren. Der implementierte Berechnungsalgorithmus ist in (Birkner et al. 2019) erläutert.

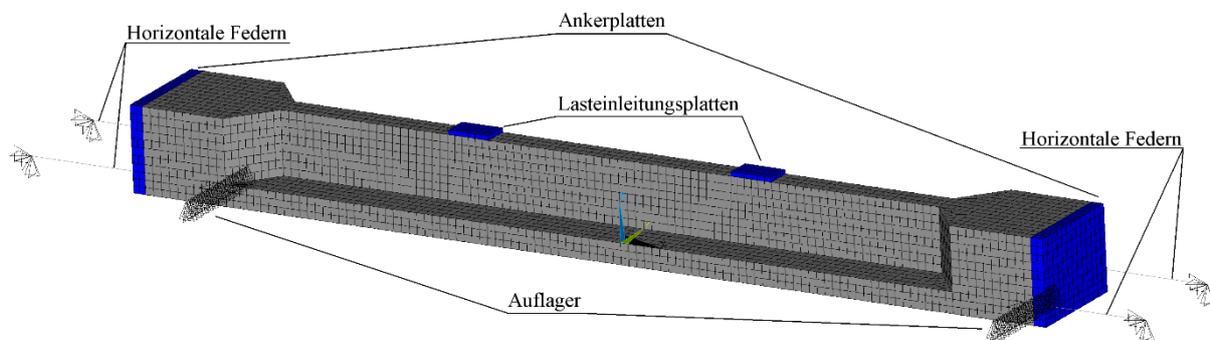


Bild 9: Numerisches Modell des Balkenprüfkörpers

Bild 9 zeigt das numerische Modell des Prüfkörpers. Der Balken ist an den Auflagerpunkten in vertikaler Richtung starr und in horizontaler Richtung zur Sicherstellung der numerischen Stabilität mit weichen Federn festgehalten. Die horizontale Vorspannung wird über Vorspannelemente realisiert, die an den Balkenenden mit den Ankerplatten starr gekoppelt sind und dort die Vorspannkraft einleiten. Die Unwuchtbeanspruchung wird in jedem Lastkollektiv als quasi-statische Last zusammen mit der vertikalen Federvorspannung über Lasteinleitungsplatten aufgebracht. Im ersten Lastkollektiv wird zunächst nur ein Lastwechsel auf das ungeschädigte System aufgebracht, in allen weiteren Durchläufen sind dies jeweils 25.000 Lastwechsel.

4.2 Schädigungsentwicklung

Infolge der aufgetragenen Ermüdungsbeanspruchung kommt es im Prüfkörper zu einer sukzessiven Materialdegradation. Diese ist in den hoch beanspruchten Randbereichen am größten. Die Vier-Punkt-Biegebeanspruchung führt im mittleren Bereich zwischen den Lasteinleitungsstellen zu einem konstanten Biegemomentenverlauf, so dass in diesem Bereich die größte Beanspruchung vorhanden ist. Aufgrund der Querschnittsform sind an der Balkenoberseite die größten Druckspannungen, dort ist demzufolge die größte Schädigung zu erwarten. Bild 10 zeigt die Verteilung des Elastizitätsmoduls nach 725.001 Lastwechseln in numerischen Modell.

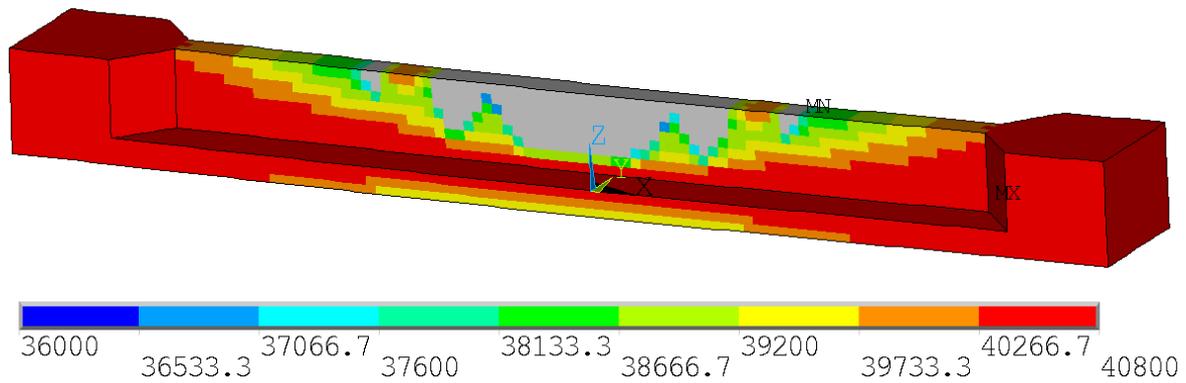


Bild 10: Steifigkeitsverteilung im Prüfkörper nach 725.001 Lastwechselln

Die grau gefärbten Bereiche stellen dabei die bereits vollständig geschädigten Elemente zu diesem Zeitpunkt dar. Wie erwartet hat der Bereich am oberen Querschnittsrand in Balkenmitte die größte Schädigung erfahren. Darüber hinaus lässt sich unterhalb der Lasteinleitungsstellen eine konzentrierte Schädigung erkennen, die aus der dort lokal erhöhten Beanspruchung resultiert. Bild 11 zeigt die Veränderung des Elastizitätsmoduls der Elemente in Balkenmitte über die Querschnittshöhe für verschiedene Berechnungszeitpunkte.

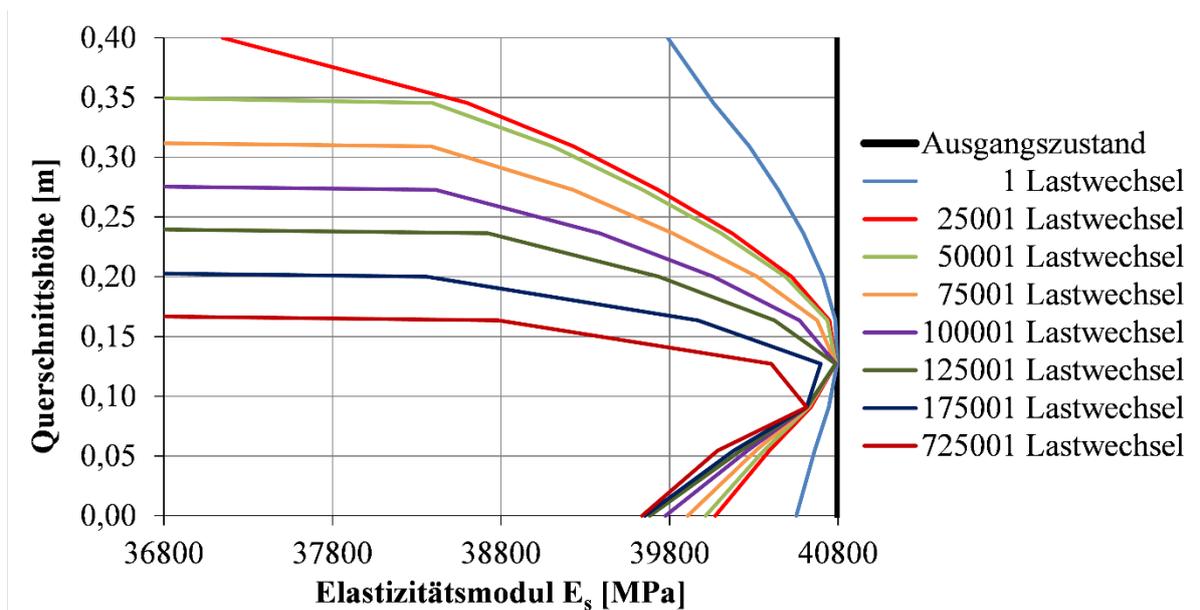


Bild 11: Veränderung des Elastizitätsmoduls über die Querschnittshöhe in Abhängigkeit der Lastwechsellzahl

Zu Beginn der Berechnung weisen noch alle Elemente den ursprünglichen Elastizitätsmodul von 40.800 MN/m² auf. Mit jedem aufgebracht Lastkollektiv kommt es zu einer fortschreitenden Schädigung einzelner Elemente und damit zu einer Reduktion der Element-Elastizitätsmoduln. Dies geschieht vornehmlich an der Balkenoberseite bei einer Höhe von 0,40 m und nimmt nach unten in den Querschnitt hinein ab. An der Balkenunterseite kommt es ebenfalls zu einer Steifigkeitsdegradation – jedoch in einer kleineren Größenordnung. Nach etwa 50.000 Lastwechselln ist das erste Element an der Balkenoberseite vollständig geschädigt. Mit jedem folgenden Lastkollektiv werden weitere Elemente geschädigt bis sich dieser Prozess ab etwa 175.000 Lastwechselln verlangsamt und sich ein scheinbar

stabiler Zustand ausbildet, ab dem es nur noch zu einem geringen Schädigungszuwachs kommt. Aufgrund des linear elastischen Materialverhaltens der einzelnen Elemente konvergiert die numerische Berechnung an dieser Stelle noch, obwohl die lokalen Elementspannungen deutlich über der real ertragbaren Betonfestigkeit liegen. Dies resultiert in unrealistischen Knotenverschiebungen, sodass der Balken als versagt betrachtet werden kann. Zu diesem Zeitpunkt ist zudem bereits mehr als die obere Querschnittshälfte in Balkenmitte geschädigt.

Eine Berechnung nach Model Code 2010 (FIB 2013) für eine bezogene Oberspannung $S_o = 0,75$ und bezogene Unterspannung $S_u = 0,05$ ergibt eine Bruchlastwechselzahl von 9.200 Lastwechseln. Demgegenüber wird mit der hier durchgeführten numerischen Simulation eine deutlich größere Bruchlastwechselzahl von etwa 175.000 Lastwechseln bestimmt. Die genauen bezogenen Spannungen des Elements am oberen Querschnittsrand im numerischen Modell betragen im Ursprungszustand $S_o = 0,74283$ und $S_u = 0,0558$. Für diese Kombination ergibt sich nach Model Code 2010 (FIB 2013) eine Bruchlastwechselzahl von etwa 13.200 Lastwechseln, die immer noch deutlich unter der im numerischen Modell erreichten Lebensdauer liegt. An dieser Stelle zeigt sich zudem, wie sensibel die rechnerische Bruchlastwechselzahl auf geringfügige Änderungen in den Spannungen reagiert und dass diese Zahlen bei der Nachweisführung mit Vorsicht betrachtet werden sollten.

4.3 Spannungsentwicklung

Zusätzlich zur Steifigkeitsentwicklung werden die Betondruckspannungen der Elemente über die Querschnittshöhe in Feldmitte betrachtet. In Bild 12 sind hierzu die Spannungen der einzelnen Elemente bezogen auf die jeweilige Spannung zum Beanspruchungsbeginn dargestellt, wodurch sich die Spannungsänderungen über die Beanspruchungsdauer erkennen lassen. Zu Beginn der Beanspruchung kommt es an der Balkenoberseite zu einer geringfügigen Zunahme und an der Balkenunterseite zu einer Abnahme der Betondruckspannungen. Dies resultiert aus der Teilschädigung der Randzonen und der damit verbundenen Verschiebung der neutralen Faser des ideellen Querschnitts nach unten. Die Exzentrizität der horizontalen Vorspannung wird somit verringert und die Spannungsänderung hervorgerufen. Nachdem das erste Element an der Balkenoberseite nach etwa 50.000 Lastwechseln vollständig geschädigt ist, fallen die Druckspannungen hier aufgrund des deutlich geringeren Elastizitätsmoduls stark ab. Gleichzeitig sinken die Druckspannungen an der Balkenunterseite als Folge der weiteren Verringerung der Exzentrizität der Vorspannung ebenfalls stärker ab. Um das Kräftegleichgewicht im Querschnitt zu wahren, nehmen synchron die Druckspannungen im Balkeninneren zu. In der Folge werden sukzessiv weitere Elemente geschädigt und dieser Prozess setzt sich kontinuierlich fort. Ab etwa 100.000 Lastwechseln haben sich die Spannungen an der Balkenunterseite so stark verringert, dass es zu Zugspannungen kommt. Der Schädigungsprozess schreitet kontinuierlich voran und die Druckspannungen im Balkeninneren nehmen zum einen zu, zum anderen wandert das Spannungsmaximum immer weiter nach unten. Auch in Bild 12 ist zu erkennen, dass zwischen 175.000 und 725.000 Lastwechseln kaum noch eine Veränderung stattfindet und daher von einem Versagen des Balkens ausgegangen werden kann.

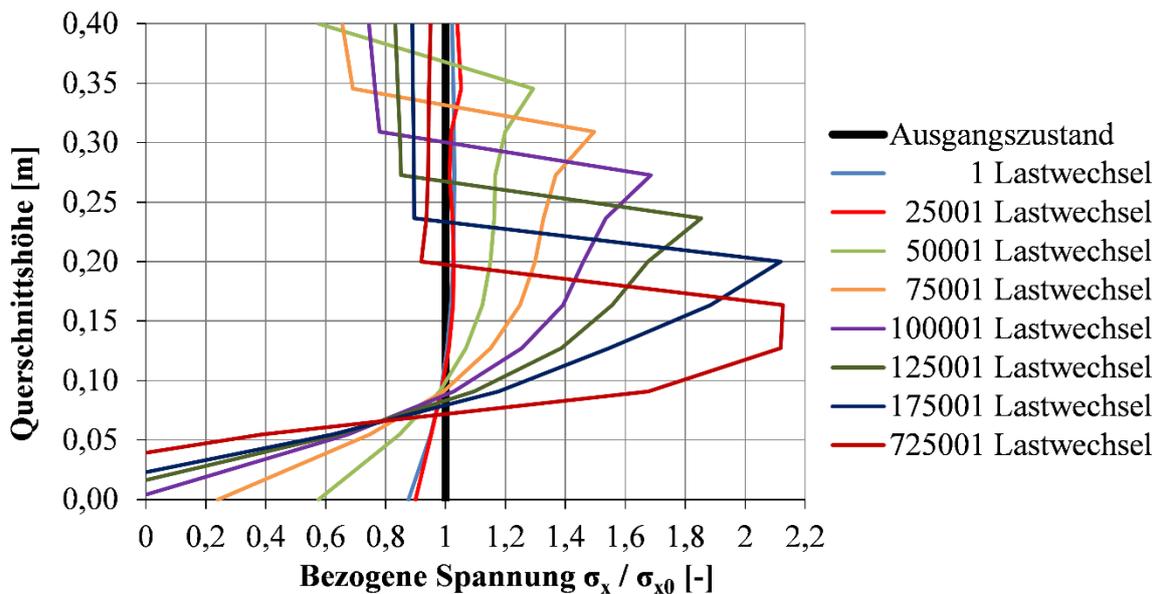


Bild 12: Veränderung der bezogenen Spannungen über die Querschnittshöhe in Abhängigkeit der Lastwechselzahl

5 FAZIT

Um das Ermüdungsverhalten von realen Bauteilen besser einschätzen zu können, werden Ermüdungsversuche an großformatigen Biegeprüfkörpern durchgeführt, da nur bei möglichst realen Versuchsbedingungen Effekte wie lokale Steifigkeitsänderungen und Spannungumlagerungen erzeugt werden können. Am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover werden solche Versuche mit Hilfe eines Resonanzprüfstands durchgeführt. Im Rahmen dieses Beitrags wurde das Versuchskonzept der aktuell geplanten Versuchsreihe vorgestellt und bereits eine vorgeschaltete numerische Modellierung des Ermüdungsversuchs beschrieben. Mit dem verwendeten numerischen Modell können die lokalen Steifigkeitsveränderungen über die Beanspruchungsdauer simuliert werden, sodass sich in den am stärksten beanspruchten Bereichen eine sukzessive Materialdegradation ausbildet. Als Folge lagern sich die Spannungen von den geschädigten weicheren Querschnittsrändern in die Querschnittsmitte um, was in der Spannungsauswertung im numerischen Modell deutlich ersichtlich wird. Bei ermüdungsbeanspruchten Bauteilen wie z. B. Windenergieanlagen wirkt sich dieser Effekt positiv auf die Lebensdauer aus, da die ursprünglich am stärksten beanspruchten Querschnittsbereiche entlastet werden und somit bei gleichbleibender äußerer Beanspruchung größere Lastwechselzahlen ertragen können.

DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Unterstützung des Forschungsvorhabens „WinConFat – Materialermüdung von On- und Offshore Windenergieanlagen aus Stahlbeton und Spannbeton unter hochzyklischer Beanspruchung“ (Fkz. 0324016A).

LITERATUR

- Bazant, Z. P. & Schell, W. F. (1993): Failure Fracture of High-Strength Concrete and Size Effect, *ACI Materials Journal*, Vol. 90, No. 5, S. 472-478.
- Birkner, D. & Marx, S. (2019): Spannungumlagerungen bei ermüdungsbeanspruchten Spannbetonbalken im numerischen Modell und Versuch, *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019).
- Bode, M., Marx, S., Vogel, A. & Völker, C. (2019): Dissipationsenergie bei Ermüdungsversuchen an Betonprobekörpern, *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019).
- Diederley, J.; Herrmann, R. & Marx, S. (2018): Ermüdungsversuche an großformatigen Betonprobekörpern mit dem Resonanzprüfverfahren, *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), H. 8, S. 589–597.
- Dillmann, R. R. (1981): Die Spannungsverteilung in der Biegedruckzone von Stahlbetonquerschnitten bei häufig wiederholter Belastung, Dissertation, TH Darmstadt.
- FIB – Fédération internationale du béton (2013): fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, Berlin.
- von der Haar, C. & Marx, S. (2016): Untersuchungen zur Steifigkeit und Ultraschallgeschwindigkeit dynamisch beanspruchter Betonproben, *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), H. 3, S. 141–148.
- von der Haar, C. & Marx, S. (2017): Ein additives Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton, *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), H. 1, S. 31–40.
- Hohberg, R. (2004): Zum Ermüdungsverhalten von Beton, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2004.
- Holmen, J. O. (1979): Fatigue of concrete by constant and variable amplitude loading. Dissertation, Trondheim 1979.
- Lohaus, L., Oneschkow, N. & Wefer, M. (2012): Design model for the fatigue behaviour of normal-strength, high-strength and ultra-high-strength concrete, *Structural Concrete* 13 (2012), No. 3, S. 182-192.
- Marx, S., Grünberg, J., Hansen, M., Schneider, S. (2017): Sachstandbericht Grenzzustände der Ermüdung von dynamisch hoch beanspruchten Tragwerken aus Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. - DAfStb, Heft 618, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- Ople, F. S. & Hulsbos, C. L. (1966): Probable Fatigue Life of Plain Concrete with Stress Gradient, *ACI Journal* 63 (1966), S. 59–81.
- Herrmann, R. (2018): Simulation und Regelung von Resonanzversuchsständen zur Untersuchung der Bauteilermüdung, In: Marx, S. (Hrsg.): Berichte des Instituts für Massivbau. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Nr. 14, IRB Verlag, Stuttgart.
- Zhao, G. Y., Wu, P. G. & Bai, L. M. (1996): Research on fatigue behavior of high-strength concrete under compressive cyclic loading, 4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete, 1996, S. 757–764.