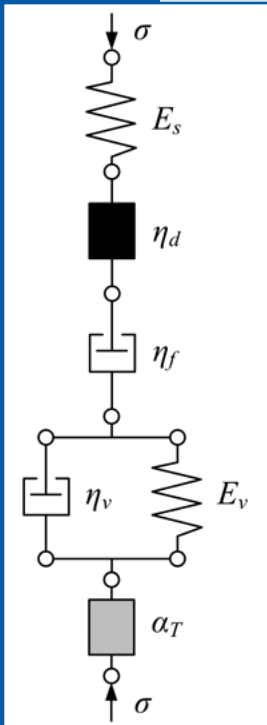




## Berichte des Instituts für Massivbau

Christoph von der Haar

# Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton



## **Berichte**

des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover  
Herausgeber:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover – Institut für Massivbau  
Heft 11, März 2017

Fraunhofer IRB Verlag

## Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Massivbau  
Appelstraße 9 A  
30167 Hannover

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung in anderen als den gesetzlich zugelassenen Fällen bedarf deshalb der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Herausgebers.

© 2017 by Univ.-Prof. Steffen Marx  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Massivbau  
ISBN (Print): 978-3-8167-9734-0  
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9765-4

## Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 80 04 60, 70504 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Telefax 0711 970-2508  
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)  
URL <http://www.baufachinformation.de>

# Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von  
Dipl.-Ing. Christoph von der Haar

2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Korreferenten: Prof. Dr. phil. Dr. techn. Konrad Bergmeister

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus

Tag der Promotion: 22.9.2016

## **Kurzfassung**

Beton weist unter zyklischen Lasten ein komplexes Verformungsverhalten auf. Dieses beeinflusst die Spannungsverteilung auf der Querschnittsebene und vermag sich positiv auf die Lebensdauer von Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen auszuwirken. Das normative Ermüdungsnachweiskonzept prognostiziert die Lebensdauer von Betonbauteilen allein auf der Grundlage von Wöhlerlinien. Die Verformungsentwicklung des Betons und die Spannungsumlagerungen auf der Querschnittsebene finden keine Berücksichtigung. Die auftretenden Verformungsprozesse und -mechanismen sind allerdings bis heute auch nicht abschließend geklärt, sodass zurzeit keine Weiterentwicklung des Ermüdungsnachweiskonzeptes möglich ist.

In dieser Arbeit wird das Verformungsverhalten von ermüdungsbeanspruchtem Beton auf der Grundlage eines additiven Dehnungsmodells betrachtet. In dem Modell wird von der Hypothese ausgegangen, dass unter einer Ermüdungsbeanspruchung elastische, viskose, thermische und schädigungsinduzierte Dehnungen im Beton auftreten. Die einzelnen Dehnungsanteile entwickeln sich individuell in Abhängigkeit von der Zahl der Lastwechsel, der Versuchsdauer und den zyklischen Beanspruchungsparametern. Kernstück der Arbeit ist die Bestimmung eines kriechaffinen Beanspruchungsniveaus, um den viskosen Verformungsanteil in Abhängigkeit von der Ermüdungsbeanspruchung abschätzen zu können. Als kriechaffines Beanspruchungsniveau wird dasjenige Spannungsniveau bezeichnet, welches unter einer konstanten Druckbeanspruchung die gleichen viskosen Verformungen hervorruft wie unter der Ermüdungsbeanspruchung bei gleicher Beanspruchungsdauer. Das kriechaffine Beanspruchungsniveau wird auf der Grundlage einer rheologischen Modellvorstellung und für verschiedene Kriechtheorien abgeleitet und für unterschiedliche Mittelspannungen, Spannungsamplituden und Belastungsfrequenzen bestimmt.

Auf der Grundlage des kriechaffinen Beanspruchungsniveaus und bekannter Zusammenhänge für die elastischen und thermischen Dehnungen können drei der vier Dehnungsanteile des additiven Dehnungsmodells beschrieben werden, sodass letztlich auch der schädigungsinduzierte Dehnungsanteil identifizierbar wird. Die gemessenen Dehnungen ermüdungsbeanspruchter Betonproben werden entsprechend der additiven Modellvorstellung zerlegt und analysiert. Es zeigt sich, dass sich der schädigungsinduzierte Dehnungsanteil in Abhängigkeit der logarithmierten Bruchlastwechselzahl linear entwickelt. Dementsprechend spiegelt sich der lineare Zusammenhang zwischen dem Oberspannungsniveau und der logarithmierten Bruchlastwechselzahl, wie er in den Wöhlerlinien für Beton sichtbar ist, auch im Dehnungsverhalten des Betons wider. Andererseits nehmen die Bruchdehnungen ermüdungsbeanspruchter Betonproben einen konstanten Wert an, wenn die gemessenen Verformungen um die thermischen und viskosen Dehnungsanteile korrigiert werden.

**Schlagwörter:** Beton, Ermüdungsbeanspruchung, Dehnungsentwicklung, additives Dehnungsmodell, kriechaffines Spannungsniveau



## Abstract

Concrete exhibits complex deformation behaviour under cyclic loads. This results in considerable stress redistributions in the cross-sections, which could have a positive effect on the service life of concrete constructions. The normative fatigue design concept predicts the service life based on  $S-N$  curves only; cross-sectional deformations and stress redistributions are neglected. However, the occurring deformation processes and mechanisms are not yet fully understood, which makes it very difficult to develop the existing fatigue design concept further.

In this dissertation, the deformation behaviour of concrete is considered according to an additive strain model. The model assumes that under cyclic loads elastic, viscous, thermal, and damage-induced strains occur in concrete. The strain components develop independently of each other as a function of the number of load cycles, the test duration, and stress level. This dissertation focuses on the determination of a creep-relevant stress level to estimate the viscous deformation component. The creep-relevant stress level is the stress level which causes the same viscous deformations under constant loads as under cyclic loads for the same test duration. The creep-relevant stress level is derived from a rheological model and for different creep theories and is determined for different stress levels and load frequencies.

Based on the creep-relevant stress levels and known relationships for elastic and thermal strains, three of the four strain components of the additive strain model can be described. Thus, the damage-induced strain component can also be identified. Experimentally measured fatigue strains of concrete specimens are separated into the strain components assumed by the additive strain model. The components are evaluated and analysed individually. It was found that the damage-induced strain component develops linearly as a function of the logarithmic load cycles to failure in the examined cycle range. Accordingly, the linear relationship between the maximum compressive stress level and the logarithmic load cycles to failure is reflected in the strain behaviour, which is visible in the  $S-N$  curves for concrete. On the other hand, the ultimate fatigue strain seems to be constant if the measured deformations are corrected by the thermal and viscous strains.

**Keywords:** concrete, fatigue loading, strain development, additive strain model, creep-relevant load level





## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Leibniz Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx, für die Anregungen und die wissenschaftliche Begleitung meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. phil. Dr. techn. Konrad Bergmeister und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus danke ich für das entgegengebrachte wissenschaftliche Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Korreferate. Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Achmus danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Des Weiteren möchte ich mich bei all meinen Kollegen und wissenschaftlichen Hilfskräften herzlich bedanken die mir stets mit Rat und Tat geholfen haben, diese Arbeit zu vollenden.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und meiner Frau Miriam für die jahrelange Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis.

Christoph von der Haar



## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract .....	III
Vorwort .....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis.....	X
1    Einleitung.....	1
1.1    Problemstellung und Motivation.....	1
1.2    Zielsetzung.....	3
1.3    Gliederung der Arbeit .....	4
2    Stand der Forschung .....	7
2.1    Materialverhalten unter monoton steigender Beanspruchung.....	7
2.2    Materialverhalten unter Dauerbeanspruchung .....	10
2.2.1    Phänomenologisches Materialverhalten.....	10
2.2.2    Empirische Kriechfunktionen.....	13
2.2.3    Rheologische Kriechansätze.....	15
2.2.4    Kriechmodelle .....	17
2.3    Materialverhalten unter zyklischer, verformungsgeregelter Beanspruchung .....	23
2.4    Materialverhalten unter zyklischer, kraftgeregelter Beanspruchung .....	25
2.4.1    Allgemeines und Grundlagen.....	25
2.4.2    Phänomenologisches Materialverhalten.....	27
2.5    Energetische Betrachtung der Schädigungsprozesse im Beton.....	37
2.6    Dehnungsmodelle für ermüdungsbeanspruchten Beton.....	39
2.6.1    Modelle basierend auf dem <i>Envelope</i> -Konzept.....	39

2.6.2	Energetisches Ermüdungsschädigungsmodell.....	40
3	Hypothese und Vorgehen.....	43
3.1	Einordnung der Arbeit in den Kontext der Literaturstudie.....	43
3.2	Hypothese.....	44
3.3	Ziel und Vorgehen .....	48
3.3.1	Modellentwicklung.....	49
3.3.2	Experimentelle Verifikation .....	50
4	Modellbildung und Ableitung kriechaffiner Beanspruchungsniveaus .....	53
4.1	Allgemeines .....	53
4.2	Mathematische Modellentwicklung .....	56
4.2.1	Reversibles Modell.....	56
4.2.2	Irreversibles Modell.....	58
4.3	Kriechkurven und Modellparameter .....	60
4.4	Modellverhalten unter variabler Beanspruchung.....	62
4.5	Sinusförmiger Beanspruchungsverlauf.....	69
4.6	Fazit.....	73
5	Experimentelle Untersuchungen.....	75
5.1	Versuchsdurchführung .....	75
5.1.1	Betoneigenschaften und Probekörperherstellung .....	75
5.1.2	Ermüdungsversuche .....	76
5.1.3	Kriechversuche.....	78
5.2	Darstellung der Versuchsergebnisse .....	79
5.2.1	Zylinderdruckfestigkeit .....	79
5.2.2	Bruchlastwechselzahlen .....	80
5.2.3	Temperaturentwicklung.....	82
5.2.4	Steifigkeitsentwicklung.....	83

5.2.5	Dehnungsverhalten .....	86
5.2.6	Viskoses Verformungsverhalten .....	90
6	Auswertung der Dehnungsanteile .....	93
6.1	Elastischer Dehnungsanteil .....	93
6.2	Thermischer Dehnungsanteil .....	95
6.3	Viskoser Dehnungsanteil .....	99
6.4	Schädigungsinduzierter Dehnungsanteil .....	102
6.5	Dehnungsentwicklung .....	104
6.6	Fazit .....	106
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	109
7.1	Zusammenfassung .....	109
7.2	Ausblick .....	111
	Literaturverzeichnis .....	113
	Abbildungsverzeichnis .....	120
	Tabellenverzeichnis .....	124
	Anhang .....	125

## Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

### Griechische Buchstaben

$\varepsilon$	Dehnung / Stauchung
$\varepsilon_c$	Betondehnung bei Erreichen der Betondruckfestigkeit $f_c$ bei monoton steigender Beanspruchung
$\varepsilon_{cr}$	Viskose Dehnung des Betons
$\varepsilon_d$	Schädigungsinduzierte Dehnung des Betons im Ermüdungsversuch
$\varepsilon_{el}$	Elastische Dehnung des Betons
$\varepsilon_f$	Irreversible Fließdehnung des Betons
$\varepsilon_{fat}$	Messbare Dehnung des Betons im Ermüdungsversuch
$\varepsilon_o$	Dehnungsverlauf auf dem Oberspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
$\varepsilon_t$	Temperaturdehnung
$\varepsilon_u$	Dehnungsverlauf auf dem Unterspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
$\varepsilon_v$	Verzögert-elastische Dehnung des Betons
$\varepsilon_o^{II}$	Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase auf dem Oberspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
$\varepsilon_u^{II}$	Steigung der Dehnungsentwicklung in der zweiten Phase auf dem Unterspannungsniveau des Ermüdungsversuchs
$\varepsilon^F$	Dehnung zum Zeitpunkt des Probekörperversagens im Ermüdungsversuch
$\eta, \eta_d, \eta_v, \eta_f$	Dämpfersteifigkeiten
$\nu_c$	Querdehnungsverhältnis des Betons
$\sigma$	Spannung
$\sigma_a$	Spannungsamplitude im Ermüdungsversuch
$\sigma_{cr}$	Spannung im Kriechversuch
$\sigma_m$	Mittelwert der Spannungen im Ermüdungsversuch
$\sigma_o$	Betragsmäßig größter Wert der Spannungen im Ermüdungsversuch
$\sigma_u$	Betragsmäßig kleinster Wert der Spannungen im Ermüdungsversuch
$\Delta\sigma$	Spannungsschwingbreite im Ermüdungsversuch
$\varphi$	Kriechzahl
$\varphi_\infty$	Endkriechzahl
$\psi$	Phasenwinkel der zyklischen Beanspruchung

### Große lateinische Buchstaben

$C$	Konstante
$E$	Elastizitätsmodul / Federsteifigkeit
$E_c$	Elastizitätsmodul des Betons

$E_s$	Elastizitätsmodul ermittelt als Sekantenmodul für den Entlastungsast bei zyklischer Beanspruchung
$J$	Kriech- oder Komplianzfunktion
$N$	Anzahl aufgebrauchter Lastwechsel
$N_f$	Ertragbare Lastwechselzahl bis zum Bruch des Probekörpers (Bruchlastwechselzahl)
$P$	Versagenswahrscheinlichkeit
$R$	Verhältniswert aus Ober- und Unterspannung im Ermüdungsversuch
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
$S_{cr}$	Auf die Betondruckfestigkeit $f_c$ bezogenes kriecheaffines Spannungsniveau $\sigma_{cr}$ im Ermüdungsversuch
$S_m$	Auf die Betondruckfestigkeit $f_c$ bezogene Mittelspannung $\sigma_m$ im Ermüdungsversuch
$S_o$	Auf die Betondruckfestigkeit $f_c$ bezogene Oberspannung $\sigma_o$ im Ermüdungsversuch
$S_u$	Auf die Betondruckfestigkeit $f_c$ bezogene Unterspannung $\sigma_u$ im Ermüdungsversuch
$\Delta S$	Auf die Betondruckfestigkeit $f_c$ bezogene Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ im Ermüdungsversuch
$T$	Temperatur
$\Delta T$	Temperaturänderung

### Kleine lateinische Buchstaben

$a, b, m, n$	Konstanten
$f_c$	Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
$f_{c,cube,28d}$	Einaxiale Würfeldruckfestigkeit des Betons im Alter von 28 Tagen
$f_{c,cyl,28d}$	Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit des Betons im Alter von 28 Tagen
$f_p$	Belastungsfrequenz im Ermüdungsversuch
$s$	Standardabweichung einer Stichprobe
$t$	Zeit
$t_0$	Betonalter bei Belastungsbeginn

### Abkürzungen

BLZ	Bruchlastwechselzahl
LW	Lastwechsel
w/z-Wert	Wasser-Zementwert



