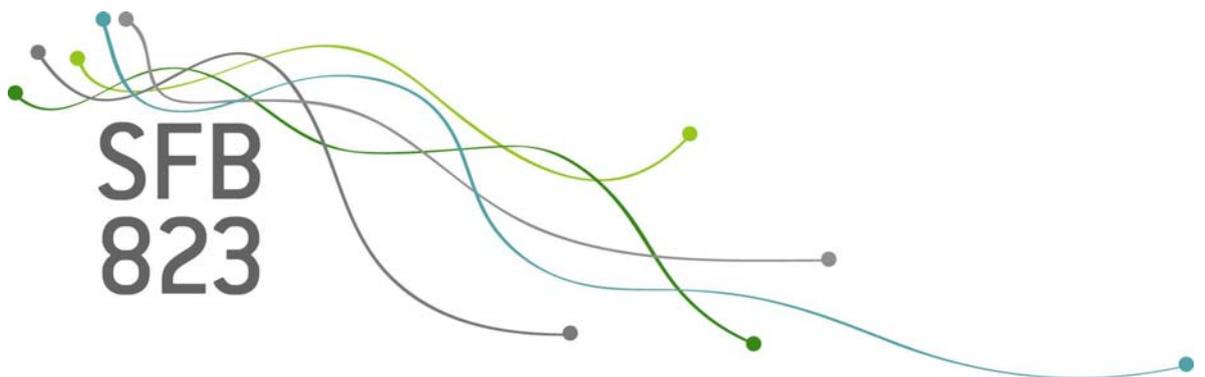


SFB  
823

# Neue Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit und Prognose der Lebensdauer von einbetonierten Spannstählen bei sehr hohen Lastwechselzahlen

Guido Heeke, Jens Heinrich,  
Reinhard Maurer, Christine Müller

Nr. 18/2016



Discussion Paper



# Neue Erkenntnisse zur Ermüdungsfestigkeit und Prognose der Lebensdauer von einbetonierten Spannstählen bei sehr hohen Lastwechselzahlen

Guido Heeke  
Eudur Bau GmbH & Co. KG, Herzebrock-Clarholz, Deutschland

Jens Heinrich  
Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

Reinhard Maurer  
Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

Christine Müller  
Technische Universität Dortmund, Dortmund, Deutschland

## Zusammenfassung

Für den Nachweis gegen Ermüdung von älteren bestehenden Spannbetonbrücken oder Neubauten werden Bemessungswöhlerlinien für Spannstahl im einbetonierten Zustand benötigt. Die bisherigen Versuche mit gekrümmten Spanngliedern im nachträglichen Verbund decken die Wöhlerlinie im Wesentlichen im Zeitfestigkeitsbereich ab. Nur sehr wenige Versuche weisen Lastspielzahlen über 10 Mio. auf, wobei keine echte Dauerfestigkeit erkennbar ist. Daher ist der Verlauf der Wöhlerlinie im Dauerfestigkeitsbereich im Wesentlichen hypothetisch festgelegt worden. Im Rahmen eines Teilprojektes im SFB 823 „Statistik nichtlinearer dynamischer Prozesse“ an der TU Dortmund wird die Ermüdungsfestigkeit einbetonierter Spannstähle im Bereich bis etwa  $10^8$  Lastzyklen experimentell untersucht. Des Weiteren wurden auf Grundlage der sehr umfangreichen Datenbasis verschiedener gemessener physikalischer Größen mit mathematisch statistischen Methoden mehrere Prognoseverfahren entwickelt. Diese ermöglichen bei vorgegebener Aussagewahrscheinlichkeit die Abschätzung eines Prognoseintervalls mit Mittelwert- und Quantilkurven für den Schädigungsverlauf.

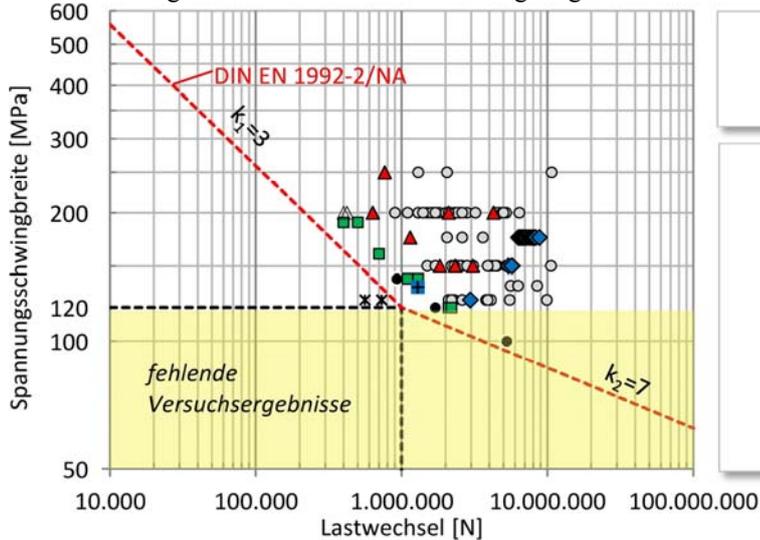
## 1. Einleitung

Die Materialermüdung beschreibt einen fortschreitenden Schädigungsprozess in einem Werkstoff. So kann es infolge einer zyklischen einwirkenden Spannungsschwingbreite auch deutlich unterhalb der Materialfestigkeit zu einem Versagen kommen. Erkenntnisse im Bereich sehr kleiner Schwingbreiten bzw. sehr hoher Lastwechselzahlen sind für Spannstahl im einbetonierten Stahlhüllrohr experimentell nicht genügend abgesichert. Wie sich in Literaturrecherchen zeigt, erfolgten systematische Untersuchungen hinsichtlich der Ermüdung von Spannstahl im gekrümmten Stahlhüllrohr im einbetonierten Zustand erst seit Anfang der 1980er Jahre. Oftmals standen hier neue Komponenten (z.B. Kunststoffhüllrohre) in diesen Untersuchungen im Fokus. Es zeigt sich auch, dass einige Arbeiten mit Unsicherheiten hinsichtlich der Größe der einwirkenden Schwingbreite und Lastwechselzahlen behaftet

sind. Dieses geschieht dann, wenn während der zyklischen Versuche das Dekompressionsniveau durchfahren wird, wodurch der innere Hebelarm der Kraftresultierenden variiert. Auch variieren die Schwingbreiten bei einigen Arbeiten aufgrund einer gemischt vorhandenen Bewehrung mit unterschiedlich steifem Verbund infolge von Umlagerungen zwischen Betonstahl und Spannstahl.

Daher kann der Verlauf des zweiten Astes der Ermüdungsfestigkeitskurve nach DIN EN 1992-2/NA [5] mit  $k_2=7$  nur als rein hypothetisch angesehen werden (Bild 1). Es fehlen Versuchsergebnisse unterhalb einer Schwingbreite von 120MPa, welche den in der Norm hypothetisch beschriebenen Bereich bestätigen oder widerlegen. Der Grund hierfür liegt in den sehr aufwendigen und kostenintensiven Versuchen, welche zudem sehr zeitintensiv sind. Dies zeigt sich auch im Bild 1, in das die verfügbaren Versuchsergebnisse einiger Arbeiten zum Spannstahl im nachträglichen

Verbund im gekrümmten Stahlhüllrohr aufgetragen



sind.

Material: **Spannstahl**  
nachträglicher Verbund,  
gekrümmtes Stahlhüllrohr

- Oertle et al. (Kleinkörperversuch)
- ◆ Oertle et al. (Balkenversuch)
- Abel et al. (Balkenversuch)
- Bökamp (Balkenversuch)
- Voß et al. (Balkenversuch)
- ▲ Müller (Balkenversuch)
- △ Eskola (Balkenversuch)
- × Hegger et al. (Balkenversuch)

Bild 1: Vergleich der Versuchsergebnisse (nachträglicher Verbund, gekrümmte Stahlhüllrohre) [1, 2, 7, 9, 13, 16, 17] mit der charakteristischen Wöhlerlinie nach DIN EN 1992-2/NA [5]

Mit diesem Hintergrund wurden bereits einige Versuche mit Spannstählen unter sehr hohen Lastwechselzahlen im einbetonierten Zustand durchgeführt [10]. Diese Versuche werden aktuell an der TU Dortmund weiter fortgeführt.

## 2. Experimentelle Untersuchungen

Es konnte auf bereits durchgeführte Versuche mit altem Spannstahl aus einem Abbruchbauwerk von 1957 aufgebaut [12] werden. Diese werden durch neue Versuche mit einem vergleichbaren Spannstahl (Material und Geometrie) einer heutigen Produktion ergänzt. Der „neue“ Spannstahl stammt von einem laufenden Strang eines Coils und konnte anhand der Zulassung der Klasse 1 nach DIN EN 1992-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5] zugeordnet werden.

Untersucht wurden 7-drähtige 3/8“ Litzen einer Spannstahlgüte St1570/1770 und einer Querschnittsfläche von 52mm<sup>2</sup>. Die Litzen wurden freischwingend sowie im einbetonierten Zustand in gekrümmten Stahlhüllrohren untersucht.

### 2.1 Freischwingend geprüfter Spannstahl

Insgesamt wurden 27 „alte“ und 29 „neue“ Spannstahlproben untersucht und nach dem interaktiven Verfahren [3] ausgewertet. Für die Prüfung wurden die Spannlitzen in eigens hierfür hergestellte Ankerröhrchen eingeklebt, damit diese an den Einspannstellen zur Maschine möglichst durch den Klemmdruck nicht gequetscht oder verformt werden. Alle Versuche wurden mit einer konstanten Unterspannung  $\sigma_0=900\text{MPa}$  angesetzt. Dieses entspricht etwa der seinerzeit gültigen zulässigen Spannung nach DIN 4227 [6], welche beim Einbau der „alten“ Spannlitzen in den damaligen Brückenbauwerken gültig war.



Bild 2: Prüfkörper (links) und Versuchstand (rechts)

Als Grenzwahrscheinlichkeit wurden, entgegen der im Rahmen von Konformitätsprüfungen üblichen  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel, in den Versuchen  $10^7$  Lastwechsel angesetzt.

Im Vergleich der durch die Versuche gewonnenen Streubänder des „alten“ und „neuen“ Spannstahls, weist der „neue“ Spannstahl eine nur geringfügig höhere 5%Quantilgrenze der Dauerschwingfestigkeit auf. Im Bereich der Zeitfestigkeit führt dieser Unterschied zu größeren, ertragbaren Schwingbreiten unter gleicher Spannungsschwingbreite.

Speziell im Bereich hoher Lastwechselzahlen zeigt der „neue“ Spannstahl vergleichsweise große Streuungen in den Versuchsergebnissen auf. Grundsätzlich ist es nicht ungewöhnlich, dass die eine oder andere Probe deutlich länger einer einwirkenden Schwingbreite standhält oder gar frühzeitig versagt. Ungewöhnlich in

diesen Versuchen erscheint hingegen die Häufigkeit, in der dies bei den getesteten Proben des „neuen“ Spannstahls unter kleinen Schwingbreiten vorkam. Für ein solches Verhalten kann es verschiedene Gründe geben, die oft im Versuchsstand, in der Probenherstellung oder im Material der Probe zu finden sind.

Ein möglicher Defekt in der Mess- oder gar Regeltechnik der Maschine konnte ausgeschlossen werden. Ebenso wurden die Art und Weise der Probenherstellung des „neuen“ Spannstahls gegenüber der des „alten“ Spannstahls in keiner Weise geändert, so dass auch hier für das streuende Verhalten keine Begründung vorlag.

Auch umfangreiche Material- und Metallanalysen zeigten lediglich die einzige Auffälligkeit, dass vereinzelte Randbereiche des „neuen“ Spannstahls entkohlte Stellen aufweisen und damit weicher sind. Dies verbleibt als einzige mögliche Erklärung für die Streuungen in den durchgeführten Versuchen unter zyklischer Belastung.

Grundsätzlich lagen alle Versuchsergebnisse den „alten“ und „neuen“ Spannstahls über der char. Ermüdungsfestigkeitskurve der DIN EN 1992-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5].

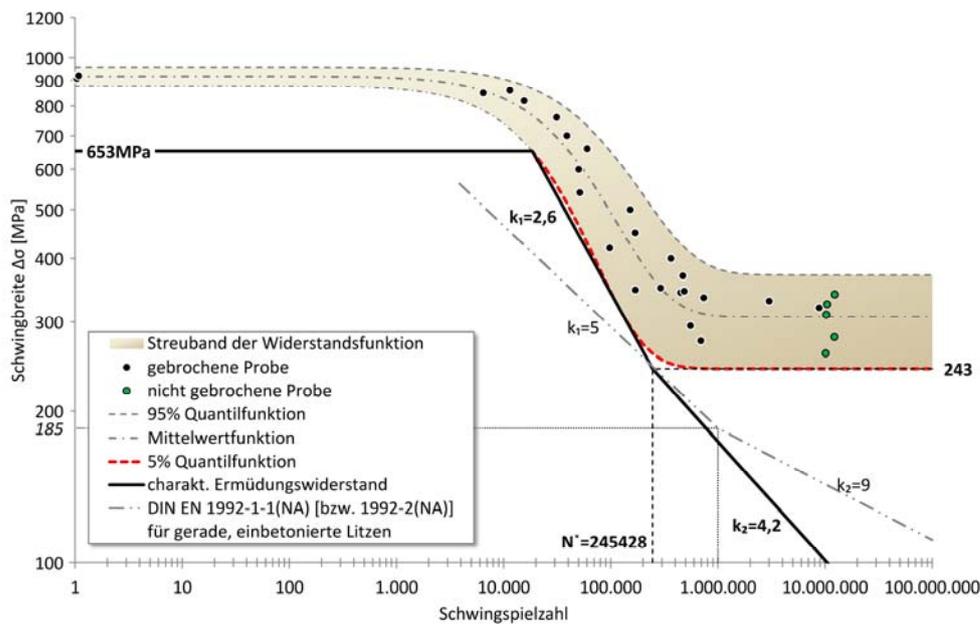


Bild 3: Versuchsergebnisse zum ersten Drahtbruch des „alten“ Spannstahls mit dem daraus gewonnenen Streuband der Widerstandsfunktion (doppellogarithmischer Maßstab)

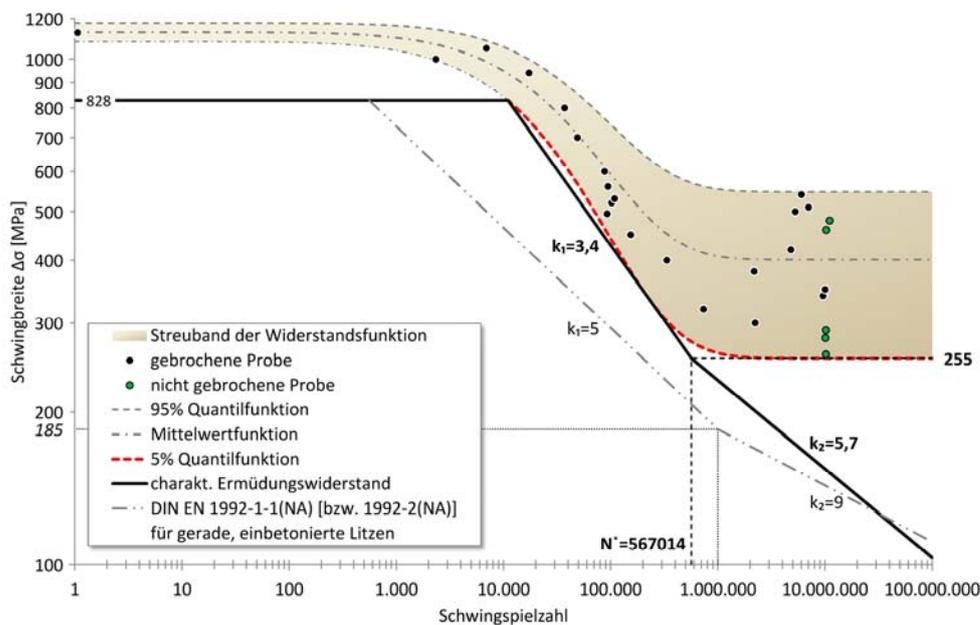


Bild 4: Versuchsergebnisse zum ersten Drahtbruch des „neuen“ Spannstahls mit dem daraus gewonnenen Streuband der Widerstandsfunktion (doppellogarithmischer Maßstab)

## 2.2 Versuche an vorgespannten Balken

Im Versuchskörper wurde ein Hüllrohr aus Stahl mit einem Mindestradius von  $r=5\text{m}$  gekrümmt eingebaut. Der Versuchskörper wurde so konzipiert, dass die vorhandenen Spannungen im Spannstahl ziemlich genau bestimmt werden konnten. Die Abmessungen der Versuchsbalken betragen  $l/h/b = 4,5/1,0/0,3\text{ m}$ . Im Bereich des Risses im Beton wurde keine zusätzliche Bewehrung mit anderen Verbundeigenschaften eingebaut, welche die Zugkräfte hätte anteilig aufnehmen können. Somit kreuzten lediglich die Spannstahlritzen in Trägermitte die gerissene Zugzone. Dadurch konnten Unsicherheiten bezüglich der im Spannstahl vorhandenen Schwingbreiten durch eine zusätzlich vorhandene Betonstahlbewehrung ausgeschlossen werden. Wesentliches Merkmal der Versuchskörper ist die kreisförmige Ausparung in Feldmitte. Im Gegensatz zu einem Vollquerschnitt bleibt dadurch der innere Hebelarm während der zyklischen Belastung im gesamten Beanspruchungsbereich nahezu konstant, sobald das Bauteil in den gerissenen Zustand übergegangen ist. Bei einem Rechteckquerschnitt verändert sich der innere Hebelarm, wenn eine zyklischen Last im Bereich des Zustand II aufgebracht wird. Dieses resultiert aus der sich verändernden Druckzonenhöhe und Lage der Druckkraftresultierenden. Wird der Spannungszuwachs im Spannstahl über dem aufgetragenen Moment aufgetragen, so lässt sich der Unterschied zwischen einem Vollquerschnitt (VQS) und dem Querschnitt mit Ausparung (LQS) deutlich erkennen (Bild 5).

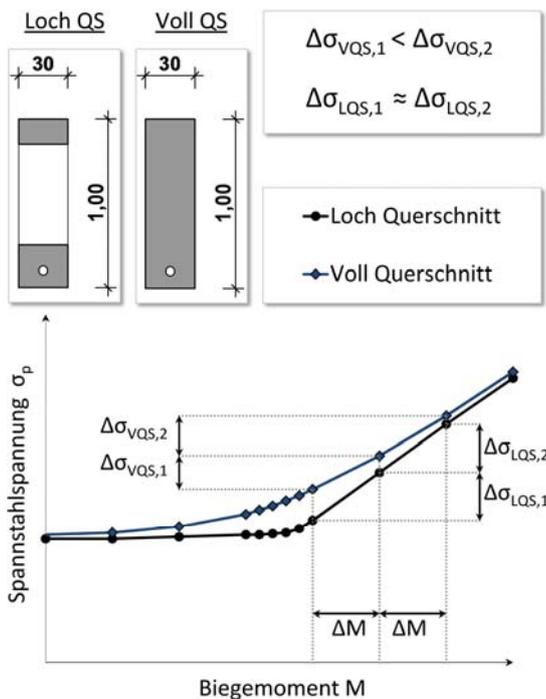


Bild 5: Abhängigkeit der Spannstahlspannung  $\sigma_p$  vom aufgetragenen Biegemoment

Daher wurde ein zyklischer 4-Punkt-Biegeversuch angesetzt, welcher zudem so aufgebaut wurde, dass die zahlenmäßige Größe der Auflagerkräfte zugleich der Größe des Biegemomentes in Trägermitte entspricht (Bild 6, Bild 7).

Die Druckzone wurde in den ersten Versuchsträgern, mit dem „alten“ Spannstahl, noch als durchlaufender Betonquerschnitt ausgeführt. Später wurden bei der Durchführung der Versuche mit dem „neuen“ Spannstahl die Versuchsträger in der Druckzone mit einem speziell hierfür entwickelten Stahldruckgelenk hergestellt. Dadurch war die Lage der Druckresultierenden ebenfalls eindeutig. Außerdem konnte das Gelenk zu jedem Zeitpunkt durch eine Kraftmessdose ersetzt werden.

Im Vordergrund standen bei der Planung des Versuchsstandes eine zwängungsfreie Auflagerung der Versuchskörper und ebenso eine zwängungsfreie Krafteinleitung aus der Maschinenpresse. Mit Beginn der Versuchsreihe der „neuen“ Spannstähle (Serie SB) wurden der Versuchsstand, sowie Versuchskörper, nochmals optimiert, um höhere Prüffrequenzen zu erzielen, da das Gesamtverhalten des Versuchsstandes mit dem eingebauten Versuchskörper entscheidenden Einfluss auf die Regeltechnik der Maschine hat. Somit konnten Prüffrequenzen bis 10Hz realisiert werden, um die ansonsten extrem langen Versuchsdauern zu minimieren.



Bild 6: Versuchsträger im Versuchsstand

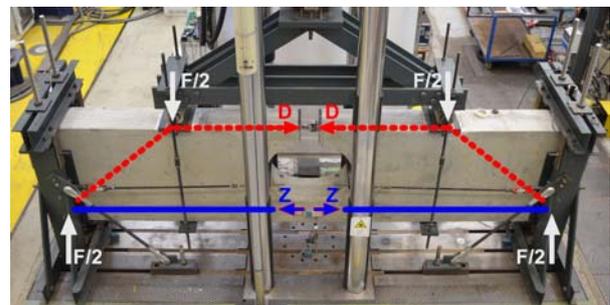


Bild 7: vereinfachte Darstellung des Kräftegleichgewichts im Versuchsstand

Zur Erfassung des Bruchzeitpunktes der einzelnen Spanndrähte bzw. der zugehörigen Lastwechselzahl beim Bruch und zur Definition eines eindeutigen Drahtbruchs wurden ein Mikrofon sowie ein Beschleunigungssensor an den Ankerkörpern des Spanngliedes angebracht (Bild 8). Das Mikrofon diente zur Aufzeichnung des Körperschalls bei einem Drahtbruch. Durch den Beschleunigungsaufnehmer wurde der Impuls des Drahtbruchs aufgezeichnet. Es wurden redundant beide Systeme verwendet. Aufgrund der lang andauernden Versuche von z.T. mehreren Monaten war es nicht sinnvoll, alle Messdaten kontinuierlich zu speichern. Dieses hätte zu einer zu großen Datenmenge geführt. Aus diesem Grund erfolgte die Datenaufzeichnung der regulären Messtechnik, so auch der Rissweitenmessung in Feldmitte des Trägers, in periodischem Abstand. Um nun zwischen zwei periodischen Messungen, also in der Messpause, ebenfalls Drahtbrüche zu detektieren, wurden die Mikrofonsignale mittels einer Triggerregelung aufgezeichnet. Dabei wird bei Überschreiten eines vorab definierten Signalpegels des Mikrofons die Messung ausgelöst und das auslösende Messsignal des Mikrofons sowie des Beschleunigungssensors aufgezeichnet. Im Anschluss stoppt die Messung bis zum nächsten Ereignis. Bei jeder Aufzeichnung wird ebenfalls die Zeit mit erfasst. Somit ist es möglich, nach einem erfolgten Drahtbruch, ausgehend von der letzten periodischen Messung, die exakten Lastwechsel zum Bruchzeitpunkt zu berechnen.

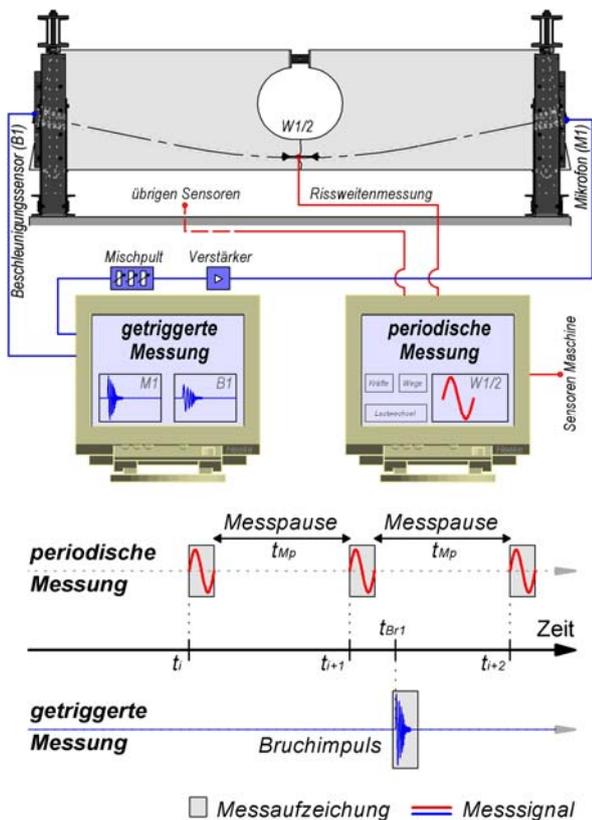


Bild 8: Messprinzip

Beide Sensoren parallel zu nutzen erwies sich als sehr sinnvoll. Dadurch konnten die Aufzeichnungen wesentlich besser interpretiert und eventuelle Fehlmessungen aussortiert werden. Üblicherweise zeigten Fehlmessungen ein ganz anderes Signalspektrum. Es zeigten sich aber durchaus Mikrofonaufzeichnungen, welche als Bruch hätten identifiziert werden können. Der Beschleunigungssensor alleine, ohne die zusätzliche Information aus der Mikrofonaufzeichnung, hätte in einigen Situationen nicht zu einer eindeutigen Interpretation des Signals geführt.

Nach Beendigung eines Versuches wurde das Hüllwellrohr im Bereich des Risses auf einer Länge von etwa 60cm vorsichtig freigelegt. Die Hüllrohre wiesen oftmals einen sichtbaren Riss auf. Anschließend ist auch das Hüllwellrohr herausgetrennt und geöffnet worden. Ob der Riss bereits unter der anfänglichen Initialbelastung zur Einprägung eines Betonrisses im Hüllrohr entstand konnte hier zwar nicht geklärt werden, ist aber eher nicht zu erwarten.

Nach Entfernen des Hüllwellrohrs zeigte sich in allen Versuchen, dass der Verpressmörtel im Bereich des Risses und der Drahtbrüche oft nur in bröseligem Zustand vorlag.

Üblicherweise erstreckte sich dieser Bereich in den entnommenen Spanngliedern auf einer Länge von etwa 5-10cm um den jeweiligen Riss im Hüllwellrohr.



Bild 9: Entnommenes Spannglied im Bereich des Betonrisses, hier: Versuch SB01



Bild 10: freigelegte Litzen; (Versuch SB01)

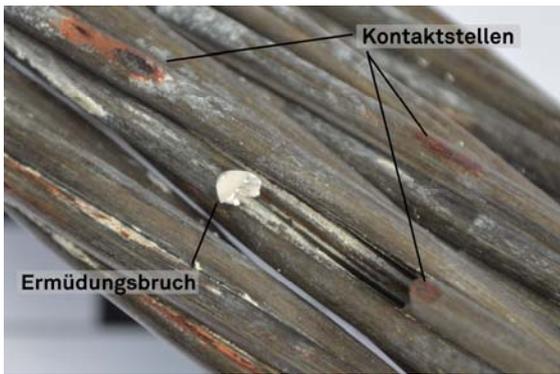


Bild 11: Ermüdungsbruch an Kontaktstelle

In beiden Versuchsserien zeigten sich typische Spuren von Reibkorrosion an den Spannstählen sowie am Hüllwellrohr. Diese waren deutlich an den Stellen zu erkennen, an denen die Spannlitzen punktuell durch die geometrisch erzwungene Umlenkung mit Anpressdruck an den Sicken des Hüllwellrohrs anlagen. Diese Stellen zeigten sich auffällig durch eine rostbraune Verfärbung (Bild 11) und entstehen durch die dortige tribochemische Reaktion bzw. Tribooxidation zwischen beiden Reibpartnern. Drahtbrüche infolge Ermüdung waren in allen Spanngliedern üblicherweise im Bereich von ca.  $\pm 10$ cm des entstandenen Bauteilrisses entfernt zu finden. Oft waren die Reibkorrosionsstellen der Ausgangspunkt für daraus folgende Ermüdungsbrüche.

### 2.3 Auswertung der Großversuche

Die jeweilige sprunghafte Zunahme der Rissweite zeigte sich in den Versuchen als guter Indikator für erfolgte Drahtbrüche. Erfolgt der erste Spanndrahtbruch, so ist dieses durch eine deutlich erkennbare Zunahme in der Rissweite feststellbar. Dieser führt jedoch nicht zu einem schlagartigen Tragverlust des Systems. Jeder weitere Drahtbruch folgt nun ebenso als Sprung in der gemessenen Rissweite, wodurch ein treppenartiger Verlauf entsteht. Mit zunehmender Anzahl an Drahtbrüchen wächst somit auch jeweils die Intensität der Rissweitzunahme. In den Versuchskurven ist ein vergleichbares Schädigungsverhalten erkennbar, welches sich in Abschnitte einteilt. Im Bild 12 ist der Versagensprozess exemplarisch an Versuchsdaten abgebildet. In einem ersten Bereich erfolgt die stabile Zunahme der Schädigung des Gesamtbauteils bis zum Versagenspunkt ①. Dieser Punkt definiert den Übergang vom stabilen Risswachstum zu einem instabilen Risswachstum. In einem zweiten Bereich erfolgt nun, bedingt durch das instabile Fortschreiten der einzelnen Ermüdungsbrüche, ein rasantes Anwachsen der Rissbreite bis zum Erreichen des Übergangspunktes ②. Ab hier wird das vollständige Versagen des Versuchsträgers eingeleitet und es kommt zu einem extrem instabilen Wachstum. Es treten vermehrt Gewaltbrüche in den verbleibenden Spanndrähten auf, da in diesen die aufnehmbaren Zugspannungen schlagartig überschritten werden.

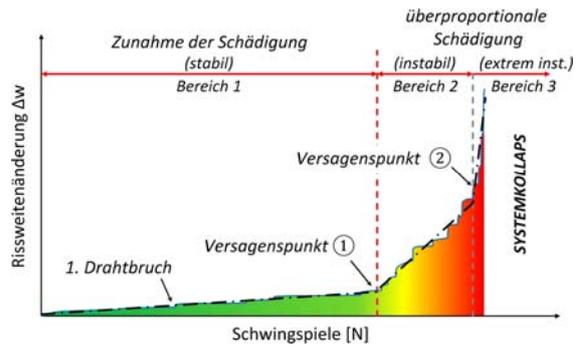


Bild 12: Versagensablauf / Rissweitenänderung

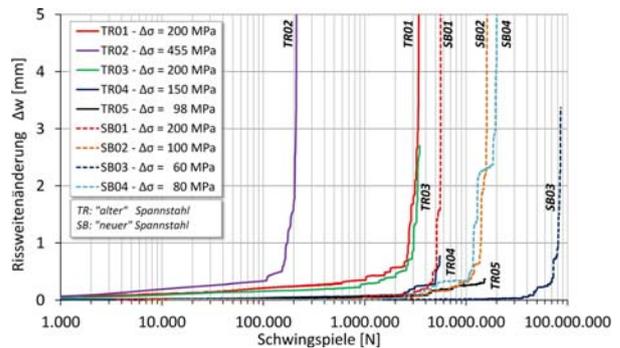


Bild 13: Zuwachs der Rissweite der Versuchsträger im Vergleich (logarithmisch)

Im Bild 13 ist die Entwicklung der Rissweitenänderung der Versuchsträger zu erkennen. Es ist in diesem Bild zu beachten, dass die Abszisse im logarithmischen Maßstab aufgetragen ist. Andernfalls ist eine vergleichende Darstellung aller Versuche schwer möglich. Der Einfluss der einwirkenden Schwingbreite  $\Delta\sigma_p$  auf die Lebensdauer und der damit verbundenen Rissweitzunahme eines Versuchsträgers ist deutlich zu erkennen. Die Versuchskurven in Bild 13 zeigen, dass Versuchsträger mit gleichen Schwingbreiten untereinander ein ähnliches Ermüdungstragverhalten aufzeigen (TR01, TR03 und SB02). So verhalten sich die Versuchsträger TR01 und TR03 aus der Serie TR des „alten“ Spannstahls bei gleicher Schwingbreite nahezu ähnlich. Der Unterschied in diesen zwei Versuchen lag in der im Versuchsträger TR01 aufgebracht geringeren Vorspannkraft. Das zeigt, dass eine leichte Änderung in der Vorspannkraft zwar in der Größe der Rissweitzunahme  $\Delta w$  erkennbar ist, sich das Ergebnis hinsichtlich der Ermüdungstragfähigkeit allerdings nicht entscheidend ändert.

Genauso unterlag aus der Serie SB des „neuen“ Spannstahls der Versuchsträger SB02 einer einwirkenden Schwingbreite von  $\Delta\sigma_p=200$ MPa und wies ebenfalls ein vergleichbares Verhalten zu den Trägern TR01 und TR02 auf. Auch bei diesem Versuch bildete sich nach ca. 1 Mio. Lastwechsel der erste Drahtbruch. Er konnte im Gegensatz zu den anderen beiden Trägern der einwirkenden ermüdungswirksamen Schwingbreite allerdings länger standhalten. Dieses ist vermutlich auf den

„neuen“ Spannstahl zurückzuführen, da dieser altersbedingt weniger Vorschädigungen aufwies. Die zur sprunghaften Rissweitenänderung führenden einzelnen Drahtbrüche sind zur Visualisierung als Wertepaare ( $\Delta\sigma_p$ , N) im doppellogarithmischen Bild 14 eingetragen. Es ist eine gute Deckung der insgesamt 9 Versuchsergebnisse beider Versuchsreihen untereinander zu erkennen. Lediglich der Versuch SB02 weist 7 ungewöhnlich frühe Drahtbrüche auf. Dieser Versuch wurde aktuell an der TU Dortmund bereits wiederholt. Dabei versagten die Spannstähle in dem zu erwartenden Bereich. Daher ist zu vermuten, dass bei einer Litze des Versuchs SB02

eine Vorschädigung vorlag. Versuche mit ähnlichen Spannungsschwingbreiten liegen, deutlich zu erkennen, in einem vergleichbaren Streubereich. Das zeigt, dass sich der über 55 Jahre ältere Spannstahl im eingebauten Gesamtsystem eines Ermüdungsversuchs durchaus mit einem Spannstahl einer heutigen Produktion vergleichen lässt. Die Ergebnisse des ersten Drahtbruchs sowie des ersten Versagenspunktes (1.VP) sind im Bild 15 als Wertepaare ( $\Delta\sigma_p$ , N) zusammen mit der charakteristischen Wöhlerlinie für gekrümmte Spannglieder im Blechhüllrohren der Klasse 1 nach DIN EN 1992-1-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5] eingetragen.

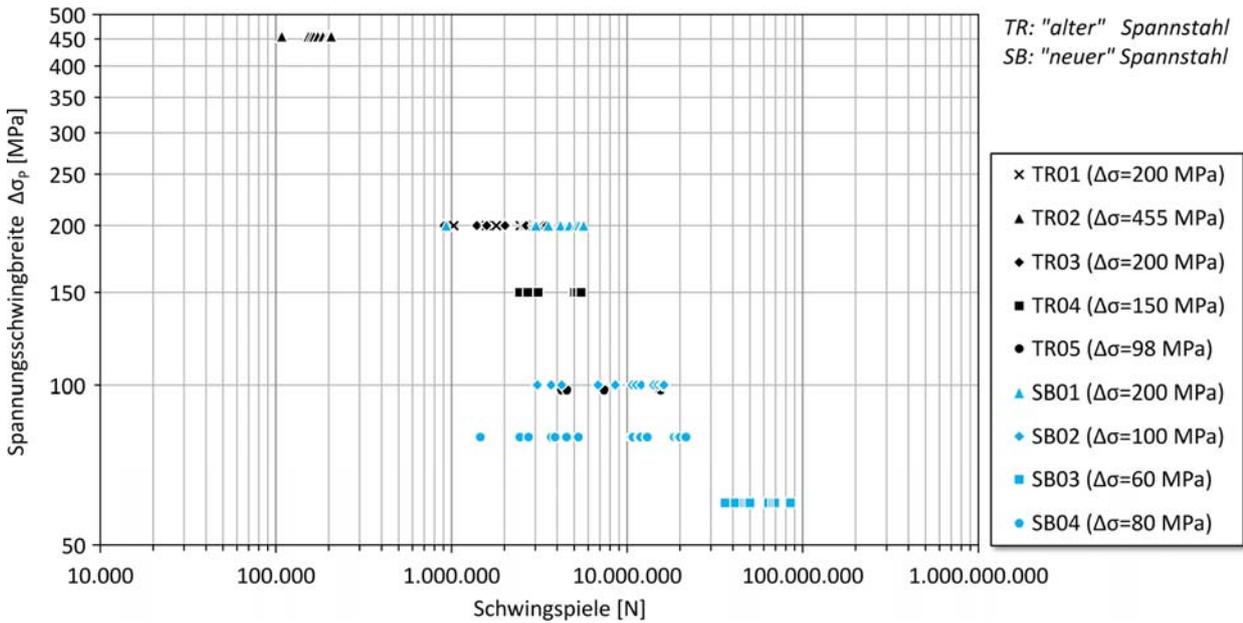


Bild 14: Drahtbrüche der Serie TR („alter“ Spannstahl) und SB („neuer“ Spannstahl)

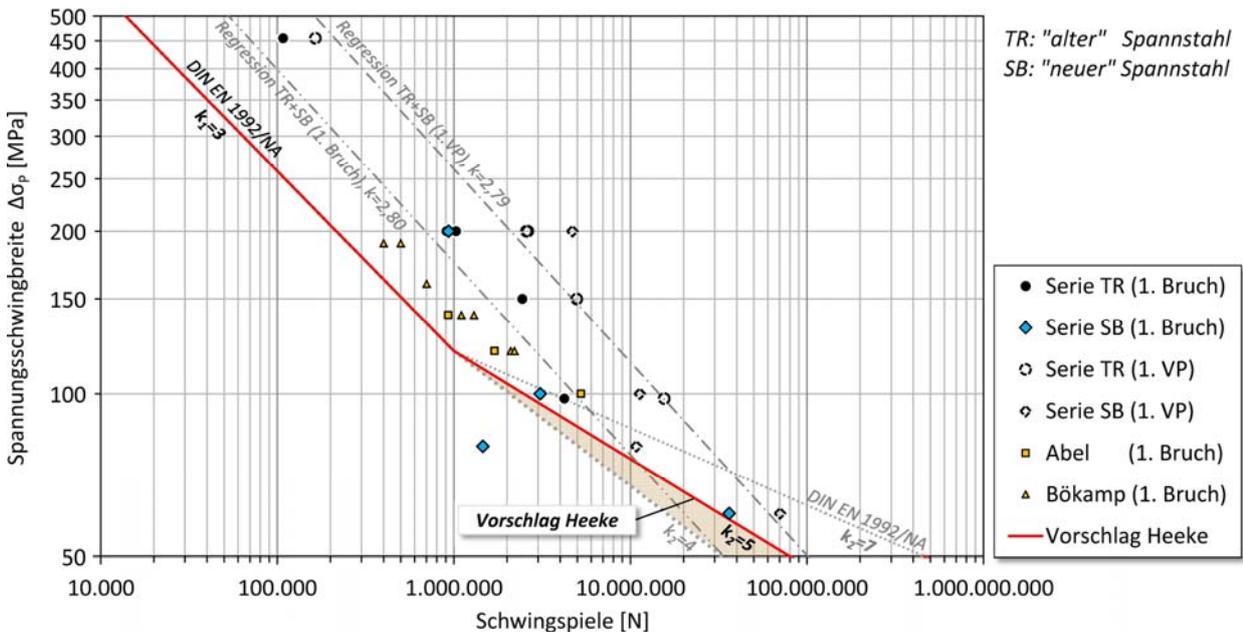


Bild 15: Eigene Versuchsergebnisse sowie Ergebnisse von Abel [1] und Bökamp [2] im Vergleich mit der charakteristischen Ermüdungsfestigkeitskurve nach DIN EN 1992-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5]

Aus den gewonnenen Versuchswerten des ersten Drahtbruchs und des definierten ersten Versagenspunktes sind die zugehörigen Mittelwertregressionsgeraden eingezeichnet. Diese weisen in ihrer Steigung tendenziell eine vergleichbare Größenordnung wie die Steigung  $k_1$  nach gültiger deutscher Norm auf. Die experimentell ermittelten Werte liegen im Bereich kleiner Schwingbreiten nicht mehr oberhalb dieser normgemäßen charakteristischen Wöhlerlinie. In den eigenen Versuchen [10] lag die niedrigste Schwingbreite bei 60MPa. Der Knickpunkt bzw. das Abflachen der charakteristischen Wöhlerlinie, bei einem charakteristischen Wert von  $\Delta\sigma_p=120\text{MPa}$ , spiegelt sich in den Versuchen nicht wieder. Eine echte Dauerschwingfestigkeit oder eine Tendenz zu einer Solchen konnte in den eigenen Versuchen nicht festgestellt werden.

## 2.4 Vorschlag zur Korrektur

Für den ersten Ast wird vorgeschlagen, die Steigung  $k_1=3$ , wie sie in DIN EN 1992-1-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5] sowie im Model Code 1990 [14] angegeben ist, beizubehalten (siehe auch Bild 15). Somit verläuft diese Steigung nahezu parallel zu den im Versuch gewonnenen Regressionsgeraden des ersten Drahtbruchs und des ersten Versagenspunktes.

Ein flacherer Ansatz mit einer Steigung  $k_1=5$ , wie nach EN 1992 oder Model Code 2010 [15] ist nicht notwendig. Dieses zeigten ebenfalls die recherchierten Ergebnisse anderer Arbeiten (Bild 1).

Auf Grundlage der eigenen Versuche mit sehr hohen Lastwechselzahlen müsste  $k_2$  statt 7 eher in einem Bereich zwischen 4 und 5 liegen. Wie sich zeigt, bietet der Vorschlag, den zweiten Steigungsast auf  $k_2=5$  statt 7 zu setzen, gerade noch Sicherheit gegenüber den gewonnenen Versuchsergebnissen.

Daher wird vorerst vorgeschlagen, den zweiten Ast mit einer steileren Steigung von  $k_2=5$ , analog zum Ansatz von Haibach [8], anzusetzen und den normgemäßen Knickpunkt bei 1 Mio. Schwingspielen und einer Spannungsschwingbreite von  $\Delta\sigma_{Rsk}=120\text{MPa}$  zu belassen.

Für einen endgültigen Vorschlag sind allerdings noch weitere Versuche im Bereich niedriger Schwingbreiten erforderlich, um hier eine abgesicherte Aussage treffen zu können. Diese werden zurzeit an der TU Dortmund weiter fortgeführt. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, den Knickpunkt aufgrund der bisherigen Ergebnisse nicht zu verändern.

## 3. Prognose der Lebensdauer der Versuche

Der in den Großversuchen gemessene Verlauf der Rissweitenänderung dient als guter Indikator für Drahtbrüche und kann durch Berechnung der Rissweite abgebildet werden. Grundlage bietet hierzu die Rissformel zur Ermittlung der Rissbreite eines Einzelrisses. Die Rissöffnung  $w$  entspricht genau dem Integral des Dehnungsunterschieds zwischen dem betroffenen Spannstahl und der umgebenen Betonfaser/Mörtelfaser inner-

halb der Verbundlänge des Risses. In diesem Bereich werden die Zugspannungen aus dem ungestörten Gesamtquerschnitt in den Stahl übertragen, bis diese letztendlich im Riss nur noch im Stahl vorhanden sind. Diese Länge umfasst beide Seiten des Risses. Durch die Bestimmung der mittleren Dehnung und der Risseinzugslänge kann daraus die Rissbreite ermittelt werden. Durch Modifikation der Rissbreitenformel hinsichtlich der zeitlich veränderlichen Einflussfaktoren, ergibt sich eine Funktion  $w(t)$  der Rissweite:

$$w(t) = (1 - k(t)) \cdot \frac{(\Delta\sigma_p(t))^2 \cdot A_p(t)}{0,72 \cdot \pi \cdot f_{cm} \cdot E_p \cdot \sqrt{A_p(t)}}$$

Diese ist zeitlich abhängig vom Verbundverhalten  $k(t)$ , der Querschnittsflächenreduzierung  $A_p(t)$  infolge auftretender Drahtbrüche, der Spannstahldifferenzspannung  $\Delta\sigma_p(t)$  in Abhängigkeit von der Restspannstahlfläche sowie dem E-Modul  $E_p$  und dem Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit  $f_{cm}$ .

Wie im Bild 16 zu sehen ist, lassen sich durch Einsetzen der in den Versuchen ermittelten Drahtbruchzeitpunkte und Materialparameter die gemessenen Werte gut abbilden. Die punktierte Linie zeigt die gemessenen Werte, die durchgezogene Linie die errechnete Rissweite. Da es sich bei der hergeleiteten Formel um eine idealisierte Betrachtung handelt, sind gewisse Abweichungen zu erwarten. So liegen Drahtbrüche durchaus auch etwas vom Betonriss entfernt und haben somit einen anderen Einfluss auf die Rissweitenzunahme. Da die exakte Lage des nächsten Drahtbruchs nicht vorhergesagt werden kann, ist diese Erfassung durch eine zusätzliche Variable nicht möglich. Es lässt sich zeigen [10], dass durch eine manuelle Gewichtung der einzelnen Drahtbrüche der Verlauf nahezu exakt als modifizierte Nachrechnung abgebildet werden kann (Bild 16).

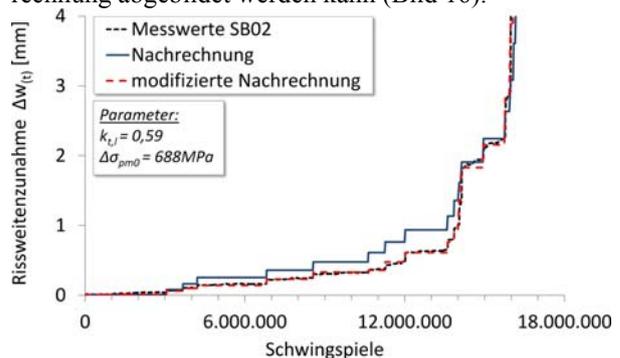


Bild 16: Nachrechnung unter expliziter Vorgabe der Bruchzeitpunkte sowie gewichteter

Basierend auf dem hergeleiteten Ansatz und der aus den Großversuchen gewonnenen Bruchdaten können nun mittels VBA Versagensverläufe simuliert werden. Weitere Prognoseverfahren werden beispielsweise in [11] vorgestellt. Wie im Bild 13 gezeigt, nimmt mit jedem Drahtbruch die Rissweite zu. Somit kann zwischen zwei

Drahtbrüchen die Differenzschwingenspielzahl  $\Delta N_i$  bestimmt werden. Ebenso steigt mit jedem Drahtbruch die Schwingbreite im Spannstahl anteilig an. Diese Wertepaare  $\Delta N_i, \Delta \sigma_i$  können als Datenbasis für Prognosesimulationen herangezogen werden. Hieraus wird eine MW-Prognosefunktion mit Prognoseintervallgrenzen einer gewählten Wahrscheinlichkeit berechnet. Anschließend erfolgt die Simulation des Schädigungsprozesses. Zu einer Ausgangsschwingbreite wird anhand der berechneten Mittelwertfunktion, Prognoseintervallgrenzen, Standardabweichung sowie Anzahl der Versuchswerte eine zufällige Schwingspielfferenz  $\Delta N_i$  auf Basis einer Normalverteilung generiert (Bild 17).

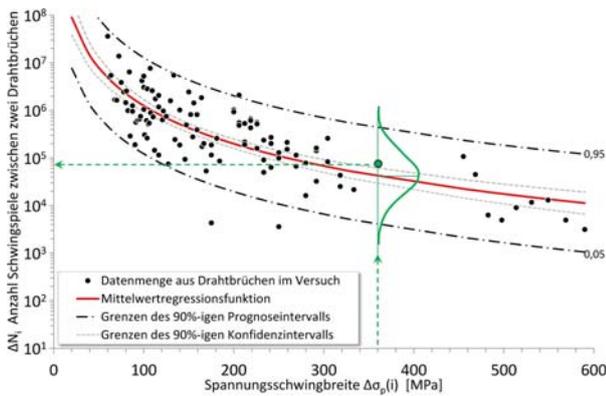


Bild 17: Regressionsfunktion mit Konfidenz- und Prognoseintervall auf Basis der Versuchswerte

Im Weiteren wird die Spannungsschwingbreite infolge eines Drahtbruchs erhöht und die nächste Schwingspielfferenz  $\Delta N_{i+1}$  analog simuliert. Zur Berücksichtigung des ersten Drahtbruchs sowie der Lage eines Drahtbruchs zum Betonriss werden zusätzliche simulierte Wichtungsfaktoren berücksichtigt.

Auf diese Weise erfolgen 500 Einzelsimulationen, aus denen dann auch wiederum die Mittelwertkurve gebildet wird.

Auf diese Weise können Prognosebänder für beliebige Ausgangsparameter generiert werden (z.B. Bild 18).

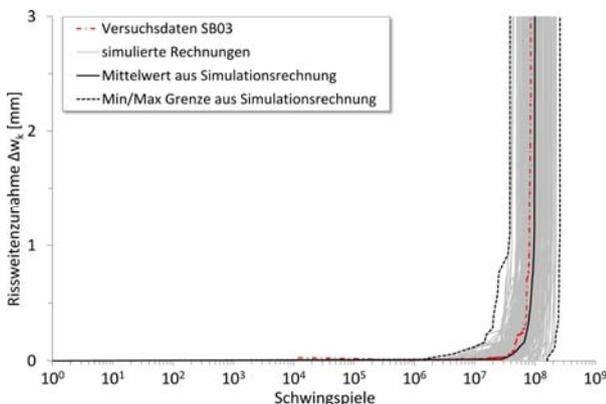


Bild 18: simuliertes Prognoseband für Versuch SB03

Diese können zur Beurteilung durchgeführter Versuche herangezogen werden oder für eine beliebige Schwingbreite eine Verhaltensprognose aufzeigen. Tendenziell kann der Fokus in der Simulation allerdings auf der generierten Mittelwertkurve liegen. Liegt eine Versuchsreihe eher im rechten Teil des aufgehenden Streubandes, so haben sich die Verhältnisse im Gesamtsystem des Versuchs positiv auf den Ermüdungsprozess ausgewirkt.

Liegt die Kurve hingegen im linken Teil des simulierten Streubandes, so kam es eher zu einem ungünstigen Systemverhalten hinsichtlich des Ermüdungsprozesses. Damit kann durch die Simulation ebenfalls eine Bewertung gewonnener Versuchsergebnisse erfolgen.

Ebenso lässt sich bei einem laufenden Versuch, zu einem beliebigen Zeitpunkt, dieser weiter prognostizieren (Bild 19).

Dabei können bereits gewonnene Versuchsergebnisse in die Grunddatenmenge mit einfließen. So kann eine Abschätzung der Restlebensdauer eines Versuchs erfolgen. Für weitere Details wird auf [10] verwiesen.

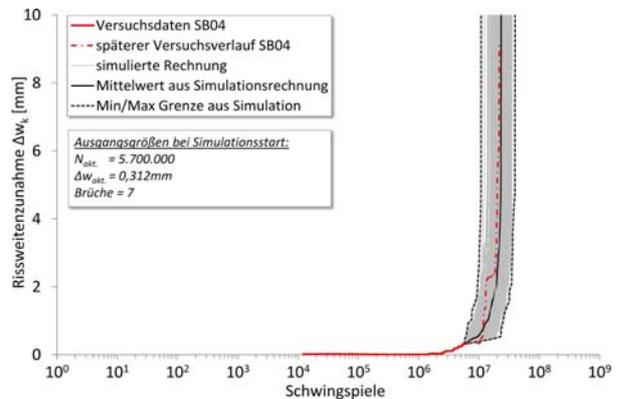


Bild 19: weitere Prognose eines laufenden Versuchs

#### 4. Zusammenfassung

„Alte“ Spannstähle aus einem Abbruchbauwerk von 1957 und „neue“ Spannstähle einer aktuellen Produktion wurden im freischwingenden und einbetonierten Versuch geprüft und untersucht. Im einbetonierten Zustand wurden diese im nachträglichen Verbund in einem gekrümmten Stahlhüllrohr eines Versuchsträgers eingebaut. In einem ersten Schritt wurden „alte“ Spannstahlproben und Spannstahlproben einer „neuen“ Produktion freischwingend unter einer zyklischen Belastung untersucht und ausgewertet.

Die „neuen“ Spannstahlproben zeigen speziell im Bereich hoher Lastwechselzahlen relativ große Streuungen in den Versuchsergebnissen.

Aufgrund der großen Streuung wies der „neue“ Spannstahl nach der Auswertung aller Versuchsergebnisse im Gegensatz zum „alten“ Spannstahl eine nur geringfügig höhere 5%-Quantilgrenze der Dauerschwingfestigkeit auf.

Im Bereich der Zeitfestigkeit zeigten die Spannstähle aus „alter“ und „neuer“ Produktion tendenziell ähnliche

Größen in der ausgewerteten Steigung im doppeltlogarithmischen Maßstab.

In einem zweiten Schritt wurden die Spannstähle im einbetonierten Zustand in gekrümmten Stahlhüllrohren untersucht, um Effekte des Gesamtsystems zu berücksichtigen.

Um die exakten Bruchzeitpunkte in den zum Teil über mehrere Monate laufenden Versuchen zeitlich eindeutig zu identifizieren, wurden Mikrofon- und Impulsmessungen an den Ankerköpfen durchgeführt.

Selbst unter der geringsten einwirkenden Schwingbreite von  $\Delta\sigma_F=60\text{MPa}$  war noch kein eindeutiges Abknicken zu einer Dauerschwingfestigkeit erkennbar. Drahtbrüche traten noch vor Erreichen der charakteristischen Wöhlerlinie nach DIN EN 1992-1-1/NA [4] bzw. DIN EN 1992-2/NA [5] auf.

Daher erfolgt der Vorschlag, den zweiten Steigungsast der Wöhlerlinie steiler zu wählen und diesen vorerst mit  $k_2=5$  anzusetzen.

Abschließend konnte gezeigt werden, dass die Zunahme der gemessenen Rissweite im Versuchsträger, hervorgerufen durch den Schädigungsprozess primär infolge auftretender Drahtbrüche unter zyklischer Beanspruchung, durch physikalisch-mathematische Beziehungen abgebildet werden kann. Hierauf basierend, erfolgte die Vorstellung eines Simulationsprozesses, durch den vorhandene oder neue Versuche gleichen Typs unter einer beliebigen Schwingbreite und geänderten Materialparametern prognostiziert werden können.

Es besteht weiterhin Forschungsbedarf, um weitere Erkenntnisse im Bereich des Ermüdungsverhaltens von Spannstahl im gekrümmten Stahlhüllrohr im nachträglichen Verbund unter kleinen Schwingbreiten mit extrem hohen Lastwechselzahlen bis  $10^8$  zu gewinnen. Ein Abknicken der Wöhlerlinie hin zu einer Dauerschwingfestigkeit konnte bislang nicht eindeutig festgestellt werden.

Weiterhin sollten Untersuchungen zur Übertragbarkeit der gewonnenen Ergebnisse auf andere Spanngliedgrößen und gemischte Bewehrung erfolgen.

## Danksagung

Die wissenschaftliche Arbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) innerhalb des Sonderforschungsbereichs SFB 823 *Statistical modeling of dynamic processes* gefördert.

## Literaturverzeichnis

[1] Abel, M.: "Zur Dauerhaftigkeit von Spanngliedern in teilweise vorgespannten Bauteilen unter Betriebsbedingungen", Schriftenreihe, 1. Auflage, IMB, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 4, (1996)

[2] Bökamp, H.: "Ein Beitrag zur Spannstahlermüdung unter Reibdauerbeanspruchung bei teilweiser

Vorspannung", Dissertation, RWTH Aachen, (1990)

[3] Block, K., Dreier, F.: "Die Ermüdungsfestigkeit zuverlässig und kostengünstig ermitteln - Das interaktive Verfahren", Materialprüfung, Band 40, Heft 3, S. 73–77, (1998)

[4] DIN EN 1992-1-1/NA: "Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau", Beuth Verlag, (April 2013)

[5] DIN EN 1992-2/NA: "Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln", Beuth Verlag, (April 2013)

[6] DIN 4227:1953: "Spannbeton - Richtlinien für Bemessung und Ausführung - DIN 4227", Ernst & Sohn, (1953)

[7] Eskola, L.: "Zur Ermüdung teilweise vorgespannter Betontragwerke", Dissertation, ETH Zürich, (September 1996)

[8] Haibach, E.: "Betriebsfestigkeit", Springer Verlag, 3. Auflage, VDI-Buch, (2006)

[9] Hegger, J., Neuser, J. U.: "Untersuchungen zur Reiberermüdung von großen Spanngliedern bei teilweise vorgespannten Bauteilen unter Betriebsbedingungen, Bericht, Nr. 49/98, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen, (1998)

[10] Heeke, G.: „Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Betonstahl und Spannstahl im Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich mit sehr hohen Lastwechselzahlen“, Dissertation, TU Dortmund, Schriftenreihe Betonbau, Heft 9, (2016)

[11] Heeke, G., Hermann, S., et al.: „Stochastic modeling and statistical analysis of fatigue tests on prestressed concrete beams under cyclic loadings“, Discussion Paper, SFB 823, Nr.05/2015 (2015)

[12] Maurer, R., Heeke, G., Marzahn, G.: "Ermüdungsfestigkeit der Spannstähle einer Autobahnbrücke von 1957 im einbetonierten Zustand", Bauingenieur, Heft 5, S. 226-236, Jg. 87, (2012)

[13] Müller, H. H.: "Prüfverfahren für die Dauerfestigkeit von Spannstählen, Abschlussbericht, Institut für Bauingenieurwesen III, Nr. 111, TU-München, (1985)

- [14] Model Code 1990: "CEB-FIP Model Code 1990", Telford Verlag
- [15] Model Code 2010: "fib Model Code for Concrete Structures 2010", International Federation for Structural Concrete
- [16] Oertle, J.: "Reibermüdung einbetonierter Spannkabel", Birkhäuser, Bericht / Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, 166, (1988)
- [17] Voß, K.-U.: "Zum Trag- und Verformungsverhalten von Spannbetonträgern im Zustand II, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, 111, (1993)





