

Resttragverhalten von korrosionsgeschädigten Beton-stählen unter dynamischen Beanspruchungen

Kevin Kriescher, Christian Helm, Michael Raupach

*Institut für Baustoffforschung,
RWTH Aachen University,
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen, Germany*

kriescher@ibac.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Ermüdungsbeanspruchte Stahlbetonbauwerke, wie beispielsweise Brücken, sind oftmals korrosionsfördernden Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Da Stahlbetonbauwerke im Zustand II Risse aufweisen, besteht die Möglichkeit, dass vor allem in Kombination mit dynamischer Beanspruchung und der daraus resultierenden Bewegung der Risse korrosionsfördernde Stoffe, z.B. Chloride, durch den Riss bis zur Bewehrung transportiert werden und diese lokal schädigen können. Die Kombination von dynamischer sowie korrosiver Beanspruchung kann die Lebensdauer eines Bauteils unter Umständen deutlich stärker vermindern, als es bei Betrachtung der gegenwärtigen Regelwerke für die Bemessung zu erwarten wäre.

Die übergeordneten Ziele dieses Projektes sind die Beurteilung des Zustandes und die Ermittlung der Restlebensdauer von nicht vorgespannten, schwingungsbeanspruchten Bauteilen sowie die Erarbeitung von Konzepten zur Bemessung von Bauteilen unter kombinierter Ermüdungs- und chloridinduzierter Korrosionsbeanspruchung. Im besonderen Fokus steht dabei die Erfassung und Charakterisierung der Korrosionsnarbenmorphologie. Dazu wird anhand einer mittels 3D-Scanner erstellten Geometrie eine Flächenanalyse durchgeführt, die zur Erfassung der lateralen Ausprägung und der Tiefe der Korrosionsnarben dient. Im Hinblick auf die Beschreibbarkeit einer Korrosionsnarbe sind mehrere Ansätze möglich. Im Zuge der späteren Schwingversuche ist zu überprüfen, welche dieser Eigenschaften, wie z.B. flächige Ausprägung, Maximaltiefe oder ein Verhältniswert aus diesen beiden, einen maßgebenden Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Stahls hat.

Im Rahmen dieses Beitrags soll die bestehende Problematik beleuchtet und darauf aufbauend die Zielsetzung des Projekts erläutert werden. Neben den Materialien und dem Prüfkörperkonzept sollen erste Ergebnisse präsentiert werden. Die Veröffentlichung der weiteren Ergebnisse ist sukzessive in zukünftigen Beiträgen geplant.

Keywords: Beton, Stahlbeton, Ermüdung, Korrosion, Chlorid

Abstract

Reinforced concrete structures under fatigue stress, such as bridges, are often exposed to corrosive environmental conditions. In State II reinforced concrete structures display cracks. When combined with dynamic loading and resulting crack movements, corrosion-promoting substances like chlorides can pass through the crack and cause local damage to the rebar. In certain circumstances, the integration of dynamic and corrosive stresses could significantly reduce the service life of the component compared to the expected reduction based on current design regulations and rules.

The primary objectives of this research project are to investigate the structural condition and determine the remaining service life of unstressed and fatigue loaded components and to develop a design approach for components subjected to combined fatigue and chloride induced corrosion. The main focus will be on recording and characterizing the morphology of the corrosion pits. Based on a geometry created using a 3D scanner, a surface analysis is carried out to determine the lateral extent and depth of the corrosion pits. There are multiple approaches to the description of a corrosion pit. In the context of the subsequent fatigue tests, it is necessary to determine which of these properties, such as flatness, maximum depth, or a ratio of these two, has a critical influence on the fatigue behaviour of the steel.

In this paper, the existing issues will be discussed and, based on this, the main objectives of the research project will be explained. In addition to the concept of the test specimen, the first results will be presented. Further results will be successively published in future articles.

Keywords: concrete, reinforced concrete, fatigue, corrosion, chloride

1 Stand der Technik

Die Ermüdungsfestigkeit von Betonstahl wird durch den Dauerschwing- bzw. Wöhlerversuch ermittelt [2, 8]. Die Ergebnisse resultieren in sogenannten Wöhlerlinien, welche für die Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Stahlbetonbauwerken herangezogen werden. Der Knickpunkt der Wöhlerlinie bei 1 Mio. Lastwechseln geführt und erfolgt unter der Annahme einer Wöhlerlinie mit den Spannungsexponenten $k_1 = 5$ und $k_2 = 9$, vgl. Bild 1 (links) [1]. Der Durchmesser der Stäbe wird in den Spannungsexponenten und somit dem Verlauf der Wöhlerlinie nicht berücksichtigt. Für Durchmesser ≤ 28 mm wird für 1 Mio. Lastzyklen eine Schwingbreite von $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$ N/mm² und für Durchmesser > 28 mm eine Schwingbreite von $\Delta\sigma_{Rsk} = 145$ N/mm² angesetzt, was zu einer Parallelverschiebung der Wöhlerlinie nach unten und einer Herabsetzung der Widerstandsseite im Nachweis führt. Die DIN EN 1992-2 NA beinhaltet dementsprechend keine konkrete Einbeziehung der Korrosionsbeanspruchung in die Bemessung. Es besteht lediglich der Hinweis, dass in korrosiven Expositionen weitere Überlegungen zur Wöhlerlinie anzustellen sind und der Spannungsexponent k_2 auf einen Wert zwischen 5 und 9 reduziert werden kann, vgl. Bild 1 (links). Eine Modifizierung des Spannungsexponenten k_1 (Schwingspiele bis 1 Mio.) ist nicht vorgesehen. [1]

Im Model Code 90 des fib [5] werden für Stähle in einer nicht korrosiven Umgebung die Spannungsexponenten ebenfalls zu $k_1 = 5$ und $k_2 = 9$ angesetzt. Der Knickpunkt ist ebenfalls durch die Schwingspielzahl $N^* = 1$ Mio. definiert. Im Unterschied zu DIN EN 1992-2/NA:2013 [1] werden hier die zwei Durchmesserbereiche $d \leq 16$ mm und $d \geq 40$ mm unterschieden. Der Knickpunkt für Stähle $d \leq 16$ mm ist bei einer Schwingbreite von $\Delta\sigma_{Rsk} = 210$ N/mm² und für Stähle $d \geq 40$ mm bei einer Schwingbreite von $\Delta\sigma_{Rsk} = 160$ N/mm² definiert, vgl. Bild 1 (rechts). Für Stähle mit einem Durchmesser $16 \text{ mm} < d < 40$ mm kann zwischen den beiden Wöhlerlinien interpoliert werden. Das Ermüdungsverhalten wird somit im Vergleich zur DIN EN 1992-2/NA:2013 [1] konservativ angenommen.

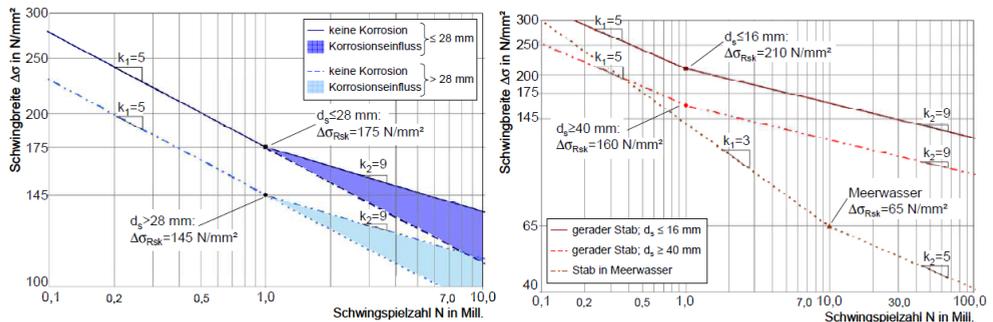


Bild 1 Wöhlerlinien nach DIN EN 1992-2/NA (links) und fib Model Code 90 für Betonstahl an Luft/ in Meerwasser (rechts) nach [10]

Im Model Code 90 wird zusätzlich eine Wöhlerlinie angegeben, die für Stäbe in Meerwasser gilt. Diese beruht auf Versuchen, die unter der Extrembedingung Meerwasserangriff durchgeführt wurden und bildet eine wesentlich schlechtere Ermüdungsfestigkeit ab als die Wöhlerlinien für Stäbe ohne Korrosionsangriff. Diese Wöhlerlinie gilt für alle Durchmesser gleichermaßen. Die gültigen Bemessungswerte der DIN EN 1992-2/NA:2013 [1] stellen demnach bei einer Vernachlässigung eines Korrosionsangriffes vermutlich eine Überschätzung der Ermüdungsfestigkeit dar. Allerdings fehlen auch im Model Code 90 Erkenntnisse zu unterschiedlichen Durchmessern und Expositionen, da nur der Extremfall „Meerwasser“ berücksichtigt wird. [5]

Weirich [10] hat Untersuchungen zur Ermüdungskorrosion von „nackten“ Betonstählen in korrosiven Lösungen durchgeführt, um zu ermitteln, inwieweit sich der Schadensverlauf bei gleichzeitiger Beanspruchung durch Schwingung und Korrosion expositionsabhängig voneinander unterscheidet. Als

korrosive Lösungen kamen für die Expositionsklasse X0 eine gesättigte Calciumhydroxid-Lösung ($\text{pH} = 12,6$, Porenlösung des Zementsteins), für die Expositionsklasse XD3 bzw. XS3 eine Calciumhydroxid-Lösung mit 3,0 M-% Chlorid (NaCl), (tausalzhaltiges Spritzwasser, Meeresspritzwasser), für die Expositionsklasse XC4 eine Calciumcarbonat-Lösung ($\text{pH} = 8,0$, karbonatisierter Beton) und für die Expositionsklasse XD1 eine Calciumcarbonat-Lösung mit 1,0 M-% Chlorid (NaCl) Zugabe ($\text{pH} = 8,0$, tausalzhaltiger Sprühnebel) zum Einsatz. Die Ergebnisse aller vier untersuchten Expositionsklassen zeigen eine deutliche Unterschreitung der Wöhlerlinien für $d = 16$ mm nach [1] und [5]. Weiterhin wurde gezeigt, dass der Stabdurchmesser einen maßgebenden Einfluss auf die Ermüdung von Betonstahl hat. Die Schwingfestigkeit von Stäben mit $d = 40$ mm war niedriger als die Schwingfestigkeit von Stäben mit $d = 16$ mm. In der Literatur wird kein maßgeblicher Unterschied der Schwingfestigkeiten bis zum Durchmesser 25 mm festgestellt, was sich auch in der Bemessung widerspiegelt. [1, 9]

Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass das Versagen von korrodierten Stählen im Ermüdungsversuch von der Korrosionsnarbe ausgehend ist. Die lokale Querschnittsverminderung wirkt wie eine Kerbe, die als Risskeim dient. Bei Querschnittsverlusten von ca. 15 % kommt es zu einer Verminderung der Schwingfestigkeit um ca. 70 % [7]. An der Korrosionsnarbe treten Spannungskonzentrationen auf und die Streckgrenze, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, wird verringert. Die Korrosionsnarben verkürzen den Einschnürungsbereich des Stahls in der Spannungs-Dehnungskurve und reduzieren die Ausdehnung. Im fortgeschrittenen Zustand bedeutet eine Herabsetzung der Bewehrungsduktilität unter Umständen eine Gefährdung der gesamten Konstruktion. [11]

Die aktuelle Literatur zeigt, dass die Schwingfestigkeit von Betonstahl durch eine kombinierte Ermüdungs- und Korrosionsbeanspruchung hinabgesetzt wird. Grundlegenden Erkenntnisse zu den maßgebenden Einflussparametern fehlen jedoch. Ziel des hier dargestellten DFG-geförderten Forschungsprojekts „Resttragverhalten von korrosionsgeschädigten Betonstählen unter dynamischen Beanspruchungen“, ist die Beurteilung des Zustandes und die Ermittlung der Restlebensdauer von nicht vorgespannten, schwingungsbeanspruchten Bauteilen sowie die Erarbeitung von Konzepten zur Bemessung von Bauteilen unter kombinierter Ermüdungs- und chloridinduzierter Korrosionsbeanspruchung. Erste Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

2 Materialien, Methoden und erste Ergebnisse

2.1 Prüfmaschine

Um die erwarteten hohen Lastwechselzahlen der Dauerschwingversuche in vertretbaren Versuchszeiträumen realisieren zu können, sind hohe Prüffrequenzen erforderlich. Diese können typischerweise nur durch Resonanzprüfmaschinen erbracht werden, die ihre Lasten mittels einer sinusförmigen magnet- oder unwuchtinduzierten Anregung mit variablen Amplituden um eine vorapplizierte Mittelast aufbringen. Hydraulische Prüfmaschinen sind bauartbedingt aufgrund ihrer mechanischen Komponenten limitiert und weisen zusätzlich einen deutlich größeren Energiebedarf und Verschleiß auf. Für die Vielzahl der im Rahmen dieses Forschungsprojekts geplanten Dauerschwingversuche wird die DFG-geförderte Großlastresonanzprüfmaschine POWER SWING 1.500 kN MOT der SincoTec Test Systems GmbH mit einer maximalen Oberlast von bis zu 1,5 MN und einer maximalen Amplituden von $\pm 0,5$ MN, siehe Bild 2, verwendet. Die Prüfmaschine agiert im Druckschwell-, Wechsel- und Zugschwellbereich und ist geeignet für die Durchführung von statischen und dynamischen Zug-, Druck- und Biegezugversuchen. Im Gegensatz zu den üblicherweise magneterregten Resonanzprüfmaschinen, ist diese Maschine als Dreimassenschwinger ausgeführt. Daraus ergibt sich insbesondere hinsichtlich der maximal möglichen dynamischen Hübe (± 5 mm) ein entscheidender Vorteil. Dieser betrifft vornehmlich Bauteilversuche im Zustand II bei denen die Rissentwicklung unter zyklischer Beanspruchung untersucht werden soll. Für die vergleichsweise geringen Schwingwege (< 1 mm), die bei den einaxialen Zugversuche dieses Projekts zu erwarten sind, ist dies jedoch nicht relevant.

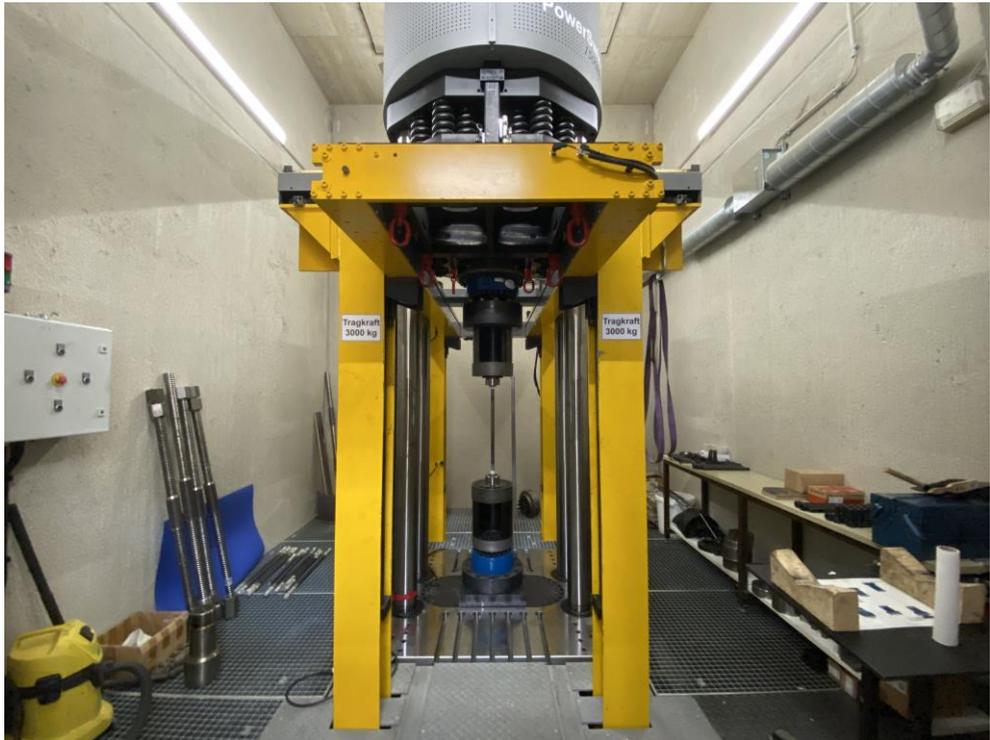


Bild 2 Großlastresonanzprüfmaschine POWER SWING 1.500 kN MOT

2.2 Materialeigenschaften

Untersucht wird Betonstahl B500B der Durchmesser 25 und 32 mm, da dieser Durchmesserbereich für die Thematik am stärksten kritisch bewertet wird, gleichzeitig hier jedoch bisher wenige Erkenntnisse vorliegen. Der untersuchte Betonstahl wurde nach dem TEMPCORE-Verfahren hergestellt und vollumfänglich zu einem definierten Zeitpunkt aus der laufenden Produktion entnommen, um Einflüsse resultierend aus dem Abnutzungsgrad der Profilierungswalzen bestmöglich auszuschließen. Die beiden untersuchten Stähle weisen einseitig alternierend geneigte Rippen auf, während die andere Seite mit parallel zueinander verlaufenden Rippen versehen ist, vgl. Bild 3. Die Maße und Abstände der Schrägrippen sowie die ermittelten bezogenen Rippenflächen gemäß DIN 488-2:2009 sind jeweils für die alternierend geneigten (a) und parallel zu einander verlaufenden Rippen (p) in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Maße und Abstände der Rippen sowie bezogene Rippenflächen

Durchmesser	Typ	Rippenhöhe			Rippenabstand	Kopfbreite	Winkel		Reihenabstand	Rippenlänge	Bez. Rippenfläche f_R
		a _{1/4}	a _m	a _{3/4}			c	α			
mm	-	mm					°		mm		-
25	a	1,31	2,42	2,09	15,1	1,9	50	68/52	3,08	38,8	0,091
	p	1,59	2,29	1,74	15,3	2,4	50	62	3,52	40,7	
32	a	2,18	2,86	2,72	19,8	2,9	49	70/48	2,64	50,6	0,097
	p	2,17	2,85	2,32	19,9	3,0	64	58	2,79	56,1	

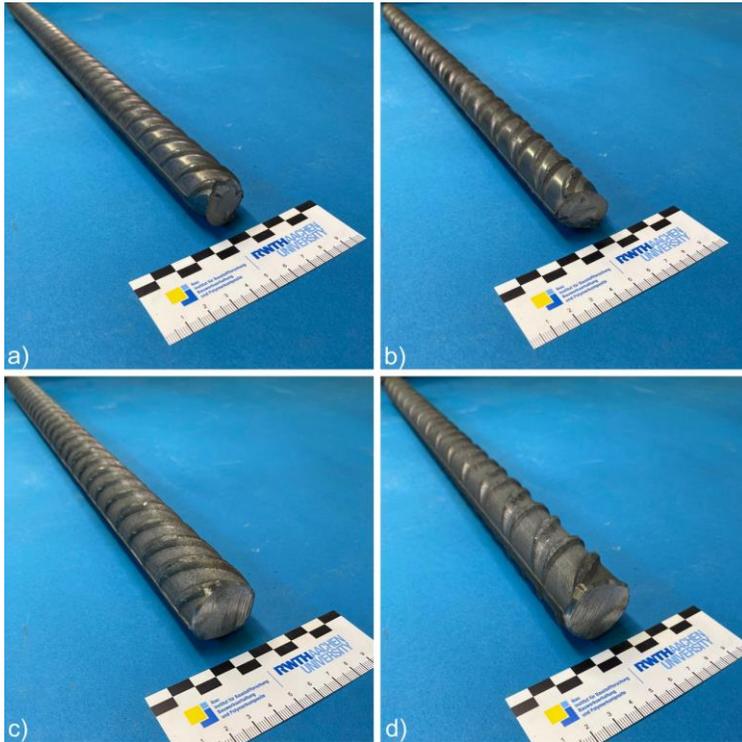


Bild 3 Exemplarische Darstellung der untersuchten Betonstähle: a) Durchmesser 25 mm parallel verlaufende Rippen; b) Durchmesser 25 mm alternierend geneigte Rippen; c) Durchmesser 32 mm parallel verlaufende Rippen; d) Durchmesser 32 mm alternierend geneigte Rippen

Neben den geometrischen Eigenschaften wurden die wichtigsten mechanischen Kennwerte wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Gesamtdehnung bei Höchstlast und E-Modul für beide untersuchten Betonstähle an jeweils 3 Proben ermittelt, s. Tabelle 2.

Tabelle 2: Mittelwerte der mechanischen Kennwerte des Betonstahls

Durchmesser	Zugfestigkeit R_m	Streckgrenze R_e	Streckgrenzenverhältnis R_m/R_e	Gesamtdehnung bei Höchstlast A_{gt}	E-Modul
mm	N/mm ²		-	%	N/mm ²
25	679,8	578,5	1,18	12,7	225613
32	663,4	562,5	1,18	11,4	240358

Um zu einem späteren Zeitpunkt Rückschlüsse auf den Einfluss der erzeugten Korrosionsnarben auf die Ermüdungsfestigkeit zu ermöglichen, muss für die ungeschädigten Betonstähle zunächst die Wöhlerlinie mit konstanter Oberspannung im Zug-Schwellbereich in Anlehnung an DIN 50100:2016-12 [2] ermittelt werden. Insgesamt werden für die Referenzserie 30 Proben mit einer konstanten Probenlänge von rd. 840 mm geprüft. Die variierten Schwingbreiten ergeben sich in Abhängigkeit der kritischen Schwingbreiten nach [1] (vgl. Bild 1) zu 145, 175 und 200 N/mm² für Durchmesser 25 mm und 125, 145 und 175 N/mm² für Durchmesser 32 mm.

2.3 Korrosionsnarbenerzeugung

Um bestimmten Korrosionszuständen Dauerschwingfestigkeiten zuordnen zu können, müssen realitätsnahe Korrosionsnarben erzeugt werden. Zu diesem Zweck werden Verbundkörper mit mittig liegendem Bewehrungsstab hergestellt. Der Verbundkörper wird als Balken mit symmetrischem Querschnitt gefertigt, die Betondeckung beträgt 30 mm. Zusätzlich wird ein MMO beschichtetes Titangitter als Gegenelektrode eingebaut. Zur Erzeugung einer Sollrissstelle werden die Prüfkörper an der Betonoberfläche mit zwei seitlichen Einkerbungen versehen. Im ausgehärteten Zustand wird der Prüfkörper einer Zugbelastung, eingebracht über den mittigen Bewehrungsstab, ausgesetzt, sodass ein Trennriss entlang der Sollrissstelle entsteht. Um die dauerhafte Rissöffnung von mindestens 0,2 mm sicherzustellen, werden im aufgeweiteten Zustand Stahlbleche in entsprechender Dicke in die Einkerbungen eingebracht, bevor die Probe wieder entlastet wird. Zur Erzeugung der Korrosionsnarbe wird auf die Oberseite des Probekörpers ein Füllstoffreservoir aufgebracht, wodurch der Riss mit korrosiver Lösung beaufschlagt werden kann und eine realistische Schädigungssituation geschaffen wird. In Bild 4 ist exemplarisch der Aufbau der Probekörper mit Stabdurchmesser 25 mm dargestellt.

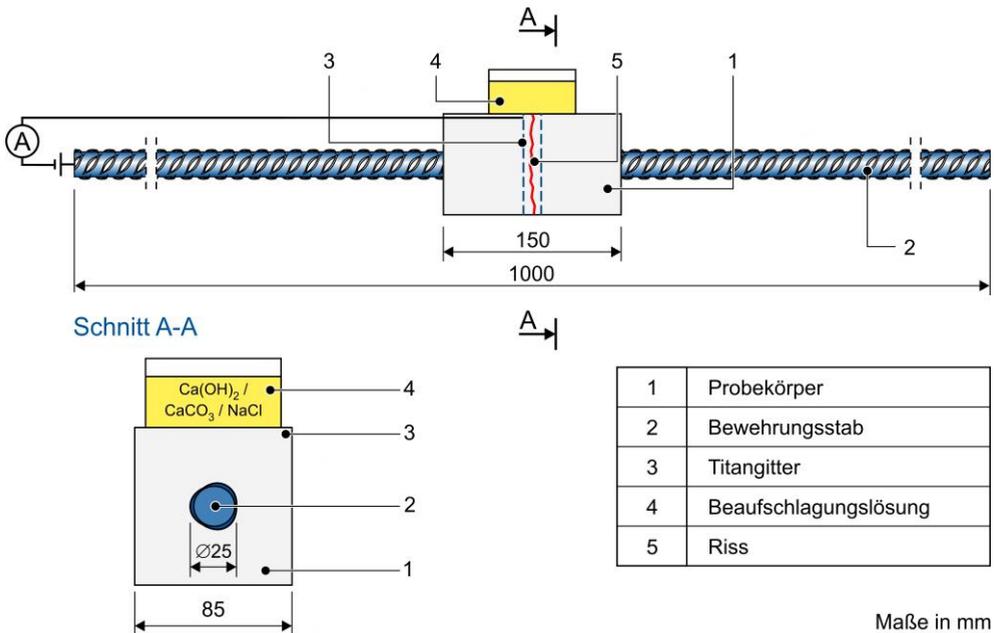


Bild 4 Schematische Darstellung der Probekörper Beaufschlagungssituation

Während die Verbundkörper durch die eindringende Lösung korrodieren, werden die Elementströme zum Titangitter gemessen. Die Messung der Elementströme erfolgt durch am ibac entwickelte Messeinheiten, die es ermöglichen, an mehreren Korrosionszellen in Dreielektrodenkonfiguration (Referenz-, Arbeits- und Gegenelektrode) Ströme bis 100 mA zu erfassen. Außerdem ermöglicht das System, Potentialmessungen mit einer Messfrequenz von 50 Hz (Einkanalbetrieb) bzw. 25 Hz (Zweikanalbetrieb). Nach einer zuvor festgelegten und von den gemessenen Makroelementströmen abhängigen Beaufschlagungsdauer werden die Stähle ausgebaut. Es wird erwartet, dass unterschiedliche Makroelementströme zu unterschiedlichen Querschnittsverlusten führen. Neben den verschiedenen Beaufschlagungsdauern wird im Rahmen dieses Arbeitspakets zwischen einer kontinuierlichen und einer diskontinuierlichen Beaufschlagung mit korrosiver Lösung unterschieden. Des Weiteren soll die Hälfte der vorgesehenen Prüfkörper natürlich korrodieren, während die andere Hälfte einem beschleunigten Korrosionsprozess mittels anodischer Polarisation ausgesetzt wird. Im Hinblick auf die erzielten Restquerschnitte der Versuche im Rahmen von [3] sowie [6] werden lokal im Rissbereich minimale Restquerschnitte zwischen 70 und 90 % angestrebt.

Der zentrale Ansatz dieses Forschungsvorhabens ist die Klärung des Einflusses der Korrosionsnarbenmorphologie auf die Materialermüdung. Hierzu soll ein 3D-Scanner verwendet werden, welcher eine CAD-Datei des aufgenommenen Objektes erstellt. In Bild 5 (rechts) ist exemplarisch der Scan

einer korrodierten Probe dargestellt. Anhand der 3D-Abbildung wird eine Flächenanalyse durchgeführt, welche sowohl die laterale Ausprägung als auch die Tiefe der Korrosionsnarben erfasst. Anhand der auf diese Weise erfassten Schadensmorphologie soll untersucht werden, inwieweit sich die Exposition auf diese auswirkt. Im Hinblick auf die Beschreibbarkeit einer Korrosionsnarbe sind mehrere Ansätze möglich. Im Zuge der Schwingversuche ist zu überprüfen, welche dieser Eigenschaften, wie z.B. flächige Ausprägung, Maximaltiefe, oder ein Verhältniswert aus diesen beiden (vgl. [4]) einen Einfluss auf das Ermüdungsverhalten des Stahls hat. Mithilfe des CAD-Modells wird ebenfalls der minimale Restquerschnitt bestimmt. Die Lastereinstellungen der Versuche können somit für jede Probe individuell festgelegt werden, sodass die Stähle auf gleichen, definierten Schwingbreiten geprüft werden. Somit kann der Einfluss der Narbengeometrie auch getrennt von der Narbentiefe betrachtet und die Stähle können trotz unterschiedlich ausgeprägter Querschnittsschwächungen bestmöglich miteinander verglichen werden.

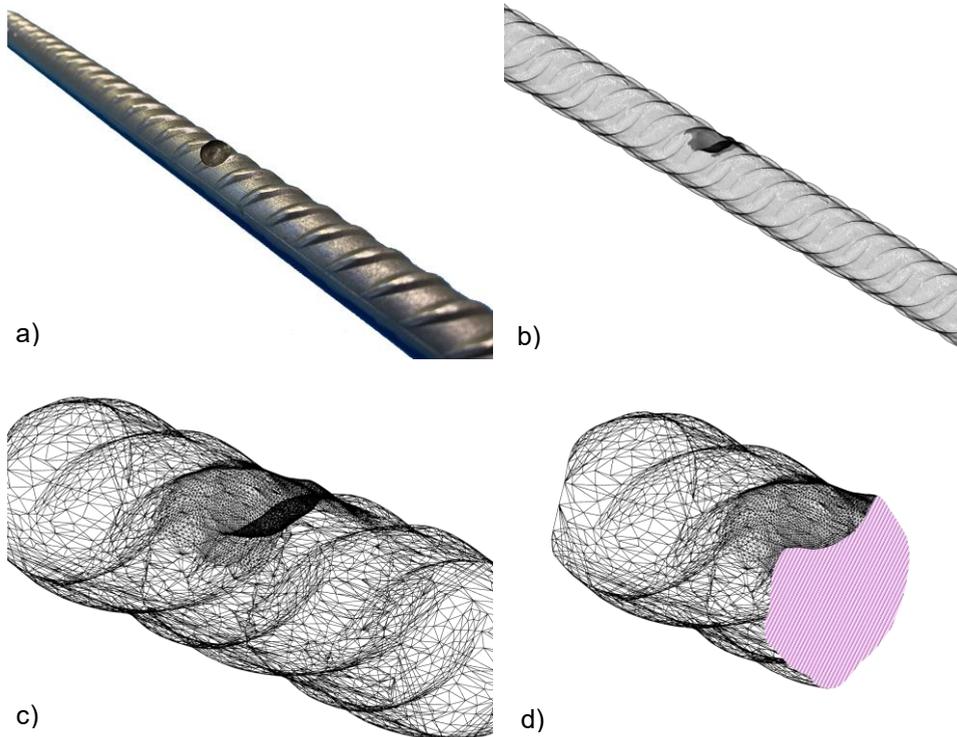


Bild 5 Exemplarische Darstellung der verschiedenen Schritte zur Charakterisierung der Korrosionsnarbengeometrie: a) Fotografische Dokumentation eines vorgeschädigten Bewehrungsstabs; b) Erstellung einer Punktwolke mittels 3D-Scanner; c) Transformation von Netz- in Volumenkörper; d) Ermittlung des Querschnittsverlusts mittels Schnittanalyse

3 Ausblick

Selbst bei gleichen Korrosionsbedingungen unterscheidet sich jede auf natürliche Weise hervorgerufene Korrosionsnarbe von der anderen, auch wenn sie ähnliche Flächenverhältnisse aufweisen. Verbunden mit der ohnehin großen Streuung von Ermüdungsversuchen ergeben sich hier also Unsicherheiten in der Bewertung der Dauerschwingfestigkeit. Um dennoch reproduzierbare geometrisch definierte Korrosionsnarben zu erzeugen, sollen relevante, zuvor mittels 3D-Scanner vermessene und in CAD-Modelle umgewandelte Korrosionsnarbengeometrien mittels einer CNC-Fräse auf unbeschädigten Betonstäben abgebildet werden. Es entsteht also eine mechanisch hergestellte Kopie der Schädigung. In Ermüdungsversuchen soll schließlich die Vergleichbarkeit der mechanisch bzw. korrosiv geschädigten Stäbe untersucht werden. Vor sowie im Anschluss an die Ermüdungsversuche werden

erneut 3D-Scans durchgeführt, um die Schädigungsmorphologie und die Bruchbilder zu charakterisieren. Sowohl bei der Auswertung der Ermüdungsfestigkeit als auch der Bruchbilder werden ebenfalls die Ergebnisse der korrosiv geschädigten Betonstähle vergleichend herangezogen. Durch die höhere Stichprobengröße von gleichen, geometrisch genau definierten Schädigungen sollen die Auswirkungen der Morphologien auf die Ermüdungsfestigkeit sicher quantifiziert werden können. Abschließend soll aufbauend auf den Ergebnissen und unter Berücksichtigung der Ergebnisse von [3] ein erstes Modell erstellt werden, welches die Zusammenhänge zwischen Schädigungsmorphologie und Ermüdungsfestigkeit beschreibt.

4 Quellen

- [1] *DIN EN 1992-2/NA:2013-04, Nat. Anh.- EC 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 2: Betonbrücken- Bem.- und Konstruktionsregeln*, Beuth Verlag, Berlin (2013)
- [2] *DIN 50100:2016-12: Schwingfestigkeitsversuch- Durchführung und Auswertung von zyklischen Versuchen mit konstanter Lastamplitude für metallische Werkstoffproben und Bauteile*, Beuth Verlag, Berlin (2016)
- [3] *Harnisch, J.: Zum zeitabhängigen Verhalten elektrochemischer und morphologischer Kenngrößen bei der chloridinduzierten Korrosion von Stahl in Beton*, Aachen, RWTH Aachen, Institut für Baustoffforschung, Dissertation, 10.02.2012
- [4] *Harnisch, J.; Raupach, M.: The residual cross section factor as a key parameter for the static evaluation of corroding reinforced concrete structures*. In: *Materials and Corrosion* 66 (2015) 9. S. 829–838
- [5] *König, G.; Danielewicz, I.: Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP Model Code 1990*, Beuth, Berlin, 1994
- [6] *Kosalla, M.; Raupach, M.: DBV Merkblattsammlung: Merkblatt Nr. 35: Korrosion der Bewehrung im Bereich von Trennrissen nach kurzzeitiger Chlorideinwirkung*, Berlin, 2015
- [7] *Li, S.: Fatigue of Reinforcing Steel Bars Subjected to Natural Corrosion*. In: *The Open Civil Engineering Journal* 5 (2011) 1. S. 69–74
- [8] *Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007
- [9] *Tilly, G. P.: Fatigue of Steel Reinforcement Bars in Concrete: A Review*. In: *Fatigue of Engineering Materials and Structures* 2 (1979). S. 251–268
- [10] *Weirich, T.: Ermüdungsverhalten des Betonstahls unter Berücksichtigung mögl. Korrosionseinflüsse*, 2013
- [11] *Yi, W.; Sashi, K.: Fatigue behaviour of reinforced concrete beams with corroded steel reinforcement*. In: *ACI Structural Journal* 107 (2010)