

Bruchmechanische Untersuchung an Betonstabstählen

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 68 (2023)

Autoren: Timo Glantschnig, Stefan Rappl

Arbeitsgruppe 3: Stahl und Korrosion

1 Einleitung

Im Rahmen einer Masterarbeit wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, um durch bruchmechanische Untersuchungen an Betonstabstählen die Paris-Gerade zu bestimmen. Dafür wurden Betonstabstähle uniaxialen Dauerschwingversuchen unterzogen. Zur Messung des Risswachstums wurden die Messsysteme Dehnungsaufnehmer und 3D digitale Bildkorrelation verwendet. Da das Paris-Gesetz u.a. von dem Gefüge und den Spannungsverhältnissen abhängig ist, wurde der Versuch mit verschiedenen Gefügearten und Spannungsverhältnissen durchgeführt.

2 Theoretischer Hintergrund

Betonstabstahl B500B, welcher im Tempcore®-Verfahren hergestellt wird, ist ein warmgewalztes und aus der Walzhitze wärmebehandeltes Bewehrungsmaterial. Durch den Herstellungsprozess bildet sich außen eine feste und spröde Martensit-Hülle und innen ein weicher, dehnfähiger ferritisch-perlitischer Kern aus [1].

Der uniaxiale Dauerschwingversuch beschreibt einen Schwingversuch, bei dem Proben unter dynamischer Belastung bis zum Bruch oder alternativ zu einem vorab definierten Abbruchkriterium belastet werden; die dafür benötigte Anzahl an Lastzyklen wird gezählt. Ein Lastzyklus gleicht einer Sinuskurve. [2]

Bei Aufbringung von äußeren Lasten verlaufen Spannungstrajektorien durch den Körper. Sobald ein Hindernis in einem Körper vorhanden ist, wie z.B. ein Bohrloch oder eine Querrippe, können die Spannungstrajektorien nicht mehr geradlinig durch den Körper geführt werden. Die Spannungslinien werden um das Hindernis herum umgelenkt und es entstehen an dem Hindernis Spannungskonzentrationen. Diese Spannungskonzentrationen werden auch Kerbspannung genannt. [3]

Aufgrund der Spannungskonzentration stellen diese Bereiche oft Orte für eine Rissinitiierung dar. Nach der Risseinleitung wächst der Riss im stabilen Risswachstum so lange bis eine kritische Risslänge erreicht wird und es zum Versagen des Werkstoffs kommt [4].

Das Ermüdungsrisswachstum kann durch das Paris-Gesetz beschrieben und in einem doppelt logarithmischen Diagramm als Graph dargestellt werden. Dabei bilden die Risswachstumsrate da/dN in Abhängigkeit des zyklischen Spannungsintensitätsfaktors ΔK im Bereich des stabilen Risswachstums eine lineare Beziehung, welche auch als Paris-Gerade bezeichnet wird. [5]

3 Methodik

Da das Paris-Gesetz von dem Gefüge abhängig ist, wurden für den Versuchsaufbau zwei Probetypen untersucht. Bei dem ersten Probetyp wurde die Martensit-Hülle eines Betonstabstahls mit einem Nenndurchmesser von 16 mm abgedreht, sodass eine zylindrische ferritisch-perlitische Probe entstand. Bei dem zweiten Probetyp wurden von einem Betonstabstahl mit Nenndurchmesser 28 mm mittig die Rippen abgedreht und der Kernquerschnitt auf 25 mm verjüngt (Schulterprobe). In beide Probetypen wurde mittig eine Umlaufkerbe mit einer Tiefe von 1 mm eingeschnitten. Damit kann der Versuch an einer ferritisch-perlitischen Probe und einer martensitisch-ferritisch-perlitischen Probe durchgeführt werden. Für den Dauerschwingversuch wurde eine servohydraulische Prüfmaschine des Typs MTS 810 verwendet. Die Proben wurden mit einer Schwingbreite von 225 N/mm², was einem Spannungsverhältnis von $R = 0,25$ entspricht, und einer Schwingbreite von 250 N/mm² ($R = 0,167$) belastet. Die Belastungsfrequenz wurde mit 6,25 Hz und 12,5 Hz eingestellt.

Zur Messung des Ermüdungsrisswachstums wurde ein Dehnungsaufnehmer verwendet, der die Verschiebung von zwei Seiten des Probetyps gleichzeitig messen kann (siehe Abbildung 1 links). Dabei wird die Verschiebung zu einem Bezugspunkt gemessen. Die Daten wurden mit einem Almemo (siehe Abbildung 1 rechts) mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 50 Hz je Dehnungsaufnehmer aufgezeichnet. Damit werden bei einer Belastungsfrequenz von 6,25 Hz 8 Messpunkte pro Lastwechsel bzw. bei 12,5 Hz 4 Messpunkte aufgezeichnet.

Ein weiteres Messsystem zur Aufzeichnung des Ermüdungsrisswachstums war die 3D digitale Bildkorrelation (3D-DIC). Diese erfasst die Ver-

schiebungsänderung von dem auf der Probe auf-
 gebrachten stochastischen ortsfesten Muster
 während der Belastung.



Abbildung 1: Versuchsaufbau mit dem Dehnungsaufnehmer (links) und dem Almemo (rechts)

4 Ergebnisse

Bei der Berechnung der Risslänge durch die
 Nachgiebigkeit wurde die Kalibrierkurve einer
 C(T)-Probe verwendet und kann damit nur ange-
 nähert ermittelt werden [6].

Die Ergebnisse mit dem Dehnungsaufnehmer ha-
 ben gezeigt, dass bei dem Vergleich einer einsei-
 tig gekerbten Probe mit einer umlaufend geker-
 bten Probe die Ergebnisse der umlaufend geker-
 bten Probe mit $y = 2,17 \cdot 10^{-13} x^3$ näher an bestehen-
 den Forschungsarbeiten liegen als die einseitig
 gekerbte Probe [7]. Die einseitig gekerbte Probe
 weicht von den Ergebnissen der bestehenden
 Forschungsarbeiten ab. Dies wird durch die grö-
 ßere Kerbbreite und damit einer geringeren Riss-
 wachstumsrate im Vergleich der umlaufendkerb-
 ten Probe begründet (siehe Abbildung 2).

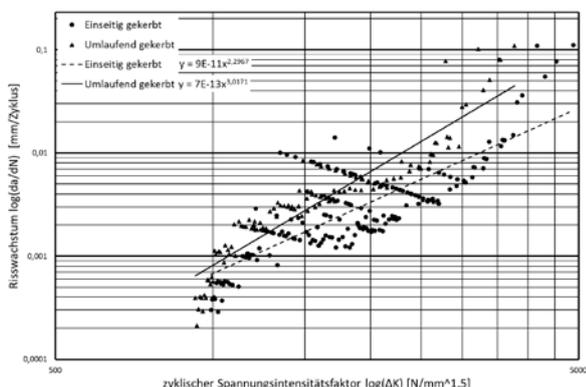


Abbildung 2: Ergebnisse der umlaufend und einseitig gekerbten Probe des Probetyp 1

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass mit zu-
 nehmendem Spannungsverhältnis sich die Pa-
 ris-Gerade nach links verschiebt. Dies wird eben-
 falls durch bestehende Forschungen belegt [7].

Im Vergleich der Gefügearten konnte gezeigt wer-
 den, dass die Gefügekombination ferritisch-perli-
 tisch mit $7 \cdot 10^{-13} x^{3,0171}$ nah an den bestehenden

Forschungsarbeiten [7] mit $y = 2,17 \cdot 10^{-13} x^3$ liegt.
 Die Gefügekombination martensitisch-ferritisch-
 perlitisch mit $9 \cdot 10^{-11} x^{2,4663}$ wurde bisher noch in
 keiner Forschungsarbeit untersucht. Im Vergleich
 mit bestehenden Forschungsarbeit liegt die Pa-
 ris-Gerade zwischen der ferritisch-perlitisch und
 der Paris-Gerade vom reinen Martensit mit
 $y = 5,71 \cdot 10^{-11} x^{2,25}$ [7].

Mit dem 3D-DIC konnte in dieser Arbeit keine
 sinnvolle Paris-Gerade nachgewiesen werden.
 Dies ist vermutlich auf die große Menge an Daten,
 die während der Aufzeichnung entstanden sind,
 zurückzuführen.

5 Zusammenfassung

Für Betonstabstähle konnte in dieser Arbeit die
 Paris-Gerade mit dem Dehnungsaufnehmer er-
 mittelt werden. Dies konnte sowohl für reine ferri-
 tisch-perlitische Proben als auch für martensi-
 tisch-ferritisch-perlitische Proben durchgeführt
 werden. Ebenfalls konnten die Paris-GERADEN für
 unterschiedliche Spannungsverhältnisse ermittelt
 werden.

Die Paris-Gerade konnte mit der 3D-DIC nicht
 sinnvoll nachgewiesen werden. Der Aufbau des
 Messsystems und die Auswertung nehmen deut-
 lich mehr Zeit in Anspruch als das beispielsweise
 beim Dehnungsaufnehmer der Fall war. Mit dieser
 Arbeit kann nicht ausgeschlossen werden, dass
 ein Nachweis der Paris-GERADEN möglich ist.

6 Literatur

- [1] Gehlen, C.; Kränkel, T.; Meng, B.; Oster-
 minski, K.; Meyer, F.; Schröder, P.: *Baustoffe im
 Betonbau* in Handbuch für Bauingenieure, Zilch,
 K. et al. (eds). Wiesbaden: Springer Vieweg,
 2019.
- [2] DIN 50100: Schwingfestigkeitsversuch. Beuth
 Verlag, Berlin, 2016.
- [3] Osterminski, K.: Werkstoffermüdung. Sonderfälle
 Betonstahl- und Betonermüdung. Habilitations-
 schrift. Technische Universität München, Mün-
 chen, 2020.
- [4] Läßle, V.: Einführung in die Festigkeitslehre.
 Lehr- und Übungsbuch (4. Aufl. Wiesbaden:
 Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Sprin-
 ger Vieweg, 2016.
- [5] Paris, P. C.; Erdoğan, F.: A critical analysis of
 crack propagation laws. *Journal of Basic Engi-
 neering*, 12, 528-533, 1963.
- [6] ASTM E647: Standard Test Method for Measure-
 ment of Fatigue Crack Growth Rates, Beuth Ver-
 lag, Berlin, 2015.
- [7] Barsom, J. M.; Rolfe, S.: *Fracture and Fatigue
 Control in Structures – Applications of Fracture
 Mechanics*. Butterworth-Heinemann, Woburn,
 Mass. (3. Aufl.), 1999.