

Parameterstudie zur Oberflächenauflösung von digitalen geometrischen Zwillingen in FE-Simulationen

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 73 (2023)

Autoren: Antonia Hoffmann, Stefan Rappl

Arbeitsgruppe 3: Stahl und Korrosion

1 Einleitung

Bei der Erforschung des Ermüdungsverhaltens von Betonstahl können neben Versuchen auch Simulationen eingesetzt werden. Für diese Simulationen bedarf es einer Möglichkeit, die Oberfläche des Probekörpers zu digitalisieren. Dabei entsteht ein digitaler geometrischer Zwilling in Form einer Punktwolke, welche mehrere Millionen Datenpunkte umfassen kann. Da diese Datenmenge in Simulationen nicht verarbeitet werden kann, wurde in einer Bachelorarbeit ein Verfahren untersucht, welches die Oberflächenauflösung mittels einer lokalen Ausdünnung der Punktwolke herabsetzt. Bewertet wird das Verfahren hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse (von-Mises-Vergleichsspannungen) wobei die Ergebnisse einer globalen Ausdünnung als Referenz dienen.

2 Theoretischer Hintergrund

Ermüdung beschreibt das Versagen eines Werkstoffes, das durch wiederholte Einwirkung hervorgerufen wird, wobei deren Größe deutlich unterhalb der statischen Festigkeit liegt. Ermüdungsbrüche treten häufig in Folge von Kerbwirkung auf. Unter Kerben sind dabei Stellen zu verstehen, an denen es zu Veränderungen in der Geometrie kommt, wie beispielsweise dem Übergang vom Rippental zur Rippenflanke an einem Betonstahl. Diese Veränderung in der Geometrie führt zu einem gestörten Kraftfluss, wodurch sich lokal eine erhöhte Beanspruchung ergibt. Das Ermüdungsverhalten von Betonstahl kann mit Hilfe eines uniaxialen Dauerschwingversuchs untersucht werden. Dabei wird der Probekörper einer sinusförmigen Belastung bis zum Bruch oder zum Erreichen der Grenzschwingspielzahl ausgesetzt. [1]

Zur Erstellung eines digitalen geometrischen Zwillings können verschiedene Verfahren (z.B. Photogrammetrie [2], Streifenprojektionsverfahren [2] oder ein Laser-Linien-Scan-System (LLS-System) [3]) herangezogen werden.

Der digitale geometrische Zwilling wird häufig in Form von einer Punktwolke gespeichert. Die Weiterverarbeitung einer solchen Punktwolke kann folgende Ziele haben: Glätten der Punktwolke, Regelgeometrien erkennen, Triangulierung der

Punktwolke oder eine Ausdünnung zur Reduktion der Datenmenge. [2]

3 Methodik

Als Probekörper diente ein Betonstabstahl B500B mit einem Nenndurchmesser von 12 mm und einer Gesamtlänge von 500 mm, dessen Geometrie mit Hilfe eines LLS-Systems [3] digitalisiert wurde. Der Abstand der aufgenommenen Punkte betrug sowohl in Stablängs- als auch Umfangrichtung 0,01885 mm, sodass der Probekörper durch knapp 50 Millionen Punkte digital abgebildet werden kann. Nachdem der digitale geometrische Zwilling erstellt war, wurde ein uniaxialer Dauerschwingversuch durchgeführt, bei welchem eine Oberspannung von 300 N/mm² und eine Schwingbreite von 260 N/mm² gewählt wurden.

In der anschließenden Verarbeitung der Punktwolke wurden die einzelnen Messpunkte zunächst zu einer Matrix zusammengefügt. Eine Spalte dieser Matrix entspricht dabei einer Scanreihe entlang der Stabachse, wohingegen eine Zeile einem Umlauf um den Stab entspricht [4]. Als Referenz für lokal ausgedünnte Daten, wurde eine globale Ausdünnung mit einem Ausdünnungsfaktor von 5 sowohl in Stablängs- als auch in Umfangrichtung durchgeführt.

Die lokale Ausdünnung erfolgt zeilen- und spaltenweise in Zonen, die von einem Zentrum (in Abbildung 1 mit einem roten Punkt markiert) ausgehen. In dieser Arbeit wurde der Rissursprung des Ermüdungsrissees als Zentrum verwendet. Des Weiteren müssen 3 Parameter definiert werden:

- Anzahl n der Zonen (hier 3: A, B und C),
- deren Breiten b_i und
- der jeweilige Ausdünnungsfaktor F .

Die Zonen werden sowohl in x - als auch in φ -Richtung eingeteilt, wobei sich das Zentrum dabei jeweils in der Mitte der innersten Zone (Zone AA) befindet. Es wurden 12 Parameterkombinationen aufgestellt.

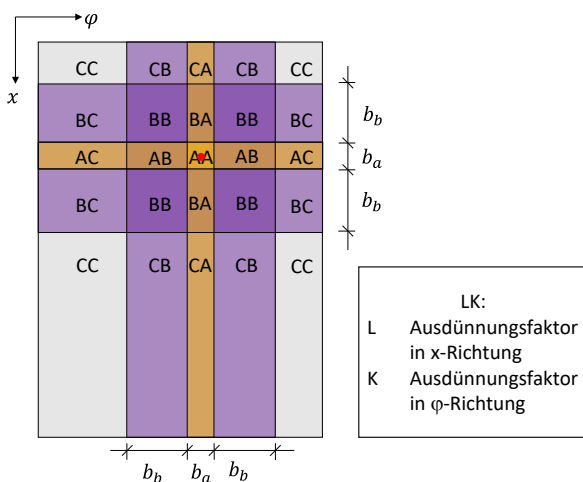


Abbildung 1: Funktionsprinzip der lokalen Ausdünnung

Für die linear-elastischen Simulationen wurde die FE-Software ANSYS Workbench herangezogen. Da aufgrund der hohen Punktdichte lediglich ein Abschnitt von etwa 20 mm zur Simulation herangezogen werden kann, wurden die Oberflächenmodelle auf die entsprechende Länge gekürzt und in ein Volumenmodell überführt, welches in Mechanical eingelesen wurde. Dort wurde im Anschluss an die Vernetzung (adaptiv, Element: Tetraeder mit Zwischenknoten) auf eine Stirnseite eine Zugkraft aufgebracht, sodass sich eine Nennspannung von 300 N/mm² ergibt, während die andere durch eine fixierte Lagerung gehalten wurde. Als Zielgröße der Simulation wurde die von-Mises-Vergleichsspannung ausgewählt.

4 Ergebnisse

Nach 10.571.659 Lastwechseln wurde der uniaxiale Dauerschwingversuch mit einem gültigen Bruch beendet.

Bei Betrachtung der Spannungsverteilung ist zu erkennen, dass sich im Rippenfuß Spannungswerte ergeben, die deutlich über der aufgetragten Nennspannung liegen, was durch die in Kapitel 2 erläuterte Kerbwirkung der Rippen schon im Vorfeld erwartet und auch in anderen Arbeiten beobachtet wurde [5].

Für die weiteren Auswertungen werden lediglich die Punkte berücksichtigt, die sich in der innersten Zone der lokalen Ausdünnung (Zone AA, Abbildung 1) befinden. Die Spannungswerte der lokalen Ausdünnungen werden mit denen aus der globalen Ausdünnung verglichen.

Der mittlere relative Fehler lag bei fast allen Parametersätzen in einem Bereich von 1,30 bis 2,74%, was einer sehr guten Annäherung an das Referenzmodell entspricht.

Bei allen Modellen konnte beobachtet werden, dass am Rand der innersten Zone, höhere mittlere Fehler zu beobachten waren als in der Mitte der Zone, wodurch sich ein Randeffekt am Zonenübergang vermuten lässt.

Durch das Gegenüberstellen von zwei lokalen Ausdünnungen mit einem variierten Parameter wurden Aussagen über den Einfluss der Parameter getroffen. Dabei zeigte sich, dass sich eine größere Zonenbreite positiv auf die Genauigkeit der Ergebnisse auswirkt. Ebenfalls eine günstige Auswirkung ergibt sich durch eine geringere Differenz zwischen dem Ausdünnungsfaktor der innersten Zone und dem der nächsten. Wählt man allerdings geringere Zonenbreiten, ist dieser Effekt nicht mehr zu beobachten. Möglicherweise können sich die Randeffekte aus äußeren Zonen nicht abbauen.

Einen eher geringen Einfluss scheinen dagegen die Ausdünnungsfaktoren der äußeren Zonen zu haben. Selbst bei einer größeren Auflösung in den Randbereichen konnten in der innersten Zone genauere Ergebnisse erzielt werden. Auch eine kleinschrittigere Unterteilung zwischen dem Ausdünnungsfaktor der innersten und der äußersten Zone brachte keine nennenswerten Verbesserungen.

5 Zusammenfassung

Durch die lokale Ausdünnung der Punktwolke konnte der Zeitaufwand für FE-Simulationen deutlich reduziert werden. Dabei lagen die relativen Abweichungen zu der global ausgedünnten Referenz meist in einem Bereich von etwa 1,30 bis 2,74%. Positiv wirken sich eine geringe Differenz zwischen dem Ausdünnungsfaktor der innersten und der nächsten Zone sowie eine größere Zonenbreite auf die Genauigkeit aus.

6 Literatur

- [1] Läßle, V.: Einführung in die Festigkeitslehre. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2016
- [2] Wilke, W.: Segmentierung und Approximation großer Punktwolken (Dissertation). Technische Universität Darmstadt, 2002
- [3] Osterminski, K.; Gehlen, C.: Development of a laser-based line scan measurement system for the surface characterization of reinforcing steel. In: Materials Testing 61, 2019
- [4] Hoffmann, A.; Rappl, S.: Datenverarbeitung eines Laser-Line-Scans von Betonstählen (Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 61). cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München, 2021
- [5] Jhamb, I. C.: Fatigue of reinforcing bars (Dissertation). University of Alberta, 1972