

Ermüdungsfestigkeit von Krag- und Querträgeranschlüssen in Stahlverbundbrücken – Betriebsfestigkeit und unterschiedliche Fertigungsbedingungen

M. Sc. Raphael Erlemann und Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Technische Universität Berlin, Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau
r.erlemann@tu-berlin.de, karsten.geissler@tu-berlin.de

Zusammenfassung

Für den Entwurf von Stahlverbundbrücken mit Stützweiten im Bereich von 40 bis 100 m werden häufig Hohlkästen mit Kragarmen verwendet. Die Schweißnähte am Anschluss der Krag- und Querträger sind Ermüdungsbeanspruchungen ausgesetzt. Es sind verschiedene Kerben zu berücksichtigen, die je nach Position und Beanspruchungsrichtung besondere Problemstellungen mit sich bringen (Abbildung 1). Zu diesen Problemstellungen gehören erschwerte und variierende Fertigungsbedingungen v.a. für Baustellensteignähte (Abbildung 1, Nr. 1), unklare Auswirkungen eines außerhalb des zulässigen Toleranzbereiches liegenden Achsversatzes auf die Ermüdungsfestigkeit des Untergurt- und Steganschlusses (Abbildung 1, Nr. 1 und 2), unzureichende Kerbfälle am Obergurtanschluss (Abbildung 1, Nr. 3), sowie fragliche Treffsicherheiten der Schadensakkumulation nach Miner-modifiziert bei brückenbautypischen Beanspruchungskollektiven.

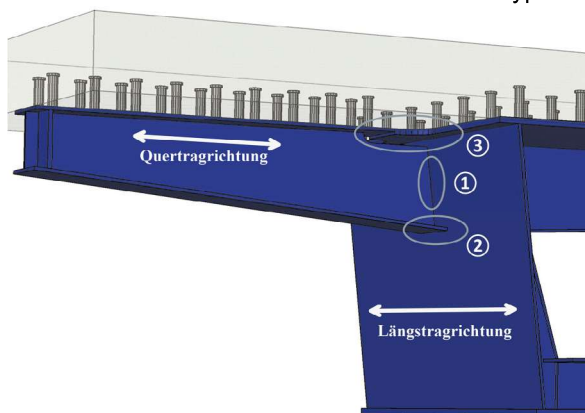


Abbildung 1 Darstellung eines typischen Verbundquerschnittes und Nummerierung der ermüdungsgefährdeten Kerben am geschweißten Kragträgeranschluss

1 Ermüdungsfestigkeit des Steganschlusses bei unterschiedlichen Fertigungsbedingungen

Für die Nähte am Kragträgeranschluss sind Handschweißungen üblich, deren Fertigungsbedingungen bzgl. Schweißposition, z.B. steigend am Steg (Abbildung 1, Nr. 1) oder horizontal am Gurt (Abbildung 1, Nr. 2), und Umgebungsbedingungen, z.B. Werk oder Baustelle, variieren können. Es wurden Kleinbauteilversuche an identischen Versuchsserien durchgeführt, die sich lediglich durch ihre Fertigungsbedingungen nach Tabelle 1 unterscheiden.

Tabelle 1 Fertigungsbedingungen der ansonsten identischen Versuchsserien

Versuchsserie W - Werk		Versuchsserie B - Baustelle	
- MAG (135) - Horizontallage PB - geräumig, stehend <u>günstige</u> <u>Werksbedingungen</u>		- MAG (135) - Steigposition PF - beengt, hockend <u>günstige</u> <u>Baustellenbedingungen</u>	

Dabei konnte ein signifikanter Einfluss der Fertigungsbedingungen auf die Ermüdungsfestigkeit festgestellt werden. Es ergibt sich eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von nahezu zwei Kerbfallklassen für eine Schweißung unter günstigen Werksbedingungen (Abbildung 2).

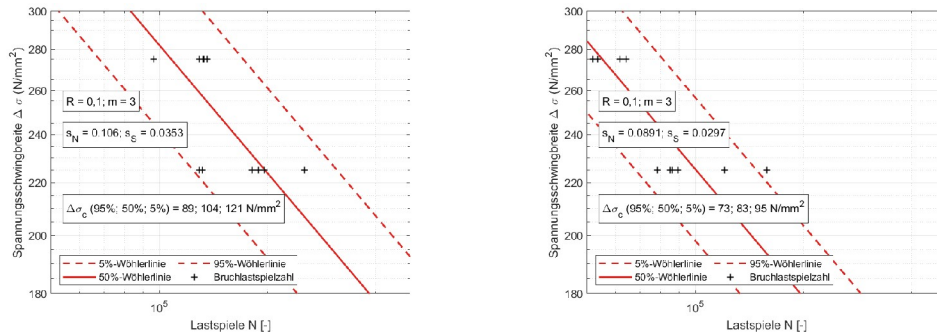


Abbildung 2 Experimentelle Wöhlerlinien der Versuchsserien W (links) und B (rechts)

Bei der Ermüdungsfestigkeit geschweißter Verbindungen, auch des gleichen Kerbdetails, wird von großen Standardabweichungen ausgegangen. Es kann angenommen werden, dass ein Teil dieser großen Streuung auf unterschiedliche und unzureichend dokumentierte Fertigungsbedingungen zurückzuführen ist. Die getrennt untersuchten Versuchsserien zeigen ähnliche Standardabweichungen bei verschobenem Median. Eine gemeinsame Auswertung führt somit zu einer Vermischung zweier Grundgesamtheiten. Die sich ergebende gemeinsame Verteilung bildet jedoch gewöhnliche Annahmen für Standardabweichungen gut ab.

2 Ermüdungsfestigkeit am Untergurtanschluss mit Achsversatz

Neben der in Abschnitt 0 beschriebenen Herausforderungen bzgl. Qualitätssicherung müssen für den Untergurtanschluss (Abbildung 1, Nr. 2) enge Toleranzen für den Achsversatz von $e \leq 15\%$ des Zwischenblechs nach DIN EN 1993-1-9 eingehalten werden.

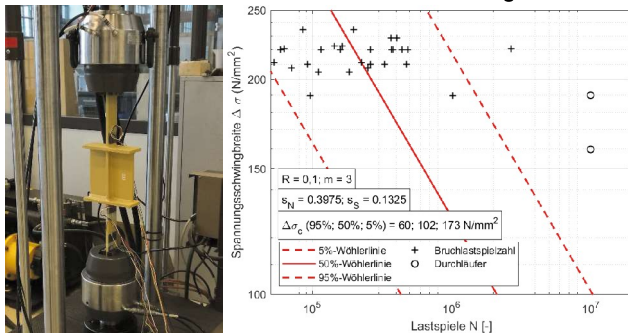


Abbildung 3 Beispielhafter Probekörper mit Achsversatz (links) und sich ergebende experimentelle Wöhlerlinie (rechts)

Die Einhaltung enger Toleranzen gestaltet sich durch außenliegende Kragträger und innenliegende Querrahmen schwierig. Als Ergebnis von Klein- und Großbauteilversuchen konnten die Auswirkungen von Exzentrizitäten außerhalb des zulässigen Bereiches hinsichtlich Ermüdungsfestigkeit unter Berücksichtigung des stützenden Stegbleches quantifiziert werden. Es ergibt sich eine Abminderung des Kerbfalls von $\Delta\sigma_c = 71$ N/mm² auf $\Delta\sigma_c = 60$ N/mm² (Abbildung 3). Für weitere Informationen wird auf [1 bis 4] verwiesen.

3 Ermüdungsfestigkeit vereinfachter Obergurtanschlüsse

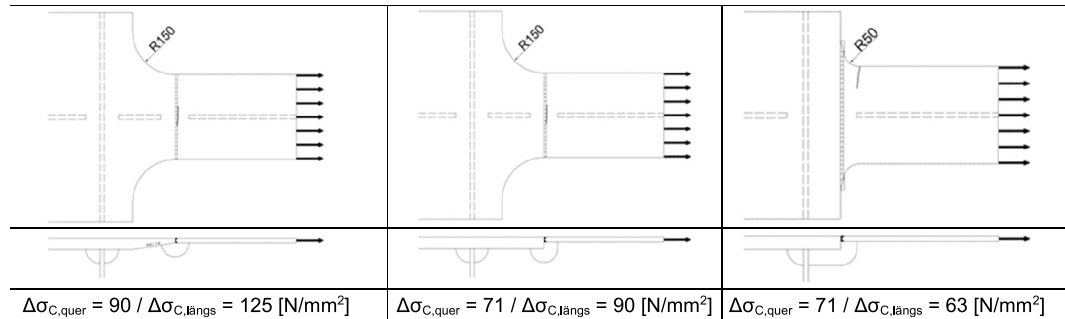


Abbildung 4 Aufsicht und Schnitt von aktuellen Vorgaben für die ermüdungsgerechte Gestaltung des Kragträger-Obergurtanschlusses (links) sowie neuentwickelte vereinfachte Details mit zugehörigen Kerbfällen

Bei der Ermüdungsbemessung des Kragträger-Obergurtanschlusses (Abbildung 1, Nr. 3) sind trotz häufig geringer Ermüdungsbeanspruchungen konstruktiv aufwendige Kerbfälle nach DIN EN 1993-2 + NA und RE-ING [5] zu berücksichtigen, die einen Blechdickenausgleich bei positionsgleichem Ausrundungsradius vorsehen (Abbildung 4 links).

Die Entwicklung vereinfachter Obergurtanschlüsse mit ausreichender Ermüdungsfestigkeit für dieses je Bauwerk oft hundertfach ausgeführte Detail kann zu einer insgesamt effizienteren Konstruktion führen. Als Ergebnis von Klein- und Großbauteilversuchen, FE-Parameterstudien sowie einer Neuauswertung existierender Versuchsdaten konnten Kerbfälle mit reduzierter, aber anforderungsgerechter Ermüdungsfestigkeit bei vereinfachter Fertigung hergeleitet werden (Abbildung 4). Für weitere Informationen wird auf [1 bis 4] verwiesen.

4 Betriebsfestigkeit der Quersteife unter mehrstufigen Kollektiven

Neben der Überprüfung der Fertigungsbedingungen und der Einführung von vereinfachten Kerbdetails wird die Lebensdauer unter variablen Beanspruchungsamplituden bei brückenbautypischen Kollektiven untersucht. Für brückenbautypische Kollektive mit vielen Spannungsamplituden im Bereich der Dauerfestigkeit und großen Kollektivumfängen variieren die rechnerischen Lebensdauern je nach verwendeter Miner-Hypothese stark, da diese sich insbesondere durch unterschiedliche Neigungen im Dauerfestigkeitsbereich unterscheiden. Miner-original geht von keinem Schädigungsbeitrag von Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit aus. Miner-elementar ist demgegenüber die konservativste Hypothese, die von einem Schädigungsbeitrag aller Amplituden ausgeht. Miner-modifiziert liegt dazwischen mit einer zweiten, flacheren Neigung bis zum Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit $\Delta\sigma_L$ und ist nach DIN EN 1993-1-9 in der Regel für die hier untersuchten Kollektive anzuwenden.

Die Grundlage der verschiedenen Miner-Hypothesen bilden Wöhlerversuche an Quersteifen (Abbildung 1, Nr. 1 in Längstragrichtung), die zu einer Ermüdungsfestigkeit von $\Delta\sigma_c = 97 \text{ N/mm}^2$ führen (Abbildung 6 rechts). Zur Überprüfung der Treffsicherheit der verschiedenen Miner-Hypothesen wurden darauffolgend Betriebsfestigkeitsversuche an gleichen Probekörpern mit brückenbautypischen Spannungskollektiven, also v.a. niedrigen Kollektivhöchstwerten im Bereich von $150 \text{ N/mm}^2 \leq \Delta\sigma_{max} \leq 250 \text{ N/mm}^2$ und großen Kollektivumfängen im Bereich von $10^6 \leq \bar{N} \leq 10^8$, durchgeführt. Die Kollektive werden durch Einheitskollektive über $H = \bar{H}^{-1-x^v}$ mit $x = \Delta\sigma_i / \Delta\sigma_{max}$ beschrieben. Dabei wurde der Formparameter $v = 2$ gewählt und aus den Kollektiven eine zufällige Reihung der Amplituden als experimenteller Lastablauf für die Betriebsfestigkeitsversuche abgeleitet. Im Bereich dieser Parameter sind nur noch wenige experimentelle Untersuchungen zu finden, da sie, entsprechend der planmäßig langen Nutzungsdauer der Bauteile, zu sehr langen Versuchsdauern führen. Die durchgeführten Betriebsfestigkeitsversuche mit Lastspielzahlen bis zu $N \approx 2 \cdot 10^8$ zeigten für Kollektive mit Höchstwerten unterhalb von $\Delta\sigma_{max} < 200 \text{ N/mm}^2$ nur noch Durchläufer (Abbildung 5).

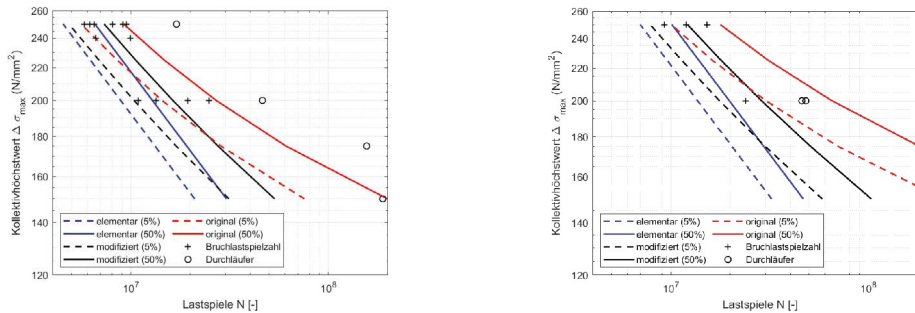


Abbildung 5 Experimentelle Bruchlastspielzahlen, Durchläufer und rechnerische Lebensdauer auf Grundlage verschiedener Miner-Hypothesen für Kollektivumfänge von $\bar{N} = 10^6$ (links) and $\bar{N} = 10^8$ (rechts)

Neben den Versuchsergebnissen sind in Abbildung 5 auch die rechnerischen Lebensdauerlinien auf Grundlage verschiedener Miner-Hypothesen farblich dargestellt. Die Bruchlastspielzahlen werden für Kollektivhöchstwerte $\Delta\sigma_{\max} \geq 200 \text{ N/mm}^2$ gut von Miner-modifiziert abgebildet. Miner-modifiziert liegt für alle untersuchten Kollektive auf der sicheren Seite. Durch die Vielzahl an Durchläufern bei Kollektivhöchstwerten $\Delta\sigma_{\max} < 200 \text{ N/mm}^2$ erscheint in diesem Bereich jedoch Miner-original passender. In diesem Kontext ist auch auf die zunehmende Streubreite der Bruchlastspielzahlen mit abnehmendem Kollektivhöchstwert hinzuweisen. Vor allem Kollektive mit niedrigen Höchstwerten enthalten eine Vielzahl von Spannungsamplituden im Bereich der Dauerfestigkeit und darunter, wodurch die immer vorhandene Streuung der Dauerfestigkeit zu signifikant abweichenden experimentellen Lebensdauern führen kann, da eine Vielzahl der einwirkenden Amplituden nicht nur zu einer geringeren, sondern zu keiner Schädigung mehr führen.

Im Gegensatz zur begrenzten rechnerischen Lebensdauer zeigte sich bei den Probekörpern, die durch Kollektive mit niedrigen Höchstwerten belastet wurden, eine unbegrenzte experimentelle Lebensdauer bei Versuchslaufzeiten von bis zu $N \approx 2 \cdot 10^8$ Lastwechseln. Die als Durchläufer gewerteten Probekörper wurden daher weitergehend durch Wöhlerversuche auf ihre bereits enthaltene Schädigung untersucht. Die mittleren Ermüdungsfestigkeiten der vorbelasteten und nicht vorbelasteten Probekörper zeigen eine gute Übereinstimmung (Abbildung 6). Aufgrund einer vergrößerten Streubreite zeigt sich eine reduzierte charakteristische Ermüdungsfestigkeit, die jedoch aus der besonders langen Lebensdauer eines Probekörpers resultiert. Insgesamt kann daher geschlussfolgert werden, dass von keiner Vorschädigung durch die Kollektive auszugehen ist.

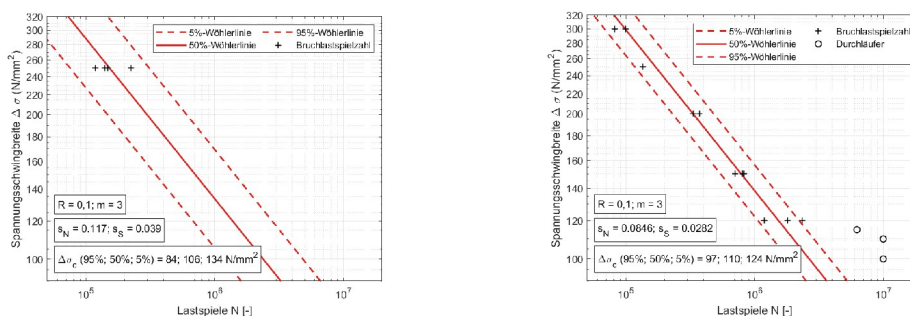


Abbildung 6 Vergleich der experimentellen Wöhlerlinien von durch Kollektive vorbelasteten Probekörpern (links) und nicht vorbelasteten Probekörpern (rechts)

Nach DIN EN 1993-1-9 sind für Kollektive mit Amplituden unterhalb und oberhalb der Dauerfestigkeit in der Regel die erweiterten Ermüdungsfestigkeitskurven mit zwei Abknickpunkten (Miner-modifiziert) anzuwenden. Bei den durchgeführten Betriebsfestigkeitsversuchen mit einer Vielzahl von Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit und

(Miner-original) empfohlen werden. Dieser Ansatz würde zu einer realistischeren Lebensdauervorhersage führen, ohne dabei die Grundlagen der Schadensakkumulation anzutasten.

5 Danksagung

Teile der in diesem Beitrag vorgestellten Forschung entstammen den Forschungsprojekten StB17/7192.40/80-3043765 [4] und FE 15.0679/2020/CRB [1] im Auftrag des BMDV und der bast sowie von der DFG unterstützten Projekten. Die Autoren danken den Förderern und dem Betreuungskreis für die Unterstützung und wertvolle Diskussionen.

6 Literatur

- [1] Geißler, K., Kuhlmann, U., Kraus, J. K., Erlemann, R., Stein, R. u. Stempniewski, L.: Ermüdungsfestigkeit von Konsolträgern an Stahlverbundbrücken und Überprüfung der Schädigungshypothese an Stahlbetonplatten unter Zug- und Querkraftbeanspruchung. Bundesanstalt für Straßenwesen 2022
- [2] Kraus, J. K., Erlemann, R., Geißler, K. u. Kuhlmann, U.: Neue Querschnitte von Stahlverbundbrücken – Teil 2: Ermüdungsfestigkeit des Anschlusses der stählernen Kragträger. Stahlbau 92 (2023) 4, S. 215–226
- [3] Erlemann, R., Kraus, J. K. u. Geissler, K.: Fatigue strength of the joint of steel cantilevers in composite bridges. ce/papers 6 (2023) 3-4, S. 1019–1024
- [4] Geissler, K., Kuhlmann, U., Kraus, J. K., Stein, R. u. Stempniewski, L.: Wissenschaftlich-technische Untersuchungen zur Festlegung der Ermüdungsfestigkeit der Fahrbahnplatte und der Konsolträger bei Großbrücken in Stahlverbundbauweise mit Halffertigteilen. StB 17/7192.40/80-3043765. 2022
- [5] Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten. RE-ING. 2023