

Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bei der Lebensdauerabschätzung von Hohlprofilkonstruktionen

Prof. Dr.-Ing. André Dürr, Prof. Dr.-Ing. Klemens Rother, M.Eng. Jakob Roth, M.Sc. Josef Neuhäusler, M.Sc. Markus Oswald

Die Ausbildung von Leichtbaukonstruktionen spielt heutzutage im Bauwesen und im Maschinenbau aufgrund der Schonung von Ressourcen eine immer wichtigere Rolle. Hierfür eignen sich insbesondere dahingehend optimierte Hohlprofil-Fachwerke und Rahmenstrukturen aus Stahl. Jedoch müssen diese bei wechselnden Beanspruchungen gegen ein Ermüdungsversagen bemessen werden. Die übliche Vorgehensweise bei der Schadensakkumulation unter betriebsnahen Lastkollektiven ist in der Praxis die lineare Schadensakkumulation nach *Palmgren-Miner*, die zwar einfach anwendbar ist, aber auch viele Einflussfaktoren auf die Lebensdauer nicht adäquat berücksichtigt. So können Einflüsse aus der Belastungsreihenfolge, auftretenden Überlasten und vorhandene Schweißeigenspannungen sowie deren Änderung durch eine Belastungsfolge nicht bei der Lebensdauerabschätzung berücksichtigt werden. Dies führt dazu, dass in den Regelwerken zur Bemessung von Stahlkonstruktionen stark variierende ertragbare Schadenssummen zwischen $D = 0,2$ - $1,0$ angegeben sind, was teilweise zu sehr unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden daher an typischen Hohlprofilkonstruktionen des Kranbaus und des Nutzfahrzeugbaus Betriebslastversuche mit variablen Amplituden und unterschiedlichen Lastkollektiven durchgeführt, um eine bessere Treffsicherheit bei der Lebensdauerprognose für Leichtbaukonstruktionen zu erhalten. Um den Einfluss von Schweißeigenspannungen und deren Änderungen durch Belastung bei Hohlprofilkonstruktionen bewerten zu können wurden versuchsbegleitend Eigenspannungsmessungen durchgeführt. Die durchgeführten Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden kurz vorgestellt und zusammengefasst.

Einleitung

Konstruktionen aus Hohlprofilen werden aufgrund der Möglichkeit zur Ausbildung als Leichtbaukonstruktion häufig für Stahlbrücken, Krane, Windkraftanlagen oder im Nutzfahrzeugbau verwendet, siehe Abbildung 1. Diese Konstruktionen unterliegen jedoch wechselnden Beanspruchungen und müssen daher gegenüber einem möglichen Ermüdungsversagen bemessen werden. In den für Hohlprofilkonstruktionen üblichen Normen und Empfehlungen, z.B. [1], [2], [3], basiert das Standardvorgehen auf der einfach anwendbaren linearen Schadensakkumulation nach *Palmgren-Miner*. Dabei variiert die zugelassene Schadenssumme zwischen den Normen und Empfehlungen deutlich. So ist im Eurocode 3 [1], der Krannorm DIN EN 13001-3-1 [4], dem CIDECT-Design Guide [3] eine ertragbare pauschale Schadenssumme von $D = 1,0$ angegeben, wohingegen bei der FKM-Richtlinie [5] sowie bei der IIW-Empfehlung [2] eine pauschale Schadenssumme von $D = 0,5$, bei stark veränderlichen Mittelspannungen sogar lediglich eine Schadenssumme von $D = 0,2$ als Grenzwert angegeben ist, was mitunter zu sehr unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann. Aufgrund der einfachen Anwendung werden bei Anwendung der *Palmgren-Miner*-Regel für die Auslegung gegen Materialermüdung viele Einflussfaktoren auf die Lebensdauer nicht adäquat berücksichtigt, so haben z.B. die Kollektivform, die Belastungsreihenfolge sowie das auftreten von Zug- oder Drucküberlasten einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer. Diese Faktoren wurden jedoch bisher bei Anwendung der *Palmgren-Miner*-Regel nicht berücksichtigt.

Zielsetzung des Forschungsprojekts

Ziel des Forschungsvorhabens FOSTA P 1195 [6] war es Einflussfaktoren wie die Kollektivform, die Belastungsreihenfolge und den Einfluss von Schweißeigenspannung bei der Lebensdauerabschätzung besser berücksichtigen und durch modifizierte Ansatzkonzepte die Treffsicherheit der Vorhersage erhöhen zu können. Des Weiteren sollte durch Variation der Belastungsart (Zug und Biegung) und der verwendeten Kollektive das Anwendungsspektrum der erzielten Ergebnisse erweitert werden. Hauptanwendungsfel-

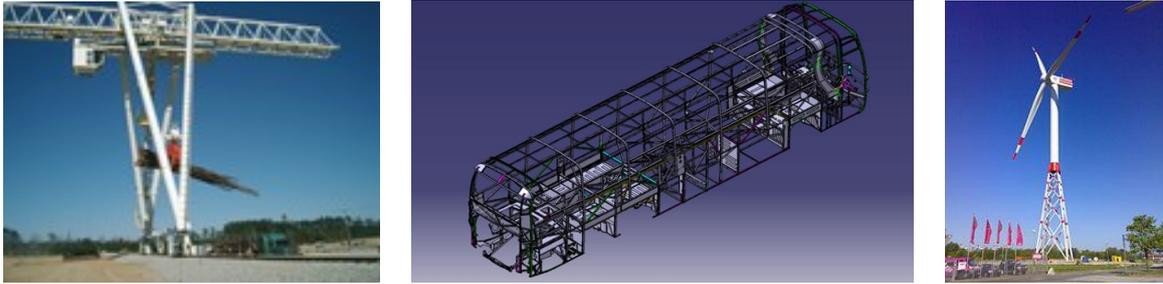


Abbildung 1: Anwendungsbeispiele für Hohlprofilkonstruktionen, entnommen aus [6]

der waren insbesondere der Kranbau sowie der Nutzfahrzeugbau mit den für diese Bereiche relevanten Bauteil- und Nahtabmessungen. Aufgrund unterschiedlicher Fertigungsvarianten (handgeschweißt vs. automatengeschweißt) sollten ansatzweise auch eventuelle Unterschiede bei der Schweißnahtqualität bei der Vorhersagegenauigkeit der Lebensdauerprognose berücksichtigt werden. Durch die Verwendung hoch- und höherfester Werkstoffe sollte die Datenbasis und die Übertragbarkeit auch auf diese Werkstoffe gewährleistet werden.

Versuche an X-Knoten unter Zugbeanspruchung

Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen an typischen X-Knoten aus dem Anwendungsgebiet des Kranbaus wurden insgesamt 108 Ermüdungsversuche durchgeführt. Um den Einfluss unterschiedlicher Profiltypen und Abmessungsverhältnisse bei der Bewertung der Ergebnisse auf die Lebensdauer berücksichtigen zu können wurden sowohl Proben aus Kreishohlprofilen (KHP) als auch aus Quadrathohlprofilen (QHP) gefertigt und geprüft. Die genauen Abmessungen können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Probekörpervarianten, entnommen aus [6]

Bezeichnung	Gurt		Strebe		Verhältniswerte			Material	Anzahl
	d_0	t_0	d_1	t_1	β	τ	γ		
	[mm]		[mm]		[-]				
KHP-51,0	101,6	5,6	51,0	4,0	0,5	0,71	9,1	S355J2H	50
KHP-82,5	101,6	5,6	82,5	4,0	0,8	0,71	9,1		22
QHP-50	100	4,0	50	4,0	0,5	1,0	12,5		25
QHP-100	200	8,0	100	8,0	0,5	1,0	12,5		12

KHP-Probekörper

QHP-Probekörper

Für die Prüfung wurden unterschiedliche Kollektive und Belastungsfolgen verwendet. Es wurden dabei das p(1/3)-Kollektiv nach der alten Krannorm DIN EN 15018 [7], sowie ein q-Kollektiv, das auf Grundlage von Messungen an Turmdrehkränen im Rahmen der Forschungsprojekte FOSTA P 778 [8] und P 512 [9]

erarbeitet wurde, verwendet. Zu Vergleichszwecken und um einen Rückschluss auf den Einfluss der Kollektivform auf die Lebensdauerabschätzung erhalten zu können, wurde zusätzlich das Nordsee-Kollektiv nach [10] für die Versuche verwendet. Zusätzlich wurden Zweistufenversuche als High-Low bzw. Low-High-Folgen und Versuchsreihen mit eingestreuten Zug- und Drucküberlasten durchgeführt. Die genauen Kollektivverteilungen können dem Abschlussbericht [6] entnommen werden. Als Belastungsfolge wurden sowohl Blockversuche als auch Randomversuche mit guter Durchmischung durchgeführt. Beide Kollektive wurden jeweils mit dem identischen Teilfolgeumfang durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte dann auf Grundlage der *Palmgren-Miner* elementar-Regel ohne Berücksichtigung eines Abknickpunkts der *Wöhlerlinie* für eine Extremfallbetrachtung.

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse konnte festgestellt werden, dass die Kollektivform und die Versuchsdurchführung einen deutlichen Einfluss auf die Lebensdauer haben. So führten Versuche mit geringer Kollektivvölligkeit tendenziell zu längeren Lebensdauern. Blockversuche wiesen im Vergleich zu Randomversuchen auch längere Lebensdauern auf. Dies konnte auch bei den ermittelten Schadenssummen festgestellt werden. So lag die Schadenssumme bei Blockversuchen im Allgemeinen bei $D > 1,0$. In Abhängigkeit der Kollektivform lagen die ermittelten Schadenssummen bei den Randomversuchen dagegen vermehrt zwischen $D = 0,5$ und $D = 1,0$. Die genauen Auswertungen können dem Abschlussbericht [6] entnommen werden.

In den gängigen Normen und Empfehlungen erfolgt bei der Bemessung eine Umrechnung der variablen Betriebslasten auf ein schadensäquivalentes Rechteckkollektiv. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Versuche mit variablen Spannungsamplituden mit Versuchen, die mit einem Einstufenkollektiv durchgeführt wurden (*Wöhlerlinie*). Die Umgerechneten Versuchsergebnisse können Abbildung 2 entnommen werden. Es zeigt sich, dass die Versuche mit variabler Beanspruchung nahezu alle im Streuband der *Wöhler*versuche liegen. Die Blockversuche liegen dabei eher am oberen Rand des Streubands und die Randomversuche eher am unteren Rand des Streubands der *Wöhler*versuche.

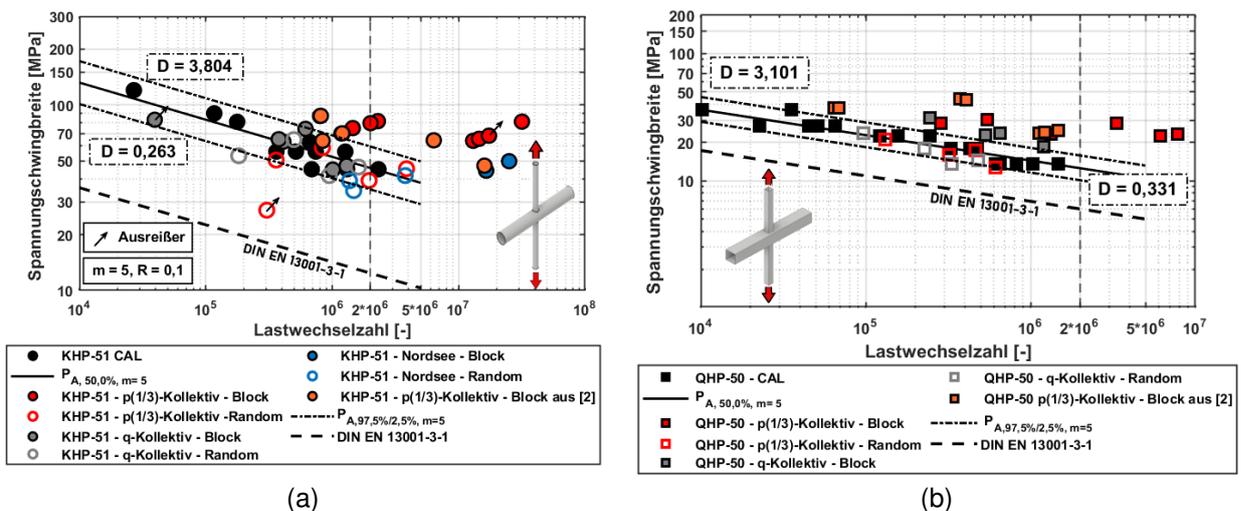


Abbildung 2: Versuchsergebnisse mit äquivalenten Spannungsschwingbreiten: (a) KHP-51, (b) QHP-50, entnommen aus [6]

Eine detaillierte Zusammenstellung der Versuchsergebnisse und deren Auswertung können dem Abschlussbericht [6] entnommen werden.

Versuche an X-Knoten unter Biegebeanspruchung

Die Versuche an typischen Knoten von Busstrukturen wurden entsprechend der vorliegenden Beanspruchungssituation unter Biegung als Drei-Punkt Biegeversuch geprüft. Es kamen dabei zwei unterschiedliche Werkstoffe zur Anwendung. Zum einen wurde der Werkstoff 1.8849 sowie der Werkstoff 1.4678, bei dem es sich um einen voll-austenitischen, hochfesten und sehr duktilen TWIP-Stahl handelt, verwendet. Um

den Einfluss der Fertigungsqualität bewerten zu können, wurde neben den handgeschweißten Proben eine zusätzliche Serie automatengeschweißt. Abbildung 3 können die Abmessungen der Probekörper (a), die unterschiedliche Fertigungsausführung (b) & (c) sowie die Ergebnisse der Fertigungsarten (d) & (e) entnommen werden.

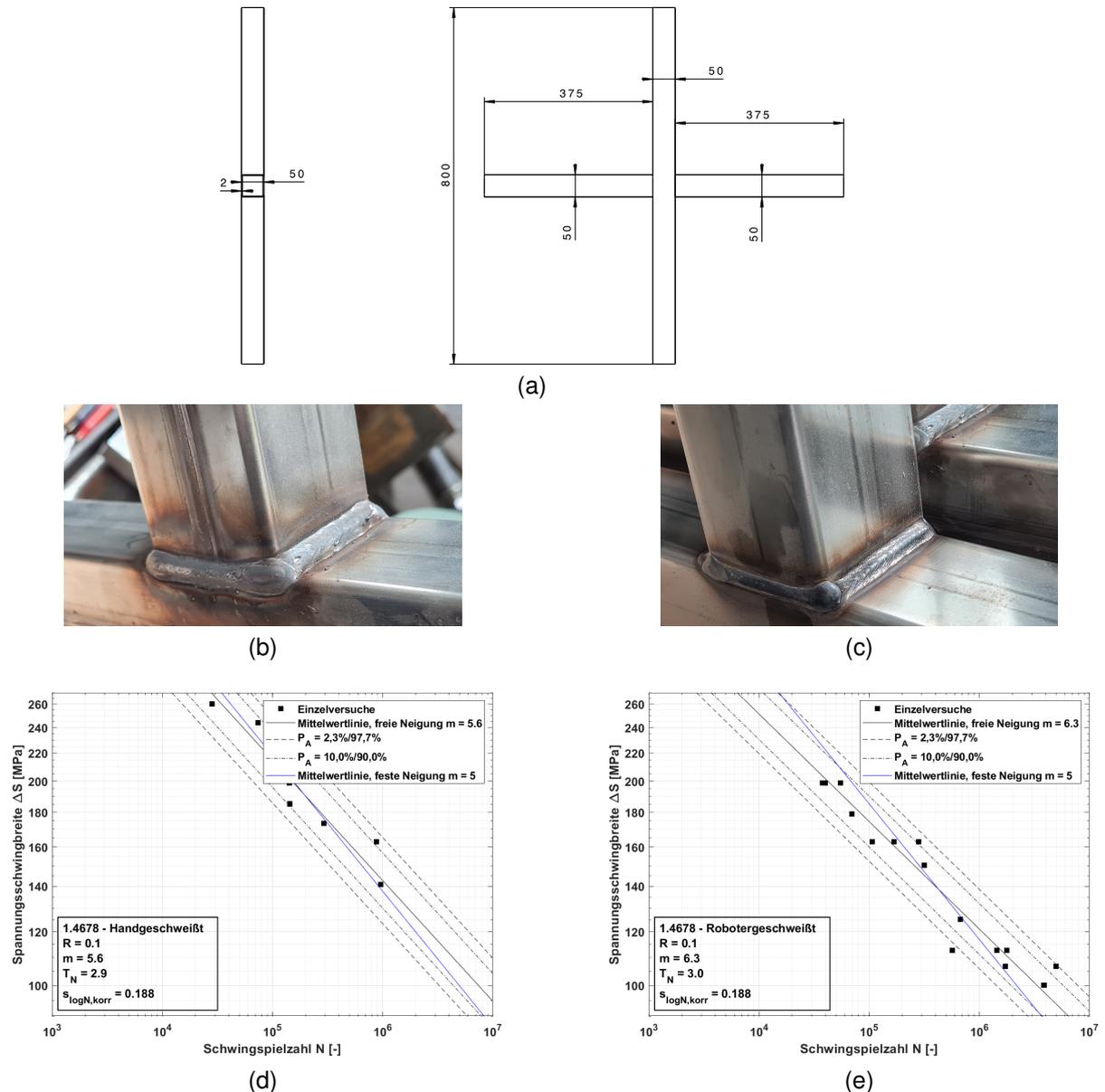


Abbildung 3: Geometrie und ermittelte *Wöhler*linien der Versuchskörper unter Biegung mit unterschiedlicher Fertigung: (a) Abmessungen der Probekörper, (b) handgeschweißte Ausführung, (c) robotergeschweißte Ausführung, (d) Ergebnisse handgeschweißte, (e) Ergebnisse robotergeschweißte, entnommen aus [6]

Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Belastungskollektiven durchgeführt. So wurden High-Low (HL) und Low-High-Folgen (LH) mit unterschiedlichen Überlastfaktoren untersucht, siehe Abbildung 4 - (a) bis (c). Der Überlastfaktor (Schwingbreite High-Block zu Schwingbreite Low-Block) betrug dabei 1,5 oder 1,8. Die Anzahl der Lastwechsel des Startblocks wurde so festgelegt, dass diese entweder 20 % oder 80 % der rechnerischen Schadenssumme betrug. Die Versuche wurden anschließend bis zum Versagen durchgeführt. Zusätzlich wurden Versuche mit wiederkehrender Blockbelastung als Zweistufenversuche durchgeführt. Dabei betrug der Überlastfaktor 1,8 und die Blöcke wurden auf ein Achtel der durchgeführten High-Low-Versuche reduziert. Der Versuchsablauf wurde so oft wiederholt bis ein Versagen auftrat, siehe Abbildung 4 - (d). Als letzte Versuchsreihen wurden Versuche mit gegenphasigem High-Block (Änderung

des R-Verhältnisses) durchgeführt, siehe Abbildung 4 - (e).

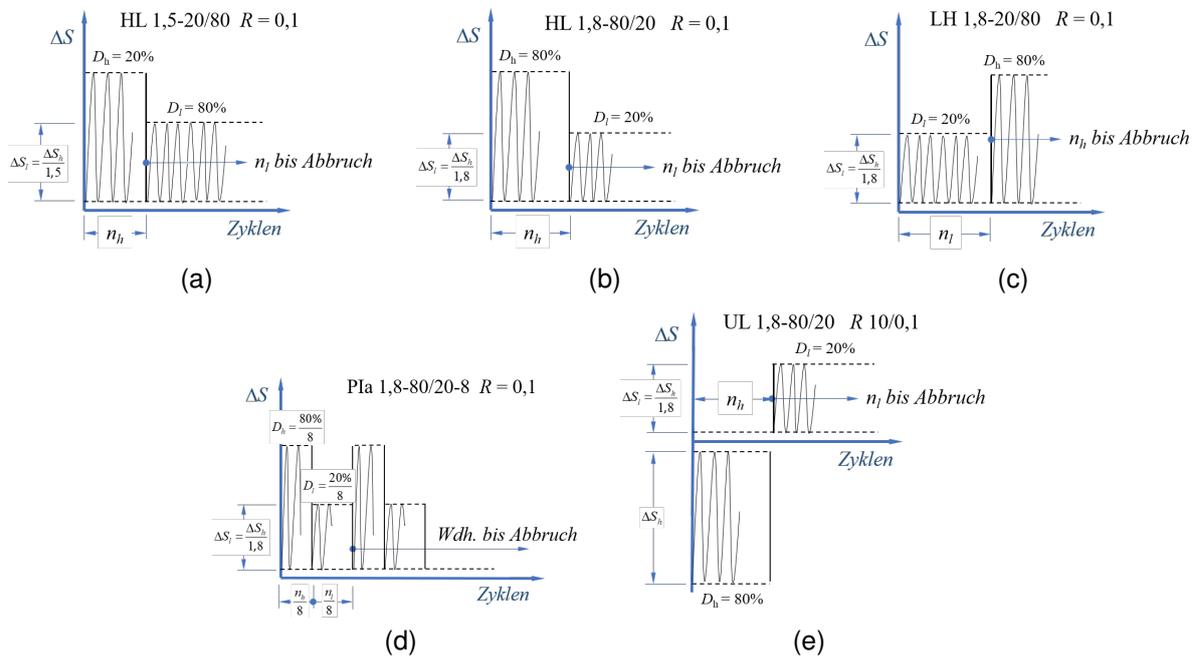


Abbildung 4: Untersuchte Lastkollektive: (a) und (b) High-Low (HL), (c) Low-High (LH), (d) Wiederkehrende Blocklasten (Pla), (e) gegenphasige Überlasten (UL), entnommen aus [6]

Die Ergebnisse der Versuche zeigten, dass der High-Block in den Versuchen maßgebend bei der Lebensdauerabschätzung war, auch wenn dieser bei der Schädigungsrechnung nur einen geringen Schädigungsanteil aufweist. Aufgrund des teilweise großen Schädigungsanteils im High-Block treten im Low-Block vermeintlich geringe Streuungen auf. Bei umgedrehter Belastungsreihenfolge (LH) liegen ähnliche Streuungen in den Ergebnissen vor. Außerdem führt eine gute Durchmischung der Blockversuche (Pla-Versuche) zu höheren Schadenssummen. Bei den Versuchen mit gegenphasigen Überlasten konnten selbst nach Mittelspannungskorrektur nur Schadenssummen $D < 1,0$ festgestellt werden.

Eine genaue Auswertung der Versuchsergebnisse kann dem Abschlussbericht [6] entnommen werden.

Eigenspannungsmessungen

An KHP- und QHP-Probekörper wurden sowohl aus dem Bereich des Kranbaus als auch aus dem Bereich der Busstrukturen Eigenspannungsmessungen vor und nach erfolgter Belastung durchgeführt, um die Änderungen des Eigenspannungszustands durch die aufgebrachte Belastung ermitteln zu können. Die Messungen wurden am Institut für Werkstofftechnik an der Universität Kassel durchgeführt. Für die Eigenspannungsmessungen wurden im Laufe des Projekts zwei unterschiedliche Geräte verwendet, die jedoch beide auf dem Prinzip der Röntgendiffraktion beruhen. Mit diesem System können punktuell in unmittelbarer Nähe der Oberfläche die vorliegenden Eigenspannungen zerstörungsfrei aufgelöst werden. Nähere Informationen zum Aufbau dieser Geräte und zur Röntgendiffraktion können [11] entnommen werden. Beispielhafte Messungen mit den verwendeten Geräten können Abbildung 5 entnommen werden.

Die zu Beginn des Projekts durchgeführten Messungen zeigten, dass sich der Eigenspannungszustand durch eine aufgebrachte Belastung nur in unmittelbarer Nähe zum Schweißnahtübergang deutlich änderte, weswegen sich die weiteren Messungen auf den unmittelbaren Schweißnahtübergang konzentrierten. Die punktuellen Messungen unmittelbar am Schweißnahtübergang wiesen im Grundzustand einen großen Streubereich mit Zug- als auch Druckeigenspannungen auf. Durch die aufgebrachten Belastungen konnte generell eine Änderung des Eigenspannungszustandes festgestellt werden. Die Messungen unterlagen aber zum Teil sehr großen Streuungen, weshalb eine detaillierte Bewertung der Änderung der Eigenspan-



Abbildung 5: Beispielhafte Messungen an KHP- und QHP-Probekörpern, entnommen aus [6]

nungen nicht erfolgen konnte.

Numerische Untersuchungen

Für die im Projekt untersuchten Bauteile wurden begleitend Kerbfaktoren an den versagenskritischen Stellen ausgewertet. Die Gegenüberstellung der ermittelten Kerbspannungen zu den Kerbspannungsklassen nach DVS Merkblatt 0905 [12] zeigte bei allen Versuchen höhere Schwingspielzahlen als die zulässigen Schwingspielzahlen. Größere Abweichungen traten bei den auf Biegung belasteten dünnwandigen Busprofilen auf. Dies lässt sich auf die kleinen hochbeanspruchten Zonen zurückzuführen, welche nach einer Korrektur des statistischen Größeneinfluss verlangen. Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der Strukturspannungsbewertung nach den IIW-Empfehlungen.

Zusammenfassung

Die im Rahmen des Forschungsprojekts FOSTA P 1195 [6] durchgeführten Versuche und numerischen Berechnungen bilden eine breite Datengrundlage für die Bewertung von Einflussfaktoren auf die Betriebsfestigkeit. Gegenstand des Forschungsvorhabens waren experimentelle und numerische Untersuchungen zur Lebensdauerabschätzung von Hohlprofilkonstruktionen unter zyklischen Betriebsbeanspruchungen, um bei der Ausbildung von Leichtbaukonstruktionen eine optimale Werkstoffausnutzung zu erreichen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten die folgenden Erkenntnisse für die Auslegung von Hohlprofilkonstruktionen im Anwendungsbereich des Kranbaus und des Nutzfahrzeugbaus erzielt werden:

- Auf Grundlage von 108 Versuchen an Hohlprofilen im Anwendungsbereich des Kranbaus zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Reihenfolge auf die Lebensdauer. So weisen ausnahmslos alle durchgeführten Blockversuche geringe Lebensdauern auf als Randomversuche mit zufallsartiger Belastung. Auch einen Einfluss von Überlasten auf die Lebensdauer konnte durch Versuche festgestellt werden.
- Auf Grundlage von 88 Versuchen an Hohlprofilen im Anwendungsbereich von Busstrukturen zeigte sich ebenfalls ein Einfluss der Reihenfolge auf die Lebensdauer. Darüber hinaus konnte eine deutliche Festigkeitssteigerung von handgeschweißten Proben im Vergleich zu robotergeschweißten Proben festgestellt werden. Der höherfeste Werkstoff 1.4678 mit einer Festigkeit von ca. 800 MPa führt außerdem zu einer höheren Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zu dem Werkstoff S460MH.
- Die Untersuchungen zeigten, dass die Vorgabe einer pauschalen Schadenssumme ohne Berücksichtigung der Kollektivform und der Belastungsreihenfolge zu unsicheren oder zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen kann. Die Auswertung der Versuchsergebnisse ergaben, dass eine effektive Schadenssumme von 0,2 eine sichere Auslegung für Betriebslasten erlaubt. In vielen Fällen kann diese Auslegung sehr konservativ sein und Leichtbaupotenzial verschenken. Sind möglichst viele Informationen über das Betriebslastkollektiv bekannt, können mitunter effektive Schadenssummen > 1,0 verwendet werden, um leichtere Hohlprofilkonstruktionen dadurch zu realisieren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für die anregenden Diskussionen und konstruktiven Ergänzungen. Außerdem bedanken sich die Autoren für das entgegengebrachte Interesse, die Materialspenden und die zur Verfügung gestellte Software sowie die hilfreichen Beratungsleistungen.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19410 N / FOSTA P 1195 „Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bei der Lebensdauerabschätzung von Hohlprofilknoten“ der FOSTA – Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V., Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Das Vorhaben wurde am Labor für Stahl- und Leichtmetallbau sowie am Verbundlabor für Mathematik und Technische Mechanik der Hochschule für angewandte Wissenschaften München durchgeführt. Die in dem Projekt erarbeiteten Forschungsergebnisse sind umfassend im zugehörigen Abschlussbericht dargestellt. Dieser ist bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) demnächst erhältlich.



**Forschungsnetzwerk
Mittelstand**

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

- [1] DIN EN 1993-1-9:2010-12: *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Ermüdung*. Dezember 2010
- [2] HOBACHER, A. F.: *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. 2. Cham : Springer, 2016 (IIW Collection). – IIW-2259-15
- [3] ZHAO, X.-L. ; HERION, S. ; PACKER, J.A. ; PUTHLI, R.S. ; SEDLACEK, G. ; WARDENIER, J. ; WEYNAND, K. ; WINGERDE, A.M. van ; YEOMANS, N.F.: *Geschweisste Anschlüsse von runden und rechteckigen Hohlprofilen unter Ermüdungsbelastung*. In: *CIDECT Konstruieren mit Hohlprofilen 8* (2002)
- [4] DIN EN 13001-3-1:2019-03: *Krane - Konstruktion allgemein - Teil 3-1: Grenzzustände und Sicherheitsnachweis von Stahltragwerken*. März 2013
- [5] FKM-RICHTLINIE: *Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile*. 6. Auflage. Frankfurt/Main : Forschungskuratorium Maschinenbau, 2012 (FKM-Richtlinie)
- [6] DÜRR, A. ; ROTHER, K. ; ROTH, J. ; NEUHÄUSLER, J. ; OSWALD., M.: *Berücksichtigung von Reihenfolgeeffekten bei der Lebensdauerabschätzung von Hohlprofilkonstruktionen / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA). 2022 (P 1195). – Abschlussbericht*
- [7] DIN 15018-3: *Krane - Grundsätze für Stahltragwerke Berechnung von Fahrzeugkranen*. November 1984

- [8] UMMENHOFER, T. ; HERION, S. ; HRABOWSKI, J. ; FELDMANN, M. ; EICHLER, B. ; BUCAK, Ö. ; LORENZ, J. ; BOOS, B. ; EIWAN, C. ; STÖTZEL, J.: Bemessung von ermüdungsbeanspruchten Bauteilen aus hoch- und ultrahochfesten Feinkornbaustählen im Kran- und Anlagenbau / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA). 2013 (P 778). – Abschlussbericht
- [9] PUTHLI, R. ; HERION, S. ; BERGERS, J. ; SEDLACEK, G. ; MÜLLER, C. ; STÖTZEL, J. ; HÖHLER, S. ; BUCAK, Ö. ; LORENZ, J.: Beurteilung des Ermüdungsverhaltens von Krankonstruktionen bei Einsatz hoch- und ultrahochfester Stähle / Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA). 2010 (P 512). – Abschlussbericht
- [10] GRIMME, D. ; MÜSGEN, B. ; LACHMANN, E. ; OBERPARLEITER, A. ; OLIVIER, R. ; SCHÜTZ, W.: Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von geschweißten Offshore-Konstruktionen in Seewasser / Kommission der Europäischen Gemeinschaft. 1986 (EUR 9896 DE). – Abschlussbericht
- [11] SPIESS, L. ; TEICHERT, G. ; SCHWARZER, R. ; BEHNKEN, H. ; GENZEL, C.: *Moderne Röntgenbeugung - Röntgendiffraktometrie für Materialwissenschaftler, Physiker und Chemiker*. Springer Spektrum, 2019
- [12] DVS0905: *Industrielle Anwendung des Kerbspannungskonzepts für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen*. 2017