Deutscher
Ausschuß für
Stahlbau

DASt

Leibniz
Universität
Hannover

19. DASt-Forschungskolloquium
27. - 28. Oktober 2014

Institut für Stahlbau
Leibniz Universität Hannover

© EIN PRODUKT DER FREHNER CONSULTING

19. DASt-Forschungskolloquium in Hannover

Probabilistische Erfassung der Schadensakkumulation für Schweißverbindungen unter Mehrstufenbeanspruchung und besonderer Berücksichtigung der Dauerfestigkeit

Dima Al Shamaa und Karsten Geißler

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau, Gustav-Meyer-Allee 25, TU Berlin, Deutschland
E-Mail: dima.alshamaa@tu-berlin.de, karsten.geissler@tu-berlin.de

ZUSAMMENFASSUNG

Die rechnerische Ermüdungsanalyse für Schweißverbindungen bei Mehrstufenbeanspruchung hängt nicht nur stark von der Streuung der (für Einstufenbeanspruchung ermittelten) Wöhlerlinie sondern insbesondere auch von der Schadensakkumulationshypothese (und damit der Dauerfestigkeit) ab. Dies ist für Konstruktionen des Bauingenieurwesens besonders wichtig, da diese oft durch Kollektive beansprucht sind, deren Höchstwerte nur wenig oberhalb der Dauerfestigkeitsgrenze liegen. Die Gesamtheit dieser Einflüsse kann nur anhand einer durchgehenden probabilistischen Betrachtung über die Streuung der so genannten tatsächlichen Schadenssumme D_{tat} erfasst werden, die sich durch Vergleiche zwischen Versuch und Rechnung ermitteln lässt. Letztere ist eine Zufallsvariable, deren Mittelwert sich auch – problemabhängig – deutlich anders als der bisher im Bauingenieurwesen übliche Grenzwert 1,0 ergeben wird. Mit anderen Worten: Das Bauteilversagen kann bei deutlich kürzeren oder auch längeren Lebensdauern im Vergleich zur derzeitig normativen Grenzschadenssumme erfolgen. In dem Beitrag wird auf die Frage, ob die rechnerische Lebensdauervorhersage zuverlässig ist, eingegangen. Dazu werden vorhandene Daten von Wöhler- und Lebensdauerversuchen an stählernen Schweißverbindungen anhand verschiedener Schadensakkumulations-Hypothesen neu ausgewertet. Die Ergebnisse werden durch die Verteilung der tatsächlichen Schadenssumme D_{tat} probabilistisch innerhalb des Sicherheitskonzeptes (über die Berechnung des Bemessungswertes der Schadenssumme) bewertet.

1 Einleitung

Im grundlegenden Fall einer konstanten Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma$ wird die Bauteillebensdauer N_L bis zum Versagen durch die erreichbare Lastspielanzahl N mit der Wöhlerlinie für eine bestimmte Überlebenswahrscheinlichkeit $P_Ü$ (%) definiert, s. Abbildung 1. Allerdings sind in den Bereichen des Bauingenieurwesens (Brücken, Krane, Windenergieanlagen etc.) die meisten Bauteile im Betrieb durch variable Spannungsschwingbreiten beansprucht. Dabei entspricht die Bauteillebensdauer N_L i. A. der Lastspielzahl, die ein Bauteil unter bestimmten Betriebsbeanspruchungen bis zum Versagen aufnehmen kann. Der Betriebsfestigkeitsnachweis wird meist nach dem Nennspannungskonzept mit der linearen Schadensakkumulationshypothese nach der Miner-Regel durchgeführt, bei der die Auswirkung einer variablen Schwingbreite $\Delta\sigma_i$ mit einer Häufigkeit n_i durch den Teilschaden $D_i = n_i / N_i$ ausgedrückt wird. Dabei ist N_i die Bruchlastspielzahl im Einstufenversuch bei $\Delta\sigma_i$. Die Teilschäden werden allgemein linear aufsummiert. Ein Bauteilversagen wird – im Bauwesen – dann angenommen, wenn die Schadenssumme einen theoretischen Grenzwert D_{Grenz}=1,0 erreicht. Die Lebensdauerwerte infolge eines bestimmten Kollektivs können auch durch die sogenannte Lebensdauerlinie gut dargestellt werden. Letztere, im Bauwesen bisher unüblich, hängt u. a. vom betrachteten Kerbdetail, der Beanspruchungsreihenfolge, dem Beanspruchungskollektiv, dem Kollektivhöchstwert $\Delta\sigma_{max}$ im Verhältnis zur Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ sowie von Verfahren zur Schadensakkumulation ab. Vergleiche zwischen Versuch und Rechnung haben dennoch gezeigt, dass die Versuchskörper „tatsächlich" sowohl bei kleineren als auch größeren Grenzschadenssummen versagen können. Während eine Grenzschadenssumme von 0,5 für stählerne Schweißverbindungen in verschiedenen Regelwerken für Maschinen- und Fahrzeugbau durchgesetzt ist, wird im Eurocode 3-1-9 [DIN EN 1993-1-9, 2010] eine Grenzschadenssumme von 1,0 zugelassen. Im vorliegenden Beitrag wird somit die Treffsicherheit der Lebensdauervorhersage näher erläutert.

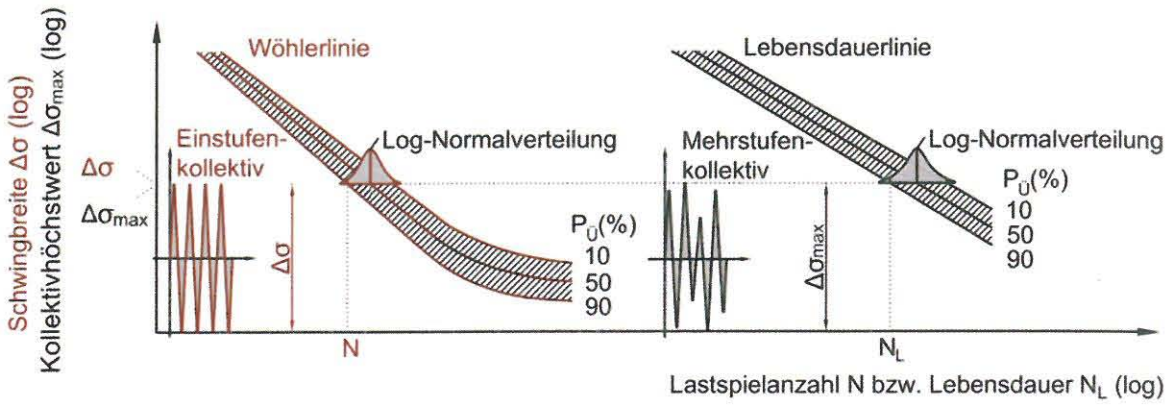

Abbildung 1: Streuende Wöhler- und Lebensdauerlinien

2 Lebensdauerabschätzung mittels Schadensakkumulationshypothesen

Vereinfacht ist die rechnerische Bauteillebensdauer $N_{L,calc}$ umgekehrt proportional zur rechnerischen Schadenssumme D_{calc}. Die „originale" Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner setzte ursprünglich voraus, dass alle Schwingbreiten oberhalb der Dauerfestigkeit liegen (Zeitfestigkeitsbereich) und jeweils eine Teilschädigung D_i verursachen. Liegen im anderen Sonderfall alle Schwingbreiten unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze, so leisten sie keinen Schadensbeitrag und das Bauteil kann theoretisch eine unendliche Lastspielzahl aufnehmen (Dauerfestigkeitsbereich). Meist weisen aber die Beanspruchungskollektive Schwingbreiten im Zeit- sowie im Dauerfestigkeitsbereich auf. Die im Zeitfestigkeitsbereich befindlichen Schwingbreiten führen zur Abminderung der Ausgangsdauerfestigkeit [Haibach, 2006]. Um höhere Treffsicherheiten der Lebensdauerberechnung zu erzielen, wurden für die Miner-Regel zahlreiche Modifikationen / Formen entwickelt, die sich in erster Linie in der Berücksichtigung dieses Dauerfestigkeitsabfalls unterscheiden, s. Abbildung 2. Nach der elementaren Form wird die Zeitfestigkeitsgerade einfach in den Dauerfestigkeitsbereich mit derselben Neigung m_1 weitergeführt, was zur deutlichen Unterschätzung der Bauteillebensdauer bei Kollektiven mit Schwingbreiten unterhalb der Dauerfestigkeit führen kann. Die weiterhin bestehenden Abweichungen zwischen vorhergesagten und experimentellen Lebensdauerwerten führten zur Erfindung der sogenannten modifizierten nach Haibach, die heutzutage als das Standardverfahren zur Lebensdauerabschätzung nach den Regelwerken gilt. Dabei wird die Bezugs-Wöhlerlinie mit den folgenden Annahmen eingeführt: 1- Die Dauerfestigkeit $\Delta\sigma_D$ fällt progressiv mit der Vorschädigung ab, 2- die Neigung der Wöhlergerade m_1 in einer doppeltlogarithmischen Darstellung bleibt von der Schädigung unbeeinflusst und 3- die Wöhlergerade ist im Dauerfestigkeitsbereich mit einer fiktiven Neigung $m_2=2m_1-1$ fortzusetzen. Die genauere, beträchtlich rechenaufwändigere Form, aus der die modifizierte Form hergeleitet wurde, wird als die konsequente Form [Haibach, 2006] bezeichnet, bei der die Dauerfestigkeit durch ein iteratives Vorgehen, Schwingspiel für Schwingspiel, schädigungsabhängig abgemindert wird.

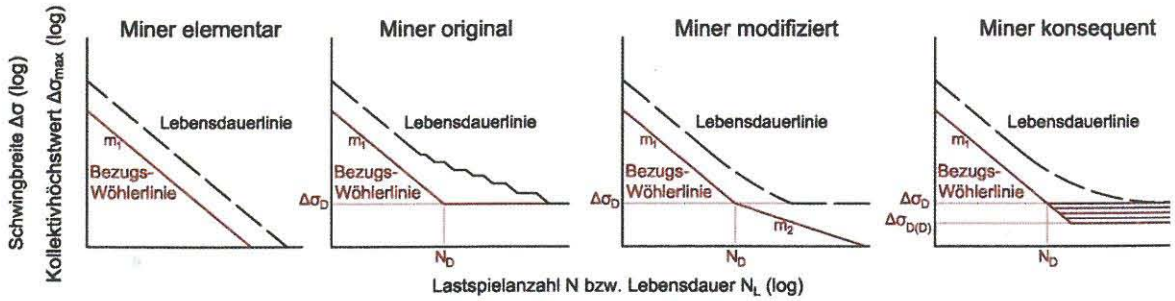

Abbildung 2: Wöhlerlinien und Lebensdauerlinien nach der elementaren, originalen, modifizierten und konsequenten Form der Miner-Regel

3 Zuverlässigkeit der Lebensdauerabschätzung

Die experimentell durch Wöhlerversuche ermittelte ertragbare Lastspielzahl wird für jede Spannungsschwingbreite üblicherweise mit einer Log-Normalverteilung beschrieben. Der Mittelwert der ertragbaren Lastspielzahl $\bar{N}$ hängt vom betrachteten Kerbdetail ab. Die Streubreite T_N wird als Verhältnis der ertragbaren Lastspielanzahl bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit $P_Ü$=10 % und $P_Ü$=90 % bestimmt. T_N schwankt für Baustahl im Zeitfestigkeitsbereich zwischen 3,0 und 7,0, was in der Bemessung für ein bestimmtes Sicherheitsniveau durch einen Teilsicherheitsbeiwert γ_{Mf} abgedeckt wird.

Führt man Betriebsfestigkeitsversuche (Mehrstufenversuche) an Kerbdetails mit gleichen Randbedingungen durch, so erhält man eine größere Streuung der Lebensdauer im Vergleich zu Wöhlerversuchen. Die rechnerischen Lebensdauerwerte nach den Miner-Modifikationen sind, verglichen mit Versuchsergebnissen, mit Ungenauigkeiten belastet, die sowohl auf der sicheren als auch auf der unsicheren Seite liegen können. Ein weitverbreitetes Maß für die Treffsicherheit der Lebensdauerberechnung ist die tatsächliche Schadenssumme D_{tat}, die durch das Verhältnis der experimentellen $N_{L,exp}$ zur rechnerischen Lebensdauer $N_{L,calc}$ ausgedrückt wird:

$$D_{tat} = \frac{N_{L,exp}}{N_{L,calc}} \tag{1}$$

Dabei wird üblicherweise die Lebensdauer $N_{L,calc}$ anhand der mittleren Wöhlerlinie $P_Ü$=50 % ermittelt und die experimentelle Lebensdauer $N_{L,exp}$ bezieht sich auf $P_Ü$=50 %. Liegen die experimentell bestimmten Lebensdauerwerte vor, so kann die Treffsicherheit der rechnerischen Lebensdauer durch eine Nachrechnung mit der Miner-Regel probabilistisch bestimmt werden. Die tatsächliche Schadenssumme ist als probabilistische Größe mit dem Mittelwert $\bar{D}_{tat}$ und der Streubreite $T_{D,tat}=D_{tat,(P_Ü=10\%)}$ / $D_{tat,(P_Ü=90\%)}$ darstellbar. Ein großer Wert der Streubreite deutet, neben auf die Streuung der Werkstoff- und Fertigungseigenschaften, auch auf die Unsicherheit der Miner-Formen mit ihren vereinfachten Annahmen bezüglich des Belastungsablaufs hin. Sogar ideale Schadensakkumulationshypothesen mit einem Mittelwert von $\bar{D}_{tat}$=1,0 zeigten Streubreiten zwischen 2,0 und 3,5 [Eulitz et al., 2005]. Diese Unsicherheiten können auf die folgenden Gründe zurückgeführt werden:

- Bei der Miner-Regel wird ein linearer Verlauf der Schädigung vorausgesetzt, wofür es aber bisher keine physikalische Begründung gibt, wie auch in [Schütz und Zenner, 1973] bereits festgestellt wurde.
- Durch die Übertragung des Ermüdungsverhaltens unter variabler, zufallsartiger Belastung auf das unter konstanter Belastung gehen einige Informationen über die Beanspruchung verloren, z. B. der Reihenfolgeeinfluss.
- Die Schädigungsanteile infolge kleiner, unter der Dauerfestigkeitsgrenze liegender Spannungsschwingbreiten werden meist nur durch fiktive Ansätze erfasst.
- Die Lebensdauerlinie streut anders als die Wöhlerlinie, siehe Abbildung 1, was aber in der Lebensdauerabschätzung nicht berücksichtigt wird.

In [Eulitz et al., 2005] wurde die Lebensdauerabschätzung nach Miner-modifiziert für Schweißverbindungen (aus Stahl und Aluminium) überprüft. Dabei wurden die Datensammlungen in [Eulitz und Kotte, 1999] (DABEF) und [Demofonti et al, 2001] verwendet, bei der die Kollektivhöchstwerte weit oberhalb der Dauerfestigkeit liegen. Trotzdem lieferte diese Untersuchung für Stahl einen Mittelwert der Schadenssumme von $\bar{D}_{tat}$=0,43 mit einer Streubreite von $T_{D,tat}$=5,4. Diese Ergebnisse deuten auf die sogenannte effektive Schadenssumme D_{eff}=0,5 (bzw. 0,3 bei harten Reihenfolgeeinflüssen) hin, die nach den Regelwerken für Maschinen- und Fahrzeugbau zur Lebensdauerkorrektur anzuwenden ist, z. B. nach der IIW-Richtlinie [Hobbacher, 2007] und der FKM-Richtlinie [FKM-Richtlinie, 2012]. Im Bauingenieurwesen wird hingegen von einer Grenzschadenssumme von 1,0 [DIN EN 1993-1-9, 2010] ausgegangen, die zu Lebensdauerwerten auf der sicheren sowie auf der unsicheren Seite führen kann. Somit sind ähnliche Untersuchungen für Baukonstruktionen unabdingbar, die anhand von vorhandenen Datensammlungen aus Versuchsergebnissen und auch ergänzenden Versuchen durchzuführen sind. Experimentelle Lebensdauerunterschungen für Kollektivhöchstwerte direkt oberhalb der Dauerfestigkeit sind in der Literatur bzw. in veröffentlichten Datensammlungen kaum zu finden. Solche Kollektive sind im Bauingenieurwesen aber von besonderem Interesse. Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass unterschiedliche Kollektivformen auch unterschiedliche Unsicherheiten liefern können.

4 Berechnungsbeispiel

Die Untersuchung der Treffsicherheit der Lebensdauervorhersage kann nur anhand einer Gegenüberstellung von rechnerischen und experimentellen Lebensdauerwerten durchgeführt werden. Anhand einer Versuchsreihe aus der DABEF-Datensammlung wird im Folgenden die Vorgehensweise der Auswertung beispielhaft näher erläutert. Eine vollständige Auswertung der Treffsicherheit durch die Ermittlung der statistischen Kennwerte der tatsächlichen Schadenssumme erfordert dennoch, dass ausreichende Einzelversuchsergebnisse für Wöhlerversuche und die zugehörigen Betriebsfestigkeitsversuche vorliegen.

Für eine Stumpfnaht aus Stahl sind diese angesprochenen Einzelversuchsergebnisse teilweise verfügbar. Dabei wurden sechs konstante Spannungsschwingbreiten mit jeweils neun Prüfkörpern bis zum Bruch untersucht, s. Abbildung 3. Die 50%-Wöhlerlinie wurde durch eine Regression über alle Versuchspunkte ausgewertet und besitzt somit den Neigungsexponenten m_1=4,54 und den Bezugspunkt (∅=230 N/mm²; N=1,13x10⁶ Lastspiele). Für $P_Ü$ = 90 % ergibt sich die Wöhlerlinie dann aus der Reststreuung $s_{R,N}$ (hier: $s_{R,N}$=0,2520), was einer Streubreite von T_N=4,42 entspricht. Die Auswertung kann alternativ nach Eurocode 3, Teil 1-9 mit m_1=3,0 und T_N=3,0 geführt werden. Zudem wurden neun Betriebsfestigkeitsversuche unter einem normalverteilten Beanspruchungskollektiv mit einer Summenhäufigkeit von 10^6 Lastspielen und einem Höchstwert von $\Delta\sigma_{max}$=440 N/mm² bis zum Bruch durchgeführt, s. Abbildung 3. Die Horizontenauswertung der experimentellen Lebensdauerwerte weist eine Log-Normalverteilung mit einem Mittelwert von $N_{L,exp,50}$=9,23x10⁶, einer Streubreite von $T_{NL,exp}$=19,23 und einer Standardabweichung von $s_{NL,exp}$=0,5016 auf. Die rechnerischen Lebensdauerwerte nach den Miner-Modifikationen und die dazugehörigen tatsächlichen Schadenssummen nach Formel (1) können Tabelle 1 entnommen werden.

Die Untersuchungsergebnisse verdeutlichen die Methode zur Ermittlung eines einzelnen Wertes der tatsächlichen Schadenssumme D_{tat} für ein Beanspruchungskollektiv je nach Miner-Regel. Die normative Grenzschadenssumme D_{Grenz} wird durch die statistische Untersuchung einer Reihe von tatsächlichen Schadenssummen für verschiedene Versuchsreihen bestimmt.

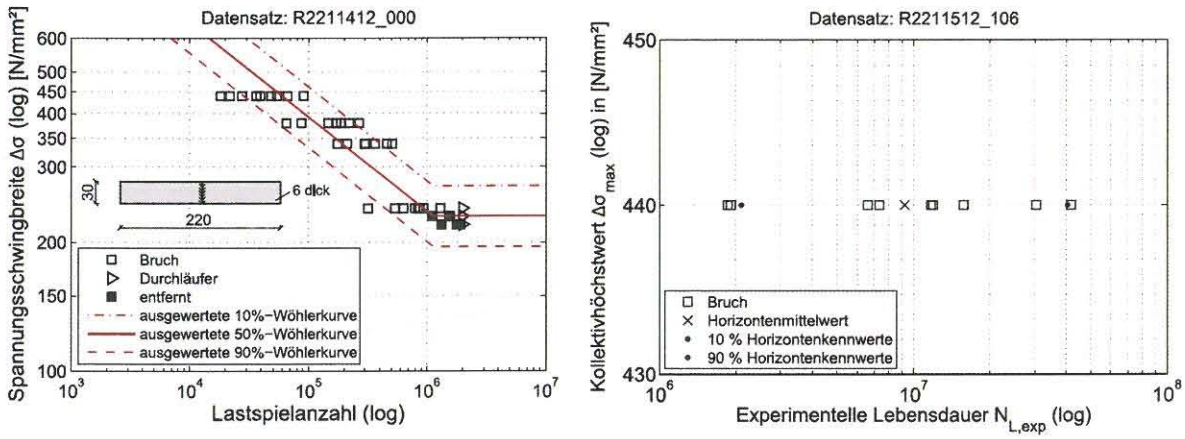

Abbildung 3: Beispielhafte Wöhler- (links) und Lebensdauerergebnisse (rechts)

Tabelle 1: Lebensdauerwerte und tatsächliche Schadenssummen

Lebensdauerwerte für $\Delta\sigma_{max} = 440\ N/mm^2$				Tatsächliche Schadenssumme bei Bruch	
Experimentelle Lebensdauer bei $P_Ü$ = 50 %		$N_{L,exp}$	$9{,}23 \times 10^6$		
Rechnerische Lebensdauer für 50 % -Wöhlerlinie	Miner-original	$N_{L,calc,o}$	$2{,}20 \times 10^7$	$D_{tat,o}$	0,41
	Miner-konsequent	$N_{L,calc,k}$	$1{,}39 \times 10^7$	$D_{tat,k}$	0,66
	Miner-modifiziert	$N_{L,calc,m}$	$1{,}19 \times 10^7$	$D_{tat,m}$	0,77
	Miner-elementar	$N_{L,calc,e}$	$8{,}12 \times 10^6$	$D_{tat,e}$	1,14

5 Literatur

Demofonti, G. et al. (2001), "High-strength steels in welded state for lightweight constructions under high and variable stress peaks," European Commission, Brussels, Directorate- General for Research, Information and Communication Unit, Report Nr. 19989.

DIN EN 1993-1-9 (2010), Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-9: Ermüdung.

Eulitz, K.-G et al. (2005), "Lebensdauerabschätzung von Schweißverbindungen unter variablen Amplituden - Berechnung und Experiment," DVS-Berichte, 236, S. 36–42

Eulitz, K.-G und Kotte, K. L. (1999), Datensammlung Betriebsfestigkeit - Teil 1: Stahl- und Eisenwerkstoffe, VDMA Verlag, Frankfurt/Main.

FKM-Richtlinie (2012), Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und Aluminiumwerkstoffen, 6. überarbeitete Ausgabe.

Haibach, E. (2006), Betriebsfestigkeit - Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin.

Hobbacher, A. (2007), Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding, Document: IIW-1823-07/XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07.

Schütz, W. und Zenner, H. (1973), "Schadensakkumulationshypothesen zur Lebensdauervorhersage bei schwingender Beanspruchung. Teil 1 - Ein kritischer Überblick," Zeitschrift für Werkstofftechnik, Vol. 4, H. 1, S. 25–33