

## Konstruktionsgrundlagen für schwingbelastete Bauteile – Erweiterung der Synthetischen Wöhlerlinien

Stetig wachsender Kostendruck und steigende Anforderungen hinsichtlich der Einsparung von Gewicht und von Emissionen bei Herstellung und Betrieb erfordern die konsequente Ausnutzung des Festigkeitspotenzials von Werkstoffen durch die Optimierung zyklischer Bauteileigenschaften bereits in der Vorauslegungsphase. Die Erweiterung der Synthetischen Wöhlerlinien spielt dabei eine bedeutende Rolle.

## AUTOREN



**Matthias Hell, M. Eng.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt



**Dr.-Ing. Rainer Wagener**

ist Gruppenleiter Bauteilgebundenes Werkstoffverhalten am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF in Darmstadt



**Dr.-Ing. Torsten Richter**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Werkstoffe und Bauteile der Materialforschungs- und Prüfanstalt MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar



**Dipl.-Ing. Andreas Kleemann**

ist Leiter der Arbeitsgruppe Betriebsfestigkeit und Werkstofftechnik der Materialforschungs- und Prüfanstalt MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar



**Prof. Dr.-Ing. Joachim W. Bergmann**

ist ehemaliger Leiter der Materialforschungs- und Prüfanstalt MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar



**Dr.-Ing. Andreas Diemar**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Werkstoffe und Bauteile der Materialforschungs- und Prüfanstalt MFPA an der Bauhaus-Universität Weimar

Für die Verlagerung der Bauteildimensionierung und Optimierung in den virtuellen Produktentwicklungsraum steht das Konzept der Synthetischen Wöhlerlinien zur Verfügung, welche die Abschätzung der Bauteillebensdauer auf Grundlage einfacher Werkstoffkennwerte sowie numerischer Ermittlung von Einflussfaktoren aus Geometrie, Fertigung und Betriebsbelastung gestatten, ohne dass hierfür der übliche Aufwand an zeit- und kostenintensiven Schwingversuchen nötig ist. Um die Abschätzungsgüte der Synthetischen Wöhlerlinien hinsichtlich neuer Werkstoffsysteme und relevanter Einflussfaktoren zu verbessern und die Anwendbarkeit der Synthetischen Wöhlerlinien nach SWL99 von 1999 auf höchstfeste Stähle auszuweiten, wurde von der Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar MFPA und dem Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF, Darmstadt, ein Forschungsprojekt in Zusammenarbeit mit der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) durchgeführt. Insbesondere im Hinblick auf die Lebensdauerabschätzung von Schmiedebauteilen wurden die Synthetischen Wöhlerlinien im Detail optimiert. Durch die Berücksichtigung verschiedener prozess- und werkstoffspezifischer Einflussgrößen, wie beispielsweise der Anisotropie von Umformgefügen oder der Wirkung von Härteverfahren auf die Beanspruchbarkeit, wird die Genauigkeit bei der Lebensdauerabschätzung von massivumgeformten Bauteilen deutlich verbessert.

### LEBENSDAUERABSCHÄTZUNG MIT DEN SYNTHETISCHEN WÖHLERLINIEN

Die Synthetischen Wöhlerlinien [1, 2] beschreiben die Beanspruchbarkeit von Bauteilen von der Bruchlast bis hin zur Dauerfestigkeit in Abhängigkeit der Nennspannung bezie-

ungsweise der Last (Bild 1). Als Aufhängungspunkt der Synthetischen Wöhlerlinie dient dabei die Lastamplitude der Bauteildauerfestigkeit  $S_D$ , das heißt der Abknickpunkt zwischen Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit, welcher im einfachsten Fall aus der Werkstoffwechselfestigkeit  $\sigma_{Wzd}$  und einem Lastübertragungsfaktor beziehungsweise der Kerbformzahl  $K_t$  berechnet wird. Zur Abschätzung der zyklischen Werkstoffeigenschaften werden quasistatische Werkstoffkennwerte, wie die Zugfestigkeit  $R_m$  oder die Streckgrenze  $R_p$ , welche durch Zugversuche bestimmt werden können, verwendet. Bei der Ermittlung der Bauteildauerfestigkeit werden Einflussfaktoren wie beispielsweise der Mittelspannungseinfluss, die Temperatur oder Oberflächenbeschaffenheit sowie Übertragbarkeitsfaktoren berücksichtigt.

Neben der Bauteildauerfestigkeit  $S_D$  ist die plastische Grenzlast, das heißt die Last, bei welcher der Querschnitt vollständig plastifiziert, zu bestimmen. Hierzu kann eine FE-Simulation mit elastisch-idealplastischem Werkstoffverhalten angewendet werden. Die Neigung  $k$  im Zeitfestigkeitsbereich der Synthetischen Wöhlerlinie wird anschließend aus dem Abstand der plastischen Grenzlast  $S_p$  und der Dauerfestigkeit  $S_D$  bestimmt. Die Festlegung der Schwingspielzahl  $N_D$  am Abknickpunkt zur Dauerfestigkeit erfolgt in Abhängigkeit der Neigung  $k$ . Die Schwingspielzahl  $N_p$  bei der plastischen Grenzlast  $S_p$  wird anschließend aus der Gleichung der Wöhlerlinie im Zeitfestigkeitsbereich bestimmt. Im Kurzzeitfestigkeitsbereich verläuft die Synthetische Wöhlerlinie von der plastischen Grenzlast ( $S_p$  bei  $N_p$ ) bis zur Bruchlast  $S_B$ , die aus der plastischen Grenzlast und dem Verhältnis der Zugfestigkeit  $R_m$  bezogen auf die Streckgrenze  $R_p$  ermittelt wird.

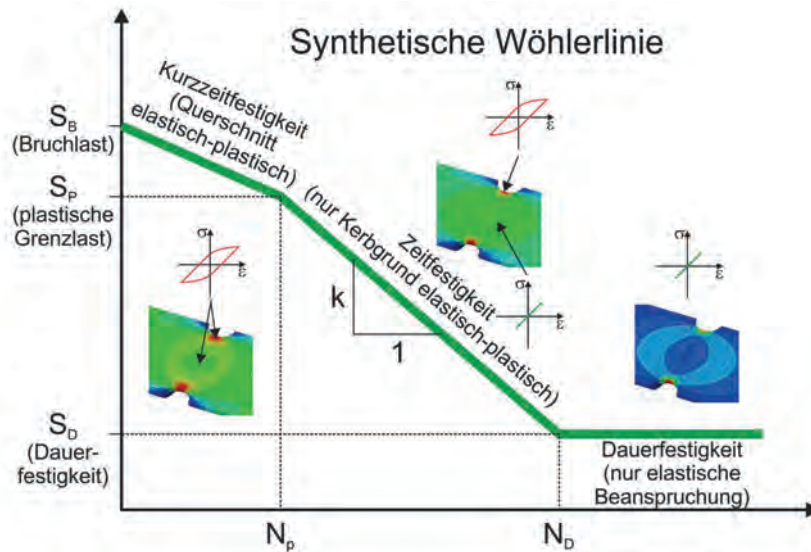


Bild 1: Synthetische Wöhlerlinie im Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeitsbereich

**NEUERUNGEN IN DEN SYNTHETISCHEN WÖHLERLINIEN 2018**

Die ständig voranschreitende Entwicklung im Bereich höchstfester Stahlwerkstoffe sowie neue wissenschaftliche Erkenntnisse, insbesondere zur Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses, des statistischen Größeneinflusses, der Anisotropie bei Schmiedeerzeugnissen sowie des Einflusses von Temperatur und Einsatzhärtung, veranlassten, die Synthetischen Wöhlerlinien durch eine Überarbeitung zu optimieren. Auf Grundlage intensiver Datenauswertungen sowie zahlreicher Schwingfestigkeitsversuche konnte der Anwendungsbereich der Synthetischen Wöhlerlinien nun auch auf höchstfeste Stähle mit Zugfestigkeiten über 2.000 MPa sowie höherfeste Stähle mit überdurchschnittlichen zyklischen Festigkeiten, hierunter AFP-Stähle, bainitische Stähle und ESU-Stähle, erweitert werden.

Hinsichtlich der Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses, welcher auch zur Bewertung von Eigenspannungen dient, wird für die neuen Synthetischen Wöhlerlinien SWL2018 eine Unterscheidung zwischen Werkstoff- und Bauteilverhalten getroffen, wobei sich die Beschreibung des Mittelspannungseinflusses für Bauteile weiterhin an der FKM-Richtlinie orientiert. Bei der Beschreibung des Mittelspannungseinflusses für den Werkstoff

wird der Schädigungsparameter nach Bergmann  $P_B$  verwendet, der dem Umstand Rechnung trägt, dass die Beanspruchbarkeit bei erhöhten Druckmittellasten entgegen den Vorgaben der FKM-Richtlinie auch abfallen kann [3].

Zu den Neuerungen der SWL2018 im Bereich der Übertragbarkeit zählt ein Übertragungskonzept, welches die Berücksichtigung von Größeneinflüssen entweder kumulativ, das heißt als Kombination aus spannungsmechanischem und statistischem Größeneinfluss durch das HBV90%-Konzept [4], oder separat als statistischem Größeneinfluss nach Weibull [5] ermöglicht. Letzterer bietet die Möglichkeit, neben der Ausdehnung höchstbeanspruchter Bereiche auch die statistische Streuung der Versuchspunkte einzubeziehen. Die erforderlichen Kennwerte lassen sich ohne Mehraufwand aus der zur Bestimmung des Lastübertragungsfaktors erforderlichen FE-Analyse ableiten.

Schmiedewerkstoffe weisen zahlreiche Besonderheiten in Bezug auf die Schwingfestigkeit auf, welche durch den Umformprozess in Form von Texturierung und Anisotropie induziert werden. Um die Auswirkungen der Richtungsabhängigkeit auf die Bauteillebensdauer berücksichtigen zu können, enthalten die

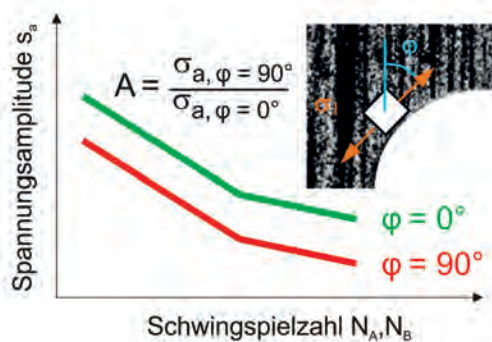


Bild 2: Bewertung der Anisotropie bei Schmiedebauteilen

Bilder: Autoren

neuen Synthetischen Wöhlerlinien SWL2018 das Konzept der relativen Anisotropie  $A$  [6], welches eine örtliche Bewertung der Schwingfestigkeit auf Basis der Gefügeausrichtung ermöglicht (Bild 2). Für einsatzgehärtete Bauteile wurde eine Methodik in die neuen Synthetischen Wöhlerlinien SWL2018 integriert, welche die Abschätzung und Berücksichtigung des Einflusses der Einsatzhärtung ausgehend vom zyklischen Werkstoffverhalten und des Randkohlenstoffgehalts, der Einsatzhärtetiefe sowie einer elastizitätstheoretischen Analyse zur Ermittlung der lokalen Beanspruchungen gestattet. Dabei wird eine Fallunterscheidung zwischen Oberflächenversagen und Randschichtversagen getroffen.

Bislang war in den synthetischen Wöhlerlinien keine Methode zur Berücksichtigung mehrachsiger Beanspruchungszustände verfügbar. Im Rahmen der Überarbeitung wurde daher die Schubspannungsintensitätshypothese in die SWL2018 eingefügt, sodass jetzt auch mehrachsig proportionale Beanspruchungszustände bewertet werden können.

In der FKM-Richtlinie werden konstante Sicherheitsfaktoren definiert, welche von den Versagensfolgen und dem Einsatz abhängen. Eine Berücksichtigung der tatsächlichen Streuung der Versuchspunkte findet nicht statt, was sowohl zu überhöhten als auch zu geringen Sicherheitsmargen führen kann. Um der mangelnden Berücksichtigung der Versuchsstreuung entgegen-

zuwirken, enthalten die SWL2018 ein probabilistisches Sicherheitskonzept, welches Sicherheitsfaktoren auf Grundlage der statistischen Auswertung der Streuung der Beanspruchbarkeit ermöglicht.

Neben den experimentellen und analytischen Arbeiten wurde ein Methodenträger erstellt, um die Übertragung in die betriebliche Bemessungspraxis zu erleichtern und die Funktionsweise der SWL2018 zu demonstrieren. In diesem sind alle Methoden der SWL2018 zusammengefasst. Mittels einer Benutzeroberfläche lassen sich die erforderlichen Eingabedaten zur Berechnung hinzufügen. Die erforderlichen Kennwerte können dabei entweder durch den Benutzer eingefügt werden oder einer Datenbank entnommen werden, welche im Rahmen des Projekts erarbeitet wurde. Diese enthält neben zahlreichen Schwingfestigkeitskennwerten und Versuchsergebnissen aus der Literatur auch die Ergebnisse der Forschungseinrichtungen zu höchstfesten Stählen und AFP-Stählen des aktuellen Forschungsprojekts. Der Abschlussbericht, der die theoretischen Grundlagen der SWL2018 sowie den Berechnungsablauf enthält, ist demnächst – ebenso wie der Methodenträger – bei der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA) in Düsseldorf erhältlich.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Synthetischen Wöhlerlinien 2018 sind das Ergebnis umfangreicher Überarbeitungen und Verbesserungen am Konzept der Synthetischen Wöhlerlinien nach Hück et al. sowie Bergmann und Thumser [1, 2]. Durch einen Methodenträger und den Abschlussbericht, in dem die methodische Vorgehensweise beschrieben wird, ist eine einfache Verwendung der SWL2018 in der praktischen Bauteilbemessung möglich.



[1] Hück, M.; Thraier, L.; Schütz, W.: Berechnung von Wöhlerlinien für Bauteile aus Stahl, Stahlguss und Grauguss – Synthetische Wöhlerlinien, Bericht ABF 11 (1983)

[2] Bergmann, J.; Thumser, R.: Synthetische Wöhlerlinie für Eisenwerkstoffe, Studiengesellschaft Stahlanwendung, Düsseldorf, 1999, ISBN 3-934238-13-0

[3] Bergmann, J. W.; Kleemann, A.; Richter, T.: Unterschiede im Mittelspannungseinfluss zwischen Werkstoff und Bauteil, in: Anwendungsspezifische Werkstoffgesetze für die Bauteilsimulation, Berlin, 2017

[4] Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.; Grubišić, V.: Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten am Beispiel eines betriebsfest auszulegenden geschmiedeten Nutzfahrzeug-Achsschenkels, Konstruktion 47 (1995) Heft 7/8, S. 222-232

[5] Diemar, A.; Thumser, R.; Bergmann, J.W.: Determination of Local Characteristics for the Application of the Weakest-Link Model, in: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Bd. 36 (2005), Nr. 5, S. 204-210

[6] Exel, N.; Türk, M.; Hanselka, H.; Groche, P.: Einfluss von Faserverlauf und Gefüge auf die Schwingfestigkeit warmmassivumgeformter AFP-Stähle (AVIF A 245), Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. FSV, 2010



Das IGF-Vorhaben „Konstruktionsgrundlagen für schwingbelastete Bauteile – Erweiterung der Synthetischen Wöhlerlinien“, IGF-Projekt Nr. 18511 BG, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags gefördert. Die Langfassung des Schlussberichts kann demnächst über die Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) angefordert werden.

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie**



**IGF**  
Industrielle  
Gemeinschaftsforschung

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestags