



Dehnungsbasierte Lebensdauerabschätzung von Aluminiumwerkstoffen für Zellverbinder

Lebensdauerabschätzung von Reinaluminiumwerkstoffen

T. Korschinsky, B. Möller, M. Kiel

ZUSAMMENFASSUNG Im Zuge des Wandels der Automobilindustrie hin zur Elektromobilität eröffnen sich für einige Werkstoffe neue Anwendungsfelder. Technische Reinaluminiumwerkstoffe wie EN AW-1050A H24 sind von zunehmendem Interesse in der industriellen Anwendung, da sie sich durch ihre elektrische Leitfähigkeit gut in Zellkontaktiersystemen einsetzen lassen. Infolgedessen muss das Werkstoffverhalten dieser Werkstoffe genau verstanden werden und in einen Prozess zur präzisen Lebensdauerabschätzung überführt werden.

Lifetime estimation of pure aluminum materials

ABSTRACT As the automotive industry moves towards electromobility, new fields of application are opening up for some materials. Technical pure aluminum materials such as EN AW-1050A H24 are of increasing interest in industrial applications, as their electrical conductivity makes them suitable for use in cell contacting systems. As a result, the material behavior of these materials must be precisely understood and transferred into a process for precise fatigue life estimation.

STICHWÖRTER

Automobilindustrie, Batteriefertigung, Simulation

1 Einleitung

Zur effizienten und ressourcenschonenden Auslegung von Bauteilen ist der Forschungsbereich der Betriebsfestigkeit von besonderer Bedeutung. Die Betriebsfestigkeit beschäftigt sich mit der Ermittlung der Lebensdauer von Bauteilen unter zeitlich veränderlichen Lasten, wie sie im Betrieb auftreten [1]. Das Ziel ist es, ein vorzeitiges Bauteilversagen auszuschließen und gleichzeitig eine wirtschaftliche Konstruktion ohne überdimensionierte Komponenten zu gewährleisten. Im Ergebnis soll die volle Funktionalität und Sicherheit einer zyklisch beanspruchten Komponente über die gesamte Lebensdauer hinweg garantiert werden.

Die vorliegende Untersuchung strebt eine möglichst präzise Abschätzung der Lebensdauer von Zellverbindern aus dem Aluminiumwerkstoff EN AW-1050A H24 an. Hierfür wird eine experimentelle Untersuchung zur Ermittlung des zyklisch-transienten Werkstoffverhaltens durchgeführt. Im Zuge dessen wird auf auftretende Herausforderungen eingegangen und deren Lösung diskutiert. Darauf aufbauend wird eine Vorgehensweise dargelegt, die das zyklisch-transiente Werkstoffverhalten in der Simulation abbilden kann, sodass daraus resultierend die Lebensdauer der Bauteile treffend abgeschätzt werden kann.

2 Experimentelle Untersuchung

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind das ermittelte zyklisch-transiente Werkstoffverhalten und bilden die Grundlage für die spätere Lebensdauerabschätzung. Als Eingangsdaten finden an Werkstoffproben ermittelte zyklische Werkstoffkennwerte Anwendung.

2.1 Probengeometrien

Zur Ermittlung des zyklisch-transienten Werkstoffverhaltens werden 80 mm lange, ungekerbte Proben mit einer Messlänge von 10 mm verwendet, wie in **Bild 1** dargestellt. Vom Mess- zum Klemmbereich der Probe ist ein elliptischer Auslauf vorgesehen, um eine Kerbformzahl von $K_t \approx 1$ zu gewährleisten. Die Kanten der Proben werden poliert und verrundet, um den Oberflächeneinfluss zu minimieren. Auf diese Weise wird ein R_a -Wert unter $0,2 \mu\text{m}$ und ein R_z -Wert unter $0,7 \mu\text{m}$ erreicht, wie es in [2] empfohlen wird. Die Rauheitswerte werden stichprobenartig mithilfe eines Rauheitsmessgeräts überprüft.

Die Validierung der dargelegten Vorgehensweise zur Lebensdauerabschätzung erfolgt an gekerbten Proben mit einer Formzahl von $K_t = 2,1$, deren Geometrie in **Bild 2** dargestellt ist.

Beide Probenarten werden für eine Aussage über eine mögliche Anisotropie sowohl längs als auch quer zur Walzrichtung aus einem Blech entnommen.

2.2 Belastungssystem

Die entnommenen Flachproben werden in dem in **Bild 3** dargestellten Belastungssystem untersucht. Das Belastungssystem hält die Proben mithilfe eines Klemmsystems zwischen dem oberen festen und dem unteren beweglichen Teil, der sich zum Aufbringen der Belastung uniaxial in Vertikalrichtung bewegen kann. Der Aktuator ist ein präzise ansteuerbarer Schrittmotor, der eine Spindel dreht, wodurch die Bewegung von einer Rotation in die axiale Bewegung übersetzt wird. Zur Messung und Regelung der aufgetragenen Kräfte wird ein Kraftaufnehmer des Typs Interfaceforce, Modell 1710DLL – 2,5 kN, genutzt. Diese Kraftaufnehmer messen die Kraft mithilfe von Dehnmessstreifen in ihrem Inneren, wodurch eine Spannung ausgegeben wird, die wiederum mit einer Kraft korreliert. Um die Dehnung an der Probe zu messen, wird entweder ein taktiles Aufsetzextensometer oder ein optisches Dehnmess- und -regelungssystem eingesetzt. Für dehnungsgeregelte Versuche ist das Dehnungssignal die Regelgröße, während das Kraftsignal zum Detektieren des Steifigkeitsabfalls genutzt wird.

2.3 Dehnungsregelsysteme

Zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens an den ungekerbten Proben kommen Dehnungsregelungssysteme zum Einsatz, wobei Aufsetzextensometer verbreitet sind. Eine neuere Weiterentwicklung sind optische Dehnungsregelsysteme, deren Vorteile für die Charakterisierung des Werkstoffs EN AW-1050A H24 genutzt werden sollen.

2.3.1 Dehnungsregelung mit Aufsetzextensometern

Die taktilen Aufsetzextensometer sind mit der Probenoberfläche über zwei Schneiden in Kontakt. Diese Schneiden bewegen sich relativ zueinander, wodurch die Dehnung im Messbereich der Probe ermittelt werden kann, indem die gemessene Längenänderung durch die Länge des Messbereichs des Extensometers dividiert wird. Während der Vorteil des Aufsetzextensometers die lang bewährte und vergleichsweise einfache Technologie ist, sind die Nachteile eine anspruchsvolle Installation auf der Probenoberfläche, die Messung einer integralen Größe über der Länge des Messbereichs und die mögliche Schädigung der Probenoberfläche durch die Schneiden.

Da der Aluminiumwerkstoff EN AW-1050A H24 eine sehr geringe Härte aufweist, führt der direkte Kontakt der Schneiden des Aufsetzextensometers mit der Probenoberfläche unter zyklischer Belastung der Werkstoffprobe zu einer Bildung von kleinen Kerben, wie es beispielhaft in **Bild 4** gezeigt ist.

Der schwingfestigkeitsvermindernde Einfluss dieser Kerben kann fälschlicherweise als Teil des Werkstoffverhaltens interpretiert werden. In einem Großteil der durchgeführten Untersuchungen erfolgt der Anriss unter den Schneiden, wodurch die Versuche nach [3] als ungültig gewertet werden. Dennoch wurden mit dem Aufsetzextensometer neun verwertbare Versuche durchgeführt, sodass eine Dehnungswöhlerlinie abgeleitet werden kann (vgl. Bild 7).

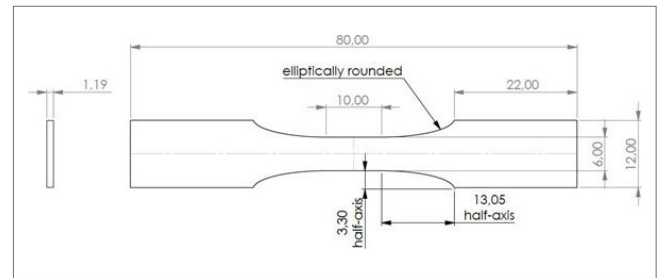


Bild 1 Ungekerbte Flachprobengeometrie für dehnungsgeregelte zyklische Versuche. Foto: Fraunhofer LBF

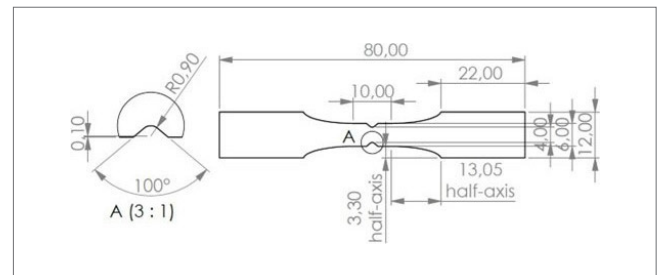


Bild 2 Gekerbte Flachprobengeometrie für kraftgeregelte zyklische Versuche. Foto: Fraunhofer LBF

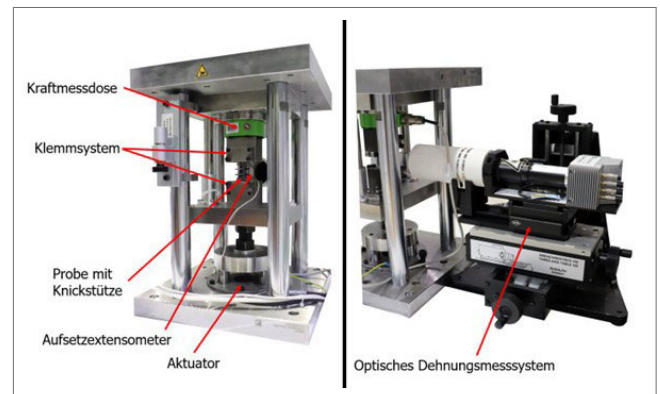


Bild 3 Verwendetes E-Zylinder-Belastungssystem mit Schrittmotor als Aktuator. Foto: Fraunhofer LBF

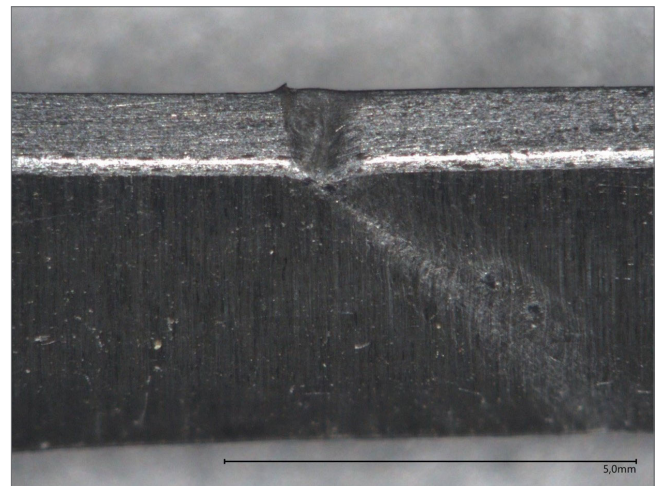


Bild 4 Durch das Aufsetzextensometer auf der Probenseitenfläche erzeugte Kerbe. Foto: Fraunhofer LBF

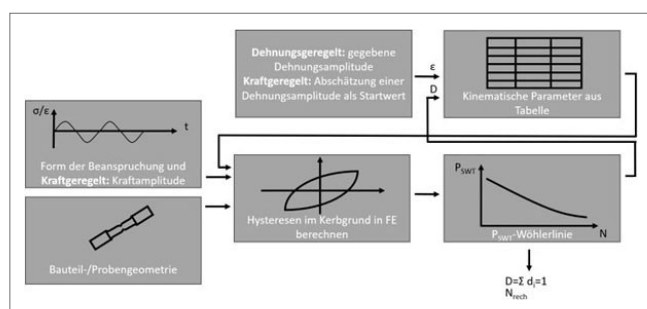


Bild 5 Vorgehensweise des schädigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodells. Grafik: Fraunhofer LBF

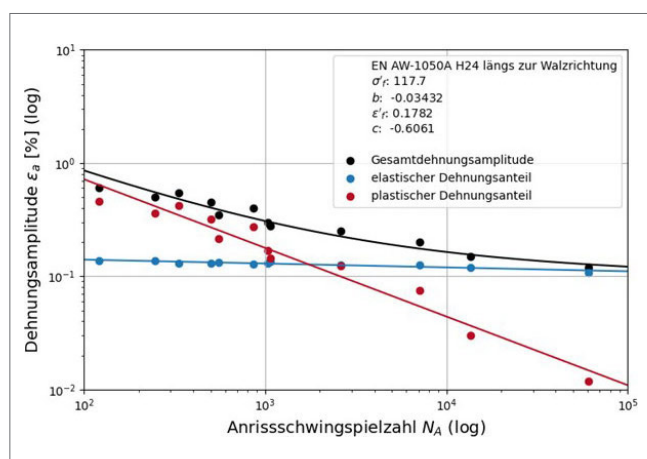


Bild 6 Dehnungswöhlerlinie der längs zur Walzrichtung entnommenen ungekerbten Flachproben. Grafik: Fraunhofer LBF

2.3.2 Dehnungsregelung mit optischen Systemen

Eine weiterentwickelte Methode zur Messung der Dehnung ist die Verwendung eines optischen Systems. Diese optischen Dehnungsmess- und -regelungssysteme verwenden Kameras zur Beobachtung der Probenoberfläche. Vor Beginn des Versuchs wird ein Referenzbild aufgenommen und darin zwei Referenzbereiche definiert. Diese Referenzbereiche weisen – wie ein Fingerabdruck – ein einzigartiges Muster auf der Oberfläche auf, das entweder auf Einflüsse aus der Produktion oder auf das Aufbringen eines statistischen Musters auf die Oberfläche, beispielsweise eines Specklemusters, zurückzuführen ist. Dies ermöglicht die Identifizierung eines präzisen Punktes auf der Oberfläche des Probekörpers während des Versuchs. Die Bewegung dieser beiden Bereiche wird verfolgt und die Dehnung analog zum Aufsetzextensometer berechnet, indem die Bewegung zwischen den beiden Referenzen durch die Ausgangslänge dividiert wird.

Der Vorteil optischer Dehnungsmess- und -regelsysteme liegt in der einfacheren Einrichtung sowie in der Möglichkeit, den Abstand zwischen den beiden erfassten Bereichen variieren zu können. Dies ermöglicht die Messung der Dehnung sowohl über einen größeren Bereich, wie beim Aufsetzextensometer (mehrere Millimeter), als auch in einem sehr kleinen Bereich (< 1 mm). Obwohl die gemessene Dehnung immer noch einen integralen Wert abbildet, kann sie nun für eine viel kleinere Ausgangslänge berechnet werden. Der dritte und für den Werkstoff EN AW-1050A H24 relevanteste Vorteil ist die berührungslose Dehnungsmessung, die das Risiko einer Vorschädigung der Oberfläche ausschließt.

Die optisch geregelten Versuchsergebnisse weichen kaum von der Dehnungswöhlerlinie ab, welche auf Grundlage von gültigen, mit dem Aufsetzextensometer ermittelten Versuchspunkten abgeleitet wurde. Dies ist in **Bild 6** nachzuvollziehen. Im Mittel liegt die Abweichung zwischen den Versuchen mit dem optischen System und dem Extensometer bei 2,3 %. Bei den quer zur Blechwalzrichtung entnommenen Proben kann bei 68 % der mit dem Aufsetzextensometer durchgeführten Versuche ein Anriss unter den Schneiden des Extensometers beobachtet werden, wodurch diese Versuche gemäß [3] als ungültig zu werten sind. Gleichzeitig ist bei der Versuchsdurchführung mit dem optischen System nur ein Versuch, was 10 % der Versuche entspricht, als ungültig zu werten. Dies ist auf eine Dehnungskonzentration verbunden mit einer Aufrauhung der Werkstoffoberfläche zurückzuführen. Wenn die Oberflächenveränderung innerhalb der vom optischen Dehnungsmesssystems beobachteten Fläche auftritt, wird der Abgleich mit dem Referenzbild fehlerhaft, in dessen Folge auf die Messung des falschen Dehnungswertes eine Regelung auf diesen inkorrekten Wert im weiteren Versuch erfolgt und somit der Versuch als ungültig zu werten ist.

3 Methodische Vorgehensweise zur Versuchsauswertung und Lebensdauerabschätzung

Um eine präzise Lebensdauerabschätzung zu erreichen, muss zunächst das zyklische Werkstoffverhalten aus Versuchen abgeleitet und beschrieben werden. Erst im darauffolgenden Schritt kann zum Beispiel unter Anwendung des örtlichen Konzepts die Lebensdauerabschätzung vorgenommen werden. Hierbei kann es bei der Übertragung auf gekerbte Proben oder Bauteile notwendig sein, weitere Einflussfaktoren der Betriebsfestigkeit zu berücksichtigen.

3.1 Beschreibung des zyklischen Werkstoffverhaltens

Das zyklische Werkstoffverhalten wird anhand der Auswertung der Versuchsdaten mithilfe von Dehnungswöhlerlinien und den zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven beschrieben. Um das ermittelte zyklische Werkstoffverhalten für Simulationen mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) nutzbar zu machen, muss das Werkstoffverhalten möglichst präzise in einem Werkstoffmodell abgebildet werden. Nach dem Stand der Technik wird meist das Chaboche-Werkstoffmodell für die zyklisch-transiente Beschreibung genutzt, da es auch in verbreiteten Softwarepaketen wie „Abaqus“ [4] implementiert ist. Darüber hinaus wird ein neues Werkstoffmodell vorgestellt.

3.1.1 Dehnungswöhlerlinie

Die Lebensdauer von Proben und Bauteilen wird ab etwa $N < 10^5$ sowohl durch elastische als auch durch plastische Verformung beeinflusst. Dabei wird der plastische Dehnungsanteil durch die Stützwirkung der elastischen Umgebung begrenzt. Dies kann nur mittels dehnungsgeregelten Wöhlerlinien an einer ungekerbten Probe abgebildet werden. [1]

Der Verlauf der Dehnungswöhlerlinie wird durch die Überlagerung der plastischen und elastischen Anteile mittels Vierparameteransatz nach Basquin [5], Coffin [6] Manson [7] und Morrow [8] beschrieben:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N)^b + \varepsilon_f' (2N)^c \quad (1)$$

3.1.2 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve

Das zyklische Spannungs-Dehnungs-Verhalten ist das Werkstoffverhalten unter zyklischer Beanspruchung und wird mathematisch nach *Ramberg-Osgood* [9] durch Addition der elastischen und plastischen Dehnungsanteile beschrieben:

$$\varepsilon_{a,t} = \varepsilon_{a,el} + \varepsilon_{a,pl} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K} \right)^{1/n} \quad (2)$$

Der elastische Dehnungsanteil wird über das Hookesche Gesetz mit dem E-Modul als Steigung angegeben. Der plastische Dehnungsanteil wird über den zyklischen Verfestigungskoeffizienten und den zyklischen Verfestigungsexponenten definiert.

3.1.3 Chaboche-Modell

Das Chaboche-Modell beschreibt das Werkstoffverhalten mit den kinematischen sowie isotropen Parametern. Die isotrope Verfestigung wird mithilfe der isotropen Variable beschrieben. Diese beschreibt das Anwachsen der Versetzungsdichte [10]:

$$R = Q \cdot \left(1 - e^{(-b \cdot \varepsilon_{pl})} \right) \quad (3)$$

Q ist hier der Sättigungswert in Form einer Spannung, b ist die dimensionslose Sättigungsrate und ε_{pl} ist die kumulierte plastische Dehnung.

Die kinematische Verfestigung wird im Chaboche mithilfe der Variable α_i beschrieben und quantifiziert das Absinken der Versetzungsdichte bei Belastungsumkehr oder Entlastung. Die Variable α_p auch Rückspannungstensor genannt, berechnet sich wie folgt [10]:

$$\alpha_i = \frac{C_i}{\gamma_i} \cdot \left(1 - e^{(-\gamma_i \cdot \varepsilon^{pl})} \right) \quad (4)$$

C_i ist hierbei die kinematische Verfestigung zu Beginn in der Dimension einer Spannung. γ_i ist eine dimensionslose Rate und beschreibt die Änderung der kinematischen Verfestigung mit zunehmender plastischer Dehnung.

Es können auch mehrere Rückspannungstensoren in einem Chaboche-Modell implementiert werden, wodurch die Möglichkeit zur Beschreibung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven steigt. Die Summe aller verwendeter Rückspannungstensoren entspricht dem gesamten Rückspannungstensor [10]:

$$\alpha_i = \sum_{m=1}^M \alpha_i^m \quad (5)$$

Die Parameter Q , b , C und γ werden unter Verwendung der beschriebenen Formeln an den dehnungsgeregelten Versuchsdaten kalibriert.

Mithilfe der ermittelten Hysteresen wird eine Lebensdauerabschätzung nach dem örtlichen Konzept unter Verwendung des Schädigungsparameters nach *Smith, Watson* und *Topper* [11] sowie der zugehörigen Schädigungsparameterwöhlerlinie durchgeführt.

3.1.4 Schädigungsabhängig-modifiziertes Werkstoffmodell

Das schädigungsabhängig modifizierte Werkstoffmodell sieht eine Kalibrierung der kinematischen Rückspannungstensoren direkt an den Hysteresen der experimentellen Untersuchung vor. Dabei werden 100 Hysteresen zwischen Beginn und technischem Anriss in gleichem Abstand aus den Versuchsdaten entnommen, um daran die Rückspannungstensoren in Abhängigkeit der Schädigung in 1 %-Schritten zu kalibrieren. Auf diese Weise wird für jeden Versuch mit spezifischer Dehnungsamplitude eine Tabelle mit kinematischen Parametern erzeugt. Das Werkstoffverhalten ist somit in Abhängigkeit der Dehnung und Schädigung in einer Datenbank hinterlegt. Während die aus dem Chaboche-Modell bekannten kinematischen Parameter zur Definition der Rückspannungstensoren genutzt werden, werden die isotropen Parameter obsolet, da das isotrope Entfestigungsverhalten implizit in der schädigungsabhängigen Definition enthalten ist.

Zum Start der Simulation nutzt das schädigungsabhängig modifizierte Werkstoffmodell zunächst die Dehnungsmaxima und -minima beziehungsweise für $R = -1$ die Dehnungsamplitude als Eingangsgröße. Die Simulation der ersten Hystereseschleife wird mithilfe der Parameter bei 0 % Schädigung aus der Tabelle der am nächsten liegenden Dehnungsamplitude durchgeführt und die aktuelle Gesamtschädigung wird mithilfe der bekannten Schädigungsparameterwöhlerlinie ermittelt. In allen weiteren Iterationen wird jeweils aus der Tabelle das Parameterset der aktuellen Schädigung entnommen und die Hysteresesimulation durchgeführt, bis eine Schädigung der theoretischen Schadenssumme von $D_{th} = 1$ entsprechend erreicht ist. Das Vorgehen des schädigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodells ist schematisch in **Bild 5** dargestellt.

3.2 Lebensdauerabschätzung unter Verwendung des örtlichen Konzepts

Beim örtlichen Konzept wird die Beanspruchung im Kerbgrund eines Bauteils betrachtet, da hier infolge der höchsten Beanspruchung das Versagen erwartet wird. Die Vorstellung ist, dass das Werkstoffverhalten im Kerbgrund durch eine dort gedachte ungekerbte Werkstoffprobe unter Axialbelastung beschrieben werden kann. [1]

Die Beanspruchung im Kerbgrund wird mithilfe des zyklischen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens beschrieben und mit der Beanspruchbarkeit verglichen, welche aus den Dehnungswöhlerlinien hervorgeht [12]. Die Dehnungswöhlerlinien können in Schädigungsparameterwöhlerlinien umgerechnet werden, sodass eine lineare Schadensakkumulation durchgeführt werden kann. Auf diese Weise wird auf die ertragbaren Schwingspiele bis zum Anriss geschlossen. [1]

3.2.1 Berücksichtigung weiterer Einflüsse der Betriebsfestigkeit bei den gekerbten Proben

Charakteristika des Werkstoffverhaltens von EN AW-1050A H24 sind die Plastifizierung des Werkstoffs und dessen sehr flache Steigung der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurve im plastischen Bereich. Dieses Verhalten führt bereits bei geringen Spannungsunterschieden zu großen Dehnungsabweichungen. Da sowohl Spannung als auch Dehnung in den verwendeten Schädigungsparameter einfließen, sind signifikante Abweichungen bei

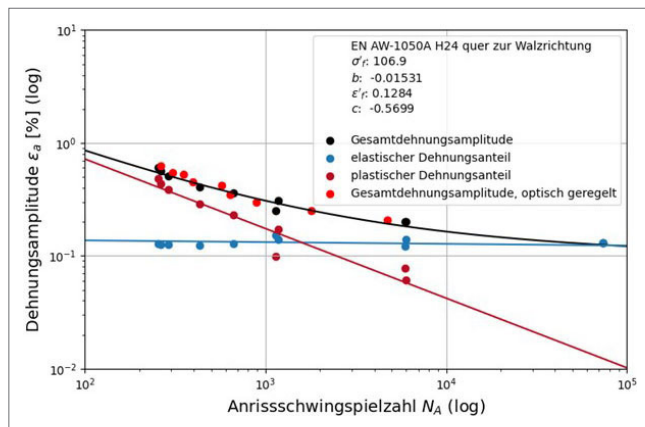


Bild 7 Dehnungswöhlerlinie der quer zur Walzrichtung entnommenen ungekerbten Flachproben. Grafik: Fraunhofer LBF

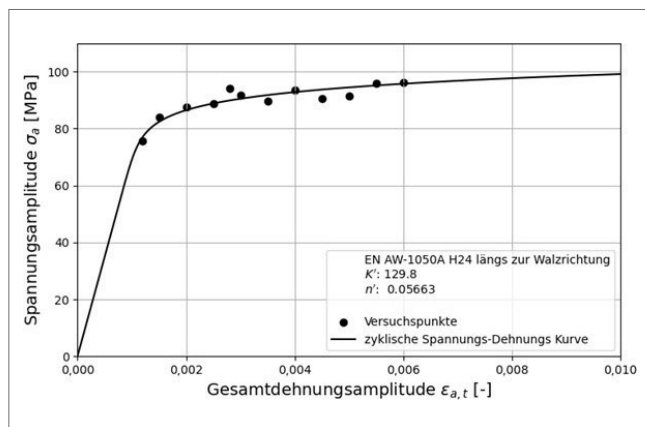


Bild 8 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Ramberg-Osgood [9] der längs zur Walzrichtung entnommenen ungekerbten Flachproben. Grafik: Fraunhofer LBF

der Lebensdauerabschätzung zu erwarten, wenn die Spannung und die zugehörige Dehnung nicht präzise ermittelt werden.

Bei einer ersten Lebensdauerabschätzung von gekerbten Proben wurde eine deutliche Überschätzung der Dehnungsamplituden und somit eine Unterschätzung der Lebensdauer festgestellt. Ein möglicher Grund sind die bisher nicht vollumfänglich betrachteten Stützwirkungseffekte. Während durch die elastisch-plastische FE-Simulation bereits die Makrostützwirkung implementiert ist, bleibt die Mikrostützwirkung bisher unberücksichtigt und wirkt sich trotz geringer Spannungsreduktion durch die Stützeffekte signifikant auf die Lebensdauerabschätzung aus.

Zur Implementierung der Mikrostützwirkung in das schädigungsabhängig modifizierte Werkstoffmodell wird der Spannungsmittelungsansatz nach *Neuber* [13] angewandt. Diese elastizitätstheoretischen Grundlagen müssen neben der elastisch-plastischen FE-Simulation berücksichtigt werden. Hierfür wird die Ersatzstrukturlänge nach *Neuber* über den Spannungsgradienten aus der linear-elastischen Simulation bestimmt, um dann in der elastisch-plastischen Simulation die Spannungen in den Knoten entlang der Ersatzstrukturlänge zu mitteln. Auf diese Weise ist die Spannung im Kerbgrund unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung bekannt.

Um die Dehnung im Kerbgrund unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung zu berechnen, wird auf den Ansatz nach *Bosch et al.* [14] zurückgegriffen. Zunächst wird die elastisch-plastische Dehnungsschwingweite ohne Mikrostützwirkung am Maximum berechnet, wobei in erster Hauptachsenrichtung für Zug und in dritter Hauptachsenrichtung für Druck ausgewertet wird:

$$\Delta \varepsilon_{ZD} = \varepsilon_{1,Z} - \varepsilon_{3,D} \quad (6)$$

Zusätzlich wird mithilfe der maximalen und gemittelten Spannungen entlang der Ersatzstrukturlänge die theoretische Dehnung nach *Ramberg-Osgood* [9] berechnet. Mithilfe dieser Werte kann eine effektive Dehnungsamplitude unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung berechnet werden [14]:

$$\varepsilon_{a,eff} = \frac{\Delta \varepsilon_{ZD}}{2} \cdot \frac{\varepsilon(\sigma_{1,avg}) - \varepsilon(\sigma_{3,avg})}{\varepsilon(\sigma_{1,max}) - \varepsilon(\sigma_{3,max})} \quad (7)$$

Die berechneten Spannungen und Dehnungen mit Mikrostützwirkung gehen in den Schädigungsparameter nach *Smith, Watson* und *Topper* [11] ein und werden so in die Lebensdauerabschätzung implementiert.

Während die Mikrostützwirkung die Beanspruchung herabsetzt, ist es alternativ möglich die Beanspruchbarkeit in der Rechnung durch das Berücksichtigen des Größeneinflusses zu erhöhen. Hierfür wird nach der FKM-Richtlinie Nichtlinear [15] eine Stützziffer wie folgt berechnet:

$$n_{\sigma} = n_{bm} \cdot n_{vm} \cdot n_{st} \quad (8)$$

Die Stützziffer wird dabei unterteilt in die bruchmechanische, versagensmechanische und statistische Stützziffer, um die verschiedenen Wirkmechanismen in der Rechnung zu berücksichtigen [15]. Die Formel der Schädigungsparameterwöhlerlinie wird mit der Stützziffer multipliziert, wodurch die Schädigungsparameterwöhlerlinie in y-Achsenrichtung verschoben wird. Dies entspricht einem Heraufsetzen der Beanspruchbarkeit und führt demnach unter Berücksichtigung der modifizierten Schädigungsparameterwöhlerlinie im Berechnungsablauf zur Abschätzung längerer Lebensdauern.

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse aus der experimentellen Untersuchung

Zur Ermittlung des zyklisch transienten Werkstoffverhaltens wurden dehnungsgeregelte Versuche an längs und quer zur Walzrichtung entnommenen Flachproben mit der in Bild 1 dargestellten Geometrie durchgeführt. Die Durchführung der experimentellen Untersuchung erfolgte entsprechend der in Kapitel 2 dargestellten Ausführungen, deren Auswertung denen aus Kapitel 3.

In Bild 6 ist die Dehnungswöhlerlinie für längs zur Walzrichtung entnommene Proben dargestellt, in **Bild 7** diejenige der Proben quer zur Walzrichtung. Es ist zunächst über drei Dekaden im Bereich von $1 \cdot 10^2 \leq N_v \leq 1 \cdot 10^5$ keine Anisotropie erkennbar. Bei der Ermittlung der Dehnungswöhlerlinie der quer entnommenen Proben war jedoch eine verstärkte Dehnungslokalisierung zu beobachten, die zu einem Anriss unter der Schneide gefolgt von

einem plötzlichen Bruch bei 13 von 23 Versuchen geführt hat. Diese Versuche sind gemäß [3] als ungültig zu werten.

In **Bild 8** und **Bild 9** sind die unter Berücksichtigung der Kompatibilität mit der jeweils zugehörigen Dehnungswöhlerlinie abgeleiteten zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven nach *Ramberg-Osgood* [9] den Versuchspunkte gegenübergestellt. Während die Versuchsergebnisse der längs entnommenen Proben gut von der theoretischen Beschreibung abgebildet werden, ist bei den Versuchen der quer entnommenen Proben ein Dehnungsmaximum bei $\varepsilon_{a,t} = 0,25\%$ zu sehen. Diese Anomalie geht auf die bereits erwähnte Dehnungslokalisierung in Verbindung mit einem dehnungsamplitudenabhängigen Entfestigungsverhalten zurück, was in [16] näher beschrieben wird.

Zur Abbildung des transienten Verhaltens ist beispielhaft für Versuch V05_e02_längs mit $\varepsilon_{a,t} = 0,2\%$ und $N_V = 6908$ Schwingspielen in **Bild 10** die Ober- und Unterlast beziehungsweise die Ober- und Unterspannung über der Schwingspielzahl aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Oberlast über die Schwingspiele hinweg kontinuierlich abnimmt und somit kein stabilisiertes Verhalten erkennbar ist. Eine sogenannte beschleunigte Abnahme ab circa 6000 Schwingspielen wird zur Ableitung des Versagenskriteriums herangezogen. Das Versagenskriterium ist definiert als 10 % Lastabfall gegenüber dem Ende des (ersten) linearen Bereichs.

Für das Ziel der präzisen Beschreibung des Werkstoffverhaltens im FE-Modell über ein Werkstoffmodell ergeben sich folglich zwei Herausforderungen:

- Mit Blick auf die zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven ist zwar eine geringe Steigung im plastischen Bereich erkennbar. Jedoch führt eine geringe Abweichung in der Spannungsermittlung zu einem signifikanten Einfluss auf die Dehnungsamplitude. Da sowohl die Spannungs- als auch die Dehnungsamplitude in den verwendeten Schädigungsparameter P_{SWT} nach *Smith, Watson und Topper* [11] eingehen, liegt darin eine Fehlerquelle mit nicht zu vernachlässigendem Einfluss.
- Die erwähnte Beobachtung des nicht Vorhandenseins eines stabilisierenden Bereichs führt zu Abweichungen, da das Werkstoffverhalten bei 50 % der Anrisschwingspielzahl als über der Lebensdauer hinweg konstant angenommen wird und auf dieser Grundlage eine Lebensdauerabschätzung durchgeführt wird. Diese Annahme ist eine noch deutlichere Vereinfachung, wenn, wie im vorliegenden Fall, keine vorübergehende Stabilisierung eintritt. Auch das Chaboche-Modell stößt hier an Grenzen, da die isotrope Entfestigung mithilfe einer Exponentialfunktion definiert wird, die in Richtung eines Amplitudenwerts und somit einer Stabilisierung des Werkstoffverhaltens strebt.

4.2 Ergebnisse aus der Beschreibung des Werkstoffverhaltens und der Lebensdauerabschätzung

Das Chaboche-Modell geht von einem stabilisierenden Werkstoffverhalten aus und ist, wie im Folgenden gezeigt wird, nicht in der Lage das Werkstoffverhalten von EN AW-1050A H24 zufriedenstellend abzubilden. Ein weiterentwickeltes Werkstoffmodell wird eingeführt und mit dem Chaboche-Modell verglichen. Abschließend wird der Einfluss der verbesserten Werkstoffbeschreibung auf die Lebensdauerabschätzung an den ungekerbten Proben gezeigt und das Vorgehen wird an gekerbten Proben validiert.

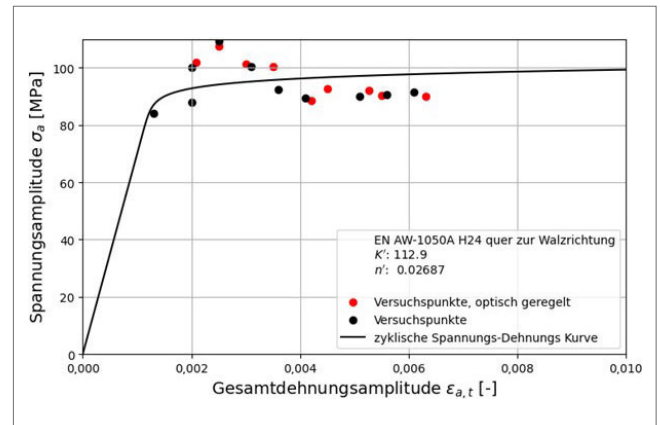


Bild 9 Zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve nach Ramberg-Osgood [9] der quer zur Walzrichtung entnommenen ungekerbten Flachproben. Grafik: Fraunhofer LBF

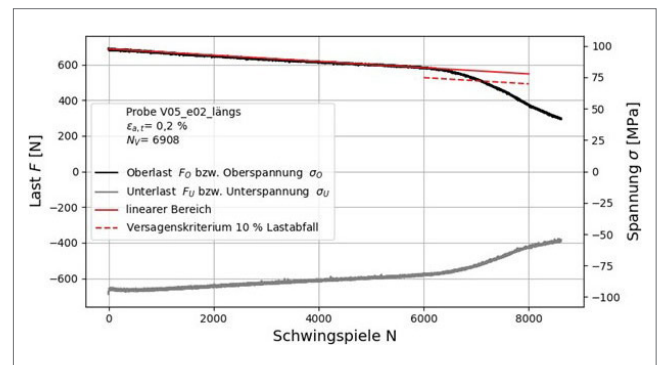


Bild 10 Zyklische Entfestigung über die Lebensdauer. Grafik: Fraunhofer LBF

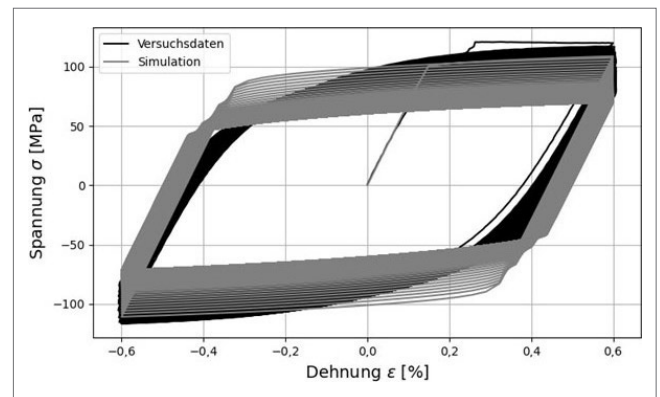


Bild 11 Vergleich der Hysteresen aus dem Versuch V02_e06_längs bei $\varepsilon_{a,t} = 0,6\%$ mit den Hysteresen des Chaboche-Modells.

Grafik: Fraunhofer LBF

4.2.1 Ergebnisse aus der Beschreibung des Werkstoffverhaltens mittels Chaboche-Modells

In **Bild 11** sind neben den Hysteresen aus dem Versuch bei 0,6 % Dehnung auch die Hysteresen aus der Simulation mit dem Chaboche-Modell zu sehen. Im Folgenden wird der Grund für den Unterschied zwischen Versuchs- und Simulationsdaten anhand des Vorgehens beim Kalibrieren der Chaboche-Parameter beschrieben.

Es ist erkennbar, dass vor allem im elastisch-plastischen Übergang keine Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Simulati-

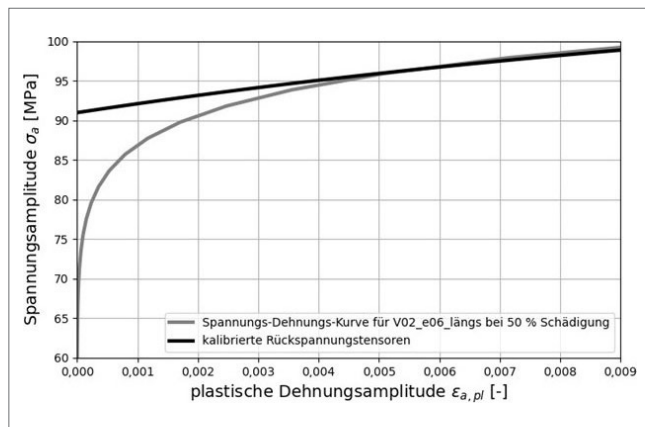


Bild 12 Kalibrieren der Rückspannungstensen an der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Versuchs V02_e06 bei einer Schädigung von 50 %. Grafik: Fraunhofer LBF

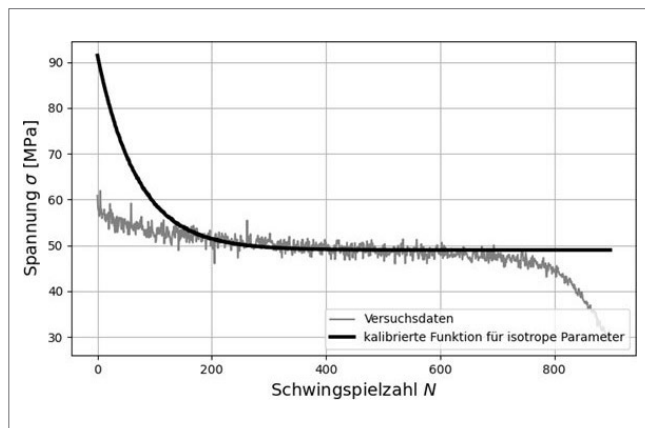


Bild 13 Kalibrieren der isotropen Parameter für V01_e04_längs mit einer Gesamtdehnung von $\varepsilon_{a,t} = 0,4\%$ an dem Verlauf der Spannung bei 0 % plastischer Dehnung über der Schwingungszahl. Grafik: Fraunhofer LBF

onsdaten vorliegt. Darüber hinaus ist mit Blick auf die Maximalwerte an den Umkehrpunkten der Hysteresen zu erkennen, dass das Chaboche-Modell von Anfang an die Spannungsamplituden unterschätzt. Diese Diskrepanz verstärkt sich mit zunehmender Schwingungszahl, da das Chaboche-Modell über die kumulierte plastische Dehnung hinweg kontinuierlich entfestigt, sodass der Großteil der Hysteresen im als stabilisiert angenommenen Bereich liegt.

Der Grund für die verringerte Übereinstimmung kann anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Formeln und deren graphische Repräsentation erklärt werden. In **Bild 12** ist daher die zyklische Spannungs-Dehnungs-Kurve für die plastischen Dehnungsamplitude aus den Versuchsdaten der kalibrierten Rückspannungstensen, definiert durch die kinematischen Parameter, gegenübergestellt.

Während die Übereinstimmung oberhalb einer plastischen Dehnungsamplitude von 0,5 % gut ist, spiegeln die Rückspannungstensen darunter das Werkstoffverhalten unzureichend ab, da als Randbedingung im Chaboche-Modell bei $x = 0$, das bedeutet bei $\varepsilon_{a,pl} = 0\%$, die zyklische Streckgrenze angesetzt wird. Diese geringe Übereinstimmung spiegelt sich in den simulierten Hysteresen im elastisch-plastischen Bereich wider, da die kinematischen Parameter für die Definition der Hysteresenform verantwortlich sind.

In **Bild 13** sind die kalibrierte Funktion für die isotropen Parameter sowie die korrespondierenden Versuchsdaten dargestellt, die in der dargestellten Form die Spannung über der kumulierten plastischen Dehnung beziehungsweise der Schwingungszahl aufträgt.

Auch hier ist die Randbedingung der Start bei der zyklischen Streckgrenze σ_0 von 91 MPa. Infolgedessen wird in der Simulation ein ausgeprägtes Entfestigungsverhalten während der ersten Schwingungsbereiche berechnet, welches dann in ein annähernd stabilisiertes Werkstoffverhalten übergeht. Folglich sind die Randbedingungen des Chaboche-Modells der Grund für das inadäquate Darstellen des realen Werkstoffverhaltens.

Trotz der Probleme, die mit der Startbedingung bei der zyklischen Streckgrenze von 91 MPa einhergehen, stellt es keine Lösung dar anstelle dieser einen deutlich geringeren Startwert und infolgedessen einen pro Schwingungsbereich geringeren, aber sich über eine größere Anzahl an Schwingungsbereichen ziehende Entfestigung zu beginnen. Der Grund hierfür ist, dass die Differenz zwischen dem Startwert σ_0 und der Spannung im angenommenen stabilisierten Bereich gleich dem Parameter Q ist und die zyklische Entfestigung an den Eckpunkten der Hysteresen darstellt.

4.2.2 Ergebnisse aus der Beschreibung des Werkstoffverhaltens mittels schädigungsabhängig modifiziertem Werkstoffmodell

In **Bild 14** ist ein Vergleich der Hysteresen aus dem Versuch und aus der Simulation mit dem schädigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodell dargestellt.

Im Vergleich mit den Hysteresen des Chaboche-Modells ist Form und Lage der Hysteresen des schädigungsabhängig modifizierten Modells in deutlich besserer Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Auch wenn die Form der Hysteresen in guter Übereinstimmung mit den Versuchsdaten sind, ist wie beim Chaboche-Modell der elastisch-plastische Übergang der Bereich der größten Abweichung. Mit Blick auf die Lebensdauerabschätzung auf Grundlage des örtlichen Konzepts mit dem Schädigungsparameter P_{SWT} nach Smith, Watson und Topper [11] ist vor allem aber die korrekte Lage der maximalen Umkehrpunkte wichtig. Diese werden mithilfe des neu entwickelten Werkstoffmodells in Bezug auf ihre maximalen Spannungen treffend abgebildet. Während die Spannungsmaxima im Experiment bei 120 MPa startend bis 78 MPa bei Anriss abfallen, starten die Spannungsmaxima der Simulation ebenfalls bei 120 MPa, enden aber bei 86 MPa. Dies erscheint aber vernachlässigbar, weil der Abfall von 86 MPa auf 78 MPa im Experiment nur in den letzten 10 Schwingungsbereichen vor Anriss entsteht. Folglich bietet das Werkstoffmodell eine gute Grundlage für die Lebensdauerabschätzung.

Diese Verbesserungen werden durch die schädigungsabhängige Kalibrierung der kinematischen Parameter erreicht. Während im Chaboche-Modell die kinematischen und isotropen Parameter über die Randbedingung, dass σ_0 der zyklischen Streckgrenze entspricht, verknüpft sind und darüber die Gesamtentfestigung quantifiziert wird, wird diese wechselseitige Abhängigkeit im schädigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodell aufgelöst. Die kinematischen Parameter werden ohne strenge Beachtung dieser Randbedingung so kalibriert, dass sie die Form der experimentell ermittelten Hysteresen möglichst präzise abbilden. Die isotrope Entfestigung wird durch die schädigungsabhängige Kalibrierung der Hysteresen direkt an den Versuchsdaten bestimmt,

sodass keine Vereinfachung in Form einer angenommenen Funktion hinterlegt ist. Der Grund hierfür ist, dass das isotrope Werkstoffverhalten implizit in den schadigungsabhängigen kinematischen Parametern enthalten ist und keine isotropen Parameter mehr nötig sind. Auf diese Weise kann das Werkstoffverhalten automatisiert mit einer deutlich größeren Anzahl an Parametern präziser an die Versuchsdaten angepasst werden, wodurch eine sehr viel größere Flexibilität in der Werkstoffbeschreibung folgt.

4.2.3 Ergebnisse der Lebensdauerabschätzung an ungekerbten Proben

Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 erwähnt, ist ein präzises Abbilden der Umkehrpunkte der Hysteresen von grundlegender Bedeutung für die Lebensdauerabschätzung, da diese Punkte in Form der Spannungs- und Dehnungsamplituden beziehungsweise der Oberspannung (ergänzt um den Elastizitätsmodul) in den Schädigungsparameter nach *Smith, Watson, Topper* eingehen.

Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass das Chaboche-Modell die Lebensdauer unterschätzt, weil die Spannungsamplituden zu niedrig berechnet werden und infolgedessen der ermittelte Schädigungsparameter unter dem Wert aus der experimentellen Ermittlung liegt. Gleichzeitig liefert die Lebensdauerabschätzung mithilfe des schadigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodells deutlich präzisere Ergebnisse, da alle Werte, die in den Schädigungsparameter eingehen, in der Simulation ausreichend gut abgebildet werden.

Mit Blick auf **Bild 15** erweisen sich diese Vorüberlegungen als bestätigt. Während die Berechnungen auf Grundlage des Chaboche-Modells systematisch im unsicheren Bereich liegen, führen die Berechnungen mit den Hysteresen aus dem schadigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodell zu einer guten Abschätzung der Lebensdauer mit sehr geringen Abweichungen.

4.2.4 Ergebnisse der Lebensdauerabschätzung an gekerbten Proben

In **Bild 16** sind die Lebensdauern dargestellt, welche für das Chaboche-Modell ohne Größeneinfluss oder Mikrostützwirkung berechnet wurden und für das schadigungsabhängig modifizierte Werkstoffmodell sowohl ohne Berücksichtigung dieser Einflüsse, als auch unter Berücksichtigung des Größeneinflusses und der Mikrostützwirkung.

Während ohne Berücksichtigung der Mikrostützwirkung beziehungsweise des Größeneinflusses die Lebensdauer deutlich unterschätzt wird, treffen die Berechnungsergebnisse mit Mikrostützwirkung gut die experimentell ermittelten Lebensdauern. Auch die Abschätzung mit dem Größeneinfluss führt zu einer Verbesserung gegenüber den Berechnungen ohne Berücksichtigung dieser Effekte, liegen allerdings weiterhin deutlich auf der sicheren Seite und sind daher weniger präzise als die Berechnungen unter Berücksichtigung der Mikrostützwirkung.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchungen wurde zunächst das zyklische Werkstoffverhalten von EN AW-1050A H24 ermittelt. Insbesondere wurde auf die zyklisch-transiente Entfestigung ohne Stabilisierung sowie auf den sehr flachen Verlauf der zyklischen Spannungs-Dehnungs-Kurven im plastischen Bereich eingegangen und

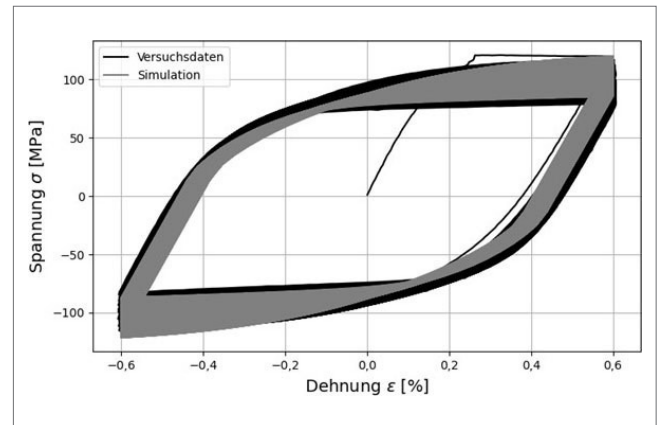


Bild 14 Vergleich der Hysteresen aus dem Versuch V02_e06_längs bei $\varepsilon_{a,T} = 0,6 \%$ mit den Hysteresen des schadigungsabhängig modifizierten Werkstoffmodells. Grafik: Fraunhofer LBF

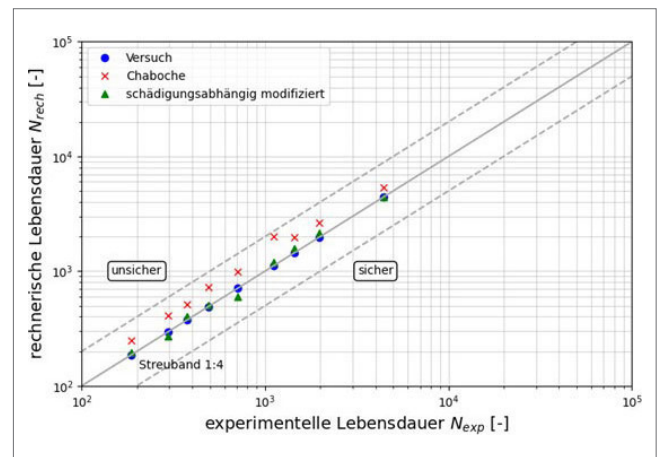


Bild 15 Vergleich der rechnerischen und der experimentellen Lebensdauern der ungekerbten Proben. Grafik: Fraunhofer LBF

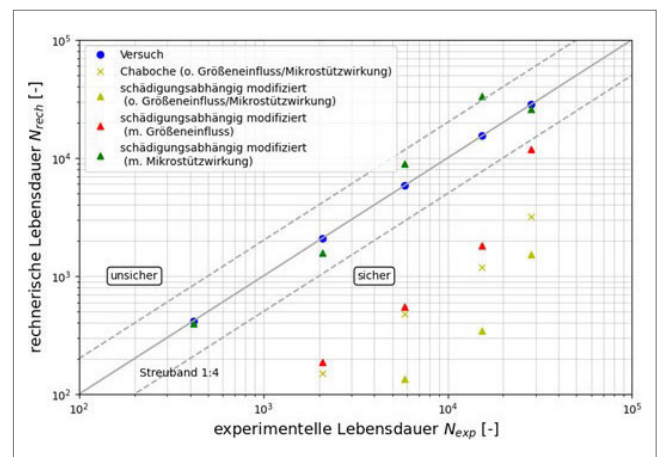


Bild 16 Vergleich der rechnerischen und der experimentellen Lebensdauern der gekerbten Proben mit einer Formzahl von $K_t = 2,1$. Grafik: Fraunhofer LBF

in diesem Zusammenhang die sich ergebenden Herausforderungen dargelegt.

Im experimentellen Teil der Arbeit wurde gezeigt, dass die Schneiden der taktilen Aufsetzextensometer bei einem weichen Werkstoff wie EN AW-1050A H24 zu einer Vorschädigung

führen, wodurch ein großer Teil der Versuche ungültig zu werten ist beziehungsweise wodurch das zyklische Werkstoffverhalten fehlerhaft beschrieben würde. Um dieses Risiko auszuschließen, wurde die Verwendung eines optischen Dehnungsmess- und -regelsystems untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Messung mit dem optischen System nur geringfügig von der Messung mit taktilen Aufsetzextensometer abweicht und zugleich zu einer deutlichen Reduktion der Anzahl ungültiger Versuche führt.

Herausforderungen zeigen sich neben den experimentellen Arbeiten auch im Modellieren des Werkstoffverhaltens. Das in der FE-Anwendung weit verbreitete Chaboche-Modell hat zur Randbedingung, dass sich das Werkstoffverhalten stets stabilisieren muss. Es wurde gezeigt, dass der fehlende stabilisierende Bereich eine unzureichende Kalibrierung der isotropen sowie kinematischen Parameter zur Folge hat, maßgeblich getrieben durch die Randbedingung des Startwerts bei der zyklischen Streckgrenze.

Zur Lösung dieser Herausforderungen wurde ein neues Werkstoffmodell eingeführt, welches unter Verwendung von schädigungsabhängig kalibrierten kinematischen Parametern das Werkstoffverhalten abhängig von der Schädigung beziehungsweise Schwingungszahl, das heißt Hysterese für Hysterese, simuliert und dabei eine deutlich verbesserte Werkstoffbeschreibung gegenüber dem Chaboche-Modell erzielt. Weiterführend konnte gezeigt werden, dass sich die verbesserte Werkstoffbeschreibung direkt positiv auf die Güte der Lebensdauerabschätzung auswirkt.

Die Zellverbinder, für die EN AW-1050A H24 genutzt wird, werden an einigen Stellen verprägt und mittels Laserschweißnähten gefügt. Für zukünftige Untersuchungen ist die Bewertung der geprägten Bereiche sowie der Schweißnähte von weiterführendem Interesse. Der Einfluss der Prägungen kann näherungsweise mit der Untersuchung von weiteren Werkstoffzuständen wie H26 und H28 quantifiziert werden, da diese gegenüber H24 weiter abgewalzt wurden. Zur Untersuchung der Schweißnähte müssen die vom Fertigungsverfahren abhängigen Schweißnahtgeometrien sowie Schweißprozessparameter bekannt sein und unterschiedlichen Varianten gegenübergestellt und bewertet werden, um Optimierungspotenziale bezüglich der Schwingfestigkeit ableiten zu können.

LITERATUR

- [1] Radaj, D.; Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2007
- [2] Stahlinstitut: SEP1240. Prüf- und Dokumentationsrichtlinie für die experimentelle Ermittlung mechanischer Kennwerte von Feiblechen aus Stahl für die CAE-Berechnung. 2006
- [3] VDA Recommendation 239-300: Experimental Determination of Mechanical Properties of Aluminum Sheets for CAE-Calculation – Testing and Documentation, February 2021 (2021)
- [4] Dassault Systèmes Simulia Corp.: SIMULIA User Assistance 2022. 2022
- [5] Basquin, O. H.: The exponential law of endurance tests. Proc. ASTM 10 (1910) 2, S. 625–630
- [6] Coffin, L. F.: A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers (1954), S. 931–950
- [7] Manson, S. S.: Fatigue: a complex subject - some simple approximations. Experimental mechanics 7 (1965) 5, S. 193–226
- [8] Morrow, J. D.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. Internal friction, damping, and cyclic plasticity, ASTM International (1965) 378, S. 45–87
- [9] Ramberg, W.; Osgood, W. R.: Description of stress-strain curves by three parameters. NACA Technical Note 902 (1943), S. 23–41
- [10] Chaboche, J. L.: Time-Independent Constitutive Theories For Cyclic Plasticity. International Journal of Plasticity 2 (1986) 2, S. 149–188
- [11] Smith, K. N.; Watson, P.; Topper, T. H.: A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. Journal of materials 5 (1970) 4, S. 767–778
- [12] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit. Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2006
- [13] Neuber, H.: Theory of Stress Concentration for Shear-Strained Prismatical Bodies with Arbitrary Nonlinear Stress-Strain Law. Journal of Applied Mechanics 12 (1961), S. 544–552
- [14] Bosch, A.; u.a.: Ermüdungsnachweis für unbearbeitete und nachbearbeitete Schweißverbindungen einschließlich thermozyklische, elastisch-plastische Beanspruchungen. 2014
- [15] Forschungskuratorium Maschinenbau: Richtlinie Nichtlinear. Rechnerischer Bauteilfestigkeitsnachweis unter expliziter Erfassung nichtlinearen Werkstoff-Verformungsverhaltens. Frankfurt: Forschungskuratorium Maschinenbau 2012
- [16] Korschinsky, T.; u.a.: Analysis of the Anisotropic Cyclic Material Behavior of EN AW-1050A H24 derived from strain-controlled testing using clip-on extensometer and an optical system. Crystals 14 (2024) 8, 686

Tim Korschinsky, M.Sc. 

Dr.-Ing. Benjamin Möller 

Marvin Kiel, M.Sc. 

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit
und Systemzuverlässigkeit LBF
Bartningstr. 47, 64289 Darmstadt
www.lbf.fraunhofer.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)