

# Ultraschallermüdungsprüfung zur Charakterisierung des Verhaltens von Aluminiumschweißverbindungen bei sehr hohen Lastspielzahlen (VHCF)

## Characterisation of Fatigue Behaviour of Welded Aluminium Alloy Joints at Very High Cycles by Means of Ultrasonic Fatigue Testing System

M. Cremer, M. Zimmermann, H.-J. Christ  
Institut für Werkstofftechnik, Universität Siegen

**Kurzfassung** – Der unveränderlich steigende Bedarf nach effizientem Leichtbau erfordert den Einsatz moderner Werkstoffe bei immer höheren Lastspielzahlen. Infolgedessen kann mit konventioneller Schwingprüftechnik dieser Bereich nicht mehr in einem vertretbaren Zeitrahmen untersucht werden, weshalb ein neuartiges Ultraschallverfahren zum Einsatz kommt. Mittels Frequenzgenerator werden sinusförmige Hochfrequenzsignale erzeugt und durch einen piezoelektrischen Wandler in eine mechanische Vibration transformiert, welche bei einem konventionellen System die einseitig eingespannte Probe mit ca. 18 bis 22 kHz bei konstanter Amplitude in Form einer symmetrischen Zug-Druckbeanspruchung ( $R = -1$ ) schwingen lässt. Das speziell für die Universität Siegen entworfene Ultraschall-Prüfsystem verfügt über einen mittels Elektromotor und Spindeltrieb arbeitenden Lastrahmen, der sowohl als Aufnahme für die Ultraschallgeneratoreinheit als auch als Einspannung für die Ermüdungsprobe dient. Mit Hilfe dieser Einspannung und der durch den Rahmen erzeugten Vorlast können zukünftig auch VHCF-Versuche im Zugschwellbereich durchgeführt werden. Am Beispiel von Aluminiumschweißverbindungen werden erste Ergebnisse zum VHCF-Verhalten vorgestellt, die zukünftig mit Versuchen bei schwelender Versuchsführung zu vergleichen sind. Hierbei bietet das Ultraschallprüfsystem u.a. die Möglichkeit, Beanspruchungszustände ähnlich einer der äußeren zyklischen Belastung überlagerten Schweißnahteigenspannung zu simulieren.

**Stichwörter:** Aluminiumschweißverbindung, Very High Cycle Fatigue, Ultraschallermüdungsprüfsystem

**Abstract** – The ever increasing need for efficient lightweight structures, requires the use of modern materials up to higher and higher load cycles. By means of conventional fatigue testing systems, these very high load cycles cannot be reached in an adequate time slot, hence a novel ultrasonic fatigue testing method is used. By means of a frequency generator a sinusoidal high-frequency signal is generated which is transformed into a mechanical vibration using a piezoelectric transducer. A conventional ultrasonic fatigue system works with testing frequencies of about 18 to 22 kHz with constant load amplitude and a load ratio  $R = -1$ . The ultrasonic system at the University of Siegen is carried from a load frame which generates the needed preload for fatigue test with a variable load amplitude. First results of fatigue tests up to the very high cycle region are presented in this paper. In this case, a welded aluminium alloy joint serves as an example. The stress conditions produced by means of the ultrasonic fatigue testing system and the load frame could simulate the superimposed residual stresses in the weld seam.

**Keywords:** Welded aluminium alloy joints, Very High Cycle Fatigue, ultrasonic fatigue testing system

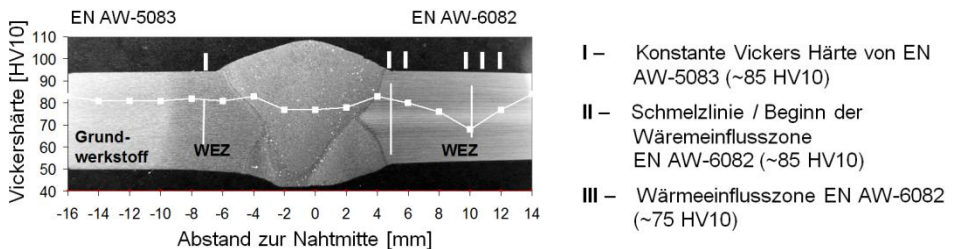
## 1 Einleitung

Die aktuellen Forderungen nach immer effizienteren, sicheren und gewichtsoptimierten zyklisch belasteten Bauteilen in verschiedensten Anwendungsfeldern stellen die Forschung und Entwicklung und speziell die Prüftechnik vor neue Aufgaben. Mit steigender auszulegender Zyklenzahl ab  $10^7$ , dem sogenannten Very High Cycle Fatigue (VHCF) Bereich, ist mit konventionellen Prüfsystemen eine angemessene Prüfdauer nicht mehr realisierbar. Da die meisten servohydraulischen Systeme für den konventionellen Lastspielzahlbereich ( $N < 10^7$ ) üblicherweise mit niedrigen Frequenzen um ca. 10 Hz betrieben werden, würde das Testen einer VHCF-Probe mehrere Wochen in Anspruch nehmen. Auch mit Maschinen mit relativ hohen Prüffrequenzen bis 200 Hz, die für Zyklenbereiche bis max.  $10^7$  Lastwechsel eingesetzt werden, dauern Versuche 14 Stunden. Servohydraulische Hochfrequenz-Ermüdungsprüfmaschinen mit einer maximal realisierbaren Prüffrequenz von 1 kHz stellen für den VHCF-Bereich eine vertretbare Alternative dar. Die erst in jüngerer Zeit einem breiteren Anwenderkreis zur Verfügung stehende Ultraschallermüdungsprüftechnik ermöglicht den

ersten experimentellen Zugang zum VHCF-Bereich in einem zeitlich vertretbaren Rahmen. Vorreiter auf diesem Gebiet sind zum einen die Forschungsgruppe um Stanzi-Tschegg und Mayer [1, 2, 3] in Wien und zum anderen die Gruppe um Bathias [4] in Paris. Bei diesen Systemen, welche in erster Linie mit einer einseitig frei schwingenden Probe und somit mit einem Spannungsverhältnis von  $R = -1$  arbeiten und die zwischenzeitlich für verschiedene Belastungsarten erweitert wurden (z.B. Reibermüdung, Torsion), wird mittels piezoelektrischem Generator die Probe zu Resonanzschwingungen bei ca. 20 kHz angeregt. In diesem Artikel wird eine Erweiterung dieses Prüfsystems mittels externem Lastrahmen beschrieben, mit dem auch schwellige Belastungsfälle getestet werden können. Am Beispiel der Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens einer Aluminiumschweißverbindung wird der Einsatz dieser neuartigen Prüftechnik zunächst für eine rein wechselnde Beanspruchung präsentiert.

## 2 Versuchsstrategie zur Charakterisierung des VHCF-Verhaltens von Aluminiumschweißverbindungen

Das Ermüdungsverhalten von Schweißverbindungen hängt von einer Vielzahl von Parametern und Einflüssen ab, wie beispielsweise der Geometrie, der Mikrostruktur in den verschiedenen Werkstoffbereichen und der prozessbedingten Defekte in der Naht. Letztere reichen von Poren, Heißrissen, mangelnden Durchschweißungen, Bindefehlern bis hin zu Einbrandkerben. Ein Resultat aus dieser Vielzahl an Einflussfaktoren ist, wie erste Versuchsergebnisse zeigen, insbesondere im VHCF-Bereich eine außergewöhnlich große Streuung der Versuchsergebnisse, die eine Interpretation und eine genaue Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens unmöglich machen. Speziell in Lastspielzahlbereichen ab  $10^7$ , bei kleinen Lastamplituden und global linear-elastischer Beanspruchung zeigen bereits konventionelle, quasi defektfreie Materialproben eine große Streuung. Um die Vielzahl an Einflussfaktoren differenziert betrachten zu können, wird eine Separation dieser Parameter angestrebt. Ein erster Schritt hierbei ist die genaue und systematische Charakterisierung der Mikrostruktur der Schweißnaht. Durch die im MIG-Schweißprozess eingebrachte Wärme, die senkrecht zur Naht stark variiert, entsteht in der sogenannten Wärmeeinflusszone eine sehr inhomogene Mikrostruktur. Ein erstes Merkmal hierfür ist die entlang des Querschliffs einer artfremd verschweißten Aluminiumverbindung variierende Härte, siehe hierzu **Bild 1**.



**Bild 1:** Mikrohärteverlauf über einer artfremd verschweißten Naht aus EN AW-5083 und EN AW-6082

**Figure 1:** Vickers hardness of a weld seam out of EN AW-6082 and EN AW-5083 (hybrid)

Mit Hilfe des Härteverlaufs lassen sich die charakteristischen Bereiche I bis III bestimmen (**Bild 1**) sowie den vierten Zustand des EN AW-6082 Grundwerkstoffes (hier nicht dargestellt). Um diese unterschiedlichen Härten in repräsentativen (nicht geschweißten) Proben herzustellen, wurden die nachfolgend vorgestellten Wärmebehandlungsschritte aufgestellt. Die genauen Parameter des Glühvorgangs, des Auslagerns und des Überalterns sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

**Tabelle 1:** Abgeleitete Wärmebehandlungsvorschrift zur Herstellung der gemessenen Härten aus der Schweißnaht in repräsentativen Proben

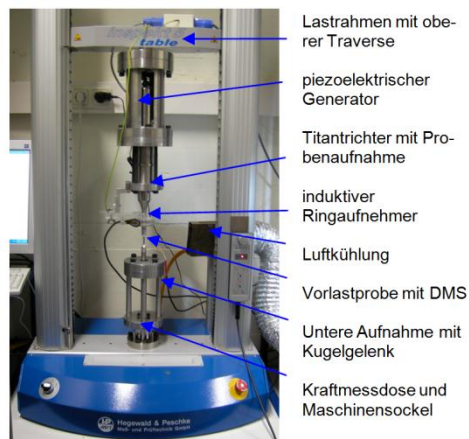
**Table 1:** Heat treatment parameters for manufacture of artificial samples with equal Vickers hardness compare to weld seam

	EN AW-5083	EN AW-6082		
	I - WEZ	II - Schmelzlinie	III - WEZ	IV- Grundwerkstoff
Glühen	340°C – 120 min	540 °C –60 min	540°C – 60 min	540 °C – 60 min
Aushärten	-	200 °C –60 min	200°C – 60 min	200 °C – 60 min
Überaltern	-	360 °C – 7 min	360 °C – 11 min	-

Die aufgrund der konzentrierten Wärmeeinbringung in der Schweißnaht eingebrachten Eigenspannungen sollen im weiteren Verlauf der Untersuchung als Mittelspannungseffekt erfasst werden. Einen Ansatz bzw. Vorschlag hierzu liefern Radaj und Sonsino [5]. Um den Einfluss und die Höhe dieser Mittelspannung zu prüfen und zu charakterisieren, ist die Verwendung einer Variation des R-Wertes bei den zukünftigen Versuchen erforderlich.

### 3 Versuchsaufbau und Probenherstellung

Der prinzipielle Versuchsaufbau des Ultraschallsystems ist in **Bild 2** dargestellt. Der äußere Lastrahmen inspekt table 5 der Firma Hegewald&Peschke dient dazu, die einzelnen Komponenten des Ultraschallsystems aufzunehmen. Der Lastrahmen verfügt über einen in der Höhe erweiterten Arbeitsraum von insgesamt 420 mm und wird durch zwei spielfreie Kugelumlaufspindeln und einen AC-Servomotor mit einer maximalen Kraft von 5 kN angetrieben.

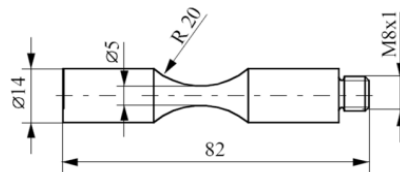


**Bild 2:** Vorlastrahmen mit integriertem Ultraschallprüfsystem zur Prüfung von wechselnder und schwellonder Belastung

**Figure 2:** Load frame with ultrasonic fatigue testing system for tests with constant and variable load amplitude

Die obere Traverse dient als erster Anbindungspunkt des piezoelektrischen Generators, der seine Energie in Form einer stehenden Welle über den Titantrichter in die Ermüdungsprobe abgibt. Der induktive Ringaufnehmer an der Position der Probenaufnahme nimmt ein „Feedback-Signal“ auf und gibt es an die Mess- und Regelungseinheit des Systems weiter, was seinerseits den Abgleich mit dem „Command-Signal“ des Verstärkers ermöglicht und somit einen geschlossenen Regelkreis sicherstellt. Somit können Resonanzfrequenz und Amplitude für die jeweilige Probengeometrie, den Werkstoff und die gewünschte

Spannungsamplitude geregelt werden. Die Beanspruchungsamplitude wird mit Hilfe eines zuvor auf der Prüflänge der Probe applizierten Dehnungsmessstreifens (DMS) gemessen und ebenfalls in der Messeinrichtung dargestellt. Benötigte Vorlasten werden mit Hilfe des Lastrahmens und einer separaten Ansteuereinheit aufgebracht und mit der zwischen der unteren Probenaufnahme mit Kugelgelenk und dem Maschinensockel installierten Kraftmessdose des Typs U3 der Firma H&M (mit einem Nennkraftbereich von 0,5 bis 5 kN) aufgenommen. Für Versuche mit symmetrisch wechselnder Beanspruchung werden die Proben (**Bild 3**) nur an der oberen Probenaufnahme angeschraubt. Der untere Teil der Probe kann in diesem Fall frei schwingen. Der wellenförmige Verlauf der Beanspruchungsamplitude über der Probenlängsachse mit einer maximalen Dehnungs- bzw. Spannungsamplitude im Kerndurchmesser ermöglicht in der gegebenen Versuchseinrichtung die separierte Prüfung einzelner Schweißnahtzonen bei R-Werten im Wechsel- als auch Zugschwellbereich. Abgeleitet von den Eigenspannungen in Schweißnähten sind Versuche mit R-Werten von 0 und 0,5 geplant.



**Bild 3:** Ultraschallprobenform für wechselnde Belastungen  
**Figure 3:** Ultrasonic fatigue sample for tests with a load ratio of  $R = -1$

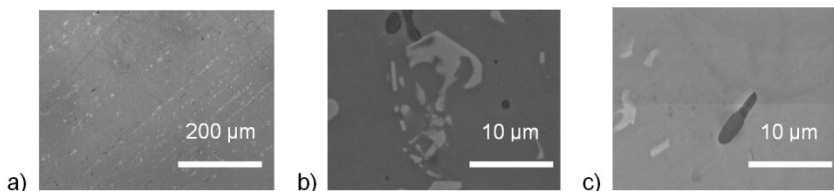
Für die erste durchgeführte Versuchsreihe wurde die Probenform in **Bild 3a** verwendet. Die chemischen Zusammensetzungen der zugrundeliegenden Aluminiumlegierungen sind in **Tabelle 2** aufgeführt

**Tabelle 2:** Chemische Zusammensetzung der verwendeten Materialien  
**Table 2:** Chemical composition of the materials used

EN AW-6082	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Cr	Ti	Al
Masse- %	0,6-1,2	0,4-1,0	0,7-1,3	0,5	0,2	0,1	0,25	0,1	Rest

EN AW-5083	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cu	Cr	Ti	Al
Masse- %	4 – 4,9	0,4-1	0,4	0,4	0,25	0,1	0,05-0,25	0,15	Rest

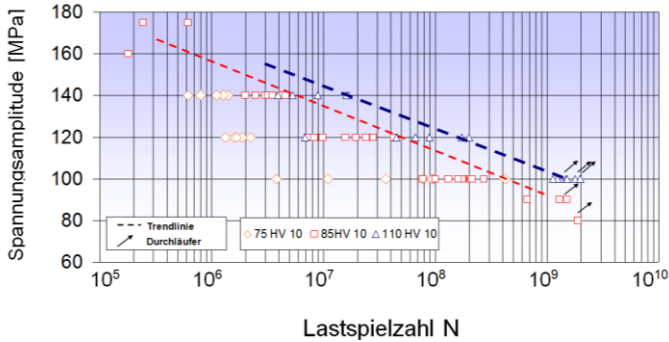
**Bild 4** zeigt Gefügebilder der verwendeten Legierungen. Es sind jeweils zwei Arten von Ausscheidungen zu sehen. Verbindungen mit Al (Si, Mn, Fe) erscheinen hierbei in heller,  $Mg_2Si$ -Ausscheidungen in einer dunklen Färbung. Die Größe dieser Teilchen reicht von 10 bis 25  $\mu m$ , und sie sind in Längsrichtung zeilenförmig angeordnet.



**Bild 4:** Gefügebilder von a) EN AW-6082 (längs), b) EN AW-6082 (quer) und c) EN AW-5083 (längs)  
**Figure 4:** Micrographs of a) EN AW-6082 (longitudinal), b) EN AW-6082 (across) and c) EN AW-5083 (longitudinal)

## 4 Ergebnisse und Diskussion

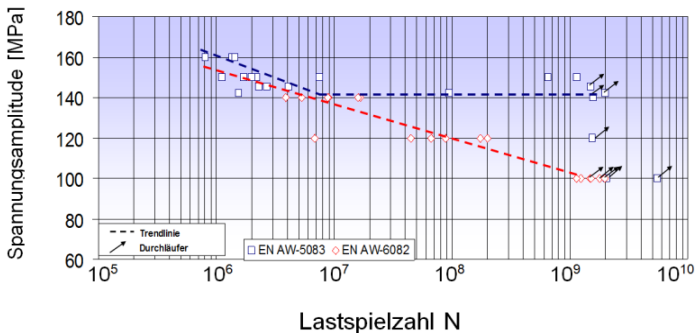
Ermüdungsergebnisse des wärmebehandelten Zustands von EN AW-6082 sind in **Bild 5** dargestellt. Es handelt sich um Proben mit den drei Härtegraden 110, 85 und 75 HV, die sehr deutlich widerspiegeln, dass mit steigender Härte eine höhere Schwingfestigkeit erzielt wird. Der maximal ausgehärtete Zustand von 110 HV wird gefolgt von dem leicht überalterten 85 HV und dem stärker überalterten Zustand mit 75 HV. Bei genauer Betrachtung der Ergebnisse fällt zudem eine große Streuung der Daten des 75 HV Zustandes ab Lastspielzahlen von  $10^7$  auf. Diese Ergebnisse weisen einen ausgeprägten Einfluss der wärmebehandelten Mikrostruktur auf das Ermüdungsverhalten im VHCF-Bereich auf, welcher in Verbindung mit der Art und Verteilung von Sekundärausscheidungen stehen könnte.



**Bild 5:** Ergebnisse der Ermüdungsversuche für wärmebehandelte, glatte Proben aus EN AW-6082, Spannungsverhältnis  $R = -1$

**Figure 5:** S-N data of smooth and heat-treated samples out of EN AW-6082 with a load ratio  $R = -1$

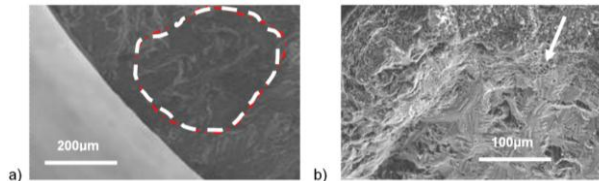
Vergleicht man Ergebnisse der Ermüdungsversuche der verwendeten Legierungen miteinander, ist eine höhere Schwingfestigkeit der naturharten Legierung EN AW-5083 (Zustand I) zu erkennen (**Bild 6**). Zudem zeichnet sich bei einer Spannungsamplitude von 140 MPa eine mögliche Dauerfestigkeit ab einer Lastspielzahl von  $10^7$  ab. Bei einem Vergleich der Härte sowie der Dehngrenze der beiden Materialien fällt auf, dass der EN AW-5083 trotz einer geringeren Härte von 85 HV und einem  $R_{p0,2}$  von 160 MPa gegenüber 300 MPa des EN AW-6082 (Zustand IV) im VHCF-Bereich der aushärtbaren Legierung überlegen ist. Im konventionellen Lastspielzahlbereich hingegen liegen die Ergebnisse nahezu in einem gemeinsamen Streuband.



**Bild 6:** Vergleich des Ermüdungsverhaltens von EN AW-6082 (Zustand IV) mit EN AW-5083 (Zustand I), Spannungsverhältnis  $R = -1$

**Figure 6:** Fatigue behaviour of EN AW-6082 (condition IV) compared to those of EN AW-5083 (condition I), load ratio  $R = -1$

Fraktographische Analysen der ermüdeten VHCF-Proben zeigen in dieser Versuchsreihe zwei Phänomene einer möglichen Rissinitiierung. Zum Einen ist die Ausbildung plateauförmiger Bereiche kurz unterhalb der Oberfläche vorhanden (**Bild 7a**), die auch bei Arbeiten anderer Forscher gefunden wurden [6, 7]. Als weitere Auffälligkeit wurden Hohlräume (sogenannte „voids“) auf der Ermüdungsbruchfläche festgestellt (**Bild 7b**). Wang et al. [8] fanden diese Bruchflächencharakteristika ebenfalls im Übergangsbereich von HCF und VHCF. Die Entstehung dieser „voids“ sowie deren möglicher Zusammenhang mit der Initiierung von Mikrorissen ist derzeit noch nicht abschließend geklärt, wird aber im Zusammenhang mit den im Werkstoff ausgebildeten Primär- und Sekundärausscheidungen aktuell untersucht.



**Bild 7:** a) Innere Rissinitiierung mit sogenannter „non-defect“ oder „featureless“ Rissinitiierung (EN AW-6082;  $N_b=2 \cdot 10^7$ ) und b) Entstehung von Hohlräumen als möglicher Rissausgangsort

**Figure 7:** a) Inner crack initiation with so called "non-defect" or "featureless" crack initiation (EN AW-6082,  $N_b=2 \cdot 10^7$  and b) creation of inner voids as possible reason of crack initiation

## 5 Zusammenfassung

Es wurden erste Ergebnisse zum Ermüdungsverhalten von speziell wärmebehandelten Aluminiumlegierungen, die die Mikrostruktur der Schweißnaht widerspiegeln, vorgestellt. Hierbei wurde eine ausgeprägte Abhängigkeit des Ermüdungsverhaltens von der Mikrostruktur der Aluminiumlegierungen für verschiedene Wärmebehandlungszustände festgestellt. Die Bruchflächen weisen sowohl eine „non-defect“ bzw. „featureless“ Rissinitiierung als auch die Ausbildung von sogenannten „voids“ auf. Der hier vorgestellte neu entwickelte Lastrahmen für das Ultraschallsystem schafft die Möglichkeit, weitere Untersuchungen für schwelende Versuchsführungen durchzuführen.

### Literatur

- [1] H. Mayer, S. Stanzi-Tschegg: Ultrasonic Torsion and Tension–Compression Fatigue Testing: Measuring Principles and Investigations on 2024-T351 Aluminium Alloy, *International Journal of Fatigue* 28 (2006), S. 1446-1455
- [2] H. Mayer: Fatigue Crack Growth and Threshold Measurements at Very High Frequencies, *International Materials Reviews* 44 (1999), S. 1-34
- [3] H. Mayer, S. Stanzi-Tschegg: Besonderheiten der schwingenden Beanspruchung bei extrem hoher Lastspielzahl, In: O. W. Buchholz und S. Geisler: *Werkstoffprüfung 2003: Herausforderungen durch den industriellen Fortschritt*, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2003, S. 26-32
- [4] C. Bathias: Piezoelectric Fatigue Testing Machines and Devices, *International Journal of Fatigue* 28 (2006), S. 1438-1445
- [5] D. Radaj, C.M. Sonsino: *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*, Verlag Abington Publishing, Cambridge, 1998
- [6] H.W. Höppel, M. Prell, L. May, M. Göken: Influence of Grain Size and Precipitates on the Fatigue Lives and Deformation Mechanisms of CP Aluminium and AA6082 in the VHCF-regime, doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.04.013
- [7] D. Schwerdt, B. Pyttel, C. Berger: Fatigue Strength and Failure Mechanisms of Wrought Aluminium Alloys in the VHCF-Region Considering Material and Component Relevant Influencing Factors, doi:10.1016/j.ijfatigue.2010.05.008
- [8] Q. Y. Wang, N. Kawagoishi, Q. Chen: Fatigue and Fracture Behaviour of Structural Al-Alloys up to Very Long Life Regimes, *International Journal of Fatigue* 28 (2006), S. 1572-1576