

VERGLEICHBARKEIT VON PRÜFERGEBNISSEN BEI DER CHARAKTERISIERUNG VON WERKSTOFFEN IN FLUGTRIEBWERKEN

T. Brendel, D. Helm, C. Schwaminger, MTU Aero Engines, München

ZUSAMMENFASSUNG

An die Werkstoffe in Flugtriebwerken werden höchste Anforderungen hinsichtlich Belastbarkeit und Lebensdauer gestellt. Diese technischen Randbedingungen, die beschränkte Verfügbarkeit von Probenmaterial und der gleichzeitige Wunsch nach Wirtschaftlichkeit erfordern eine besondere Verlässlichkeit bei der Ermittlung von Eigenschaften im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung und der Qualitätssicherung.

Der für die Bauteilgruppe „Scheiben“ exemplarisch vorgestellte Prozess für die Werkstoffzulassung stellt eine mögliche Basis für Versuchsprogramme zur Datenermittlung dar. Die anschließend aus den eigenen, aber auch aus fremden Versuchsergebnissen erzeugten Werkstoffspezifikationen und Werkstoffanwendungsnormen sind Grundlage für die Rohmaterialbeschaffung und Bauteilauslegung während des gesamten Lebenszyklus eines Triebwerkes. Damit kommt jedem einzelnen Versuchsergebnis (heute und morgen) große Bedeutung zu. Das gilt nicht nur für die Vergleichbarkeit und Zuverlässigkeit von Prüfergebnissen im eigenen Haus, sondern auch für die Daten von externen Prüfstellen und Lieferanten. Denn werden auch die Rahmenbedingungen für die Versuchsdurchführung weitgehend in den geltenden internationalen Prüfnormen geregelt, so kann nur unter Berücksichtigung der tatsächlichen am Prüfprozess beteiligten Parameter die „Qualität“ von Prüfergebnissen verlässlich beurteilt werden. Das macht die Verwendung von bekannten „zugelassenen“ Prüfstellen und definiert „eingefrorenen“ Prüfprozessen erforderlich. Der Abgleich bzw. die Zulassung von solchen Prüfstellen erfolgt im Rahmen von „Vor Ort Audits“ und durch regelmäßige Teilnahme an Vergleichsversuchen. Dabei spielt nicht nur die rein statistische Übereinstimmung der Ergebnisse eine Rolle, sondern vor allem die Qualität von einzelnen, ausgewählten Versuchsmerkmalen ist entscheidend.

Als Beispiel für diese Vorgehensweise wurden Daten aus dehnungsgeregelten Low-Cycle-Fatigue-Tests dargestellt und ausgewertet, die bei unterschiedlichen Prüfstellen ermittelt wurden. Die dabei beobachteten Abweichungen dienen unter anderem als Entscheidungsgrundlage für die Laborzulassung.

1. EINLEITUNG

Beim Betrieb von Flugtriebwerken werden extreme Anforderungen an die Leistung und Sicherheit aller eingesetzten Komponenten gestellt. Gleichzeitig müssen auch die Herstell- und Betriebskosten möglichst gering gehalten werden. Dieser Zwiespalt macht eine verlässliche Ermittlung der Eigenschaften aller eingesetzten Werkstoffe zwingend erforderlich.

Das gilt sowohl für die Datenermittlung bei der Basis-Charakterisierung, als auch für alle Prüfungen im Rahmen der routinemäßigen Qualitätssicherung. Vor allem die Werkstoffdaten, die in die Erzeugung von sogenannten „Design-Lines“ einfließen, müssen über „jeden Zweifel“ erhaben und absolut vertrauenswürdig sein. Denn diese „Design-Lines“ werden nicht nur für die Auslegung von Triebwerkskomponenten verwendet, sondern sie stellen auch die Basis für die Spezifikationsprüfung bei der Wareneingangskontrolle dar. Deshalb dürfen nur „zugelassene“ Werkstoffdaten eingesetzt werden, die einen standardisierten Prozeß bei der Ermittlung und Aufbereitung durchlaufen haben. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Zulassung von in Flugtriebwerken eingesetzten Werkstoffen sind schematisch im Bild 1 zusammengefasst.

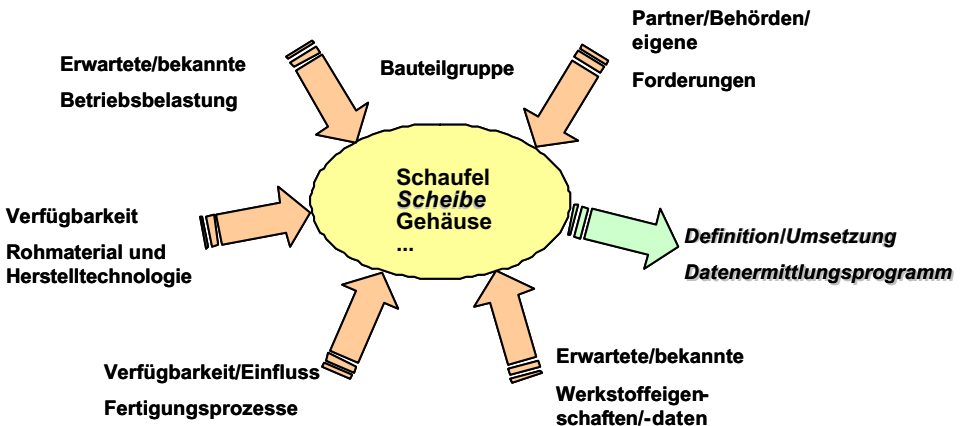


Bild 1 Einflussfaktoren bei der Werkstoffzulassung

2 DATENERMITTLUNG BEI SCHEIBENWERKSTOFFEN

Die Wirkung der oben beschriebenen Einflussgrößen auf die Definition eines Datenermittlungsprogrammes ist für die einzelnen Bauteilgruppen unterschiedlich ausgeprägt. Besonderes Augenmerk verdienen die Werkstoffe, die für rotierende, hoch belastete Scheiben im Verdichter und Turbinenbereich verwendet werden. Das Bild 2 zeigt recht anschaulich welche Belastungen bei dieser Bauteilgruppe für die Lebensdauer bestimmend sind.

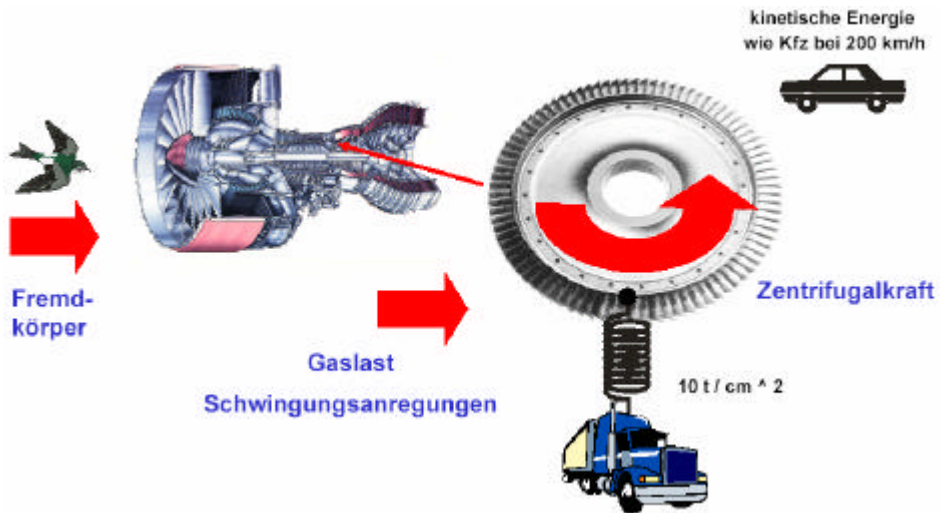


Bild 2 Typische Belastungen von Turbinenscheiben

Die Auswirkung dieser tatsächlich auftretenden Belastungen auf die Lebensdauer von Turbinenscheiben muss durch geeignete Probenversuche abgeschätzt/simuliert werden. Dabei spielt neben dem reinen Werkstoffverhalten auch der Einfluss der Bauteilgeometrie und der verwendeten Fertigungsverfahren eine entscheidende Rolle. Diese unterschiedlichen Gesichtspunkte müssen, wie im Bild 3 dargestellt durch geeignete Probengeometrien und Versuchsbedingungen berücksichtigt werden.

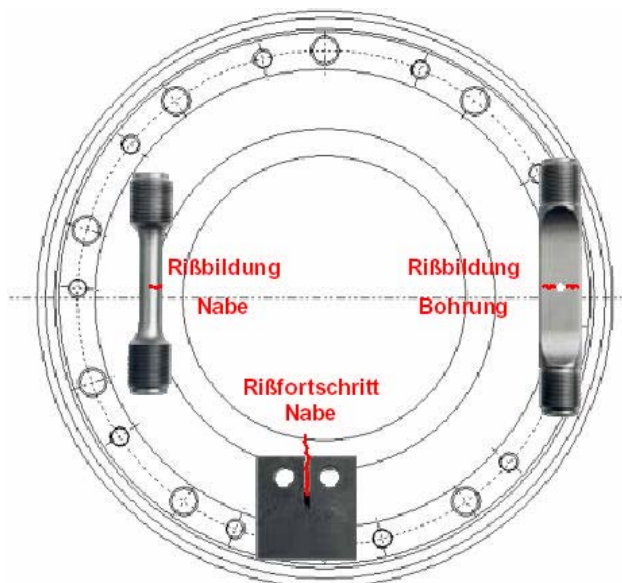


Bild 3 Unterschiedliche Versuche an Proben

Für Lebensdaueraussagen bei Scheibenwerkstoffen benötigt man neben den Zahlen für die ertragbaren Lastwechsel bis zum ersten Anriß (Rissinitiierung) auch fundierte Kenntnisse über das Rissausbreitungsverhalten. Letzteres ist vor allem für die Definition/Absicherung von Inspektionsintervallen von Bedeutung.

Aussagen über die Rißeinleitung werden bei Scheibenwerkstoffen aus dehnungsgeregelten Ermüdungsversuchen abgeleitet.

3 DEHNUNGSGEREGLTER ERMÜDUNGSVERSUCH

Das Anfahren und Abstellen von Triebwerken führt zu einer Belastung von Verdichter- und Turbinenscheiben, die am besten durch SCLCF (Strain-Controlled-Low-Cycle-Fatigue) Versuche an glatten Proben mit erhöhter Prüftemperatur angenähert werden kann. Hier werden die lokalen plastischen Deformationen, die durch örtliche Verformungsbehinderung im Nabenbereich auftreten können, simuliert.

Der Versuchsaufbau und die grundlegende Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung im SCLCF-Versuch werden in internationalen Normen (ASTM E606, PrEN 3988) beschrieben. Das heißt, grundsätzlich arbeiten alle Prüfstellen (intern und extern) nach vergleichbaren Vorschriften und Regeln.

Zur Sicherstellung von wirklich vergleichbaren Ergebnissen zwischen den beteiligten Prüfstellen, ist aber zusätzlich die Überprüfung von weiteren Qualitätsmerkmalen sowie die Durchführung von Vergleichsversuchen erforderlich.

3.1 Vergleich von SCLCF-Daten

Im Folgenden werden nur Methoden zum Vergleich von Meßdaten aus SCLCF-Versuchen beschrieben. Die möglichen Auswirkungen auf die Lebensdauer werden nicht quantifiziert.

3.2 Schwankungen der Ober- und Unterspannung

Die Ober- und Unterspannung sind gute Indikatoren für die Qualität von SCLCF-Daten, da sich diese Spannungen in Abhängigkeit von den geregelten Dehnungswerten ergeben. Dabei können für typische Scheibenwerkstoffe im Triebwerksbau nach dem ersten Belastungszyklus, nahezu gleichbleibende Spannungsniveaus erwartet werden.

Das Bild 4 zeigt die Spannungsniveaus von SCLCF-Versuchen an Proben aus dem selben Werkstoff unter gleichen Versuchsbedingungen ermittelt in zwei unterschiedlichen Prüflabors.

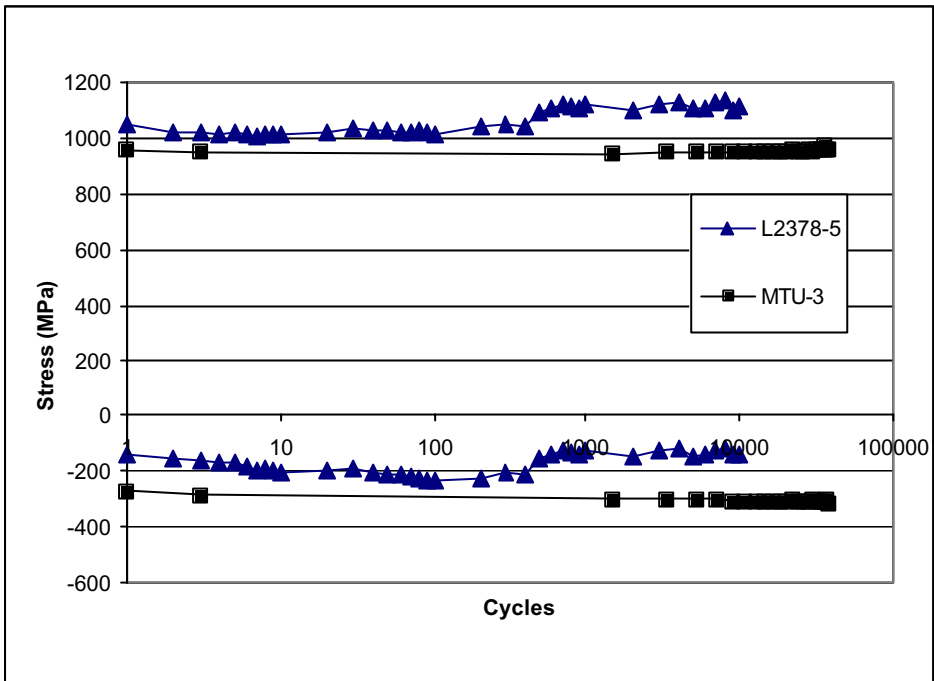


Bild 4 Spannungsverlauf beim SCLCF-Versuch für zwei Prüfstellen

Schon bei bloßer Betrachtung der Versuchsdaten wird ein Unterschied in den sich ergebenden Spannungen deutlich. Denn liegen die von MTU ermittelten Spannungen alle auf einem fast gleichbleibenden Niveau, so zeigen die von einer externen Prüfstelle ermittelten Werte starke Schwankungen und sogar eine Drift in Abhängigkeit von den Lastwechseln.

Zur Analyse dieses beobachteten Unterschieds bieten sich zwei gängige statistische Methoden an:

- Vergleich der RMS-Werte $RMS = \sqrt{[(1/N)\sum(x_i - \mu)^2]}$
 - x_i Spannung des jeweiligen Lastwechsels
 - μ durchschnittlicher Spannungswert
 - N Anzahl der Lastwechsel
- Varianzanalyse (1-way ANOVA)
EXCEL-AddIn *ANALYSE-IT* (näheres siehe www.analyse-it.com)

Die folgenden Analysen basieren auf drei Versuchen bei MTU und 6 Versuchen bei der externen Prüfstelle.

Die aus den Spannungsschwankungen ermittelten RMS-Werte sind im Bild 5 dargestellt. Wie erwartet ergibt sich zwischen den beiden Prüfstellen ein deutlicher Unterschied in der mittleren Schwankungsbreite der beim SCLCF-Versuch induzierten Spannungssignale.

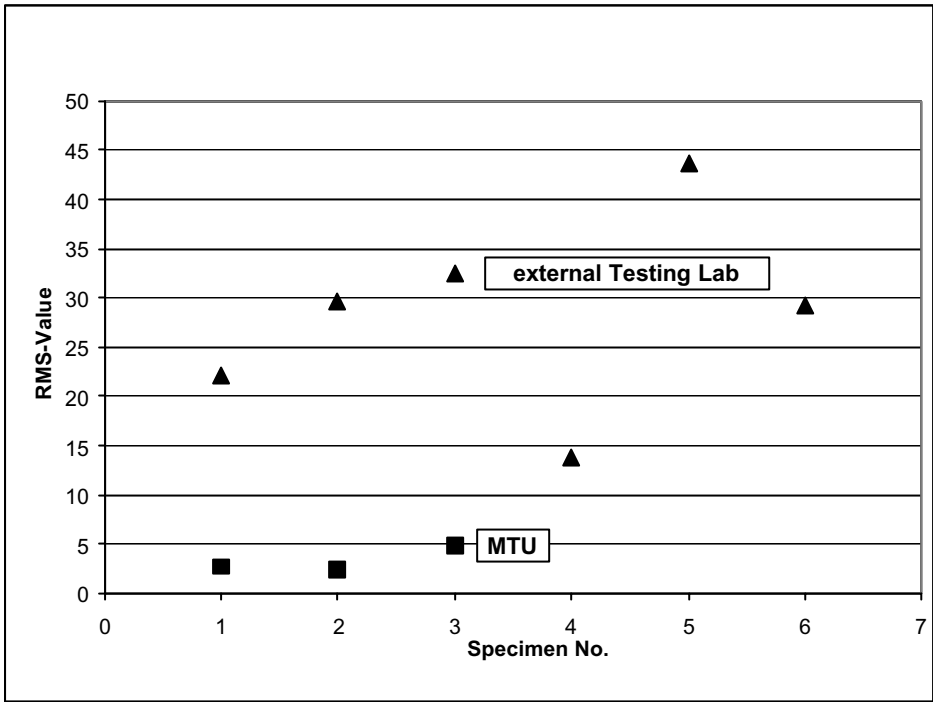


Bild 5 RMS-Werte der beobachteten Spannungsschwankungen

Das Ergebnis der Varianzanalyse (Tabelle 1) zeigt für einen Vertrauensbereich von 95% einen signifikanten Unterschied zwischen den Prüfstellen an.

Tabelle 1 Ergebnisse der Varianzanalyse

analysed with: Analyse-it + General 1.62

Test		1-way between subjects ANOVA				
Performed by		TEWP				
n		9				
Date		2 April 2003				
Test Lab	n	Mean	SD	SE		
MTU	3	32,867	7,422	4,2854		
External Lab	6	93,883	22,468	9,1724		
Source of variation	SSq	DF	MSq	F	P	
Test Lab	7446,067	1	7446,067	19,79	0,0030	
Within cells	2634,195	7	376,314			
Total	10080,262	8				
LSD						
Contrast	Difference	95% CI				
External Lab v MTU	61,017	28,581 to 93,452		(significant)		

3.3 Unterschiedlicher Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) beschreibt das Verhältnis zwischen Dehnung und der daraus resultierenden Spannung im elastischen Bereich. Er ist für alle gängigen Triebwerkswerkstoffe über den gesamten Temperaturbereich bekannt und stellt damit einen Schlüsselparameter für die Beurteilung der Qualität von SCLCF-Versuchen dar. In die Berechnung des E-Moduls fließen sowohl die ermittelten Spannungen als auch die Dehnungen ein und es ergibt sich ein kombinierter Einfluss der beteiligten Messgrößen Kraft und Verlängerung. Der Einsatz und die Kalibrierung von Kraftmesseinrichtungen ist eine gängige Praxis und liefert vertrauenswürdige Ergebnisse. Im Gegensatz dazu lassen sich die üblichen Verlängerungssysteme für Hochtemperaturanwendungen nicht so einfach handhaben.

Das folgende Bild 6 zeigt in Abhängigkeit von den Lastwechseln die im SCLCF-Versuch unter gleichen Prüfbedingungen, an demselben Werkstoff, bei unterschiedlichen Prüflabors ermittelten Be- und Entlastungs-E-Module.

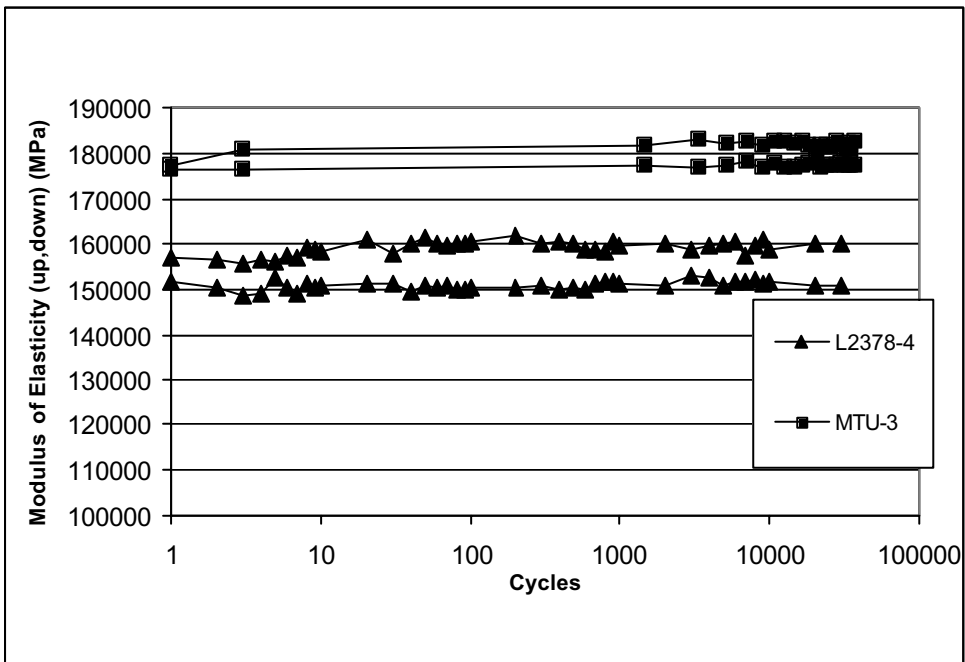


Bild 6 Im SCLCF-Versuch ermittelte E-Module

Aus den beobachteten unterschiedlichen E-Modulen und der Annahme, dass der Fehler vom Verlängerungsmesssystem herrührt, kann bei der externen Prüfstelle auf die Verwendung einer zu geringen Dehnungsamplitude geschlossen werden. Das führt zu größeren Lastwechselzahlen und damit zu nicht konservativen Ergebnissen.

3.4 Überschwingen des Dehnungssignals

Beim SCLCF-Versuch wird die aus der Probenverlängerung abgeleitete Dehnung als Regelgröße verwendet. Die üblichen elektronischen Regelungssysteme, mit gut abgestimmten Regelparametern, können die vorgegebenen Sollwerte problemlos ausregeln. Unerwünschtes Überschwingen wird vermieden und sogar das erlaubte langsame Ausblenden des Dehnungssignals auf den Sollwert ist nicht erforderlich. Das Bild 7 zeigt die Ober- und Unterdehnung eines SCLCF-Versuchs mit einem deutlichen Überschwingen der Oberdehnung nach einem Aufblendvorgang innerhalb der ersten 10 Zyklen. Aufgrund der dabei auftretenden zusätzlichen plastischen Verformung der Probe kommt es bei der weiteren Prüfung zu einer Verschiebung der Ober- und Unterspannungen.

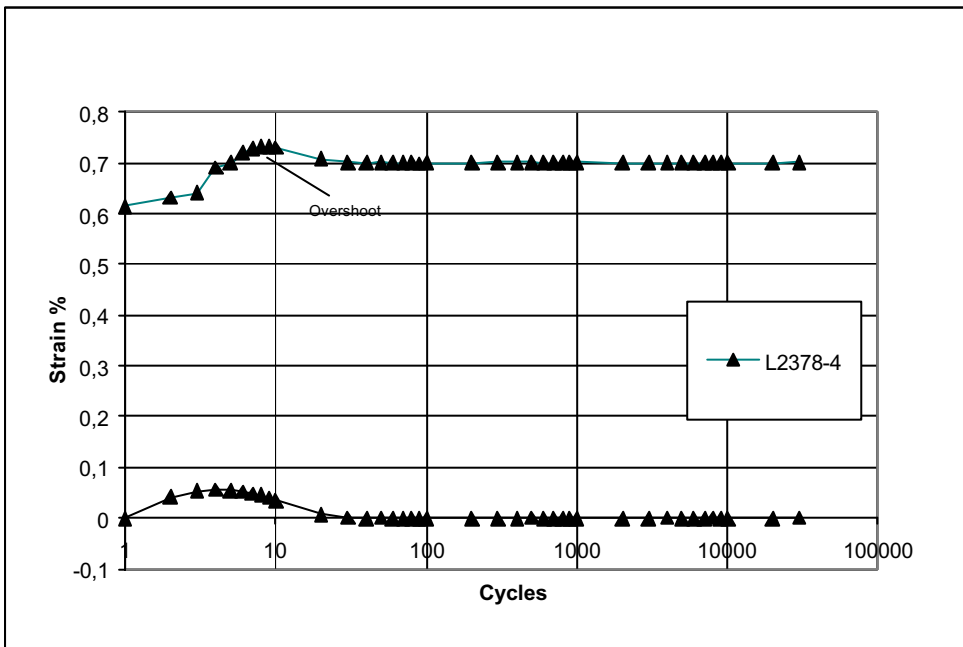


Bild 7 Überschwingen des Dehnungssignals beim SCLCF-Versuch

4 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aufgrund der hohen Anforderungen an die Werkstoffe in Flugtriebwerken hinsichtlich Belastbarkeit und Lebensdauer ist die verlässliche Ermittlung von Werkstoffkennwerten unverzichtbar.

Anhand der Versuchsart SCLCF, die für die Bauteilgruppe „Scheiben“ die Einsetzbarkeit bestimmt, wurde exemplarisch die Beurteilung der Qualität von Versuchsdaten dargestellt. Hier ist, zur Sicherstellung eines zuverlässigen Prozesses zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten, neben der Einhaltung der geltenden Normen auch die Überprüfung der beim Versuch anfallenden Messdaten erforderlich. Für die Laborzulassung ist ein erfolgreicher Abschluss von Vergleichsversuchen zwischen interner und externer Prüfstelle erforderlich.