

◆ **DVM** ◆

Deutscher Verband für  
Materialforschung und  
-prüfung e.V.



Stahlinstitut VDEh

**DGM**

Deutsche Gesellschaft  
für Materialkunde e.V.

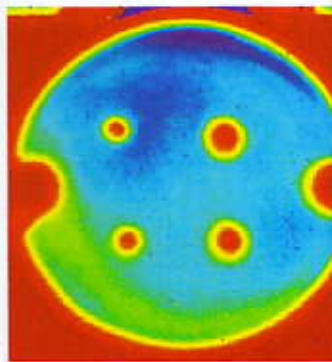
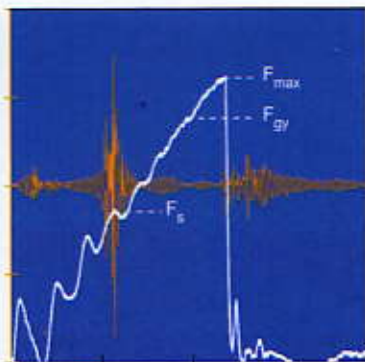
Tagung

Werkstoffprüfung 2011

01. und 02. Dezember 2011  
Berlin

## Neue Entwicklungen in der Werkstoffprüfung – Herausforderungen an die Kennwertermittlung

Herausgegeben von  
Wolfgang Grellmann



# ERMÜDUNGSVERSUCHE IM LCF-BEREICH AN MINIATURISIERTEN FLACHPROBEN

A.Uihlein\*, K.-F. Stärk\*  
) ALSTOM (Switzerland) Ltd.

**Zusammenfassung:** Standard Low-Cycle Fatigue Versuche (LCF) an metallischen Werkstoffen verlangt entsprechend dickes Platten- oder Stangenmaterial um zylindrische Proben entsprechend der geltenden Standards entnehmen zu können [1–5]. Bei vielen Bauteilen ist die Entnahme von Standardproben aus geometrischen Gründen nicht möglich. Aus diesem Grund wurde bei der Firma ALSTOM eine Prüfmethode entwickelt, welche erlaubt, LCF-Versuche an miniaturisierten Flachproben durchzuführen [6, 7]. Der folgende Beitrag stellt den Versuchsaufbau vor. Anschließend werden Ergebnisse aus LCF-Versuchen an einem Rotorstahl, Gusseisen sowie an einer grobkörnigen Nickelbasislegierung vorgestellt, an welchen diese Prüfmethode verifiziert wurde.

**Stichwörter:** Low-Cycle Fatigue (LCF), Ermüdung, Flachproben, Gefügeeinfluss

## FATIGUE TESTING IN THE RANGE OF LCF AT MINIATURIZED FLAT SPECIMEN

**Abstract:** Standard Low-Cycle Fatigue (LCF) testing of metallic materials requires thick plates or bars to cut cylindrical specimens according to corresponding standards [1–5]. Many components do not allow extracting and machining of standard type specimens from the areas of interest due to geometrical reason. In order to satisfy this demand a small-scale specimen test technique was developed by ALSTOM [6, 7]. This lecture will present the test rig setup and the experimental procedure. Furthermore results of LCF-tests carried out at a rotor steel, cast iron as well as at coarse Ni-base-alloy are presented which were used to verify this test method.

**Keywords:** Low-Cycle Fatigue (LCF), Flat Specimen, Microstructure

### Einleitung

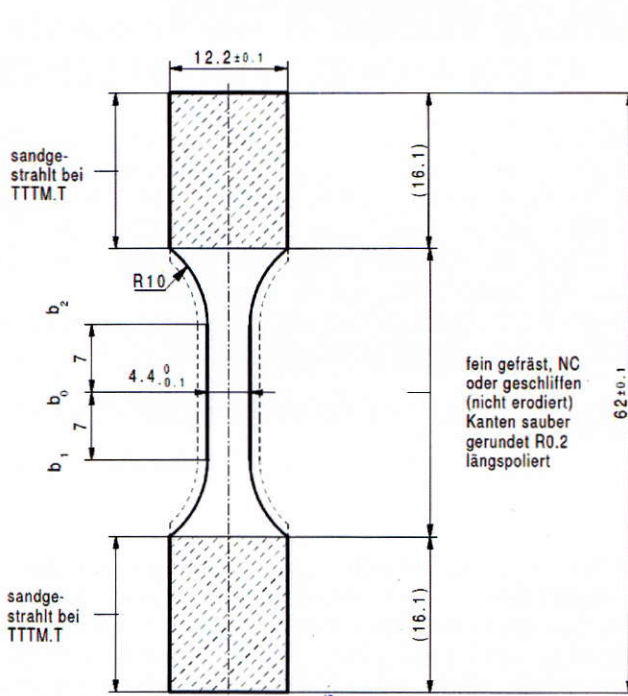
Oft ist es wünschenswert, LCF-Proben aus höchstbeanspruchten Bauteilbereichen zu entnehmen, beispielsweise um Restlebensdauerbewertungen durchführen zu können. Da diese Bereiche oft relativ klein sind, ist es meist nicht möglich Standardproben zu entnehmen und herzustellen. Um auch diesen Anforderungen zu genügen, wurde in den letzten Jahren im ALSTOM Materiallabor in Baden (Schweiz) eine Prüfmethode entwickelt, welche es erlaubt Miniaturproben mit üblichen Prüfsystemen für Standardproben zu prüfen. Dabei sollten die Miniaturproben unter identischen Bedingungen wie Standardproben geprüft werden können. So sollte es vor allem möglich sein, Druckkräfte aufbringen zu können, ohne dass es zu einem Ausknicken der Probe kommt.

Ebenso sollte es möglich sein, Versuche bei erhöhten Temperaturen (LCF) bzw. mit nicht stationären Temperaturverläufen (TMF) zu realisieren. Im Folgenden sind LCF-Versuche bei isothermer Beanspruchung an ausgewählten Werkstoffen, welche zur Verifizierung dieser Prüfmethode dienen, vorgestellt. Es handelt sich dabei um einen Cr-Ni-Rotorstahl, ein globuläres Gusseisen sowie eine grobkörnige Nickelbasislegierung. Der feinkörnige Rotorstahl wurde in Hinblick auf seine sehr homogene Mikrostruktur und geringe Defektdichte ausgewählt. Das globuläre Gusseisen stellt einen grob zweiphasigen Werkstoff mit relativ vielen inneren Defekten dar. Die Nickelbasislegierung zeichnet sich durch eine sehr starke Grobkörnigkeit aus. Deshalb sind meist nur wenige Körner im Bereich der Messtrecke vorzufinden.

Die Versuchsergebnisse der Miniaturproben wurden mit Versuchsergebnissen von Standardproben verglichen. Nachfolgend wird zunächst der Aufbau des Prüfstandes erläutert. Zur Validierung und Verifizierung der Prüfmethode werden die Versuchsergebnisse von Miniaturproben mit Versuchsergebnissen von Standardproben verglichen.

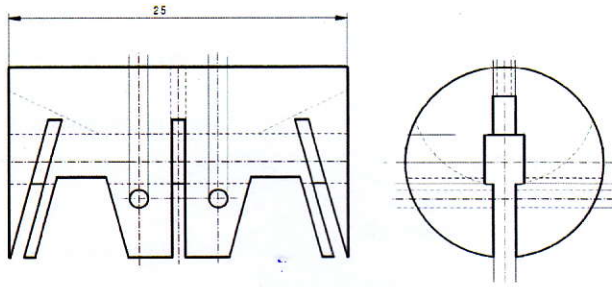
### Probengeometrie, Versuchsführung und Prüfstand

Bild 1 zeigt die Probengeometrie der Miniaturprobe mit einer effektiven Messlänge von 14 mm. Die Dicke der Proben der präsentierten Versuche betrug 1,5 mm.



**Bild 1:** Probengeometrie Miniaturprobe  
Drawing miniaturized specimen

Um ein Knicken der Probe bei Druckbelastung zu vermeiden wurde eine schwimmende Probenabstützung, wie in Bild 2 dargestellt, verwendet.



**Bild 2:** Suszeptor  
*Susceptor*

Diese dient gleichzeitig als Suszeptor, welcher bei Versuchen mit erhöhter Temperatur zur indirekten Erwärmung der Probe dient und die Probenkanten vor Überhitzung schützt. Die Versuche wurden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine der Bauart MTS mit einer (theoretischen) Maximallast von 250 kN durchgeführt, wobei hierbei der Kraftbereich auf maximal 20 kN angepasst wurde. Die Erwärmung der Proben erfolgte induktiv mit Hilfe von zwei Hochfrequenzgeneratoren. Zur Temperaturmessung dienten 3 Thermoelemente vom Typ S, wovon 2 zur Temperaturregelung verwendet wurden. Die isothermen, dehnungsgeregelten LCF-Versuche wurden mit einem R $\epsilon$ -Verhältnis ( $\epsilon_{\min}/\epsilon_{\max}$ ) von -1 durchgeführt.

Der Dehnungsverlauf war dreieckförmig mit einer Dehnrates von 0,1 %/s. Als „End-of-Life“-Kriterium für die LCF Versuche wurde ein „2 %-Load-Drop“-Kriterium zugrunde gelegt. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung kann [8] entnommen werden.

## Versuchsergebnisse

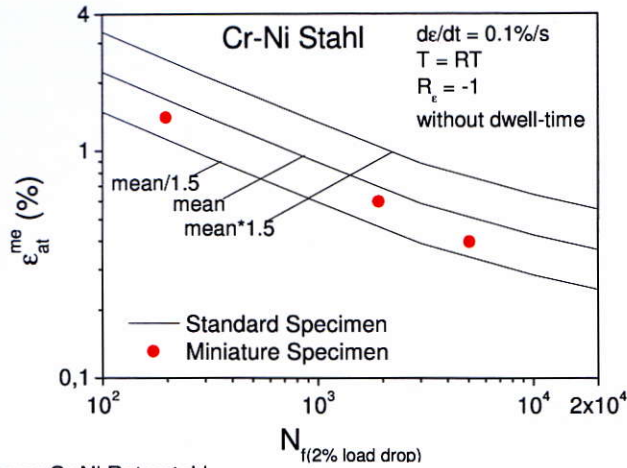
Die nachfolgenden Diagramme vergleichen das Wechselverformungs- sowie Lebensdauerverhalten von Standard- und Miniaturproben. In den Lebensdauerkurven ist jeweils die Mean-Design-Kurve sowie ein zulässiger Auslegungsbereich (Mean\*1.5 und Mean/1.5) dargestellt. Diese Kurven wurden mit Versuchen an Standard LCF-Proben ermittelt. Die Lebensdauerwerte der Miniaturproben sind durch ausgefüllte Kreise symbolisiert.

### Cr-Ni ROTORSTAHL

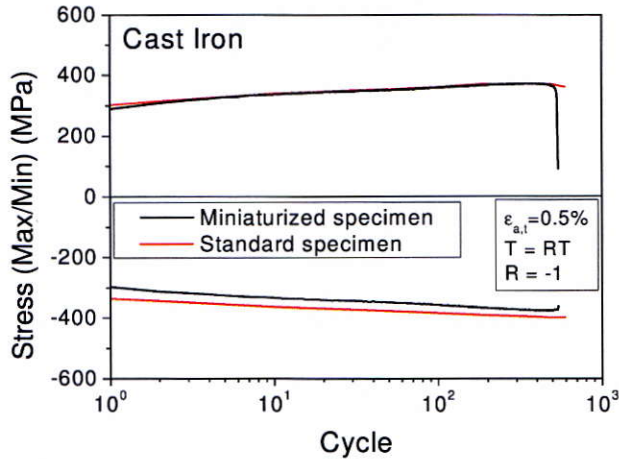
Bild 3 zeigt das Lebensdauerverhalten des feinkörnigen Cr-Ni-Rotorstahls. Die Werte der Miniaturproben liegen nahe an der Mean-Kurve, aus Standardversuchen und entsprechend innerhalb des Design-Bereichs. Die Abweichungen der Miniaturproben zur Mean-Kurve sind nahezu konstant.

### GUSSEISEN

Bild 4 zeigt vergleichend die Verläufe der Maximal- und Minimalspannungen von Miniatur und Standardproben aus LCF-Versuchen mit einer Totaldehnungsamplitude von 0,5 %. Dabei zeigt sich, dass die Spannungen an der miniaturisierten Probe und der Standardprobe nahezu gleich sind. Lediglich im Druckbereich werden geringfügig höhere Spannungen an der Standardprobe beobachtet, jedoch liegen diese im Rahmen der für Gusseisen typischen Streuungen.

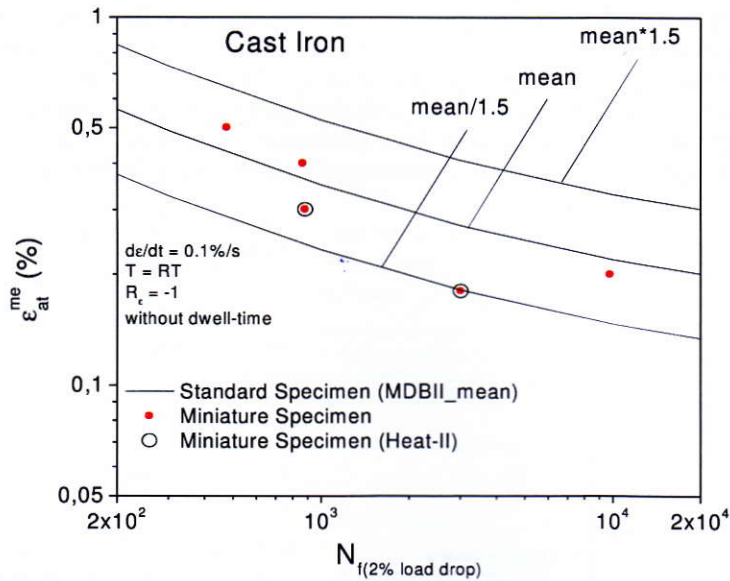


**Bild 3:** Lebensdauer Cr-Ni Rotorstahl  
*Comparison lifetime Cr-Ni Steel*



**Bild 4:** Wechselverformung Gusseisen  
*Cyclic deformation Cast Iron*

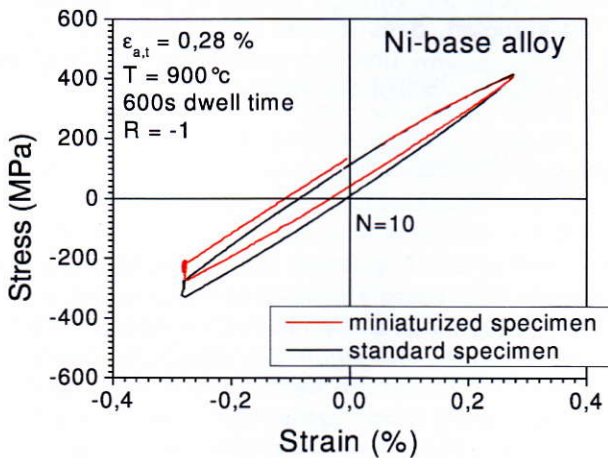
Bild 5 zeigt das Lebensdauerverhalten der LCF-Versuche an dem Gusseisenwerkstoff. An den Miniaturproben wurden Versuche an zwei Chargen durchgeführt. Die erste Charge ist nicht explizit gekennzeichnet, die zweite Charge (Heat 2) wird durch umrandete Symbole gekennzeichnet. Generell liegen die Lebensdauerwerte der Miniaturproben innerhalb der vorgegebenen Designgrenzen. Bezüglich der ersten Charge werden über der Mean-Kurve liegende Lebensdauerwerte beobachtet. Die der zweiten Charge liegen dagegen unterhalb der Mean-Kurve.



**Bild 5:** Lebensdauer Gusseisen  
*Comparison lifetime Cast Iron*

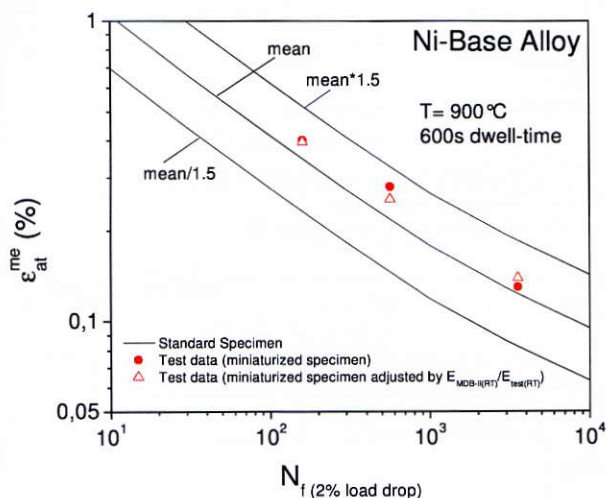
### Nickelbasislegierung

Bild 6 vergleicht die Hysteresen von Miniaturproben und Standardproben aus Versuchen an der grobkörnigen Nickelbasislegierung, welche bei 900 °C und einer Druckhaltezeit von 600 s durchgeführt wurden. Wie zu erkennen ist, weichen die beiden Kurven im Druckbereich zunehmend voneinander ab. Die Kurve der Miniaturproben zeigt hierbei betragsmässig geringere Werte.



**Bild 6:** Hysterese Nickelbasislegierung  
*Hysteresisloop Ni-base-alloy*

Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei den miniaturisierten Proben nur wenige Körner im Bereich der Messstrecke vorzufinden sind und das Verformungsverhalten im Wesentlichen von der kristallographischen Orientierung dieser einzelnen Körner bestimmt wird. Dies führt bei dieser grobkörnigen Nickelbasislegierung häufig zu Abweichungen im Verformungsverhalten hinsichtlich Standard- und Miniaturproben. Die Lebensdauerwerte der Miniaturproben sind in Bild 7 durch rote Kreise dargestellt.



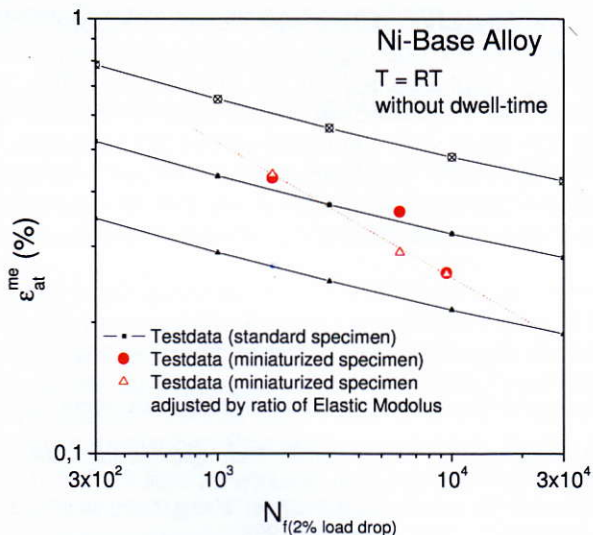
**Bild 7:** Lebensdauer Nickelbasislegierung  
Comparison lifetime Ni-base-alloy

Es zeigt sich, dass der Abstand der Lebensdauerwerte zur Mean-Design-Kurve innerhalb der Versuche variiert. Aus diesem Grund wurde der Einfluss der Kornorientierung innerhalb der Messtrecke der Miniaturproben wie folgt berücksichtigt: die entsprechend der Kornorientierung unterschiedlichen Elastizitätsmoduli wurden vor Versuchsbeginn ermittelt. Die im Versuch aufgebrachte Totaldehnungsamplitude wurde dann in der Art korrigiert, dass sie mit dem Quotienten des E-Moduls der Standardproben bei RT,  $E_{\text{DataBase}(RT)}$ , und dem individuellen E-Modul der Miniaturprobe vor Versuchsbeginn,  $E_{\text{Test}(RT)}$ , multipliziert wurde:

$$(\epsilon_{at}^{me})_{adjusted} = (\epsilon_{at}^{me})_{Test} \frac{E_{\text{DataBase}(RT)}}{E_{\text{Test}(RT)}} \quad (1)$$

Die korrigierten Werte sind in Bild 7 als nach oben gerichtete Dreiecke dargestellt. Wie das Diagramm zeigt, führt diese Korrektur teilweise zu einer Annäherung der Lebensdauerwerte in Richtung Mean-Design-Kurve. In manchen Fällen wird jedoch auch eine geringe Verschiebung entgegen der Mean-Design-Kurve beobachtet. Bild 8 zeigt das Lebensdauerverhalten von Versuchen ohne Haltezeit bei RT. Analog zu Bild 7 sind die Versuchsdaten durch Kreise dargestellt. Die offenen nach oben gerichteten Dreiecke symbolisieren wiederum, wie oben beschrieben, korrigierte Versuchsdaten.

Die Regressionslinie der korrigierten Versuchsdaten liefert dabei eine steilere Lebensdauerlinie und damit ein anderes Lebensdauerverhalten als die Mean-Kurve.



**Bild 8:** Lebensdauer Nickelbasislegierung  
*Comparison lifetime Ni-base-alloy*

### Schlussfolgerung

Eine neu entwickelte Prüfmethode für Ermüdungsversuche an miniaturisierten Flachproben sollte an verschiedenen Werkstoffen validiert und verifiziert werden. Hierzu dienten ein feinkörniger Cr-Ni-Rotorstahl, ein sphärolitisches Gusseisen sowie eine stark grobkörnige Nickelbasislegierung. Die Versuchsergebnisse von miniaturisierten Proben wurden mit Ergebnissen von Standardproben hinsichtlich des Wechselverformungs- sowie Lebensdauerverhalten verglichen und verifiziert.

Das Lebensdauerverhalten des Rotorstahls zeigt bei den Miniaturproben zwar geringfügig geringere Werte als die Standardproben, trotzdem kann jedoch ein vergleichbares Lebensdauerverhalten bei Miniatur- und Standardproben beobachtet werden.

Das Wechselverformungsverhalten des Gusseisens ist bei beiden Probenvarianten nahezu identisch. Hinsichtlich des Lebensdauerverhaltens liegen die Werte der Miniaturproben in dem für diesen Werkstoff typischen Streubereich.

Die grobkörnige Nickelbasislegierung zeigt teilweise deutliche Unterschiede hinsichtlich des Wechselverformungsverhaltens. Dies zeigte sich sowohl bei den Hysteresen, welche unterschiedliche Steigungen aufweisen, als auch in den sich einstellenden Maximal- bzw. Minimalspannungen. Zurückzuführen ist dies auf die Grobkörnigkeit und damit auf den Einfluss der kristallographischen Orientierung einzelner Körner im Messbereich, welche das Verformungsverhalten dominieren. Bei den Versuchen an Miniaturproben wurde die Totaldehnungsamplitude mit Hilfe des vor Versuchsbeginn ermittelten Elastizitätsmoduls korrigiert. Hierzu sollte die kristallographische Orientierung der verformungsbestimmenden Körner berücksichtigt werden. Allerdings konnte dabei lediglich eine geringe Annäherung des Lebensdauerverhaltens der Miniaturproben an das der Standardproben bewirkt werden. Vielmehr besteht bei wenigen Versuchen die Gefahr ein verfälschtes Lebensdauerverhalten abzubilden.



Generell zeigt sich bei Versuchen an miniaturisierten Flachproben, dass die Anzahl der durchgeführten Versuche zu gering ist, um eine statistisch fundierte Auswertung durchzuführen. Generell zeigt sich jedoch bei allen Werkstoffen, dass mit der hier vorgestellten Prüfmethode vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich des Wechselverformungsverhaltens als auch des Lebensdauerhaltens erzielt werden können. Eine tendenziell höhere Anzahl von Versuchen zur Bewertung des Ermüdungsverhaltens wird gegenüber Standardproben jedoch empfohlen, da infolge der Miniaturisierung deutlich mehr Streuungseinflüsse die Resultate beeinflussen.

## Literatur

- [1] ISO/DIS 12106 (1999): Metallic Materials – Fatigue Testing – Axial Strain-Controlled Method, Draft International Standard, ISO/TC 164/SC 5
- [2] ISO Thermomechanical Fatigue Testing Method, Working Document, ISO/TC 164/SC 5/WG9, (2000)
- [3] AECMA STANDARD, Aerospace series (1998): Test methods for metallic materials, Constant amplitude strain-controlled low cycle fatigue testing, prEN 3988
- [4] Kandil, F.A.: Alignment and Uncertainties in Fatigue Testing. National Physical Laboratory, (NPL), UK, International Symposium, 22nd September 1998
- [5] Sakane, M., Yamaguchi, K.: High Temperature Low Cycle Fatigue. Standard Testing – JSME Recommendation, Fourth Japan-China Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials (2001)
- [6] Zerbst, U., Kocak, M., Huebner, P.: Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen, MP Materialprüfung, Vol.9 (2002) 333–356
- [7] Cornec, A., Schneider, I.: Modellierungskonzept für die Versagensbewertung von Laserschweißverbindungen. Mat.-Wiss. u. Werkstofftechnik, Vol.32 (2001) 316–328
- [8] Staerk, K.-F.: High Temperature Axial Strain-Controlled LCF/TMF Fatigue Testing of Flat-Sheet Specimen. Fatigue 2003, Cambridge, UK, ISBN 0-9544368-0-6