

COORETEC-Werkstoffe

Verbundvorhaben

Robuste Modelle zur verbesserten Werkstoffausnutzung für aktuelle Turbinenschaufelwerkstoffe (RoMoTurb)

Arbeitsanteil Technische Universität Darmstadt

Abschlussbericht

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages, die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Förderkennzeichen: 0327705M
Kassenzeichen: 810301871527
Laufzeit des Vorhabens: 05/2006 – 01/2010
Berichtszeitraum: 01.05.2006–31.01.2010

Darmstadt, den 01.03.2010

Prof. Dr.-Ing. C. Berger
Institutsleiterin

Dr.-Ing. A. Scholz
Projektleiter

Dr.-Ing. Y. Wang
Sachbearbeiterin

Inhaltsverzeichnis

I Kurzdarstellung

1. **Aufgabenstellung**
2. **Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**
3. **Planung und Ablauf**
4. **Wissenschaftlicher und technischer Stand des Wissens**
5. **Zusammenarbeit mit anderen Stellen/Kooperation**

II Eingehende Darstellung

6	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse	10
6.1	Aufstellung über die erbrachten Leistungen	10
6.2	Experimentelle Arbeiten.....	11
6.2.1	Kurzzeitverhalten	11
6.2.2	Zeitstandverhalten.....	17
6.2.3	Ermüdungsverhalten	27
6.3	Theoretische Arbeiten	33
6.3.1	Beschreibung des Kriechverhaltens mit Garofalo-Gleichung	
6.3.2	Beschreibung des Ermüdungsverhaltens mit Manson-Coffin-Gleichung und Ramberg-Osgood-Gleichung	
6.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	41
6.5	Literatur.....	41
7	Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung	433
8	Nutzung und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse	43
9	Während des Vorhabens bekannte gewordene Ergebnisse anderer Stellen	44
10	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen zu dem im Teilvorhaben erarbeiteten Ergebnissen	44

I Kurzdarstellung

1. Aufgabenstellung

Vor dem Hintergrund einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung spielt die Effizienzsteigerung durch optimierte Ausnutzung des Potentials vorhandener Werkstoffe eine zentrale Zielvorgabe. Dazu ist eine Absicherung der zeit- und temperaturabhängigen Eigenschaften hochwertiger Hochtemperaturlegierungen für hochbelastete Gasturbinenschaufeln im gesamten Anwendungstemperaturbereich erforderlich.

Im Teilvorhaben der TU Darmstadt erfolgt eine Beschreibung von Verformung und Anriss bzw. Bruch unter statischer und zyklischer Beanspruchung an der einkristallinen Nickelbasis-Gusslegierung SC2000 sowie an der gerichtet erstarrten Legierung Alloy247DS. Belastbare zeit- und zykluszahlabhängige Daten in Abhängigkeit von bauteiltypischen Beanspruchungsparametern werden für eine robuste Beschreibung des komplexen Hochtemperaturwerkstoffverhaltens als Grundlage für die Lebensdauerbewertung benötigt. Die zu erarbeitenden Werkstoffbeschreibungen sind von direktem Nutzen für die industrielle Anwendung.

2. Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die wesentlichen Voraussetzungen waren dadurch gegeben, dass die Projektpartner aufgrund der vorliegenden individuellen Kenntnisse und Erfahrungen alle anfallenden Aufgaben besonders kooperativ erledigten.

Das IfW ist seit Jahrzehnten eine von der Industrie anerkannte Prüf- und Forschungsstelle für statische und zyklische Untersuchungen an Hochtemperaturwerkstoffen des thermischen Maschinen- und Anlagenbaus. Neben Kriechbeschreibungen ist das IfW auch mit der Beschreibung des Ermüdungs- und Kriechermüdungsverhaltens befasst und besitzt daher vielfältige experimentelle und theoretische Kenntnisse und Erfahrungen. Diese liegen insbesondere auf den Gebieten der Modellierung des Kriechverhaltens und der Streubandanalyse von Kriech- und Zeitstandbruchdaten. Durch die Mitarbeit in vielen nationalen und europäischen Forschungsvorhaben liegen am IfW vielfältige Erfahrungen hinsichtlich der Auswertung von Hochtemperaturrexperimenten und der Bewertung der geprüften Eigenschaften vor.

3. Planung und Ablauf

Für die Arbeiten in diesem Teilvorhaben standen Personalmittel für einen wissenschaftlichen Mitarbeiter, einen Techniker und eine studentische Hilfskraft zur Verfügung. Die Projektleitung erfolgte durch Dr.-Ing. A. Scholz. Die Sachbearbeitung wurde im Projektzeitraum durch Frau Dr.-Ing. Y. Wang durchgeführt. Die Institutsleitung obliegt Frau Prof. Dr.-Ing. C. Berger. Die Planung und die Durchführung der Arbeiten in diesem Teilvorhaben erfolgten in Absprache mit den Projektpartnern.

Warmzugversuche

Die Durchführung der Warmzugversuche [1] wurde in Anlehnung an DIN EN 10 002, Teil 5 [2] unter Regelung des Kolbenwegs in einer rechnergesteuerten servohydraulischen Zugprüfmaschine mit 100 kN maximaler Prüfkraft und laufender Dehnungsmessung mit einem axial wirkenden Extensometer mit hochauflösenden kapazitiven Dehnungsaufnehmern durchgeführt. Die Dehngeschwindigkeit beträgt bis zum Überschreiten der 1 %-Dehngrenze 0,5 %/min und bis zum Bruch der Probe 5 %/min. Für die Warmzugversuche werden IfW-Proben vom Typ 21 (Bild 1) herangezogen. Das Messlängenverhältnis $L_0/d_0 = 5$ entspricht dem Standard.

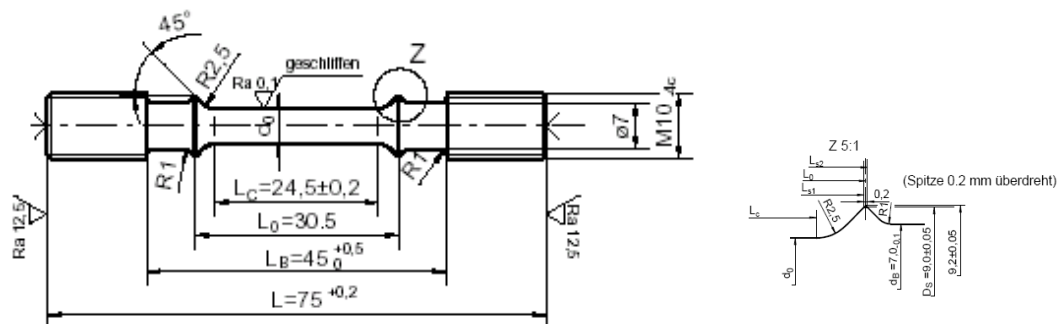


Bild 1: IfW-Probe vom Typ 21 für Warmzug- und Zeitstandversuche

Zur Probenerwärmung wurde ein 3-Zonen-Konvektionsofen eingesetzt. Die Temperaturmessung erfolgte mit Pt-RhPt-Thermoelementen (Typ S). Die Kalibrierung der Thermoelemente erfolgte nach einem am IfW entwickelten 4-rangigen Kalibriersystem [3] mit Anbindung an den nationalen Standard (PTB/Braunschweig).

Zeitstandversuche

Die Zeitstandversuche wurden in Zeitstandeinzelprüfmaschinen mit Gewichtsbelastung (Bild 2) nach der in [1, 3] beschriebenen Prüftechnik und nach DIN EN 10291 [4] durchgeführt. Die Durchführung der Zeitstandversuche erfolgte mit IfW-Proben vom Typ 21 (Bild 1), wie sie auch für die Warmzugversuche eingesetzt werden. Die Probenerwärmung erfolgte wieder mit 3-Zonen-Konvektionsöfen. Zur Temperaturmessung wurden ebenfalls Pt-RhPt-Thermoelemente verwendet. Die Aufbringung der Belastung erfolgt stopfrei und mit einer Belastungsgeschwindigkeit entsprechend der anfänglichen Belastung im Warmzugversuch. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in logarithmischer Auftrag von Dehnung über Zeit bzw. Spannung über Zeit sowie den Werten für Bruchdehnung A_u und Brucheinschnürung Z_u . Die Messunsicherheit bezüglich der Temperatur beträgt bis 600°C max. $\pm 3^\circ\text{C}$, bis 800°C $\pm 4^\circ\text{C}$ und bis 1000°C $\pm 5^\circ\text{C}$ und entspricht damit den Normvorgaben. Die Messunsicherheit der Prüfkraft max. $\pm 1\%$ der max. Kraft in der Versuchsserie. Die bezüglich der Verlängerung bzw. Dehnung beträgt die Messunsicherheit max. $\pm 3\mu\text{m}$ entsprechend max. rd. $\pm 0,01\%$ im Dehnung.

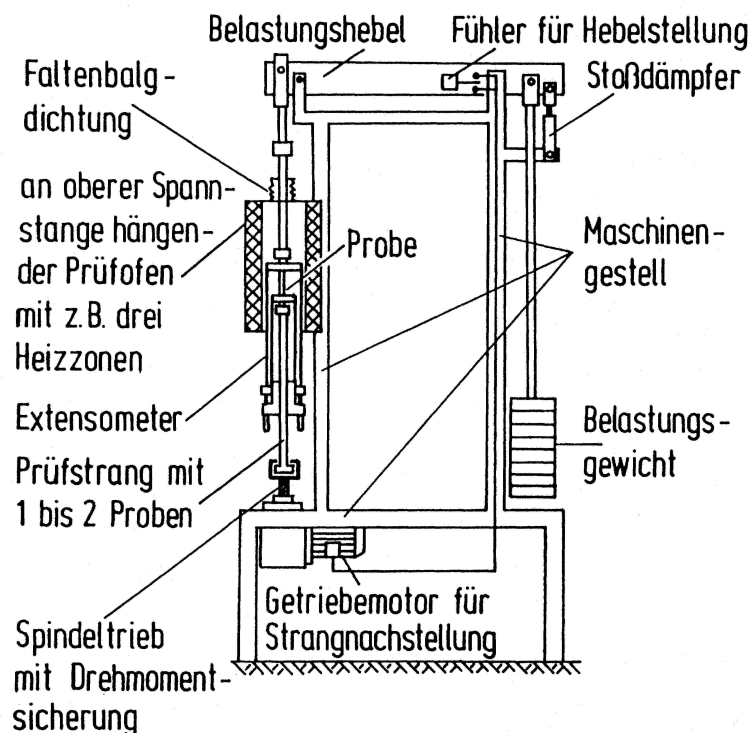


Bild 2: Hebelgewichtbelastete Zeitstandeinzelprüfmaschine, Bauart Mohr und Federhaff für 1 bis 2 Proben und Prüftemperaturen bis 1300 °C [1, 3]

LCF-Versuche

Die Durchführung der Standarddehnwechselfersuche (LCF-Versuche) erfolgte in Anlehnung an entsprechende Normen [5] unter Regelung der axialen Gesamtverlängerung in einer servohydraulischen Dehnwechselfprüfmaschine (Bild 3). Die Dehnwechselfersuche wurden an IfW-Proben des Typs 39a (Bild 4) durchgeführt. Die axiale Gesamtverlängerung wurde mittels eines Seitenextensometers mit keramischen Messstangen am zylindrischen Teil der Probe abgegriffen.



Bild 3: Prüfaufbau einer servohydraulischen Prüfmaschine zur Durchführung dehnungsgeregelter Ermüdungsversuche (mit Seitenextensometer für den axialen Dehnungsabgriff) und kraft geregelter Ermüdungsversuche

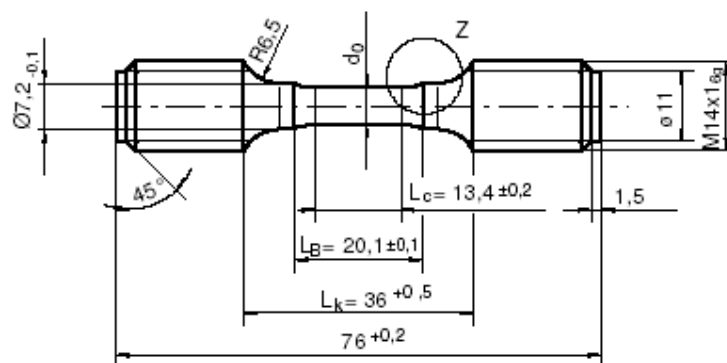


Bild 4: IfW-Probe des Typs 39a für LCF-Versuche

Zur Probenerwärmung diente ein Einzonen-Infrarot-Strahlungsofen. Die Prüftemperatur wurde in Probenmitte mit PtRh-Pt-Thermoelementen gemessen. Zur Absicherung eines konstanten Verlaufes längs der Probe erfolgen hier zusätzliche Temperaturmessungen an den Probenbunden. Die Temperatur an den drei Messstellen wurde während des Versuchs auf $\pm 1^\circ\text{C}$ eingehalten. Die Angaben zur Messunsicherheit für Temperatur und Kraft entsprechen den Werten bei den Zeitstandversuchen. Die Messunsicherheit bei der Dehnung beträgt rd. $\pm 0,001\%$ in Dehnung.

Einen Überblick über LCF-Prüftechnik einschließlich Fragen zur Versuchsdurchführung und Einflussgrößen auf das Versuchsergebnis sind in [6 bis 10] zu finden.

HCF-Versuche

Die Durchführung der HCF-Versuche erfolgte unter Regelung der Prüfkraft in einer servohydraulischen Schwingprüfmaschine. Die HCF-Versuche erfolgten an IfW-Proben des Typs 39b (Bild 5).

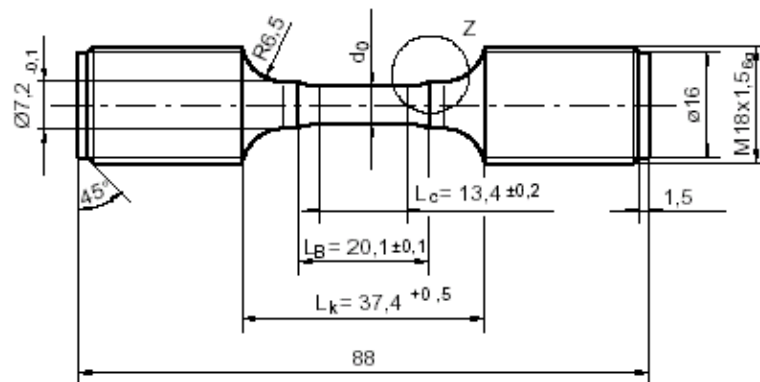


Bild 5: IfW-Probe des Typs 39b für HCF-Versuche

Die Kraft-Zeit-Vorgabe erfolgt über einen in die Regelelektronik integrierten Frequenzgenerator. Die Prüffrequenz beträgt 40 Hz Sinus. Für das Spannungsverhältnis A von Ausschlagsspannung σ_a und Mittelspannung σ_m wurde $A \approx 0,95$ vorgegeben mit dem Ziel, im Probenstrang stets eine geringe Vorspannkraft von maximal 5 % der Mittelspannung zu gewährleisten. Die Versuche wurden bis zum Probenbruch durchgeführt. Zur Probenerwärmung diente ein 3-Zonen-Konvektionsofen. Die Prüftemperatur wurde in Probenmitte wieder mit Pt-RhPt-Thermoelementen gemessen. Zur Absicherung eines konstanten Verlaufes längs der Probe erfolgen zusätzliche Temperaturmessungen an den Spannstäben. Die Messunsicherheiten entsprechen den Angaben zum LCF-Verhalten.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand des Wissens

Für die Beschaukelung leistungsfähiger, großer stationärer Gasturbinen stehen immer noch keine Legierungen zur Verfügung, welche die technischen Anforderungen des Kraftwerkbetriebes voll erfüllen sowie die wirtschaftliche Herstellung großer Schaufeln ermöglichen. Als besonders schwierig erweist sich das Feingießen großer Schaufeln für die vorderen Turbinenreihen. Um den hohen mechanisch-thermischen Beanspruchungen standhalten zu können, müssen diese Schaufeln mit einer stengelförmigen Kornstruktur abgegossen werden, was durch gerichtete Erstarrung erreicht wird. Im Flugtriebwerksbau lassen sich stengel- und einkristalline Schaufeln wegen ihrer kleinen Baugröße mit guter Qualität abgießen. Bei großen stationären Turbinen für den Kraftwerkbau bestehen dagegen noch weitgehend ungelöste Probleme. Die korrosive Beanspruchung bei Kraftwerksturbinen ist wegen stärkerer Luftverunreinigungen und häufig auch Brennstoffverunreinigungen von stärkerem Einfluss auf die Bauteillebensdauer als bei Flugtriebwerken.

Mit „Mittel-Chromlegierungen“ für stationäre Gasturbinenschaufeln wie IN 792 mit 12,5 % Cr und 3,5 % Al) [11], lassen sich gegenüber „Hoch-Chromlegierungen“ wie IN 738 LC mit 16 % Cr höhere Festigkeiten erzielen unter gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer ausreichenden Korrosionsbeständigkeit. Für große Laufschaufeln leistungsstarker Turbinen mit hohen Verbrennungs- und Materialtemperaturen reicht jedoch die Kriechfestigkeit dieser Werkstoffe nicht aus. Außerdem hat sich IN 792 als besonders schlecht gießbar für solche Schaufeltypen erwiesen. Die typischen, aus dem Flugtriebwerksbau stammenden Legierungen, wie CM 247 LC [12-14] bzw. Alloy 247 DS sind auf relativ hohe Kriechfestigkeit und gute Oxidationsbeständigkeit optimiert. Die statischen Festigkeitsanforderungen sowie Anforderungen hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit bei großen stationären Turbinen für den Kraftwerkbau sollten mit der Legierung Alloy 247 DS zu erfüllen sein.

Als Teilprojekt im Rahmen von COORETEC-Werkstoffe umfassen die Arbeiten eine experimentell abgesicherte Beschreibung von Verformung und Anriss bzw. Bruch unter statischer und zyklischer Beanspruchung an **Alloy247 DS** bei großen stationären Turbinen für den Kraftwerkbau bei Siemens und an **SC2000**, der von MTU neu entwickelten einkristallinen Legierungen für die vorderen Turbinenreihen in Flugtriebwerken in Abhängigkeit von bauteiltypischen Beanspruchungsparametern und Kristallorientierung sowie metallographischen Nachuntersuchungen.

Angestrebt wird eine robuste Beschreibung des komplexen Werkstoffverhaltens auf der Grundlage belastbarer experimenteller Daten mit Referenzcharakter und

eine Dokumentation der Arbeitsschritte. Die zu erarbeitenden Werkstoffbeschreibungen sind von direktem Nutzen für die industrielle Anwendung.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen/Kooperation

Industriepartner

- Siemens AG, Power Generation, Aufgaben: Projektfederführung, Materialbeschaffen, Auswertung von Versuchsdaten der Legierung **Alloy247 DS**, Viskoplastisches Werkstoffgesetz, Service Feedback.
- MTU Aero Engines GmbH, Aufgaben: Materialbeschaffen und Probenherstellung, Auswertung von Versuchsdaten der Legierung **SC2000**, Modellbildung, Konzept & Prototyp des Expertensystems, Implementieren von Servicedaten, Abgleich Lebensdauer/Servicedaten.

Institutspartner

- Forschungszentrum Jülich, Aufgaben: Einfluss von Schichten auf die Lebensdauer, Modellbildung TMF-Lebensdauer.
- Technische Universität Darmstadt, Institut für Werkstoffkunde (IfW), Aufgaben: Bestimmung maßgeblicher mechanischer Kurz- und Langzeiteigenschaften in statischen sowie nieder- und hochfrequenten zyklischen Versuchen, sowie metallographische Bewertung der Probenbefunde.

Im einzelnen hatte das IfW die Aufgabe übernommen, an den Legierungen Alloy 247 DS und SC2000 die maßgeblichen mechanischen Eigenschaften zu bestimmen und hierzu Zeitstand- und Warmzugversuche sowie (LCF-) Dehnwechselversuche, HCF-Versuche durchzuführen. Metallographische Nachuntersuchungen, auch zum Einfluss der Kristallorientierung und Modellbildung zum Kriech- und Ermüdungsverhalten wurden vom IfW vorgenommen.

II Eingehende Darstellung

6 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

6.1 Aufstellung über die erbrachten Leistungen

Experimentelle Arbeiten:

Einkristalline Nickelbasisgusslegierung SC2000

- 4 Warmzugversuche
- 16 Zeitstandversuche bei 900 und 1100°C
- 19 HCF-Versuche bei 550°C und 900°C
- 19 LCF Versuche bei 800°C, 900°C und 1000°C
 - <001> 10 Versuche
 - <111> 9 Versuche

Gerichtet erstarrte Nickelbasisgusslegierung Alloy 247DS

- 6 Warmzugversuche
- 21 Zeitstandversuche bei 750°C, 850°C und 950°C
 - <längs> 9 Versuche
 - <quer> 9 Versuche
 - <45°> 3 Versuche
- 33 LCF Versuche bei 750°C, 850°C und 950°C
 - <längs> 15 Versuche
 - <quer> 16 Versuche
 - <45°> 2 Versuche

Theoretische Arbeiten:

Das Komplexe Kriechverhalten der Legierungen wurde mit der alle drei Kriechbereich umfassenden Garofalo-Gleichung modelliert. Das Zeitdehn- und Zeitstandbruchverhalten wurde mithilfe des Larson-Miller-Parameters modelliert.

Das Ermüdungsverhalten wurde hinsichtlich Anriss mit der Manson-Coffin-Gleichung und hinsichtlich zyklischer Verformung mit der Ramberg-Osgood-Gleichung modelliert.

Metallographische Untersuchungen tragen zur Bewertung der ermittelten Verformungs- und Lebensdauerergebnisse bei.

6.2 Experimentelle Arbeiten

6.2.1 Kurzzeitverhalten

SC2000

Die Warmzugversuchsergebnisse des Werkstoffes SC2000 zeigen in Bild 6 bis 8. Die Versuchsparameter und die wichtigsten Versuchsergebnisse, nämlich der Elastizitätsmodul E (Bild 7), die Dehngrenzen $R_{P0,2}$, $R_{P0,5}$ und R_{P1} , die Zugfestigkeit R_m (Bild 6) sowie die Bruchdehnung A und die Brucheinschnürung Z (Bild 8) sind für $\langle 001 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$ Orientierungen bei 900°C und 1100°C dargestellt. Die im Warmzugversuch ermittelten Festigkeitskennwerte $R_{P0,2}$, $R_{P0,5}$, R_{P1} und R_m (Bild 6) weisen bei der Orientierung $\langle 001 \rangle$ durchschnittlich um 10% höhere Werte im Vergleich zur Orientierung $\langle 111 \rangle$ auf. Bei der Orientierung $\langle 001 \rangle$ zeigt der Elastizitätsmodul dagegen um 2,5 fach niedrigere Werte als bei der Orientierung $\langle 111 \rangle$ (Bild 7). Bei den Verformungskennwerten nämlich der Bruchdehnung A und die Brucheinschnürung Z (Bild 8) sind jedoch keine systematischen Einflüsse der Orientierung bei 900°C zu erkennen, bei 1100°C dagegen besitzt die Orientierung $\langle 001 \rangle$ höhere Verformungskennwerten als bei der Orientierung $\langle 111 \rangle$.

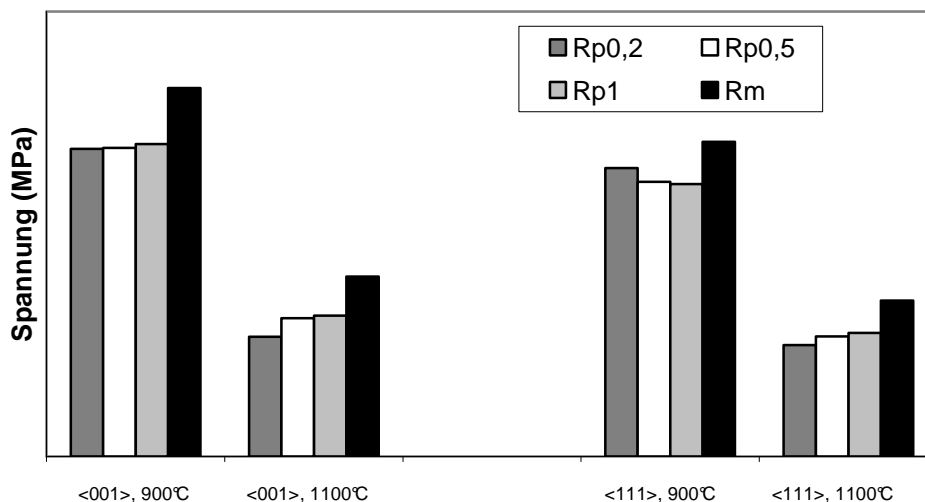


Bild 6: Warmzugversuchsergebnisse, SC2000

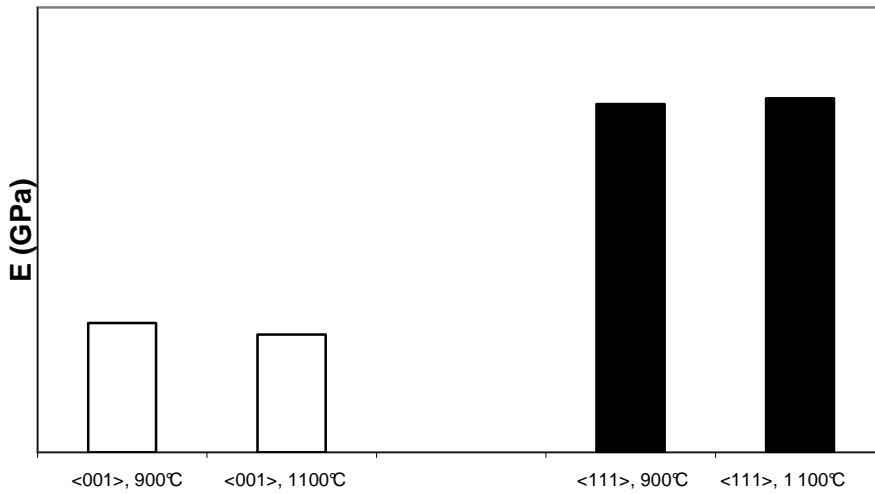


Bild 7: Warmzugversuchsergebnisse, E-Modul, SC2000

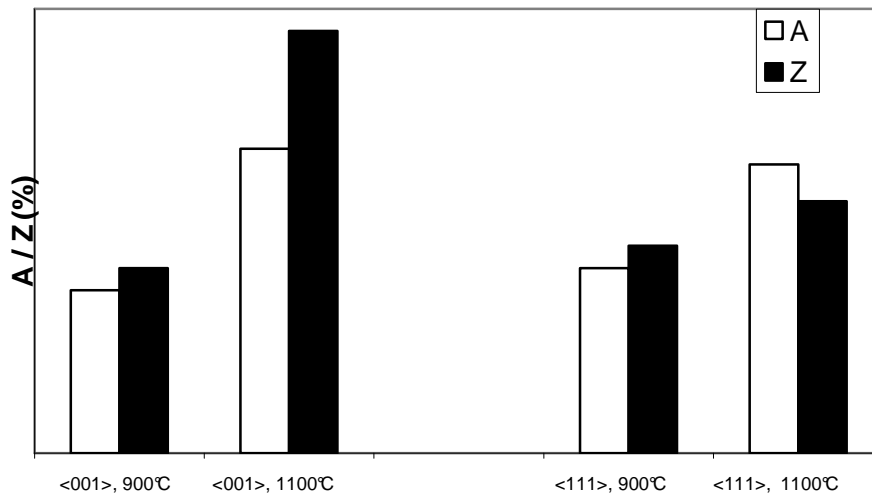


Bild 8: Warmzugversuchsergebnisse, Bruchdehnung und Brucheinschnürung, SC2000

Die Einordnung der Ergebnisse des Vorhabens in Literaturdaten einer vergleichbaren Legierung zeigen die Bilder 9 bis 11. Aufgetragen sind die Literaturdaten als Lienenverläufe, während die Ergebnispunkte aus dem Vorhaben entsprechend ihrer Kristallorientierung dargestellt sind. Insgesamt ordnen sich die Ergebnisse der Legierung SC2000 in die Daten aus der Literatur ein.

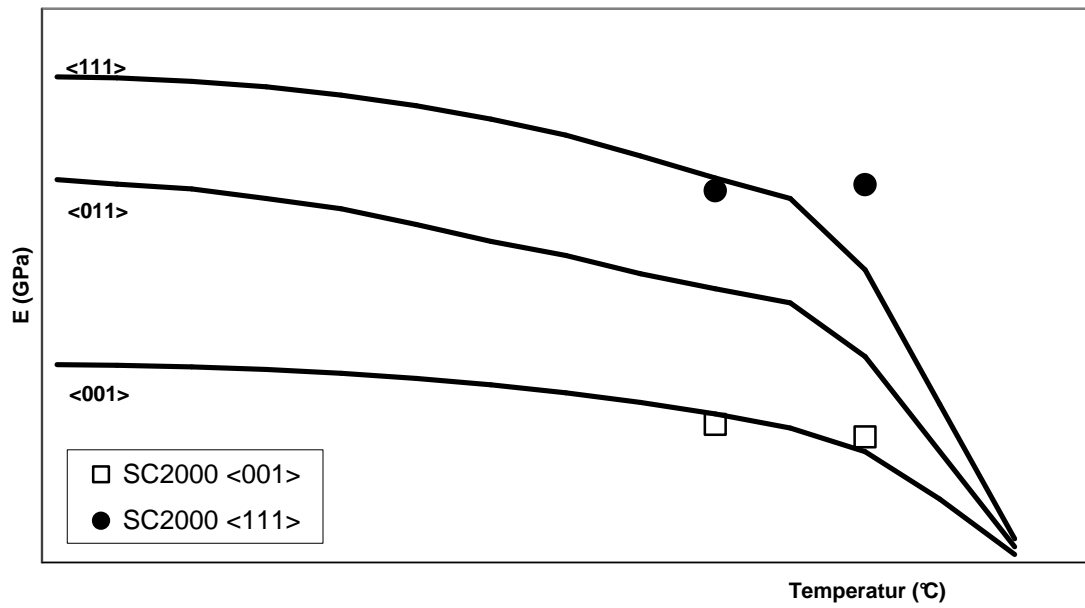


Bild 9: E-Modul der Legierung SC2000 im Vergleich zu Werten der Referenzlegierung, Ergebnisse aus Warmzugversuchen

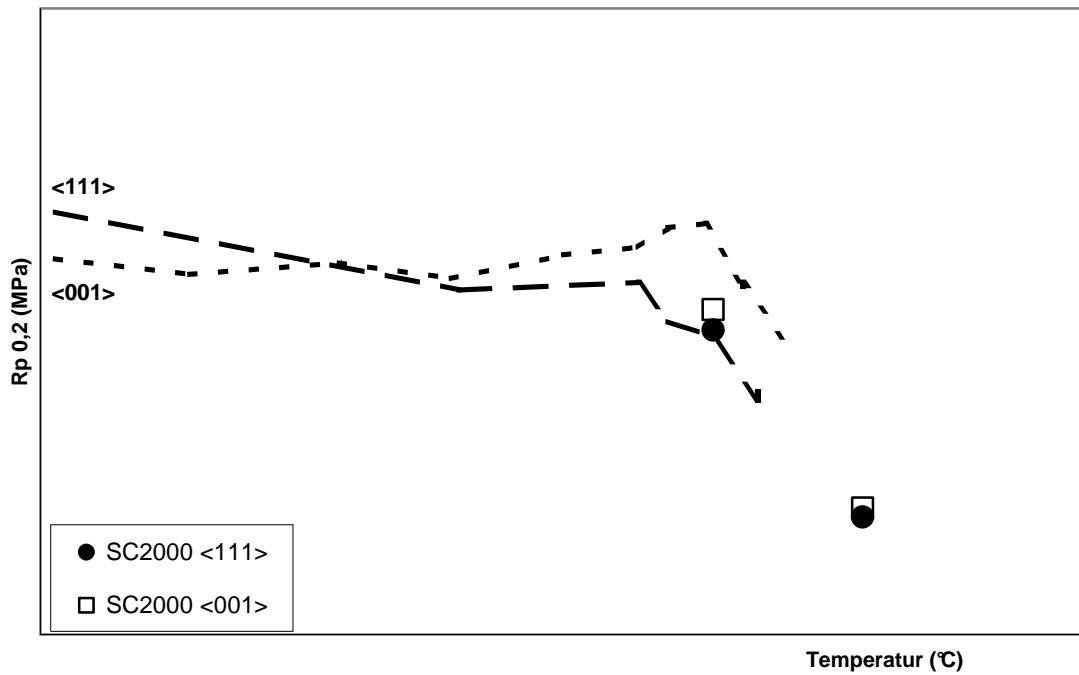


Bild 10: 0,2%-Dehngrenze (Rp0,2) der Legierung SC2000 im Vergleich zu Werten der Referenzlegierung

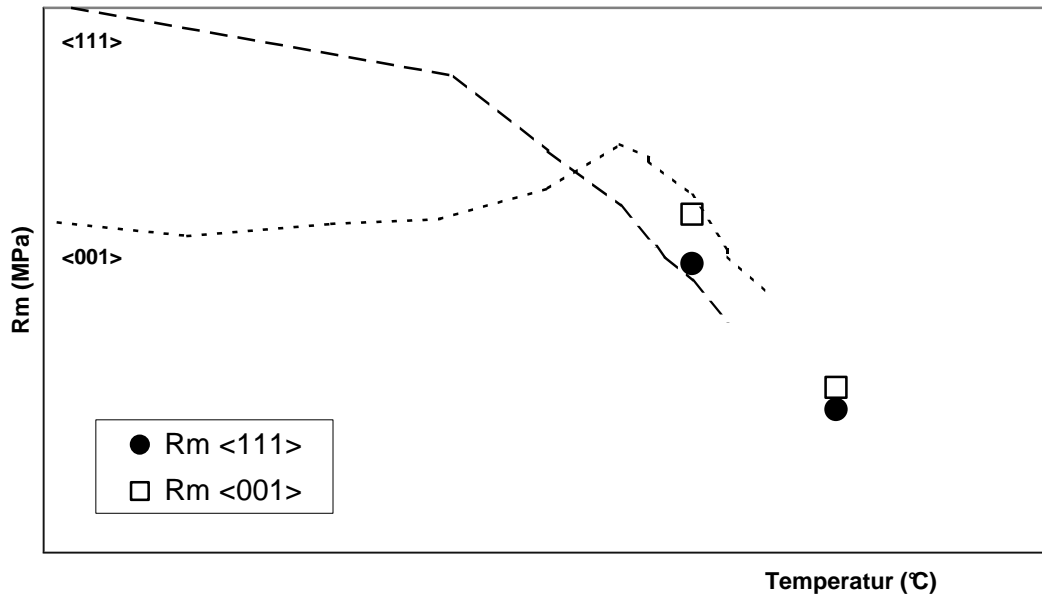


Bild 11: Zugfestigkeit R_m der Legierung SC2000 im Vergleich zu Werten der Referenzlegierung

Alloy 247DS

Die Ergebnisse der Warmzugversuche am Werkstoff Alloy247 DS sind in Bild 12, 14 und 16 dargestellt. Die Werte der Dehngrenzen $R_{P0,2}$, $R_{P0,5}$ und R_{P1} , die Zugfestigkeit R_m (Bild 12) sowie die Bruchdehnung A und die Brucheinschnürung Z (Bild 16) zeigen eine systematische Abhängigkeit von der Temperatur und den Orientierungen „längs“ und „quer“. Festigkeitskennwerte weisen bei der Orientierung „längs“ durchschnittlich höhere Werte im Vergleich zur Orientierung „quer“ auf. Der Elastizitätsmodul dagegen zeigt bei der Orientierung „längs“ niedrigere Werte als bei der Orientierung „quer“ (Bild 14). Die Korngrenzen in der Richtung „längs“ entlang der Beanspruchungsrichtung und die Korngrenzen in der Richtung „quer“ senkrecht zu der Beanspruchungsrichtung zeigen sich deutlich in Bild 12. Im Vergleich zu Literaturdaten weisen die Festigkeitskennwerte $R_{p0,2}$ in Bild 13 und der Elastizitätsmodul in Bild 15 höhere auf.

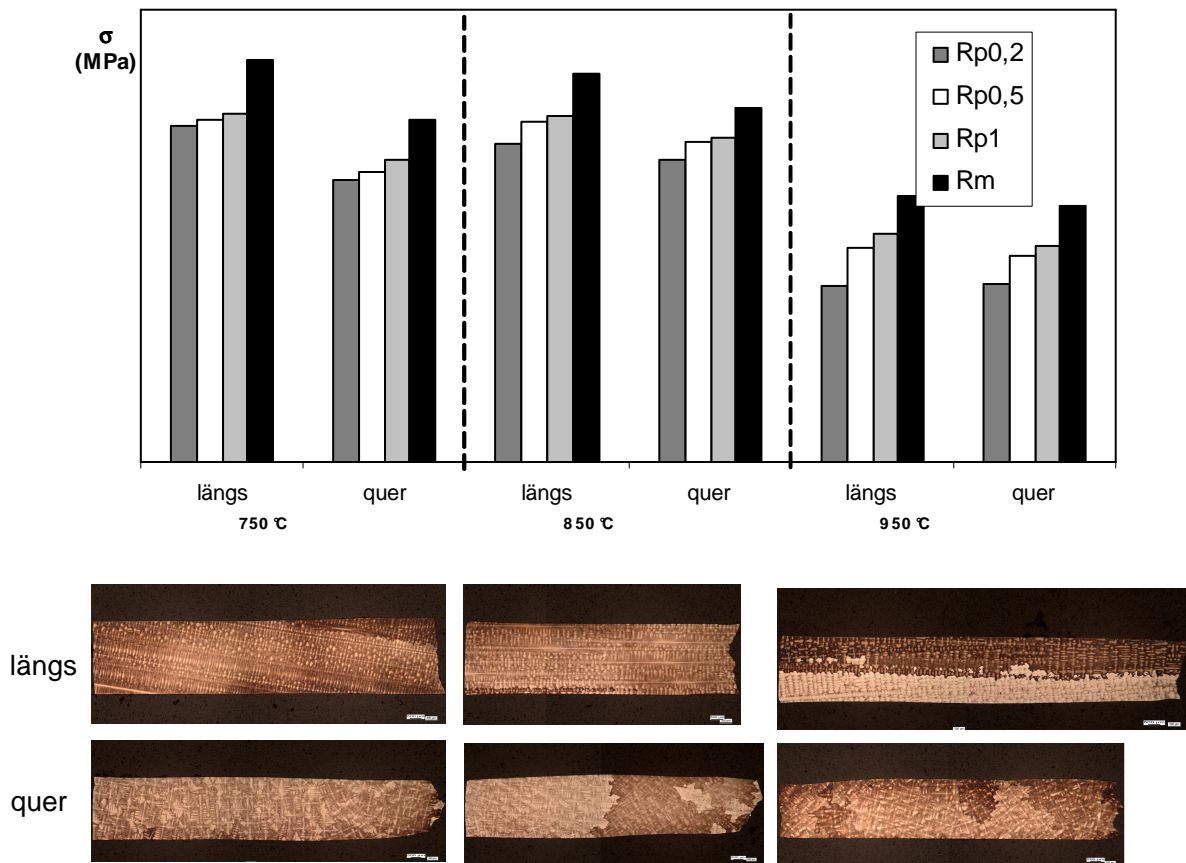


Bild 12: Ergebnisse der Kurzzeiteigenschaften aus Warmzugversuchen, Alloy 247DS

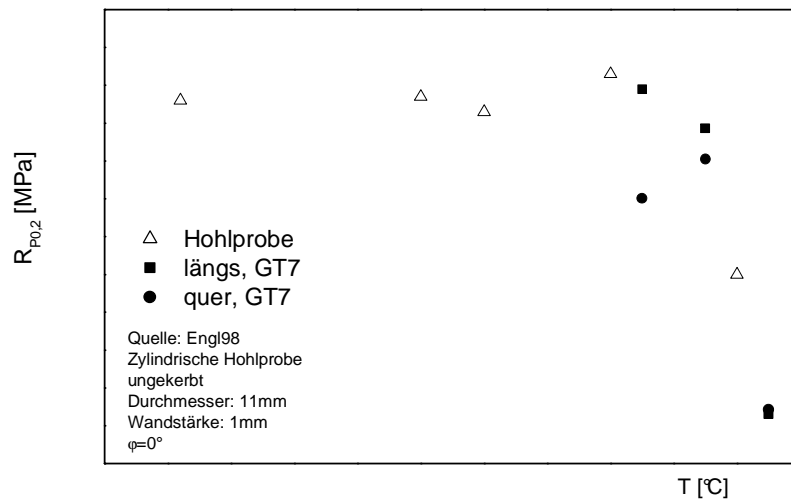


Bild 13: Streckgrenze $R_{p0,2}$, Alloy 247DS im Vergleich zur Literaturdaten

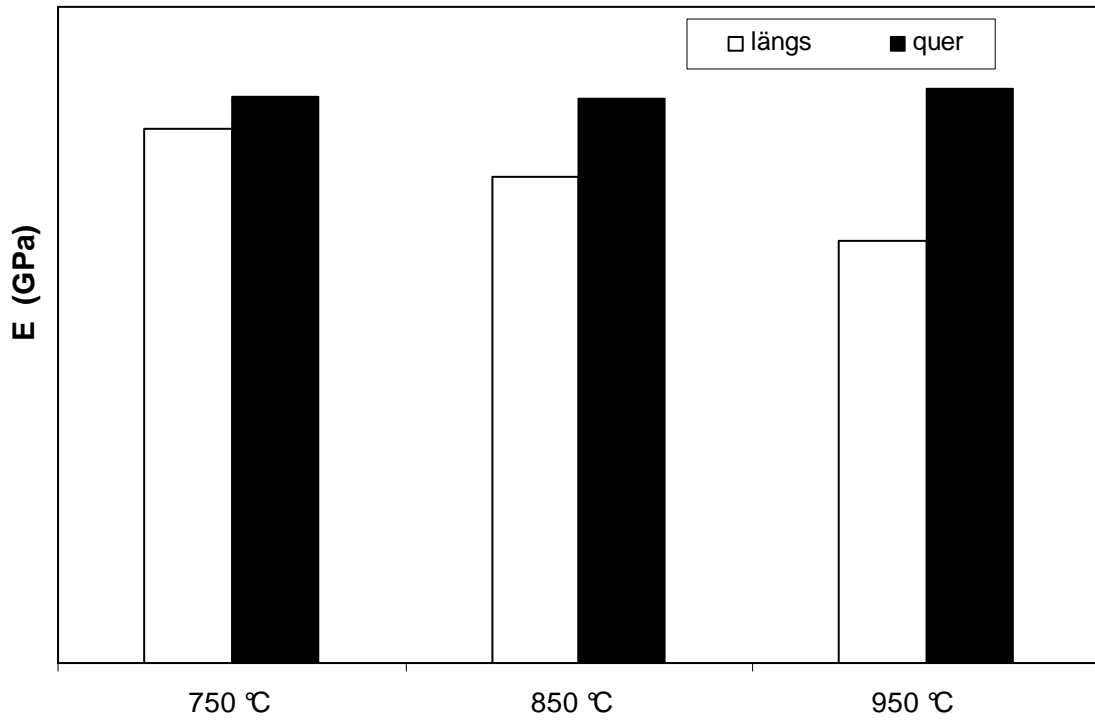


Bild 14: Elastizitätsmodul E ermittelt aus den Zugversuchen bei unterschiedlicher Temperatur und Orientierung, Alloy 247DS

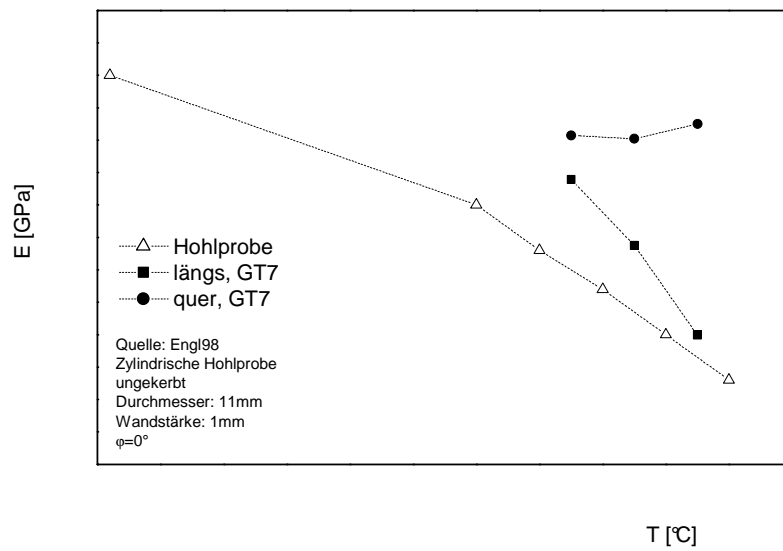


Bild 15: Elastizitätsmodul E, Alloy 247DS im Vergleich zur Literaturdaten

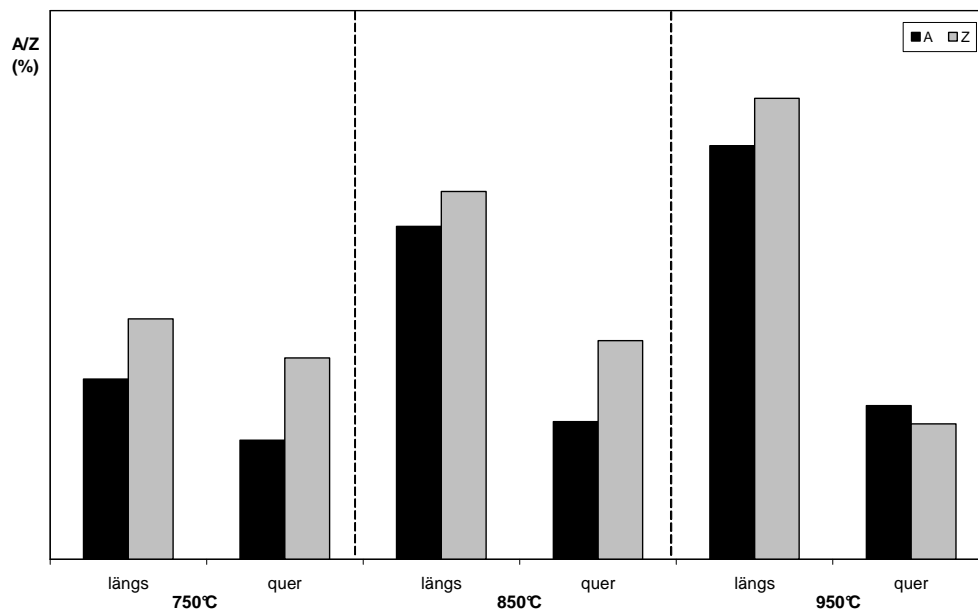


Bild 16: Ergebnisse der Bruchverformungskennwerte der Warmzugversuche gemäß Bild 12, Bruchdehnung A und Brucheinschnürung Z, Alloy 247DS

6.2.2 Zeitstandverhalten

SC2000

Die Ergebnisse zur Kriechverformung am Werkstoff SC2000 für beide Orientierungen zeigen eine systematische Staffelung der Spannungen (Bild 17 und 18). Zur 1%-Zeitdehngrenze sowie der Zeitbruchdehnung und Zeitbrucheinschnürung am Werkstoff SC2000 ordnen sich in die Literaturangaben am Referenzwerkstoff jedoch bei anderen Temperaturen ein (Bild 19 und 20). Diese Beobachtung gilt für beide Orientierungen $\langle 001 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$.

Ein zusammenfassende Darstellung in der Larson – Miller Auftragung (Bild 21) zeigt für die Referenzlegierung systematische Unterschiede zwischen den beiden Orientierungen. Bei der hier untersuchten Legierung SC2000 sind diese Unterschiede jedoch geringer. Die einzelnen Messpunkte ordnen sich in ein relativ schmales Streuband ein.

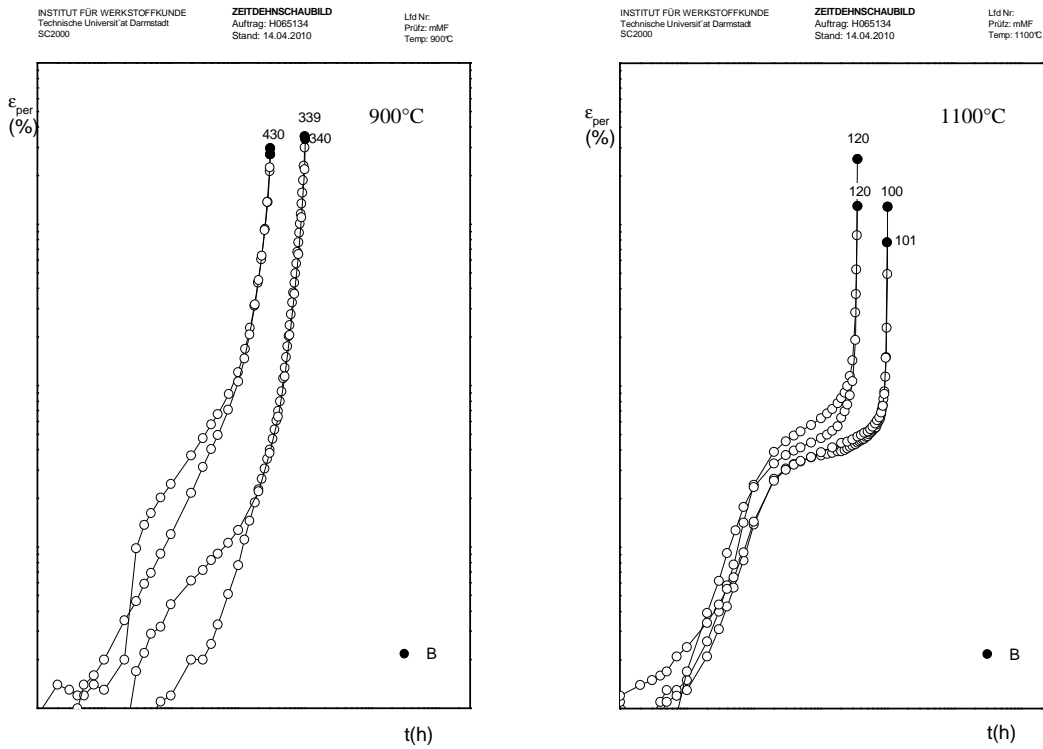


Bild 17: Kriechkurven bei den Temperatur 900°C und 1100°C, Orientierung <001>, SC2000

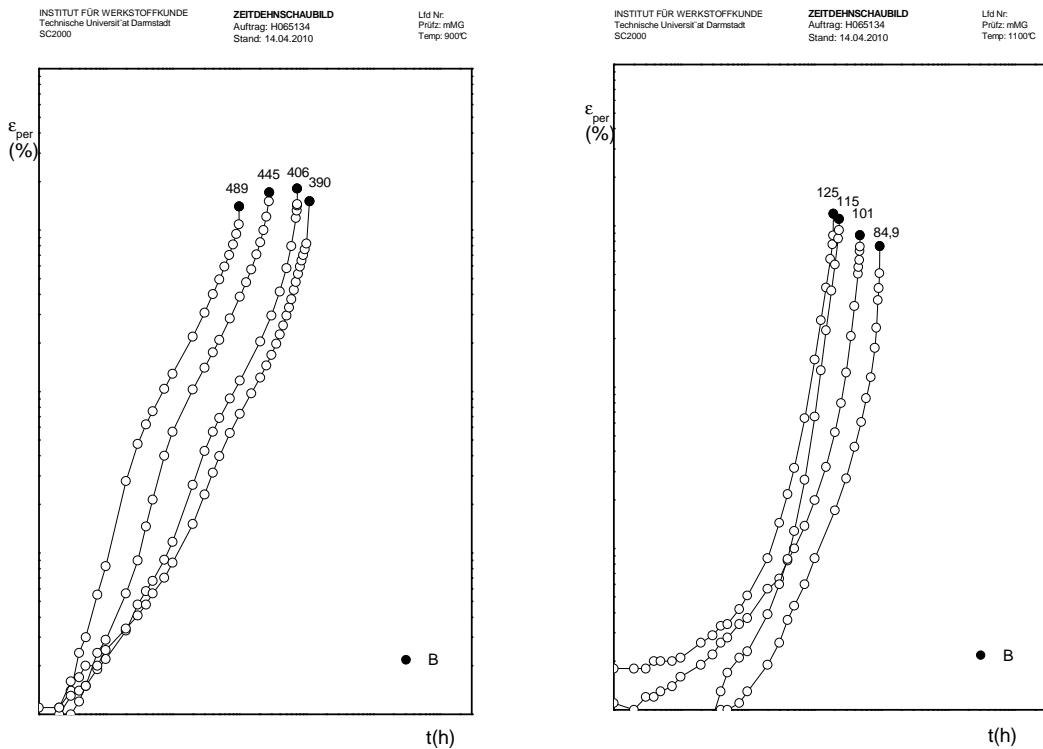


Bild 18: Kriechkurven bei den Temperatur 900°C und 1100°C, Orientierung <111>, SC2000

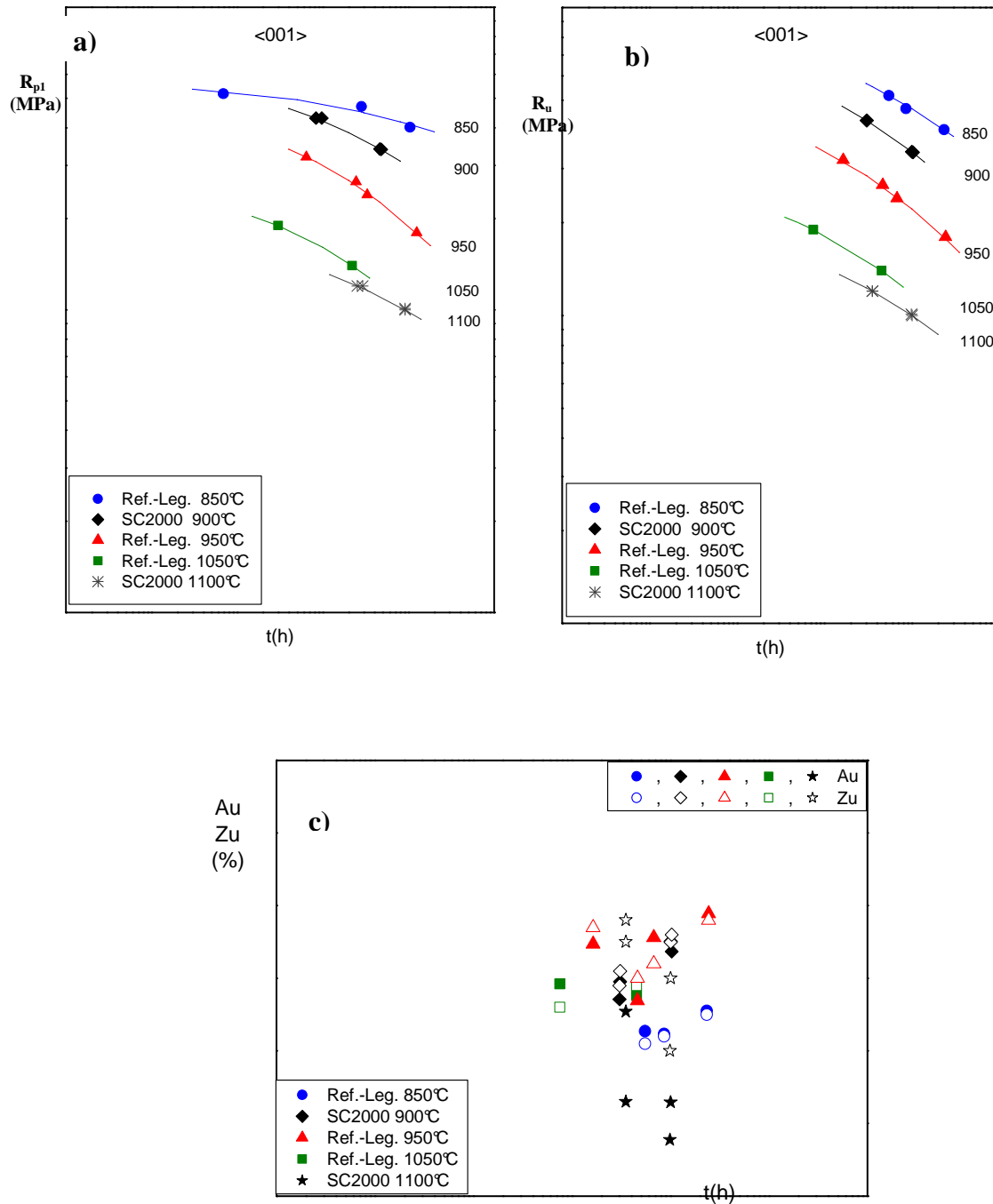


Bild 19: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, SC2000, <001>, a) 1% Zeitdehngrenze R_{p1} , b) Zeitstandfestigkeit R_u , c) Zeitbruchdehnung A_u , Zeitbrucheinschnürung Z_u

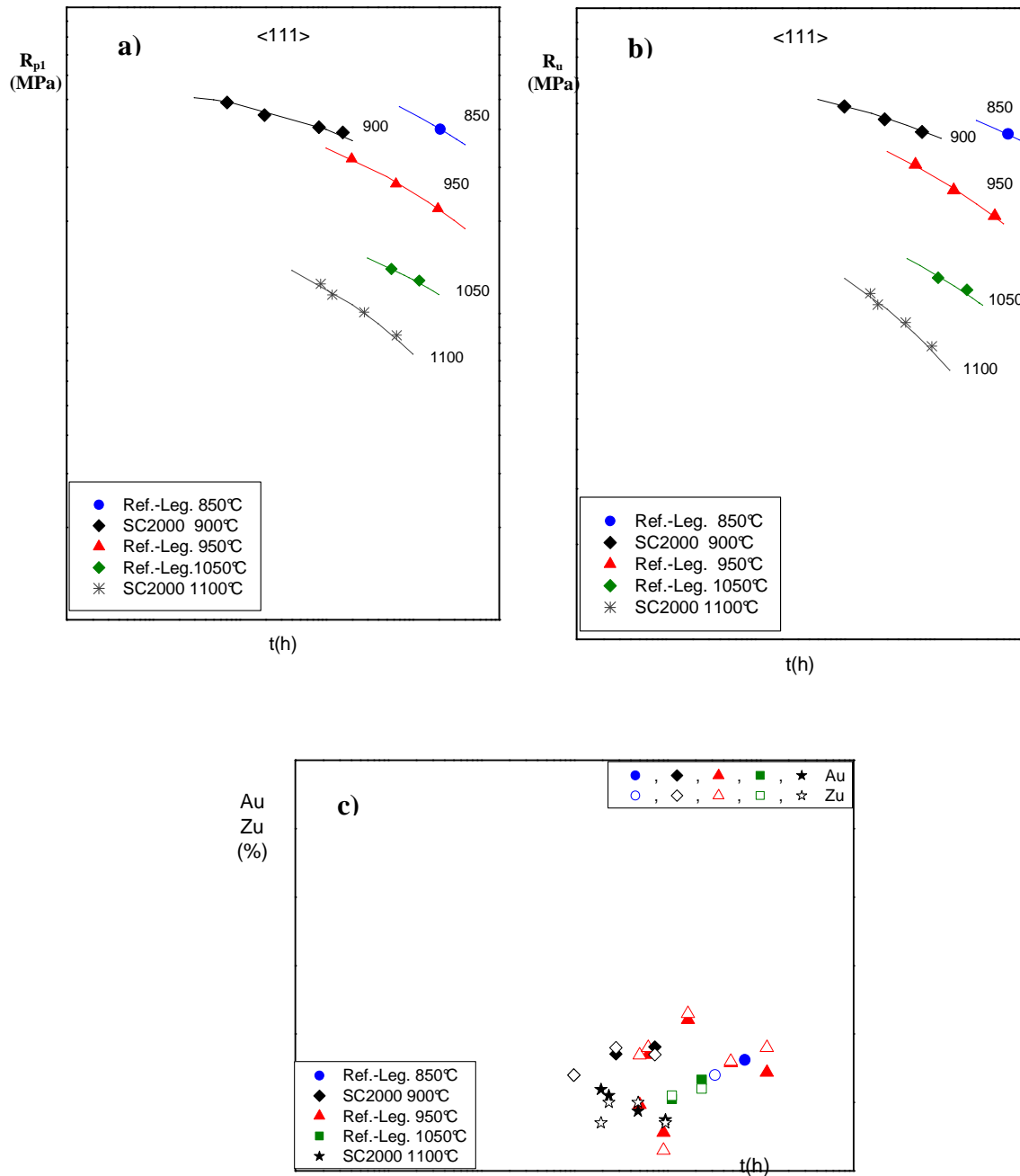


Bild 20: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, SC2000, <111>, a) 1% Zeitdehngrenze R_{p1} , b) Zeitstandfestigkeit R_u , c) Zeitbruchdehnung A_u , Zeitbrucheinschnürung Z_u

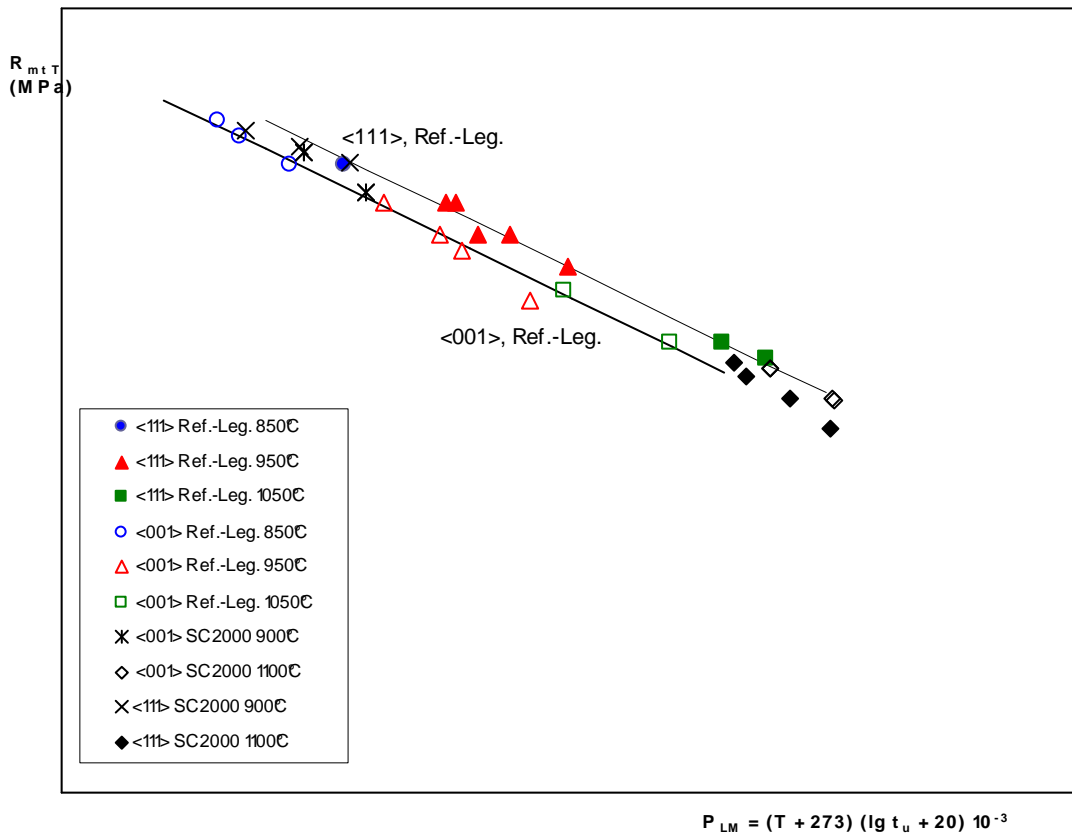


Bild 21: Ergebnisse der Zeitstandfestigkeit R_{ut} in der Larson-Miller-Darstellung für die Legierung SC2000 und die Referenzlegierung, $\langle 001 \rangle$ und $\langle 111 \rangle$ Orientierungen

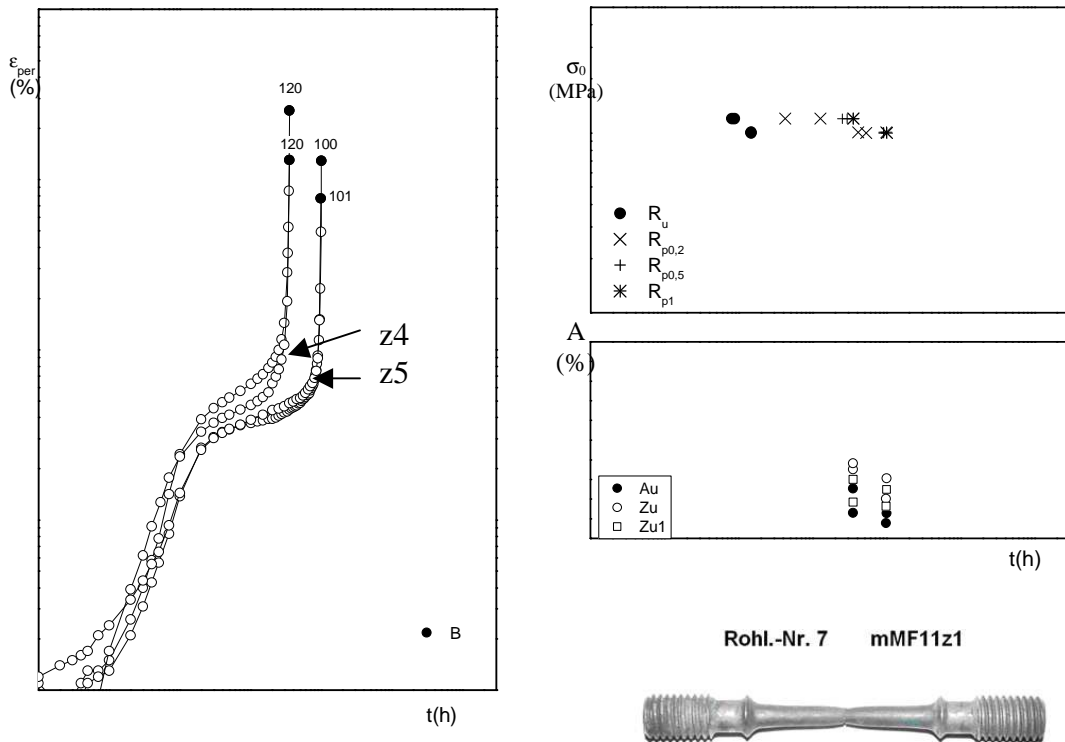


Bild 22: Zeitstandeigenschaften SC2000 bei Temperatur 1100°C, $\langle 001 \rangle$

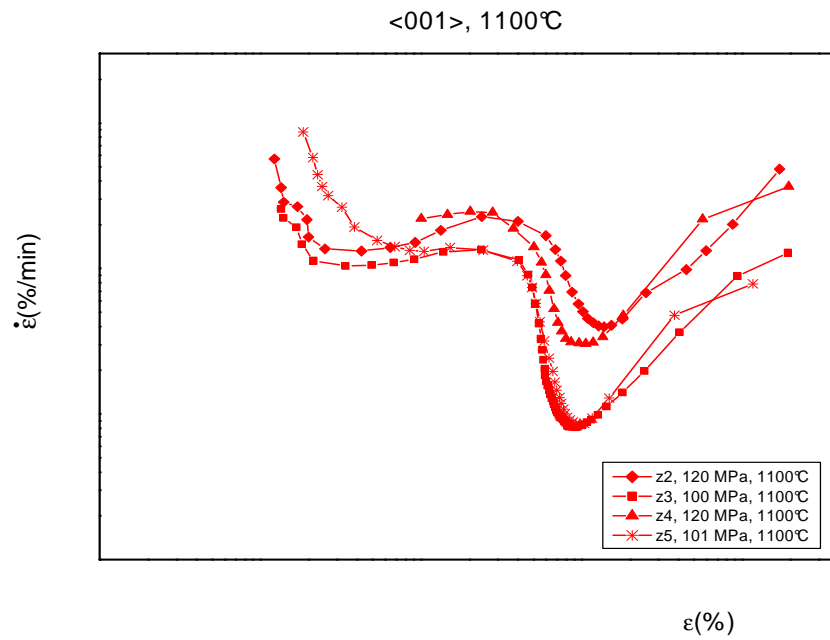


Bild 23: Kriechgeschwindigkeit gegenüber Kriechdehnung SC2000, <001> 1100°C

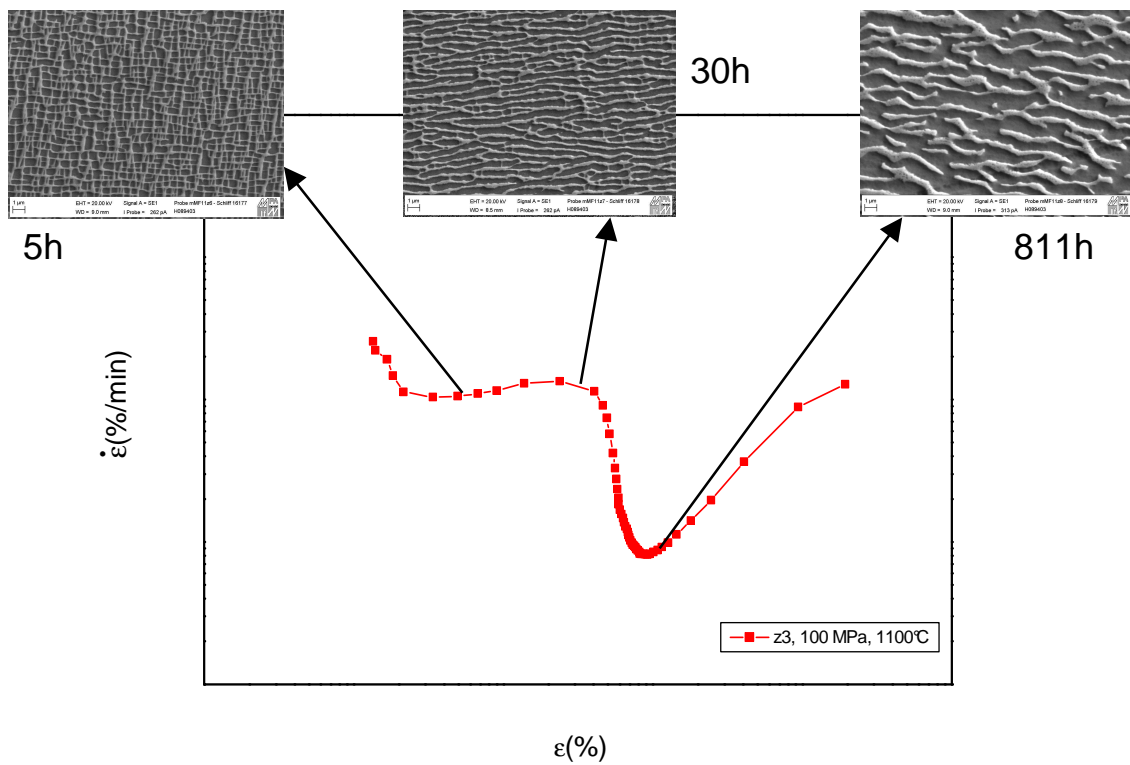


Bild 24: Veränderung der γ' -Teilchenmorphologie im Laufe des Kriechens bei 1100°C und 100 MPa. REM-Aufnahmen, γ' -Ätzung

Zur Beobachtung von sekundären Kriechbereichen in $\langle 001 \rangle$ Richtung bei 1100°C (Bild 22 und 23) lassen sich folgende Aussagen treffen:

Um die Entwicklung der Mikrostruktur bei 1100°C verfolgen zu können, wurden Proben bis zu ausgezeichneten Punkten der Kriechkurve verformt und anschließend mikrostrukturellen Untersuchungen unterworfen (Bild 24). Im ersten Minimum der Kriechrate nach 0,05% Dehnung sind gegenüber dem unverformten Ausgangszustand keine erkennbaren Veränderungen eingetreten. Die würfelförmige γ' -Ausscheidungsmorphologie ist noch erhalten. Nach dem anschließenden leichten Anstieg der Verformungsrate ($\epsilon=0,3\%$) sind die vertikalen Matrixgebiete fast verschwunden. Im absoluten Minimum der Kriechrate nach Dehnung von 0,9% beobachtet man schon eine leichte Vergrößerung der ideal entwickelten γ/γ' -Floßstruktur. Die Entstehung der Floßstruktur mit einer Abnahme der Kriechgeschwindigkeit verbunden ist, führt unter diesen Verformungsbedingungen die Floßbildung zu einer Verbesserung der Kriecheigenschaften. Der Grund dafür ist, dass die γ' -Flöße bis zum Durchlaufen von $\dot{\epsilon}_{\min}$ nicht geschnitten werden und damit nur durch Klettern überwunden werden können.

Alloy247DS

Die Ergebnisse am Werkstoff Alloy 247 DS (längs und quer) und zur 1% Zeitdehngrenze ordnen sich in die Literaturangaben am Werkstoff CM 247 LC-DS jedoch bei anderen Temperaturen ein (Bild 25-33). Der Vergleich des Zeitstandverhaltens zwischen längs und quer in Bild 29 und 30 zeigt einen Unterschied bei 700°C auf. Die Kriechverformungswerte in Bild 31 weisen in Richtung längs höhere Werte auf als in Richtung quer. Ein zusammenfassende Darstellung in der Larson-Miller-Auftragung (Bild 32 und 33) zeigt für die Legierung Alloy 247 DS und die Referenzlegierung CM 247 LC-DS keine Unterschiede. Die einzelnen Messpunkte ordnen sich in ein relativ schmales Streuband ein, wobei diese Aussage für längs und quer gilt.

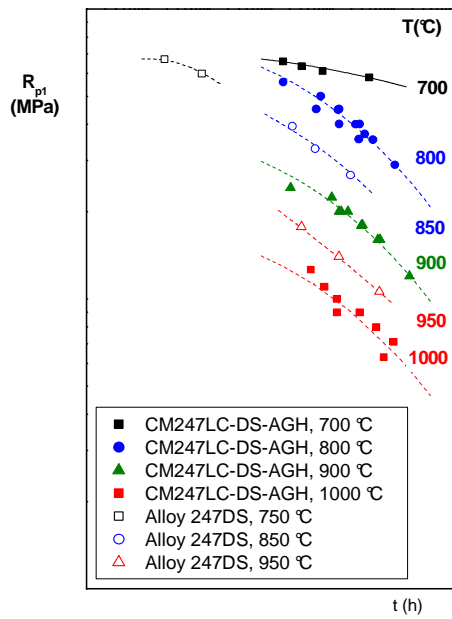


Bild 25: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, Alloy247DS und die Referenzlegierung CM247LC-DS, längs, 1% Zeitdehngrenze R_{p1}

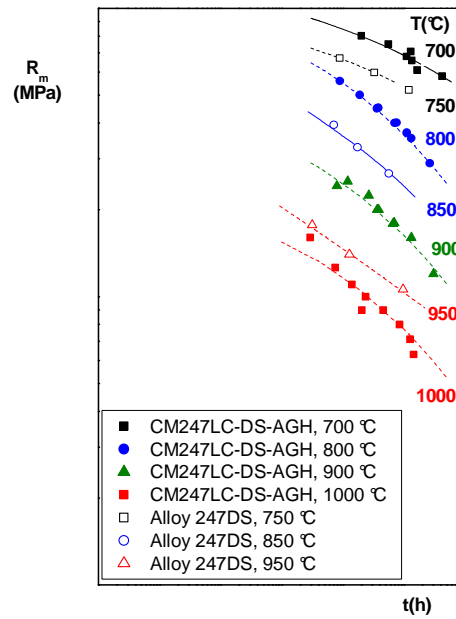


Bild 26: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, Alloy247DS und die Referenzlegierung CM247LC-DS, längs, Zeitstandfestigkeit R_m

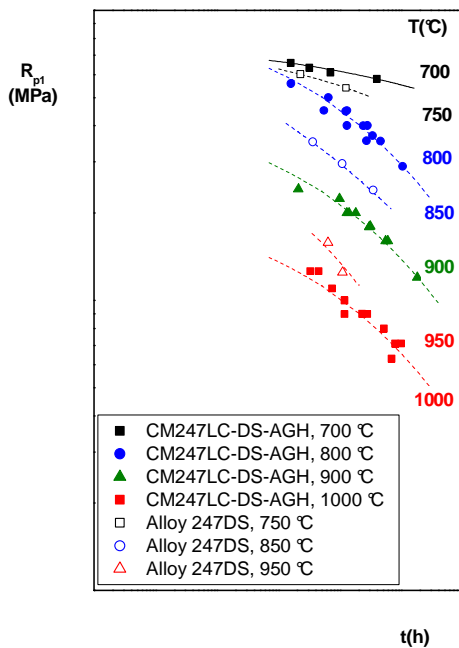


Bild 27: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, Alloy247DS (quer) und die Referenzlegierung CM247LC-DS (längs), 1% Zeitdehngrenze R_{p1}

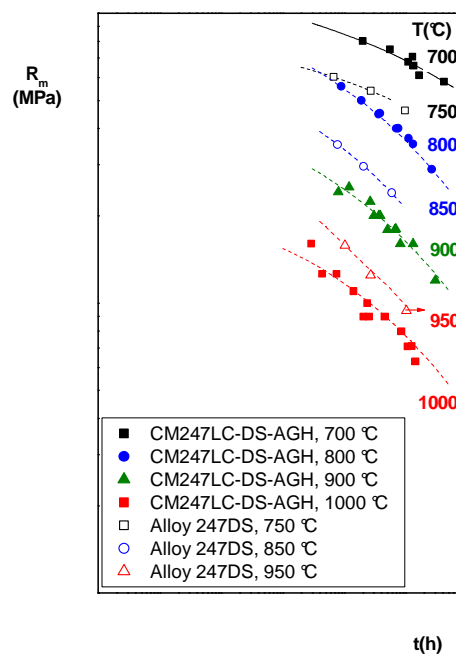


Bild 28: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, Alloy247DS (quer) und die Referenzlegierung CM247LC-DS (längs), Zeitstandfestigkeit R_m

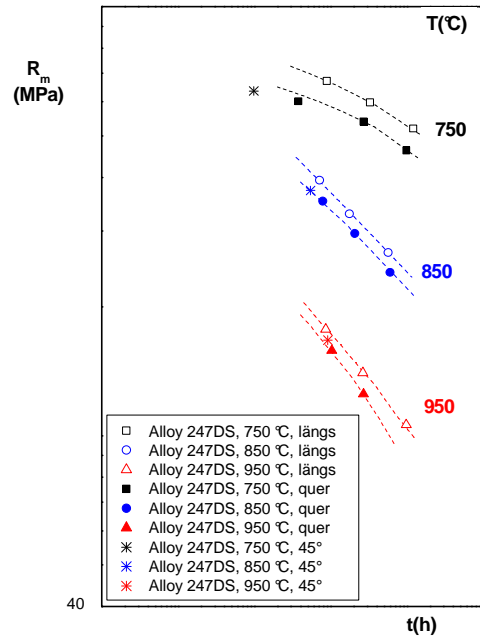
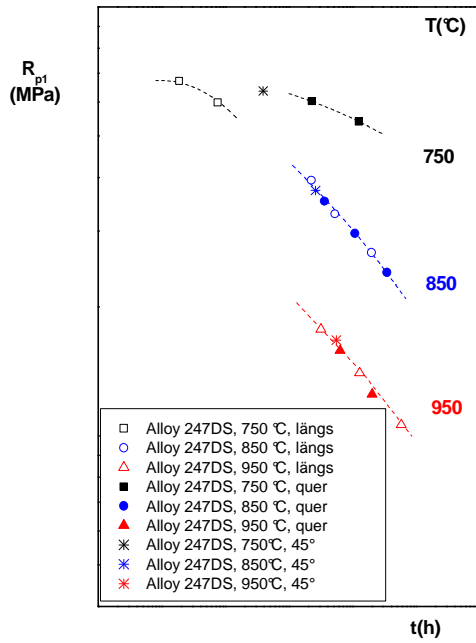


Bild 29: Vergleich zwischen längs und quer, 1% Zeitdehngrenze R_{p1}

Bild 30: Vergleich zwischen längs und quer, Zeitstandfestigkeit R_m

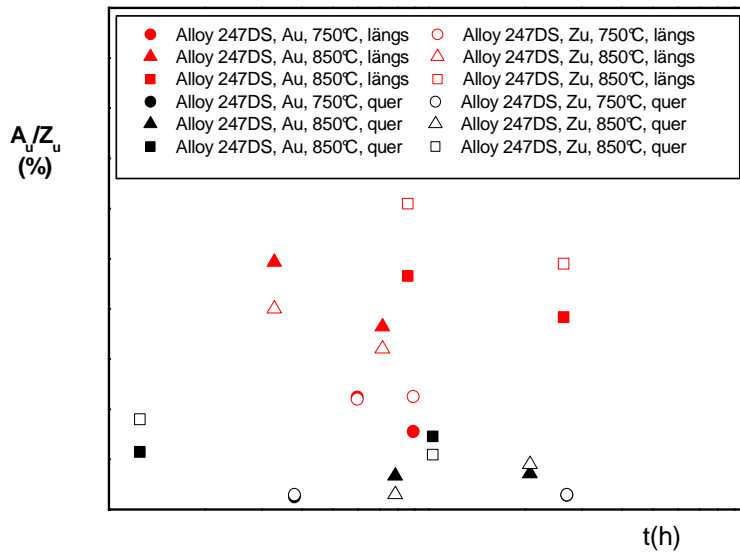
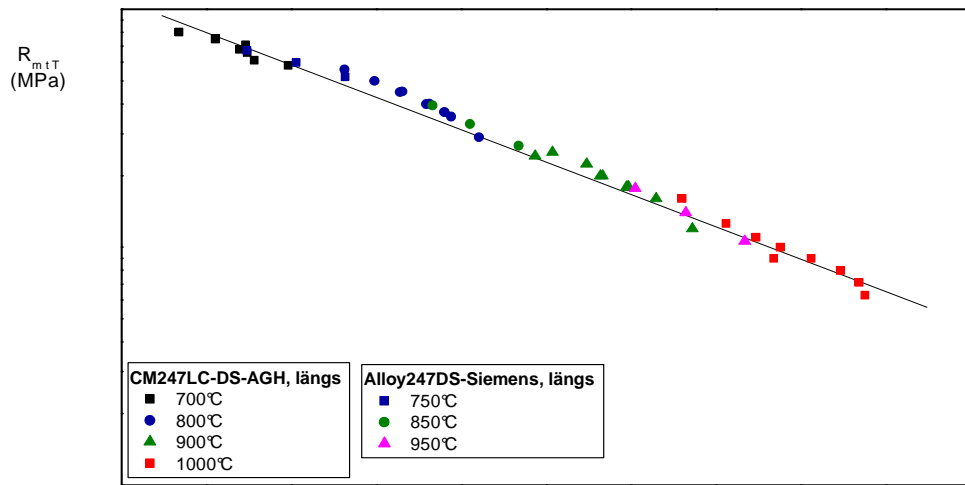
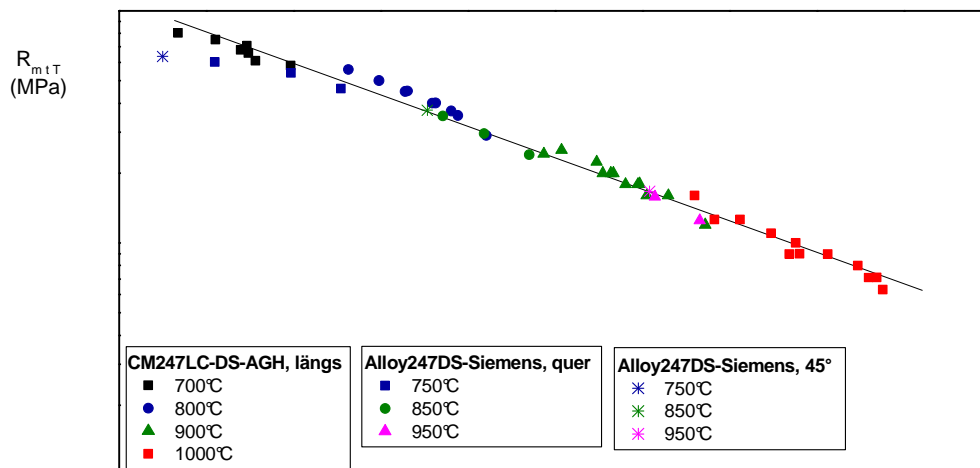


Bild 31: Ergebnisse zum Zeitstandverhalten, Alloy 247DS, „längs“ und „quer“, Zeitbruchdehnung A_u, Zeitbrucheinschnürung Z_u



$$P_{LM} = (T+273)(\lg t_m + 20)10^{-3}$$

Bild 32: Ergebnisse der Zeitstandfestigkeit R_{utT} in der Larson-Miller-Darstellung für die Legierung Alloy 247DS und die Referenzlegierung CM247LC-DS, "längs"



$$P_{LM} = (T+273)(\lg t_m + 20)10^{-3}$$

Bild 33: Ergebnisse der Zeitstandfestigkeit R_{utT} in der Larson-Miller-Darstellung für die Legierung Alloy 247DS (**quer** und **45°**) und die Referenzlegierung CM247LC-DS (**längs**)

6.2.3 Ermüdungsverhalten

SC 2000, LCF-Verhalten

Die LCF-Versuche bei 800, 900 und 1000°C am Werkstoff SC2000 mit einer Dehnrade von 18%/min ordnen sich in die Fließkurven der Orientierung <001> für die Referenzlegierung ein (Bild 34). Dies gilt auch für das Ergebnis hinsichtlich der Anrisswechsellzahl (Bild 35). Zu beachten ist hierbei, dass die Mittelwertkurven somit Datenpunkte für den Referenzwerkstoff für eine niedrigere Dehnrade, nämlich $d\varepsilon/dt=6\%/min$ gelten.

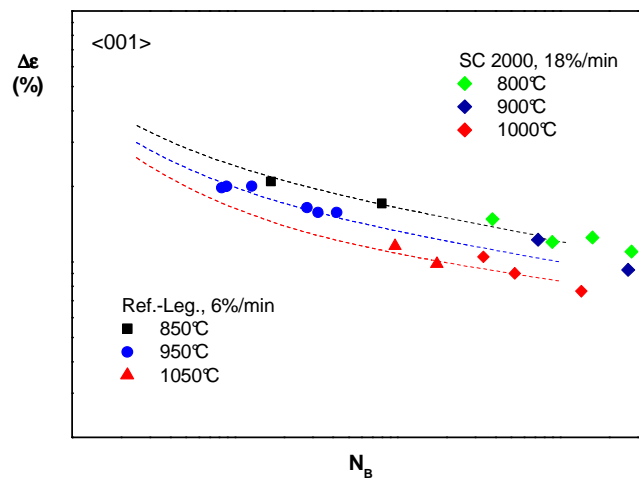


Bild 34: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung SC2000 im Vergleich mit der Referenzlegierung, <001>

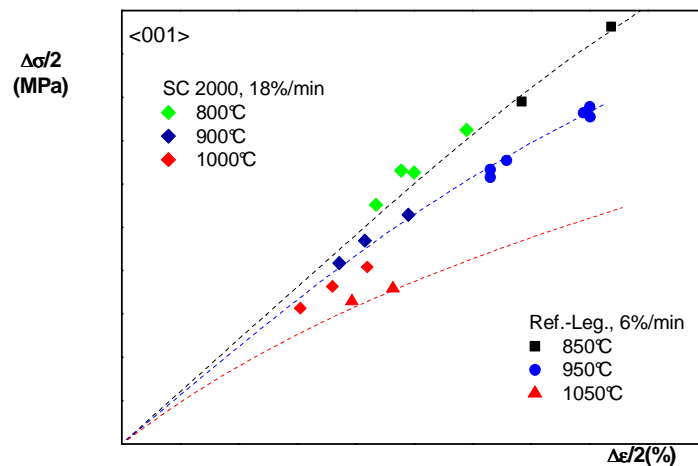


Bild 35: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung SC2000 im Vergleich mit der Referenzlegierung, <001>, Ergebnisse bei halber Anrisswechsellzahl $N/N_B=0,5$

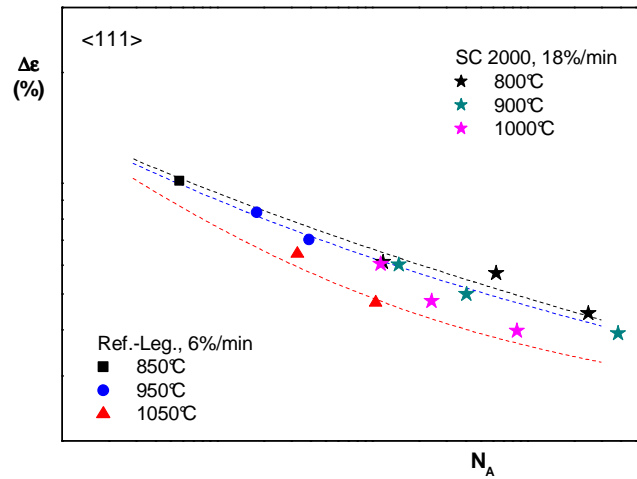


Bild 36: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung SC2000 im Vergleich mit der Referenzlegierung, <111>

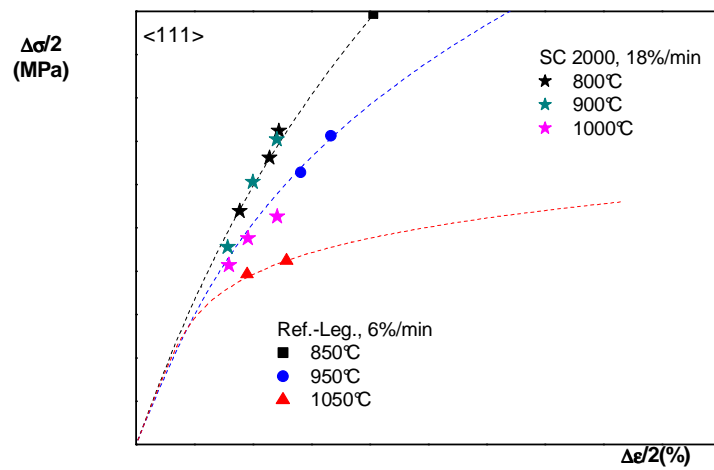


Bild 37: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung SC2000 im Vergleich mit der Referenzlegierung, <111>, Ergebnisse bei halber Anrisswechselzahl $N/N_B = 0,5$

Die Anrisskennlinien (Bild 36) und die Fließkurven (Bild 37) am Werkstoff SC2000, Orientierung $\langle 111 \rangle$, ordnen sich in die Ergebnisse der Referenzlegierung ein. Zu beachten ist hierbei, dass die Dehnrate beim Werkstoff SC2000 mit 18%/min um den Faktor 3 über den Werten am Referenzwerkstoff liegt, was nicht mehr vernachlässigbar ist.

Die ermittelten Lebensdauern in der Orientierung $\langle 001 \rangle$ weisen in etwa eine Zehnerpotenz höhere Anrisswechselzahlen auf als in der Orientierung $\langle 111 \rangle$.

SC2000, HCF-Verhalten

Die HCF Untersuchungen ($R=-1$, $f=40\text{Hz}$, Sinus) bei dem 550°C -Versuch am Werkstoff SC2000 in $\langle 001 \rangle$ Orientierung (R68) wurde nach einer Schwingspielzahl von rd. 5×10^7 bei $\sigma_a=275\text{MPa}$ ohne erkennbaren makroskopischen Anriss die Ausschlagsspannung in 9 Stufen auf $\sigma_a=310\text{MPa}$ angehoben. Für einen zweiten 550°C -Versuch (R69) wurde nach einer Schwingspielzahl von rd. 1×10^8 bei $\sigma_a=260\text{MPa}$ die Ausschlagsspannung auf $\sigma_a=286\text{MPa}$ angehoben. Der dritte Versuch (R64) wurde nach einer Schwingspielzahl von rd. $5,17 \times 10^5$ bei $\sigma_a=275\text{MPa}$ mit Bruch der Probe abgeschlossen (Bild 38). Aufgrund der unterschiedlichen Schwingspielzahl wurde die Bruchfläche analysiert. Es wurde herausgefunden, dass die Probe R68 eine kleine Abweichung zur Ideal-Orientierung $\langle 001 \rangle$ bei $\varphi_2=1,1$ besitzt und eine ca. 45° glatte Ebene zur Beanspruchungsrichtung zeigt. Die Abweichungen zur Ideal-Orientierung $\langle 001 \rangle$ der anderen Proben (R64, R68, R70) liegen schon bei $\varphi_2 > 4$ und weisen hier mehrere glatte Ebenen auf. Es ist zu vermuten, dass die Abweichung der Orientierung der Proben ein wichtige Ursache sein könnte.

Bei dem 550°C -Versuch am Werkstoff SC2000 in $\langle 111 \rangle$ Orientierung (R80) wurde die Ausschlagsspannung in 5 Stufen auf $\sigma_a=330\text{MPa}$ angehoben. Die anderen Versuche (R77, R78, R79) wurde nach einer Schwingspielzahl von rd. 6×10^6 (R77, bei $\sigma_a=300\text{MPa}$), 2×10^6 (R78, bei $\sigma_a=280\text{MPa}$) und 5×10^6 (R79, $\sigma_a=280\text{MPa}$) mit Bruch der Probe abgeschlossen (Bild 39). Die Bruchfläche liegt ca. 30° zur Beanspruchungsrichtung. Vergleichsdaten aus der Literatur liegen bisher nicht vor.

Die Zusammenfassende Darstellung der HCF-Ergebnisse am Werkstoff SC2000 weisen im Fall der Orientierung $\langle 001 \rangle$ (Bild 38) eine weiter höhere Streuung auf als bei der Orientierung $\langle 111 \rangle$ (Bild 39) und eine deutliche Abhängigkeit von der Kristallorientierung auf.

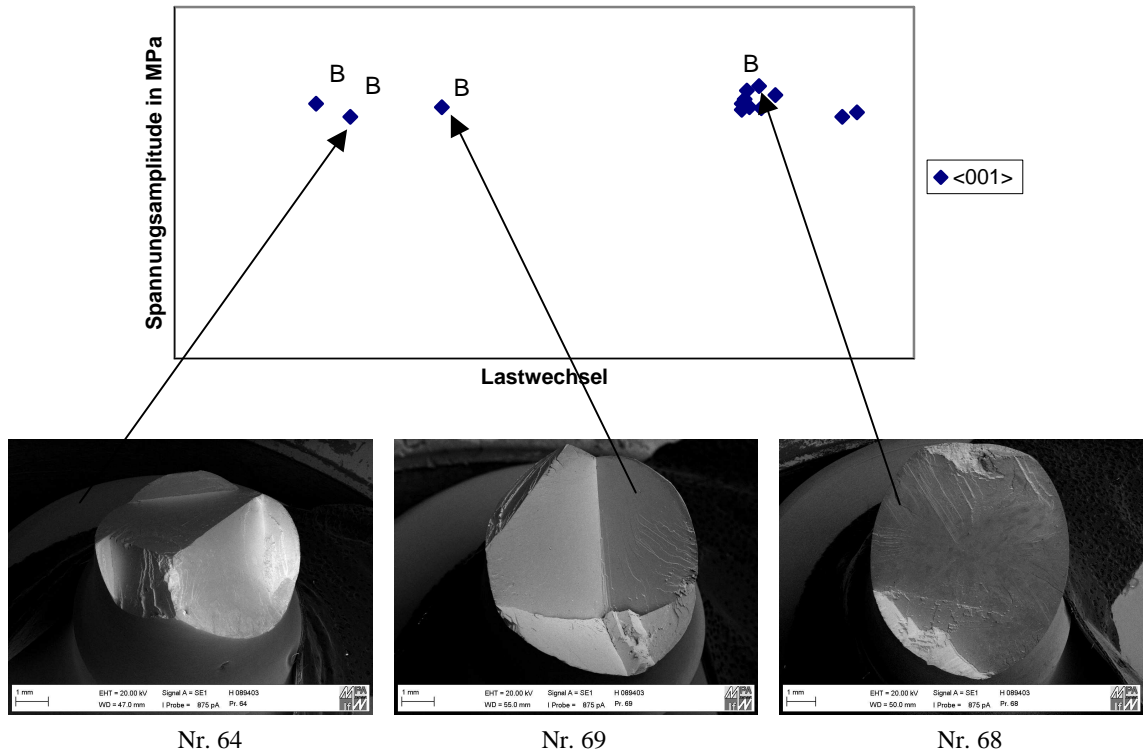


Bild 38: Ergebnisse der HCF-Schwingversuche ($R=-1$) in der Auftragung Spannungsamplitude σ_a über der Bruchwechselzahl N_B , SC 2000, <001>, $T=550^\circ\text{C}$

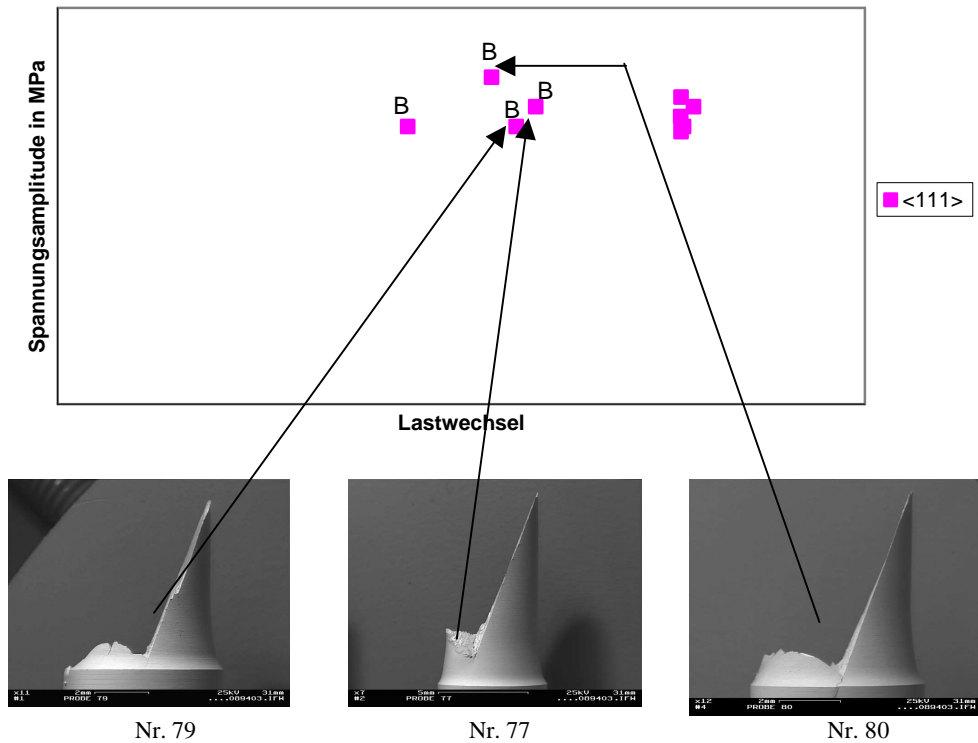


Bild 39: Ergebnisse der Schwingversuche in der Auftragung Spannungsamplitude σ_a über der Bruchwechselzahl N_B , SC 2000, <111>, 550°C

Alloy 247DS

Die LCF-Versuchsergebnisse (Bild 40 bis 43) der Legierung Alloy 247DS (längs, quer und 45°) bei 850°C und 950°C zeigen, dass diese Legierung, wie erwartet, bei Versuchen mit Haltezeit geringere Ermüdungseigenschaften als ohne Haltezeit aufweisen, bzw. bei Versuchen mit 20min/20min Haltezeit geringere Ermüdungseigenschaften als im Fall von 3min/3min Haltezeit. Wie in der Literatur angegeben, zeigt die Orientierung längs die besten Ermüdungseigenschaften, und die Orientierung 45° die geringeren Werte, die Eigenschaften der Orientierung quer liegen dazwischen.

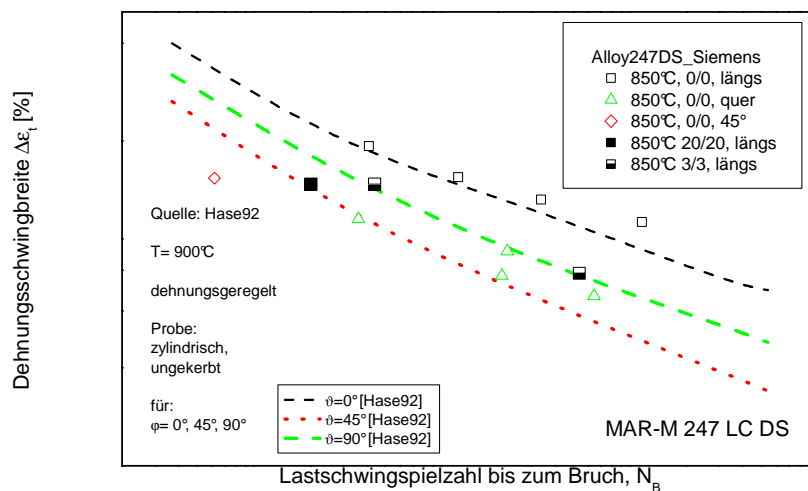


Bild 40: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung Alloy 247DS (längs) bei 850°C im Vergleich mit der Referenzlegierung (Mittelwertkurven)

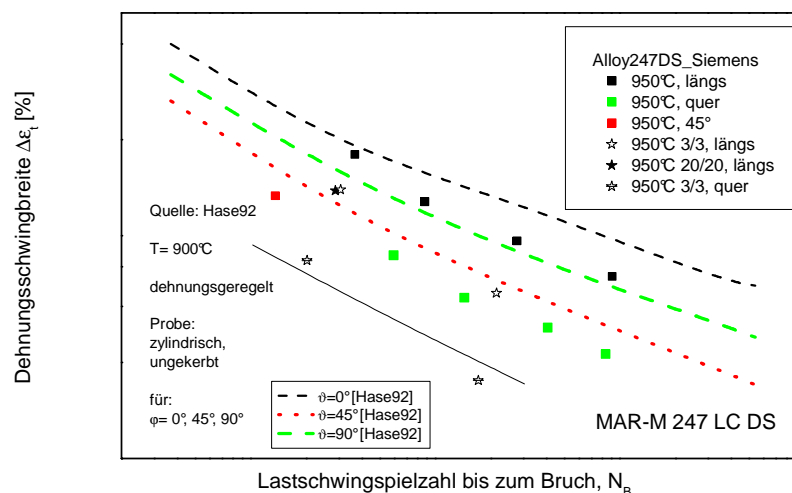


Bild 41: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung Alloy 247DS (längs) bei 950°C im Vergleich mit der Referenzlegierung (Mittelwertkurven)

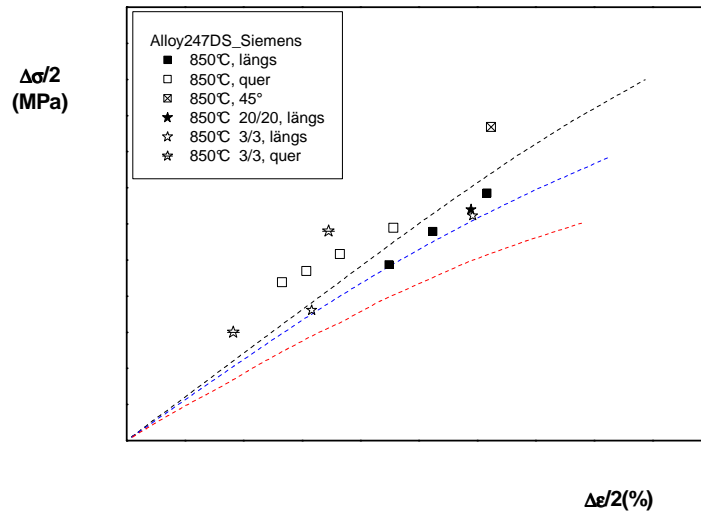


Bild 42: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung Alloy 247DS (längs) bei 850°C im Vergleich mit Referenzlegierung bei 850, 950 und 1050°C (Mittelwertkurven für Referenzlegierung gestrichelt), Ergebnisse bei halber Anrisswechselzahl $N/N_B=0,5$

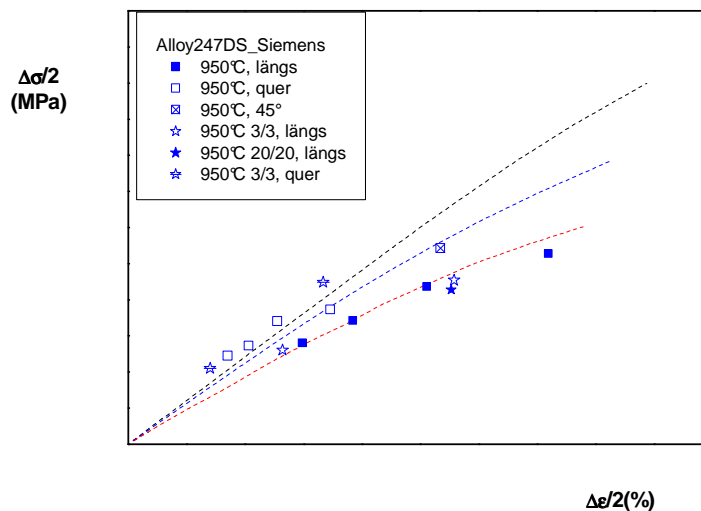


Bild 43: LCF-Versuchsergebnisse der Legierung Alloy 247DS (längs) bei 950°C im Vergleich mit Referenzlegierung bei 850, 950 und 1050°C (Mittelwertkurven für Referenzlegierung gestrichelt), Ergebnisse bei halber Anrisswechselzahl $N/N_B=0,5$

Die Fließkurven bei 850°C (Bild 42) und 950°C (Bild 43) zeigen im Vergleich mit der Referenzlegierung, <001> bei 850°C, 950°C und 1050°C ebenfalls für Orientierung „längs“ höhere ertragbare Spannungen $\Delta\sigma/2$, die entsprechenden Werte der Orientierung „quer“ liegen zwischen längs und 45°. Zunehmende Haltezeit verringert die ertragbare Spannung.

6.3 Theoretische Arbeiten

6.3.1 Beschreibung des Kriechverhaltens mit Garofalo-Gleichung

Mit dem im Institut entwickelten Programm INCA [16] wurden die Modellierung zur Beschreibung des Kriechverhaltens mit Garofalo-Gleichung für SC2000 (Bild 44 bis 47) und für Alloy247DS (Bild 48 bis 53) durchgeführt und die Parameter wurden dazu identifiziert.

Die Garofalo Gleichung umfasst die drei technischen Kriechbereiche, nämlich Primär- (I), Sekundär- (II) und Tertiärkriechen (III).

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{p1,\max} \cdot H(t) + \dot{\varepsilon}_{p,\min} \cdot t + K_3 \cdot (t/t_{23})^f \quad (1)$$

primärkriechen

$$\varepsilon_{p1,\max} = K_1(T) \cdot \sigma_0^{n_1} \cdot e^{a_1(T) \cdot \sigma_0^{b_1}}$$

$$K_1(T) = K_{10} e^{-Q_{k1}/T}$$

$$H(t) = 1 - e^{-D \cdot (t/t_{12})^u}$$

$$a_1(T) = a_{10} + a_{11}T$$

$$t_{12} = (C_{12} / \dot{\varepsilon}_{p,\min})^{a_{12}}$$

Sekundärkriechen

$$\dot{\varepsilon}_{p,\min} = K_2(T) \cdot \sigma_0^{n_2} \cdot e^{a_2(T) \cdot \sigma_0^{b_2}}$$

$$K_2(T) = K_{20} e^{-Q_{k2}/T}$$

$$a_2(T) = a_{20} + a_{21}T$$

Tertiärkriechen

$$K_3(T) = K_{30} e^{-Q_{k3}/T}$$

$$t_{23} = (C_{23} / \dot{\varepsilon}_{p,\min})^{a_{23}}$$

Einheiten: ε_p (%), T (°C), t (h), σ (MPa)

Diese aus Summen für die einzelnen Kriechbereiche bestehende Beschreibung ermöglicht vorteilhaft zum Einen die physikalische Nachvollziehbarkeit der einzelnen Terme und zum Anderen die weniger starke Abhängigkeit vom zugrundeliegenden Messdatensatz. Wird ein Datensatz, für den bereits ein Parametersatz für die modifizierte Garofalo-Gleichung identifiziert wurde, mit weiteren Daten ergänzt, so muss nur der entsprechende Term (z.B. für Tertiärkriechen beim Hinzufügen langzeitiger Versuchsdatenpunkte) angepasst werden. Ein weiterer Vorteil der modifizierten Garofalo-Gleichung ist ihre Fähigkeit, die einzelnen Dehnungsanteile gesondert zu beschreiben [16].

SC2000

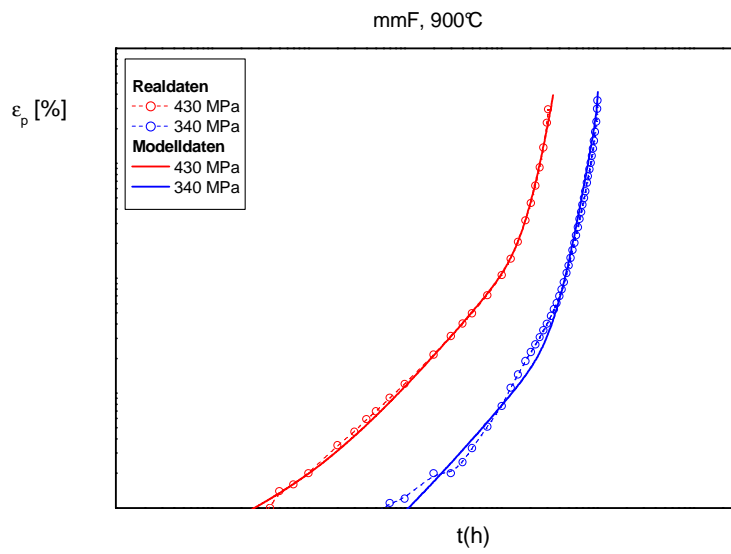


Bild 44: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, SC2000, <001>, 900°C

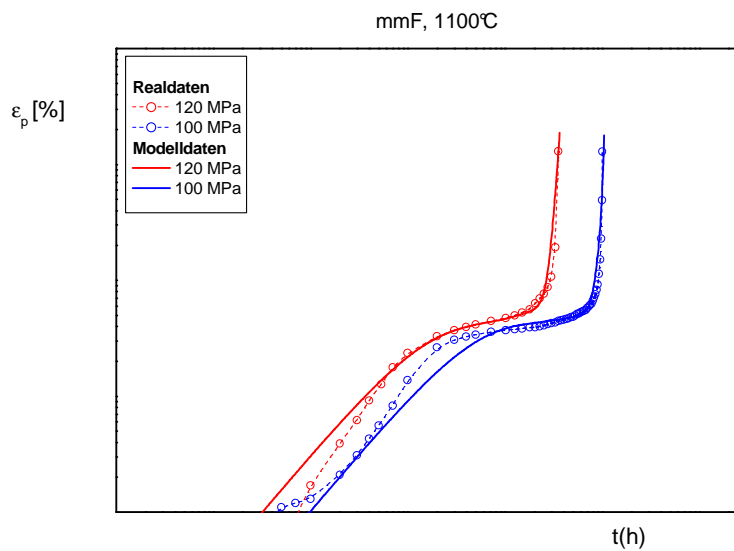


Bild 45: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, SC2000, <001>, 1100°C

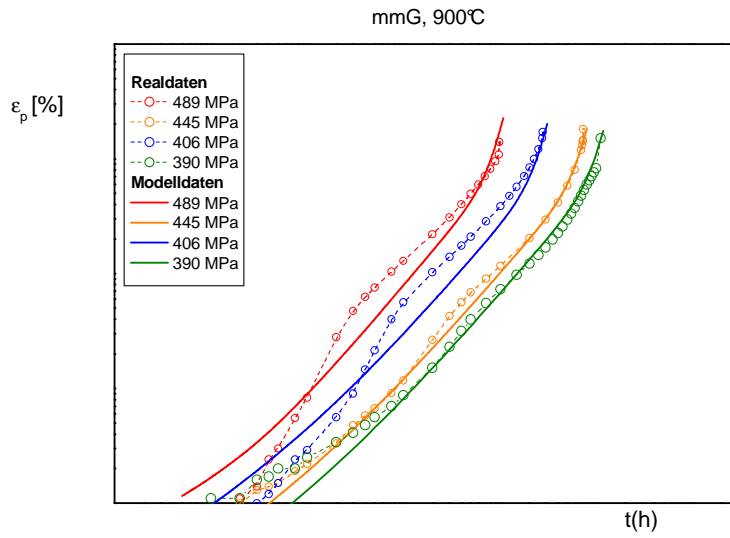


Bild 46: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, SC2000, <111>, 900°C

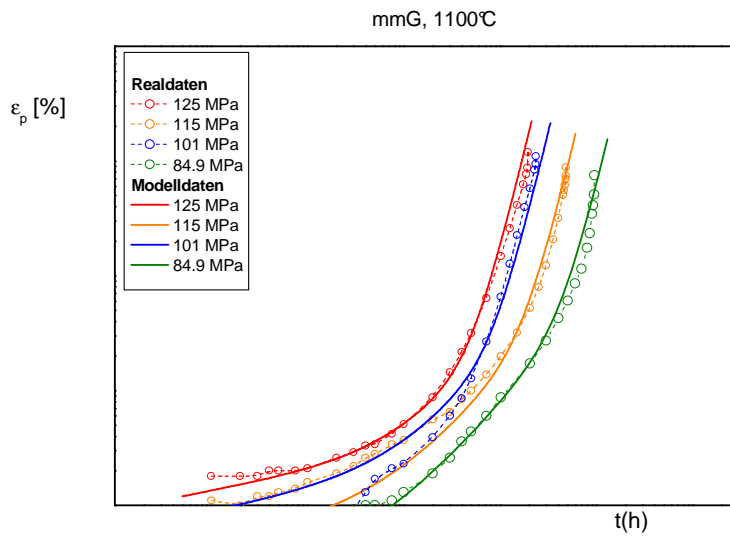


Bild 47: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, SC2000, <111>, 1100°C

Alloy 247DS

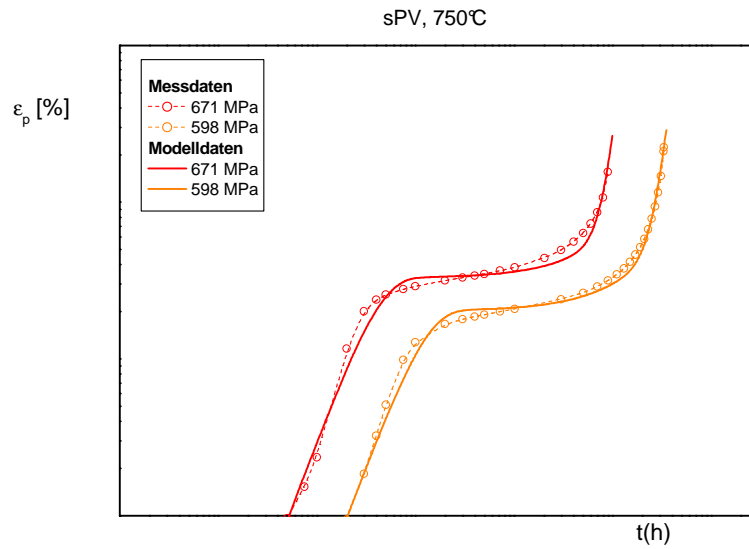


Bild 48: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, längs, 750°C

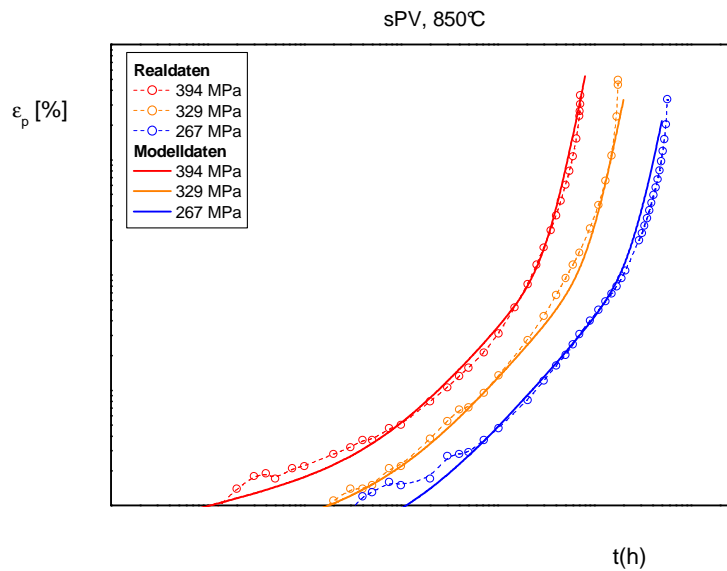


Bild 49: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, längs, 850°C

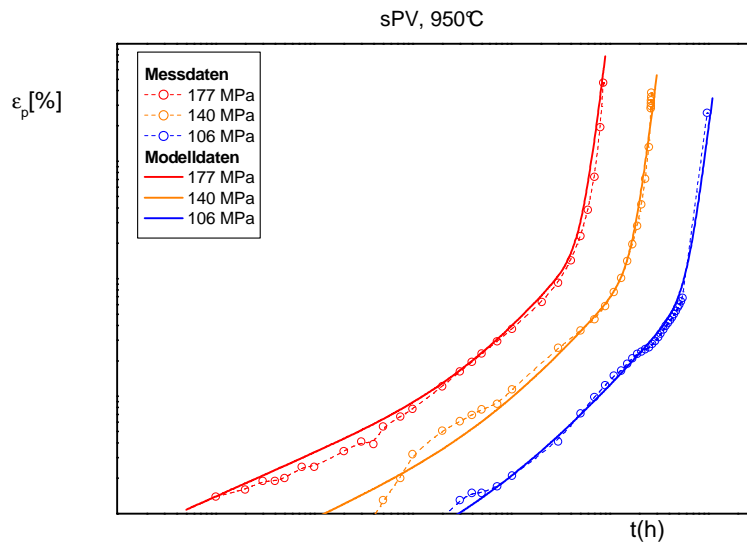


Bild 50: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, längs, 950°C

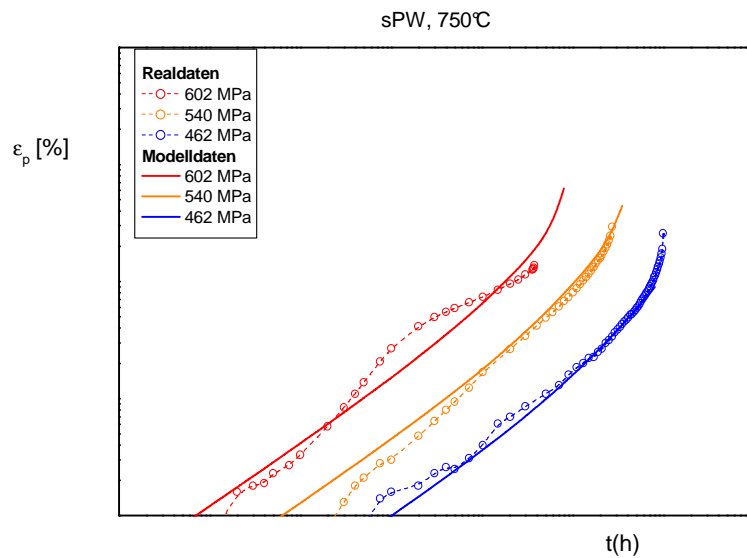


Bild 51: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, quer, 750°C

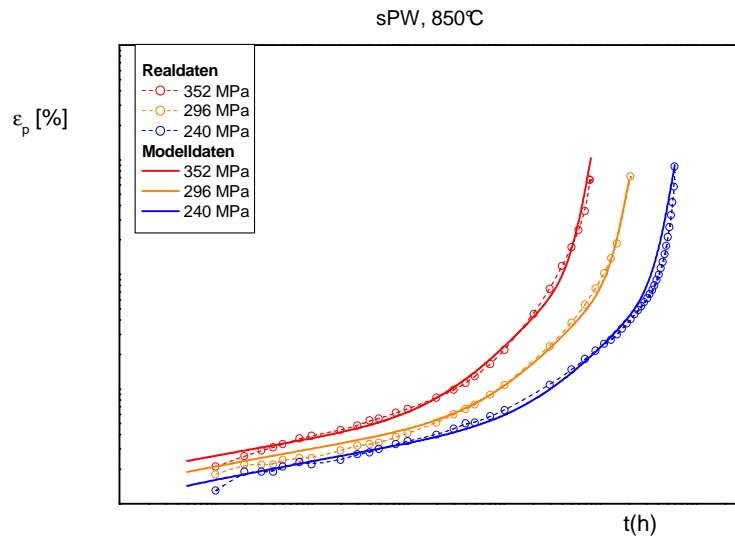


Bild 52: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, quer, 850°C

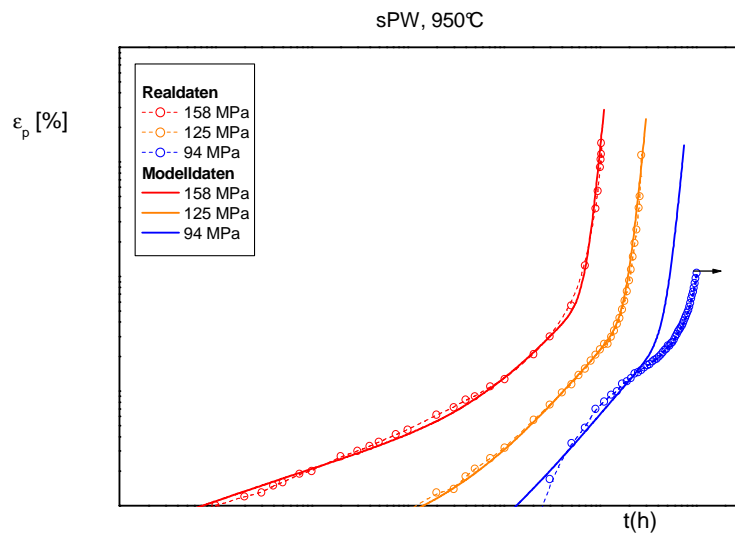


Bild 53: Beschreibung des Kriechverhaltes mit der Garofalo-Gleichung, Alloy247DS, quer, 950°C

6.3.2 Beschreibung des Ermüdungsverhaltens mit Manson-Coffin-Gleichung und Ramberg-Osgood-Gleichung

Das LCF-Ermüdungsverhalten wurde mit der Manson-Coffin-Gleichung und Ramberg-Osgood-Gleichung für SC2000 (Bild 54, 55) sowie für Alloy247DS (Bild 56, 57) modelliert. Die Materialparameter wurden identifiziert. Zur Modellierung wurden die Daten bei halber Bruchwechselzahl zugrunde gelegt.

Manson-Coffin-Gleichung:

$$\Delta\varepsilon = \alpha_1 N_A^{\beta_1} + \alpha_2 N_A^{\beta_2} \quad (2)$$

Ramberg-Osgood-Gleichung:

$$\Delta\varepsilon = (\Delta\sigma/2)/E + (\Delta\sigma/2)/K' \cdot 1/n' \quad (3)$$

SC2000

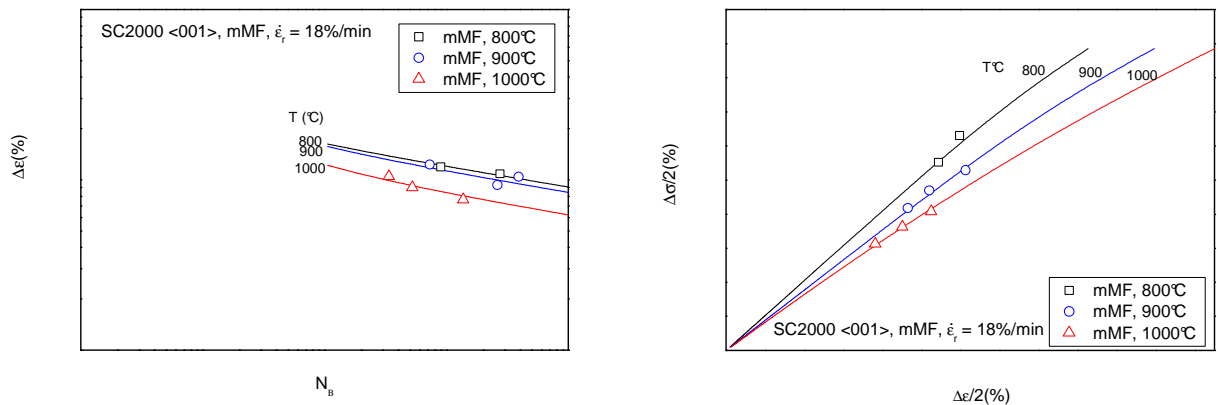


Bild 54: Beschreibung des Ermüdungsverhaltes, SC2000, <001>

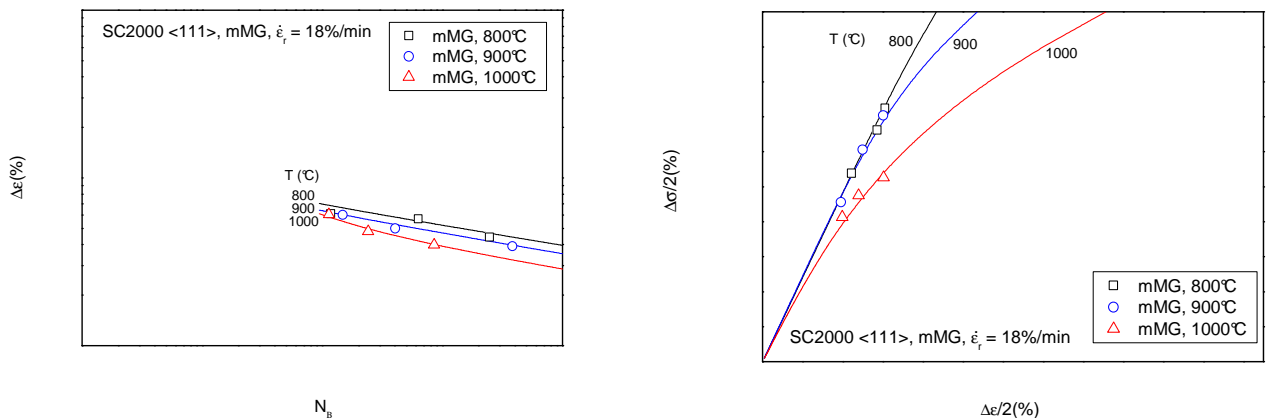


Bild 55: Beschreibung des Ermüdungsverhaltes, SC2000, <111>

Alloy247DS

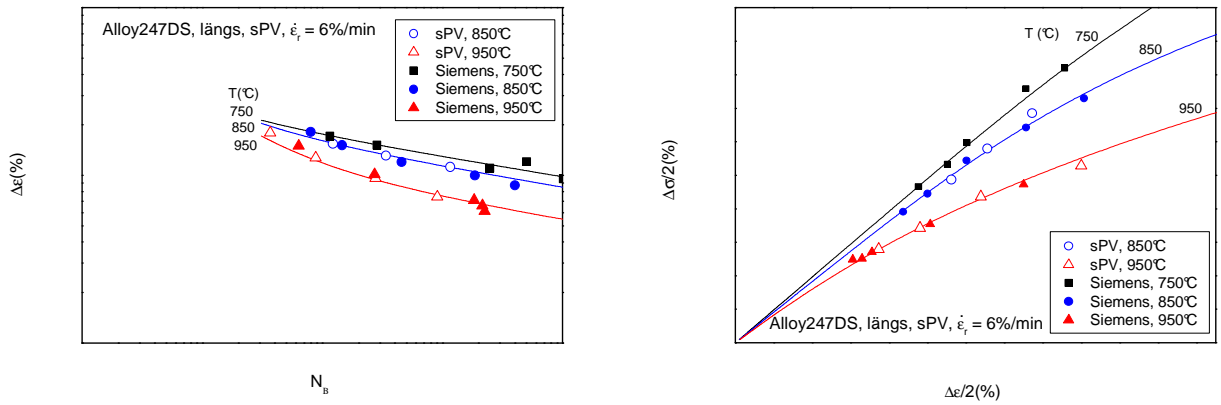


Bild 56: Beschreibung des Ermüdungsverhaltes, Alloy247DS, längs

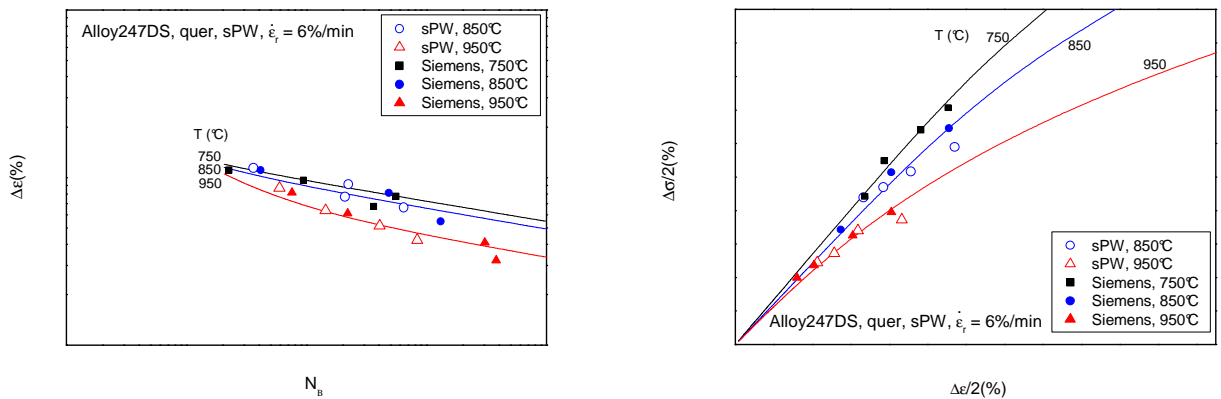


Bild 57: Beschreibung des Ermüdungsverhaltes, Alloy247DS, quer

Zusammenfassend zeigt die Modellierung zufriedenstellende Ergebnisse. Die genommenen Mittelwertkurven beschreiben die Temperaturabhängig des Zyklischen verformungsverhaltens sowie der Lebensdauer (Bruchwechselzahl N_B).

6.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der experimentellen Arbeiten in diesem Projekt wurden 4 Warmzug-, 16 Zeitstand-, 19 LCF- und 19 HCF-Versuche am Werkstoff SC2000 durchgeführt. Entsprechend wurden am Werkstoff Alloy 247DS 6 Warmzugversuche und 21 Zeitstandsversuche sowie 33 LCF-Versuche durchgeführt.

Das komplexe Kriechverhalten der Legierungen ließ sich mit der alle drei Kriechbereiche umfassenden Garofalo-Gleichung modellieren. Das Zeitdehn- und Zeitstandbruchverhalten wurde mithilfe des Larson-Miller-Parameters modelliert.

Das Ermüdungsverhalten wurde hinsichtlich Anriss mit der Manson-Coffin-Gleichung und hinsichtlich zyklischer Verformung mit der Ramberg-Osgood-Gleichung modelliert.

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Eigenschaften von der Kristallorientierungsrichtung. Streubandauswertungen zeigen unter Einbeziehung verfügbarer Daten eine deutliche Abhängigkeit der Eigenschaften von der Temperatur. Insgesamt ist die Streuung sowohl der Verformungskennwerte als auch der Lebensdauerkenwerte in der Größenordnung vergleichbarer Daten.

Metallographische Untersuchungen tragen zur Bewertung der ermittelten Verformungs- und Lebensdauerergebnisse bei.

Die erzielten Ergebnisse aus den experimentellen und den Modellierungsarbeiten sowie die Befunde aus den metallkundlichen Untersuchungen tragen zu einer verbesserten Ausnutzung des Werkstoffpotentials bei. Bei den Modellierungsarbeiten wurden reproduzierbare Arbeitsschritte entwickelt und dokumentiert mit dem Ziel, die Bereitstellung von Daten für die Bestimmung der Parameter der Liding-Konzepte zu beschleunigen, was von direktem Nutzen für die Industrie ist. Gleichzeitig wurde hieraus ein wertvoller Beitrag zur Qualitätssicherung des gesamten Auslegungs- und Überwachungsprozesses von Turbinen geleistet. Insgesamt ist aus diesen Arbeiten ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung gegeben.

6.5 Literatur

- [1] Kloos, K. H., J. Granacher, A. Scholz und R. Tscheuschner: Prüfung metallischer Werkstoffe bei hohen Temperaturen, Teil 1: Warmzugversuch und Zeitstandsversuch in Einzel- und Vielprobenprüfmaschinen, Materialprüfung 30

- (1988) S. 93/98 und Teil 2: Besondere Probleme des Zeitstandversuchs und Entspannungsversuch, Materialprüfung 30 (1988) S. 151/155.
- [2] DIN EN 10 002, T5: Metallische Werkstoffe; Zugversuch; Teil 5: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur; Deutsche Fassung EN 10002-5: 1991.
- [3] Scholz, A., M. Schwenheer und C. Berger: Hochtemperaturprüfung metallischer Werkstoffe – Prüftechnik, Normung, Datenmanagement und Auswertung, 25. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaften Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf (2002).
- [4] DIN EN 10291: Einachsiger Zeitstandversuch unter Zugbeanspruchung, Deutsche Fassung EN 10291: 2000.
- [5] ISO 12106, Metallic Materials – Fatigue testing, axial strain-controlled low cycle method.
- [6] Kloos, K. H., J. Granacher, A. Scholz und R. Tscheuschner: Prüfung metallischer Werkstoffe bei hohen Temperaturen, Teil 4: Versuche unter nieder- und hochfrequenter Wechselbeanspruchung und unter besonderem Umgebungseinfluß, Materialprüfung 30 (1988) S. 225/230.
- [7] Scholz, A.: Results of a Low Cycle Fatigue Inter-Laboratory Comparison on 1 CrMoNiV Rotor Steel, 19. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaften Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf (1996) S. 51/63.
- [8] Scholz, A.: Influence of bending on low cycle fatigue life of cylindrical test pieces, 21. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaften Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf (1998) S. 121/132.
- [9] Scholz, A., M. Monsees, U. Brill und J. Sundermann: LCF-Verhalten einiger hochwarmfester Werkstoffe, 23. Vortragsveranstaltung der Arbeitsgemeinschaften Warmfeste Stähle und Hochtemperaturwerkstoffe, Düsseldorf, Tagungsband, Hrsg.: VDEh Düsseldorf (2000) S. 115/130.
- [10] Scholz, A., H. Kirchner, P. Hortig, J. Granacher and C. Berger: Experience with service type strain cycling under thermomechanical conditions, Materials Week, Munich 2000.
- [11] Peterson, L. G.: ASME Paper 89-GT-332, New York 1989.
- [12] Erickson, G. L., K. Harris: Materials for Advanced Power Engg. 1994 Hrsg. D. Coutsouradis et al. Kluwer, Dordrecht 1994, 1055/1074.
- [13] Ross, E. W., K. S. O'Hara, in: Proc. of Seventh Internat. Symp. on Superalloys, Seven Springs, Hrsg. S. D. Antolovich et al., The minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, Pennsylvania, 1992, 257/265.

- [14] Darolia, R., D. F. Lahrman, R. D. Field, in: Proc. of Sixth Internat. Symp. on Superalloys, Seven Springs, Hrsg. D. N. Duhi et al., The Metallurgical Society, Warrendale, Pennsylvania, 1988, 255-264.
- [15] Feher, A., S. Linn, M. Schwienheer, A. Scholz, C. Berger: An interactive approach to creep behavior modeling, Materials Science and Engineering A 510-511, pp. 29-34, 2009
- [16] Scholz, A., Y. Wang, C. Berger and G. Koenig, D. Engel, G. Mokosch: Modelling of mechanical Properties of neue SX-Alloy SC2000, Materials Science and Engineering, geplant
- [17] Scholz, A., Y. Wang, C. Berger and B. Buchholz, O. Luesebrink: High Temperature Low Cycle Fatigue of Alloy247LC DS Superalloy, Journal of Engineering Materials and technology, geplant
- [18] Buchholz, B., O. Luesebrink, Y. Wang, A. Scholz: Vortragsveranstaltung Hochtemperaturwerkstoffe

7. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Arbeitsplan:

Die Arbeiten wurden planmäßig durchgeführt

Zeitplan:

Mit der Projekt-Verlängerung von 9 Monaten wurde der Zeitplan eingehalten werden.

Kostenplan:

Der Kostenplan wurde eingehalten.

8. Nutzung und Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse

Die erzielten Ergebnisse bzw. die aus den experimentellen Arbeiten abzuleitenden Datenbasis für Werkstoffe zum Bau hochbelasteter Gasturbinenschaufeln haben Referenzcharakter, sind direkt kurzfristig verwertbar und langfristig für Industrie und Forschung von Bedeutung.

Die Befunde aus den metallkundlichen Untersuchungen wurden zur Bewertung der Schädigungsbefunde an Bauteilen und damit zum sicheren Betrieb von Turbinen beigetragen.

Die durchgeführten Werkstoffbeschreibungen und Streubandanalysen tragen zu einer verbesserten Ausnutzung des Werkstoffpotentials bei. Bei den Modellierungsarbeiten wurden reproduzierbare Arbeitsschritte entwickelt und dokumentiert mit dem Ziel, die Bereitstellung von Daten für die Bestimmung der Parameter der Lifing-Konzepte zu beschleunigen, was von direktem Nutzen für die Industrie ist. Gleichzeitig wurden hieraus ein wertvoller Beitrag zur Qualitätssicherung des gesamten Auslegungs- und Überwachungsprozesses von Turbinen geleistet, dadurch ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung gegeben.

9. Während des Vorhabens bekannte gewordene Ergebnisse anderer Stellen

Es sind keine FE-Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant sind.

10. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen zu dem im Teilvorhaben erarbeiteten Ergebnisse

Die in diesem Teilprojekt erarbeiteten Ergebnisse werden in der folgenden Veröffentlichung geplant zu publizieren (siehe Kapitel 6.5, Literatur [16, 17 und 18]).

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht	
3a. Titel des Berichts BMW-PTJ-Verbundvorhaben RoMoTurb Robuste Modelle zur verbesserten Werkstoffausnutzung für aktuelle Turbinenschaufelwerkstoffe (RoMoTurb)		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Berger, Christina; Scholz, Alfred; Wang, Yan		5. Abschlußdatum des Vorhabens 31.01.2010
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum 01.03.2010
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Darmstadt Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde, Grafenstr. 2 64283 Darmstadt		7. Form der Publikation Broschüre
		9. Ber.Nr. Durchführende Insitution
		10. Förderkennzeichen 0327705M
		11a. Seitenzahl Bericht 44
		11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA Scharnhorststr. 34-37 10115 Berlin		12. Literaturangaben 18
		14. Tabellen
		15. Abbildungen 57
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Vor dem Hintergrund einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung spielt die Effizienzsteigerung durch optimierte Ausnutzung des Potentials vorhandener Werkstoffe eine zentrale Zielvorgabe. Dazu ist eine Absicherung der zeit- und temperaturabhängigen Eigenschaften hochwertiger Hochtemperaturlegierungen für hochbelastete Gasturbinenschaufeln im gesamten Anwendungstemperaturbereich erforderlich. Als Teilprojekt im Rahmen von COORETEC-Werkstoffe umfassten die Arbeiten eine experimentell abgesicherte Beschreibung von Verformung und Anriss bzw. Bruch unter statischer und zyklischer Beanspruchung an SC2000 der neu entwickelten einkristallinen Legierungen für die vorderen Turbinenreihen in Flugtriebwerken und an Alloy247DS für große stationäre Turbinen für den Kraftwerksbau in Abhängigkeit von bauteiltypischen Beanspruchungsparametern und Kristallorientierung sowie metallographische Nachuntersuchungen. Die erzielten Ergebnisse bzw. die aus den experimentellen Arbeiten abzuleitenden Datenbasis für Werkstoffe zum Bau hochbelasteter Gasturbinenschaufeln haben Referenzcharakter, sind kurzfristig direkt verwertbar und langfristig für Industrie und Forschung von Bedeutung. Die Befunde aus den metallkundlichen Untersuchungen tragen zur Bewertung der Schädigungsbefunde an Bauteilen und damit zum sicheren Betrieb von Turbinen bei. Die durchgeführten Werkstoffbeschreibungen tragen unmittelbar zu einer verbesserten Ausnutzung des Werkstoffpotentials bei. Bei den Modellierungsarbeiten wurden reproduzierbare Arbeitsschritte entwickelt und dokumentiert mit dem Ziel, die Bereitstellung von Daten für die Bestimmung der Parameter der Lifing-Konzepte zu beschleunigen, was von direktem Nutzen für die Industrie ist. Gleichzeitig wurden hieraus ein wertvoller Beitrag zur Qualitätssicherung des gesamten Auslegungs- und Überwachungsprozesses von Turbinen geleistet. Dadurch ist ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung gegeben.		
19. Schlagwörter SC2000, Alloy 247DS, Kriechverhalten, Ermüdungsverhalten		
20. Verlag -		21. Preis -

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report	
3a. Title of Report BMW-PTJ-Verbundvorhaben RoMoTurb Robuste Modelle zur verbesserten Werkstoffausnutzung für aktuelle Turbinenschaufelwerkstoffe (RoMoTurb)		
3b. Title of Publication		
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Berger, Christina; Scholz, Alfred; Wang, Yan		5. End of Project 31 Januar 2010
4b. Author(s) of the Publication(Family Name, First Name(s))		6. Publication Date 01 March 2010
8. Performing Organizations (Name, Address) Technische Universität Darmstadt Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde Grafenstr. 2 64283 Darmstadt		7. Form of Publication Booklet
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit BMWA Scharnhorststr. 34-37 D-10115 Berlin Germany		9. Originator's Report No.
		10. Reference No. 0327705M
		11a. No. of Pages Report 44
		11b. No. of Pages Publication
		12. No. of References 18
		14. No. of Tables
		15. No. of Figures 57
16. Supplementary Notes		
17. Presented at (Title, Place, Date)		
18. Abstract <p>In the frame of an environmental friendly energy production, efficiently increase by optimized exploitation of the potential of existing materials is a key target. Therefore, validation of the time and temperature characteristics of high-quality high-temperature alloys for highly loaded gas turbine blades in the complete application temperature range is required. As partial project within COORETEC materials, this project included the elaboration of an experimentally validated description of deformation and rupture under static and cyclic loading on SC2000, a new developed single crystal for first-row aero turbine engines and Alloy247DS for large stationary turbines for power plants. The description also includes dependency on strain parameters and crystal orientation, as well as metallographic investigation.</p> <p>The results obtained from the experimental work, resp. the data base for materials for the design of highly loaded gas turbine blades have reference character, can be rapidly exploited and are of long-term importance for industry and research. Results from metallurgical investigations contribute to damage evaluation on components and thereby to safe operation of turbines.</p> <p>In the modelling work the reproducible steps were developed and documented with the aim of accelerating the provision of data for determining the parameters of the lifing concepts, which is of direct benefit to the industry. Simultaneously, a valuable contribution to quality assurance of turbines has been resulting hereof. Consequently, an important contribution to a resource- and environment-preserving energy production is given.</p>		
19. Keywords SC2000, Alloy247DS, creep rupture behaviour, fatigue behaviour		
20. Publisher -		21. Price -

Erfolgskontrollbericht

Anlage zum Abschlussbericht des BMWA-PTJ-Verbundvorhaben

Verbundprojekt RoMoTurb

Robuste Modelle zur verbesserten Werkstoffausnutzung für aktuelle Turbinenschaufelwerkstoffe (RoMoTurb)

Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde, Technische Universität Darmstadt

Förderkennzeichen 0327705M

Kassenzeichen: 810301871527

Berichtszeitraum 01.05.2006 bis 31.01.2010

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Die erzielten Ergebnisse bzw. die aus den experimentellen Arbeiten abzuleitende Datenbasis für Werkstoffe zum Bau hochbelasteter Gasturbinenschaufeln haben Referenzcharakter, sind kurzfristig direkt verwertbar und langfristig für Industrie und Forschung von Bedeutung.

Die Befunde aus den metallkundlichen Untersuchungen tragen zur Bewertung der Schädigungsbeefunde an Bauteilen und damit zum sicheren Betrieb von Turbinen beigetragen.

Die durchgeführten Werkstoffbeschreibungen tragen zu einer verbesserten Ausnutzung des Werkstoffpotentials bei. Bei den Modellierungsarbeiten wurden reproduzierbare Arbeitsschritte entwickelt und dokumentiert mit dem Ziel, die Bereitstellung von Daten für die Bestimmung der Parameter der Lifing-Konzepte zu beschleunigen, was von direktem Nutzen für die Industrie ist. Gleichzeitig wurde hieraus ein wertvoller Beitrag zur Qualitätssicherung des gesamten Auslegungs- und Überwachungsprozesses von Turbinen geleistet. Dadurch ist ein wichtiger Beitrag zu einer ressourcen- und umweltschonenden Energieerzeugung gegeben.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Aufstellung über die erbrachten Leistungen:

Experimentelle Arbeiten:

Einkristalline Nickelbasisgusslegierung SC2000

- 4 Warmzugversuche
- 16 Zeitstandversuche bei 900 und 1100°C, max. Laufzeit: 1122h
- 19 HCF-Versuche bei 550 und 900°C, max. Zykluszahl: $1,66 \times 10^7$
- 19 LCF Versuche bei 800, 900 und 1000°C, max. Zykluszahl: 39090
 - <001> 10 Versuche
 - <111> 9 Versuche

Gerichtet erstarrte Nickelbasisgusslegierung Alloy 247DS

- 6 Warmzugversuche
- 21 Zeitstandversuche bei 750, 850 und 950°C, max. Laufzeit: 12043h
 - <längs> 9 Versuche
 - <quer> 9 Versuche
 - <45°> 3 Versuche
- 33 LCF-Versuche bei 750, 850 und 950°C, max. Zykluszahl: 11660
 - <längs> 15 Versuche
 - <quer> 16 Versuche
 - <45°> 2 Versuche

Theoretische Arbeiten:

Das komplexe Kriechverhalten der Legierungen wurde mit der alle drei Kriechbereiche umfassenden Garofalo-Gleichung modelliert. Das Zeitdehn- und Zeitstandbruchverhalten wurde mithilfe des Larson-Miller-Parameters modelliert.

Das Ermüdungsverhalten wurde hinsichtlich Anriss mit der Manson-Coffin-Gleichung und hinsichtlich zyklischer Verformung mit der Ramberg-Osgood-Gleichung modelliert.

Metallographische Untersuchungen tragen zur Bewertung der ermittelten Verformungs- und Lebensdauerergebnisse bei.

3. Verwertungsplan

- **Erfindungen/Schutzrechte**

(keine)

- **Wirtschaftliche Erfolgsaussichten, Nutzen, Transferstrategien**

Aus den im Vorhaben erarbeiteten Ergebnissen haben sich die beteiligten Verbundpartner der Industrie einen Knowhow-Vorsprung und damit einen Wettbewerbsvorteil gegenüber der internationalen Konkurrenz erworben. Die hierzu durchgeführten experimentellen und theoretischen Arbeiten gewährleisten, dass der Wettbewerbsvorteil der Industriepartner auch noch in einigen Jahren erhalten bleibt, z. B. hinsichtlich Lebensdaueranalysen. Hierzu zählt auch, daß Optimierungsmöglichkeiten identifiziert wurden, die eine weitere Verbesserung des Werkstoffpotenzials zulassen. Neben dem direkten Nutzen für die Industriepartner des Verbundvorhabens können auch Unterauftragnehmer, die als kleine und mittlere Unternehmen bei der Herstellung einzelner Bauteile und Baugruppen der meist großtechnischen Anlagen beteiligt sind, an den Ergebnissen partizipieren.

Die Anwendergruppen der Forschungsergebnisse sind Werkstoffhersteller, Turbinenhersteller und Betriebe des Anlagen- und Maschinenbaus, sowie Überwachungsgesellschaften. Die Forschungsergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektgruppen des RoMoTurb-Vorhabens gewonnen. Dies führt zu einer unmittelbaren Wissensübertragung an die beteiligten Industrieunternehmen, die die Ergebnisse direkt anwenden.

- **Wissenschaftlich/technische Erfolgsaussichten / Nutzung durch andere Stellen**

Die Umsetzung der unter Punkt 2 aufgeführten wissenschaftlich-technischen Ergebnisse in die industrielle Anwendung ist durch die Industriepartner des Verbundvorhabens gewährleistet, die die gewonnenen Kennwerte und Werkstoffeigenschaften für Hochtemperaturbauteile zukünftiger hocheffizienter Kraftwerke benötigen. Des Weiteren stehen die Ergebnisse den Forschungspartnern des Verbundvorhabens zur Verfügung, die zusammen mit den Industriepartnern in anderen Forschungsvorhaben die Ergebnisse verwerten können. Daher liefern die Ergebnisse einen wichtigen Beitrag vor allem für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Turbinenschaufelwerkstoffe.

- **Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Die in diesem Vorhaben gewonnenen Erfahrungen im Verbund mit den Partnern stellen einen wichtigen Schritt zur Erweiterung der Anwendungsgrenzen der Werkstoffklasse dar. Die Untersuchung und Beschreibung der Eigenschaften ist Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz in der industriellen Praxis.

4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Es gibt keine Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.

5. Präsentationsmöglichkeiten

Die gewonnenen Ergebnisse wurden noch nicht auf einer Vortragsveranstaltung präsentiert.

6. Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die im Verbundvorhaben vorgesehenen Kosten für dieses Teilprojekt wurden eingehalten.

7. Veröffentlichungen

Ergebnisse werden in den folgenden Publikationen veröffentlicht:

- [1] Buchholz, B., O. Luesebrink, Y. Wang, A. Scholz: Vortragsveranstaltung Hochtemperaturwerkstoffe
- [2] Scholz, A., Y. Wang, C. Berger and G. Koenig, G. Mokošch, D. Engel: Modelling of mechanical Properties of neue SX-Alloy SC2000, Materials Science and Engineering, geplant
- [3] Scholz, A., Y. Wang, C. Berger and B. Buchholz, O. Luesebrink: High Temperature Low Cycle Fatigue of Alloy247LC DS Superalloy, Journal of Engineering Materials and Technology, geplant