

4 Experimente

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus der Basischarakterisierung der beiden Versuchswerkstoffe sowie aus den LCF-Versuchen an den bauteilähnlichen Modellkörpern zusammengestellt. Sämtliche Experimente wurden bei der maßgeblichen Versuchstemperatur von 550 °C sowie stichprobenartig auch bei Raumtemperatur durchgeführt, siehe Anhang A.4. Zusätzlich zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchen standen zur statistischen Absicherung darüber hinaus noch weitere Experimente bei einachsigen Spannungszustand zur Verfügung [35, 38].

4.1 Basischarakterisierung IN 939

Wie bereits in Abschnitt 3.2 erwähnt, wurden die idealisierten Schaufeln der Modellkörper aus der konventionellen Feingusslegierung IN 939 gefertigt.

Allgemeines

Die chemische Zusammensetzung des Versuchswerkstoffs ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Zusätzlich sind als Referenz typische Legierungszusammensetzungen von IN 939 und IN 738 LC dargestellt [30].

Massenanteile in %							
Werkstoffe	Al	Co	Cr	Nb	Ti	W	Ni
IN 939	1,6	19,0	23,7	2,0	3,4	2,3	Basis
IN 939 (Referenz)	1,9	19,0	22,5	1,0	3,7	2,0	Basis
IN 738 LC (Referenz)	3,4	8,5	16,0	0,9	3,4	2,6	Basis

Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung IN 939 und IN 738 LC

Bedingt durch den erhöhten Chromgehalt besitzt der IN 939 eine etwas bessere Korrosionsbeständigkeit als der IN 738 LC, was allerdings häufig zu einer verminderten Zeitstandfestigkeit im oberen Temperaturbereich führt [26-28]. Ausführliche Untersuchungen zum Zeitdehn- und Zeitstandverhalten dieser Werkstoffe sind in [74] zusammengefasst dargestellt, wobei unter anderem auch der Einfluss der Korngröße diskutiert wird.

Die Mikrostruktur von IN 939 zeigt die für Gusslegierungen typische Dendritenstruktur, siehe Bild 4.1. Die Bestimmung der Korngröße nach ASTM E 112 ergibt eine Korngröße M 8 bis M 9, was einem mittleren Durchmesser der Körner von $\bar{d} = 2,3 \text{ mm}$ bzw. $1,6 \text{ mm}$ entspricht.

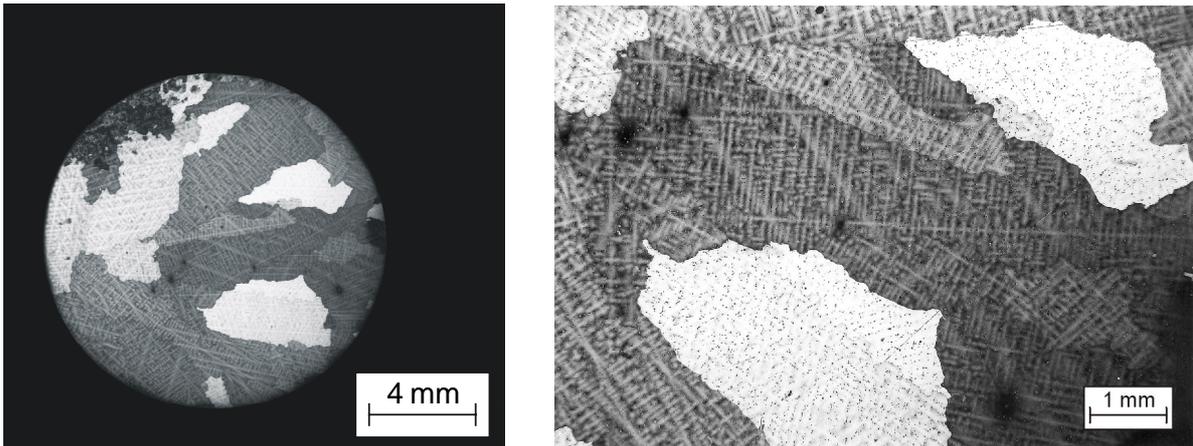


Bild 4.1: Mikrostruktur IN 939

Eine typische Wärmebehandlung für IN 939 beinhaltet beispielsweise

1160 °C 4 h Gasumwälzung,
850 °C 16 h.

Zur Fertigung der Proben für die Basischarakterisierung standen drei Platten (Abmessungen 120x40x35) zur Verfügung, die aus gegossenen Gasturbinenschaufeln entnommen sind. Die Schaufeln für die Modellkörper sind denselben Halbzeugen entnommen. Insgesamt konnten aus dem vorliegenden Material je sechs Zug- und LCF-Proben angefertigt werden, siehe Bild 4.2.

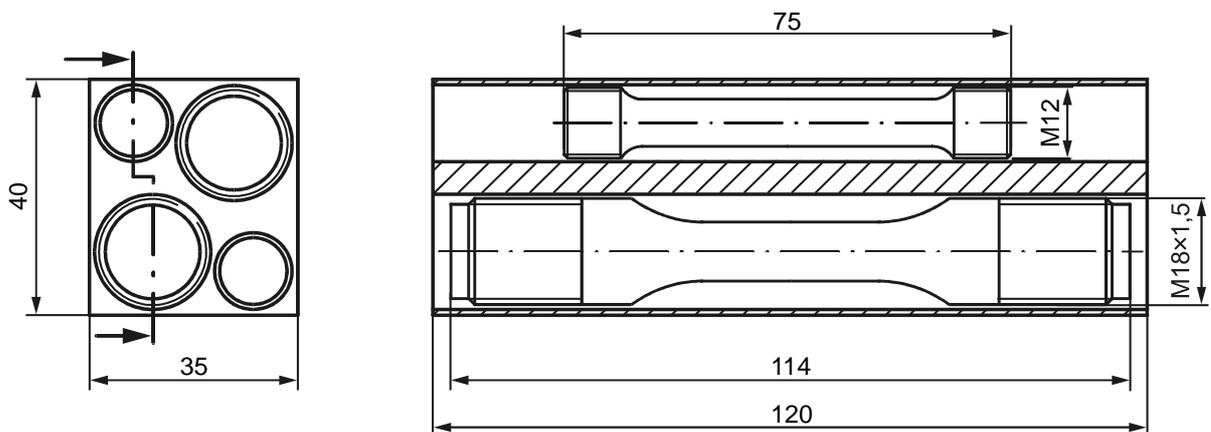


Bild 4.2: Entnahme der Rohlinge für die Basischarakterisierung an IN 939

Die Härteprüfung nach Vickers ergab einen Mittelwert von 476 HV 30, bei einer Standardabweichung von 13 HV 30.

Zugversuche

Insgesamt wurden sechs Zugversuche nach DIN EN 10002 bei Raumtemperatur und bei 550 °C durchgeführt. Die geometrischen Abmessungen der Proben mit dem Prüfdurchmesser $d = 8 \text{ mm}$ sind im Anhang A.5 dargestellt. Die berechneten arithmetischen Mittelwerte \bar{X} sowie die Standardabweichungen s der durchgeführten Zugversuche zeigt Tabelle 4.2.

Temp.	Größe	$R_{p0,2}$ /MPa	R_{p1} /MPa	R_m /MPa	E /GPa	A_5 /%	Z /%
RT	\bar{X}	746	844	904	191	3,5	3,3
	s	4	9	12	6	0,8	0,6
550 °C	\bar{X}	663	748	799	174	4,2	4,3
	s	6	4	7	5	0,7	1,8

Tabelle 4.2: Statistische Auswertung der Zugversuche an IN 939

Die ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerte im Zugversuch ordnen sich eher im unteren Bereich des Streubands der aus der Literatur bekannten Kennwerte ein. Dieses Ergebnis war aufgrund der vergleichsweise groben Struktur der untersuchten Charge auch zu erwarten.

LCF-Versuche

Insgesamt wurden sechs dehnungskontrollierte LCF-Versuche mit $R_\epsilon = -1$ an einer servohydraulischen Prüfmaschine (Hersteller: MTS) mit einer maximalen Prüflast von $F_{\max} = 100 \text{ kN}$ durchgeführt. Die verwendete Probenform ist im Anhang A.6 dargestellt. Zur besseren statistischen Absicherung der zyklischen Fließkurve wurden unter anderem auch zwei Incremental Step Tests durchgeführt, siehe Tabelle 4.3.

Temp.	ϵ_a /%	Probe	N_A	N_{AG}	N_B	$\sigma_a(N_A/2)$ /MPa	$\sigma_{\max}(N_A/2)$ /MPa
RT	0,53	9-L-1	1134	---	1139	802,9	800,7
	max. 0,50	9-L-2	---	4824	---	Incremental Step Test	
550 °C	0,29	9-L-6	---	70001	---	439,3	379,9
	0,39	9-L-5	2329	2337	---	644,7	594,3
	0,50	9-L-6	479	---	514	682,3	657,1
	0,55	9-L-3	49	---	50	680,5	692,6
	max. 0,60	9-L-4	7671	7736	---	Incremental Step Test	

Tabelle 4.3: Dehnungskontrollierte LCF-Versuche IN 939

Zusätzlich zu den charakteristischen Lastwechselzahlen sind in Tabelle 4.3 auch die Spannungsamplituden und die Maximalspannungen bei halber Lebensdauer angegeben. Die Probe 9-L-6 wurde dabei nach 70001 Lastwechseln bei $\epsilon_a = 0,29\%$ ohne Anriss mit $\epsilon_a = 0,50\%$ erneut belastet.

Beispielhaft wurden an der LCF-Probe 9-L-5 Längsschliffe durchgeführt, siehe Bild 4.3. Der transkristallin verlaufende Riss initiiert etwa unter dem Winkel 50° zur Axialrichtung, was näherungsweise der Ebene der maximalen Schubspannung entspricht. Nach Durchgang durch ein Korn ändert sich die Rissfortschrittsrichtung und der Riss wächst bis zum Versuchsende senkrecht zur größten Hauptspannung.

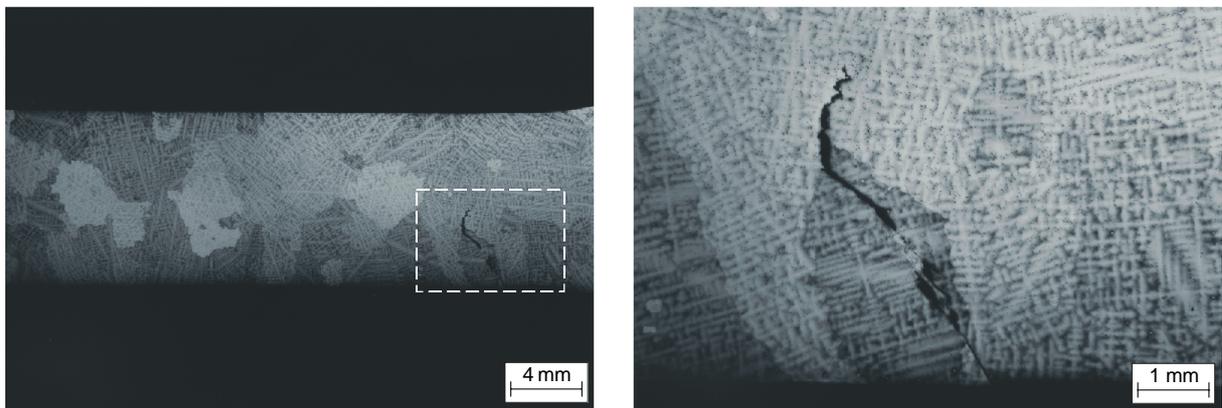


Bild 4.3: Rissverlauf LCF-Versuch IN 939 bei $550\text{ }^\circ\text{C}$

Zwischen dem technischen Anriss und dem Abbruch dieses Versuchs finden 8 Zyklen statt, wobei eine Risslänge von $\Delta a = 5,2\text{ mm}$ ermittelt wurde. Diese hohe Rissfortschrittsgeschwindigkeit ist eine Folge der niedrigen Duktilität von IN 939.

Fließkurven

Zur mathematischen Beschreibung der statischen und zyklischen Fließkurve wird die Ramberg-Osgood-Gleichung (2.1) verwendet. Die mit einer linearen Regression unter Verwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechneten Parameter für den Bereich $0 \leq \epsilon \leq 2\%$ sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Hierbei wurde für die statische und zyklische Fließkurve jeweils derselbe Elastizitätsmodul verwendet.

Temperatur	Fließkurve	K'/MPa	n'	E/GPa
RT	statisch	1247,6	0,085	191
	zyklisch	1612,0	0,098	
550 °C	statisch	1062,4	0,076	174
	zyklisch	1326,3	0,090	

Tabelle 4.4: Parameter der Ramberg-Osgood-Gleichungen für IN 939

Grafisch sind die statischen und zyklischen Fließkurven für IN 939 im [Anhang A.9](#) und [Anhang A.10](#) veranschaulicht. Ein Vergleich zeigt, dass der Werkstoff IN 939 sich bei Raumtemperatur und 550 °C jeweils zyklisch verfestigt. In [Bild 4.4](#) ist als Beispiel die zyklische Fließkurve bei 550 °C mit den zugehörigen Versuchspunkten aus den Einstufenversuchen und dem Incremental Step Test aufgetragen.

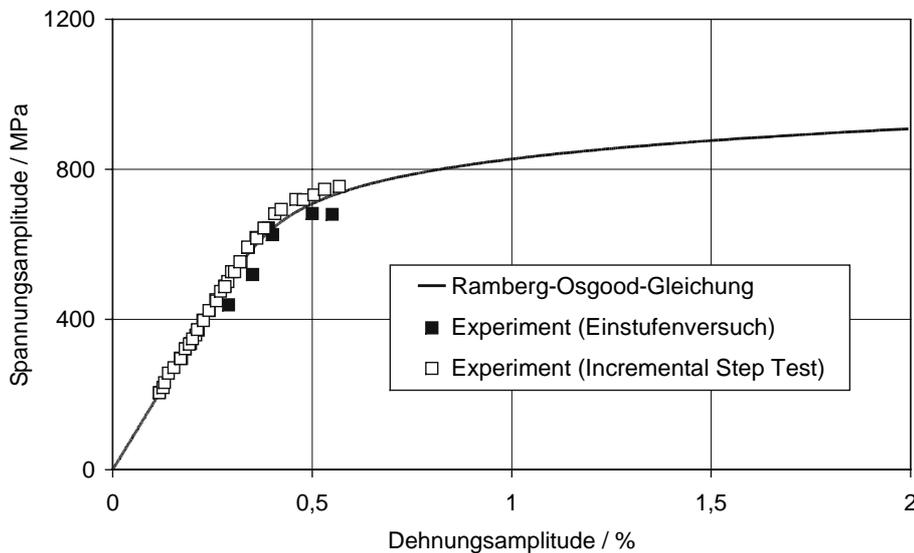


Bild 4.4: Zyklische Fließkurve IN 939 bei 550 °C

Bei der Berechnung der Regression für die Ramberg-Osgood-Gleichung in [Bild 4.4](#) wurde der geringeren Anzahl an Versuchspunkten aus Einstufenversuchen durch eine stärkere Gewichtung Rechnung getragen. Man erkennt, dass die Stützpunkte aus den Einstufenversuchen etwas unterhalb von denen aus dem Incremental Step Test liegen. Insofern zeigt der Werkstoff IN 939 offensichtlich einen geringfügigen „Trainiereffekt“, wie er manchmal auch bei austenitischen Stählen, allerdings in weit größerem Maß, beobachtet wird.

Anrisskennlinie

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Parameter für die Manson-Coffin-Gleichungen bei Raumtemperatur und 550 °C bestimmt, siehe [Tabelle 4.5](#). Bei der Berechnung der Parameter wurden die Kompatibilitätsbedingungen (2.10) sowie (2.11) zwischen der Manson-Coffin-Gleichung und der zyklischen Fließkurve berücksichtigt.

Temperatur	E/GPa	σ_f' /MPa	b	ϵ_f'	c
RT	191	1345,5	-0,060	0,158	-0,612
550 °C	174	877,5	-0,035	0,010	-0,393

Tabelle 4.5: Parameter der Manson-Coffin-Gleichungen für IN 939

Ein Vergleich zwischen der berechneten Anrisskennlinie und den rein wechselnden LCF-Versuchen bei 550 °C zeigt gute Übereinstimmung, siehe Bild 4.5. Die ohne Anriss bei $N_{AG} = 70001$ ausgebaute Probe wurde nicht bei der Regressionsrechnung berücksichtigt.

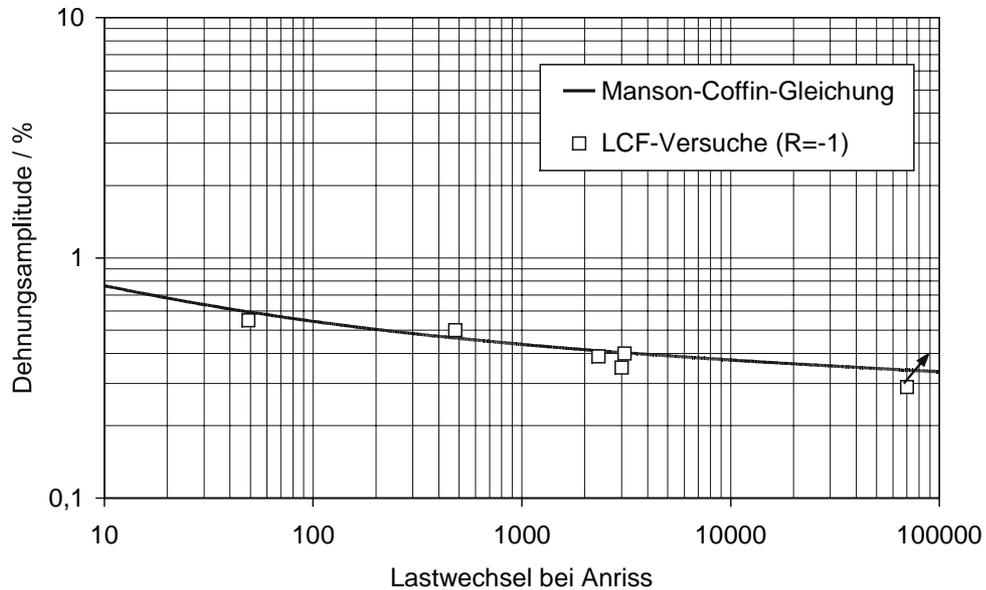


Bild 4.5: Anrisskennlinie IN 939 bei 550 °C

Wie in Bild 4.6 beispielhaft gezeigt, lassen sich unter Verwendung des Schädigungsparameters P_{SWT} auch dehnungskontrollierte LCF-Versuche mit Mittelspannungen mit den Konstanten der Manson-Coffin-Gleichung zutreffend beschreiben.

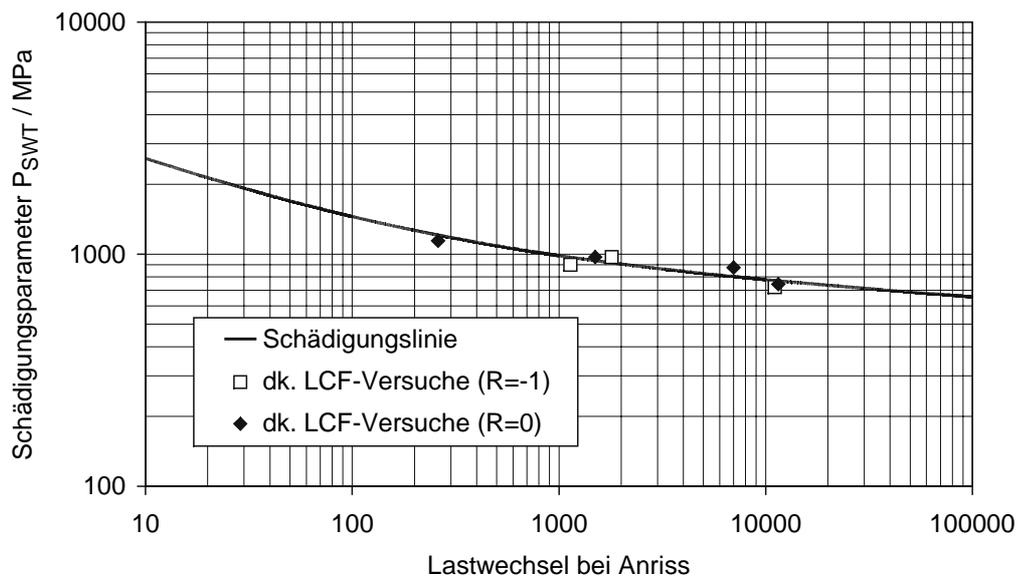


Bild 4.6: Schädigungslinie nach Smith, Watson und Topper für IN 939 bei RT (dk. = dehnungskontrolliert)

Zeitstandverhalten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine Zeitstandversuche durchgeführt. Aus diesem Grund erfolgt die Beschreibung des Zeitstandverhaltens (Kriechgleichungen, Zeitbruch- und Zeitdehngrenzen) anhand von den in der Literatur verfügbaren Daten. Insbesondere für den Schaufelwerkstoff IN 939 ist dies ohne Schwierigkeiten möglich, da dieser Werkstoff in zahlreichen Forschungsarbeiten untersucht wurde.

Am IfW Darmstadt wurde eine Kriechgleichung für die Werkstoffsorte IN 939 erarbeitet, die anhand einer differenzierten Auswertung [26] von Kriechdaten an 37 Einzelwerkstoffen bestimmt wurde [28]. Diese große Datenbasis ist für die Güte der Kriechgleichung um so bedeutsamer, als das festgestellte Streuband für die Werkstoffsorte IN 939 offensichtlich recht groß ist.

Bei der Generierung der Zeitbruch- und Zeitdehngrenzkurven wurde eine quadratische Meisterkurve unter Verwendung des Larson-Miller Parameters eingesetzt, bei der Krümmung und Steigung frei vorgebar sind. Diese etwas ungewöhnliche Vorgehensweise war erforderlich, da aufgrund der bereits angesprochenen großen Streuung ansonsten keine Kriechgleichung aufstellbar gewesen wäre.

$$P_{LM} = T \cdot (C + \log t) = B_1 + 2 (P_E - B_1) \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_E} \right)^m - (P_E - B_1) \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_E} \right)^{2m} \quad (4.1)$$

Die zur Darstellung der Meisterkurven in Bild 4.7 benötigten Konstanten sind in Anhang A.11 dargestellt. Durch Vergleich mit Kriechdaten an Einzelwerkstoffen [26] konnte gezeigt werden, dass eine Extrapolation der ursprünglich für den Bereich $600 \text{ °C} \leq \vartheta \leq 1000 \text{ °C}$ angegebenen Meisterkurve auf 550 °C möglich ist.

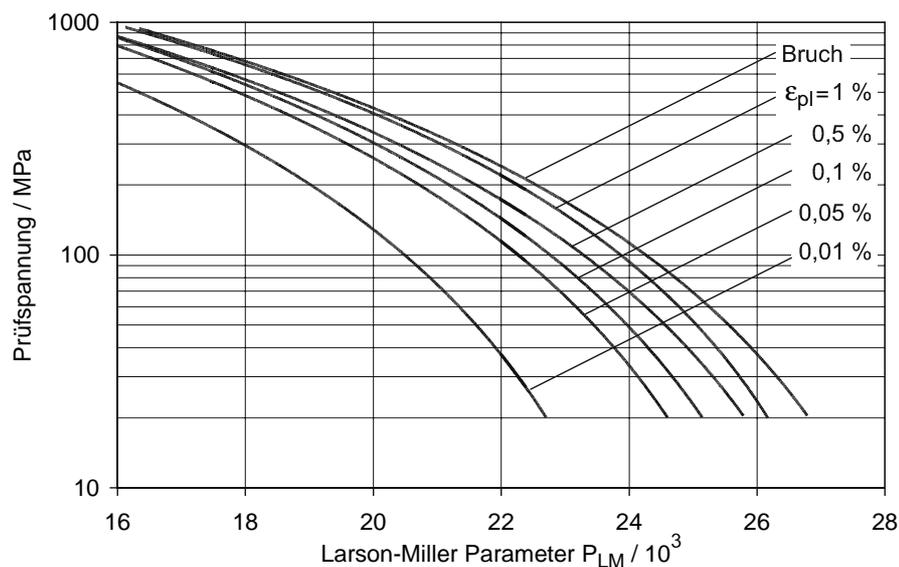


Bild 4.7: Meisterkurven IN 939 [28]

Als Beispiel sind die isothermen Zeitbruchkurven dargestellt, siehe [Bild 4.8](#). Als wesentliches Ergebnis bleibt festzuhalten, dass für die vorliegenden Versuchsbedingungen kaum relevante Zeitstandschädigungen auftreten.

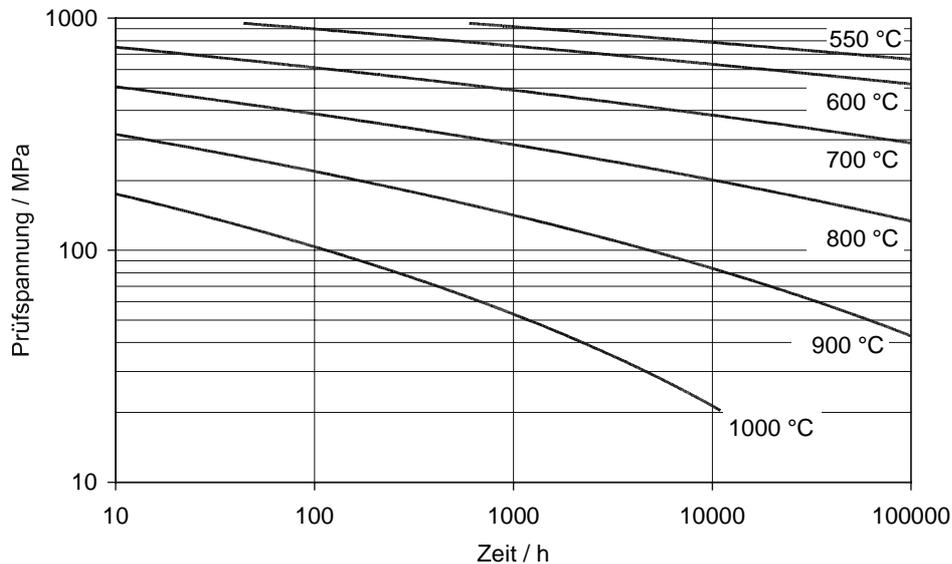


Bild 4.8: Isotherme Zeitbruchkurven IN 939 [28]

Auf Basis von Stützpunkten, die aus der Meisterkurve abgeleitet werden, lassen sich mittlere Kriechgleichungen angeben, siehe [Anhang A.12](#). Die hieraus resultierenden Kriechkurven für 550 °C sind in [Bild 4.9](#) dargestellt. Dies zeigt noch einmal, dass offensichtlich bei der Nickel-Basis-Legierung IN 939 bei 550 °C nur bei sehr hohen Spannungen nahe der Zugfestigkeit technisch relevante Kriechvorgänge auftreten.

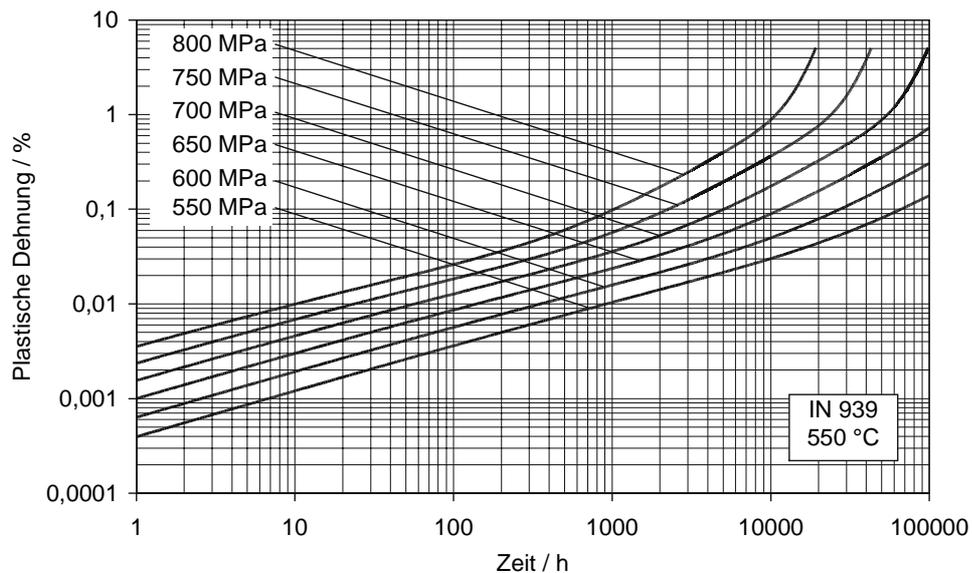


Bild 4.9: Kriechkurven IN 939 bei 550 °C

4.2 Basischarakterisierung IN 718

Die geschmiedete Nickel-Basis-Legierung IN 718 ist ein typischer Werkstoff für Radscheiben in stationären Gasturbinen. Darüber hinaus werden verschiedene Komponenten in Flugzeugturbinen aus IN 718 gefertigt. Der Schwerpunkt der Werkstoffuntersuchungen richtet sich dabei in Regel auf das LCF-Verhalten, da Versagen durch Ermüdung und Kriechermüdung bei diesen Anwendungen von besonderem Interesse ist.

Allgemeines

Im Rahmen dieser Arbeit wurden von ALSTOM geschmiedete Scheiben zur Verfügung gestellt, die von der Firma Special Metals (Hartford NY, USA) geliefert wurden. Die durchgeführte Wärmebehandlung ist dabei vergleichsweise aufwendig:

955 °C 1 h Luftabkühlung,
718 °C 8 h,
Ofenabkühlung 56 °C/h bis 620 °C,
620 °C 8 h Luftabkühlung.

Die chemische Zusammensetzung der vorliegenden Schmelze ist in Tabelle 4.6 dargestellt. Ein Vergleich mit den Spezifikationen des Herstellers zeigt gute Übereinstimmung.

Massenanteile IN 718 in %						
Co	Cr	Fe	Nb	Mo	Ti	Ni
0,2	19,1	18,1	6,6	3,4	0,9	Basis

Tabelle 4.6 Chemische Zusammensetzung IN 718

Die Mikrostruktur von IN 718 ist in Bild 4.10 dargestellt. Das unregelmäßige Duplex-Gefüge zeigt dabei Korngrößen nach ASTM zwischen 4 bis 5 bzw. 7 bis 8.

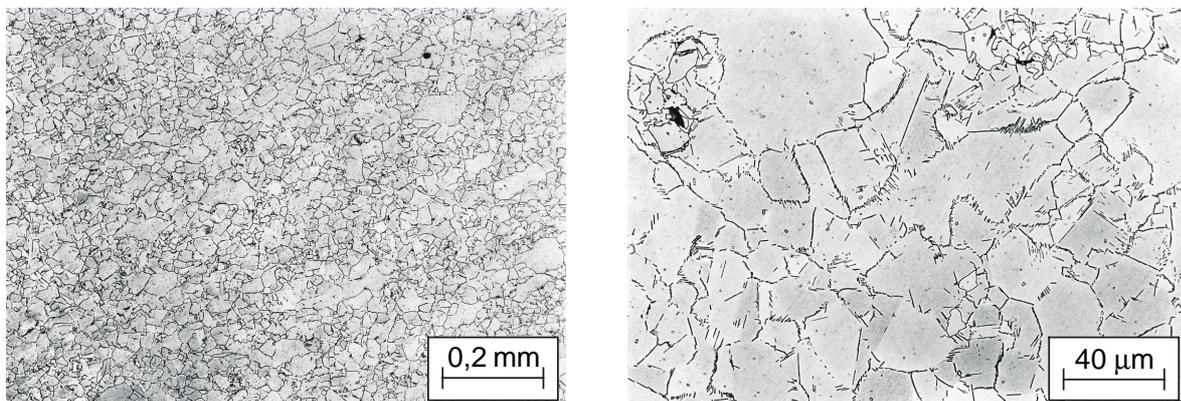


Bild 4.10: Mikrostruktur IN 718 (Ausgangszustand)

Härteprüfungen ergaben eine mittlere Vickershärte für IN 718 von 462 HV 10. Die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche sind in Bild 4.11 dargestellt. Dabei tritt eine im Vergleich zu ferritischen Stählen geringere Kerbschlagarbeit in der Hochlage auf.

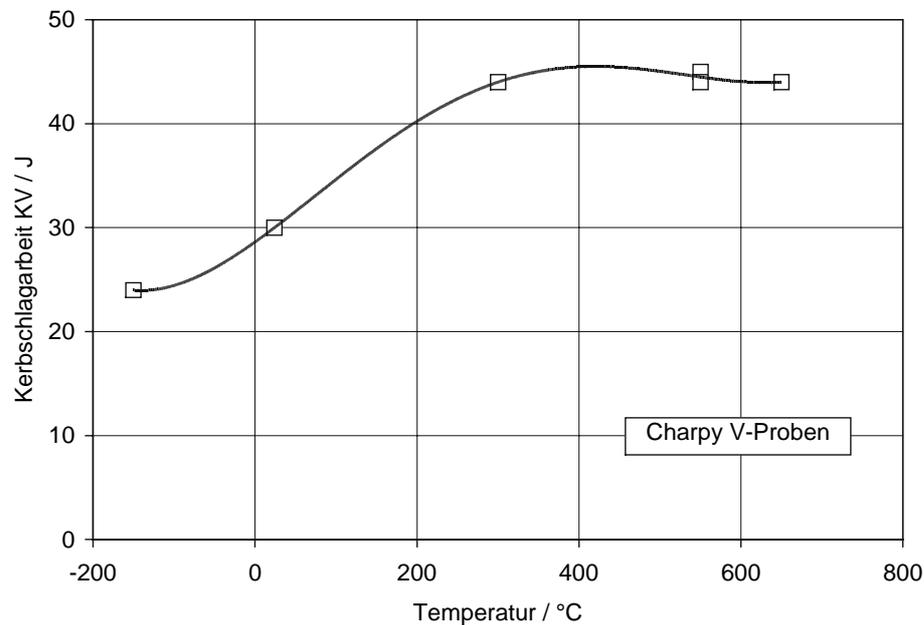


Bild 4.11: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche an IN 718

Zur Bestimmung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten wurde ein Dilatometerversuch mit dem thermomechanischen Prüfsystem Gleeble 2000 durchgeführt, siehe Anhang A.13. Die dabei eingesetzte Probenform zeigt Anhang A.8.

Zugversuche

Es wurden sechs Zugversuche bei den Versuchstemperaturen (RT, 550 °C) sowie zusätzlich stichprobenartig auch bei weiteren Temperaturen durchgeführt. Die Dehngeschwindigkeit wurde dabei im Bereich zwischen 0,04 %/min und 4 %/min variiert. Es konnte festgestellt werden, dass der IN 718 erst bei Temperaturen größer als 600 °C eine signifikante Dehnratenabhängigkeit im untersuchten Bereich zeigt. Die statistische Auswertung der durchgeführten Versuche ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Temp.	Größe	R _{p0,2} /MPa	R _{p1} /MPa	R _m /MPa	E /GPa	A ₅ /%	Z /%
RT	\bar{X}	1211	1314	1417	203	18,3	27,5
	s	20	25	21	4	1,1	0,7
550 °C	\bar{X}	1013	1173	1214	171	19,3	38,0
	s	35	19	11	4	3,6	1,0

Tabelle 4.7: Statistische Auswertung der Zugversuche an IN 718

Die Kennwerte aus der vorliegenden Werkstoffcharge zeigen gute Übereinstimmung mit den zur Verfügung stehenden zusätzlichen Ergebnissen für andere Schmelzen [38], siehe Anhang A.14

Bei Temperaturen über 300 °C tritt beim IN 718 bei kleinen bis mittleren Dehngeschwindigkeiten ein unregelmäßiger Verlauf der Fließkurve im überelastischen Bereich auf, siehe Anhang A.15. Der ruckartige Verlauf wird durch blockierte Versetzungsbewegungen verursacht, die dann nicht mehr zu weiteren plastischen Verformungen beitragen können. Dieser Effekt, der auch als Portevin-Le Chatelier Effekt bezeichnet wird, kann auf dynamische Reckalterungsvorgänge im Werkstoff zurückgeführt werden [83-85].

LCF-Versuche

Die LCF-Versuche an der Schmiedelegierung IN 718 wurden aufgrund des zur Verfügung stehenden Halbzeugs mit etwas kleineren Prüfdurchmessern ($d=8\text{ mm}$) durchgeführt, siehe Anhang A.7. Die wesentlichen Ergebnisse aus den dehnungskontrollierten Zug/Druck-Wechselversuchen einschließlich der Incremental-Step-Tests sind in Tabelle 4.8 zusammengestellt.

Temp.	ϵ_a /%	Probe	N_A	N_{AG}	N_B	$\sigma_a(N_A/2)$ /MPa	$\sigma_{max}(N_A/2)$ /MPa
RT	0,52	7-L-22	8247	8313	---	955,9	885,9
	0,65	7-L-21	5241	5520	---	995,7	994,8
	0,70	7-L-20	3322	---	3324	1015,6	952,0
	0,75	7-L-19	1675	---	1678	1055,5	995,7
	max. 0,75	7-L-23	---	5303	---	Incremental Step Test	
550 °C	0,43	7-L-15	13301	13379	---	716,9	707,2
	0,52	7-L-9	2649	---	2660	697,5	705,2
	0,52	7-L-8	1764	---	1819	706,3	674,2
	0,60	7-L-13	1192	1224	---	785,4	771,3
	0,72	7-L-27	1043	1064	---	855,8	820,8
	0,78	7-L-16	359	410	---	901,0	971,4
	0,85	7-L-14	601	610	---	896,2	877,2
	max. 0,80	7-L-26	1820	1955	---	Incremental Step Test	

Tabelle 4.8: Dehnungswechselversuche IN 718 bei RT und 550 °C

Metallografische Untersuchungen zeigen, dass der Rissverlauf bei zyklischer Beanspruchung beim Werkstoff IN 718 makroskopisch senkrecht zur größten Hauptspannung verläuft, wie dies aufgrund der im Vergleich zum IN 939 feinkörnigeren Struktur zu erwarten war. In Bild 4.12 ist ein geätzter Längsschliff der LCF-Probe L-7-27 dargestellt, die mit der Dehnungsamplitude $\varepsilon_a = 0,72\%$ bei 550 °C belastet wurde. Im Gegensatz zum IN 939 finden sich bei diesem Werkstoff neben dem Hauptriss noch weitere Risse, die eine maximale Länge von 300 μm erreicht haben.

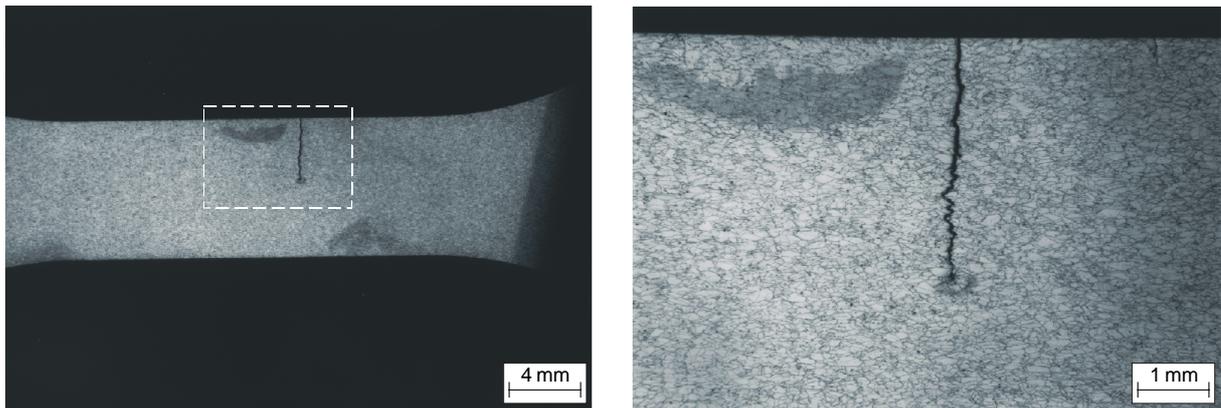


Bild 4.12: Anrissbildung im LCF-Versuch IN 718

Fließkurven

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit die Ergebnisse von 31 Zugversuchen sowie 64 spannungs- und dehnungskontrollierten LCF-Versuchen an IN 718 ausgewertet, teilweise auch unter Berücksichtigung von Mittelspannungen. Mit Hilfe dieser Experimente ist eine hervorragende Charakterisierung des zyklischen Werkstoffverhaltens für Raumtemperatur, 400 °C, 550 °C und 600 °C möglich. Die Parameter für die Ramberg-Osgood-Gleichung der statischen und zyklischen Fließkurven bis maximal 2 % Gesamtdehnung sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

Temperatur	Fließkurve	K'/MPa	n'	E/GPa
RT	statisch	1807,9	0,067	203
	zyklisch	1729,5	0,076	
400 °C	statisch	1843,1	0,103	186
	zyklisch	1549,0	0,088	
550 °C	statisch	1963,9	0,111	171
	zyklisch	1607,7	0,098	
600 °C	statisch	1671,3	0,089	169
	zyklisch	1889,2	0,160	

Tabelle 4.9: Parameter der Ramberg-Osgood-Gleichungen für IN 718

Der IN 718 zeigt im gesamten untersuchten Temperaturbereich ein entfestigendes Verhalten, siehe auch [Bild 4.13](#). Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Versuchspunkte aus Einstufenversuchen und Incremental Step Tests.

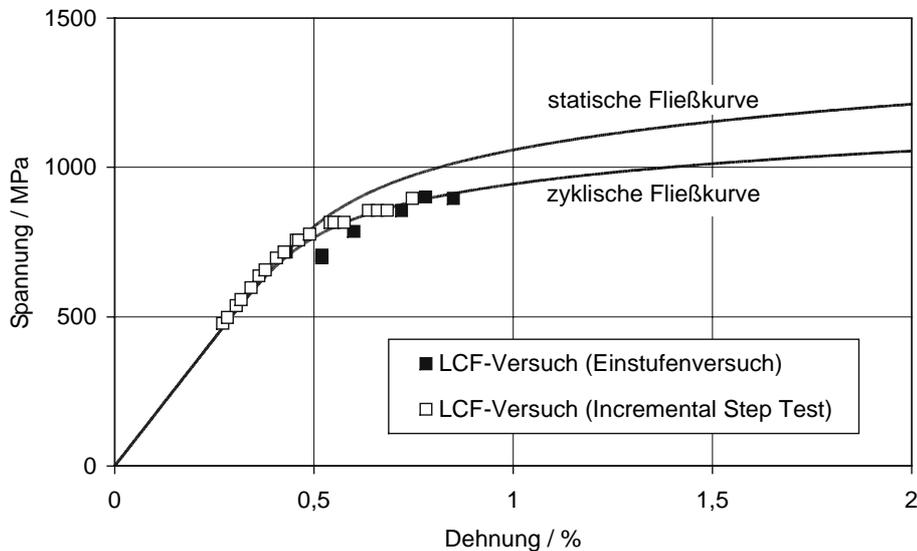


Bild 4.13: Statische und zyklische Fließkurve IN 718 bei 550 °C

Anrisskennlinie

Die ermittelten Parameter für die Manson-Coffin-Gleichung für IN 718 sind in [Tabelle 4.10](#) dargestellt.

Temperatur	E/GPa	σ_f' /MPa	b	ϵ_f'	c
RT	203	2076,9	-0,077	11,115	-1,011
400 °C	186	1494,0	-0,064	0,663	-0,726
550 °C	171	1677,4	-0,089	1,542	-0,905
600 °C	169	1143,5	-0,057	0,043	-0,356

Tabelle 4.10: Parameter der Manson-Coffin-Gleichungen für IN 718

Als Beispiel ist die Anrisskennlinie bei 550 °C dargestellt, wobei zum Vergleich zusätzlich die zugehörigen Experimente mit $R_\epsilon = -1$ eingetragen sind, siehe [Bild 4.14](#).

Wie bereits in Abschnitt 2.2 diskutiert, ist mit dem Schädigungsparameter P_{SWT} eine zutreffende Beschreibung des Mittelspannungseinflusses bei der Schmiedelegierung IN 718 möglich, siehe auch [Bild 2.16](#). Dies konnte anhand von spannungskontrollierten Experimenten mit Mittelspannungen bei 400 °C und 600 °C verifiziert werden.

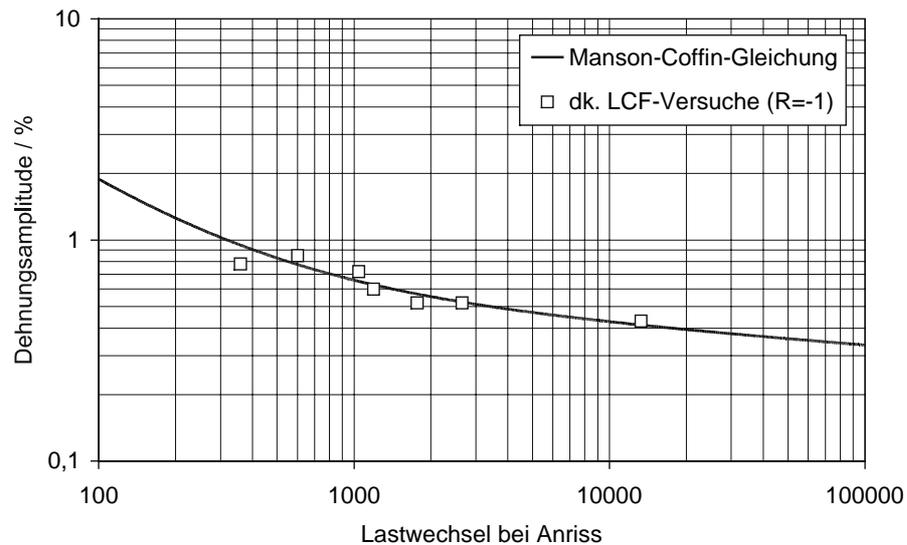


Bild 4.14: Anrisskennlinie IN 718 bei 550 °C
(dk. = dehnungskontrolliert)

Zeitstandverhalten

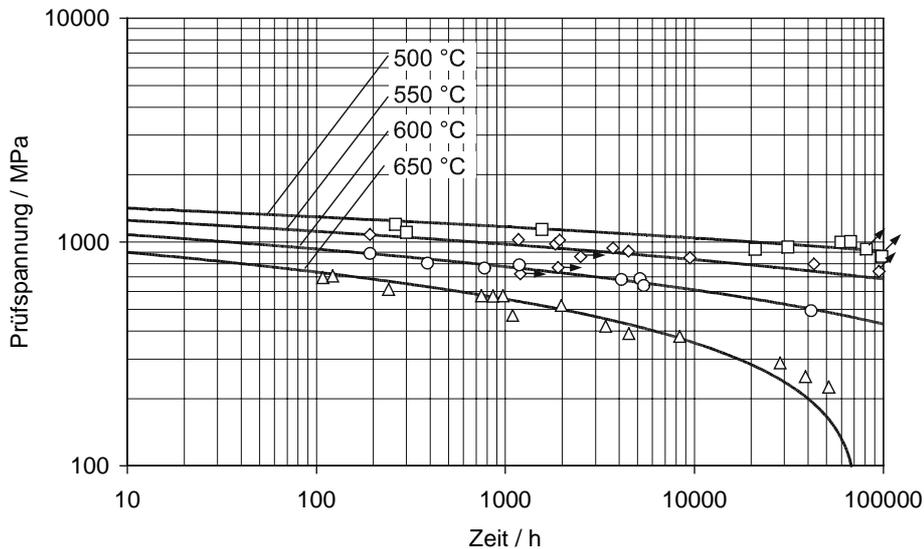
In der Literatur finden sich wenige Hinweise auf Zeitstanddaten an IN 718, da in den typischen Anwendungsbereichen dieses Werkstoffs Ermüdungs- und nicht Zeitstandserschädigung relevant ist. Zur Beschreibung des Kriechverhaltens werden insgesamt 52 Kriechversuche im Temperaturbereich zwischen 500 °C und 650 °C herangezogen, die von GEC ALSTOM [38] und vom IfW Darmstadt [86] zur Verfügung gestellt wurden.

Bei der Auswertung der Kriechdaten wurde eine ähnliche Vorgehensweise wie bei dem Schaufelwerkstoff IN 939 angewandt. Unter Verwendung des Larson-Miller Parameters liess sich die in [Anhang A.16](#) dargestellte temperaturunabhängige Meisterkurve gemäß Gleichung (4.1) aufstellen. Die zugehörigen Konstanten sind in [Tabelle 4.12](#) zusammengefasst.

$\epsilon_{pl} / \%$	C	B_1	σ_E / MPa	$P_E / 10^3$
0,1	20	22,167	40,0	22,370
0,5	20	22,400	44,0	22,610
1,0	20	22,553	50,0	22,801
5,0	20	22,577	60,0	22,900
10,0	20	22,530	66,0	22,900
Bruch	20	22,527	71,2	22,936

Tabelle 4.11: Materialparameter der Meisterkurven für IN 718 ($m = 0,541$)

Als Beispiel sind die isothermen Zeitbruchkurven für IN 718 in [Bild 4.15](#) veranschaulicht. Zusätzlich sind die Zeitdehngrenzkurven für $\epsilon_{pl} = 0,5\%$ und $\epsilon_{pl} = 1\%$ im [Anhang A.17](#) und [Anhang A.18](#) dargestellt. Eine allgemeingültige Kriechgleichung für die Werkstoffsorte IN 718 konnte dagegen mit den vorliegenden Daten nicht aufgestellt werden.



[Bild 4.15](#): Isotherme Zeitbruchkurven IN 718

4.3 Modellkörper

Wie bereits in Kapitel 3 diskutiert, soll ein bauteilähnlicher Modellkörper für Schaufel-Scheibe-Verbindungen entwickelt werden. An diesem Modellkörper werden LCF-Versuche ohne und mit Haltezeit durchgeführt, die zur Verifizierung eines rechnerischen Lebensdauerkonzepts herangezogen werden.

Entwicklung eines Modellkörpers

Der für die LCF-Versuche vorgesehene Modellkörper ist in [Bild 4.16](#) dargestellt. Die „Scheibe“ wird durch einen einfachen Balken abgebildet, der aus der geschmiedeten Nickel-Basis-Legierung IN 718 gefertigt wird. Die „Schaufel“ aus dem Gusswerkstoff IN 939 wird durch den Schaufelfuss und ein sich daran anschließendes Gewindestück approximiert. Im Bereich der Schaufel-Scheibe-Verbindung wird die Oberfläche kugelgestrahlt. Die Modellkörper wurden von der Firma ALSTOM gefertigt, wobei die Fertigungsparameter wie etwa die Bearbeitungstoleranzen an die Gegebenheiten der Fertigung von Gasturbinenkomponenten angepasst wurden.