

# LEBENSDAUERVORHERSAGEN FÜR HEIßGASBEAUFSCHLAGTE TURBINENBAUTEILE

(Vortrag im Rahmen des Seminars „Mechanik in Forschung und industrieller Anwendung“ auf dem  
Neujahrsempfang 2002 des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Ruhr-Universität Bochum)

D. Anding

MTU Aero Engines GmbH  
Dachauer Str. 665, 80995 München

## 1. EINLEITUNG

Durch die während einer Flugmission auftretenden Lasten sind die Bauteile eines Triebwerks verschiedenen Ermüdungsmechanismen unterworfen, siehe [1]. Als Beispiele seien hier thermomechanische Ermüdung (TMF) und Kriechermüdung genannt (siehe [5], [6], [10], [11]). Klassische Verfahren zur Lebensdauermodellierung benutzen die folgende Vorgehensweise, siehe [2]:

- Die Lebensdauerkurven werden aus LCF-Versuchen ermittelt.
- Zur Beschreibung der Lebensdauer wird der Manson-Coffin-Ansatz verwendet (siehe [10], [11]).
- Die während einer Flugmission auftretenden Spannungen werden durch eine linear-elastische Rechnung ermittelt. Anschließend erfolgt eine Korrektur der Spannungen mit Ramberg-Osgood und Neuber (siehe [2]).

Bei der Lebensdauervorhersage für Turbinenschaufeln in Flugtriebwerken tritt zusätzlich das Problem auf, daß Flugmissionen sehr komplex sein und viele unterschiedliche Lastpunkte beinhalten können. Um einen Vergleich mit den gemessenen Lebensdauerkurven anstellen zu können, ist es notwendig, Zyklen zu extrahieren, siehe [2]. Hierzu dient das sogenannte Rainflow-Verfahren. Weiterhin erwähnt werden sollte die Problematik von Spannungskorrekturen mit dem oben erwähnten Neuber-Verfahren, da es die Lastgeschichte nicht mit berücksichtigt.

Aus diesem Grunde werden verbesserte Spannungsberechnungen mit viskoplastischen Materialmodellen durchgeführt (siehe [3], [8], [9]). Zwei unterschiedliche Wege werden hier gezeigt:

- Die Materialbibliothek Z-mat für ABAQUS (siehe [7], [12]), sowie das
- INTERATOM-Modell als Benutzerroutine in ABAQUS (siehe [4], [7]).

## 2. KLASSISCHE LEBENSDAUERMODELLIERUNG

Im Rahmen der klassischen Lebensdauermodellierung werden LCF-Versuche benötigt; diese sind dehnungsgesteuert, werden mit

einer konstanten Dehnschwingbreite und bei einer konstanten Temperatur durchgeführt (siehe Bild 1). Ziel ist die Bestimmung der Anzahl der Zyklen bis zum Versagen der Probe unter den oben erwähnten Bedingungen.

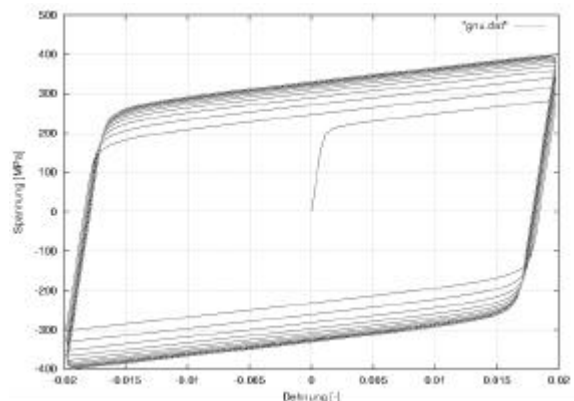


BILD 1. LCF-Versuch

Aus den LCF-Versuchen lassen sich Lebensdauerkurven ableiten (siehe Bild 2). Diese beinhalten die Anzahl der Zyklen bis zum Versagen der Probe als Funktion der Temperatur und der Dehnschwingbreite, mit der der Versuch gefahren wurde.

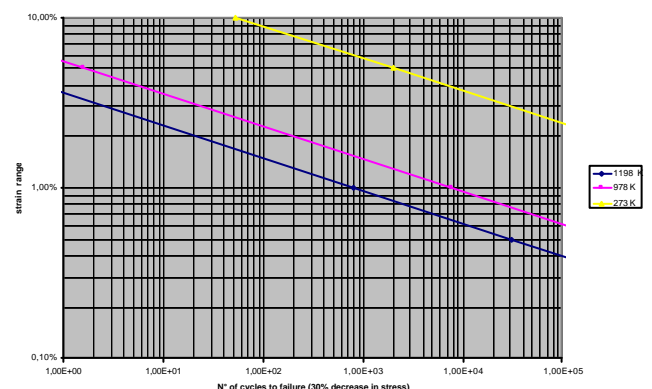


BILD 2. Lebensdauerkurven aus LCF-Versuchen

Die Beschreibung der Lebensdauer erfolgt mit der Manson-Coffin-Beziehung (siehe Bild 3). Diese beinhaltet einen elastischen Anteil für große Lebensdauern (d.h. kleine Dehnschwingbreiten)

und einen plastischen Anteil für kleine Lebensdauern (d.h. große Dehnschwingbreiten).

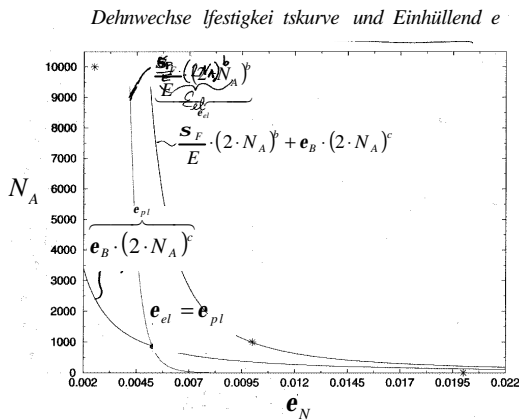


BILD 3. Beschreibung der Lebensdauerkurven mit Manson-Coffin

Zur Berechnung der während einer Flugmission auftretenden Spannungen und Dehnungen im Bauteil dient eine linear-elastische Rechnung. Zur Bestimmung der wahren Spannungen und Dehnungen wird eine Spannungskorrektur nach Neuber durchgeführt (die sogenannte Neuber-Hyperbel, siehe Bild 4). Die Beschreibung der Fließkurve des Materials erfolgt dabei mit der Ramberg-Osgood-Beziehung. Mit dieser korrigierten Spannung läßt sich die Dehnschwingbreite nach Neuber berechnen und die Lebensdauer mit der Manson-Coffin-Beziehung bewerten.

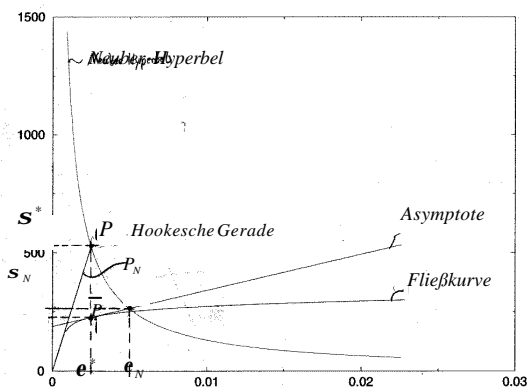


BILD 4. Spannungskorrektur mit der Neuber-Hyperbel

Als Beispiel für Lebensdauervorhersagen mit der oben vorgestellten Methode wird im folgenden eine

Scheibe mit mittiger Bohrung unter Zugbelastung betrachtet (siehe Bild 5).

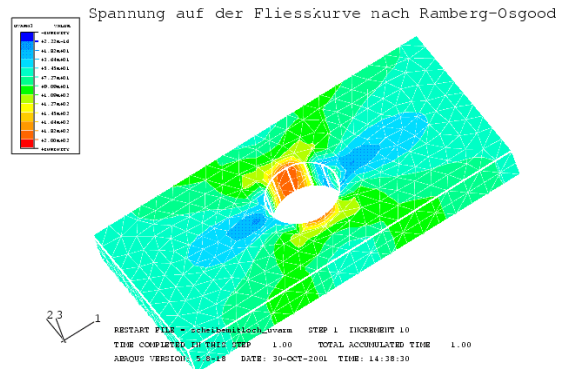


BILD 5. Scheibe mit mittiger Bohrung unter Zugbelastung

Aufgrund dieser Belastung stellt sich die höchste Spannung im Bauteil normal zur Lastrichtung in der Bohrung ein. Hier tritt aufgrund der hohen Belastung eine Plastifizierung des Materials auf (siehe Bild 6).

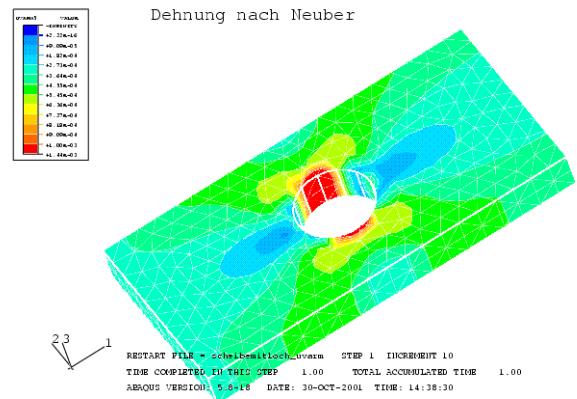


BILD 6. Plastifizierung in der Bohrung der Scheibe

Aus der Plastifizierung des Materials resultiert eine Schädigung (siehe Bild 7), welche zur Rißinitiierung und –bei fortgesetzter Belastung– zur Rißausbreitung und schließlich zum Versagen des Bauteils führt.

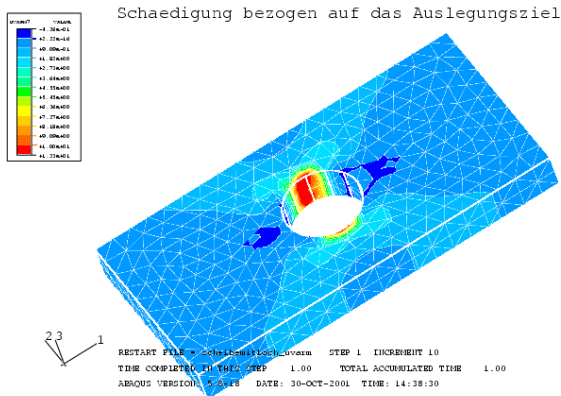


BILD 7. Schädigung in der Bohrung der Scheibe

### 3. LEBENSDAUERVORHERSAGE FÜR TURBINENSCHAUFELN IN FLUGTRIEBWERKEN

Bei der Lebensdauervorhersage für Turbinenschaufeln besteht die Problematik, aus der komplexen Flugmission des Triebwerks mit vielen Lastpunkten Zyklen zu extrahieren, um die oben beschriebene Vorgehensweise anwenden zu können. Hier hilft das sogenannte Rainflow-Verfahren, mit dem man aus beliebigen Lastantworten Zyklen definieren kann. Ein Minimalzyklus zur Bestimmung einer Lebensdauer wäre beispielsweise die Beschleunigung von Idle, also dem Leerlauf vor dem Start, zu Take-Off, also den Lasten beim Abheben des Flugzeuges, und der Verzögerung zurück zu Idle.

In Bild 8 ist die Temperaturverteilung in einer Turbinenschaufel bei der Beschleunigung dargestellt.

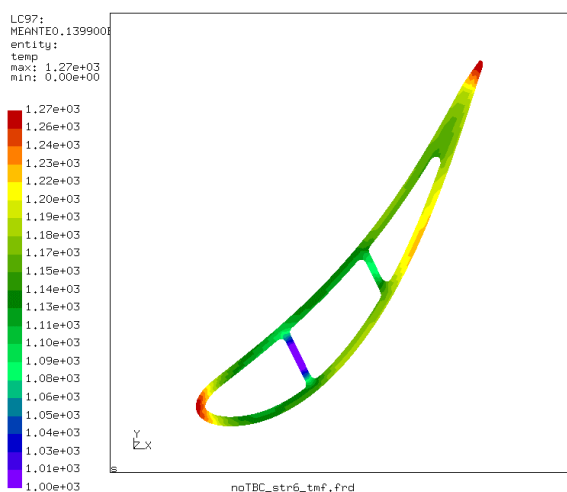


BILD 8. Temperaturverteilung im Schaufelblatt beim Beschleunigen

Man erkennt die ungleichmäßige Temperaturverteilung, welche sich zudem in jedem

Lastpunkt ändert. Ebenso variieren die Lasten aus Fliehkraft und Gaskräften. Aus dieser kombinierten Belastung entsteht im Bauteil die thermomechanische Ermüdung (TMF). In Bild 9 ist die Dehnungsantwort an einer bestimmten Stelle des Schaufelblatts auf die thermomechanischen Lasten im Zyklus dargestellt:

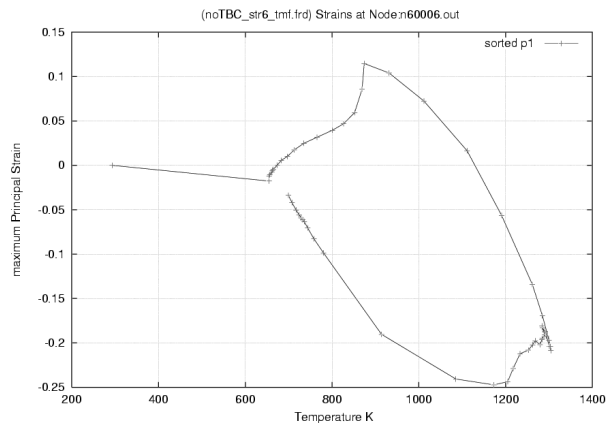


BILD 9. Dehnungsantwort auf thermomechanische Lasten

Die weiteren Schritte zur Lebensdauervorhersage sind die Definition einer Dehnschwingbreite, die Definition einer Referenztemperatur im Zyklus sowie die vorher gezeigte Spannungskorrektur nach Neuber. Diese ist allerdings problematisch, da dadurch die einzelnen Lastpunkte entkoppelt werden. Aus diesem Grunde wird im folgenden die Spannungsberechnung mit viskoplastischen Materialmodellen gezeigt, welche dieses Problem nicht aufweist.

### 4. SPANNUNGSBERECHNUNG MIT VISKOPLASTISCHEN MATERIALMODELLEN

Für die Spannungsberechnung mit viskoplastischen Materialmodellen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, von denen hier zwei präsentiert werden sollen. Die eine ist die Materialbibliothek Z-mat für ABAQUS, welche verschiedene Modelle zur Beschreibung viskoplastischen Materialverhaltens enthält. Ein bekanntes Modell ist das Modell von Chaboche für temperaturabhängiges Materialverhalten. Es erfasst die isotrope und die kinematische Verfestigung des Materials sowie die Dehnratenabhängigkeit. Beispiele für die Beschreibung viskoplastischen Materialverhaltens mit dem Chaboche-Modell sind in den Bildern 10 und 11 gegeben.

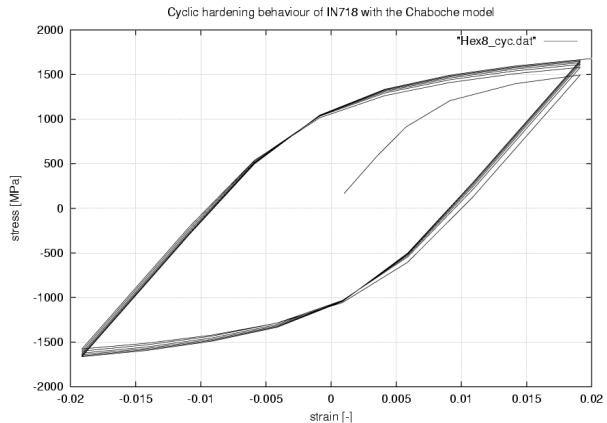


BILD 10. Beschreibung der zyklischen Verfestigung von Inconel718 mit dem Chaboche-Modell

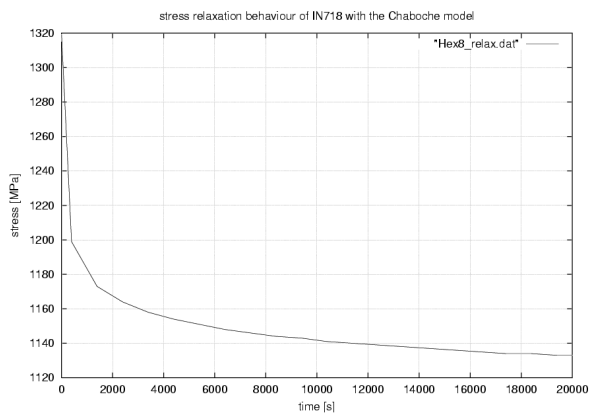


BILD 11. Beschreibung des Relaxationsverhaltens von Inconel718 mit dem Chaboche-Modell

Weiterhin besteht die Möglichkeit, mit Z-mat das Verhalten anisotroper Materialien zu beschreiben. Typische Beispiele sind Einkristallwerkstoffe für Turbinenschaufeln. Zur Beschreibung des Verhaltens von Einkristallen dient in Z-mat das phänomenologische Mikro-Makro-Modell von Cailletaud. Das Modell erfasst kubische und Oktaeder-Gleitsysteme sowie die Interaktion zwischen den Gleitsystemen. Auf der Mikro-Ebene des Materials wird wiederum das oben erwähnte Chaboche-Modell verwendet (siehe Bild 12).

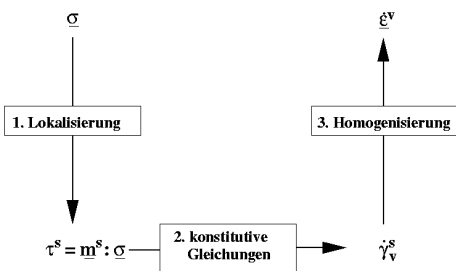


BILD 12. Mikro-Makro-Modell von Cailletaud

In Bild 13 ist die zyklische Verfestigung des Materials in [0 0 1]-Richtung dargestellt. Aufgrund der Anisotropie des Materials gilt dieses Verhalten nur in dieser Richtung.

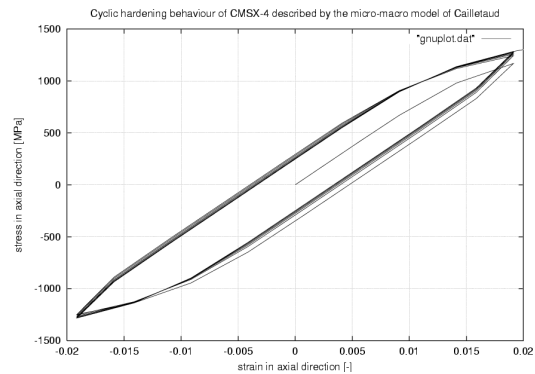


BILD 13. Beschreibung der zyklischen Verfestigung von CMSX-4 in [0 0 1]-Richtung mit dem Modell von Cailletaud

Im folgenden wird ein Beispiel für das Strukturverhalten einer Turbinenleitschaufel unter Maximallast bei Take-Off gegeben. Dazu wird die Berechnung der auftretenden Kriechdeformation mit dem Chaboche-Modell in Z-mat durchgeführt. Zu überprüfen ist die Zulässigkeit der auftretenden Kriechverformung.

In Bild 14 ist die anfängliche Spannungsverteilung im Bauteil dargestellt, welche sich durch Kriech- und Relaxationsvorgänge während der Belastung ändert.

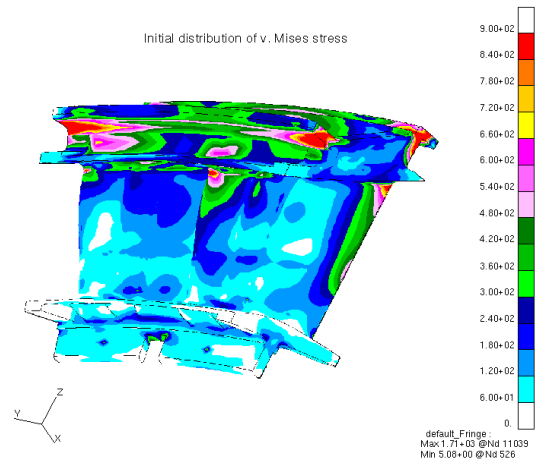


BILD 14. Anfängliche Spannungsverteilung in einer Turbinenleitschaufel unter Maximallast

Diese Änderung ist für ausgewählte Bereiche des Bauteils in Bild 15 als Funktion der Kriechzeit dargestellt.

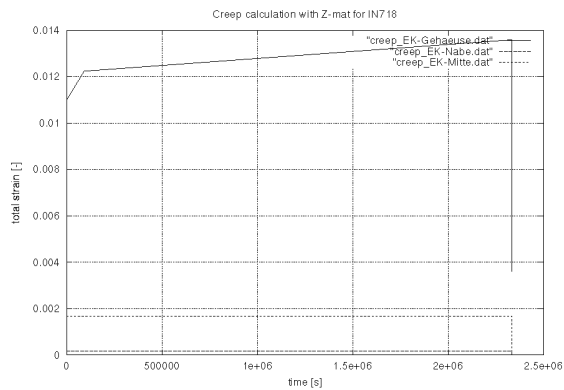


BILD 15. Kriechdehnung in ausgewählten Bereichen einer Turbinenschaufel

Weiterhin von Bedeutung ist die benötigte Rechenzeit (CPU-Zeit) für komplexe nichtlineare Analysen. In der folgenden Tabelle ist die CPU-Zeit sowie die Anzahl der benötigten Inkremente zur Berechnung der Kriechdeformation für zwei unterschiedliche Methoden zusammengefasst; die eine Methode ist das Modell von Chaboche aus der Materialbibliothek Z-mat, die andere ist eine benutzereigene Routine in ABAQUS.

	Creep calculation with ABAQUS using subroutine 'CREEP'	Creep calculation using Z-mat
N° of increments	44	46
CPU time [h]	3.82	27.45
Factor	1 (reference value)	7.19

TABELLE 1. Vergleich von Rechenzeiten bei Kriechrechnungen mit verschiedenen Methoden

Das Fazit der Berechnung der Kriechdeformation einer Turbinenschaufel mit dem Chaboche-Modell aus Z-mat ist:

- Z-mat ist robust und stabil,
- Die Ergebnisse sind vernünftig und nachvollziehbar und
- Die Rechenzeiten bei Kriechrechnungen sind vertretbar.

Die zweite Möglichkeit zur Spannungsberechnung mit viskoplastischen Materialmodellen ist die eigene Implementierung beliebiger Modelle über eine vorgegebene Benutzerschnittstelle in ABAQUS. Als Beispiel hierfür wird im folgenden das viskoplastische INTERATOM-Modell mit temperaturabhängigen Parametern präsentiert. Zur Validierung der Implementierung dienen zwei Beispiele. Das erste ist ein beidseitig eingespannter Druckstab unter gleichmäßiger Erwärmung, siehe Bild 16.

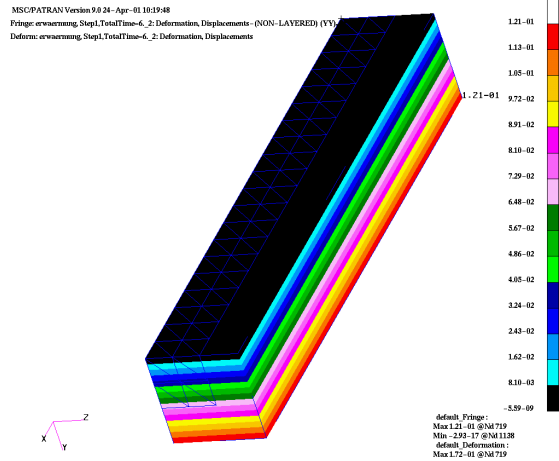


BILD 16. Beidseitig eingespannter Druckstab unter gleichmäßiger Erwärmung

Zur Verdeutlichung der Verfestigung des Materials ist in Bild 17 die resultierende Fließkurve im Vergleich zur Berechnung mit linear-elastischem Materialverhalten dargestellt.

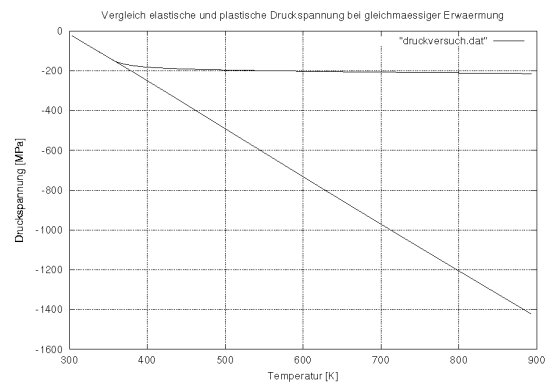


BILD 17. Vergleich der resultierenden Druckspannung im Stab bei linear-elastischem und nichtlinearem Materialverhalten

Das zweite Beispiel ist die schon vorher dargestellte Scheibe mit mittiger Bohrung unter Zugbelastung. Wie vorher erwähnt, tritt die höchste Spannung normal zur Lasttrichtung in der Bohrung auf (siehe Bild 18), was zur Plastifizierung und Schädigung des Materials führt.

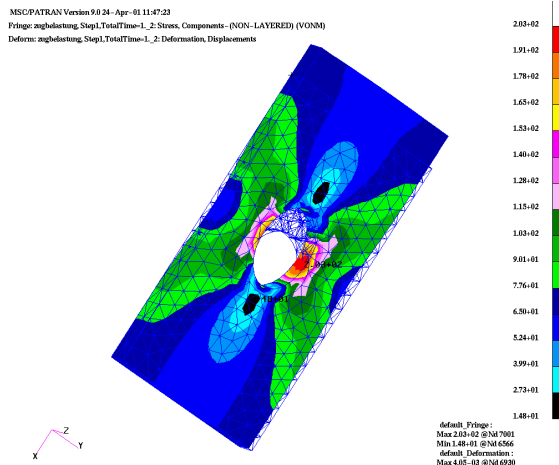


BILD 18. Spannungsverteilung in einer Scheibe mit Bohrung unter Zugbelastung

Zur Verdeutlichung der Verfestigung des Materials in der Bohrung ist in Bild 19 die resultierende Fließkurve im Vergleich zur Berechnung mit linear-elastischem Materialverhalten dargestellt.

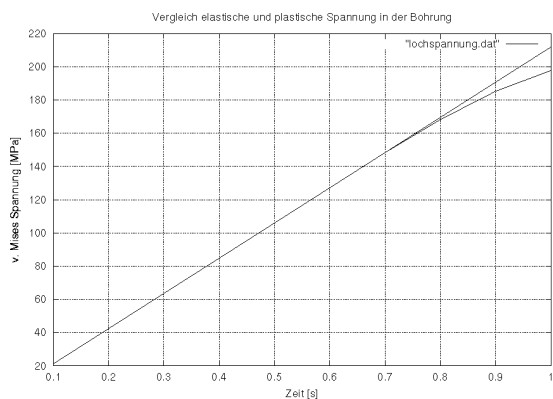


BILD 19. Vergleich der Spannung in der Bohrung bei linear-elastischem und nichtlinearem Materialverhalten

Wesentlicher Unterschied zur vorher beschriebenen Vorgehensweise ist das Wegfallen der Notwendigkeit einer Spannungs Korrektur, da alle berechneten Spannungen der Fließkurve des Materials folgen. Dies ist der wesentliche Vorteil der verbesserten Materialmodellierung.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Es wird ein Überblick über verschiedene Aspekte der Lebensdauerberechnung für Bauteile von Flugtriebwerken gegeben. Neben den klassischen Methoden zur Lebensdauervorhersage werden Beispiele für verbesserte Aussagen durch den Einsatz von viskoplastischen Materialmodellen gegeben, welche wesentliche Phänomene inelastischen Materialverhaltens beschreiben können.

## 6. LITERATUR

- [1] Chaboche, J.L. and Colie, J.P.: „On Turbine Blade Creep and Fatigue Analysis by special Kinematic Assumptions“, ONERA Technical Report Nr. 1980-108
- [2] Lemaitre, J. and Chaboche, J.L.: „Mechanics of Solid Materials“, Cambridge University Press, 1990
- [3] Bruhns, O.T.: „The INTERATOM (IA) Model“, in: O.T. Bruhns, editor, „Constitutive Modelling in the Range of Inelastic Deformations – A State of the Arts Report“, pages 33-63, INTERATOM, 1984
- [4] Bruhns, O.T. and Anding, D.K.: „On the simultaneous estimation of model parameters used in constitutive laws for inelastic material behaviour“, International Journal of Plasticity 15 (1999) 1311-1340
- [5] Manson, S.S.: „Interfaces between Fatigue, Creep and Fracture“, International Journal of Fracture Mechanics, 2:337-363, 1966
- [6] Rabotnov, Y.N.: „Creep problems in Structural members“, North Holland Publ. Comp., Amsterdam – London, 1969
- [7] Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.: „ABAQUS User’s Manual, Version 5.8, 1996
- [8] Méric, L., Poubanne, P. and Cailletaud, G.: „Single Crystal Modeling for Structural Calculations: Part 1 – Model Presentation“, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, January 1991
- [9] Méric, L. and Cailletaud, G.: „Single Crystal Modeling for Structural Calculations: Part 2 – Finite Element Implementation“, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 113, January 1991
- [10] Manson, S.S.: „Behaviour of materials under conditions of thermal stress“, NACA TN 2933, 1954
- [11] Coffin, L.F.: „A study of the effect of cyclic thermal stresses in a ductile metal“, Trans. ASME 76, 1954
- [12] Z-mat Version 8.2, User commands, ©Northwest Numerics and Modeling, Inc. 1998-2000 (<http://www.nwnumerics.com>)