

Berechnung des inelastischen Verhaltens von Superlegierungen im Hochtemperaturbereich

Dr.-Ing. **A. Bertram**, Dipl.-Ing. **J. Olschewski** und
Dipl.-Ing. **R. Sievert**, Berlin

Zusammenfassung

Um das thermo-mechanische Verhalten von ein- und vielkristallinen Turbinenschaufeln zu simulieren, konstruiert man Materialmodelle, die in Finite-Elemente-Programme implementiert werden. Die darin vorkommenden Materialkonstanten werden durch Anpassung an experimentelle Daten ermittelt. Damit ist man in der Lage, am Rechner komplexe Versuchsbedingungen zu simulieren, um die Eignung der Modelle durch Vergleich mit Experimenten zu verifizieren.

1. Einleitung

In stationären Gasturbinen wie auch in Flugtriebwerken werden Nickel-Basislegierungen in viel- und einkristalliner Ausbildung als Schaufelmaterial verwendet. Hohe Gaseintrittstemperaturen zur Erhöhung des thermischen Wirkungsgrades wie auch materialsparender Leichtbau zur Verbesserung des Schub/Gewichtsverhältnisses bei Flugtriebwerken stellen hohe Anforderungen an die Auslegung derartiger Hochtemperaturkomponenten. Im Bereich stationärer Gasturbinen läßt sich der Wirkungsgrad von Kombikraftwerken, in denen Dampf- und Gasturbinen in Koppelung im Grundlastbereich arbeiten, durch erhöhte Gaseintrittstemperaturen auf über 50 % steigern. Die damit verbundene Reduzierung des Brennstoffverbrauches führt bei einer Temperaturerhöhung von 50 °C während einer Betriebszeit von 100 000 Stunden zu einer Einsparung, die in der Größenordnung der Investitionskosten für eine Gasturbine liegen. Darüber hinaus reduziert sich die Emission von CO, CO₂ und NO_x beträchtlich.

Neben vielkristallinen Metallegierungen werden jetzt auch verstärkt einkristalline Legierungen als Schaufelwerkstoff im Flugturbinen- und demnächst auch stationären Turbinenbau eingesetzt. Da sie keine Korngrenzen mehr enthalten, sind alle diejenigen Schadens- und Versagensmechanismen ausgeschaltet, die üblicherweise auf Korngrenzen ihren Ausgang nehmen.

Die in der Praxis verwendeten Auslegungsregeln basieren auf einer mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM) durchgeführten Simulation des Bauteilverhaltens. Dabei wird zur Ermittlung der Spannungs- und Verzerrungszustände im Bauteil meistens linear-elastisches Materialverhalten unterstellt; das komplexe Materialverhalten zweiphasiger Hochtemperaturlegierungen im Bereich oberhalb der halben Schmelztemperatur kommt dabei bislang nicht zur Anwendung. Die Feststellung der Nutzungsdauer eines Bauteils erfolgt in der Regel durch eine Bewertung hinsichtlich des Verhaltens gegenüber Niedrig-Lastwechsel-Ermüdung (Low-Cycle-Fatigue, LCF) und Kriechschädigung mit Hilfe von Lebensdauerregeln, die Bezug nehmen auf berechnete kritische Spannungs- und Verzerrungszustände. Unzureichende Kenntnis des Materialverhaltens unter komplexen mehrachsigen thermisch-mechanischen Beanspruchungszuständen führt zu Unsicherheiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Auslegungsregeln und damit zu einer konservativen Auslegung mit erhöhtem Material- und Brennstoffverbrauch. Daraus resultiert die Bedeutung der Anwendung inelastischer Bauteilanalysen in der Ingenieurpraxis.

Die Materialtheorie als Teildisziplin der Kontinuumsmechanik hat die Aufgabe, das phänomenologische Verhalten von Bauteilen mit Hilfe von Materialgleichungen zu beschreiben. Diese Materialgleichungen, implementiert in Finite-Elemente-Programmsystemen, dienen dann dazu, realistischere Abschätzungen der Beanspruchungen in Hochtemperaturkomponenten wie Turbinenschaufeln vorzunehmen. Die Arbeitsgruppe "Hochtemperatur-Materialmodelle" des Labors 1.31 der BAM widmet sich diesem Problem durch die Anwendung von viskoplastischen Stoffmodellen auf viel- und einkristalline Hochtemperaturlegierungen auf der Grundlage ein- und mehrachsiger thermisch-mechanischer Versuche.

2. Prinzipielle Vorgehensweise bei der Materialmodellierung

Die **Materialtheorie** /1/ liefert die Rahmenordnung zur Konstruktion mathematischer Modelle, sog. **Materialmodelle**, mit deren Hilfe man das phänomenologische Verhalten von Werkstoffen unter komplexen Beanspruchungsbedingungen simulieren kann. Für die Beschreibung des inelastischen Verhaltens haben sich zwei Vorgehensweisen herausgebildet. Die Geschichtsbeschreibung basiert auf der Annahme, daß der momentane Zustand des Materials von der gesamten thermisch-mechanischen Prozeßgeschichte abhängt, während die Methode der inneren

Zustandsvariablen davon ausgeht, daß der aktuelle Zustand von den Momentanwerten der observablen Größen Verzerrung und Temperatur sowie inneren Zustandsvariablen bestimmt ist. Neben numerischen Gründen spricht auch die größere Durchsichtigkeit bei der Modellierung für die Verwendung innerer Variablen. In der Regel bestehen diese Modelle aus einem Satz von Materialgleichungen in Form von Differentialgleichungen erster Ordnung in der Zeit. Die Materialgleichungen enthalten Freiwerte in Form von Materialkonstanten oder Materialfunktionen, die mittels einer experimentellen Datenbasis bestimmt werden müssen. Dieser Prozeß wird Materialidentifikation genannt. Nach erfolgter Identifikation wird die Vorhersagefähigkeit des Modells anhand von ein- und mehrachsigen Verifikationsversuchen untersucht. Dies ist notwendig, um die Grenzen des Modells festzustellen, und um insbesondere zu überprüfen, ob zur Identifikation allein homogene einachsige Versuche herangezogen werden können. Ein weiterer Schritt ist die Implementierung des Materialmodells in ein FE-Programm. Damit ist es dann möglich, das Spannungs- und Verzerrungsverhalten von Turbinenschaufeln unter komplexen thermisch-mechanischen Beanspruchungen als notwendige Voraussetzung für eine Lebensdauerabschätzung zu ermitteln. Die hier im Überblick dargelegte Vorgehensweise ist in der Abb. 1 graphisch dargestellt; sie verdeutlicht die Parallelität zwischen Experiment (mechanische Prüfmaschine) und Simulation durch das Modell (numerische Prüfmaschine).

3. Materialmodelle für Nickelbasis-Legierungen

Nickelbasis-Legierungen zeigen im Hochtemperaturbereich eine ausgeprägte Geschwindigkeitsabhängigkeit der Verfestigung. Das wird insbesondere am einachsigen Zugversuch deutlich. Klassische Materialtheorien, wie sie in der Materialmodell-Bibliothek kommerzieller FE-Programme, z.B. ADINA /2/, zu finden sind, gehen von einer Unterteilung der inelastischen Phänomene in geschwindigkeitsunabhängige (Plastizität) und geschwindigkeitsabhängige (Kriechen, Relaxation) aus, sowie einer Behandlung durch separate Materialgleichungen.

In den letzten 20 Jahren haben sich "unified models" oder viskoplastische Theorien durchgesetzt /3/, in denen die inelastische Verformungsvorgänge durch lediglich eine Verzerrungsgröße erfaßt werden, sodaß die Gesamtverzerrungen nur in elastische und inelastische Verzerrungen aufgespalten werden. Diese additive Zerlegung der Verzerrung ist in dem für die Hochtemperatur-Anwendung wichtigen Fall kleiner Deformationen unproblematisch. Eine allgemeine Struktur viskoplastischer Stoffgesetze beinhaltet die folgenden Bestandteile: kinematischer Zerlegungsansatz, elastisches Gesetz (HOOKE), (geschwindigkeitsabhängige) Fließregel und Verfestigungsgesetz.

Die Materialkonstanten werden durch den Vektor $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ repräsentiert. Die Modellierung des Verfestigungsverhaltens erfolgt über geeignete innere Variablen, einer skalarwertigen zur Beschreibung der isotropen Verfestigung sowie einer tensorwertigen zur Darstellung einer gerichteten (kinematischen) Verfestigung. Die Evolutionsgleichungen oder Verfestigungsregeln, die die Veränderung der inneren Variablen beschreiben, können neben den mit den inelastischen Deformationen einhergehenden Verfestigungsvorgängen auch Erholungsvorgänge, dynamischer wie statischer Art, beschreiben. Fließbedingungen sind kein notwendiger Bestandteil viskoplastischer Materialmodelle.

Für die vielkristallinen Materialien wurden zwei typische Vertreter der Klasse viskoplastischer Materialmodelle der Literatur, das **CHABOCHE-Modell** /4/ und das **BODNER-PARTOM-Modell** /3/, ausgewählt. Beide Modelle unterscheiden sich in der Fließregel, den Verfestigungsregeln sowie der Verwendung einer Fließbedingung.

Bei einkristallinen Schaufelmaterialien sind die Materialeigenschaften stark abhängig von der Orientierung des Kristallgitters gegenüber der Probe. Dieser Anisotropie wird Rechnung getragen durch die Verwendung von Strukturtenoren in den Materialmodellen, die in mathematischen Darstellungssätzen geeigneter Materialgleichungen auftauchen /11/. Damit gelingt es dann, die Orientierungsabhängigkeit beispielsweise von Kriechbeanspruchungen mehrachsig zu verallgemeinern /12, 13/.

4. Identifikation und Verifikation von Materialgleichungen

Die Anwendung von Materialmodellen setzt zunächst die Bestimmung der Materialkonstanten in bezug auf das konkrete Werkstoffverhalten voraus. Hierzu werden Daten aus isothermen, einachsigen Zug-, LCF- und Kriechversuchen verwendet. Eine Simulation der Werkstoffantwort bezüglich dieser experimentellen Pozeßgeschichten erfordert die Lösung von Anfangs- und Randwertproblemen, die durch das Modell und den jeweiligen Belastungsprozeß definiert sind. Die Lösungen dieser Rand- und Anfangswertprobleme hängen nichtlinear von den Materialparametern $\mathbf{c} = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ ab, sodaß die Bestimmung von \mathbf{c} grundsätzlich ein **nicht-lineares Optimierungsproblem** darstellt. Durch Vergleich der Modellantwort, z.B. der Spannung $\sigma_i^{Sim}(\mathbf{c}, t)$ bei verzerrungsgesteuerten Prozessen (Zug- und LCF-Versuche) in den Meßzeitpunkten t_i des i-ten Prozesses, mit dem korrespondierenden Meßwerten $\sigma_i^{Exp}(t)$ werden Einzelabweichungen

$$r_{i,j}(\mathbf{c}) = \sigma_i^{Sim}(\mathbf{c}, t_j) - \sigma_i^{Exp}(t_j) \quad (1)$$

gebildet, deren gewichtete Quadratsumme durch systematische Variation von \mathbf{c} minimiert wird. Zur Lösung der Optimierungsaufgabe eignet sich besonders

der LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus. Hierbei hat sich eine schrittweise Optimierung von wechselnden Materialparameter-Gruppen als zweckmäßig erwiesen.

Zur Verifikation der verwendeten Materialmodelle sind verschiedene isotherme einachsige und axial-torsionale Versuche mit komplexer Belastungsgeschichte gerechnet und die Modellvorhersagen mit den experimentellen Befunden verglichen worden /5/. Die Ergebnisse zeigen, daß sowohl die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens (Abb. 2) als auch mehrachsiges axial-torsionales Verfestigungsverhalten in verformungsgesteuerten nichtproportionalen LCF-Versuchen (Abb. 3a-c) mit lediglich einem Satz von Materialkonstanten je Modell adäquat simuliert werden kann. Über weitere Vergleiche wird in /6/ berichtet. Inwieweit isotherme Versuche ausreichen, um das Materialverhalten bei thermisch veränderlichen Prozeßgeschichten, wie wir sie in einer Turbinenschaufel vorfinden, hinreichend genau zu beschreiben, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

5. Analysen mit der Finite-Elemente-Methode

Der Einsatz viskoplastischer Materialmodelle in der Berechnungspraxis hängt nicht nur von den Fähigkeiten der Modelle zur Beschreibung inelastischer Phänomene ab, sondern insbesondere auch von leistungsfähigen, d.h. rechenökonomischen Algorithmen und Rechenstrategien. Dazu wurden Untersuchungen durchgeführt bezüglich der Eignung von Algorithmen zur Integration der Materialgleichungen, d.h. von Differentialgleichungs-Systemen erster Ordnung, die sich hinsichtlich der ermittelten Materialparameter sowie der Belastungsprozesse verschieden steif verhalten /7,8/. Hinzu kommen Untersuchungen zur Verwendung konsistenter tangentialer Steifigkeitsmatrizen wie einer optimalen Zeitschrittsteuerung auf Strukturebene. Als bauteilähnliche Struktur wurde ein zylindrischer Stab mit Umfangskerbe unter zyklischen Beanspruchungen analysiert /7,9,12/. Für die FE-Analysen sind die viskoplastischen Materialmodelle in das FE-Programm ADINA implementiert worden. Zur Zeit werden FE-Analysen an einer Modell-Turbinenschaufel durchgeführt, die parallel in einem Prüfstand des Forschungszentrums Jülich thermisch-mechanischen Belastungsprogrammen unterworfen wird. Ziel ist es, die an der Modellschaufel vorgenommenen Verformungsmessungen mit denen aus FE-Rechnungen zu vergleichen. Die Abb. 4 zeigt die berechnete stationäre Temperaturverteilung der mit einem Luft-Wasser-Gemisch gekühlten Modellschaufel. Das zur Berechnung benutzte FE-Netz wurde von der KFA Jülich dankenswerterweise zur Verfügung gestellt /10/.

Literatur:

- /1/ Krawietz, A.: Materialtheorie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1986
- /2/ ADINA 6, A finite element program for automatic dynamic incremental nonlinear analysis, Report ARD 90-4, ADINA R&D, Inc., Watertown, MA, USA, 1991

- /3/ Miller, A.K. : Unified constitutive equations for creep and plasticity, Elsevier Applied Science, London, 1987
- /4/ Lemaitre, J. & J.L. Chaboche: Mechanics of solid materials Cambridge University Press, Cambridge, 1990
- /5/ Olschewski, J., Sievert, R., Meersmann, J. & J. Ziebs: Selection, calibration and verification of viscoplastic constitutive models used for advanced blading methodology, in: Proceedings "High-temperature materials for power engineering 1990", E. Bachelet et al. ,Vol. II, 1051-1060, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1990
- /6/ Olschewski, J., Sievert, R. & A. Bertram: A comparison of the predictive capabilities of two unified constitutive models at elevated temperatures, in: Proceedings "Third international conference on constitutive laws for engineering materials", C. S. Desai et al., ASME Press, New York, 1991
- /7/ Olschewski, J. & H.-D. Noack: Numerical investigations on viscoplastic constitutive models, in: Proceedings " Third international conference on computational plasticity (COMPLAS III)", D. J. R. Owen et , Pineridge Press, Swansea, Vol. I, 129-140, 1992
- /8/ Qi, W.: Entwicklung eines allgemeinen FE-Bausteines für viskoplastische Materialmodelle auf der Basis der für thermisch-mechanische Belastungsvorgänge erweiterten Integrationsmethoden nach Tanaka, Diplomarbeit, BAM-1.01, 2. IfM der TU Berlin, 1992
- /9/ Olschewski, J., Sievert, R. & A. Bertram: Comparative viscoplastic FE-calculations of a notched specimen under cyclic loadings, in: Proceedings "Plasticity'91, third international symposium on plasticity and its current applications", J.-P. Boehler & A.S. Khan , Elsevier Applied Science, London, 397-400, 1991
- /10/ Breitbach, G. & U. Stübben: Thermomechanische Analyse einer Turbinenschaufel, Forschungszentrum Jülich, IRW-TN-36/91, 1991
- /11/ Bertram, A. & J. Olschewski: Formulation of anisotropic linear viscoelastic constitutive laws by a projection method. in: "High Temperature Constitutive Modeling: Theory and Application" (Hrg.: Freed, A., Walker, K.P.) 129 - 137, ASME, MD-Vol. 26, AMD-Vol. 121 1991
- /12/ Bertram, A., Olschewski, J., Sievert, R., & M. Zelewski: Constitutive modeling of the creep behaviour of single crystals with applications to notched specimens, in: "Constitutive Laws for Engineering Materials" (Hrg.: Desai, C.S. et al.) 237 - 240, ASME Press, New York 1991
- /13/ Bertram, A., Olschewski, J. & M. Zelewski: Anisotropic creep modeling for f.c.c. single Crystals, in: IUTAM Symp. Creep in Structures IV (Hrg.: Zyczowski, M.) 29 - 36, Springer-Verlag 1991

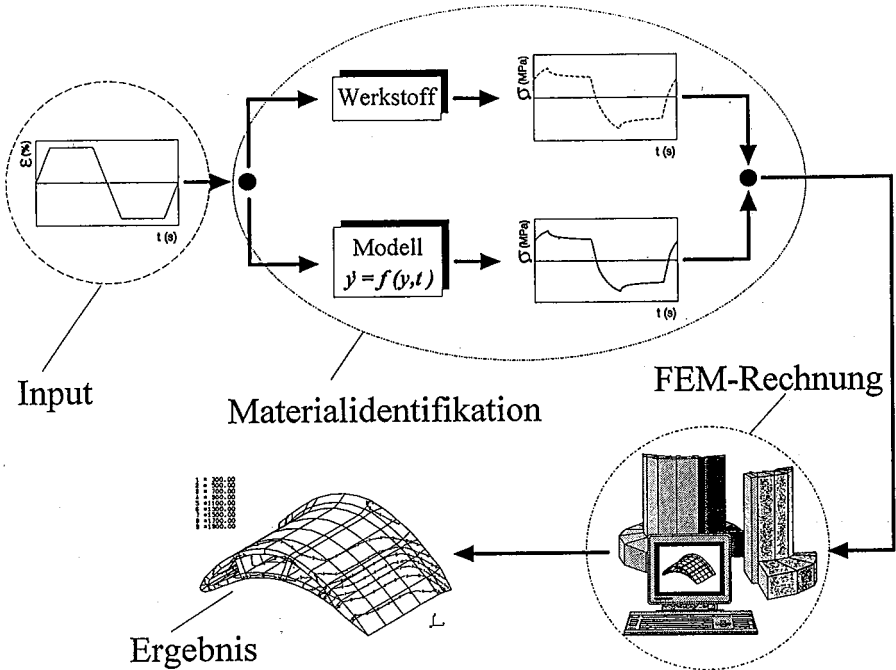


Abb. 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Stufen einer inelastischen Spannungs-Verzerrungs-Analyse eines Bauteils

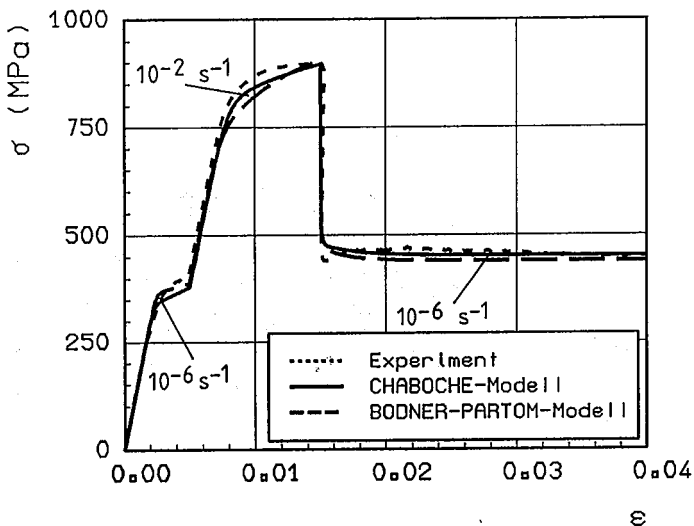


Abb. 2: Zugversuch mit sprungförmiger Änderung der Dehngeschwindigkeit, IN 738 LC, $T = 850^\circ\text{C}$

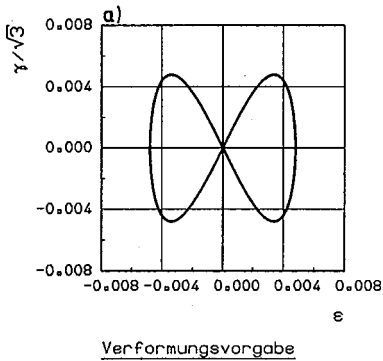


Abb. 3:

Simulation eines "Schmetterling"-
Dehnungspfades, IN 738 LC,
 $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon_v = 0.6\%$, $\dot{\epsilon}_v = 10^{-3}/\text{s}$

a) Belastungspfad

b) Spannungsantwort des Werkstoffes

c) Spannungsantwort des Modells

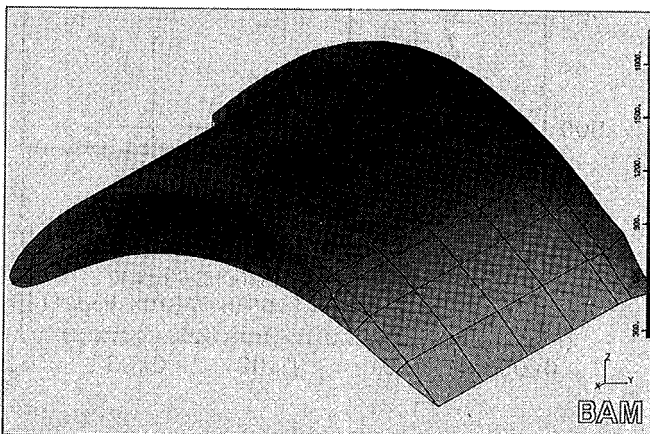
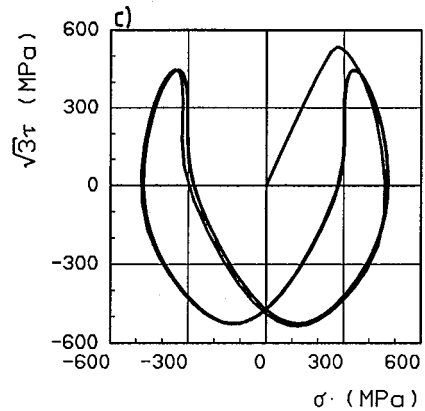
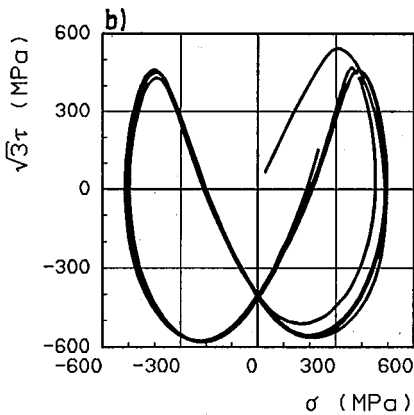


Abb. 4: Temperaturverteilung in einer gekühlten Modell-Turbinenschaufel