

F. Sanladerer, J. Heizmann

Materialmodelle zur Berechnung der Autofrettage

Der aktuelle Entwicklungsstand sowie der zukünftige Fortschritt in der Automobilindustrie wären ohne hochfeste, massivumgeformte Bauteile aus metallischen Werkstoffen kaum vorstellbar. Gleichzeitig hat die Steigerung von Bauteileigenschaften durch das gezielte Einbringen von Eigenspannungen in vielen industriellen Bereichen eine herausragende Bedeutung erlangt. Immer leistungsfähigere Werkzeuge zur Simulation derartiger Prozesse mit nachfolgender Auswertung von Bauteileigenschaften liefern dabei einen unverzichtbaren Beitrag. In der vorliegenden Abhandlung wird die Eignung der FEM-Software „Ansys“ hinsichtlich verfügbarer Materialmodelle zur Autofrettage-Berechnung – im Vergleich zur Umformsimulationssoftware „Forge“ – zusammenfassend bewertet.

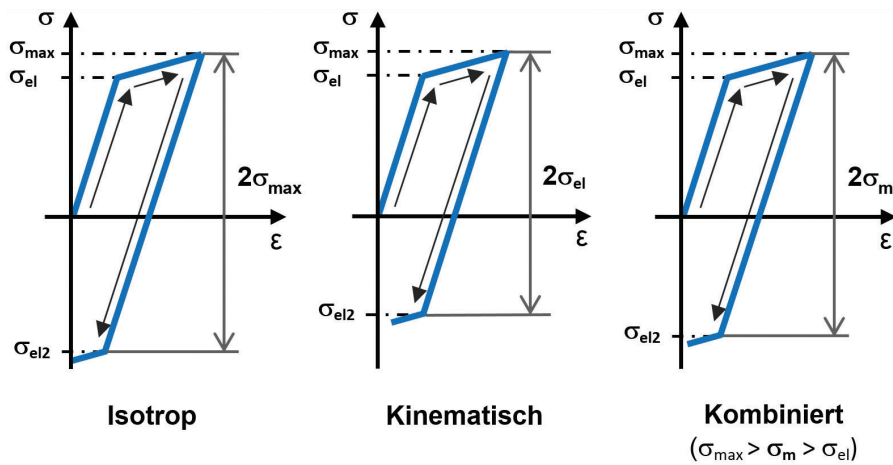


Bild 1
Isotropen, kinematischer und kombinierter Verfestigungsmechanismus

In funktionskritischen Bereichen kommen insbesondere an der Bauteiloberfläche Eigenschaften wie Rauheit, lokaler Festigkeit und Eigenspannungen eine zentrale Rolle zu. Die Verbesserung der Randzoneneigenschaften basiert dabei häufig auf gezielter plastischer Deformation des Werkstoffs.

Vorwiegend kommt diese in funktionskritischen Bereichen zum Einsatz. Bei innenhochdruck-beaufschlagten Komponenten, wie sie beispielsweise im Bereich von Einspritzsystemen zur Anwendung kommen (z. B. Common-Rails), werden diese Effekte über die sogenannte hydraulische Autofrettage

erzeugt. Bei diesem Prozessschritt werden die Bauteile zunächst einem – im Vergleich zum späteren Betriebsdruck – stark überhöhten Innendruck ausgesetzt. Dies hat zur Folge, dass das Bauteil in Bereichen des Innendurchmessers plastifiziert und sich nach Entlastung der lediglich elastisch verformten äußeren Bereiche lokal oberflächennahe Druckeigenspannungen einstellen.

Materialmodellierung entscheidend

Die konstruktive Gestaltung derartiger Komponenten erfordert bereits ab dem Anfangsstadium eine Berücksichtigung späterer Prozessparameter des Autofrettage-Verfahrens. Im Zuge der langjährigen Erfahrung in der Fertigung derartiger Komponenten konnte die Hirschvogel Automotive Group umfassendes Know-how zu erforderlichen Kennwerten aufbauen. Aus diesem Grund kann eine frühzeitige Einbindung des späteren Bauteillieferanten in den Entwicklungsprozess signifi-

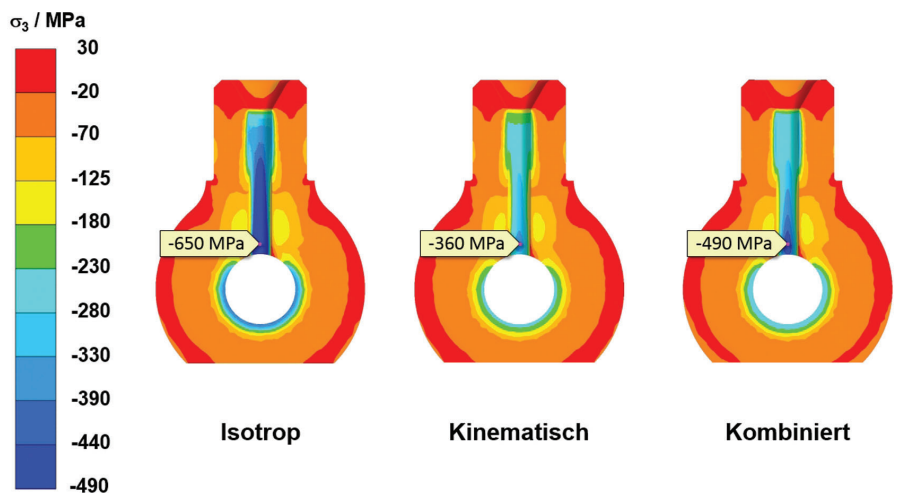


Bild 2
Relevanz des verwendeten Verfestigungsmodells

Autoren

Florian Sanladerer
B.A. Jochen Heizmann
beide: Hirschvogel Umformtechnik

Kontakte:
Hirschvogel Umformtechnik GmbH
Dr.-Manfred-Hirschvogel-Straße 6
86920 Denklingen
E-Mail: jochen.heizmann@hirschvogel.com
www.hirschvogel.com

Cadferm GmbH
Marktplatz 2, 85567 Grafing b. München
E-Mail: info@cadferm.de
www.cadferm.de

kante Vorteile bieten. Des Weiteren hat sich Hirschvogel dazu entschlossen, unter dem Branding „Hirschvogel Tech Solutions“ derartige Entwicklungsleistungen zukünftig auch unabhängig von potenziellem Seriengeschäft anzubieten.

Im Zuge dieses Entwicklungsprozesses kommt sinnvollerweise FEM-Software zur Anwendung. Die korrekte Abbildung der Autofrettage in der Simulation erfordert dabei sowohl ausgeprägte Erfahrung zum jeweils vorliegenden Materialverhalten als auch die softwaretechnische Umsetzung anhand nichtlinearer Werkstoffmodelle. Im Mittelpunkt steht eine bei vielen duktilen Metallen beobachtete Erscheinung – der sogenannte Bauschinger Effekt. Dieser beschreibt die richtungsabhängige Änderung der Elastizitätsgrenze nach einer primären plastischen Verformung. Infolgedessen stellt sich nach vorausgehender plastischer Verformung und Umkehr der Belastungsrichtung eine verringerte Fließspannung im Vergleich zur initialen Elastizitätsgrenze ein.

Zyklische Plastizitätseffekte werden in FEM-Softwarelösungen zumeist mit Materialmodellen für die in Bild 1 veranschaulichten Gesetze kinematischer und isotroper Verfestigung realisiert. Dabei wird deutlich, dass der Bauschinger Effekt ($|\sigma_{el2}| < |\sigma_{el1}|$) lediglich bei einer Beteiligung von kinematischer Verfestigung berücksichtigt werden kann. Hierbei entspricht die Differenzspannung (nach Lastumkehr und Fließbeginn unter Druck) der doppelten initialen Fließspannung (σ_{el1}). Im Gegensatz dazu ergibt sich bei isotroper Verfestigung die Differenzspannung aus der doppelten Maximalspannung vor Lastumkehr (σ_{max}). Das reale Werkstoffverhalten liegt jedoch erfahrungsgemäß oftmals zwischen den beiden Grenzzuständen der vollständig kinematischen und vollständig isotropen Verfestigung. Man spricht in diesem Fall von kombinierter Verfestigung (Bild 1). Für die Fließspannung nach Lastumkehr ($|\sigma_{el2}|$) gilt dabei: $|\sigma_{max}| > |\sigma_{el2}| > 2 |\sigma_{max} - \sigma_{el1}|$.

Das verwendete Verfestigungsmodell – das heißt mit oder ohne Berücksichtigung des Bauschinger Effekts – wirkt sich letztendlich signifikant auf das Ergebnis der Autofrettage-Simulation aus. So führen die von vielen Anwendungen standardmäßig angewandten Ansätze zur Berücksichtigung von Plastizität mittels isotroper Materialmodelle zu einer gravierenden Überschätzung

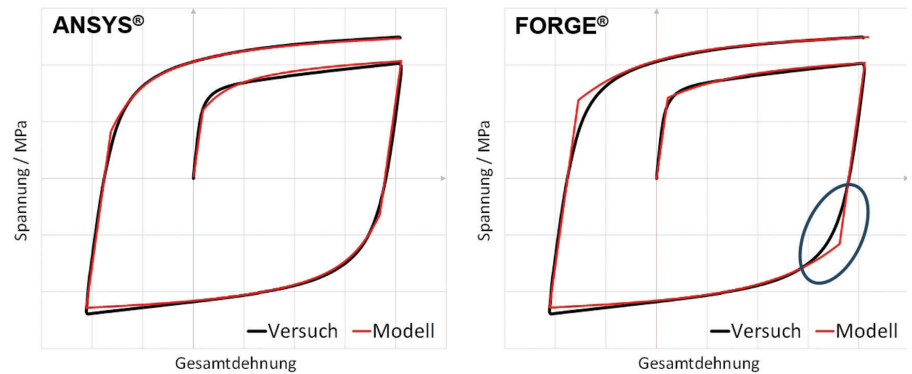


Bild 3

Parameterfit für kombinierte Verfestigung „Ansys“ (links) und „Forge“ (rechts)

des Eigenspannungsfelds nach der Autofrettage. Bild 2 zeigt exemplarisch – anhand der Bohrungsverschneidung eines Common-Rails – die stark differierenden Spannungszustände nach einer Autofrettage-Operation aufgrund Anwendung unterschiedlicher Verfestigungsmodelle (isotrop vs. kinematisch vs. kombiniert).

Ermittlung der Modellparameter

Zur Beurteilung und Modellierung des Werkstoffverhaltens werden zyklische Zug-Druck-Versuche auf Basis von Proben aus realen Schmiedeteilen durchgeführt. Diese liefern wesentliche Rohdaten, welche für die nachfolgende Parameteridentifikation herangezogen werden. In diesem Zusammenhang stellt die Simulationsumgebung Ansys Workbench ein Curve-Fitting Tool zur Verfügung. Für kinematische Verfestigung kommt ein nichtlineares Modell nach Chaboche zur Anwendung. Mithilfe dessen werden teilautomatisiert – auf Basis von zu wählenden Startwerten – die entsprechenden Modellparameter gesucht. Im Nachgang können ergänzende Optimierungsschleifen die Qualität des erzeugten Materialmodells noch weiter steigern. Hierbei werden beispielsweise die Anzahl der Chaboche-Terme oder die eingegebenen Startwerte für das Curve-Fitting variiert. Der Bereich um die Fließgrenzen steht dabei besonders im Fokus. Die Reduktion des modellbedingten scharfen Abknickens an dieser Stelle ist hierbei eines der wesentlichen Optimierungsziele. Bild 3 zeigt die Verbesserung in diesen Gebieten durch eine höhere Anzahl an Chaboche-Termen im Vergleich zur bisher eingesetzten Softwarelösung mit nur einem Chaboche-Term.

Zur Abbildung von Materialien wie beispielsweise eines zuletzt untersuchten austenitischen Stahls ist eine ausschließlich kinematisch-verfestigende Modellierung auf Basis des Chaboche-Modells nicht ausreichend. Ausgeprägte Anteile isotroper und kinematischer Verfestigung erfordern in Ansys Workbench eine Kombination von Modellen für kinematische Verfestigung und nur über Kommandoobjekte verfügbaren Ansätzen zur Berücksichtigung nichtlinear-isotroper Verfestigung (z. B. nach Voce). Dieser Vorgang bedarf einer iterativ-manuellen Parameterermittlung und Übergabe an die Simulation mittels APDL-Befehlen (Ansys Parametric Design Language), wodurch insgesamt im Vergleich zur Lösung in „Forge“ ein deutlicher Mehraufwand entsteht.

Bewertung der Ergebnisqualität

Seit vielen Jahren kommt in der Hirschvogel Automotive Group das in der Forge-Software verfügbare kombinierte Materialgesetz zur Anwendung. Zuletzt wurde die Eignung von Ansys für derartige Aufgabenstellungen auf den Prüfstand gestellt: Vorteile mit Ansys können dabei insbesondere auf die Möglichkeit zurückgeführt werden, den Simulationen mehrtermige Chaboche-Modelle zugrundezulegen – vgl. Bild 3. Dies ermöglicht letztendlich eine genauere Abbildung des Werkstoffverhaltens in Bereichen, welche im Übergangsbereich zwischen elastischer und plastischer Verformung liegen. Anhand von Bild 4, welches die Spannungsverteilung nach dem Autofrettageprozess veranschaulicht, wird dies besonders deutlich.

In Umgebung der Bohrungsverschneidung – dem am stärksten ungleichmäßig verformten Bereich – unterscheiden sich

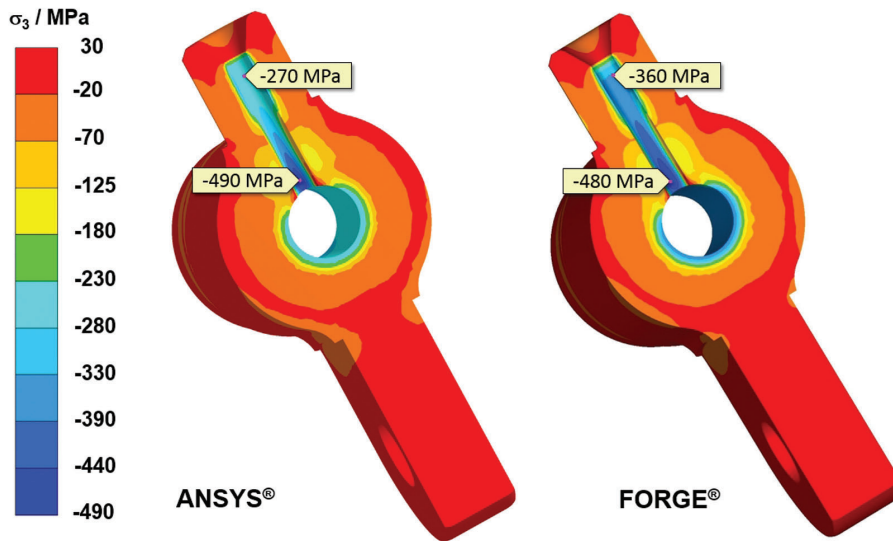


Bild 4
Resultierender Spannungszustand nach Autofrettage mit Ansys (links) und Forge (rechts)

die Spannungsergebnisse nur geringfügig. Demgegenüber zeigen Bereiche, welche nur eine schwache zweite

Plastifizierung durch den eingangs erklärten Autofrettage-Effekt erfahren haben, größere Abweichungen in der

Größenordnung von mehr als 20 %. Dies lässt sich mit Blick auf Bild 3 erklären: Das bisher verwendete kombinierte Modell zeigt bei Plastifizierung unter Druck zwar eine große Übereinstimmung mit dem Prinzipversuch, weist aber aufgrund lediglich eines Chaboche-Terms einen ausgeprägten Knick zum Zeitpunkt der erneuten Plastifizierung auf. Abschließend muss aber unabhängig von der eingesetzten Softwarelösung besonders die Bedeutung des eingesetzten Verfestigungsmodells und damit die Berücksichtigung des Bauschingereffekts zur beträchtlichen Steigerung der Ergebnisqualität hervorgehoben werden.

Danksagung: Die Autoren danken Dr.-Ing. Cord Steinbeck-Behrens (Cadferm GmbH), Ralf Hofmann (Inneo Solutions GmbH) sowie Dipl.-Ing. Patrice Lasne (Transvalor S.A.) für deren freundliche Unterstützung bei der Durchführung dieses Projekts.