

Auslegung von hochbelasteten Einspritz- und Motorkomponenten

Die hydraulische Autofrettage als Medium zur Steigerung der Lebensdauer von Innenhochdruck beaufschlagten Komponenten (zum Beispiel Common-Rails für Diesel-Einspritzsysteme) etabliert sich zunehmend auch im Bereich von Offhighway-Motoren. Bei der rechnerischen Auslegung dieses Prozessschritts erhält die Beachtung des anisotropen Materialverhaltens eine zentrale Bedeutung. Die lokale und womöglich richtungsabhängige Bauteilfestigkeit (beispielsweise nach Autofrettage) findet jedoch bisher in Ansätzen zur Bewertung der Lebensdauer von massivumgeformten Komponenten kaum Berücksichtigung. Diese Lücke haben Hirschvogel Automotive Group, Engineering Center Steyr und Transvalor im Zuge eines gemeinsamen Entwicklungsprojekts geschlossen.

AUTOREN



B. A. Jochen Heizmann
ist zuständig für die Entwicklung neuer Geschäftsfelder im Bereich Vorausentwicklung der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen.



Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt
ist Vice President Advanced Engineering der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen.



Dipl.-Ing. Patrice Lasne
ist Oberingenieur im Bereich Entwicklung der Transvalor S.A. in Mougins Cedex (Frankreich).



Dipl.-Ing. Helmut Dannbauer
verantwortet Berechnungsdienstleistungen und Softwareprodukte im Bereich Strukturmechanik der Engineering Center Steyr GmbH & Co. KG in St. Valentin (Österreich).

PRINZIP DER HYDRAULISCHEN AUTOFRETTAGE

Einspritzdrücke über 2000 bar liefern einen wesentlichen Beitrag dafür, dass in den Motoren der Zukunft der Kraftstoff noch effizienter ausgenutzt wird. Über das sogenannte Autofrettage-Verfahren wird sichergestellt, dass Leitungen und Rohre den immer größeren Wechselbelastungen Stand halten [1]. Autofrettage ist eine Methode zur Generierung von Eigenspannungen in Rohren, um deren Belastbarkeit und Lebensdauer zu verbessern [2]. Während der hydraulischen Autofrettage werden dickwandige metallische Zylinder im Bohrbereich mit einem Druck beaufschlagt, der beim circa drei- bis vierfachen des Nenn-Betriebsdrucks liegt. Dabei wird der Werkstoff im Bereich des Innendurchmessers jenseits der Elastizitätsgrenze unter Zugbelastung gedehnt, **BILD 1**, während die Dehnungen äußerer Bereiche weiterhin im elastischen Bereich liegen. Bei Wegnahme des Autofrettage-Drucks entlastet sich der äußere Rohrbereich elastisch. Der Werkstoff im Inneren des Rohrs und besonders an der Verschneidung wird dabei wiederum plastisch verformt, dieses Mal unter Druckspannung. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustands liegen die plastisch deformierten Bereiche in einem Druckeigenspannungszustand. Dies wirkt sich im späteren Betrieb bei erneuter Beaufschlagung mit Innendruck positiv aus, da die Druckeigenspannungen aus der Autofrettage die Zugspannungen kompensieren: Es tritt im Betrieb eine geringere Vergleichsspan-

nung auf und die lokalen Mittelspannungen sind kleiner [3].

OPTIMIERUNG MASSIVUMGEFORMTER HOCHLEISTUNGSKOMPONENTEN

Moderne technische Systeme – sowohl für Automotive- als auch Offhighway-Anwendungen – beinhalten häufig massivumgeformte Hochleistungskomponenten. Deren Schlüsselrolle begründet sich insbesondere in der hohen Belastbarkeit, welche bei der Übertragung hoher Kräfte, Momente oder Drücke erforderlich ist. Zunehmende Anforderungen bezüglich der Leistungsdichte verlangen eine immer intensivere Bauteiloptimierung, was die sorgfältige Abstimmung von Werkstoff, Bauteilgeometrie und den zahlreichen Parametern entlang der gesamten Entwicklungs- und Fertigungsprozesskette voraussetzt.

Im Zuge der vollen Ausnutzung werkstofflich-geometrischer Potenziale zu idealerweise geringsten Kosten kommt der intensiven Anwendung und gleichzeitig permanenten Weiterentwicklung fortschrittlicher Auslegungswerkzeuge eine zentrale Bedeutung zu. Aufgrund langjähriger Know-hows und Softwaretools wie CAD, Topologie- und Gestaltoptimierung sowie der linear-elastischen FEM-Simulation können Bauteile auf Basis der Anforderungen und Gestaltungsrichtlinien von Kunden durch die Hirschvogel Automotive Group zuverlässig ausgelegt werden. Des Weiteren hat sich das Unternehmen zuletzt zahlreiche weitere Kompetenzen angeeignet und zusammen mit

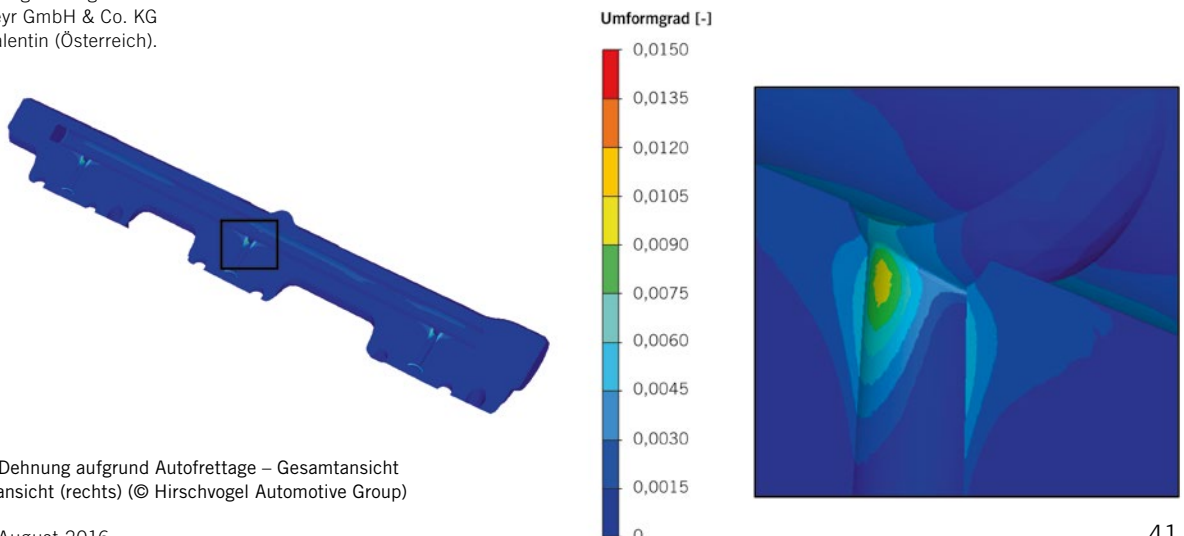


BILD 1 Plastische Dehnung aufgrund Autofrettage – Gesamtansicht (links) und Detailansicht (rechts) © Hirschvogel Automotive Group

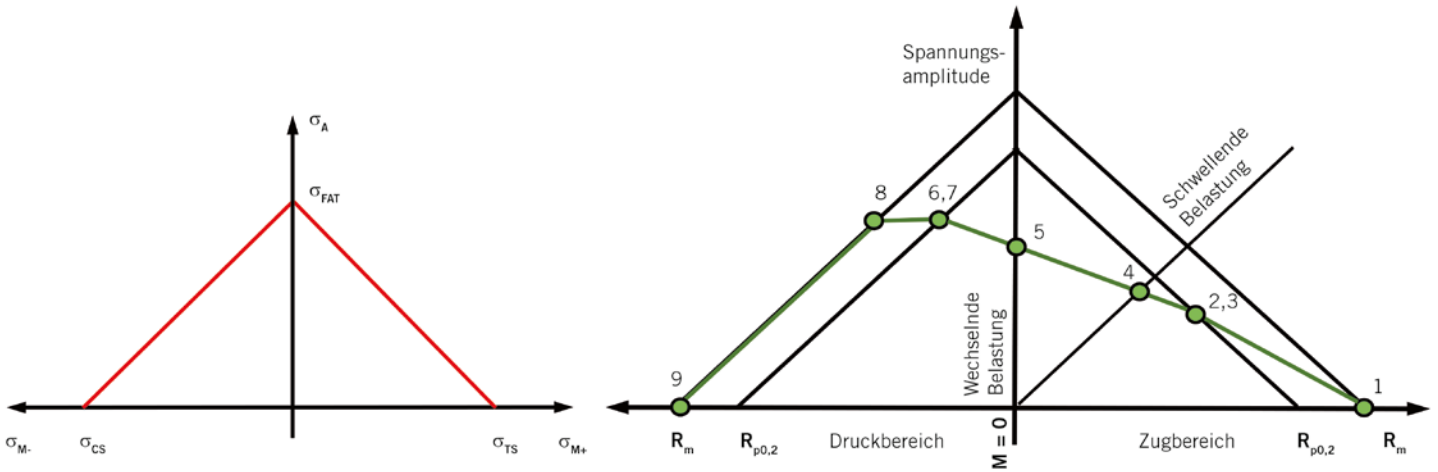


BILD 2 Goodman-Diagramm (links) und Haigh-Diagramm (rechts) © Hirschvogel Automotive Group

Partnern in Industrie und Hochschule weiterentwickelt (zum Beispiel zum Verständnis über mikromechanische Werkstoff-Mechanismen). So besteht beispielsweise durch den Einsatz von elastisch-plastischer Simulation in Kombination mit fortschrittlichen Modellen nicht nur die Möglichkeit, die während der Autofrettage gezielt eingestellten geringfügigen plastischen Dehnungen im Bauteil zu berechnen, sondern auch die dabei entstehenden Eigenspannungen auszuwerten. In der klassischen Umformsimulation metallischer Werkstoffe wird im Allgemeinen das Werkstoffverhalten als isotrop verfestigend angenommen. Bei geringfügigen plastischen Dehnungen, insbeson-

dere in Kombination mit zyklischer Werkstoffbelastung, dominiert aber in der Regel das kinematische Verfestigungsverhalten. Dies wird nun mittels geeigneter Modelle in Kombination mit werkstoff-spezifischen Parametern im Finite-Elemente-Modell zur Simulation der Autofrettage berücksichtigt.

BISHERIGE ANSÄTZE ZUR ERMITTLUNG DER LEBENSDAUER VON COMMON-RAILS

Kommt die Autofrettage nicht zum Tragen oder werden eher konservative Ansätze zur Auslegung von Common-Rails verfolgt, so dienen Entwicklern teilweise Erfahrungswerte zu den

Durchmesserverhältnissen als Hilfe. Steht FEM-Software zur linear-elastischen Analyse von Betriebszuständen (ohne vorherige Autofrettage) zwecks Bewertung unterschiedlicher Geometrievarianten von Bauteilwürfen zur Verfügung, so fließen häufig Faustformeln in die Abschätzung ein, welche sich an der Materialfestigkeit (zum Beispiel Rp0.2 oder Rm) und an der von Mises Vergleichsspannung orientieren. Kommen erste Ansätze aus der Material-Wissenschaft und -Ermüdung zum Einsatz, wird gegebenenfalls das Goodman-Diagramm herangezogen, BILD 2, um die Wechselwirkung von Mittelspannung und Wechselbelastungen in Bezug auf die Lebensdauer des Materi-

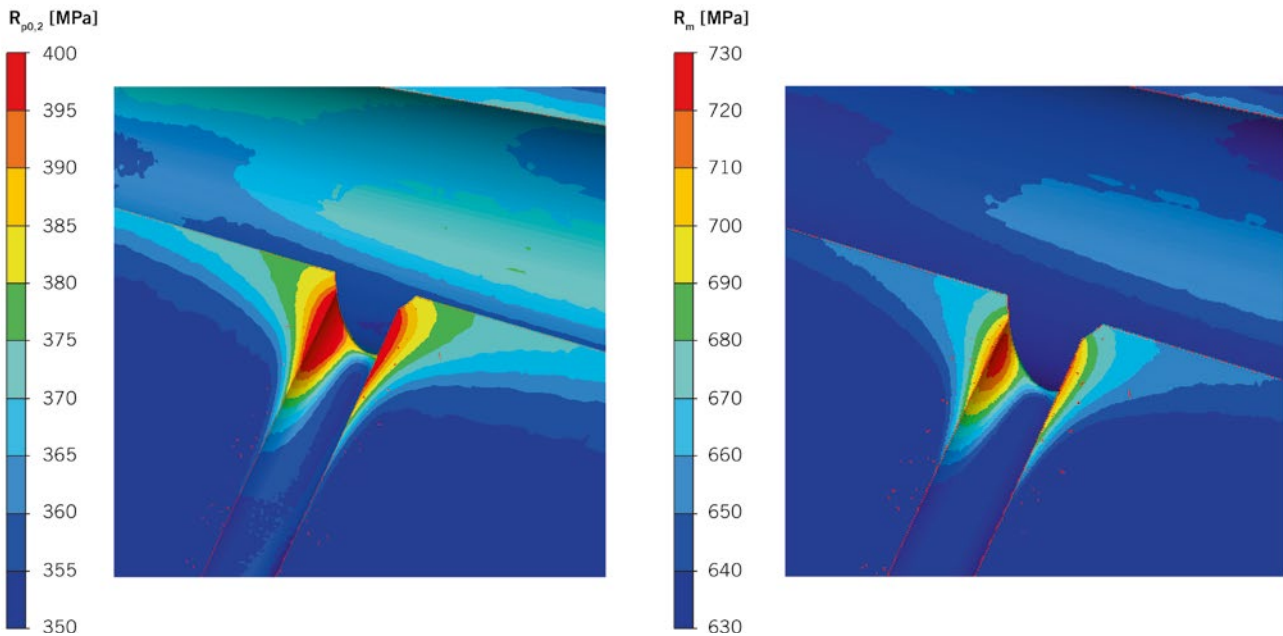


BILD 3 Lokale Erhöhung von Streckgrenze (links) und Mindestzugfestigkeit (rechts) aufgrund Autofrettage ©Hirschvogel Automotive Group

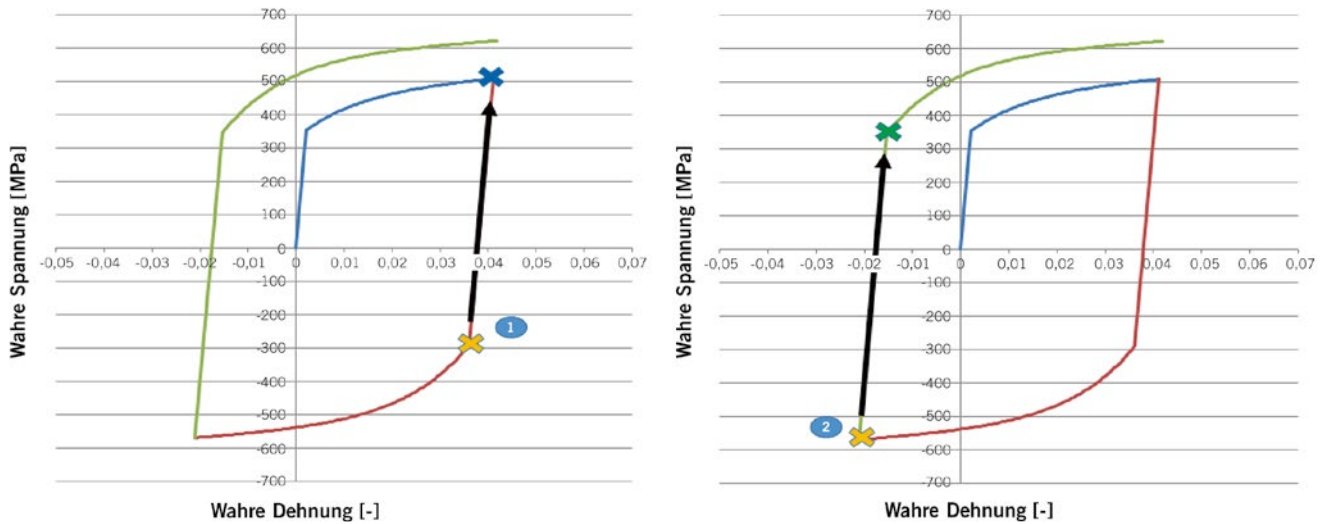


BILD 4 Berücksichtigung von isotropem (links) und kinematischem (rechts) Werkstoffverhalten (© Hirschvogel Automotive Group)

als zu quantifizieren. Der Bereich unter der Kurve indiziert, dass das Material unter den vorgegebenen Spannungen nicht versagen sollte. Der Bereich über der Kurve repräsentiert wahrscheinliches Versagen des Materials. Dabei steht σ_A für die Spannungsamplitude, σ_M für die Mittelspannung, σ_{FAT} repräsentiert die Dauerfestigkeit für ausschließliche Wechselbelastung und σ_{TS} steht für die Mindestzugfestigkeit beziehungsweise σ_{CS} für die Minstdruckfestigkeit des Werkstoffs. Der allgemeine Trend, welcher durch das Goodman-Verhältnis vorgezeichnet wird, zeigt beispielsweise abnehmende ertragbare Amplituden Spannungen mit zunehmender Zug-Mittelspannung an [4].

Im Zuge einer Abschätzung der Lebensdauer zum Beispiel von Common-Rails mit Berücksichtigung der Autofrettage unter Einbeziehung fortschrittlicher Ansätze kommt in der Regel elastisch-plastische FEM-Software

(beispielsweise FORGE) zur Anwendung. Gleichzeitig fließt der sogenannte Bauschinger-Effekt in Form von Modellen zur Berechnung der kinematischen Verfestigung in die Analysen ein, sodass aus der Autofrettage-Simulation eine realitätsnahe Verteilung der Eigen Spannungen in die Lebensdauer-Berechnung (beispielsweise FEMFAT) übergeben werden kann. Aufgrund der Beschreibung des Materialverhaltens auf Basis von sogenannten Haigh-Diagrammen kann dabei die Mittelspannungsempfindlichkeit der Werkstoffe mit höherem Detailierungsgrad als lediglich mit dem Goodman-Diagramm in die Berechnung eingehen, BILD 2.

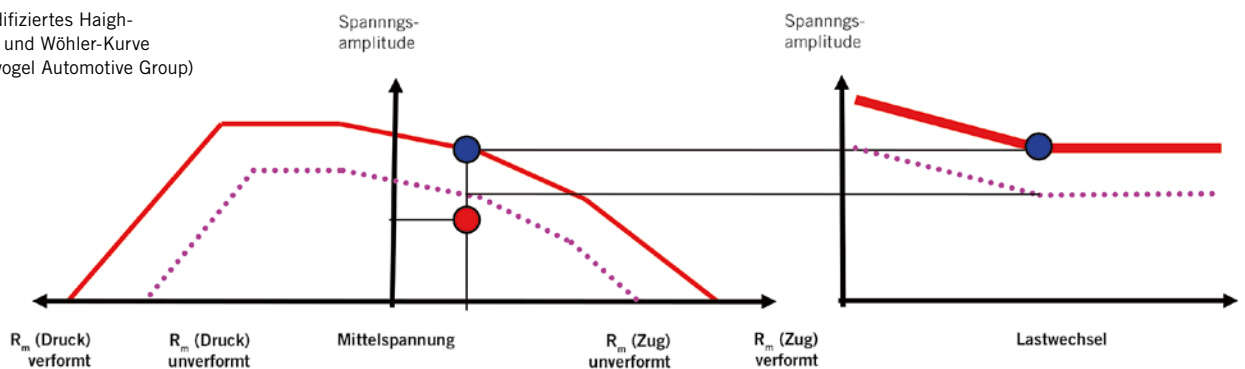
NEUE ANSÄTZE ZUR ERMITTLUNG DER LEBENSDAUER VON COMMON-RAILS

Aufgrund der gemeinsamen Weiterentwicklung von Modellen zur Bewertung

der Lebensdauer können zukünftig aus dem Umformprozess auch lokale Ver- und Entfestigungsmechanismen auf Basis von Streckgrenzen- und Mindestzugfestigkeitswerten aus der elastisch-plastischen Umformsimulation in die Fatigue-Analyse einbezogen werden, BILD 3. Dies wird dadurch ermöglicht, dass bei der Übergabe von lokalen Parametern an die Lebensdauerberechnung zwischen isotropem und kinematischem Werkstoffverhalten unterschieden wird, das heißt bei letzterem auch die Richtungsabhängigkeit von Mindestzugfestigkeit und Streckgrenze nach Vorverformung in der Autofrettage-Simulation im Allgemeinen eine zentrale Rolle spielt, BILD 4.

Das hat wiederum zur Folge, dass die Lebensdauerberechnung nicht nur auf Basis von lokalen Haigh-Diagrammen arbeitet, sondern dass diese aufgrund der vorliegenden Festigkeitsveränderungen modifiziert werden. Wenn Einflüsse

BILD 5 Modifiziertes Haigh-Diagramm und Wöhler-Kurve (© Hirschvogel Automotive Group)



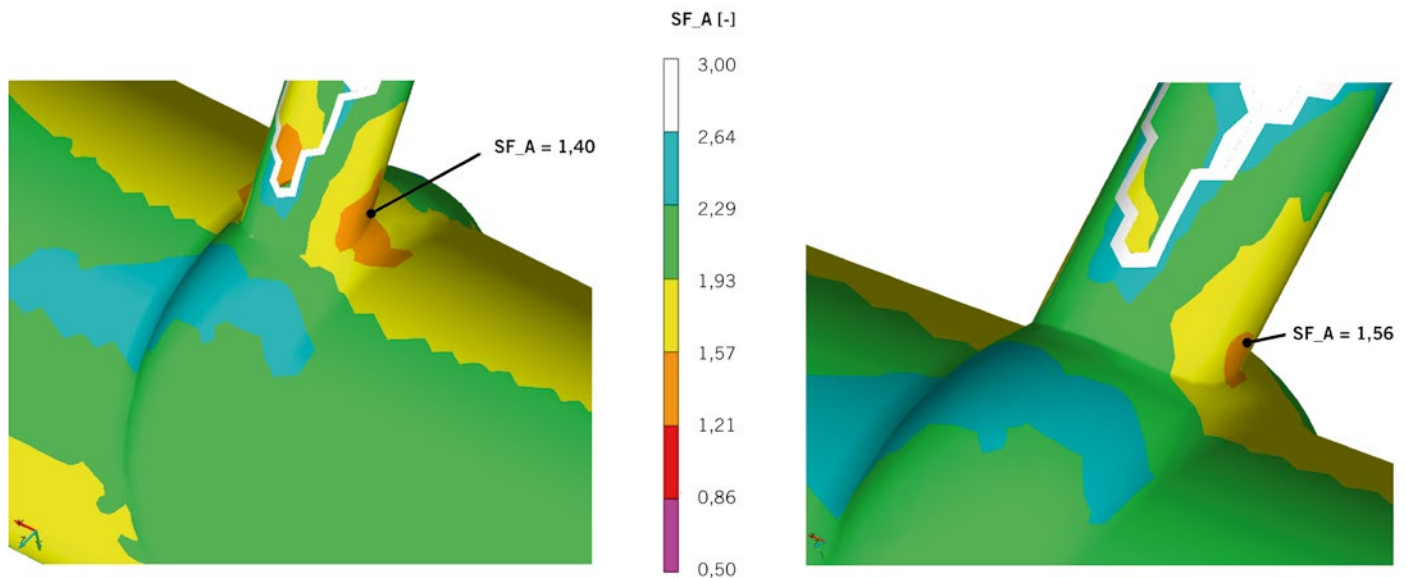


BILD 6 Sicherheitsfaktor ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung lokaler Parameter (© Hirschvogel Automotive Group)

auf die Werkstoffkennwerte (wie zum Beispiel die Dauerfestigkeit) in FEMFAT ermittelt werden, transformiert sich das Haigh-Diagramm. Positive Einflüsse führen dabei zu einer Ausdehnung des Diagramms, wohingegen negative Einflüsse die Werkstoffkennwerte schrumpfen lassen und die Ertragbarkeit somit mindern würden. Die Anpassung erfolgt dabei jeweils einzeln proportional zu den lokal vorliegenden Werten der Mindestzugfestigkeit. Somit kann jeder Knoten der FE-Struktur ein individuelles Haigh-Diagramm und daher auch eine andere lokale Wöhlerlinie aufweisen – aufgrund unterschiedlicher Werkstoffkennwerte und Umgebungsbedingungen (Temperatur, Kerbe, Oberflächenrauigkeit etc.). Die Genauigkeit der Materialbeschreibung durch individuelle Festigkeitsdaten an jedem FE-Knoten aus der Umform-Simulation kann bereits in die Lebensdauerbewertung überführt und es muss nicht mehr von homogenem Material ausgegangen werden, **BILD 5**.

Motorkomponenten werden üblicherweise auf Dauerfestigkeit ausgelegt. Dabei fokussiert die Lebensdauerberechnung von Common-Rails meist das kritische Ereignis. Für dieses wird unter Berücksichtigung von Streuspanne, Überlebenswahrscheinlichkeit des zu untersuchenden Werkstoffs und geforderter Überlebenswahrscheinlichkeit der lokal vorliegende Sicherheitsfaktor ermittelt. Anhand

dessen bewertet der Entwickler, ob Dauerfestigkeit für das analysierte Bauteil zu erwarten ist. **BILD 6** zeigt, dass die erhöhte Mindestzugfestigkeit und Streckgrenze im kritischen Bereich der Bohrungsverschneidung eine signifikante Steigerung des Sicherheitsfaktors (von SF_A = 1,40 auf SF_A = 1,56) und somit der Lebensdauer erwarten lässt.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Vorhersagegenauigkeit bei der Auslegung von innenhochdruck-beaufschlagten Komponenten (zum Beispiel Common-Rails für Diesel-Einspritzsysteme) kann unter Berücksichtigung kinematischer Werkstoffmodelle deutlich erhöht werden. Soll insbesondere auch die voraussichtliche Lebensdauer des Bauteils bewertet werden, so empfiehlt es sich, die in der Autofrettage-Simulation ermittelten Bauteil-Eigenstressspannungen sowie die lokale Werkstoffverfestigung in die Lebensdauerberechnung zu überführen. Darüber hinaus ermöglichen neuartige Ansätze eine signifikante Steigerung der Aussagegüte von Lebensdauer-Analysen. Diese basieren auf Generierung und Transfer zusätzlicher Parameter zur Charakterisierung der lokalen Werkstofffestigkeit (vorerst für die lokale Mindestzugfestigkeit und Streckgrenze des umgeformten Bauteils erfolgreich umgesetzt).

LITERATURHINWEISE

- [1] N. N.: Felss – Shortcut Technologies. www.felss.com/verfahren-maschinen/autofrettage, Zugriff vom 04.06.2016
- [2] Carlucci, D.; Jacobson, S.: Ballistics – Theory and Design of Guns and Ammunition. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014
- [3] Narayanan, R.; Dixit, U.: Advances in Material Forming and Joining. New Delhi: Springer, 2015
- [4] N.N.: Wikipedia: Goodman Relation. https://en.wikipedia.org/wiki/Goodman_relation#cite_ref-6, Zugriff vom 04.06.2016

DANKE

Die Autoren danken sowohl Dipl.-Ing. Axel Werkhausen, FEMFAT-Vertriebs- und Support-Manager, als auch Dr.-Ing. Christian Gaier, Gruppenleiter FEMFAT-Entwicklung, beide Engineering Center Steyr GmbH & Co. KG in St. Valentin (Österreich), Dipl.-Ing. Olivier Krafft, Vertriebs-Manager bei Transvalor S.A. in Mougins Cedex (Frankreich) sowie Dipl.-Ing. Angela Kotte, Entwicklerin für Material und Technologie im Bereich Vorausentwicklung der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen (Deutschland), herzlich für die Unterstützung bei der Durchführung des Entwicklungsprojekts.



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.emag.springerprofessional.de/atz-offhighway-worldwide