

© Liebherr

AUTOREN



**Jochen Heizmann, B. A.** war zuständig für die Entwicklung und Vermarktung neuer Anwendungsbereiche in der Abteilung Advanced Engineering der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen.



**Tobias Walter, M. Sc.** beschäftigte sich im Rahmen seiner Masterarbeit mit der Verbesserung von Ansätzen zur Bewertung der Lebensdauer von geschmiedeten Hochleistungskomponenten in der Abteilung Advanced Engineering der Hirschvogel Automotive Group in Denklingen.



**Giovanni Corbinelli, M. Eng.** ist verantwortlich für die Entwicklung und Erprobung von Common-Rail-Hochdrucksystemen bei Liebherr in Bulle (Schweiz).



**Myriam Rossier, B. Sc.** ist zuständig für die Auslegung und Konstruktion von Komponenten für Common-Rail-Hochdrucksysteme bei Liebherr in Bulle (Schweiz).

**NEUER DIESELMOTOR D976**

Liebherr ist ein weltweit führender Anbieter von Medium Duty(MD)- und Heavy Duty(HD)-Dieselmotoren für Off-road-Anwendungen. Die Dieselmotoren

zeichnen sich durch hohe Leistung und Robustheit aus. In den letzten Jahren hat Liebherr intensiv an der Entwicklung einer neuen Motorenreihe gearbeitet, um weiterhin eine hohe Leistung und Zuverlässigkeit zu gewährleisten

und den Kraftstoffverbrauch sowie die Schadstoffemissionen deutlich zu senken. Der D976-Reihenmotor ist eines der Flaggschiffe dieser neuen Baureihe. Mit einem Hubraum von 18 l und einem Leistungsbereich von bis zu 620 kW ist

# Liebherr-Dieselmotor D976 mit geschmiedetem Common Rail

Die Bedeutung von geschmiedeten Hochleistungskomponenten erstreckt sich über vielfältige Anwendungen in zahlreiche Branchen. Im Bereich der Verbrennungsmotoren liefert deren Einsatz einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit sowie auch zur Absicherung der Robustheit. Hirschvogel Automotive Group und Liebherr Common Rail Systems stellen die neuesten Ergebnisse ihres Kooperationsprojekts zur Einführung der Schmiedetechnologie bei der Herstellung von Einspritzkomponenten vor. Ziel der Entwicklung eines geschmiedeten, hochfesten Common Rails für den kürzlich auf dem Markt eingeführten Liebherr-Dieselmotor D976 war die signifikante Verringerung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Reduzierung der Schadstoffemissionen.

er derzeit der stärkste Reihenmotor des Herstellers. Der Motor erzeugt ein maximales Drehmoment von 3650 Nm bei 1500/min und erfüllt die Abgasnormen EU Stufe V, Tier 4 Final und Stufe IIIA. Zur Realisierung der Stufe V kommen die Systeme SCRFilter und SCROnly von Liebherr zum Einsatz. Für die hohe Leistung des Motors sorgt das Common-Rail-System (CRS) von Liebherr, das einen hohen Wirkungsgrad, eine präzise Kraftstoffzufuhr und eine genaue Dosierung der Kraftstoffmenge bei bis zu 2500 bar Einspritzdruck garantiert.

## FUNKTIONSPRINZIP VON KRAFTSTOFFEINSPRITZSYSTEMEN

Bei Hochleistungsmotoren ist das Einspritzsystem eines der Hauptmerkmale und unterliegt hohen Anforderungen. **BILD 1** zeigt schematisch den typischen Aufbau eines Einspritzsystems und seiner Hauptkomponenten. Der im Tank gespeicherte Kraftstoff wird von der Niederdruckpumpe (LPP) angesaugt und fließt durch ein Vorfilter-/Wasserabscheide-Element, um die größten Verunreinigungen herauszufiltern. Die LPP

fördert den unter Druck stehenden Kraftstoff (circa 8 bar) zum Feinfilter, wo der Kraftstoff der zweiten Filtrationsstufe unterzogen wird. Damit werden kleinste Verunreinigungen entfernt und eine hohe Sauberkeit gewährleistet, bevor er in den Hochdruckbereich des Einspritzsystems gelangt. Der von der LPP gelieferte Kraftstoff wird über ein Volumenregelventil (VCV) dosiert und gelangt in die Hochdruckkammer, wo er die zweite Kompressionsstufe durchläuft, die ihn auf den gewünschten Einspritzdruck bringt. Der unter Druck stehende Kraftstoff sammelt sich im Common Rail und fließt zu den Injektoren, wenn die Einspritzung von der elektronischen Steuereinheit (ECU) ausgelöst wird. Der Injektor fördert die angeforderte Kraftstoffmenge – fein zerstäubt – direkt in die Brennkammer, um einen ordnungsgemäßen Verbrennungsprozess zu ermöglichen.

## KRAFTSTOFFEINSPRITZSYSTEM FÜR DEN DIESELMOTOR D976

Für den D976 wurde ein sehr kompakter Aufbau gewählt. Das Hochdruck-

Verteilerrohr wird zusammen mit den Top-Feed-Injektoren unter der Zylinderkopfhaube montiert. Dies garantiert einen minimalen Abstand zwischen Kraftstoffdruckspeicher und Einspritzdüsen, wodurch eine optimale Druckstabilität und Kraftstoffförderung erreicht werden kann. **BILD 2** zeigt das für den Motor entwickelte Kraftstoffeinspritzsystem. Folgende Komponenten von Liebherr sollen explizit aufgeführt werden:

- Pumpe LP11.2
- Rail LR60.8
- Top-Feed-Injektoren LI2.9
- ECU3.

Für eine genaue Dosierung der Einspritzmenge ist die Druckstabilität von großer Bedeutung. Diese gilt es unabhängig von Rail-Position und Einspritzzeitpunkt sicherzustellen – insbesondere wegen der hohen Leistungsdichte des Motors (~ 105 kW pro Zylinder) und der daraus resultierenden hohen Einspritzmenge je Stoß (bis zu 500–550 mg für die höchste Nennleistung). Druckschwankungen aufgrund der Pump- und Einspritzvorgänge können über die richtige Dimensionie-

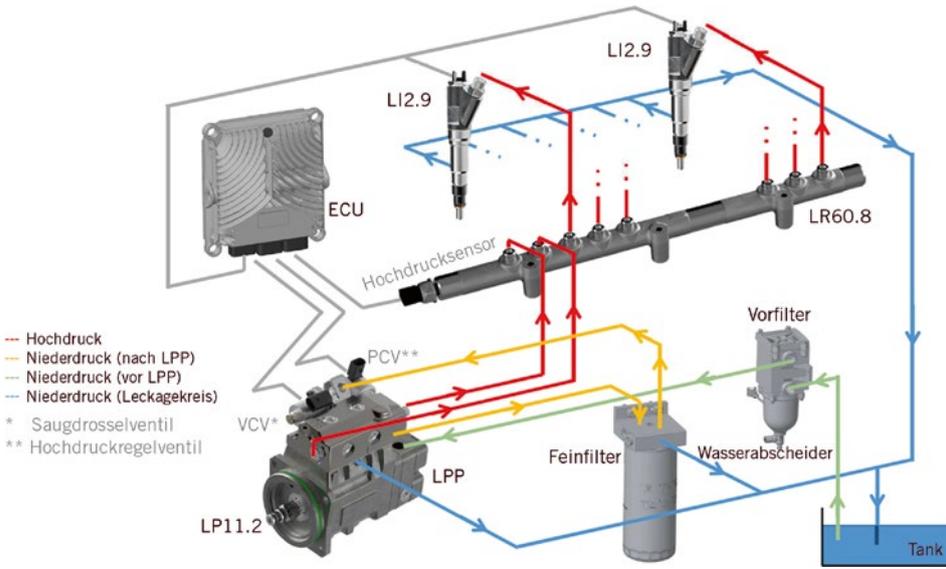


BILD 1 Typisches Funktionsdiagramm eines Common-Rail-Systems (© Liebherr)

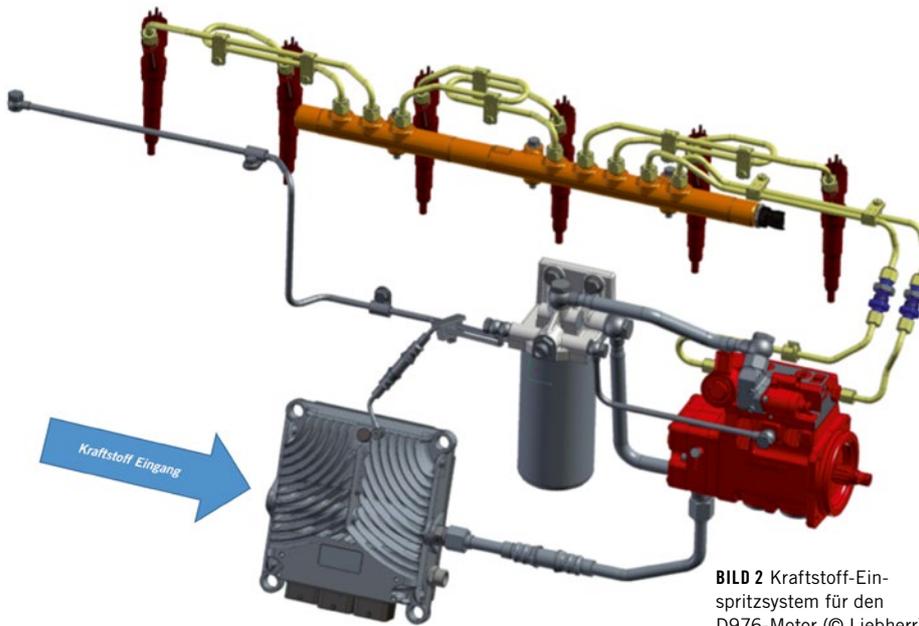


BILD 2 Kraftstoff-Einspritzsystem für den D976-Motor (© Liebherr)

rung des Speichervolumens maßgeblich gedämpft werden. Schließlich führt ein ausgeklügeltes Design des Speichers zu einem stabilen Druckzustand von Zyklus zu Zyklus und von Zylinder zu Zylinder, was sich als vorteilhaft für die Einspritzgenauigkeit, den niedrigen Verbrauch und die Emissionen erwiesen hat.

**BILD 3** zeigt beispielhaft den erwähnten Dämpfungseffekt, der durch den gezielten Einsatz von Common Rails als Druckspeicher entsteht. **BILD 3** (unten links) zeigt den pulsierenden

Druck am Pumpenausgang. Aufgrund der Pumpvorgänge kommt es zu einem extrem diskontinuierlichen und rauen Verlauf. Dank des Dämpfungseffekts einer vorteilhaften Speicherauslegung lassen sich die Druckgradienten am Einlass eines jeden Injektors wesentlich reduzieren, **BILD 3** (oben rechts). Der Unterschied zwischen den beiden gemessenen Drucksignalen ist offensichtlich. Des Weiteren erweist sich der beschriebene Effekt für die Kraftstoffzufuhr als enorm vorteilhaft. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich

ein gut dimensioniertes Common Rail in zweierlei Hinsicht positiv auswirkt:

- Hochfrequente Störeinflüsse, aufgrund von Pumpeffekten und Schaltvorgängen der Hochdruckventile, werden vollständig herausgefiltert. Dies führt zu einer höheren Konstanz der eingespritzten Menge über die Einspritzzyklen.
- Die Amplituden von niederfrequenten Störungen werden erheblich gedämpft, was zu einer geringeren Abhängigkeit der Einspritzmenge von der Injektorposition führt.

Schließlich wurde für den Motor ein Common Rail mit einem Speichervolumen von 60 cm<sup>3</sup> gewählt. Der Motoraufbau und die zulässige Bauteillänge führten damit zu einem Innendurchmesser von 12 mm. Die daraus resultierende Bauteilgeometrie in Verbindung mit dem hohen Einspritzdruck ließ eine merkliche Beanspruchung des Bauteils erwarten. Entsprechend wurde für die Absicherung der Dauerfestigkeit insbesondere auch die Werkstoffauswahl berücksichtigt.

#### ANVISIERTER EINSATZ UND ANWENDUNGSPROFIL

Dank des erweiterten Leistungsbereichs und des hohen Drehmoments eignet sich der Motor für eine Vielzahl an Anwendungen: Offhighway-Maschinen, Land- und Bergbaumaschinen, Nutz- und Schienenfahrzeuge, Schiffs- und Stromgeneratoren sowie spezielle Fahrzeuge. Jede Anwendung hat in der Regel ihre eigene Charakteristik. Diese bestimmt wiederum das Niveau und die Art der Belastung des Einspritzsystems und insbesondere des Common Rails.

**BILD 4** zeigt beispielhaft einen Vergleich in Bezug auf den Einspritzdruck für eine Erdbewegungsmaschine und für einen Continuous-Power(COP)-Stromgenerator. Die verschiedenen Einsatzmerkmale sind gut zu erkennen: hochdynamischer Arbeitsdruck an der Erdbewegungsmaschine und konstanter Arbeitsdruck für das Aggregat. Ebenso wird der Unterschied zum durchschnittlichen Arbeitsdruck deutlich: eher niedrig bei der Erdbewegungsmaschine und extrem hoch beim Aggregat. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die späteren Einsatzbereiche genau zu kennen, damit mögliche Fehlermodi und die Beanspruchung durch die jeweilige Anwendung abgeschätzt werden kön-

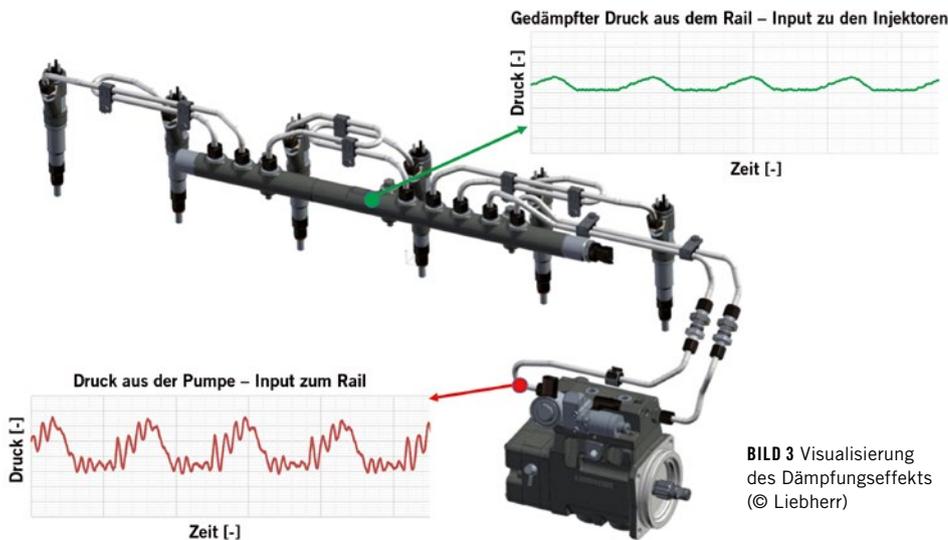


BILD 3 Visualisierung des Dämpfungseffekts (© Liebherr)

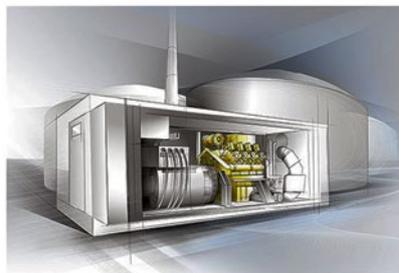
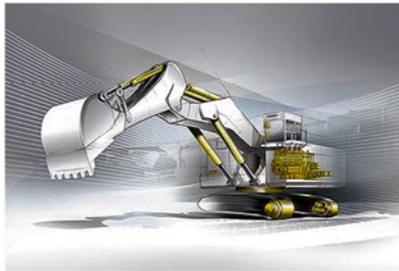
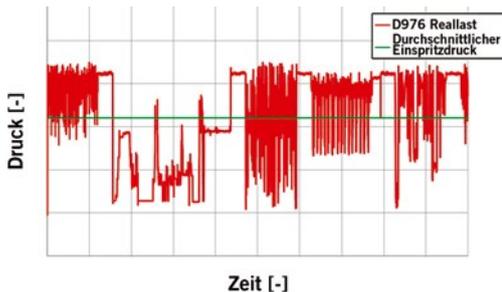


BILD 4 Einspritzdruck einer Erdbewegungsmaschine und eines COP-Generators (© Liebherr)

nen. Um ein genaues Ziel für die Lebensdauerbewertung zu definieren, wurde bei Liebherr eine spezielle Methodik zur Analyse des Anwendungsprofils entwickelt [1]. Diese Methode besteht aus drei Hauptschritten, **BILD 5**:

- Hochfrequenz-Datenerfassung zum Rail-Innendruck an der Arbeitsmaschine
  - Frequenzanalysen und Rainflow-Zählung auf Basis der Druckwerte
  - Erzeugung eines 3-D-Lastspektrums.
- Zur Bewertung der Robustheit der Lebensdauer wird das 3-D-Lastspekt-

rum in einem typischen Wöhler-Diagramm zusammengeführt und mit den Bauteil-Wöhler-Kurven verglichen. **BILD 6** zeigt einen Vergleich zwischen einer Erdbewegungsmaschine (grün) und einem COP-Generator (lila). Erwartungsgemäß belastet die Erdbewegungsmaschine das Common Rail mit höheren Druck-Amplituden (hochdynamischer Einspritzdruck), während der COP-Generator den Druckspeicher mit geringeren Amplituden belastet. Andererseits liegt die kumulierte Pulszahl für Generatoren während der gesamten Lebensdauer wesentlich höher.

## FESTLEGUNG DER FERTIGUNGSSCHRITTE

In einem frühen Stadium der Komponentenentwicklung werden alle in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Kenntnisse und Erfahrungen in einem Lastenheft zusammengefasst. Dies wiederum dient als Grundlage für die virtuelle Bauteilauslegung und für nachfolgende Bauteiltests. Sowohl die Entwicklung der Bauteilgeometrie als auch die Werkstoffauswahl erfolgen unter Berücksichtigung möglicher Fertigungsschritte. Da Common Rails für Dieselmotoren im Betrieb einem hohen dynamischen Innendruck ausgesetzt sind, ist meist auch die hydraulische Autofrettage integriert. Im Folgenden soll dieser spezielle Prozessschritt kurz erläutert werden.

Die hydraulische Autofrettage als Methode zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit wurde bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen diskutiert – sowohl experimentell als auch rechnerisch mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM). Bei diesem Prozessschritt wird das Bauteil einmalig einem Innendruck ausgesetzt, welcher deutlich über dem späteren Betriebsdruck liegt. Nach der Druckentlastung verbleibt ein Eigenspannungsfeld, **BILD 7**. Das lokale Einbringen von Druckeigenspannungen an versagenskritischen Stellen führt wiederum zu einer signifikanten Absenkung der Mittelspannung. Ausschlaggebend hierfür sind die negativen Eigenspannungen, welche sich mit den späteren Betriebsspannungen überlagern und diesen entgegenwirken [2, 3].

## VIRTUELLER ENTWICKLUNGSANSATZ

Da der Ausfall eines Common Rails zu einem Motorbrand führen kann, müssen strenge Sicherheitsrichtlinien erfüllt werden. Gleichzeitig ist eine dauerfeste Auslegung unerlässlich. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, kommt bei Hirschvogel die in **BILD 8** dargestellte Vorgehensweise zur Anwendung. Zunächst wird eine Fließkurvenaufnahme über standardisierte Zug-Druck-Versuche durchgeführt, um das elastisch-plastische Materialverhalten zu identifizieren. Dies dient als Grundlage für die Bestimmung der Parameter zum in der FEM implementierten Cha-

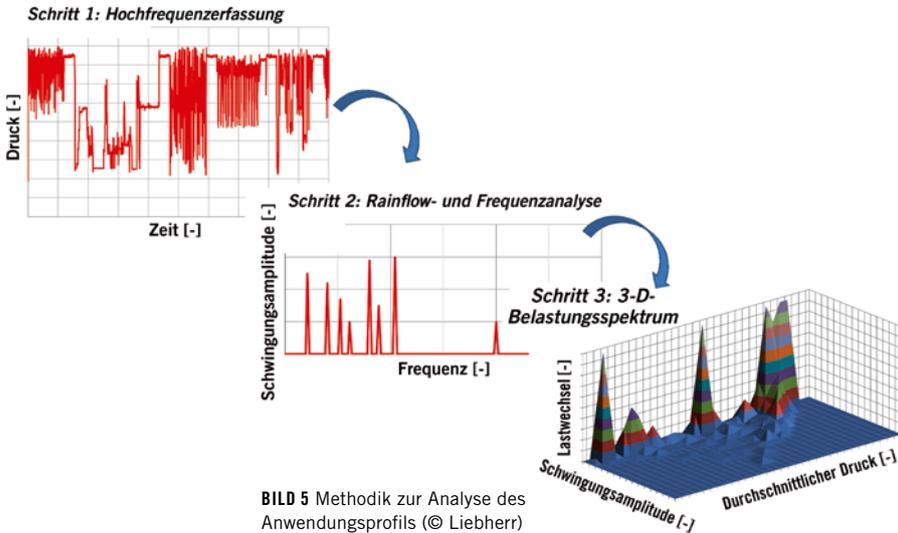


BILD 5 Methodik zur Analyse des Anwendungsprofils (© Liebherr)

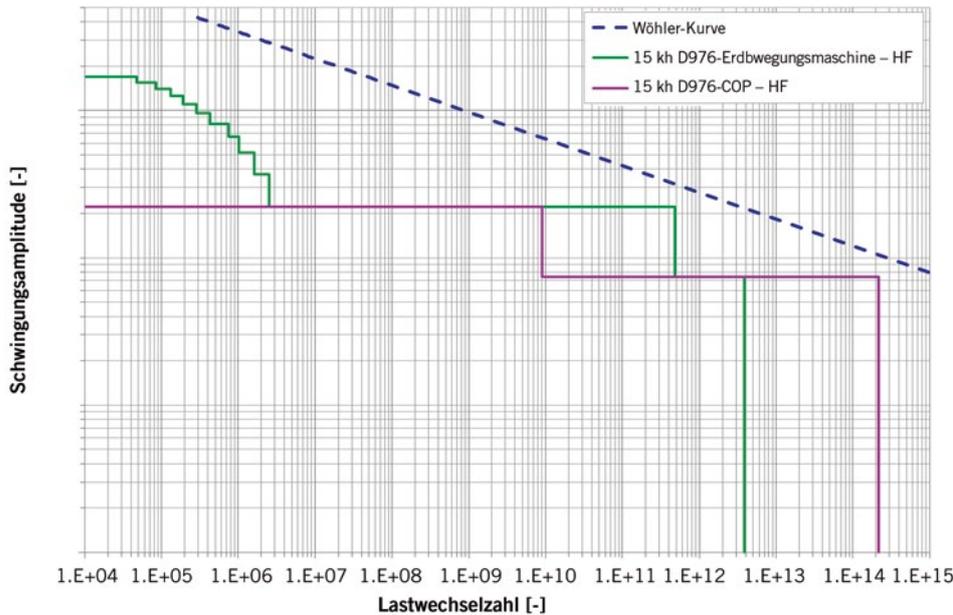


BILD 6 Vergleich von Wöhler-Kurven einer Erdbewegungsmaschine und eines COP-Generators (© Liebherr)

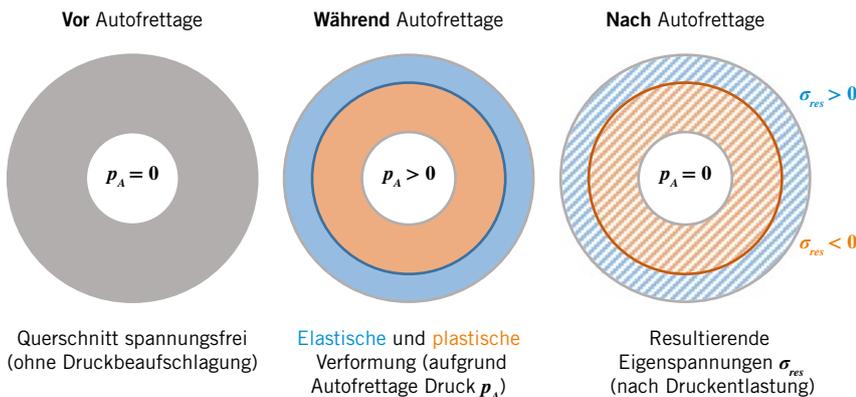


BILD 7 Prinzip der Autofrettage am Beispiel eines dickwandigen Hohlzylinders (© Hirschvogel Holding)

boche-Modell. Die Erstellung von Lastkollektiven erfolgt durch Kombination von Autofrettage-Druck und anschließender zyklischer Last gemäß den Betriebsbedingungen. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die in der FEM berechneten lokalen (das heißt knotenspezifischen) Spannungstensoren herangezogen und zur Berechnung der Ermüdungsfestigkeit an weiterführende Software (beispielsweise Finite Element Method Fatigue (FEMFAT)) übergeben. Die Berechnungen berücksichtigen unter anderem komponentenspezifische Haigh-Diagramme. Bei deren Konstruktion ist die Druckseite von entscheidender Bedeutung. Denn aufgrund des hohen Autofrettage-Drucks erfahren die ausfallkritischen Stellen meist eine Beanspruchung im Bereich negativer Mittelspannungen. Die spätere Durchführung von Wöhler-Tests anhand von Prototypen liefert fundierte Aussagen zur Genauigkeit der Berechnungsergebnisse. Dabei werden Wöhler-Kurven mithilfe von statistischen Auswertemethoden erstellt und für Schwingfestigkeitsbewertungen herangezogen. Gleichzeitig erlauben Schadenselementuntersuchungen auf Basis der Rasterelektronenmikroskopie weitere Rückschlüsse auf die Ausfallmechanismen und tragen so zur Absicherung der angewendeten Berechnungsmethoden bei.

BILD 9 zeigt das Ergebnis einer Lebensdauerberechnung in Form der Schadensverteilung auf Basis der bei Hirschvogel etablierten Berechnungsmethoden. Im vorliegenden Fall wurde das Bauteil bei einem Druck von 9400 bar autofrettet. Die nachfolgend aufgebrachte zyklische Belastung mit einem Maximaldruck von 3500 bar repräsentiert die Bedingungen während der Bauteilprüfung. Die Schadensverteilung zeigt, dass die kritischen Bereiche an der Bohrungsverschneidung liegen, genau dort, wo sich die Umfangsspannungen der Längs- und Querbohrung überlappen, was zu einer Spannungskonzentration führt. Der Kehrwert der berechneten Schädigung liefert dann die ertragbaren Lastwechselzahlen. Komponenten-Wöhler-Tests haben diesen ausfallkritischen Punkt an der Bohrungsverschneidung bestätigt.

LAUFENDE VERBESSERUNGEN

Heutzutage kommen für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Bauteilen

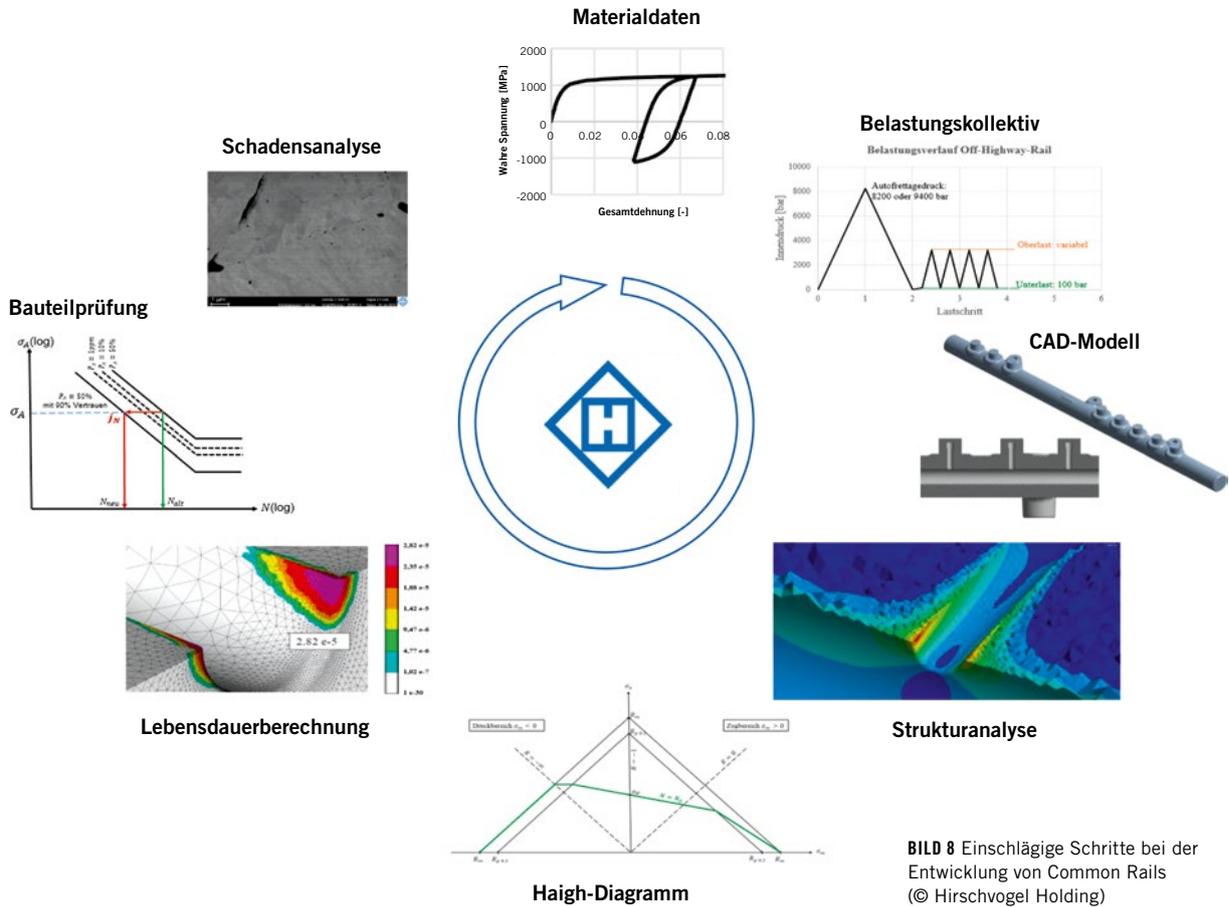


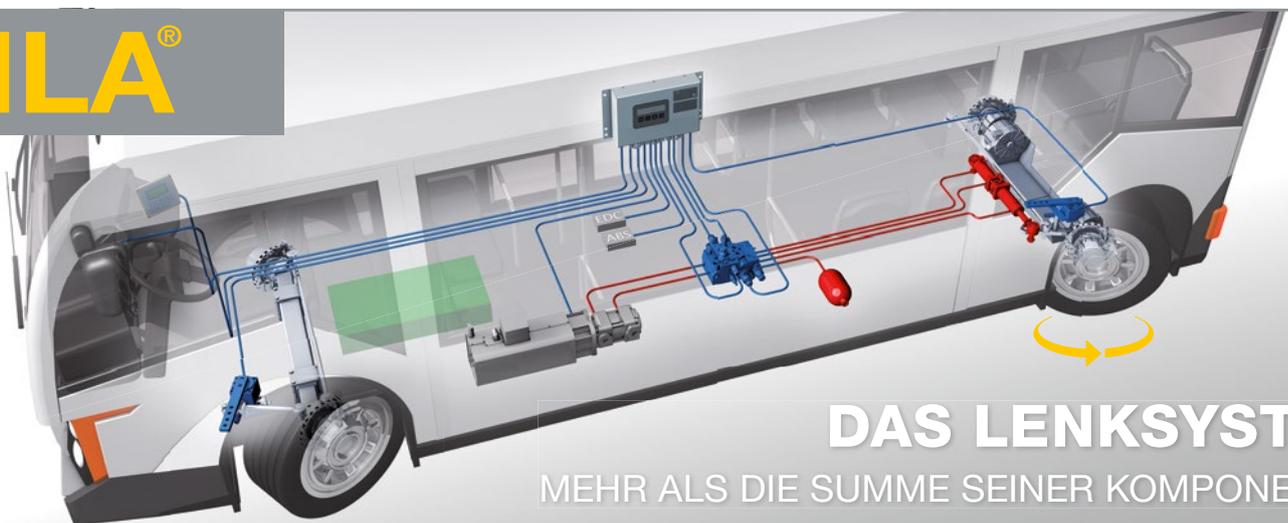
BILD 8 Einschlägige Schritte bei der Entwicklung von Common Rails  
(© Hirschvogel Holding)

zunehmend Softwareprogramme zum Einsatz. Diese berücksichtigen in der Regel die Ergebnisse von vorgelagerten FEM-Analysen. Analog zum Stand der

Technik werden mittels FEM ermittelte Spannungstensoren in die Lebensdauerberechnung überführt. Mithilfe von Haigh-Diagrammen lässt sich der Ein-

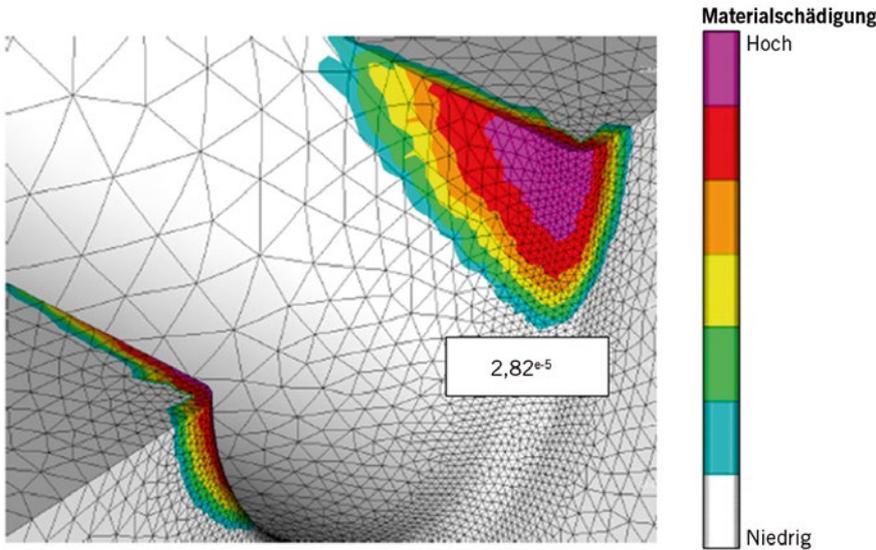
fluss der Mittelspannungen auf die Ermüdungsfestigkeit berücksichtigen. Gemäß dem Kerbspannungskonzept stoppt die Software im Schadensfall die

**EHLA®**



**DAS LENKSYSTEM**

MEHR ALS DIE SUMME SEINER KOMPONENTEN



**BILD 9** Darstellung der Verteilung der Materialschädigung mittels FEMFAT-Postprozessor (© Hirschvogel Holding)

Berechnung, sobald der technische Anriss erreicht ist [4, 5]. Durch diese Vorgehensweise können zahlreiche Entwicklungsschleifen reduziert werden, was zu erheblichen Zeit- und Kostenvorteilen führt. Das Ende der Entwicklung scheint jedoch noch nicht erreicht zu sein. Beispielsweise deutet die Weiterentwicklung der Konstruktionsvorschrift für Haigh-Diagramme auf eine weitere Steigerung der Genauigkeit von Berechnungsergebnissen hin.

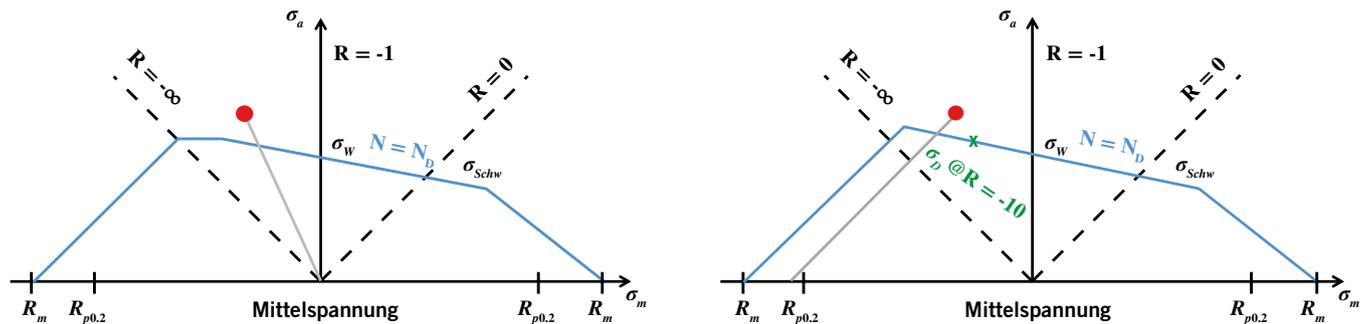
In Bezug auf das Design von Haigh-Diagrammen liegt FEMFAT eine eigene Konstruktionsvorschrift zugrunde [4]. Neben den statischen Kennwerten, wie Streckgrenze und Zugfestigkeit, hängt

sie insbesondere von der Wechsel- und Schwellfestigkeit ab. Derzeit steigt die Ermüdungsfestigkeitslinie im Haigh-Diagramm ab einer bestimmten negativen Mittelspannung nicht mehr weiter an und nimmt anschließend einen horizontalen Verlauf. Diese Annahme führt unmittelbar dazu, dass in diesem Bereich mit der Absenkung der Mittelspannung keine weitere Erhöhung der Dauerfestigkeit einhergeht. Wie aus **BILD 10** (links) ersichtlich ist, befindet sich bei autofrettierten Common Rails der Spannungszustand am ausfallkritischen Ort (roter Punkt) eindeutig im Druckbereich. Deswegen sollte das Haigh-Diagramm dort so genau wie

möglich sein. Die Ermüdungsgrenze für negative Mittelspannungen ist jedoch bislang wenig erforscht. Daher wurde gemeinsam mit dem Softwarehersteller eine Überarbeitung des Haigh-Diagramms durchgeführt. Es wurde vereinbart, die Belastbarkeit des eingesetzten Werkstoffs für ein Spannungsverhältnis von  $R = -10$  unter Verwendung eines standardisierten Tests experimentell zu bestimmen. Anschließend wurde die Konstruktionsvorschrift für das Haigh-Diagramm entsprechend angepasst.

Im Rahmen dieser Untersuchungen ergab sich eine Dauerfestigkeit von 550 MPa bei einem R-Wert von -10. Dieser Wert liegt über der bisherigen Dauerfestigkeit und bestätigt die Annahme, dass die Dauerfestigkeitslinie des Haigh-Diagramms im Druckbereich weiter zunimmt. **BILD 10** (rechts) zeigt das neue Haigh-Diagramm, das unter Berücksichtigung dieses zusätzlich generierten Stützpunktes (grünes Kreuz) erstellt wurde. Die Verbindungslinie zwischen schwelender und wechselnder Belastung bleibt erhalten. Es wird jedoch nicht mehr wie bisher in den Druckbereich hinein verlängert. Stattdessen bilden die Wechselfestigkeit und die Ermüdungsfestigkeit bei  $R = -10$  eine neue Gerade, die bis zum Schnittpunkt mit der Geraden aus der statischen Druckfestigkeit (unter einem Winkel von  $45^\circ$ ) gezogen wird. Der Aufbau des Haigh-Diagramms im Bereich der positiven Mittelspannungen bleibt unverändert. Weitere Verbesserungen konnten durch die Umstellung des Überlastfalls von  $R = \text{konstant}$  auf  $\sigma_U = \text{konstant}$  erzielt werden.

**BILD 10** Haigh-Diagramm ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung von zusätzlichem Stützwert (© Hirschvogel Holding)



- Eindimensionaler Spannungszustand am versagenskritischen FE-Knoten
- Lebensdauerberechnung mit Überlastfall  $R = \text{konstant}$  (in Anlehnung an die FKM-Richtlinie)

- Eindimensionaler Spannungszustand am versagenskritischen FE-Knoten
- Lebensdauerberechnung mit Überlastfall  $\sigma_U = \text{konstant}$  (in Anlehnung an die FKM-Richtlinie)

## ZUSAMMENFASSUNG

Die hohe Leistung des kürzlich vorgestellten D976-Motors basiert unter anderem auf einem geschmiedeten Common Rail mit sehr hoher Dauerfestigkeit. Das Bauteil wurde von Liebherr CRS und der Hirschvogel Automotive Group entwickelt. Um das Ziel dieses Simultaneous-Engineering-Projekts zu erreichen, tauschten beide Parteien ihre Fachkenntnisse untereinander aus. Liebherr brachte hierbei sein Know-how in Bezug auf Auslegung, Herstellung und Validierung von Einspritzsystemen ein. Die Bedeutung des Beitrags von Hirschvogel liegt in der Konstruktion und Fertigung hochfester Komponenten sowie in der Werkstoffauswahl. Darüber hinaus spielen der Einsatz leistungsfähiger Simulationssoftware einschließlich Anwendung von fortschrittlichen Materialmodellen sowie die Generierung zuverlässiger Materialdatensätze eine wichtige Rolle.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Corbinelli, G.; et al.: Advanced product validation methodology for long life reliability of MD/HD Common Rail System. Tagung im Haus der Technik, Berlin, 2016
- [2] Greuling, S.; et al.: Autofrettage innen-druckbelasteter Bauteile. in: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 37 (2006), Nr. 3
- [3] Greuling, S.; et al.: Ein Konzept zur Dauerfestigkeitssteigerung autofrettierter Bauteile unter Innendruck. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 32 (2001)
- [4] N. N.: FEMFAT 5.3 BASIC – Benutzerhandbuch. Magna, St. Valentin, 2017
- [5] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. Berlin Heidelberg: Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006

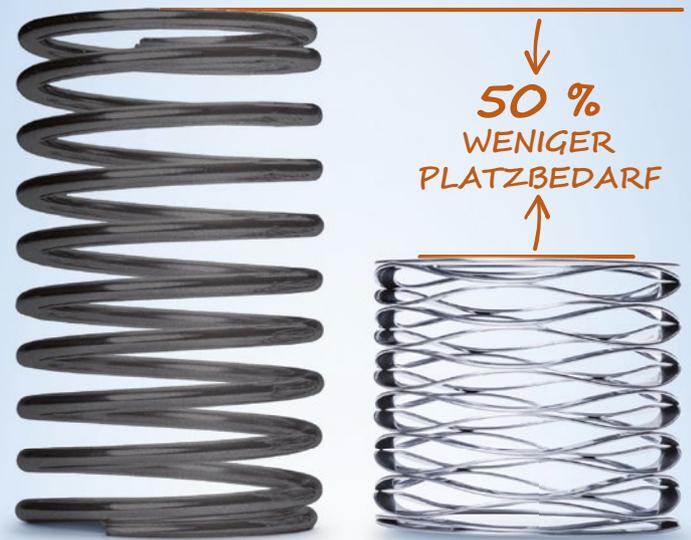
## DANKE

Die Autoren bedanken sich bei Dipl.-Ing. Roland Ruf, Ingenieur für Bauteilsimulation, und Dipl.-Ing. Lukas Wunsch, Ingenieur für Produktvalidierung, in der Hirschvogel Automotive Group (Deutschland) für deren Unterstützung während der Vorbereitung und Durchführung von relevanten Analysen. Darüber hinaus bedanken sich die Autoren bei Mario D'Onofrio, M. Eng., von Liebherr CRS (Schweiz) und Patrick Mallard von Duncha (Frankreich) für deren technische Unterstützung in der Entwicklungs- und Validierungsphase.



### READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:  
[www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide](http://www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide)

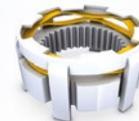


STANDARD-  
SPIRALFEDER

SMALLEY®  
WELLENFEDER



Druckventil



Schwimmend  
gelagertes Zahnrad



Ölventil

## ALL SPRINGS ARE NOT EQUAL® (ALLE FEDERN SIND NICHT GLEICH)

Federhöhe gegenüber gewöhnlichen Spiralfedern um 50 % reduziert - bei gleicher Federkraft und gleichem Federweg. Standardmäßig aus Edelstahl und Kohlenstoffstahl erhältlich. Sie benötigen individuelle Teile? Kein Problem. Wir liefern Ihnen die richtige Feder aus dem gewünschten Werkstoff für Ihre spezifische Verwendung.



IN DEUTSCHLAND VERTRETEN DURCH

+49 (0) 234 92361 0  
[tfcddeutschland.com](http://tfcddeutschland.com)



### KOSTENLOSE MUSTER:

Rufen Sie uns an unter +49 (0) 234 97849-011  
oder besuchen Sie uns im Internet unter  
[expert.smalley.com/ATZ/wellenfeder](http://expert.smalley.com/ATZ/wellenfeder)