



Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.

AWT)))
Arbeitsgemeinschaft
Wärmebehandlung + Werkstofftechnik e.V.

Forschungsgesellschaft
Stahlverformung e. V.



FVA 
sharing drive innovation

FORSCHUNGSVERBUND

massiver LEICHTBAU

Forschungsverbund Massiver Leichtbau –
Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt
in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für
massivumgeformte Bauteile der
Automobiltechnik

www.massiverLEICHTBAU.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)

Die IGF ermöglicht die effiziente Verbindung von Grundlagenforschung und wirtschaftlicher Anwendung. In diesem vom BMWi geförderten Programm werden neue Technologien aufbereitet, um die Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen (KMU) zu stärken.

Die Förderung von Vorhaben der branchenweiten Industriellen Gemeinschaftsforschung hat zum Ziel, die strukturbedingten Nachteile kleiner und mittlerer Unternehmen in der Forschung auszugleichen. Diese Unternehmen sind aufgrund ihrer geringen Größe zumeist nicht in der Lage, Forschungsaufträge an externen Stellen zu finanzieren oder eigene Forschungsabteilungen zu unterhalten. Im Rahmen der IGF können KMU ihre Fragestellungen durch gemeinsame Forschungsaktivitäten lösen, die vor allem von Hochschulen und gemeinnützigen wirtschaftsnahen Forschungseinrichtungen durchgeführt werden. Diese Vorgehensweise ist besonders effizient, da so gleichgelagerter Forschungsbedarf vorwettbewerblich gebündelt und Risiken verteilt werden. Außerdem profitieren zahlreiche kleine und mittelständische Unternehmen von Forschungsergebnissen, die jedes für sich allein nicht hätte erreichen können. Förderfähig sind vorwettbewerbliche Forschungsvorhaben, die unternehmensübergreifend ausgerichtet sind und neue Erkenntnisse vor allem im Bereich der Erschließung bzw. Nutzung moderner Technologien erwarten lassen.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort: Prof. Hans-Werner Zoch	3
Übersicht Forschungsverbund Massiver Leichtbau: Gemeinsam mehr erreichen	4 - 5
Hochleistungszahnräder: Vielfältige Lösungsansätze	6 - 7
Zahnräder in Blechbauweise: Eine starke Leistung	8 - 9
Umformtechnisch hergestellte Zahnräder: Potentiale erkennen und nutzen	10 - 11
Kolbenbolzen: Innovatives Fertigungsverfahren für Kolbenbolzen	12 - 13
CAE-basierte Vorhersage von Bauteileigenschaften: Numerische Abbildung der Prozesse	14 - 15
Getriebewelle: Fertigungstechnischer Leichtbau	16
Hybride Radnabe: Sichere Prozesse im Fokus	17
Innovationstransfer: Abbau von Innovationshemmnissen und weiterführende Leichtbaupotentiale	18
Summery & Danksagung	19

Herausforderungen – Chancen – Potentiale



*Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch,
Geschäftsführender Direktor
Leibniz-Institut für Werkstofforien-
tierte Technologien IWT*

Liebe Leserinnen und Leser!

Ein verantwortungsbewusster Umgang mit den vorhandenen Ressourcen und eine konsequente Reduzierung der CO₂-Emissionen bilden die Zielgrößen der aktuellen und zukünftigen Entwicklung im Fahrzeugbau. Um diese zu erreichen, ist der Leichtbau eine der entscheidenden Schlüsseltechnologien. Das gilt vor allem auch für die Elektromobilität batteriebetriebener Fahrzeuge, da sich so die hohen Gewichte der Energiespeichersysteme kompensieren lassen. Ein erster revolutionärer Schritt auf dem Weg zum Leichtbau war in den 1990er Jahren die Vorstellung eines Serienfahrzeuges mit Ganz-Aluminium-Karosserie. Diese Innovation bereitete den Weg für eine ganze Reihe von Entwicklungsprojekten, deren Ergebnis moderne, hochfeste und gut herstellbare Stahlkarosserien mit höchstem Leichtbaupotential und ausgezeichneter Recyclingfähigkeit sind.

Was bei der Fertigung von Karosserien gelang, blieb für andere bauliche Komponenten des Fahrzeugs, wie z. B. den Antriebsstrang, zunächst unerreicht. Ein Grund hierfür war unter anderem die auf verschiedene Unternehmen und Branchen verteilte Fertigung dieser Komponenten. Um diese Problematik anzugehen, wurde im Jahr 2013 eine Initiative der deutschen Massivumform-Unternehmen und Stahlhersteller (www.massiverLEICHTBAU.de) auf den Weg gebracht. Ziel war eine klare Gewichtsreduzierung im Antriebsstrang unter Anwendung bekannter Werkstoffe und Verfahren. Auf den Ergebnissen dieser Initiative basierend konnte im Jahr 2015 dann der Forschungsverbund „Massiver Leichtbau – Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für massivumgeformte Bauteile der Automobiltechnik“ seine Arbeit aufnehmen. Im Rahmen dieses vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) geförderten interdisziplinären Verbundes gelang es, die vorhandenen Potentiale für den Leichtbau, die im Antriebsstrang durch den Einsatz neuer Stahlwerkstoffe und Fertigungsmethoden stecken, zu identifizieren und zu nutzen. Darüber hinaus konnten Innovationshemmnisse, die aus einer stark arbeitsteiligen Prozesskette, aber auch aus unternehmensinternen Strukturen resultieren, definiert werden.

Eine interessante Lektüre und gute Anregungen für eigene Umsetzungen der Ergebnisse wünscht Ihnen

Prof. Hans-Werner Zoch

Gemeinsam mehr erreichen

Der von vier Forschungsvereinigungen koordinierte Verbund „Massiver Leichtbau“ erarbeitete von 2015 bis 2018 in 6 Teilprojekten die Nutzung neuer Leichtbaupotentiale im Antriebsstrang und Fahrwerk.

Ins Leben gerufen wurde der Forschungsverbund „Massiver Leichtbau – Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für massivumgeformte Bauteile der Automobiltechnik“ von der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. (AWT), der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. (FVA) und der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. (FSV). Innerhalb des Verbunds sollten die an der Zulieferkette beteiligten Bereiche Werkstoffentwicklung, Konstruktion, Fertigung und Innovationsmanagement miteinander verknüpft werden. Neben der Betrachtung des Lebenszyklus spielten hierbei auch die Faktoren Ressourceneffizienz, CO₂-Bilanz sowie die Identifizierung von Innovationshemmnissen durch einen zu geringen Wissenstransfer und eine niedrige Nutzungsbereitschaft neuer Technologien in einer stark arbeitsteiligen Prozesskette eine Rolle. Im Fokus der Untersuchungen stand jedoch vor allem die Entwicklung neuartiger Werkstoffkonzepte und Fertigungstechniken.

Beteiligte Partner

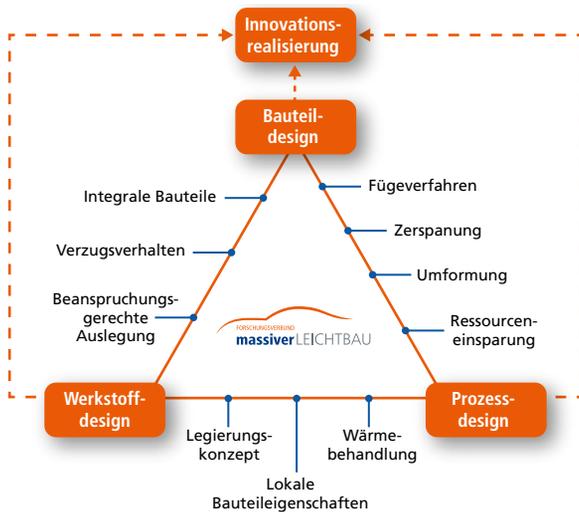
Zu den beteiligten Forschungsstellen gehörten das Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien IWT (Bremen), das Institut für Eisenhüttenkunde IEHK (Aachen), die Forschungsstelle für Zahnräder und Ge-

triebbau FZG (München), der Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen utg (München), das Institut für Umformtechnik IFU (Stuttgart), das Institut für Spanende Fertigung ISF (Dortmund), das Institut für Umformtechnik und Leichtbau IUL (Dortmund), das Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen IFUM (Hannover), das Rheinisch-Westfälische Institut für Wirtschaftsforschung RWI (Essen) sowie das Institut für Kraftfahrzeuge ika (Aachen).

Zukunftsweisende Ergebnisse

Der Forschungsverbund war aus der 2013 gegründeten „Initiative Massiver Leichtbau“ hervorgegangen und bildete eine vierte Säule neben drei durchgeführten industriegetragenen Projekten. In diesen hatten sich seit 2013 insgesamt 54 Unternehmen der





Branchen Stahlherstellung und Massivumformung zusammengeschlossen. Ziel dieser weltweit einzigartigen Initiative waren Gewichtseinsparungen in Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen mit innovativen Komponenten aus Stahl. In Phase I (2013 und 2014) wurden ein Mittelklasse-Pkw untersucht und Leichtbaupotentiale massivumgeformter Komponenten identifiziert. Hierbei wurde ein Einsparpotential des Gewichts von 42 kg im Antriebsstrang und Fahrwerk erzielt. Die Initiative ging 2015 in Phase II über und führte Untersuchungen an einem leichten Nutzfahrzeug bis 3,5 t durch. Es konnten Leichtbaupotentiale von 99 kg im Antriebsstrang und Fahrwerk realisiert werden. Phase III begann 2017 auf internationaler Ebene mit 39 Unternehmen aus den USA, Japan und Westeuropa. Hierbei wurden Leichtbaupotentiale im Antriebsstrang und Fahrwerk eines Hybrid-Pkws sowie im Getriebe eines konventionellen Lkws in den Blick genommen: Die Leichtbaupotentiale konnten mit 93 kg im Antriebsstrang und Fahrwerk eines Hybrid-Pkws sowie 124 kg im Antriebsstrang eines schweren Nutzfahrzeugs beziffert werden.

Weitere Informationen: www.massiverLEICHTBAU.de

Teilprojekte

- **TP 1:** Entwicklung von höchstfesten Stählen für alternative Wärmebehandlungen und für die Kaltmassivumformung von Bauteilen im Kfz-Antriebsstrang
(P 1055 / IGF-Nr. 24 LN)
- **TP 2:** Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren
(P 1056 / IGF-Nr. 18189 N)
- **TP 3:** Leichtbau durch gezielte Einstellung lokaler Bauteileigenschaften mit optimierten Umform- und Zerspanprozessen
(P 1057 / IGF-Nr. 18225 N)
- **TP 4:** Erweiterung technologischer Grenzen bei der Massivumformung in unterschiedlichen Temperaturbereichen
(P 1058 / IGF-Nr. 18229 N)
- **TP 5:** Innovationstransfer, technische Potentialbewertung und Lebenszyklusanalyse
(P 1059 / IGF-Nr. 25 LN)
- **TP 6:** Untersuchungen zum Verbundschmieden unterschiedlicher artfremder und artgleicher Materialkombinationen
(P 1154 / IGF-Nr. 19040 N)

Die vollständigen Abschlussberichte können unter <https://shop.stahldaten.de> erworben werden.

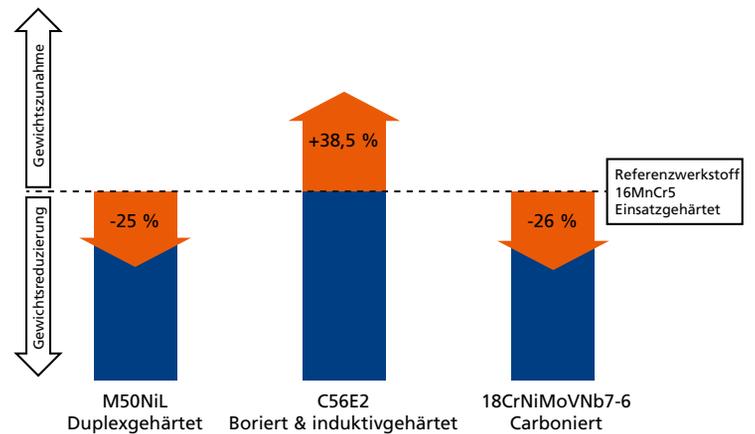
Vielfältige Lösungsansätze

Welche Potentiale der stoffliche Leichtbau in der Fertigungskette eines Zahnrades bietet, und wie sich die Leistungsdichte ggf. noch erhöhen lässt, wurde im Rahmen eines Projektes untersucht.

Das Projekt verfolgte drei Ansätze: Lösungsweg A basierte auf der Hochleistungslegierung M50NiL in Verbindung mit einer Wärmebehandlung. Lösungsweg B zielte auf eine Leistungssteigerung der Flankentragfähigkeit aufgrund einer gesteigerten Oberflächenhärte ab, die aus der Kombination des Borierens mit einer nachträglichen Randschichthärtung fußte. Beim Lösungsweg C stand die Entwicklung eines mikrolegierten Einsatzstahls auf Basis von 18CrNiMo7-6 sowie die Anpassung des Einsatzhärtens auf den neuen Stahl zur Steigerung der Zahnradtragfähigkeit im Fokus.

Lösungsweg A

Im Prozess der Niederdruckaufkohlung bei 980 °C wurden die Zahnräder ($m = 2 \text{ mm}$) aufgekohlt (C_2H_2 , 400 l/h, 4 mbar) und bei einer Temperatur von 1080 °C direkt gehärtet. Nach zweimaligem Anlassen (450 °C, 2 h) und Tiefkühlen (-196 °C) wurden die Räder zunächst an den Zahnflanken geschliffen, bevor das Plasmanitrieren bei 420 °C für 40 h (H_2/N_2 , 8 mbar, 460 V) erfolgte. Es wurde ein Kohlenstoffverlauf mit einem Randkohlenstoffgehalt von 0,73 Masse-% und einer



Relatives Leichtbaupotential in Bezug auf die realisierbare Verzahnungsbreite unter Einhaltung einer Mindest-Grübchensicherheit

$$S_{Hmin} = 1,2 \text{ und einer Mindest-Zahnfußsicherheit } S_{Fmin} = 1,4$$

Aufkohlungstiefe von ca. 0,5 mm ermittelt. Der Stickstoff konzentrierte sich im oberflächennahen Bereich (bis ca. 0,1 mm), in dem eine erhöhte Härte bis über 1000 HV_{0,05} im Bereich der Zahnradflanken bestimmt wurde.

Lösungsweg B

Das Schleifen von boriierten Zahnrädern hat zur Folge, dass die boriierte Schicht im Verhältnis zu den gemessenen Maß- und Formabweichungen zu gering ist. Deshalb wurden die Zahnräder im weichen Zustand endkonturnah geschliffen und dann boriiert. Das Randschichthärten erfolgte nach induktivem Wärmen und Polymerabschreckung. Nach dem Randschichthärten wies die Borierschicht eine Stärke von ca. 30 µm auf, die in erster Linie aus dem Eisenborid Typ Fe₂B bestand. Die Randschichthärtung führt zu einer Härte unter der boriierten Zone von etwa 750 HV₁. Im Be-

reich der Zahnflanke wurde eine intakte Boridschicht ermittelt. Darunter befand sich eine zunächst martensitische Randschicht. Mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche wuchsen die Anteile an Bainit. Die Boridschicht im Bereich der 30°-Tangente sowie im Zahngrund wies Risse auf.

Lösungsweg C

Im Lösungsweg C wurde ein mikrolegierter Einsatzstahl 18CrNiMoVNb7-6 mit verschiedenen Wärmebehandlungsparametern carbonitriert. Nach den Ergebnissen der metallo- und röntgenographischen Voruntersuchungen wurde eine Wärmebehandlung durch den projektbegleitenden Ausschuss ausgewählt. Die Ergebnisse zeigten in einer Tiefe von 100 µm C- und N-Gehalte von 0,73 Masse-% bzw. 0,30 Masse-%, eine maximale Härte von 730 HV1 und eine CHD_{550} von 0,71 mm. Das Gefüge der wärmebehandelten Proben bestand aus Martensit mit fein verteiltem Restaustenit sowie Carbiden und Nitriden.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die Bewertung des Leichtbaupotentials der neu entwickelten Werkstoff- und Wärmebehandlungskonzepte aus den Lösungswegen A, B und C erfolgte auf Basis von Tragfähigkeitsuntersuchungen an Zahnrädern, die im Bereich der Pkw-Anwendung übliche Verzahnungsgrößen hatten. Hierfür wurden Wöhlerlinien zur Zahnfußtragfähigkeit im Pulsatorprüfstand und zur Grübchentragfähigkeit im Zahnradverspannungsprüfstand ermittelt. Zum Vergleich wurde eine Referenzvariante aus dem Werkstoff 16MnCr5 im einsatzgehärteten Zustand untersucht. Es wurden Festigkeitskennwerte zur Zahnfußtragfähigkeit σ_{Flim} und Grübchentragfähigkeit σ_{Hlim} nach Norm ISO 6336 ermittelt. Die realisierbare Gewichtsreduzierung durch die Lösungswege A und C bzw. die Gewichtszunahme für den Lösungsweg B resultierten aus der Anpassung der effektiven Verzahnungsbreite bei gleichzeitiger Einhaltung der erforderlichen Zahnfußmindestsicherheit S_{Fmin} und Grübchenmindestsicherheit S_{Hmin} .



Ich simuliere mit Simufact Forming ...
... weil ich mit der benutzerfreundlichen Bedienung zuverlässige Ergebnisse erziele.



Massivumformung simulieren mit Simufact Forming

Und welche Argumente überzeugen Sie?

- ◆ Verkürzung der Entwicklungszeiten
- ◆ Vielfältige, intuitive Auswertmöglichkeiten
- ◆ Simulation und Referenzmodell vergleichen
- ◆ Vereinfachte Positionierung der Werkstücke
- ◆ Automatisierte Funktion zur Falterkennung
- ◆ Induktive Erwärmprozesse auslegen und optimieren
- ◆ Einsatzhärten simulieren



simufact
Simulating Manufacturing

MSC Software Company



Erfahren Sie mehr:
simufact.de

Eine starke Leistung

Durch Materialeinsparungen und den Einsatz hochfester Werkstoffe kann das Gewicht eines Zahnrades in Leichtbauweise deutlich reduziert werden.

Im Folgenden wird exemplarisch dargestellt, wie eine beanspruchungsgerechte Konstruktion in innovativer Mehrkomponentenbauweise möglich ist. Hierfür wird ein Zahnrad aus zwei Einzelkomponenten, einem hochbeanspruchten Zahnkranz und einem geringer beanspruchten Radkörper gefertigt. Der weniger be-

anspruchte Radkörper bietet Potentiale, das Gewicht durch leichtere Werkstoffe und andere Fertigungsverfahren zu minimieren. Auf Basis der geometrischen und prozesstechnischen Randbedingungen können die verschiedenen Geometrien konstruiert werden, z. B. ein tiefgezogener Doppel-U Radkörper.



*Tiefgezogener Radkörper
in Doppel-U Form (ohne
Zahnwelle)*

Eine durchdachte Lösung

Durch das Konstruktionsprinzip des Blechpaketierens sind Gestaltanpassungen auf der Blechebene möglich. Ein weiteres Ziel neben der Leichtbauweise ist die homo-

IHRE NUMMER EINS FÜR ANSPRUCHSVOLLE PROJEKTE

Produkte aus dem Stahlwerk Annahütte

Das kontinuierliche Streben nach Innovation und das Know-How unserer Mitarbeiter sichern unseren Erfolg. Unser Anspruch für die Zukunft ist, neue Einsatzgebiete zu erschließen und durch eine konsequente Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu expandieren. Die Einsatzmöglichkeiten von SAH Stahl sind dabei unerschöpflich und eröffnen weltweit neue Perspektiven.



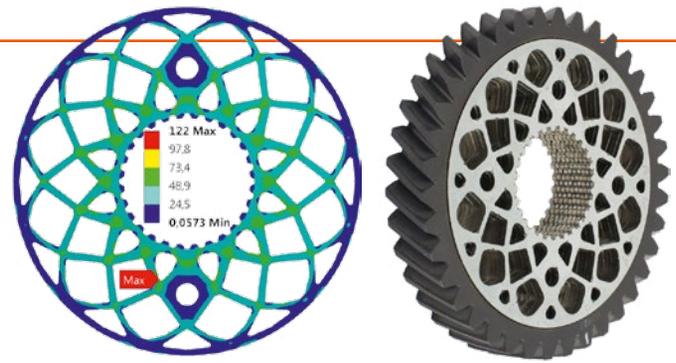
STAHL
unendlich
einsetzbar



gene Lastverteilung im Bauteil. Das Versuchswerkzeug, mit dem auch die tiefgezogenen Radkörper hergestellt werden, muss entsprechend angepasst werden. In axialer Richtung des Zahnrades ändert sich die Geometrie der Blechlagen nicht. Zur Ermittlung der geometrischen Gestalt einer Blechebene kommt ein analytisches Entwurfsverfahren nach Claus Mattheck zum Einsatz.

Erhebliche Gewichtseinsparungen

Um die Vorgabe einer kraftschlüssigen Fügeverbindung zwischen den Komponenten Zahnkranz und Radkörper direkt bei der Wärmebehandlung zu erreichen, muss das Einsatzhärten entsprechend eingestellt werden. Um den Fügeprozess effizient in die Fertigungskette zu integrieren, stehen zwei Optionen zur Verfügung: Zum einen können Zahnkränze unmittelbar nach dem Aufkohlen bzw. nach Absenken auf Härtetemperatur aus dem Ofen entnommen und auf den Radkörper gefügt



Links: Geometrie und Simulation (Ergebnisse in MPa) einer einzelnen Blechlage des blechpaketierten Radkörpers

Rechts: Zahnrad aus gehärtetem Zahnkranz mit blechpaketiertem Radkörper

werden. Eine zweite Möglichkeit ist ein auf das Härten folgender Anlassprozess. Dafür werden die Zahnkränze zunächst in einem Chargenprozess einsatzgehärtet und dann in einem Luftumwälzofen bei 180 bzw. 220 °C angelassen. Nach 1 h können die Zahnkränze aus dem Ofen entnommen und auf den Radkörper gefügt werden. Im Vergleich zum Vollkörper sind so Gewichtseinsparungen von bis zu 45 % möglich.



Wir haben innovative Lösungen für die Herausforderungen unserer Kunden

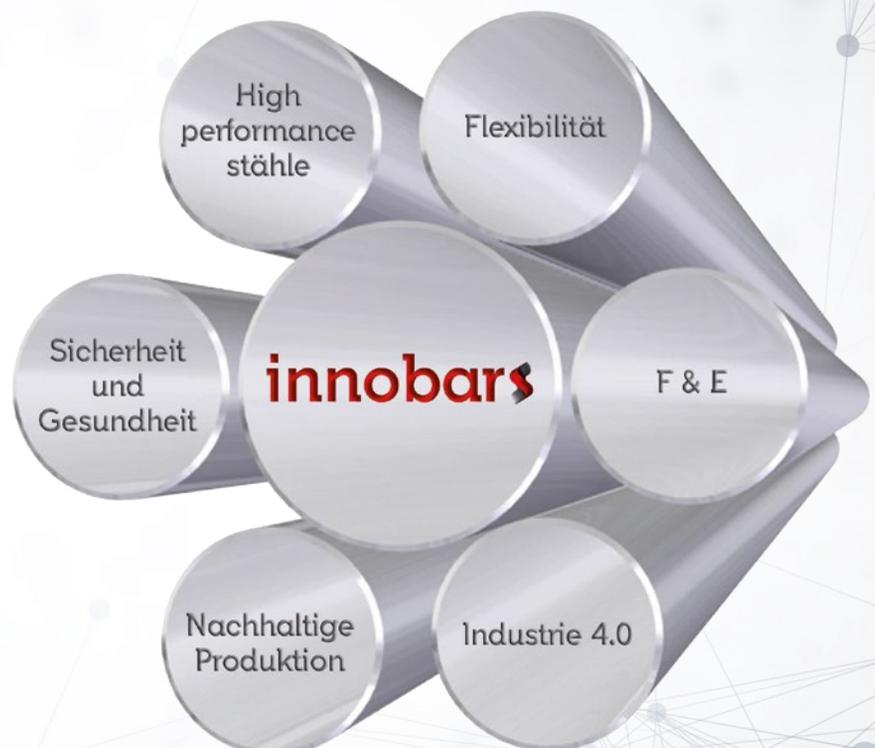
Unter dem Markennamen innobars entwickelt Sidenor höchst anspruchsvolle und innovative Produkte und Prozesse, um gemeinsam mit unseren Kunden den immer höher werdenden Anforderungen des Marktes gerecht zu werden.

Das Konzept innobars by Sidenor garantiert hierbei die Anwendung unserer ganzen Erfahrung aus mehr als 30 Jahren Forschung und Entwicklung im Bereich Edelbaustahl.

Wir sind Experten in der Entwicklung von nachhaltigen, sicheren Produkten und Prozessen für fast jeden Anwendungsbereich.

In Verbindung mit unserer nachgeschalteten Produktion auf den modernsten Anlagen unter Berücksichtigung von Industrie 4.0 in allen Bereichen wird daraus ein echter Mehrwert für Sie.

Unser Anspruch ist es unseren Kunden Entwicklungen in die Hand zu geben, die dessen Erwartungen übertreffen.



Potentiale erkennen und nutzen

Untersuchungen zum Querfließpressen in Mehrkomponentenbauweise haben gezeigt, wie gebaute Zahnräder umformtechnisch effizient gefertigt werden können.

Im Rahmen der Arbeiten wurden die Potentiale für eine Leichtbauweise untersucht. Das Ergebnis ist ein Verfahrenskonzept, das ein form- und/oder reibschlüssiges Fügen von Zahnkranz, Radkörper und Welle erlaubt. Zunächst wurden in numerischen Untersuchungen der Einfluss einer geometrischen Gestaltung des Zahnradkörpers auf Stempelkraft sowie Materialfluss geprüft und geeignete Zahnkranzinnenprofile für eine formschlüssige Kraftübertragung ermittelt. Wie sich kritische tangentielle Zugspannungen durch eine gezielte Zahnkranzvorspannung vermeiden lassen, wurde dabei berücksichtigt.

Mit Präzision zum Erfolg

Auf Basis von theoretischen Betrachtungen wurde ein Werkzeug zur Kaltumformung für eine einstufige Hydraulikpresse konstruiert. In Experimenten wurde ermittelt, welchen Einfluss die Zahnkranzinnenprofile, der Zahnradkörperwerkstoff und der Schmierstoff auf die Umformkraft haben. Während der Werkstoffeinfluss zwischen C15 und EN-AW 6082 mit den unterschiedlichen Werkstofffestigkeiten zu begründen ist, ergaben die anderen Versuchsparameter keine weiteren Einflüsse. Das Leichtbaupotential eines Bauteils zur Leistungsübertragung resultiert aus dem Gewicht und der Tragfähigkeit. Zur Prüfung der Zahnräder in



Umformgefügte Zahnräder mit dem Zahnradkörperwerkstoff EN-AW 6082 in drei verschiedenen Ausführungen

Mehrkomponentenbauweise wurden zwei Verfahren eingesetzt: Ein statischer Test ermöglichte Aussagen über das statisch maximal übertragbare Drehmoment. Außerdem wurden Laufversuche durchgeführt, die eine einsatznahe Belastung darstellen und die konkrete Nutzung des Zahnrades im Getriebe abbilden.

Überzeugende Ergebnisse

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die innovativen Leichtbaukonzepte des gebauten Zahnrades hohe statische Drehmomente übertragen. Bei den dynamischen Tests konnten die Zahnradvarianten mit Leichtbaupotential gegenüber dem Referenzzahnrad mit massivem Radkörper überzeugen. Die Schäden im Laufversuch verdeutlichen, wie das dynamisch übertragbare Drehmoment und damit auch das Leichtbaupotential der Zahnräder weiter optimiert werden kann.



Halbzeuge vor dem Fügen und gefügtes Zahnrad



Geschmiedeter Zahnkranz aus 18CrNiMoVNb7-6



Niemand behauptet, dass in Zukunft alles leichter wird. Wir schon!

Unseren Partnern in der Automobilbranche helfen wir mit der Entwicklung hochfester Werkstoffe: Diese ermöglichen **geringere Fahrzeuggewichte bei hoher Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz**. So meistern wir gemeinsam eine der wegweisenden Herausforderungen für die Mobilität der Zukunft - mit Leichtigkeit.

Innovatives Fertigungsverfahren für Kolbenbolzen

Ziel bei der Entwicklung eines neuen Kolbenbolzens war die Gewichtsreduzierung durch Optimierung des Bauteildesigns. Gleichzeitig sollten funktionale Eigenschaften, wie Festig- und Steifigkeit, bewahrt werden.

Wissenschaftliche Recherchen hatten im Vorfeld des Projektes ergeben, dass ein großes Problem bei der Produktion von Kolbenbolzen besteht, wenn diese im Leichtbaudesign realisiert und zugleich Parameter, wie eine hohe Steifigkeit, bewahrt werden sollen. Eine einfache Wanddickenreduzierung zur Gewichtsreduzierung war auszuschließen: Die Bauteilsteifigkeit würde, auch bei höherer Bauteilfestigkeit, in Bezug auf die Ovalisierung der Lagerflächen unter Betriebsbelastung negativ beeinträchtigt werden. Als mögliche Lösung kristallisierte sich ein Kolbenbolzendesign mit spiralförmiger Innengeometrie heraus.

Wie lässt sich das Bauteilgewicht konsequent verringern?

Um zu ermitteln, welchen Einfluss die Innenkonturierung auf die statische Festigkeit und Steifigkeit sowie auf das Bauteilgewicht hat, erfolgte eine Sensitivitätsanalyse. Diese ergab, dass ein Kolbenbolzen mit angepassten Parametern der spiralförmigen Innengeometrie die funktionalen Anforderungen mit einem um 4 bis 8 % reduzierten Bauteilgewicht erfüllt. Auf Basis dieser Erkenntnis wurde eine optimierte Innenkonturierung ausgelegt, die ein reduziertes Bauteilgewicht mit einer gleichbleibenden Steifigkeit kombiniert. Um eine solche Geometrie zu erzeugen, wurde ein Kaltumformprozess konzipiert und mittels numerischer Simulationen entwickelt, der auf dem Umformverfahren des „Abstreckgleitziehens“ basiert. Außerdem wurde ein Versuchswerkzeug zur Realisierung des Kaltumformprozesses angefertigt, mit dem eine Validierung der numerischen Untersuchungsergeb-

nisse durchgeführt werden konnte. Mit experimentellen Untersuchungen konnten prozessspezifische Effekte identifiziert werden, die durch eine rein numerische Betrachtung nicht erfassbar sind. Außerdem wurde untersucht, wie die Prozessparameter die Formfüllung und die Härteverteilung im Bauteil beeinflussen.

Neues Verfahren optimiert Prozesszeiten & -kosten

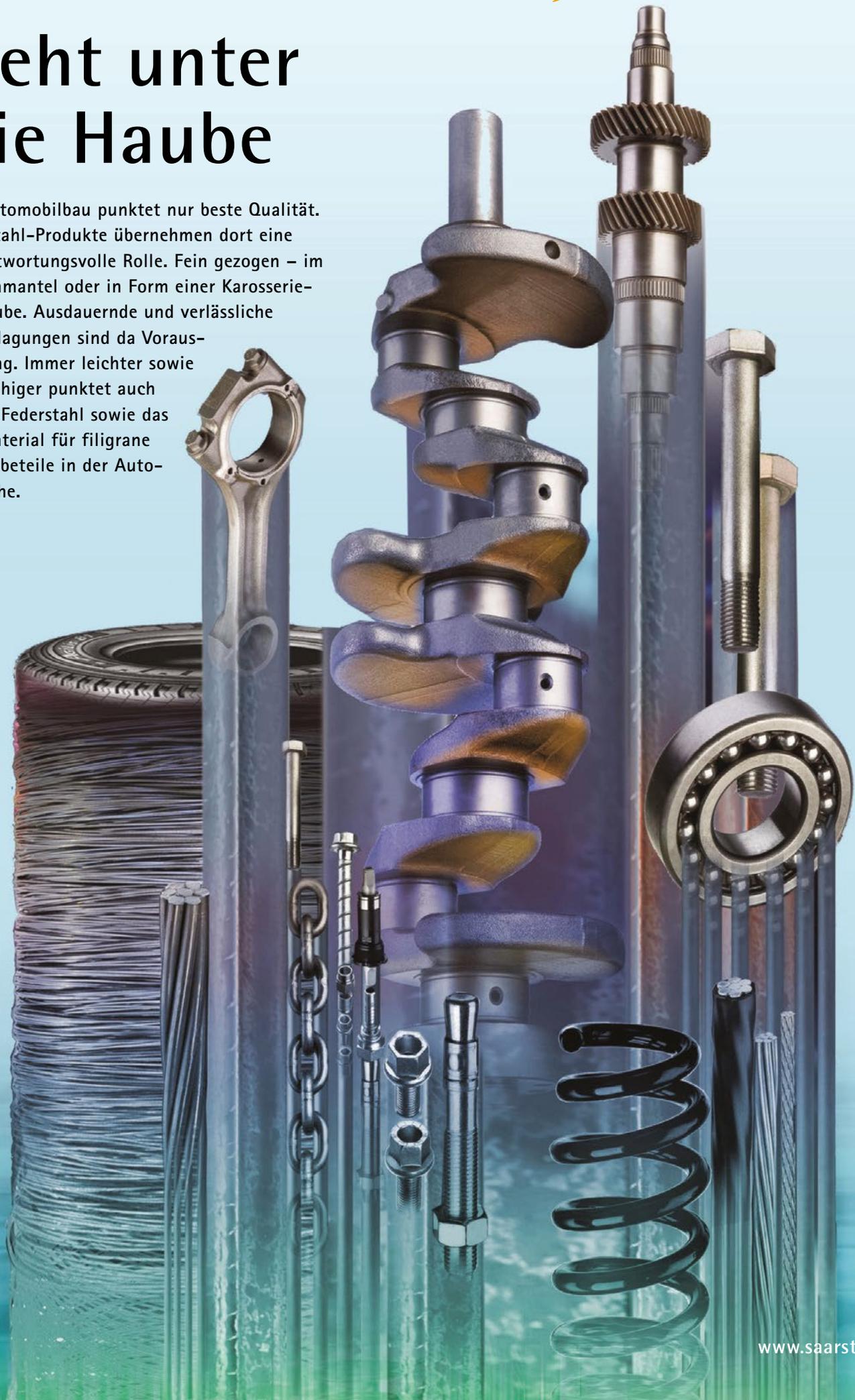
Die Untersuchungen ergaben eine Härte- und Festigkeitssteigerung von 38 % durch das Abstreckgleitziehen von weichgeglühten Näpfen. Daran anschließend erfolgte die technische und wirtschaftliche Bewertung der Fertigung von Kolbenbolzen mittels spiralförmiger Innengeometrie. Dafür wurde die im Rahmen des Projektes entwickelte Prozesskette mit der bisherigen, konventionellen Methode verglichen. Die Ergebnisse der Bewertung zeigten klar, dass durch die Anwendung der innovativen Prozesskette die Fertigungszeiten für einen Kolbenbolzen um ca. 33 % reduziert werden können. Das wirkt sich natürlich auch positiv auf die Fertigungskosten aus. Das angewandte Umformverfahren kann optimal zur Herstellung von gewichtsoptimierten hohlen, innenprofilierten Bauteilen (z. B. Gewindehülsen, Zapfwellen, Gehäuse, Schneckengetriebe etc.) verwendet werden. Dadurch lässt sich das Gewicht des Fahrzeuges insgesamt deutlich verringern.

Kolbenbolzen mit spiralförmiger Innengeometrie



Geht unter die Haube

Im Automobilbau punktet nur beste Qualität. Saarstahl-Produkte übernehmen dort eine verantwortungsvolle Rolle. Fein gezogen – im Reifenmantel oder in Form einer Karosserie-schraube. Ausdauernde und verlässliche Veranlagungen sind da Voraussetzung. Immer leichter sowie tragfähiger punktet auch unser Federstahl sowie das Vormaterial für filigrane Getriebeteile in der Auto-Branche.



Auf CAE-BASIS – Sichere Vorhersage von Bauteileigenschaften

Im Mittelpunkt der Untersuchung stand eine genaue numerische Abbildung der Prozesskette in Hinblick auf die Eigenschaften des produzierten Bauteils.

Simulation Kaltumformung

Im Bereich Kaltfließpressen wurde die Richtungsabhängigkeit der lokalen Festigkeit als Ansatzpunkt zur Abbildungsverbesserung bei der Simulation von Kaltumformprozessen identifiziert. Anhand von Realversuchen konnte der Einfluss des Bauschingereffektes am Einsatzstahl 16MnCr5FP nachgewiesen werden. Zur Steigerung der Abbildungsgüte sind verschiedene isotrop-kinematische Verfestigungsmodelle verglichen

worden, die eine Modellierung des Bauschingereffektes ermöglichen.

FE-Zerspannsimulation

Bei der Auslegung von Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen mit gezielt eingestellten Eigenschaften werden vermehrt FE-basierte Simulationssysteme eingesetzt. Dafür sind grundlegende Anpassungen der in den Simulationsprogrammen hinterlegten Werkstoff-



Simulation für die Prozesskette.



„Mit dem DoE Modul von DEFORM® kann man effektive Einflussfaktoren im Entwicklungsprozess untersuchen und Leichtbaupotentiale im Fertigungsprozess erschließen!“

Robert Meißner
IFU Stuttgart / co-founder MW-Forming

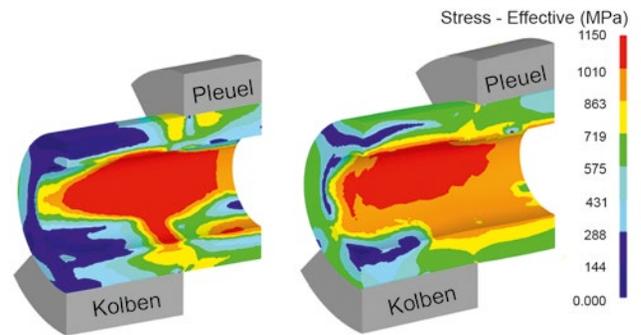


SynOpt GmbH
Industriestr. 52 – 54
70565 Stuttgart
deform@synopt.de
www.synopt.de

modelle nötig. Dies betrifft einerseits die den Modellen zugrunde liegenden Fließkurven, andererseits müssen Parameter der Werkstoffmodelle durch einen iterativen Abgleich der numerisch ermittelten, mechanischen Werkzeugbelastung mit den Messwerten experimenteller Untersuchungen identifiziert werden.

Strukturmechanische Simulation

Es wurde eine Auslegung entwickelt, welche die aus der Umformung resultierende Festigkeitssteigerung lokaler Bauteilbereiche in einer anschließenden strukturmechanischen Simulation berücksichtigt. Dabei wurde eine Kopplung zwischen der Umformsimulation (DEFORM®-3D) und strukturmechanischen Simulation (Ansys Workbench) realisiert, wobei die durch Kaltfließpressen auftretenden Verfestigungseffekte und Eigenspannungen in eine strukturmechanische Simulation übertragen wurden. Parallel wurden die



Ergebnisse der Biegebelastungssimulation eines Pleuelbolzens, links: isotropes Materialmodell; rechts: isotrop-kinematisches Materialmodell

Umformsimulationen und die strukturmechanischen Simulationsrechnungen unter Beachtung der entstandenen Verfestigungs- und Eigenspannungszustandes direkt in DEFORM®-3D durchgeführt. Weiterhin wurde die Anwendung der belastungsrichtungsabhängigen Materialeigenschaften in einer strukturmechanischen Simulation untersucht, um die lokalen Festigkeitseigenschaften der Bauteile zu bestimmen.

**LINAMAR
SEISSENSCHMIDT
FORGING**



Light. Lighter.
Lightweight Solutions.

Fertigungstechnischer Leichtbau

Getriebewellen sind dynamisch hochbelastete, bewegte Bauteile im Automobil und werden für gewöhnlich als gebaute Wellen produziert. In diesem Projekt wurde untersucht, welche Potentiale durch Kaltmassivumformung erzielt werden können.

Die großen Vorteile der Kaltmassivumformung liegen in der hohen Werkstoffausnutzung, einem ununterbrochenen Faserverlauf sowie der Kaltverfestigung des Werkstoffes und damit der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Grundwerkstoff. Ziel der Arbeiten war, die Fließpresswerkzeuge so auszulegen, dass skalierte Wellen mit lokal definierten und optimierten mechanischen Eigenschaften gefertigt werden, indem die Kaltverfestigung ausgenutzt wird. Es wurde überprüft, ob durch die Kaltverfestigung eine Reduktion des Bauteilgewichtes erfolgt oder übliche Wärmenachbehandlungen substituiert werden.

Chancen für die Zukunft

Im Rahmen der numerischen Prozessmodellierung mit FEM wurden die Prozessroute, die Werkzeuggeometrien, die Reibkoeffizienten und der Halbzeugwerkstoff variiert. In Anlehnung an die numerischen Ergebnisse wurden die optimierten Werkzeug- und Prozess-



Schematische Darstellung der Herstellung einer gebauten Getriebewelle durch Fügen eines Wellengrundkörpers und eines Ritzels

parameter realisiert und skalierte Getriebewellen aus 16MnCr5, 18CrNiMo7-6 und 100Cr6 mittels Fließpressen hergestellt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für alle drei Werkstoffe ein Anstieg der Härte zwischen $\varphi = 0,4$ und $\varphi = 1,0$ vorliegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Prozessparameter den lokalen Umformgrad und die lokale Härte deutlich beeinflussen und gut vorherzusagen sind. Eine Übertragung der Erkenntnisse auf andere Halbzeugwerkstoffe mit höherem Verfestigungspotential oder auf andere Bauteile mit geringeren Anforderungen könnte neue Potentiale für den fertigungstechnischen Leichtbau aufzeigen.

Mobilität entwickelt sich weiter – unser Stahl auch.



Mit einem Fokus auf Leichtbau-Komponenten, lassen sich mit unserem **Bainidur 1300** anspruchsvolle Schmiedeteile noch kosteneffizienter fertigen. Keine zusätzliche Wärmebehandlung, keine Nachbearbeitung – Schmiedeteile in konstant hoher Qualität. Unser Stahl für die Zukunft.

www.dew-stahl.com



Sichere Prozesse im Fokus

Wie sich hybride Leichtbauteile durch massivumformtechnisches Verbundschmieden zuverlässig herstellen lassen, wurde am Beispiel der Fertigung einer hybriden Radnabe untersucht.

Die Warmmassivumformung ist ein Verfahren, mit dem hybride Leichtbauteile aus mehreren Werkstoffen effizient hergestellt werden können. Beim Verbundschmieden können Bauteile aus mehreren Werkstoffen durch Kombination von „Formgebung“ und „Fügen“ hergestellt werden. Dieser Thematik wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens zur Herstellung hybrider Radnaben nachgegangen. Es wurden Stahl-Aluminium Radnaben aus den Werkstoffen C60 und EN AW 6182 und Stahl-Stahl Radnaben aus den Vergütungsstählen 30CrNiMo8 und C60 hergestellt. Das Design der Hybridbauteile wurde so konzipiert, dass es dem Belastungskollektiv des industriellen Bauteiles entspricht.

Zuverlässigkeit entscheidet

Nachdem die Halbzeuge auf die Umformtemperatur erwärmt worden waren, wurden sie manuell in das Werkzeugsystem eingelegt und durch das einstufige Verbundschmieden hybride Radnaben sowie Monoradnaben hergestellt. Es konnte bei der artfremden Materialkombination eine stoffschlüssige Verbindung durch intermetallische Phasen vom Typ Fe₂Al₅ nachgewiesen werden. Diese zeigten eine Härte von 1.050 bis 1.200 HV und ein sprödes Materialverhalten. Es wurde eine maximale Phasensaumdicke von 16,33 µm gemessen. Da der Grenzwert von 10 µm überschritten wurde, war eine reduzierte Bauteilfestigkeit der Stahl-Aluminium Radnabe zu erwarten.

Push-Out-Tests schaffen Klarheit

Für die artgleiche Materialkombination wurden aufgrund von Diffusionsvorgängen stoffschlüssige Phasen in der Fügezone zwischen C60 und 30CrNiMo8 festgestellt. Die mechanischen Eigenschaften der hybriden Radnaben wurden mittels Push-Out Tests analysiert. Diese ergaben ein hohes mechanisches Potential bei den vollflächig gefügten Stahl-Stahl Proben, da eine Trennung des Werkstoffverbunds aufgrund seiner hohen Festigkeit nicht realisiert werden konnte. Somit werden durch das Verbundschmieden unterschiedlicher Werkstoffe gezielt Bauteileigenschaften eingestellt und ein effizienter Leichtbau ermöglicht.



Verbundschmieden



Erwärmung im Schmelzofen



Stahl-Aluminium Radnabe

Ablauf zum Verbundschmieden hybrider Radnaben

185 JAHRE*

*185 Jahre Unternehmensgeschichte machen uns zum erfahrensten deutschen Schmierstoffhersteller. Gleichzeitig gehören wir zu den modernsten Anbietern weltweit. Gleitlacksysteme mit Mikrokapseltechnologie, phosphatfreie Beschichtungen und wasserbasierte Schmierstoffsysteme stehen beispielhaft für unsere hochinnovativen Produkte.

BECHEM – Schmierstofflösungen für die Industrie.

BECHEM
LUBRICATION
TECHNOLOGY

Abbau von Innovationshemmnissen und weiterführende Leichtbaupotentiale

Auf Basis von Expertenbefragungen wurde die Funktionsweise des Innovationsystems untersucht, um mögliche Hemmnisse zu identifizieren und weitere Potentiale aufzuzeigen.



Innovationshemmnisse, die die Nutzung neuer Bauteilpotentiale behindern

Obgleich das Interesse am Leichtbau groß ist, gibt es noch immer zahlreiche Innovationshemmnisse. So stellt sich für viele z. B. die Frage nach der Nutzen-Kosten-Relation des Massiven Leichtbaus und die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten. Darüber hinaus ist fraglich, wie der Umgang mit neuen Materialien und Bearbeitungsmöglichkeiten konkret erfolgen soll, und welche Investitionskosten entstehen. Weitere Innovationshemmnisse resultieren aus mangelndem Wissen.

Wissen schafft Vertrauen

Durch Analysen des Antriebsstranges und des Fahrwerkes im Rahmen einer technischen Potentialbewertung lässt sich der Einfluss einer primären Gewichtsreduktion auf den Energieverbrauch und die Fahrsicherheit klar ermitteln. In einem weiteren Schritt kann dann eine quantitative Bestimmung der sekundären Gewichtsreduktion erfolgen. Um klare Aussagen treffen zu können, wurden daher Simulationsmodelle aufgebaut. Das Referenzmo-

dell entsprach einem Mittelklassefahrzeug mit Allradantrieb. Im Leichtbaumodell wurden die in der „Industrieinitiative Massiver Leichtbau“ entwickelten Maßnahmen abgebildet. Schließlich wurden Fahrmanöver definiert, die eine Veränderung von Fahrsicherheit und Fahrkomfort durch die primäre Gewichtsreduktion zeigen, wobei sich insbesondere auf die Fahrdynamik ein positiver Einfluss zeigte. Durch die primäre Massenreduktion wurden Potentiale für eine sekundäre Gewichtseinsparung möglich, da sich die Anforderungen von strukturellen und funktionalen Komponenten im Fahrzeug aufgrund der geringeren Fahrzeugmasse reduzieren und sie daher kleiner dimensioniert werden können.

Sekundäres Leichtbaupotential

Im Rahmen der Untersuchung wurde das sekundäre Gewichtseinsparpotential von Kraftfahrzeugen am o. g. Beispielfahrzeug bestimmt. Hierbei wurden drei unterschiedliche, sich ergänzende Ansätze verfolgt: Ein analytischer, ein empirischer sowie ein dritter Ansatz, der auf dynamischen Crash-Simulationen basiert. Zur Abschätzung des maximalen Potentials der sekundären Gewichtseinsparung, wurde die Berechnung in mehreren Iterationen durchgeführt. Hierbei ging die jeweils vorhergehende Gewichtsreduktion als Eingangsgröße in die folgende Iteration ein. In der Untersuchung zeigte sich, dass nach der dritten Iteration keine weiteren signifikanten Reduktionen mehr möglich sind. Die Gewichtseinsparungen der drei Iterationen (15,06 kg, 5,25 kg, 0,89 kg) führten zu einer sekundären Gesamt-reduktion von 21,20 kg. Dieser Wert entspricht ca. 50 % der primären Gewichtsreduktion.

Achieving more together

From 2015 to 2018, the “Lightweight Forging” research network worked across six sub-projects on the use of new lightweight construction capabilities for drive trains and chassis. The network was founded by the research associations FOSTA, AWT, FVA and FSV. Within the sub-projects, the areas of materials development, design, manufacturing and innovation management involved in the supply chain were to be linked with one another. In addition to a consideration of the life cycle, the following factors played a role here: resource efficiency, CO₂ footprint, the identification of obstacles to innovation due to insufficient knowledge transfer, and a low preparedness to use new technologies in a process chain with divided responsibilities. The primary focus of the studies, however, was the development of novel material concepts and manufacturing techniques. The research network emerged from the “Lightweight Forging Initiative” founded in 2013, and formed a fourth pillar alongside three other industry-supported projects that were being conducted. Since 2013, a total of

54 steel producing and forging companies had joined forces in this network. The aim of this globally unique initiative was to achieve weight savings in passenger cars and commercial vehicles using innovative steel components. In Phase I (2013/14), a medium-sized passenger car was analysed and the potential for lightweight construction of forged components identified. A savings potential of 42 kg was determined in the drive train and chassis. The initiative entered Phase II in 2015 and carried out tests on a light commercial vehicle up to 3.5 tonnes. A lightweight construction potential of 99 kg was to be assessed. Phase III began in 2017 at the international level with 39 companies from the US, Japan and Western Europe. Here, lightweight construction potential in the drive train and chassis of a hybrid passenger car and in the transmission of a conventional truck was examined: The lightweight construction potential was estimated at 93 kg in the drive train and chassis of a hybrid car and 124 kg in the drive train of a heavy commercial vehicle. [For more information, go to: www.lightweightforging.com](http://www.lightweightforging.com)

Danksagung

Der Forschungsverbund „Massiver Leichtbau – Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für massivumgeformte Bauteile der Automobiltechnik“ ist 2015 entstanden aus dem Ideenwettbewerb „Leittechnologien für KMU“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin und der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF), Köln. Ziel war es, mithilfe neuer Stahlwerkstoffe sowie Bauteilkonstruktionen und Fertigungsmethoden den Antriebsstrang von Automobilen – vom Motor über das Getriebe bis zu den Radlagerungen – noch leichter zu

machen und trotzdem höchste Lebensdauernerwartungen zu erfüllen. An insgesamt 6 Teilprojekten waren zehn Forschungseinrichtungen aus fünf Bundesländern beteiligt.

Die IGF-Vorhaben 24 LN, 25 LN, 18189 N, 18225 N, 18229 N, 19040 N der FOSTA zusammen mit AWT, FVA und FSV wurden über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Alle Beteiligten danken für die Förderung sehr herzlich.

FORSCHUNGSVERBUND

massiverLEICHTBAU

**Forschungsvereinigung
Stahlanwendung e. V.**

Sohnstraße 65
40237 Düsseldorf

Tel.: +49 211 6707- 856
Fax: +49 211 6707- 840

fosta@stahlforschung.de
www.stahlforschung.de

www.massiverLEICHTBAU.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages