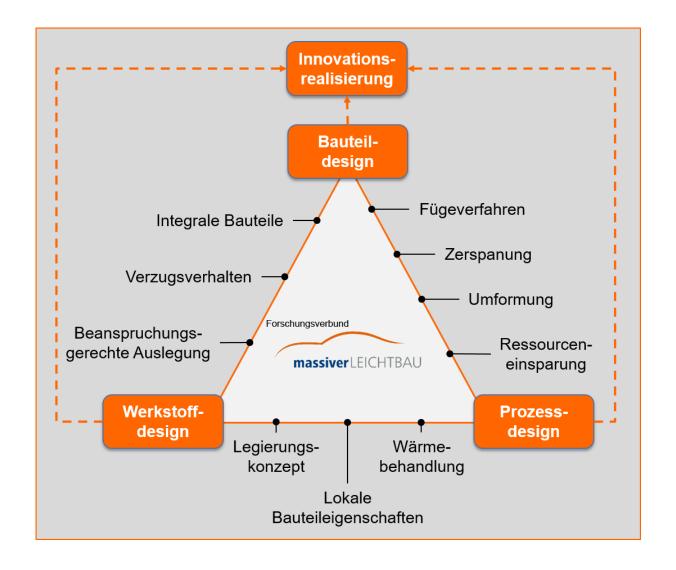
Abschlussveranstaltung des Forschungsverbundes "Massiver Leichtbau - Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für massivumgeformte Bauteile der Automobiltechnik"



11. Oktober 2018 in Düsseldorf



Inhalt

Agenda der Abschlussveranstaltung	5
Forschungsverbund "Massiver Leichtbau"	7
Hochleistungszahnrad	9
Zahnräder in Blechbauweisen	14
Umformtechnisch hergestelltes Zahnrad	18
Kolbenbolzen	22
CAE-basierte Vorhersage von Bauteileigenschaften	24
Getriebewelle	28
Hybride Radnabe	32
Innovationstransfer	34
Kartellrechtshinweise	38
Notizen	39
Danksagung	40

Agenda der Abschlussveranstaltung

10:00 Begrüßung

Dr.-Ing. Hans-Joachim Wieland, FOSTA e. V., Düsseldorf Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch , Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen

Grußworte

Werner Loscheider, Leiter Referat IVB4 Bauwirtschaft, Ressourceneffizienz und Leichtbau, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin Dr. Thomas Kathöfer, Hauptgeschäftsführer der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto-von-Guericke" e. V. (AiF), Köln

10:35 Motivation zum massiven Leichtbau

Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt, Hirschvogel Automotive Group, Denklingen

10:45 Forschungsverbund "Massiver Leichtbau"

Motivation und Zielrichtung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen

11:00 Hochleistungszahnrad

Einführung und Motivation, Werkstoffkonzepte, Baukonzept, Wärmebehandlungskonzepte, Zahnkranzherstellung, Prüfung, Bauteileigenschaften

Clemens Neipp, M. Sc., Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK), RWTH Aachen; Dr.-Ing. Holger Surm, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen; Dr.-Ing. Michael Otto, Christian Weber, M. Sc., Technische Universität München, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG)

11:45 Zahnräder in Blechbauweisen

Gebautes Zahnrad aus Blech, Prüfung und Bauteileigenschaften

Dipl.-Ing. Tim Benkert, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg); Dipl.-Ing. Dawid Nadolski, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen

12:15 Pause

13:00 Umformtechnisch hergestelltes Zahnrad

Einführung, Umformtechnik, Werkstoffkonzepte, Prüfung und Bauteileigenschaften

Robert Meißner, M. Sc., Universität Stuttgart,Institut für Umformtechnik (IFU); Christoph Leonhardt, M.Sc., Technische Universität München, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG); Dipl.-Ing. Julian Diefenbach, Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

13:50 Kolbenbolzen

Einführung und Motivation, Herstellung, Prüfung

Dipl.-Ing. Nadja Missal, Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU)

14:20 Pause



14:35 CAE-basierte Vorhersage von Bauteileigenschaften

Werkstoffmodellierung, Zerspanungssimulation, Umformsimulation, strukturmechanische Simulation

Felix Kolpak, M.Sc., Technische Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL); Dipl.-Ing. Florian Vogel, Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung (ISF); Dipl.-Ing. Nadja Missal, Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU)

15:30 Getriebewelle

Einführung und Motivation, Numerische Werkzeugauslegung, Prüfung und Bauteileigenschaften, Oberflächenbearbeitung

Felix Kolpak, M.Sc., Technische Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL)

16:00 Hybride Radnabe

Einführung und Konzept, Verbundgestaltung, Eigenschaften

Dipl.-Ing. Julian Diefenbach, Philipp Kuwert, M. Eng., Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

16:30 Innovationstransfer

Technische Potenzialbewertung, Lebenszyklusanalyse

Dr. Michael Rothgang, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Essen; Alexander Busse, M.Sc., RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge (ika)

17:10 Schlussworte

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen



Forschungsverbund "Massiver Leichtbau"

Motivation und Zielrichtung

Prof. Dr.-Ing. Hans-Werner Zoch, Dr.-Ing. Rainer Tinscher, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen; Michael Rothgang, RWI - Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung e. V., Essen

Wesentliche Zielgrößen aktueller und zukünftiger Entwicklungen im Fahrzeugbau sind die Reduzierung des Verbrauchs und damit der CO2-Emissionen. Eine Schlüsseltechnologie stellt hierbei der Leichtbau dar, der auch für die Elektromobilität eine hohe Bedeutung hat, um hohe Gewichte der Energiespeichersysteme kompensieren zu können. Ein revolutionärer Schritt, das Gewicht damaliger Fahrzeugkarosserien zu verringern, war in den 1990er Jahren die Vorstellung eines ersten Serienfahrzeugs mit Ganz-Aluminium-Karosserie. Diese Technologie löste im Wettbewerb der Werkstoffe nachfolgend eine ganze Reihe von Entwicklungsprojekten aus, als deren Ergebnis moderne, hochfeste und gut herstellbare Stahlkarosserien mit mindestens gleichwertigem Leichtbaupotenzial im Vergleich zu Aluminium resultierten.



Abb. 1: Leichtbauzahnrad aus gehärtetem Zahnkranz mit Leichtbau-Nabe aus gelochtem Blechpaket

Diese Erfolge setzten sich bisher jedoch nicht im gleichen Maße bei anderen Komponenten eines Fahrzeugs wie dem Antriebsstrang fort, dessen Herstellung, hier Innovationen erschwerend, stark arbeitsteilig auf verschiedene Unternehmen und Branchen aufgeteilt erfolgt. Eine Initiative der deutschen Massivumform-Unternehmen und Stahlhersteller (www.massiverleichtbau.de) griff im Jahr 2013 (Phase I) diese Aufgabenstellung auf und demonstrierte erste nennenswerte Potenziale zur Gewichtsreduzierung unter Anwendung bekannter Werkstoffe und Verfahren. Darauf aufbauend widmen sich seit 2015 in dem Forschungsverbund "Massiver Leichtbau - Innovationsnetzwerk für Technologiefortschritt in Bauteil-, Prozess- und Werkstoff-Design für massivumgeformte Bauteile der Automobiltechnik" 10 Institute und über 60 Unternehmen der Nutzung gänzlich neuer Leichtbaupotenziale im Antriebsstrang bzw. Fahrwerk



und verbinden hierbei interdisziplinär die an der gesamten Zulieferkette beteiligten Fachgebiete Konstruktion, Werkstoff, Fertigung und Innovationsmanagement.

Die Ergebnisse des Forschungsverbundes zeigen Wege auf, wie mithilfe neuer Stahlwerkstoffe sowie Bauteilkonstruktionen und Fertigungsmethoden auch der sog. Antriebsstrang von Automobilen - vom Motor über das Getriebe bis zu den Radlagerungen - noch leichter gemacht werden kann, wobei gleichzeitig höchste Lebensdauererwartungen erfüllt werden können (Abb. 1). Hierzu wurde in insgesamt 6 Teilprojekten von der Legierungsentwicklung, der Wärmebehandlung, den Mehrkomponentenverfahren über die Massivumformung bis zum Technologietransfer die gesamte Wertschöpfungskette hinsichtlich Leichtbaupotenzial analysiert und optimiert. Erstmalig wird auch in einem derartigen Großprojekt eine umfangreiche wissenschaftliche Analyse zu den Innovationshemmnissen durchgeführt, die zeigt, dass in einer sehr stark arbeitsteiligen Prozesskette ein verbesserungsfähiger Wissenstransfer die noch unzureichende unternehmensstrategische Priorisierung des Themas Leichtbau sowie unternehmensinterne Strukturen und Prozesse an vielen Stellen die Umsetzung von Leichtbauinnovationen behindern.













Hochleistungszahnrad

Einführung und Motivation, Werkstoffkonzepte, Baukonzept, Wärmebehandlungskonzepte, Zahnkranzherstellung, Prüfung, Bauteileigenschaften

Clemens Neipp, M. Sc., Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK), RWTH Aachen; Dr.-Ing. Holger Surm, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen; Dr.-Ing. Michael Otto, Christian Weber, M. Sc., Technische Universität München, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG)

Zielsetzung

Im Rahmen des Teilprojektes 1 (IGF-Vorhaben 24 LN) wurden Möglichkeiten des "Stofflichen Leichtbaus" in der Prozesskette Zahnrad abgebildet. In verschiedenen Lösungswegen wurde dabei das Leichtbaupotenzial durch eine Erhöhung der Leistungsdichte untersucht:

Lösungsweg A: Einsatz einer Hochleistungslegierung M50NiL in Verbindung mit einer Wärmebehandlung bestehend aus einem Einsatzhärten (Aufkohlen) mit anschließendem mehrfachen Anlassen und Tiefkühlen sowie einem Plasmanitrieren zur weiteren Erhöhung der Randschichthärte und zum Einbringen erhöhter Druckeigenspannungen.

Lösungsweg B: Leistungssteigerung der Flankentragfähigkeit aufgrund einer gesteigerten Oberflächenhärte durch die Kombination des Borierens mit einer nachträglichen Randschichthärtung. Es wurde ein herkömmlicher Vergütungsstahl C56E2 verwendet.

Lösungsweg C: Entwicklung eines mikrolegierten Einsatzstahls auf Basis des Stahls 18CrNiMo7-6 und Anpassung des Einsatzhärtens (Carbonitrieren) auf den neuen Stahl zur Steigerung der Zahnradtragfähigkeit.

Ergebnisse aus dem Lösungsweg A

In einem Niederdruckaufkohlung bei 980 °C wurden die Zahnräder (m=2 mm) aufgekohlt (C2H2, 400 l/h, 4 mbar) und von einer Temperatur von 1080 °C direkt gehärtet. Nach einem zweimaligen 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 (H2/N2, 8 mbar, 460 V) durchgeführt wurde.

Das Ergebnis der Wärmebehandlung ist in den folgenden Diagrammen und Bildern dokumentiert: Es wurde ein typischer Kohlenstoffverlauf mit einem Randkohlenstoffgehalt von 0,73 Masse-% und einer Aufkohlungstiefe von ca. 0,5 mm eingestellt. Der Stickstoff kon-zentriert sich im oberflächennahen Bereich (bis ca. 0,1 mm), in dem eine erhöhte Härte bis über 1000 HV0,05 im Bereich der Zahnradflanken bestimmt wird (in Abb. 1). Die Härtesteige-rung an der 30°-Tangente fiel dagegen deutlich geringer aus.

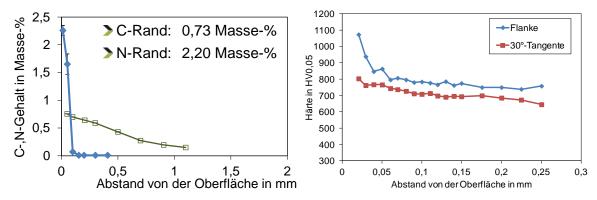


Abb. 1: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf nach dem Einsatzhärten und Plasmanitrieren (links) mit den entsprechenden Härteverläufen (rechts)













Der Grund kann aus den Schliffbildern in Abb. 2 abgeleitet werden: In der Übersicht kann die gleichmäßig einsatzgehärtete Randschicht entlang der gesamten Kontur entnommen werden. Die dünne Nitrierschicht kann dagegen nur erahnt werden. In dem im Bild markierten Bereich ist aber ein Wechsel im Anätzverhalten zu identifizieren. Es ist davon auszugehen, dass in diesem Bereich nur eine geringe bzw. keine Nitrierwirkung zu verzeichnen ist, so dass es zu keiner Härtesteigerung gekommen ist.

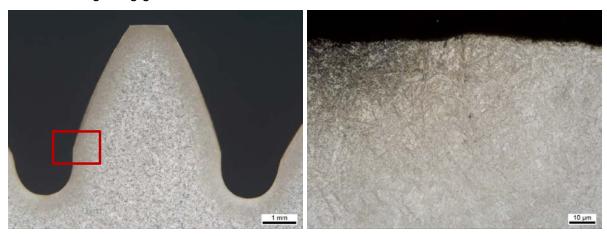


Abb. 2: Mikrostruktur nach dem Einsatzhärten und Plasmanitrieren: Übersicht Zahn (links), im Bereich des rot markierten Feldes (rechts)

Ergebnisse aus dem Lösungsweg B

In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass das Schleifen von borierten Zahnrädern prinzipiell möglich ist. Einschränkungen ergaben sich aber daraus, dass die borierte Schicht im Verhältnis zu den gemessenen Maß- und Formabweichungen zu gering ist, so dass nach dem Schleifen lokal keine bzw. nur eine geringe borierte Zone mehr vorhanden ist. Deshalb wurden die Zahnräder schon im weichen Zustand endkonturnah geschliffen. Die Zahnräder wurden danach boriert. Das Randschichthärten erfolgte nach einem induktiven Wärmen und einer Polymerabschreckung.

Der Zustand nach dem Randschichthärten bildet sich wie folgt ab: Es liegt eine Borierschicht mit einer ungefähren Stärke von 30 µm vor, die in erster Linie aus dem Eisenborid des Typs Fe2B besteht. Die Randschichthärtung führt zu einer Härte unter der borierten Zone von etwa 750 HV1. Im Bereich der 30°-Tangente wurde eine SHD von 0,51 mm erzielt.

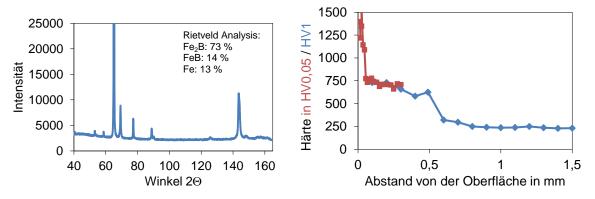


Abb. 3: Röntgenbeugungsdiagramm und Härteverlauf an der 30°-Tangente der borierten Randschicht













Im Bereich der Zahnflanke wird eine intakte Boridschicht vorgefunden. Darunter liegt eine zunächst rein martensitische Randschicht, mit zunehmenden Abstand von der Oberfläche erhöhen sich die Anteile an Bainit. Die Boridschicht im Bereich der 30°-Tangente sowie im Zahngrund ist durch Risse gekennzeichnet, die bei allen untersuchten Parametervarianten vorgefunden wurden. Drunter liegt wiederum die gehärtete Randschicht mit ihrer charakteristischen Änderung der Gefügebestandteile.

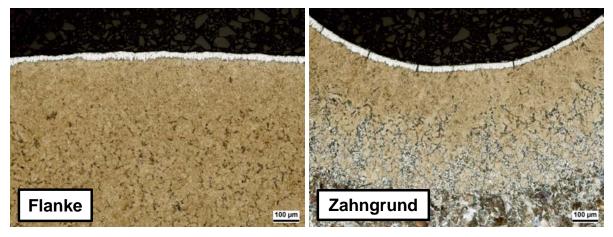


Abb. 4: Mikrostruktur nach dem Borieren und Randschichthärten im Bereich der Zahnflanke (links) und des Zahngrunds (rechts)

Ergebnisse aus dem 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 Wärmebehandlungsvariante durch den projektbegleitenden Ausschuss ausgewählt. Die Ergebnisse zeigten in einer Tiefe von 100 μ m C- und N-Gehalte von 0,73 Masse-% bzw. 0,30 Masse-%, eine maximale Härte von 730 HV1 und eine CHD₅₅₀ von 0,71 mm, graphisch dargestellt in Abb. 5.

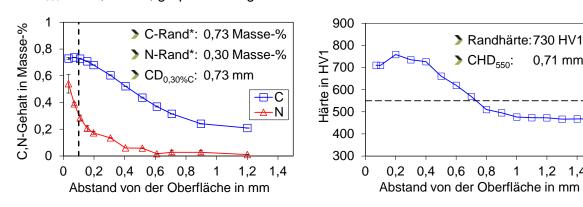


Abb. 5: Kohlenstoff- und Stickstoffverlauf nach dem Carbonitrieren und mit dem entsprechenden Härteverlauf (Begleitprobe)

Das Gefüge der wärmebehandelten Proben besteht aus Martensit mit fein verteiltem Restaustenit sowie Carbiden und Nitriden. Lichtmikroskpische Aufnahmen nach unterschiedlichen Ätzungen sind in Abb. 6 zu sehen.

Durch einen Industriepartner wurde anschließend eine Pilotschmelze erstellt und das so erzeugte Material mit den gewählten Parametern wärmebehandelt und einer intensiveren mechanischen und mikroskopischen Prüfung unterzogen. Elektronenmikroskopisch wurden vorallem













die Bestandteile der Randschicht betrachtet. Auszüge der Ergebnisse der Untersuchun-gen durch TEM und EBSD sind in Abb. 7 abgebildet.

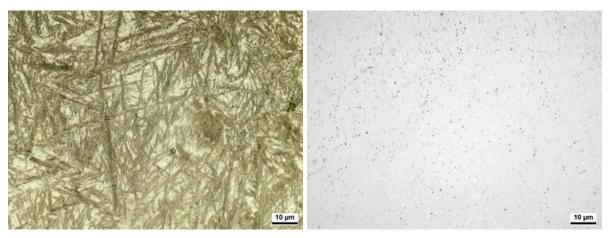


Abb. 6: Mikrostruktur nach dem Carbonitrieren (Randschicht in einem Abstand von 100 μm): Ätzung Nital (links), Murakami (rechts)

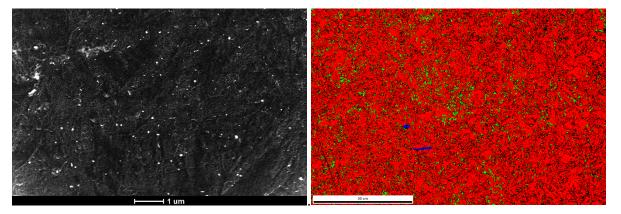


Abb. 7: Ergebnisse der elektronenmikroskopischen Untersuchung der Randschicht, links: TEM-Aufnahme eines Extraktionsabdrucks, Carbonitride erscheinen weiß; rechts: EBSD-Aufnahme des Gefüges, Martensit rot, Restaustenit grün, MnS blau eingefärbt

Bewertung des Leichtbaupotenzials

Die Bewertung des Leichtbaupotenzials der neu entwickelten Werkstoff- und Wärmebehandlungskonzepte aus den Lösungswegen A, B und C erfolgt anhand von Tragfähigkeitsuntersuchungen an Zahnrädern mit im Bereich der Pkw-Anwendung üblichen Verzahnungsgrößen. Hierfür wurden Wöhlerlinien zur Zahnfußtragfähigkeit im Pulsatorprüfstand und zur Grübchentragfähigkeit im FZG-Zahnradverspannungsprüfstand ermittelt. Zusätzlich wurde für eine vergleichende Beurteilung eine Referenzvariante aus dem Werkstoff 16MnCr5 im einsatzgehärteten Zustand untersucht. Auf Basis der Ergebnisse dieser Wöhlerversuche wurden Festigkeitskennwerte zur Zahnfußtragfähigkeit σ_{Flim} und Grübchentragfähigkeit σ_{Hlim} nach Norm ISO 6336 ermittelt. In Abb. 8 ist das jeweilige Leichbaupotenzial der unterschiedlichen Lösungswege A, B und C in Bezug auf die einsatzgehärtete Referenzvariante dargestellt. Die realisierbare Gewichtsreduzierung für die Lösungswege A und C bzw. die notwendige Gewichtszunahme für den Lösungsweg B ergibt sich hierbei durch eine Anpassung der effektiven Verzahnungsbreite unter der Randbedingung der Einhaltung einer erforderlichen Zahnfuß-Mindestsicherheit S_{Fmin} und Grübchen-Mindestsicherheit S_{Hmin}.













Bei dem hier dargestellten Ergebnis gilt es für den Lösungsweg B zu beachten, dass aufgrund der bei der gewählten Verzahnungsgeometrie auftretenden Risse in der Boridschicht im Zahnfußgrund keine ausreichende Zahnfußtragfähigkeit erzielt werden konnte.

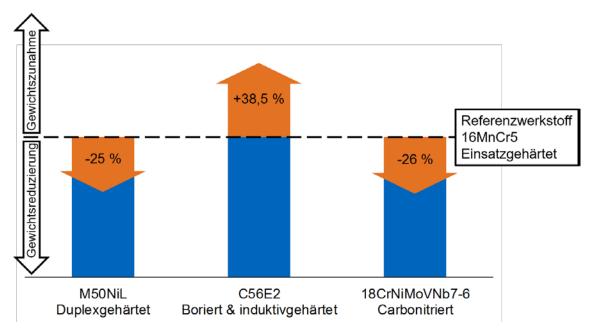


Abb. 8: Relatives Leichtbaupotential in Bezug auf die realisierbare Verzahnungsbreite unter Einhaltung einer Mindest-Grübchensicherheit $S_{Hmin} = 1,2$ und einer Mindest-Zahnfußsicherheit $S_{Fmin} = 1,4$

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus den IGF-Vorhaben 24 LN "Entwicklung von höchstfesten Stählen für alternative Wärmebehandlungen und für die Kaltmassivumformung von Bauteilen im Kfz-Antriebsstrang" und Nr. 18189 N "Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren".





Zahnräder in Blechbauweisen

Gebautes Zahnrad aus Blech, Prüfung und Bauteileigenschaften

Dipl.-Ing. Tim Benkert, Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg); Dipl.-Ing. Dawid Nadolski, Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien (IWT), Bremen

Durch intelligenten Leichtbau kann das Gewicht eines Zahnrades durch Materialeinsparung an geringer belasteten Bereichen und durch die Verwendung von hochfesten Werkstoffen reduziert und die Leistungsdichte damit erhöht werden. Das Ziel einer beanspruchungsgerechten Konstruktion soll durch eine innovative Mehrkomponentenbauweise dargestellt werden. Dabei wird das Zahnrad aus zwei Einzelkomponenten, einem hochbeanspruchten Zahnkranz und einem geringer beanspruchten Radkörper, gefertigt (Abb. 1). Der Radkörper bietet als geringer belastetes Bauteil ein Gewichtseinsparungspotenzial und kann durch die Verwendung anderer Werkstoffe und Fertigungsverfahren optimiert werden. Als Zielgröße für den Neuentwurf des Zahnrades ist eine Gewichtsreduzierung auf 75 % des Referenzgewichtes vorgegeben. Im Folgenden werden zunächst die Radkörper und anschließend die Herstellung des Zahnkranzes sowie das Fügen vorgestellt. Radkörper in Blechbauweise sind durch zwei Verfahren herzustellen. Zum einen durch Blechumformung mittels Tiefziehen und zum anderen durch Blechpaketieren. Die Randbedingungen für den Entwurf eines Radkörpers, vorgegeben durch die Geometrie des Zahnkranzes, zeigt Abb. 1. Die drei dargestellten Radkörperformen sind prinzipiell die einzig möglichen, die sich mittels Tiefziehen herstellen lassen.

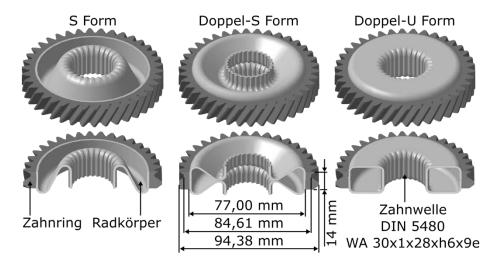


Abb. 1: Die drei Varianten des umgeformten Radkörpers, welche in die Untersuchungen eingegangen sind.

Aus den geometrischen sowie prozesstechnischen Randbedingungen und dem Leichtbauziel, lassen sich die Geometrien der Radkörpervarianten bereits konstruieren. Lediglich die Blechdicke ist noch festzulegen, um die Konstruktion zu finalisieren. Eine Gewichtsbetrachtung liefert 1,5 mm als geeignete Blechdicke. Damit sind die drei Varianten des tiefgezogenen Radkörpers festgelegt. Im Forschungsprojekt wird nur eine Variante gefertigt, weshalb aus den vorliegenden Möglichkeiten eine auszuwählen ist. Mittels Simulation wird das Verformungsverhalten von Zahnrädern mit den drei verschiedenen Radkörpervarianten untersucht und der Radkörper mit dem günstigsten Verhältnis von Gewicht zu Steifigkeit ausgewählt. Dies ist der Radkörper mit Doppel-U Form. In einem Versuchswerkzeug des Lehrstuhls für Umformtechnik







Abb. 2: Tiefgezogener Radkörper ohne Zahnwelle, im Nachgang drahterodiert

und Gießereiwesen erfolgt die Fertigung der Versuchsteile (Abb. 2), welche anschließend ans IWT in Bremen geschickt und dort mit dem Zahnkranz gefügt werden (s.u.).

Das Vorgehen zur Entwicklung der Geometrie des blechpaketierten Radkörpers unterscheidet sich grundlegend von der oben beschriebenen des tiefgezogenen. Durch das Konstruktionsprinzip des Blechpaketierens, sind lediglich Gestaltanpassungen in der Blechebene möglich. 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 Matt-

heck zum Einsatz. Die Methodik des Torsionsankers lässt sich ohne Anpassungen verwenden. Dabei wird mittels Papier und Stift zwischen einer angreifenden Kraft (Zahnkräfte) und einem Torsionsanker (Zahnwelle) eine Verbindung entwickelt, die bei genügend hoher Genauigkeit in der Kreisevolvente mündet. Durch Überlagerung mehrerer Evolventen, ergibt sich die in Abb. 3 gezeigte Geometrie. Die Farben verdeutlichen die unter Belastung herrschenden Spannungen in einer einzelnen Blechlage. Neben dem Leichtbauziel ist hier eine möglichst homogene Lastverteilung im Bauteil angestrebt und erreicht worden. Das Versuchswerkzeug mit dem auch die tiefgezogenen Radkörper hergestellt worden sind, ist zur Fertigung der Blechlagen des blechpaketierten Radkörpers lediglich anzupassen. Die finale Stapelung der Bleche erfolgt außerhalb des Werkzeuges in einem manuellen Prozess. Nach der Fertigstellung der Radkörper findet das Fügen mit dem Zahnkranz wieder am IWT in Bremen statt.

Zur Qualitätssicherung wird jeder hergestellte Radkörper vor dem Versand auf einer Koordinatenmessmaschine vermessen und die Messergebnisse ans IWT übermittelt. Zahnkränze und Radkörper können nun so ausgesucht und gefügt werden, dass sich immer gleiche Passungen zwischen den Teilen ergeben.

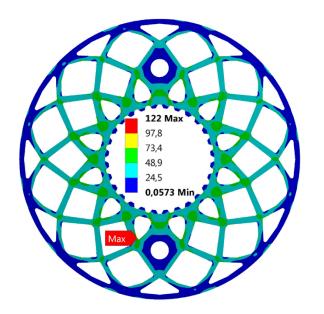




Abb. 3: Links: Geometrie und Simulation (Ergebnisse in MPa) einer einzelnen Blechlage des blechpaketierten Radkörpers, Rechts: Blechpaketierter Radkörper inkl. Verbindungselementen





Dem Fügeprozess der beiden Einzelteile kommt beim Mehrkomponentenzahnrad eine entscheidende Rolle zu. Einerseits soll eine feste Verbindung zwischen den beiden Komponenten erreicht werden, um möglichst hohe Kräfte und Momente zu übertragen, anderseits sollen die Formabweichungen des Zahnrades durch den Fügeprozess nicht negativ beeinflusst werden.

In diesen Untersuchungen wurde eine kraftschlüssige Fügeverbindung zwischen den beiden Komponenten direkt beim Wärmebehandlungsprozess eingestellt. Der Wärmebehandlungsprozess Einsatzhärten bietet zwei Möglichkeiten die Fügeoperation in die Prozesskette zu integrieren. Zum einen können Zahnkränze unmittelbar nach dem Aufkohlen, beziehungsweise nach einem vorherigen Absenken auf Härtetemperatur, aus dem Ofen entnommen und auf den Radkörper gefügt werden. Bei der Härtetemperatur (850 °C) sind die thermischen Dehnungen des Zahnkranzes so hoch, dass sich dieser unproblematisch über den Radkörper schieben und anschließend durch ein Gasabschrecken auf den Radkörper aufschrumpfen lässt. Zusätzlich kann der Radkörper tiefgekühlt werden, um einerseits das Fügespiel weiter zu erhöhen, aber auch um den Zeitpunkt, bei dem sich der Kraftschluss zwischen Zahnkranz und Radkörper einstellt, zu verändern. Eine besondere Herausforderung stellt das Einstellen des Übermaßes bei dieser Fügevariante dar. Bei der Auslegung der Abmessungen der beiden Komponenten muss bereits der Verzug des Zahnkranzes infolge der Wärmebehandlung berücksichtig werden. Eine weitere Fügemöglichkeit bietet der dem Härten folgende Anlassprozess.

Werkstoff Radkörper:	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6	18CrNiMo7-6
Geometrie:	Vollkörper	4 x Bohrungen	Umfangsnut
Fertigungsverfahren:	gedreht	gedreht/gefräst	gedreht/gefräst
Gewichtsreduktion:	0 %	-25 %	-25 %
Werkstoff Radkörper:	Dualphasenstahl	DC04 (Blech)	Aluminium
Geometrie:	Leichtbaustruktur	Leichtbaustruktur	Vollkörper
Fertigungsverfahren:	geschnitten/paketiert	tiefgezogen	gedreht
Gewichtsreduktion:	-30 %	-45 %	-45 %

Abb. 4: Beispiele thermisch gefügter Zahnräder

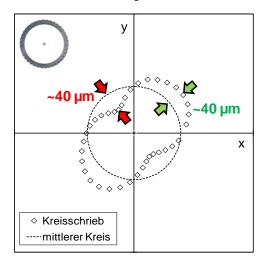
Dafür werden die Zahnkränze zunächst in einem Chargenprozess einsatzgehärtet. Nach dem Einsatzhärten werden die Zahnkränze in einem Luftumwälzofen bei einer Temperatur von 180 beziehungsweise 220 °C angelassen. Nach 1 h werden die Zahnkränze aus dem Ofen entnommen und direkt auf den Radkörper gefügt.





Die erzielbaren Gewichtseinsparungen gegenüber der bisherigen Ausführung (Vollkörper) liegen bei gebauten Zahnrädern bei bis zu 45 % (Abb. 4).

Ferner bieten die thermisch gefügten Verbundzahnräder eine bisher kaum erreichbare Rundheit. Abb. 2 verdeutlicht am Beispiel der Radiusänderung (gemessen auf den Zahnköpfen) den Einfluss des Fügeprozesses. Während ein Zahnkranz ohne Radkörper nach dem Einsatzhärten eine starke Rundheitsabweichung (Ovalität) aufweist, zeigt ein identisch aufgekohlter Zahnkranz, der beim Abschrecken auf einen zerspanten Radkörper aufgeschrumpft wurde, nahezu keine Formabweichungen.



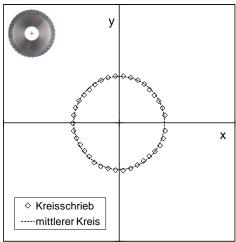


Abb. 5: Auf dem Kopfkreis gemessene Rundlaufabweichung eines einsatzgehärteten Zahnkranzes (links) und eines auf einen zerspanten Radkörper gefügten Zahnkranzes (rechts)

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem IGF-Vorhaben 18189 N "Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren".











Umformtechnisch hergestelltes Zahnrad

Einführung, Umformtechnik, Werkstoffkonzepte, Prüfung und Bauteileigenschaften

Robert Meißner, M. Sc., Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU); Christoph Leonhardt, M.Sc., Technische Universität München, Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG); Dipl.-Ing. Julian Diefenbach, Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Am Institut für Umformtechnik (IFU) in Stuttgart wurde das Verfahrenskonzept zur umformtechnischen Herstellung von "gebauten" Zahnrädern mittels Querfließpressen in Mehrkomponentenbauweise entwickelt und dessen Leichtbaupotenzial untersucht. Dieses Verfahren erlaubt das form- und/oder reibschlüssige Fügen von Zahnkranz, Radkörper und Welle. In numerischen Untersuchungen wurden zunächst der Einfluss geometrische Gestaltung des Zahnradkörpers auf die Stempelkraft und der Materialfluss untersucht. Weiterhin wurden geeignete Zahnkranzinnenprofile für eine formschlüssige Kraftübertragung ermittelt. Ebenso wurde die gezielte Zahnkranzvorspannung mit dem Ziel der Vermeidung kritischer tangentialer Zugspannungen untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass die aktive Vorspannung die Rundheitsgenauigkeit signifikant steigern kann. Die theoretischen Untersuchungen wurden mit der Ermittlung der statischen Drehmomentübertragungsfähigkeit abgeschlossen.

Aufbauend auf den theoretischen Untersuchungen zur Prozessgestaltung wurde ein Umformwerkzeug für einen Kaltumformprozess auf einer einstufigen Hydraulikpresse konstruiert und aufgebaut. Die Durchführung des Querfließpressens erfolgte mithilfe einer hydraulischen Schließvorrichtung mit angeschlossenem Stickstoffblasenspeicher. In den nachfolgenden experimentellen Untersuchungen wurde zunächst der Einfluss der Zahnkranzinnenprofile, des Zahnradkörperwerkstoffs und des Schmierstoffs auf die Umformkraft ermittelt. Während der Werkstoffeinfluss zwischen C15 und EN-AW 6082 mit den unterschiedlichen Werkstofffestigkeiten zu begründen ist, konnten die weiteren Versuchsparameter keinen weiteren Einfluss hervorbringen. Weiterhin wurden drei verschiedene Ausbaustufen gefügt (vgl. Abb. 1).





Abb. 1: links: Halbzeuge vor dem Fügen und gefügtes Zahnrad; rechts: Umformgefügte Zahnräder mit dem Zahnradkörperwerkstoff EN-AW 6082 in drei verschiedenen Ausführungen

Das Leichtbaupotenzial eines Bauteils zur Leistungsübertragung wird zum einen durch sein Gewicht sowie seine Tragfähigkeit bestimmt. Die Bestimmung des Gewichts ist über CAD-Software auf theoretische oder per Wägung auf empirische Weise verhältnismäßig einfach möglich. Die Bestimmung der Tragfähigkeit erfordert eine Prüfeinrichtung, die eine praxisgerechte sowie reproduzierbare Belastung des gebauten Zahnrades ermöglicht. Für die Prüfung der Zahnräder in Mehrkomponentenbauweise sind dafür zwei Prüfverfahren verwendet worden. Zum einen wurde ein statischer Test durchgeführt, welcher mit verhältnismäßig geringem Versuchsaufwand eine Aussage über das statisch maximal übertragbare Drehmoment zulässt.









Leibniz Universität Hannover

Zum anderen wurden Laufversuche durchgeführt, die eine einsatznahe Belastung darstellen und damit den Anwendungsfall eines Zahnrades in einem Getriebe am besten abbilden.

Für die Durchführung der statischen Untersuchungen wurde ein statischer Überlastprüfstand an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) konstruiert und aufgebaut (Abb. 2).

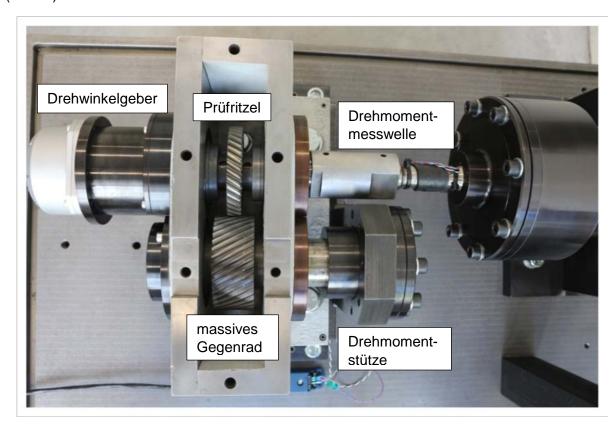


Abb. 2: Statischer Überlastprüfstand

Das zu prüfende Zahnrad (Ritzel) befindet sich im Eingriff mit einem massiven Gegenrad deutlich höherer Tragfähigkeit. Somit ist sichergestellt, dass Schäden nur am Ritzel auftreten. Das zu prüfende Zahnrad wird mit einem steigenden Drehmoment belastet. Um einen quasistatischen Lastzustand zu erreichen, wird das Drehmoment langsam rampenförmig gesteigert, bis es zu einem Schadenseintritt kommt. Um den Eintritt eines Schadens und die statische Tragfähigkeit des Zahnrades bestimmen zu können, ist der Prüfstand mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Das am Prüfritzel anliegende Drehmoment wird mit einer mit Dehnmessstreifen beklebten Torsionswelle bestimmt. Die Verdrehung der Welle wird auf der lastfreien (bzgl. Drehmoment) Seite mittels eines hochauflösenden Drehwinkelgebers erfasst. Die Signale beider Sensoren werden auf einer Zeitbasis erfasst und zur späteren Auswertung abgespeichert.

Die softwaregestützte Durchführung der Versuche ermöglicht eine reproduzierbare Generierung der Versuchsbedingungen. Das Ziel des statischen Tests ist eine schnelle Durchführung von Screening-Versuchen, um die Anzahl der untersuchten Parameter hinsichtlich Geometrie, Werkstoff, Wärmebehandlung etc. auf die statisch tragfähigsten Varianten einzugrenzen. Diese werden dann im aufwändigeren Laufversuch weiterführend untersucht.

Die Referenzzahnräder mit massiven zerspanten Radkörpern lieferten die höchsten statisch übertragbaren Momente für die größere der untersuchten Zahnkranzdicken und ohne ein Abdecken der Innenbohrung beim Aufkohlungsprozess des Zahnrades. Außerdem wirkten sich ein konstanter Volumenstrom beim Abschrecken im Gasdüsenfeld sowie die größere der











untersuchten Einhärtetiefen beim Aufkohlen des Zahnkranzes positiv auf das maximal statisch übertragbare Drehmoment aus.

Unter den Zahnrädern mit blechpaketiertem Radkörper erzielten die Varianten mit dem höherfesten der beiden untersuchten Werkstoffe die höchsten statisch übertragbaren Drehmomente.

Die Untersuchung der Zahnräder mit massiv umgeformtem Radkörper zeigte über alle Versuchskombinationen, dass der Zahnradkörperwerkstoff und der Schmierstoff den höchsten Einfluss auf die Torsionsfestigkeit nehmen, wohingegen die Zahnkranzprofilkontur keinen signifikanten und eindeutigen Einfluss zeigte. Die Zahnräder mit dem Zahnradkörperwerkstoff Stahl C15 konnten ein hohes Drehmoment mit jeder Schmierstoff- und Zahnkranzinnenprofilkombination erreichen. Das maximale Drehmoment von 1.200 Nm wurde mit dem Zahnradkörperwerkstoff Stahl C15 und dem Schmierstoff Glubricant O159 ohne Bauteilversagen erreicht.

Für die Varianten mit der höchsten statischen Tragfähigkeit wurden zudem dynamische Tests durchgeführt. In diesem Test sind im Gegensatz zum statischen Test das Ritzel und das Rad als Leichtbaukonzept ausgeführt. Die im Eingriff befindlichen Zahnräder werden mit einem Drehmoment belastet und in Drehung versetzt. Die Zahnräder wurden auf unterschiedlichen Lastniveaus untersucht wobei die ohne Schaden erreichten Lastwechselzahlen ausgewertet werden. Die Ergebnisse aus statischen und dynamischen Tests sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

massiv umgeformt blechpaketiert zerspant Stahl Alu 708 Nm statisch 759 Nm 308 Nm 845 Nm 220 Nm 105 Nm 50 Nm dynamisch 265 Nm Gewichtseinspa--30% -55% 0% 0% rung

Tab. 1: Übersicht über Versuchsergebnisse

Die statisch erreichten Drehmomente sind aus dem Mittelwert mehrerer Stichproben der statisch tragfähigsten Varianten berechnet worden. Aufgrund der unterschiedlichen Lastniveaus bei den dynamischen Tests sind die erreichten Drehmomente auf einen Wert von 25.000 Lastwechseln umgerechnet worden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Es hat sich gezeigt, dass alle innovativen Leichtbaukonzepte des gebauten Zahnrades hohe statische Drehmomente übertragen können. Bei den dynamischen Tests haben die Zahnradvarianten mit Leichtbaupotenzial höher abgeschnitten als das Referenzzahnrad mit massivem Radkörper. Die Schäden im Laufversuch haben zudem Potentiale aufgezeigt, mit denen das dynamisch übertragbare Drehmoment und damit das Leichtbaupotenzial der untersuchten gebauten Zahnräder weiter gesteigert werden kann.

Bei Leichtbaurädern, die durch ein Versagen des Zahnkranzes oder durch Zahnfußbruch ausgefallen sind, ist ein Lösungsansatz, die Belastbarkeit des Gesamtbauteils durch die Verwendung eines Zahnkranzes mit höherer Tragfähigkeit und besseren Werkstoffeigenschaften zu











Leibniz Universität Hannover

erhöhen. Dieses Ziel kann mit alternativen Fertigungsverfahren, wie zum Beispiel durch Präzisionsschmieden des Zahnkranzes anstatt der zerspanenden Herstellung, erreicht werden.

Um maximale Effizienz beim Leichtbau zu erreichen, muss der Zahnkranz des gebauten Zahnrades möglichst dünnwandig ausgeführt werden. Darüber hinaus ist die größte lokale Beanspruchung im Bereich der Zähne zu finden. Um diese hochbelastete Komponente mit besten Eigenschaften auszustatten, wird das mehrstufige Präzisionsschmieden mit gleichzeitiger thermomechanischer Behandlung als Alterative zur zerspanenden Fertigung vorgestellt. Um die Demonstratoren herstellen zu können, wurden zunächst die Umform- und Umwandlungseigenschaften der Ausgangswerkstoffe charakterisiert und anschließend eine FE-gestützte Prozessund Werkzeugauslegung durchgeführt. Die Konstruktion des komplexen zweistufigen Präzisionsschmiedewerkzeuges wurde durch Modellierung und Simulation unterstützt. Um den thermischen Verfahrensablauf gewährleisten zu können, sind Einrichtungen zum Erwärmen durch Induktion und Abkühlen im Gasdüsenfeld entwickelt und gefertigt worden. Die Demonstratoren wurden anschließend durch Verfahren der Metallografie und durch Vermessung von Geometrie und Oberflächeneigenschaften untersucht. Es hat eine Weitergabe der Bauteile an andere Teilprojekte stattgefunden, die die Weiterentwicklung der thermochemischen Wärmebehandlung sowie der Fügetechnik zum Ziel haben.

Die Ergebnisse aus dem Bereich Bauteilvermessung weisen auf eine verbesserte Genauigkeit durch die Umformung im metastabilen Austenit hin. Trotz des Verzuges, der bei der Umwandlung von Austenit in die Niedrigtemperaturmodifikation zu erwarten ist, konnte eine bessere Annäherung an die CAD-Vorgabedaten erreicht werden. Die metallografische Auswertung hat gezeigt, dass eine deutliche Reduktion der Korngröße durch die umformtechnische Verarbeitung der betrachteten Einsatzstähle möglich ist. Über die einzelnen Schritte der Prozesskette hinweg kann eine wesentliche Steigerung der Härte gemessen werden. Das feinkörnigere Gefüge, welches bei der Nachformung im metastabilen Austenit entsteht, führt verglichen mit dem nach der Umwandlung verformten jedoch nicht zu einer höheren Härte.



Abb. 3: Geschmiedeter Zahnkranz

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus den IGF-Vorhaben Nr. 18229 N "Erweiterung technologischer Grenzen bei der Massivumformung in unterschiedlichen Temperaturbereichen" und Nr. 18189 N "Intelligenter Leichtbau durch Mehrkomponentenverfahren".





Kolbenbolzen

Einführung und Motivation, Herstellung, Prüfung

Dipl.-Ing. Nadja Missal, Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU)

Das wissenschaftliche Ziel der Forschungsaktivitäten am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart bestand in der Gewichtsreduzierung eines Kolbenbolzens durch Optimierung des Bauteildesigns unter Beibehaltung der funktionalen Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit.

Anhand einer Literaturrecherche wurde festgestellt, dass ein erhebliches Problem bei der Entwicklung und Produktion von Kolbenbolzen in den begrenzten Möglichkeiten besteht, hohe Steifigkeit mit dem Leichtbaudesign im Bauteil zu kombinieren. Auch bei einer höheren Bauteilfestigkeit könnte eine Gewichtsminderung durch eine einfache Wanddickenreduzierung nicht realisiert werden, da dadurch die Bauteilsteifigkeit in Bezug auf die Ovalisierung der Lagerflächen unter Betriebsbelastung beeinträchtig wäre. Eine mögliche Lösung für dieses Problem stellt das Kolbenbolzendesign mit spiralförmiger Innengeometrie dar (Abb. 1), wodurch ein solches Bauteil ein geringeres Gewicht bei einer gleichbleibenden Steifigkeit aufweisen kann.

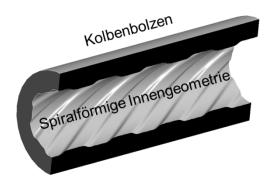


Abb. 1: Kolbenbolzen mit spiralförmiger Innengeometrie

Im Zuge der Auslegung eines Kolbenbolzens mit spiralförmiger Innengeometrie erfolgte zunächst eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der Parameter der Innenkonturierung auf die statische Festigkeit, Steifigkeit und Bauteilgewicht. Dabei wurde festgestellt, dass ein Kolbenbolzen mit angepassten Parametern der spiralförmigen Innengeometrie die funktionalen Anforderungen mit einem um 4 % bis 8 % reduzierten Bauteilgewicht erfüllen kann. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde eine optimierte Innenkonturierung ausgelegt, welche ein reduziertes Bauteilgewicht mit einer gleichbleibenden Steifigkeit kombiniert. Zum Erzeugen einer solchen Bauteilgeometrie wurde ein Kaltumformprozess, welchem das Umformverfahren Abstreckgleitziehen zugrunde liegt, konzipiert und mithilfe numerischer Simulationen entwickelt. Weiterhin wurde ein Versuchswerkzeug zur Realisierung dieses Kaltumformprozesses konstruiert und angefertigt. Mit diesem Versuchswerkzeug wurde eine Validierung der numerischen Untersuchungsergebnisse durchgeführt. Zudem erfolgte mithilfe der experimentellen Untersuchungen eine Identifikation von prozessspezifischen Effekten, welche durch eine rein numerische Betrachtung nicht erfassbar wären. Anschließend fand eine Analyse der Prozessparametereinflüsse auf die Formfüllung und Härteverteilung im Bauteil statt. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung wiesen eine Härte- und Festigkeitssteigerung von 38 % durch Abstreckgleitziehen von weichgeglühten Näpfen auf. Abschließend wurde eine technische und wirtschaftliche Bewertung der Fertigungsfolge zur Erzeugung von Kolbenbolzen mit spiralförmiger Innengeometrie durchgeführt. Dafür wurde die im Rahmen des





Projektes entwickelte Prozesskette zur Herstellung von Kolbenbolzen mit der konventionellen Fertigungsfolge verglichen. Die Ergebnisse der Bewertung zeigen, dass durch die Anwendung der innovativen Prozesskette die Prozesszeit für die Fertigung eines Kolbenbolzens um ca. 33 % reduziert werden kann. Dadurch können die Fertigungskosten signifikant reduziert werden. Darüber hinaus kann das entwickelte Umformverfahren zur Herstellung von gewichtsoptimierten hohlen, innenprofilierten Bauteilen wie Gewindehülsen, Zapfwellen, Gehäusen, Schneckengetrieben oder Lagerschalen verwendet werden und dadurch zu einer Gewichtsreduzierung des gesamten Fahrzeuges beitragen

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus den IGF-Vorhaben Nr. 18225N "Leichtbau durch gezielte Einstellung lokaler Bauteileigenschaften mit optimierten Umform- und Zerspanprozessen" und Nr. 18229N "Erweiterung technologischer Grenzen bei der Massivumformung in unterschiedlichen Temperaturbereichen".









CAE-basierte Vorhersage von Bauteileigenschaften

Werkstoffmodellierung, Zerpanungssimulation, Umformsimulation, strukturmechanische Simulation

Felix Kolpak, M.Sc., Technische Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL); Dipl.-Ing. Florian Vogel, Technische Universität Dortmund, Institut für Spanende Fertigung (ISF); Dipl.-Ing. Nadja Missal, Universität Stuttgart, Institut für Umformtechnik (IFU)

Das Ziel der Forschungsaktivitäten zu diesem Thema bestand in einer möglichst präzisen numerischen Abbildung von Prozessketten hinsichtlich der resultierenden lokalen Bauteileigenschaften der produzierten Bauteile. Dazu wurde eine Verkettung der Bereiche Kaltumformung, Zerspanung und strukturmechanische Simulationen betrachtet.

Simulation der Kaltumformung (IUL, TU Dortmund)

Im Bereich Kaltfließpressen wurde die Richtungsabhängigkeit der lokalen Festigkeit, hervorgerufen durch den Bauschingereffekt, als Ansatzpunkt für eine Verbesserung der aktuellen Abbildungsgüte der Simulation von Kaltumformprozessen identifiziert. Anhand von Realversuchen wurde der Einfluss des Bauschingereffektes am Einsatzstahl 16MnCr5FP experimentell nachgewiesen, indem Zug- und Druckversuche an den aus Fließpressteilen mit unterschiedlichen Umformgraden entnommenen Proben durchgeführt wurden (Abb. 1). Da im Zentrum der Umformzone ein deviatorischer Zugspannungszustand vorliegt, wurde der Bauschingereffekt in einem nachgeschalteten Druckversuch beobachtet.

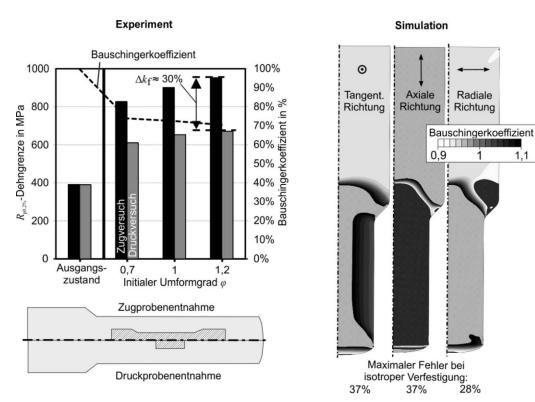


Abb. 1: Einfluss des Bauschingereffektes auf die Festigkeit fließgepresster Teile und numerische Abbildung des Bauschingereffektes unter Annahme der kinematischen Verfestigung

Zur Steigerung der Abbildungsgüte lokaler Bauteileigenschaften in der Prozesssimulation wurden verschiedene isotrop-kinematische Verfestigungsmodelle verglichen, welche eine Modellierung des Bauschingereffektes ermöglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die









Berücksichtigung kinematischer Verfestigung zu einer deutlichen Verbesserung der Modellierung lokaler Festigkeiten und Eigenspannungen führt, was eine Grundvoraussetzung für eine ganzheitliche Prozessauslegung in Bezug auf neue Leichtbaupotenziale darstellt. Dies spielt insbesondere bei der Betrachtung von mehrstufigen Umformprozessen ohne Zwischenglühen eine große Rolle. Im Projektverlauf konnte gezeigt werden, dass bereits einfache kinematische Verfestigungsmodelle (z.B. Chaboche) in der Lage sind, die Abbildungsgüte gegenüber isotropen Verfestigungsmodellen deutlich zu steigern. Diese Modelle sind in den meisten kommerziellen FEM-Programmen bereits standardmäßig implementiert (z.B: DEFORM, Abaqus, Simufact). Im Rahmen des Projektes konnte eine bisher fehlende experimentelle Methodik zur exakten Einstellung der Modelle erarbeitet werden. Anstatt konventioneller Zug-Druck-Versuche wurden Druckversuche an gezogenen Proben mit unterschiedlichen Vordehnungen genutzt, um den Bauschingereffekt bis zur Gleichmaßdehnung zu charakterisieren. Die Ergebnisse wurden durch Zug- und Druckversuche an Fließpressteilen für höhere Umformgrade validiert, wodurch ein großer Bereich der in der Kaltumformung auftretenden Dehnungen abgedeckt werden konnte.

FE-Zerspansimulation (ISF, TU Dortmund)

Bei der Auslegung von Prozessketten zur Herstellung von Bauteilen mit gezielt eingestellten Eigenschaften finden vermehrt FE-basierte Simulationssysteme Anwendung, um den Aufwand experimenteller Untersuchungen, insbesondere im Hinblick auf den gesteigerten Einsatz innovativer Werkstoffe, gering zu halten. Dafür bedarf es jedoch in der Regel grundlegender Anpassungen der in den Simulationsprogrammen hinterlegten Werkstoffmodelle. Dies betrifft einerseits die den Modellen zugrunde liegenden, durch Zugversuche ermittelten Fließkurven, welche an die bei der Zerspanung wirkenden hohen Dehnungsgeschwindigkeiten von bis zu $\dot{\varepsilon} = 10^6~\text{s}^{-1}$ anzupassen sind. Andererseits ist es teilweise notwendig, Parameter der Werkstoffmodelle durch einen iterativen Abgleich der numerisch ermittelten, mechanischen Werkzeugbelastung mit den Messwerten experimenteller Untersuchungen zu identifizieren.

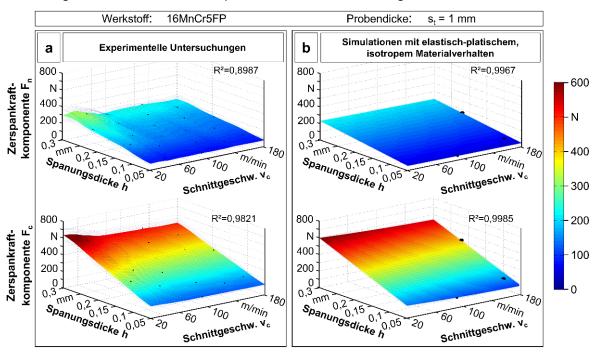


Abb. 2: (a) DACE-Modelle der experimentell ermittelten Zerspankraftkomponenten und (b) Regressionsmodelle der simulativ ermittelten Zerspankraftkomponenten

Die Abb. 2 zeigt eine Gegenüberstellung der durch experimentelle Orthogonalschnittversuche ermittelten mechanischen Werkzeugbelastung in Form von DACE-Modellen (Design and









Analysis of Computer Experiments) mit den aus FE-Zerspansimulationen (DEFORM®-2D) mit angepasstem "Johnson-Cook" (JC)-Werkstoffmodell resultierenden Regressionsmodellen der Zerspankraftkomponenten. Das JC-Modell für den Einsatzstahl 16MnCr5FP wurde einerseits durch einen Fließkurvenextrapolationsansatz und andererseits durch iterativ angepasste Materialparameter modifiziert. Dadurch erfolgte eine vergleichsweise realitätsnahe Abbildung der Werkstoffeigenschaften im Simulationsprogramm.

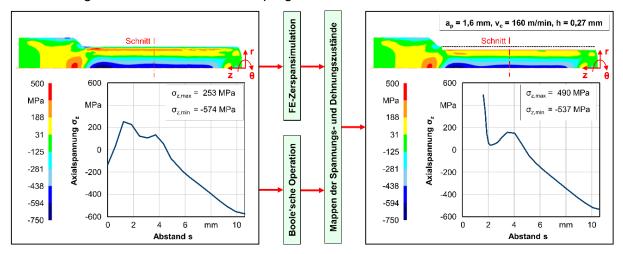


Abb. 3: Vorgehen zur Verknüpfung von FE-Umform- mit FE-Zerspansimulationen

In Abb. 3 ist ein ausgearbeitetes Vorgehen für vereinfachte FE-Zerspansimulationen (DE-FORM®-2D) an Bauteilen gezeigt, deren Eigenschaften durch vorherige FE-Umformsimulationen gezielt eingestellt wurden. Einerseits wurde durch eine Boole'sche Operation am gesamten Modell der reine Einfluss der Materialentfernung auf die Bauteileigenschaften abgebildet. Andererseits berücksichtigte eine zusätzliche Simulation des orthogonalen Schnitts den Zerspanungseinfluss. Das dabei verwendete Modell war entsprechend der gewählten Schnitttiefe a_p und Position bereits vor der Simulation mit aus dem Gesamtmodell extrahierten Spannungs- und Dehnungszuständen behaftet. Diese wurden nach durchgeführter Simulation erneut aus dem Orthogonalschnittmodell extrahiert und auf das Modell der Boole'schen Operation gemappt. Beim Vergleich der repräsentativ aufgezeigten Axialspannung σ_z im Ausgangszustand und nach erfolgtem Mapping war erkennbar, dass die Zerspanung mit den gewählten Parametern insbesondere im Randbereich einen signifikanten, aber auch im Kern des Bolzens einen erkennbaren Einfluss auf die umformtechnisch erzeugten Eigenspannungen nahm.

Während in dem obigen Beispiel lediglich ein Parametersatz betrachtet wurde, könnten durch weitere Simulationsstudien mit statistisch relevanten Parametern entsprechende Regressionsmodelle erstellt werden, die eine Vorhersage des Einflusses der Zerspanung in einem bestimmten Parameterbereich auf die umformtechnisch eingestellten Bauteileigenschaften ermöglichen.

Strukturmechanische Simulation (IFU, Universität Stuttgart)

Im Rahmen der Forschungsaktivitäten am Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart wurde eine Auslegungsmethodik entwickelt, welche die aus der Umformung resultierende Festigkeitssteigerung lokaler Bauteilbereiche in einer anschließenden strukturmechanischen Simulation berücksichtigen kann. 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 werden konnten. Parallel dazu wurden die Umformsimulationen und die strukturmechanischen Simulationsrechnungen unter Berücksichtigung der entstandenen Verfestigungs- und Eigenspannungszustandes direkt in DEFORM®-3D durchgeführt. Ergebnisse der mit DEFORM®-3D und mit Ansys Workbench durchgeführten









strukturmechanischen Simulationen weisen nur sehr geringe Diskrepanzen auf. Da die Anwendung von DEFORM®-3D für die durchgängige Betrachtung der Fertigungskette (Umformung und Zerspanung) sowie des Bauteilverhaltens unter Betriebsbedingungen neben der Zeit- und Kosteneinsparung auch erweiterte Möglichkeiten bezüglich Prozesskettenoptimierung bietet, wurden weitere Simulationsrechnungen im Rahmen dieser Forschungsaktivitäten mit DEFORM®-3D durchgeführt.

Weiterhin wurde die Anwendung der belastungsrichtungsabhängigen Materialeigenschaften bzw. des o.g. isotrop-kinematischen Werkstoffmodells in einer strukturmechanischen Simulation untersucht, um die lokalen Festigkeitseigenschaften der Bauteile bestimmen zu können. Dafür wurde eine mehrstufige Prozesskette (Kaltfließpressen und Zerspannung) zur Erzeugung eines Kolbenbolzens sowie eine strukturmechanische Analyse der Biegebeanspruchung des fertigen Bauteils in DEFORM®-3D durchgeführt. Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse war zu erkennen, dass die Spannungsverteilung des isotrop-kinematischen Verfestigungsmodells weniger äquatorial im Vergleich zur Spannungsverteilung des konventionell einsetzbaren isotropen Verfestigungsmodells ausgebildet war (Abb. 4). Außerdem wurde speziell für die betrachtete Biegebeanspruchung festgestellt, dass die Bauteilverformung bei der Anwendung des isotrop-kinematischen Verfestigungsmodells früher als beim Einsatz des isotropen Verfestigungsmodells eintritt.

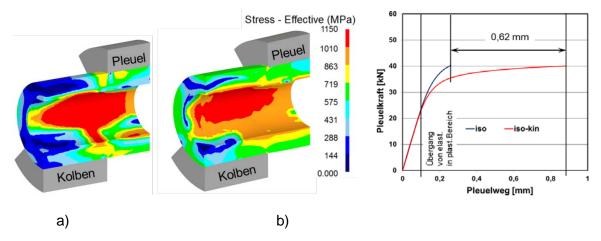


Abb. 4: Ergebnisse der Biegebelastungssimulation eines Kolbenbolzens, a) isotropes Materialmodell; b) isotrop-kinematisches Materialmodell

Ferner wurde eine CAE-basierte Prozessauslegungskette zur Optimierung von Herstellungsprozessen von Kaltfließpressteilen aufgebaut. Die CAE-basierte Prozesskettenauslegung bestand aus den Schritten Versuchsplanerstellung, Modellerstellung, Umform- und Strukturmechaniksimulation, Optimierung und Validierung. Diese Vorgehensweise sah zunächst die Festlegung von Optimierungsparametern sowie Randbedingungen vor. Anschließend wurde die verkettete Simulation, bestehend aus der Umformung und der nachfolgenden Betriebsbelastung, in DEFORM® aufgebaut. Danach erfolgte die Gewichtsoptimierung in OptiSLang an einem Metamodell. Abschließend wurde das Metamodell mittels einer erneuten Simulation des optimierten Kaltfließpressteils validiert.

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem IGF-Vorhaben Nr. 18225N "Leichtbau durch gezielte Einstellung lokaler Bauteileigenschaften mit optimierten Umform- und Zerspanprozessen".





Getriebewelle

Einführung und Motivation, Numerische Werkzeugauslegung, Prüfung und Bauteileigenschaften, Oberflächenbearbeitung

Felix Kolpak, M. Sc., Technische Universität Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL)

Einführung und Motivation

Getriebewellen sind dynamisch hochbelastete bewegte Bauteile im Automobil. Eine mögliche Methode zur Herstellung von Getriebewellen ist das Konzept der gebauten Welle. Dabei erfolgt eine getrennte Herstellung eines Wellengrundkörpers sowie eines oder mehrerer Ritzel und darauffolgend das Fügen der Komponenten zu einer Getriebewelle (Abb. 1). Einzelne Komponenten werden häufig mit den Verfahren der Kaltmassivumformung hergestellt. Die Vorteile liegen dabei unter anderem in der hohen Werkstoffausnutzung, dem ununterbrochenen resultierenden Faserverlauf sowie der Kaltverfestigung des Werkstoffes und damit der Verbesserung der mechanischen Eigenschaften im Vergleich zum Grundwerkstoff.

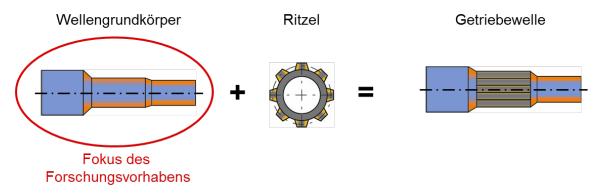


Abb. 1: Schematische Darstellung der Herstellung einer gebauten Getriebewelle durch Fügen eines Wellengrundkörpers und eines Ritzel

In diesem Projektabschnitt wurde die Fertigung von skalierten Getriebewellen mit definierten lokalen Eigenschaften durch Voll-Vorwärts-Fließpressen zuerst numerisch bezüglich der resultierenden Bauteileigenschaften optimiert und darauffolgend experimentell realisiert und bewertet. Ziel war hierbei, Fließpresswerkzeuge derart auszulegen, dass skalierte Wellen mit lokal definierten und optimierten mechanischen Eigenschaften gefertigt werden können, indem die Kaltverfestigung ausgenutzt wird. Es wurde systematisch überprüft, ob durch alleinige Kaltverfestigung eine Reduktion des Bauteilgewichtes erfolgen kann oder übliche Wärmenachbehandlungen subsituiert werden können.

Für die Fertigung komplexer Geometrien, welche einen hohen Umformgrad bedingen, wird konventionell das mehrstufige Fließpressen eingesetzt, wodurch sich die Formänderungsgrenzen der umzuformenden Werkstoffe erweitern und die Prozesskräfte verringern lassen (Abb. 2). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde zusätzlich auch das einstufige Fließpressen betrachtet und die resultierenden mechanischen Eigenschaften der umgeformten Bauteile verglichen. Neben geometrischen Werkzeugparametern wurden als zusätzliche Einflussgrößen auf die sich lokal ausbildende Kaltverfestigung der Halbzeugwerkstoff sowie das verwendete Schmierstoffsystem variiert.





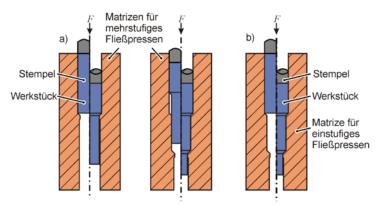


Abb. 2: Schematische Darstellung des Voll-Vorwärts-Fließpressens einer mehrfach abgesetzten Welle a) Mehrstufige Prozessführung b) Einstufige Prozessführung

Numerische Werkzeugauslegung

Im Rahmen einer numerischen Prozessmodellierung mittels FEM (Software: Simufact.forming des Softwareherstellers MSC) erfolgte eine Variation der Prozessroute, der Werkzeuggeometrien (Schulteröffnungswinkel, Werkzeugradien), des Reibkoeffizienten und des Halbzeugwerkstoffes und eine Bewertung der sich ausbildenden Kaltverfestigung im Wellenrandbereich und die resultierenden Eigenspannungen (Abb. 3).

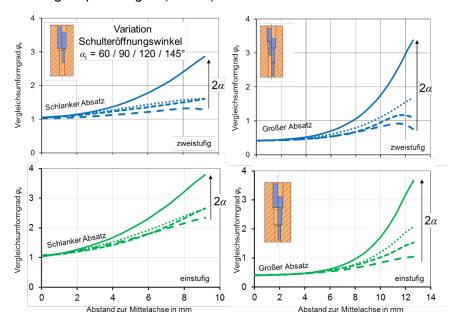


Abb. 3: Einfluss der Prozessroute auf den Umformgrad über den Bauteilradius

Als begrenzende Faktoren sind die maximalen Pressenkräfte und die resultierende Werkzeugbelastung sowie die Anforderungen an den verwendeten Schmierstoff zu nennen. Durch optimierte Prozessparameter konnten für den Fall des einstufigen Pressens maximale Umformgrade im Randbereich von $\varphi = 4,2$ erreicht werden.

Prüfung und Bauteileigenschaften

In Anlehnung an die numerischen Ergebnisse wurden die optimierten Werkzeug- und Prozessparameter realisiert und skalierte Getriebewellen aus 16MnCr5, 18CrNiMo7-6 und 100Cr6 mittels einstufigem und zweistufigem Fließpressen hergestellt. Um das Verfestigungspotential der untersuchten Werkstoffe bis zu hohen Umformgraden zu verdeutlichen, wurden die experimentell ermittelten Härtewerte entlang der Wellenmittelachse über den Umformgrad für die drei untersuchten Halbzeugwerkstoffe aufgetragen (Abb. 4).





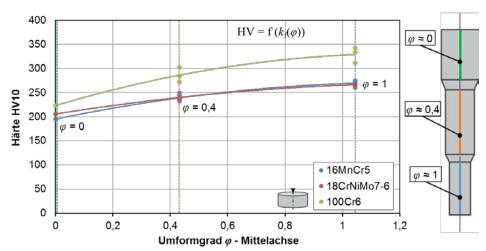


Abb. 4: Härte im Bereich der Wellenmittelachse über den Umformgrad

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass für alle drei Werkstoffe ein deutlicher Anstieg der Härte zwischen $\varphi=0,4$ und $\varphi=1,0$ vorliegt. Insbesondere für 100Cr6 scheint das Verfestigungspotential des Werkstoffes bis $\varphi=1,0$ zwar nicht vollständig ausgeschöpft zu sein, wodurch hier ein gewisses Potential zur möglichen Substitution von Wärmebehandlungen durch Kaltverfestigung vorliegt, es macht sich jedoch eine zunehmende Sättigung bemerkbar. Im vorliegenden Fall konnten übliche Härteanforderungen an Zahnradwerkstoffe (z.B. erzielbar durch Einsatzhärten) durch eine reine optimierte Kaltumformung nicht erreicht werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch, 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 jedoch neue Potentiale für den fertigungstechnischen Leichtbau durch Kaltumformung aufzeigen.

Oberflächenbearbeitung

Um eine Reduzierung des Bauteilgewichts von umformtechnisch erzeugten Bauteilen zu erreichen, müssen die lokalen mechanischen Eigenschaften der Bauteile belastungsgerecht eingestellt werden. Da mechanische Belastungen und der damit einhergehende Verschleiß insbesondere in randschichtnahen Bereichen auftreten, müssen diese Bereiche eine hohe lokale Festigkeit bzw. Härte aufweisen. Ziel dieses Arbeitsabschnittes war es, durch ein dem Umformprozess nachgelagertem inkrementellem Umformverfahren, genauer dem Festwalzen, die Oberfläche umgeformter Bauteile lokal weiter zu verfestigen.

Um die genannten Ziele zu erreichen, wurde zunächst untersucht, ob durch die inkrementelle Umformung konventioneller Werkstoffe eine nachgelagerte Wärmebehandlung zur Randschichthärtung vermieden werden kann. Dazu wurden Festwalzversuche an 18CrNiMo7-6 und 100Cr6 durchgeführt, da diese die höchsten Härten beim Fließpressen erreicht haben. Die maximalen Härtesteigerungen (Variation der Walzkraft, Überrollungszahl, Werkzeugkonzept, Vorschub, Kugeldurchmesser) und damit die maximalen Härtesteigerungen für beide untersuchten Versuchswerkstoffe sind in Abb. 5 dargestellt.





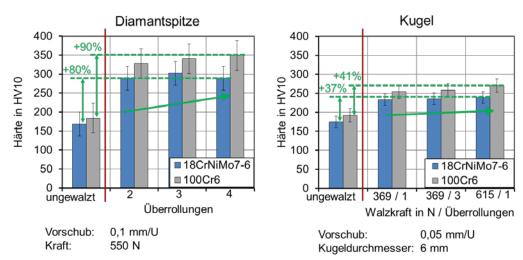


Abb. 5: Maximal erreichte Härtesteigerungen beim Oberflächenfestwalzen

Die erlangten Erkenntnisse wurden auf Bauteile angewendet, welche bereits einer Wärmebehandlung (Vergüten) unterzogen wurden. Durch eine weitere Steigerung der Härte sollte eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Werkstoffes erreicht werden, wodurch eine auf Leichtbau ausgerichtete und bezüglich der Dimensionierung reduzierte Bauteilauslegung ermöglicht wird. Vergleichbare Versuche wurden an fließgepressten Bauteilen mit nahezu identischer Anfangshärte durchgeführt, um einen Vergleich bezüglich des Verfestigungspotentials der beiden Werkstoffe mit unterschiedlicher Vorgeschichte zu erhalten.

Während sich vergütete Werkstoffe durch Festwalzen weiter umformen und kaltverfestigen lassen (bis zu 20%-iger Härteanstieg), führt Festwalzen kaltfließgepresster Teile durchgängig zu Oberflächenrissen bis hin zu Abplatzungen (Abb. 7). Diese Form des Werkstoffversagens ist bei allen untersuchten Werkstoffen aufgetreten. Die Beobachtungen lassen vermuten, dass die Werkstoffe durch die starke Kaltverfestigung im vorangegangenen Fließpressprozess nur noch wenig oder kein Restumformvermögen aufweisen. Hier wird deutlich, dass sowohl 16MnCr5 als auch 18CrNiMo-7-6 im fließgepressten Zustand ihre maximale Härte durch Kaltverfestigung erreicht haben.



Abb. 6: Oberflächenrisse und Abplatzen der Wellenoberfläche bei steigender Festwalzkraft

Da 100Cr6 der Abbildung nach noch ein gewisses Restverfestigungspotential aufweist, beim Festwalzen jedoch ebenso versagt, ist die Sättigung der Kaltverfestigung nicht der einzige Grund für das Prozessversagen. Das Abplatzen des Werkstoffes und der dabei entstehende, fast pulverartige Werkstoffabtrag sprechen ebenso für einen negativen Einfluss der umformbedingten Eigenspannungen auf das Festwalzergebnis.

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus dem IGF-Vorhaben Nr. 18225 N "Leichtbau durch gezielte Einstellung lokaler Bauteileigenschaften mit optimierten Umform- und Zerspanprozessen".









Hybride Radnabe

Einführung und Konzept, Verbundgestaltung, Eigenschaften

Dipl.-Ing. Julian Diefenbach, Philipp Kuwert, M. Eng., Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Für die Herstellung hybrider Leichtbauteile können die Verfahren der Warmmassivumformung gezielt genutzt werden, um Bauteile aus mehreren Werkstoffen effizient durch das kombinieren der Prozessschritte "Formgebung" und "Fügen" herzustellen. Eines dieser massivumformtechnischen Verfahren ist das Verbundschmieden. Die wissenschaftlich-technische Problemstellung ist das unterschiedliche Fließverhalten der aus artfremden und artgleichen Materialien bestehenden Rohteile. Dies resultiert abhängig vom herzustellenden Bauteil in unterschiedliche Herausforderungen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde das Verbundschmieden als Verfahren zur Herstellung hybrider Radnaben aus artfremden und artgleichen Werkstoffen evaluiert. Hierfür wurden Stahl-Aluminium Radnaben aus den Werkstoffen C60 und EN AW 6182 und Stahl-Stahl Radnaben aus den Vergütungsstählen 30CrNiMo8 und C60 hergestellt.

Im Zuge der Untersuchungen wurde ein Design der Hybridbauteile konzipiert, welches dem Belastungskollektiv des industriellen Bauteil zugeschnitten entspricht und dabei die Notwendigkeit eines zusätzlichen form- und kraftschlüssigen Verbundes identifiziert. Hierfür wurde in enger Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss eine Fügestrategie entwickelt, welche einen lokalen Stoff- und Kraftschluss vorsieht. In den anschließenden numerischen Untersuchungen wurde eine zweistufige Prozesskette für das Verbundschmieden im geschlossenen Gesenk, optimale Halbzeuggeometrien, ein geeignetes Prozessfenster für die artfremde und artgleiche Materialkombination innerhalb einer kombinierten Halbwarm-Warm- und Warm-Warmumformung ermittelt.

Zu Beginn der experimentellen Untersuchungen wurden für die artfremde und artgleiche Materialkombination verschiedene Erwärmungsvarianten erprobt. Bedingt durch Zunderbildung, welche die Ausbildung eines stoffschlüssigen Verbundes stört, wurde eine Erwärmung und Zusammenführen im Schutzgasofen als geeignet identifiziert. Nach Erwärmung auf Umformtemperatur wurden die Halbzeuge manuell in das Werkzeugsystem eingelegt und durch das einstufige Verbundschmieden die hybriden Radnaben sowie Monoradnaben hergestellt (Abb. 1).



Abb. 1: Ablauf zum Verbundschmieden hybrider Radnaben

Im Anschluss konnten durch lichtmikroskopische Aufnahmen stoffschlüssige Verbindungen bei der Stahl-Aluminium und Stahl-Stahl Kombination identifiziert und durch Mikrohärtemessungen und EDX-Analysen charakterisiert werden.





Bei der artfremden Materialkombination konnte eine stoffschlüssige Verbindung durch intermetallische Phasen vom Typ Fe $_2$ Al $_5$ nachgewiesen werden, welche sich im Allgemeinen durch eine Härte von 1.050 bis 1.200 HV und ein sprödes Materialverhalten auszeichnen. Zudem konnte eine maximale Phasensaumdicke von 16,33 μ m gemessen werden. Da der Grenzwert von 10 μ m, bis zu dem ein negativer Einfluss des Phasensaumes auf die Verbundeigenschaften vernachlässigbar ist überschritten wird, ist eine reduzierte Bauteilfestigkeit der Stahl-Aluminium Radnabe zu erwarten.

Für die artgleiche Materialkombination wurden durch lichtmikroskopische Aufnahmen mögliche Bereiche für die Bildung stoffschlüssiger Phasen ermittelt und aufgrund der geringen Dicke von 0,5 µm durch Rasterelektronenmikroskopaufnahmen detektiert. Hierbei entspricht die chemische Zusammensetzung der Fügezone einer Kombination aus den Werkstoffen C60 und 30CrNiM8 bedingt durch ein diffusionsgestütztes Fügen während des Verbundschmiedens. Weitergehend konnte in den Grundwerkstoffen nahe der Fügezone ebenfalls ein Austausch von Legierungselementen und eine Veränderung des Gefüges festgestellt werden. Durch anschließende Mikrohärtemessungen konnte die Fügezone weiter charakterisiert und das mechanische Verhalten der stoffschlüssigen Verbindung approximiert werden.

Im Anschluss wurden die mechanischen Eigenschaften der hybriden Radnaben und hybrider Scheibenproben in Push-Out sowie in Biege- und Torsionsversuchen analysiert und Kennwerte für die Verbundfestigkeit ermittelt.

Vor Versuchsdurchführung wurden die hergestellten Radnaben einer spanenden Nachbearbeitung unterzogen zur Fertigung der jeweiligen Versuchsproben. Bereits bei der spanenden Nachbearbeitung der Bauteile tritt ein Versagen des Stahl-Aluminium Verbunds ein, sodass eine Prüfung der Werkstoffverbindung für die artfremde Materialkombination nicht durchgeführt werden konnte.

Während der Versuchsdurchführung der Push-Out Tests konnte ein hohes mechanisches Potential bei vollflächig gefügten Stahl-Stahl Proben identifiziert werden, da eine Trennung des Werkstoffverbunds, mit den zur Verfügung stehenden Prüfanlagen, nicht realisiert werden konnte. Dieses Verhalten konnte weitergehend in den Bauteilversuchen bestätigt werden und führte wiederholt zum Versagen der Prüfstände, sodass die Verbundeigenschaften die Festigkeiten der Prüfkomponenten übersteigen. Somit können durch das Verbundschmieden unterschiedlicher Werkstoffe gezielt Bauteileigenschaften eingestellt werden und somit effizienter Leichtbau ermöglicht werden.

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus den IGF-Vorhaben Nr. 19040 N "Untersuchungen zum Verbundschmieden unterschiedlicher artfremder und artgleicher Materialkombinationen".





Innovationstransfer

Technische Potenzialbewertung, Lebenszyklusanalyse

Dr. Michael Rothgang, Jochen Dehio, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung, Es-sen; Alexander Busse, M.Sc., RWTH Aachen, Institut für Kraftfahrzeuge

Unter dem Thema "Innovationstransfer, Technische Potenzialbewertung und Lebenszyklusanalyse" wurden die Prozesse, die der wissenschaftlich-technologischen Entwicklung der Bauteile nachgelagert sind, in Hinblick auf ihre wirtschaftliche Umsetzung und Nachhaltigkeit in das Untersuchungsprogramm einbezogen.

Beschäftigung mit Leichtbaupotenzialen und Innovationshemmnisse

Im Projekt wurden, basierend u.a. auf schriftlichen Befragungen und Expertengesprächen, die Funktionsweise des sektoralen Innovationssystems untersucht und auf dieser Basis Innovationshemmnisse identifiziert. Im Rahmen der Untersuchungen zeigte sich, dass das Interesse der zur Wertschöpfungskette des Massiven Leichtbaus gehörenden Unternehmen an dieser Thematik seit dem Jahr 2008 und insbesondere in den letzten Jahren deutlich zugenommen hat. Mittlerweile beschäftigen sich über 60% der befragten Unternehmen mit einem gewichtsoptimierten Bauteildesign. Knapp 30% dieser Unternehmen nutzen Produkte mit gewichtsoptimierten Bauteildesigns oder bieten diese an. Im wissenschaftlichen Bereich ist es – anders als beim Stahl-Leichtbau insgesamt sowie den neuen hochfesten Stählen –in den vergangenen Jahren nicht zu einer Zunahme der wissenschaftlichen Publikationen zu Fragen des Massiven Leichtbaus in den relevanten Top-Journals der Ingenieurs- und Materialwissenschaften gekommen. Ein bedeutsamer Grund dafür dürfte sein, dass es sich dabei um eine sehr anwendungsorientierte Problematik handelt.

Im Unternehmensbereich existieren zahlreiche Innovationshemmnisse an verschiedenen Stellen der Wertschöpfungskette (vgl. Abb. 1): Bei den Stahl- und Umformunternehmen bestehen diese bspw. in eingefahrenen Routinen und noch unzureichenden Erfahrungen im Umgang mit den neuen Materialien. Bei den Systemzulieferern und OEMs ist dagegen derzeit das Wissen über die Möglichkeiten neuer Materialien und Bauteildesigns noch nicht in ausreichendem Maße vorhanden. Gleichzeitig sind die Entscheidungsprozesse mitunter komplex, verbunden mit einer Vielzahl von beteiligten Ansprechpartnern. Ein besonderes Hemmnis stellen auch die bislang noch zu wenig ausgeprägten Kontakte zwischen Stahl- und Umformunternehmen auf der einen sowie Systemzulieferern und OEMs auf der anderen Seite dar.

Die Innovationshemmnisse lassen sich systematisch in den verschiedenen Stufen der Wertschöpfungskette verorten:

- Die Frage nach den zu erwartenden Nutzen und Kosten des Massiven Leichtbaus, die damit verbundenen technischen und wirtschaftlichen Unsicherheiten sowie die erforderlichen Anpassungen von Routinen zur Diffusion von Leichtbaulösungen betreffen die gesamte Wertschöpfungskette.
- Am Anfang der Wertschöpfungskette (Stahlwerke, Massivumformer) stehen darüber hinaus u.a. Fragen des Umgangs mit neuen Materialien und Bearbeitungsmöglichkeiten sowie die erforderlichen Investitionskosten im Vordergrund.
- Auf Seite der Kunden (also Systemzulieferern und OEMs) zeigen sich Innovationshemmnisse in komplexen Entscheidungsprozessen sowie in dem mangelnden Wissen über den Nutzen des Massiven Leichtbaus.







 Die Abstimmung zwischen den verschiedenen Unternehmen in der Wertschöpfungskette ist wiederum mit Herausforderungen in Hinblick auf vorwettbewerbliche Kommunikations- und Abstimmungsprozesse verbunden.

Abbau der Innovationshemmnisse

Die wichtigsten Faktoren, die die Markteinführung von Produkten des Massiven Leichtbaus begünstigen und somit Ansatzpunkte für eine Überwindung der Innovationshemmnisse bieten, sind neben einem günstigen Nutzen-Kosten-Verhältnis auch verbesserte technische Eigenschaften (wie eine höhere Leistungsdichte der Bauteile), die frühzeitige Kontaktaufnahme zwischen den Stahlwerken, Umformunternehmen und ihren Kunden (Systemzulieferer und OEMs) sowie die Bereitstellung von Informationen zu Bauteil- und Materialeigenschaften.

Impulse für einen Abbau der Innovationshemmnisse und eine intensivere Beschäftigung mit Fragen des Massiven Leichtbaus gingen in den vergangenen Jahren von den Aktivitäten der Industrieinitiative und vom Verbundvorhaben in Verbund mit den beteiligten Forschungsvereinigungen aus. Diese beinhalten insbesondere die verbesserte Informationsbereitstellung sowie den Ausbau der Kontakte: Aus Sicht von 71% der antwortenden Unternehmen trifft die Aussage (voll) zu, dass die Industrieinitiative und das Verbundvorhaben zu einer höheren Sichtbarkeit des Leichtbaupotenzials geführt hat, für 58% trifft (voll) zu, dass sich durch diese Aktivitäten die Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette verbesserte (Unternehmensbefragung 2018, Frage 10, n=31).

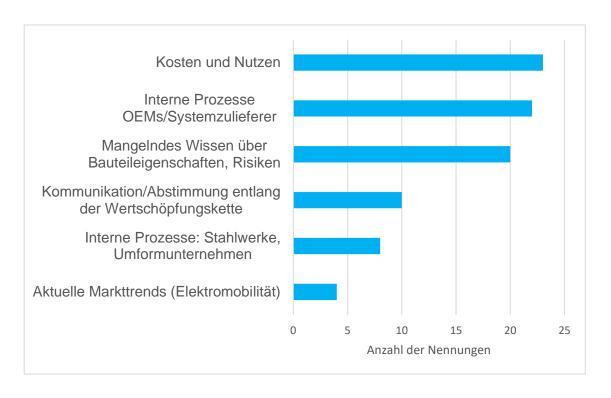


Abb. 1: Die bis zu drei wichtigsten Faktoren, die die Nutzung neuer Bauteilpotenziale behindern (Quelle: Unternehmensbefragung 2018, Frage 6 (n=35), Mehrfachnennungen möglich.)

Im Rahmen des Verbundprojekts wurden an mehreren Stellen Maßnahmen ergriffen, um den Nutzen der Ergebnisse für Unternehmen zu erhöhen. Insbesondere wurden gezielt Informationen über das Projekt an neue Unternehmen weitergegeben. Darüber hinaus wurde eine grobe Abschätzung der Veränderungen von Produktionsprozessen und Bauteilkosten vorgenommen und die Ergebnisse gezielt so aufbereitet, dass sie den Unternehmenserfordernissen







entgegenkommen. Aus den Untersuchungen ergeben sich Ansatzpunkte für weitere Verbesserungen. Diese betreffen u.a. die Unterstützung der Kontaktaufnahme mit Kunden durch die Forschungsvereinigungen, die weitere Fokussierung auf Leichtbaufragen in der Industrieinitiative und den Forschungsvereinigungen, die frühzeitigen Kontaktaufnahme und Kontaktpflege zwischen Umformunternehmen und ihren Kunden, sowie die stärkere Nutzung des Anwendungswissens aus den Unternehmen durch die Forschungsstellen.

Technische Potenzialbewertung

Im Rahmen der technischen Potenzialbewertung erfolgen Analysen des Antriebsstranges und Fahrwerk hinsichtlich des Einflusses primärer Gewichtsreduktion auf den Energieverbrauch und der Fahrsicherheit. In einem weiteren Schritt wird die quantitative Bestimmung der sekundären Gewichtsreduktion durchgeführt.

Die Masse des Fahrzeugs beeinflusst den Energiebedarf des Kraftfahrzeugs. Zur Untersuchung des Einflusses der Gewichtsreduzierung wurde mithilfe des oben beschriebenen Längsdynamiksimulationsmodells eine Parametervariation durchgeführt. Der Kraftstoffverbrauch wird mit der Masse vor der Reduktion berechnet, um einen Vergleichswert zu erhalten. Anschließend wird das Fahrzeuggewicht um den vorgegebenen Betrag reduziert, um die Kraftstoffeinsparung zu ermitteln. Die Leichtbaumaßnahmen führten zu einer Reduktion der Masse von 42,256 kg. Für die Untersuchungen wurden die Fahrzyklen NEFZ und WLTC betrachtet. Aufgrund der Verringerung der Fahrzeugmasse wird in beiden betrachteten Fahrzyklen eine Kraftstoffverbrauchsreduzierung festgestellt. Der Kraftstoffverbrauch sinkt für den NEFZ um 0,52 % und für den WLTC um 0,47 %. Die rotatorischen Trägheiten erreichen maximal einen Einfluss von 0,001 l/100 km. Der Einfluss der Massenreduktion ist im WLTC geringer als im NEDC, da der WLTC eine höhere Durchschnittsgeschwindigkeit aufweist und damit der Luftwiderstand für den Kraftstoffverbrauch einen höheren Stellenwert einnimmt. Weiterhin wird der positive Einfluss der Massenreduktion hinsichtlich des Energiebedarfs am Rad durch einen im Vergleich ungünstigeren Betriebspunkt des Verbrennungsmotors teilweise wieder aufgehoben. Dieser Effekt kann durch eine Anpassung der Getriebeübersetzung verringert werden.

Der Einfluss primärer Gewichtsreduktion auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort von Pkw wird bewertet. Um vergleichende Aussagen treffen zu können, werden zunächst zwei Simulationsmodelle in einer Mehrkörpersimulationsumgebung (MKS) aufgebaut. Das Referenzmodell entspricht einem Mittelklassefahrzeug mit Allradantrieb. Im zweiten, sogenannten Leichtbaumodell werden die in der Industrieinitiative "massiver Leichtbau" entwickelten Leichtbaumaßnahmen abgebildet. Zur Untersuchung der Auswirkungen der Leichtbaumaßnahmen werden Fahrmanöver definiert, die eine Veränderung von Fahrsicherheit und Fahrkomfort durch die primäre Gewichtsreduktion zeigen können. Insgesamt zeigt sich in den Ergebnissen in Bezug auf die Fahrdynamik ein positiver Einfluss, die Größenordnung der Verbesserungen bewegt sich dabei im Rahmen auf Grund der relativ geringen betrachteten Gewichtsreduktion von etwa zwei Prozent der Fahrzeuggesamtmasse zu erwartenden Rahmen. Im Hinblick auf den Fahrkomfort war im Rahmen dieser Untersuchung kein positiver Trend ersichtlich.

Durch eine primäre Massenreduktion werden Potenziale für sekundäre Gewichtseinsparungen eröffnet, da sich die Anforderungen von strukturellen und funktionalen Komponenten im Fahrzeug aufgrund der geringeren Fahrzeugmasse reduzieren und sie daher kleiner dimensioniert werden können. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird dieses sekundäre Gewichtseinsparpotenzial von Kraftfahrzeugen an einem Beispielfahrzeug bestimmt. Zur Bestimmung der sekundären Gewichtsreduktionen dieser Komponenten wurden drei unterschiedliche, sich ergänzende Ansätze verfolgt. Der analytische Ansatz leitet Gewichtseinsparungen auf Basis mechanischer bzw. fahrzeugtechnischer Grundlagen her. Der empirische Ansatz greift auf eine Datenbasis zurück, um Massenwerte anhand vorliegender Fahrzeugmodelle in Abhängigkeit der jeweiligen Eingangsgrößen zu bestimmen. Hier wurde mithilfe von







Regressionsgeraden eine Funktion zur Bestimmung der Masse gebildet. Insbesondere Komponenten des Antriebstrangs und des Fahrwerks wurden mithilfe der analytischen und empirischen Zusammenhänge bewertet. Der dritte Ansatz bedient sich dynamischer Crash-Simulationen. Zur Abschätzung des maximalen Potenzials der sekundären Gewichtseinsparung, wurde die Berechnung in mehreren Iterationen durchgeführt. Hierbei ging die jeweilige vorhergehende Gewichtsreduktion als Eingangsgröße in die folgende Iteration ein. In der vorliegenden Untersuchung zeigte sich, dass nach der dritten Iteration keine weiteren signifikanten Reduktionen mehr möglich waren. Die Gewichtseinsparungen der drei Iterationen (15,06 kg, 5,25 kg, 0,89 kg) führten zu einer sekundären Gesamtreduktion von 21,20 kg. Dieser Wert entspricht ca. 50 % der primären Gewichtsreduktion.

Lebenszyklusanalyse

Die LCA umfasst eine ganzheitliche Bewertung von Leichtbauinnovationen exemplarisch an einem Referenzbauteil. Im ersten Schritt wurden in einer Umfeldanalyse die Treiber und Trends der Branche dargestellt. Im zweiten Arbeitsschritt wurden die relevanten Analysedimensionen sowie die Leichtbau-Innovationen für die folgende Detailanalyse ausgewählt. Das Vorgehen entspricht dabei den Ansätzen in den Normen ISO 14040 bis14044, um eine spätere Vergleichbarkeit und Weiterverwendung der LCA Ergebnisse für weitere wissenschaftliche Untersuchungen zu ermöglichen. Für die Betrachtung werden das Demonstratorbauteil Zahnrad aus dem Forschungsverbund ausgewählt, der Referenzvariante werden 3 Leichtbauansätze gegenübergestellt: 1. Zahnkranz aus Stahl, Radkörper aus Aluminium, 2. Zahnkranz aus Stahl, Radkörper aus einer topologieoptimierten Blechpaketierung und 3. Zahnkranz aus Stahl, Rädkörper aus tiefgezogenem Blech. Im dritten Schritt erfolgt zunächst die Erstellung des Life Cycle Inventory, in dem alle technischen Informationen zu der relevanten Komponente wie die detaillierte Materialzusammensetzung, das Gewicht der fertig bearbeiteten Komponente und die technischen Abmessungen (Länge, Breite und Höhe) erfasst werden. Im vierten Arbeitspunkt erfolgt eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Prozessschritte zur Herstellung der ausgewählten Referenzkomponente, hierzu werden die grundsätzlichen Herstellungsprozesse zunächst auf Basis einer Primär- und Sekundäranalyse erfasst und beschrieben. Diese Informationen werden zum Modellaufbau für die Lebenszyklusanalyse genutzt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

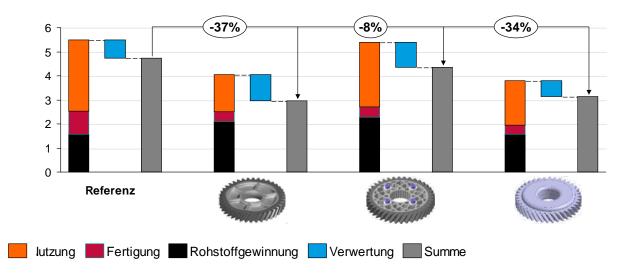


Abb. 2: Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse bzgl. GWP₁₀₀

Die vorgestellten Ergebnisse stammen aus den IGF-Vorhaben Nr. 25 LN "Innovationstransfer, technische Potenzialbewertung und Lebenszyklusanalyse"











Kartellrechtshinweise

Folgender Hinweis ist vor Beginn der Veranstaltung erfolgt: / Following notice has to be given at the beginning of a meeting:

"Im Rahmen dieser Veranstaltung dürfen keinerlei kartellrechtlich unzulässige Themen behandelt, insbesondere keine Preis- oder Mengenabsprachen, getroffen werden." / "During this meeting it must be ensured that no breaches of cartel-law provisions especially no price and quantity agreements take place."

Die "FOSTA-Leitlinien zur Einhaltung kartellrechtlicher Vorschriften" sind den PA-Mitgliedern zur Kenntnis gegeben worden. / All attendees of the project-related working group have been informed about the "FOSTA-Guidelines on Adherence to Cartel-Law Regulations."

https://www.stahlforschung.de/ueber-uns/leitlinien.html



Mit der Unterschrift in der Teilnahmeliste bestätigen die Teilnehmer die Kenntnisnahme des Merkblattes zum Projektbegleitenden Ausschuss der Industriellen Gemeinschaftsforschung – IGF:

https://www.aif.de/fileadmin/user_upload/aif/innovationsfoerderung/PDF/Leitfaden_fuer_Sitzungen_des_Projektbegleitenden_Ausschusses.pdf













Notizen











orschungsgesellschaft

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 Lebensdauererwartungen zu erfüllen. An insgesamt 6 Teilprojekten waren zehn Forschungseinrichtungen aus fünf Bundesländern beteiligt.

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 Potenzialbewertung 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 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.

Gefördert durch:



