

Prozessgerechtes Design

Massivumformung – eine Prozesskette für den Leichtbau

Das Stichwort „Leichtbau“ weckt selbst bei Fachleuten oft zunächst die Vorstellung von Konstruktionen aus exotischen Materialien niedriger Dichte wie Faserverbundwerkstoffen, Hochleistungskunststoffen oder Titan. Erhebliches Potenzial zur Gewichtseinsparung findet sich jedoch auch in den eher „klassischen“ Einsatzbereichen konventioneller Werkstoffe wie Stahl oder Aluminium. Dabei spielt die konsequente Nutzung der Vorteile des Massivumformprozesses oft eine wesentliche Rolle.

Aus Sicht des Konstrukteurs kommt es beim Leichtbau vor allem darauf an, eine Komponente beziehungsweise eine Gesamtkonstruktion mit der geringst möglichen Masse auszuführen, mit der sie die gewünschte Funktion noch mit der erforderlichen Zuverlässigkeit erfüllen kann. Angesichts der Vielfalt und Komplexität moderner Produkte ist die Palette der jeweils zu erfüllenden Anforderungen äußerst breit gestaffelt, Bild 1. Neben der Dichte des Werkstoffs spielen zahlreiche weitere Parameter von Festigkeit und Temperaturbeständigkeit bis hin zu Beständigkeit gegen Schwingungsbeanspruchung oder Korrosion eine Rolle. Hinzu kommen die für jede industrielle Fertigung entscheidenden Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Beherrschbarkeit der Produktionsprozesse und Sicherung der erforderlichen Qualität.

Darüber hinaus sind noch Lifecycle-Aspekte wie Ressourcenverbrauch, Auswirkungen auf den Energieverbrauch des Endpro-

dukts sowie Recyclingfähigkeit zu beachten. In diesem Multi-Parameter-Umfeld muss der Konstrukteur versuchen, einen vertretbaren Kompromiss zu finden. In jedem Fall ist er jedoch gefordert, das Potenzial des gewählten Werkstoffs so optimal wie nur möglich zu nutzen.

STOFFLICHER LEICHTBAU

Beim stofflichen Leichtbau wird versucht, die Bauteilmasse durch Umstellung auf einen Werkstoff mit geringerer Dichte zu reduzieren. Klassisches Beispiel für solche Substitutionen ist insbesondere im Automobilsektor der Wechsel von Stahl zu Aluminium, Magnesium oder sogar Kunststoffen, Bild 2. Die geringere Dichte dieser Werkstoffe trägt dazu bei, den Kraftstoffverbrauch zu senken und die Fahrdynamik zu verbessern. Vorteilhafte Auswirkungen können sich darüber hinaus – je nach Größe und Lage



»Es ist dringend zu empfehlen, die ins Auge gefassten Zulieferer so frühzeitig wie möglich am Entwicklungsprozess zu beteiligen.«

Dipl.-Ing. Andreas Kucharzewski ist Stellvertretender Fachbereichsleiter Forschung und Technik beim Industrieverband Massivumformung e. V. in Hagen.



BILD 1 Im Fahrwerk von Passagierflugzeugen - hier das Hauptfahrwerk des A 380 im Test - widerstehen geschmiedete Sicherheitsteile aus hochfesten Vergütungsstählen bei Start und Landung extremen dynamischen Belastungen (Bild: Airbus)

der Bauteile – durch Verlagerung des Fahrzeugschwerpunkts und Verbesserung des Fahrkomforts dank Verringerung der ungefederten Massen ergeben. Aufgrund der erheblichen Unterschiede in den maßgeblichen mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe ist es dabei nur in den seltensten Fällen möglich, die Geometrie des Teils unverändert zu übernehmen. Neben Unterschieden in Zugfestigkeit und Deformationsverhalten sind noch weitere Aspekte wie E-Modul, Härte, Schwingfestigkeit bei glatten oder bei gekerbten Bauteilen sowie die Druckbelastbarkeit der Oberfläche (Hertz'sche Pressung) zu beachten.

KONSTRUKTIVER LEICHTBAU

Beim konstruktiven Leichtbau versucht der Konstrukteur stattdessen, die gewünschte Funktion mit einem von der Dichte her vergleichbaren Werkstoff zu erfüllen. In erster Linie versucht er daher, Gewicht zu sparen, indem er die Geometrie des Bauteils den Belastungen so gut wie möglich anpasst. Dies erfolgt in der Regel mit Hilfe geeigneter Software, mit deren Hilfe sukzessiv die Topologie des Bauteils optimiert wird. Moderne FEM-Programme zur Topologieoptimierung erhalten als Vorgabe eine überdimensionierte Grobgeometrie im Bauraum zwischen den Anbindungspunkten, [Bild 3](#).

Die Optimierung erfolgt in sukzessiven Durchläufen, indem das Bauteil mit den vorgesehenen Lasten beaufschlagt und die entsprechende Verteilung der Spannungen im Material berechnet wird. Anschließend werden die finiten Elemente in den am wenigsten

belasteten Bereichen ausgeblendet und die Berechnung mit den neuen Vorgaben wiederholt. Diese Zyklen lässt man so lange ablaufen, bis das verbleibende Volumen eine homogenere Spannungsverteilung aufweist und damit der Werkstoff insgesamt besser ausgenutzt wird, [Bild 4](#). Die so erhaltene Geometrie wird danach für die weitere Bearbeitung in ein CAD-Modell überführt, das als Ausgangspunkt für die in einem zweiten Schritt erfolgende Gestaltoptimierung des Bauteils dient.

DIE UTOPIE VON DER ISOTROPIE

Wer Leichtbau betreiben will, muss sich von der immer wieder anzutreffenden Idealisierung verabschieden, dass der im Bauteil vorhandene Werkstoff weitgehend isotrope Eigenschaften aufweist. In der Realität überwiegen dagegen teils ausgeprägte Anisotropien der mechanischen und physikalischen Eigenschaften im Bauteil. Hauptursache hierfür sind im Wesentlichen die Besonderheiten des gewählten Fertigungsverfahrens. Besonders leicht einzusehen ist dies natürlich unter anderem bei Faserverbundwerkstoffen, die in Faserrichtung ganz andere Belastbarkeiten aufweisen als quer dazu, [Bild 5](#). Aber auch so gut wie jeder metallische Werkstoff weist Anisotropien auf, die für seinen Fertigungsprozess charakteristisch sind.

Besonderen Einfluss hat in diesem Zusammenhang auch die Wanddicke: Man wäre schlecht beraten, die Eigenschaften, die in einem 5-10 mm dicken Walzblech oder Gussteil dargestellt werden können, auch von einem 75 mm oder gar 500 mm dicken Rohteil zu erwarten. Zu beachten sind aber auch verfahrensbedingte Geometrieinschränkungen wie Wanddickenversprünge oder Hinterschneidungen sowie Eigenspannungszustände. Ihre Ausrichtung und Größe sind untrennbar mit der Fertigungshistorie des Bauteils verknüpft. Eine Nichtbeachtung kann unter anderem zu störendem Verzug nach mechanischer Bearbeitung oder abschließender Wärmebehandlung führen.

MIT DEM PROZESS KONSTRUIEREN

Für den Konstrukteur ergibt sich daraus, dass er seine Konstruktion im Hinblick auf den Fertigungsprozess ausführen sollte. Dies gilt nicht nur für die Festlegung der Geometrie, sondern auch für vielfache weitere Vorteile entlang der Gesamtprozesskette. Eine wesentliche Rolle spielen hierbei auch wirtschaftliche Aspekte, zum Beispiel die Nutzung von Hochtemperaturprozessen für die thermomechanische Behandlung zur Verbesserung der Eigenschaften. Optimale Ergebnisse sind nur bei genauer Kenntnis der Besonderheiten, Vorteile und Grenzen des Verfahrens möglich, beispielsweise durch gezielte Beeinflussung der Fließrichtung beim Umformen. Deshalb ist dringend zu empfehlen, die ins Auge gefassten Zulieferer so frühzeitig wie möglich am Entwicklungsprozess zu beteiligen. Nur so kann deren spezielles Prozesswissen möglichst nutzbringend direkt in die Auslegung des Bauteils einfließen.

VORTEILE DES MASSIVUMFORMENS

Beim Massivumformen, das im kalten, halbwarmen oder warmen Zustand - oder in Kombination unterschiedlicher Verfahren - aus-



BILD 2 Substitution: Beim Auto zählt jedes Kilo Gewichtseinsparung. Dieses mit Hilfe des innovativen Thixoforming-Verfahrens erzeugte Aluminium-Knotenelement für eine Autotür kann besonders hohe Kräfte aufnehmen (Bild: Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V., Schmiede-Journal März 2008)

geführt werden kann, wird das Bauteil mit Hilfe von Werkzeugen durch hohe Kräfte spanlos umgeformt. Das Material wird dadurch feinkristalliner, eventuell vorhandene Poren wurden geschlossen und Einschlüsse zusammen mit den Kristallen des Gefüges in Fließrichtung des Materials gestreckt. Nach dem Schmiedeprozess ist dann die typische Faserstruktur im Schmiedeteil zu finden, entlang derer die Belastbarkeit des Werkstoffs erhöht ist. Durch geeignete Wahl der Schmiedung kann dieser Faserverlauf gezielt in Richtung der Hauptbeanspruchungsverläufe im Bauteil ausgerichtet werden. Je nach Prozesstemperatur wird das Gefüge zudem kalt verfestigt oder feinkörnig rekristallisiert. Bei geeigneter Prozessführung bildet die Warmumformung dabei zugleich den ersten Schritt

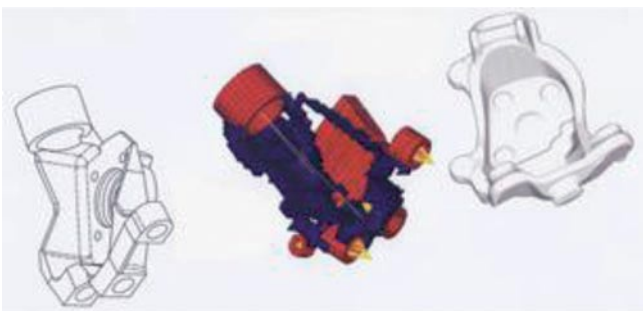


BILD 3 Topologieoptimierung eines Schwenklagers: Das aus der Kundenidee (links) erzeugte Grobmodell wird im Rechner sukzessive verschlankt (Mitte). Für das Endergebnis berücksichtigt der Konstrukteur noch die Erfordernisse des Schmiedeprozesses (Grafik: Hirschvogel Automotive Group)

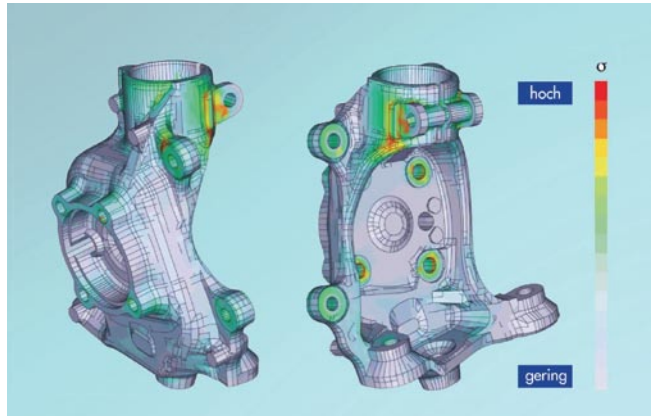


BILD 4 Die FEM-Analyse ermöglicht die virtuelle Untersuchung der im Bauteil auftretenden Belastungen und damit die abschließende Optimierung der Geometrie (Grafik: Hirschvogel Automotive Group)

einer thermomechanischen Behandlung mit positiven Auswirkungen auf die Feinkörnigkeit des Gefüges und die mechanischen Eigenschaften. Durch weitere Prozessschritte wie die nach dem Warmumformen übliche Reinigung durch eine Strahlbehandlung können zusätzlich Druckeigenspannungen in der Oberfläche erzeugt werden. Dies bewirkt eine Steigerung der Biegewechselfestigkeit.

Vielfach wirken sich die Vorteile des Massivumformprozesses erst im weiteren Verlauf der Prozesskette aus, zum Beispiel durch deutlich verringerte Bearbeitungskosten bei Zahnrädern mit einbaufertig geschmiedeter Verzahnung, Bild 6. Ein weiterer Vorteil steckt in der der großen gestalterischen Freiheit, welche das Verfahren bietet. Bei Nutzung der Vorzüge des bereits genannten Faserverlaufs kann zum Beispiel die Zahnfußfestigkeit eines Zahnrades um zirka 8 % gesteigert werden – bei Nutzung der gestalterischen Freiheit, in diesem



BILD 5 Der Umformprozess erzeugt im Bauteil eine Faserstruktur, welche die Belastbarkeit in Richtung der Fließlinien des Werkstoffs erhöht (Bild: Hirschvogel Automotive Group)



BILD 6 Gangräder mit einbaufertigen hinterstellten Kupplungsverzahnungen (Bild: Sona BLW Präzisionsschmiede)

Fall, indem die Zähne am kleinen und großem Modul an die Nabe „angebunden“ werden, erhöht sich der Vorteil auf rund 25 %. Wegen des fehlenden Freigangs für die heute eingesetzten Zerspanungswerkzeuge können vergleichbare Geometrie durch spanende Verfahren nicht hergestellt werden. Gleiches gilt zum Beispiel für innenverzahnte Innen-Steckverzahnungen, wo beim massivumgeformten Bauteil auf den ansonsten für die Stoßwerkzeuge notwendigen Auslauf verzichtet werden und die entsprechende Welle somit kürzer gestaltet werden kann. Selbstverständlich ist so auch dem konstruktiven Leichtbau gedient.

MODERNSTE IT-TOOLS

Für die Auslegung des Fertigungsprozesses verfügt der Konstrukteur heute über durchgängige CAx-Tools. Neben z. B. CAD und CAM kommen hier FEM-Programme zur Berechnung von Stoff-



BILD 8

Im Vergleich mit einer gegessenen Ausführung zeichnet sich die geschmiedete Ausgleichswelle durch ein um rund 1/3 geringeres Gewicht aus, was eine Gewichtseinsparung um bis zu 1 kg je Motor ermöglicht (Bild: Stahl-Informations-Zentrum im Stahl-Zentrum, Düsseldorf)

fluss und Wärmebehandlung zum Einsatz, mit deren Hilfe alle Schritte von der Simulation der Umformvorgänge im Werkstück über die Werkzeugauslegung bis zur Wärmebehandlung vorab an mathematischen Modellen prognostiziert werden können. Dies ermöglicht sowohl die Vorhersage und damit Vermeidung von Schmiedefehlern als auch die Vorhersage kritischer Belastungen der Schmiedegesenke. Dadurch wird es möglich, die Werkzeuglebensdauer durch geeignete Designanpassungen zu optimieren. Mittlerweile ist es sogar möglich, bei solchen Untersuchungen die Auswirkung der Werkzeugverformung auf den Materialfluss im Werkstück zu berücksichtigen, Bild 7.

Diese Möglichkeit der vollständig digitalen Simulation bietet vielfältige Vorteile vom prozessgerechten „Feintuning“ der Bauteilgeometrie noch während der Konzeptionsphase über die Kostenkontrolle bis zur Optimierung von nachgeschalteten Behandlungs-

BILD 7 Um Entwicklungszeiten zu verkürzen und Kosten zu reduzieren, bedient sich der Massivumformer komplexer Entwicklungswerkzeuge zur virtuellen Produktentwicklung (Bild: Bharat Forge)

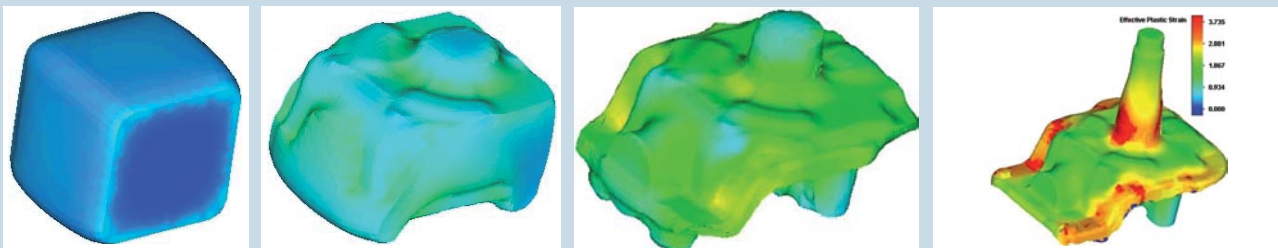
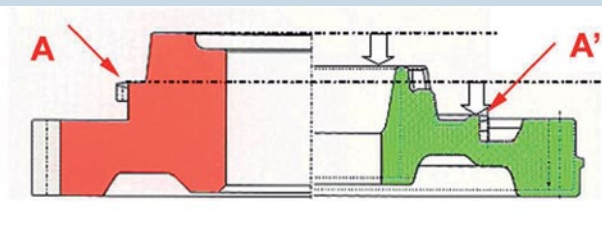
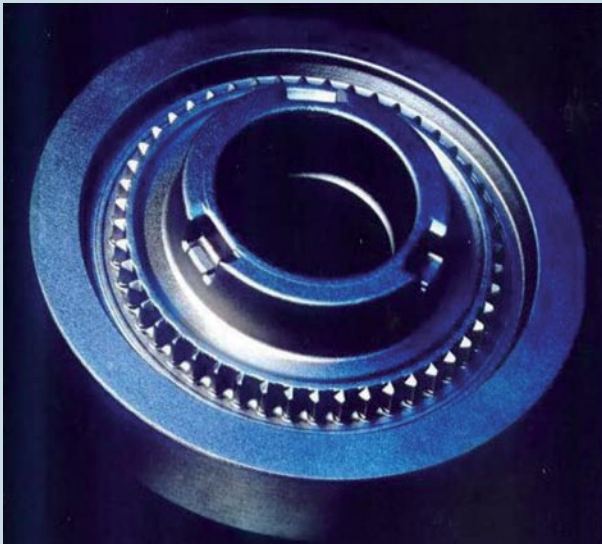


BILD 9 Das Präzisionsschmieden ermöglicht es, die Kupplungsverzahnung (A) teilweise in den Radkörper einzulassen (A'), wodurch die Zahnräder erheblich schmaler und damit auch leichter ausgeführt werden können (Bild: Sona BLW Präzisionsschmiede)



schritten. Wichtiger Nutzen für den Kunden sind verkürzte Entwicklungszeiten und die schnelle Verfügbarkeit von Prototypen, die bereits dem Serienstand entsprechen. Hinzu kommen weitere Vorteile sowohl beim Entwicklungsprozess selbst als auch bei der Produktion, denn die resultierenden Fertigungsprozesse lassen sich schnell hochfahren und auf hohem Niveau beherrschen.

OPTIMIERTE WERKSTOFFE

Einen wichtigen Beitrag zum Leichtbau liefert auch die in den letzten Jahren zu hoher Reife geführte Entwicklung verbesserter Werkstoffe sowohl bei Stahl- als auch bei Aluminiumlegierungen. Höhere Festigkeiten ermöglichen es, eine Konstruktion bei gleicher Belastung filigraner und damit leichter auszulegen. Vor allem bei Massenteilen spielen zudem Kostenaspekte eine wesentliche Rolle.

Bei Schmiedeteilen für den Automobilsektor dominieren deshalb heute mikrolegierte, ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische

(AFP) Stähle. Sie zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass ihre Wärmebehandlung einfach durch Abkühlung aus der Schmelztemperatur erfolgt, was in hohem Maße Kosten spart. Das Festigkeitsspektrum reicht dabei von 600 MPa bis 1050 MPa. In bestimmten Anwendungsbereichen kommen darüber hinaus Vergütungsstähle, nichtrostende Stähle sowie Sonderwerkstoffe für die Luft- und Raumfahrt zum Einsatz.

Bei Aluminium-Schmiedeteilen kommen meist ausscheidungshärtende Legierungen wie EN AW-6082/AlSi1MgMn zum Einsatz. Dieser Werkstoff vereint mittlere Festigkeit mit guter Duktilität und Korrosionsbeständigkeit. Diese Legierungen werden nach dem Schmieden bei Temperaturen um 500 °C lösungsgeglüht. Die gewünschte Eigenschaftskombination erhalten sie anschließend durch eine abgestimmte Auslagerungsbehandlung.

Sowohl bei Stahl- als auch bei Aluminiumwerkstoffen wird die Entwicklung noch höher belastbarer Werkstoffe kontinuierlich vorangetrieben. Bei Stählen interessiert man sich dabei besonders für bainitische Stähle wegen ihrer hervorragenden dynamischen Belastbarkeit. Hier wurden bereits Dehngrenzen von 1080 MPa dargestellt. Bei Al-Legierungen der korrosionsbeständigen 6000er-Reihe sind $R_{p0,2}$ -Werte von bis zu 400 MPa in der Pipeline.

BEISPIEL AUSGLEICHSWELLE

Mit dem Stahl-Innovationspreis 2009 ausgezeichnet wurde eine von den Firmen Schaeffler und Hirschvogel Umformtechnik gemeinsam entwickelte Leichtbau-Ausgleichswelle für PKW-Vierzylindermotoren. Solche Wellen weisen exakt ausgelegte Unwuchten auf, die einen Großteil der von der Hauptkurbelwelle verursachten Schwingungen kompensieren. Frühere Ausführungen waren als Gussteil ausgeführt und mit hydraulischen Gleitlagern versehen.

Im Vergleich mit einer gegossenen Ausführung zeichnet sich das jetzt entwickelte Schmiedeteil durch eine um rund 1/3 niedrigere Masse aus, was eine Gewichtseinsparung von bis zu 1 kg je Motor ermöglicht, Bild 8. Hauptvorteil ist die Verringerung der Reibungsverluste an der Ausgleichswelle um 50 %. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung eines induktiv härtbaren Stahls. Daher können Wälzkörper ohne Innenring direkt auf der gehärteten Welle laufen. Dies ermöglichte die Umstellung von Gleitlagern auf die reibungsärmeren Wälzlager. Insgesamt bewirkt diese innovative Ausgleichswelle eine Treibstoffersparnis von einem Prozent.

BEISPIEL ZAHNRÄDER

Mit Hilfe eines patentierten Präzisions-Schmiedeverfahrens stellt die Sona BLW Präzisionsschmiede Zahnräder für den Kfz-Antriebsstrang mit zum Teil direkt einbaufertiger Verzahnung her. Hierzu gehören Differenzial-Kegelräder mit optimierter Geometrie sowohl der Zahnflanken als auch des Zahnfußes, Bild 9. Darüber hinaus können im gleichen Prozessschritt noch weitere Nebenfunktionen integriert werden.

Noch eindrucksvoller zeigen sich die Vorteile des Verfahrens bei Getriebe-Gangrädern, auch wenn deren Laufverzahnungen aufgrund

BILD 10 Diese innovative Zahnrad-Verbundkonstruktion aus zwei verschiedenen Stählen sowie Aluminium ermöglicht eine Gewichtseinsparung von 5-10% (Bild: Neumayer Tekfor)



besonders hoher Genauigkeitsanforderungen noch konventionell spanend gefertigt werden müssen. Direkt einbaufertig geschmiedet werden dagegen die Kupplungsverzahnungen dieser Räder. Besonders vorteilhaft ist dabei aus Sicht des Getriebeherstellers, dass diese Verzahnung in den Radkörper eingelassen werden kann, wodurch die Zahnräder erheblich schmäler und damit auch leichter ausgeführt werden können. Je nach Zielsetzung wird es außerdem möglich, die Baulänge des Getriebes bei gleicher Gangzahl zu reduzieren oder alternativ mehr Gänge unterzubringen.

Weitere Vorteile ergeben sich durch die Integration wichtiger Zusatzfunktionen wie Mitnehmertaschen und Anschläge für Schiebemuffen. Auch auf der Rückseite des Radkörpers können Vertiefungen

und Versteifungsstege eingeschmiedet werden. Ebenso wie bei den Kupplungsverzahnungen ermöglicht das Schmieden auch hierbei, die erforderliche Genauigkeit und alle beschriebenen Funktionselemente in nur einem Prozessschritt zu erzeugen.

BEISPIEL VERBUND-GANGRÄDER

Eine sehr interessante Lösung zur Gewichtsreduzierung bei Getriebezahnrädern stellt die Neumayer Tekfor Gruppe vor. Statt das gesamte Bauteil monolithisch aus hochlegiertem und damit relativ teurem Stahl zu fertigen, entschied man sich hier für eine mehrteilige Verbundkonstruktion aus gleich drei Werkstoffen – zwei verschiedenen Schmiedestählen sowie Aluminium, Bild 10.

English abstract

Process-oriented design

Hot and cold forging – a process chain for lightweight design

Even among experts, the term “lightweight design” initially arouses the idea of designs made of exotic materials with a low density, such as fibre composites, high-performance plastics or titanium. However, considerable potential for saving weight can also be found in the more “classical” applications of conventional materials such as steel or aluminium. In such cases, a key role is often played by consistently using the advantages of the forging process.

Zugleich ermöglicht dies eine elegante Umgehung der Verzugs- und Verformungsprobleme, die sich dann ergeben, wenn zur Gewichtseinsparung die Wanddicke im Stegbereich zu stark verringern würde.

Bei der neuen Lösung besteht der Zahnkranz aus legiertem, für den Einsatz im Verzahnungsbereich bestens bewährtem Stahl, während im Nabenbereich ein preisgünstiger Kohlenstoffstahl für die erforderliche Drehmomentübertragung sorgt. Im geringer belasteten Steg sorgt eine leichte Aluminiumlegierung für eine Gewichtsreduzierung von rund 5- 10 %. Nabe und Zahnkranz werden zunächst über die klassische Prozesskette – Schmieden, Bearbeiten, Härten beziehungsweise Einsatzhärten – vorgefertigt. Im nächsten Schritt werden Nabe und Zahnkranz mit Hilfe eines eingepressten Aluminiumkörpers zum kompletten Zahnrad verbunden. Dabei sorgen einbaufertig in die Stahlkörper eingeschmiedete Profilverzahnungen für eine formschlüssige Verbindung und damit für die sichere Übertragung hoher Drehmomente.

Bei diesem Umformprozess werden im Aluminiumkörper gezielt Spannungen erzeugt, welche die unterschiedliche Wärmeausdehnung von Stahl und Aluminium kompensieren und so Betriebs-

icherheit über den gesamten Einsatztemperaturbereich garantieren. Letzte Arbeitsgänge sind dann das Verzahnungsschleifen der Außenverzahnung und gegebenenfalls die Hartbearbeitung der Nabenbohrung. Das dargestellte Produkt kann ob der komplexen Bauweise den wirtschaftlichen Vergleich zur Monobloc-Bauweise selbstverständlich nur unter Berücksichtigung der aus dem geringeren Gewicht erwachsenden Vorteile bestehen. ●

Der Autor:

DIPL.-ING. ANDREAS KUCHARZEWSKI ist Stellvertretender Fachbereichsleiter Forschung und Technik beim Industrieverband Massivumformung e. V. in Hagen.

Innovate! Steel
Werkstoff. Technologie. Know-how.

**welser
profile** 

Die neue Dimension der Kaltwalzprofilierung – Prozessintegrierte Banddickenoptimierung

Die im Profilierprozess integrierte Banddickenoptimierung ist die wirtschaftlich-technische Antwort auf die Frage nach belastungs- und funktionsoptimierten Längsbauteilen aus Stahl und Nichteisenmetallen. Dabei wird das Band je nach geforderter Funktionalität des Profilbereiches, inline, in nur einem einzigen Fertigungsprozess, in der Dicke reduziert, genutet oder an den Enden angestaucht und zum gewünschten Querschnitt verformt.

Besuchen Sie uns
auf der **Tube**
Düsseldorf 

12. - 16. April 2010
Halle 070, Stand 70C22

Welser Profile GmbH
Edisonstraße 23 • D-59199 Bönen / Deutschland
Tel (+49 2383) 914-0 • de@welser.com

Welser Profile AG
Prochenberg 24 • A-3341 Ybbsitz / Österreich
Tel (+43 7443) 800-0 • at@welser.com

www.welser.com