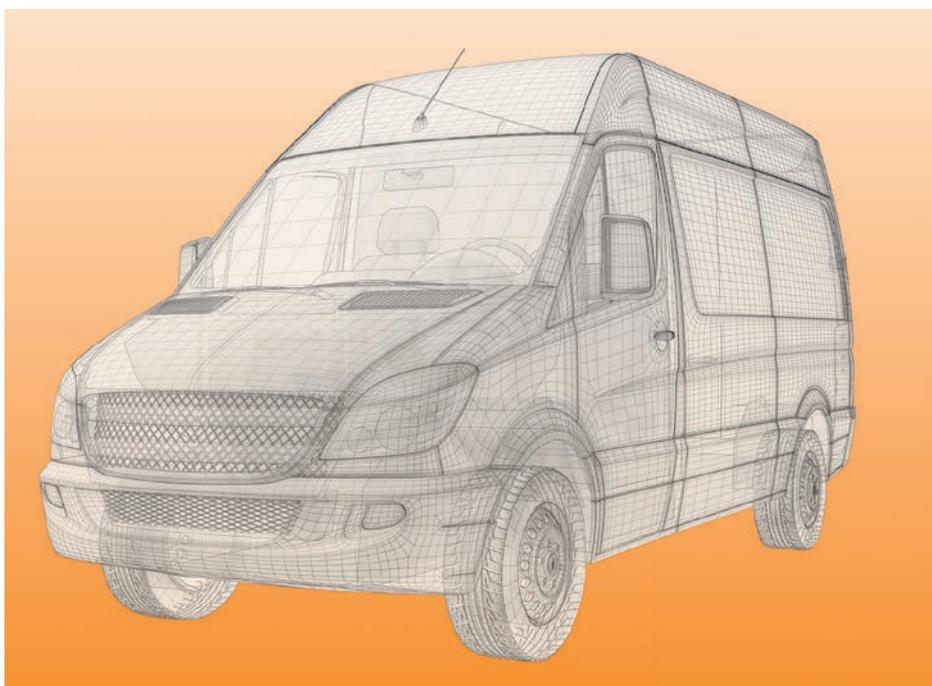


Lightweight Forging Initiative – Phase II: Lightweight Design Potential for a Light Commercial Vehicle

The Lightweight Forging Initiative was formed in 2013 by 15 forging and 9 steelmaking companies under the auspices of the German Forging Association (IMU) and the Steel Institute VDEh. During

Phase I, a medium-sized passenger car was analysed and a lightweight design potential of 42 kg was identified for components in the powertrain and chassis [1]. Based on the tremendous customer interest which the results generated and driven by the intensive cooperation of the two participating industries, a decision was made to launch Phase II in 2015 to focus on the lightweight design potential of forgings in a light commercial vehicle. Phase II of the Lightweight Forging Initiative brings together 17 forging companies, 10 steelmakers and one engineering service supplier.

Initiative Massiver Leichtbau – Phase II: Leichtbaupotenzial für ein leichtes Nutzfahrzeug



Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt,
Denklingen,
Dipl.-Ing. Frank Wilke,
Siegen und
Dr.-Ing. Christian-Simon
Ernst, Aachen

Die Initiative Massiver Leichtbau wurde 2013 durch 15 Umformunternehmen und 9 Stahlhersteller unter der Schirmherrschaft des Industrieverbands Massivumformung e. V. (IMU) und des Stahlinstituts VDEh ins Leben gerufen. In der ersten Phase wurde ein Mittelklasse-Pkw untersucht und ein Leichtbaupotenzial von 42 kg bei Antriebsstrang- und Fahrwerksbauteilen erarbeitet [1]. Aufgrund des großen Interesses der Kunden am Ergebnis und angetrieben durch die intensive Kooperation der beiden beteiligten Industriezweige wurde entschieden, 2015 die zweite Phase zu lancieren, die sich nun auf das Leichtbaupotenzial eines leichten Nutzfahrzeugs konzentriert. Die zweite Phase brachte 17 Umformunternehmen, 10 Stahlhersteller und einen Ingenieurdienstleister zusammen.

Das Fahrzeug

In Phase I der Initiative Massiver Leichtbau wurde ein Mittelklasse-Personenkraftfahrzeug analysiert. Für die Phase II wurde ein leichtes Nutzfahrzeug (LNFz) ausgewählt. Im Gegensatz zu Autos wächst das Gewicht von LNFzs immer noch mit jeder Fahrzeuggeneration an. Ebenso wie bei Autos wird allerdings auch hier die Reduzierung der CO₂-Emission vorgegeben. Schließlich sind die Gesamtbetriebskosten kritischer zu betrachten als bei Pkws – Leichtbauresultate wie das Senken des Kraftstoffverbrauchs beeinflussen die Kaufentscheidung stärker als bei Pkws [2]. Das gewählte Fahrzeug verfügt über einen Vierzylinder-Dieselmotor mit 2,1 l Hubraum und 120 kW Leistung sowie ein 6-Gang-Schaltgetriebe und Heckantrieb und repräsentiert damit die meistverkaufte Variante.

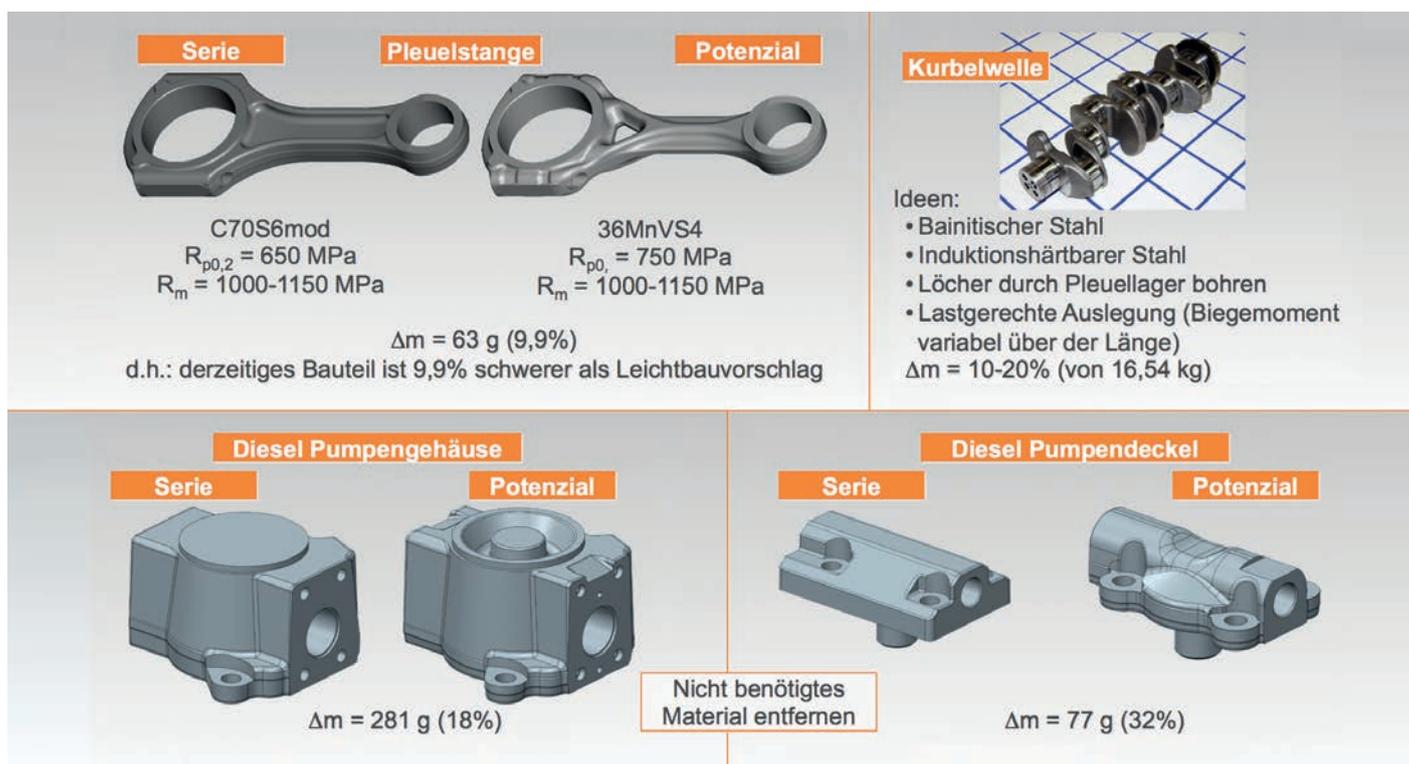


Bild 1: Leichtbaupotenzial in Dieseleinspritzsystem und Motor.

Bilder: Schmiedetechnik Plettenberg, ArcelorMittal, Saarstahl, Georgsmarienhütte, Linamar Seissenschmidt Forging, Sachs engineering, Hirschvogel Automotive Group

Vorgehensweise und Ergebnisse

Das Verfahren zum Generieren von Ideen mit Leichtbaupotenzial entsprach dem der Phase I der Initiative Massiver Leichtbau [1]. Jedes Bauteil des Antriebsstrangs und des Fahrwerks wurde hinsichtlich Gewicht, Werkstoff und Herstellprozess dokumentiert und in einer

Datenbank gespeichert. Hierzu wurden Fotos verschiedener Perspektiven einschließlich Einbaulage angefertigt. Anschließend fanden zwei Hands-on-Workshops statt, um alle 2.536 Bauteile zu analysieren und Ideen für Leichtbaupotenzial zu erarbeiten. Insgesamt wurden 535 Leichtbaupotenzialideen generiert.

Für das gesamte Fahrzeug wurde ein Gesamtleichtbaupotenzial durch alternative Werkstoffe, Leichtbauschmiedeauslegung und Leichtbaukonzepte von 99 kg identifiziert. Nach der Analyse von 535 Leichtbauideen an 2.536 Bauteilen in Antriebsstrang, Fahrwerk und Getriebe hat sich auch beim leichten Nutz-

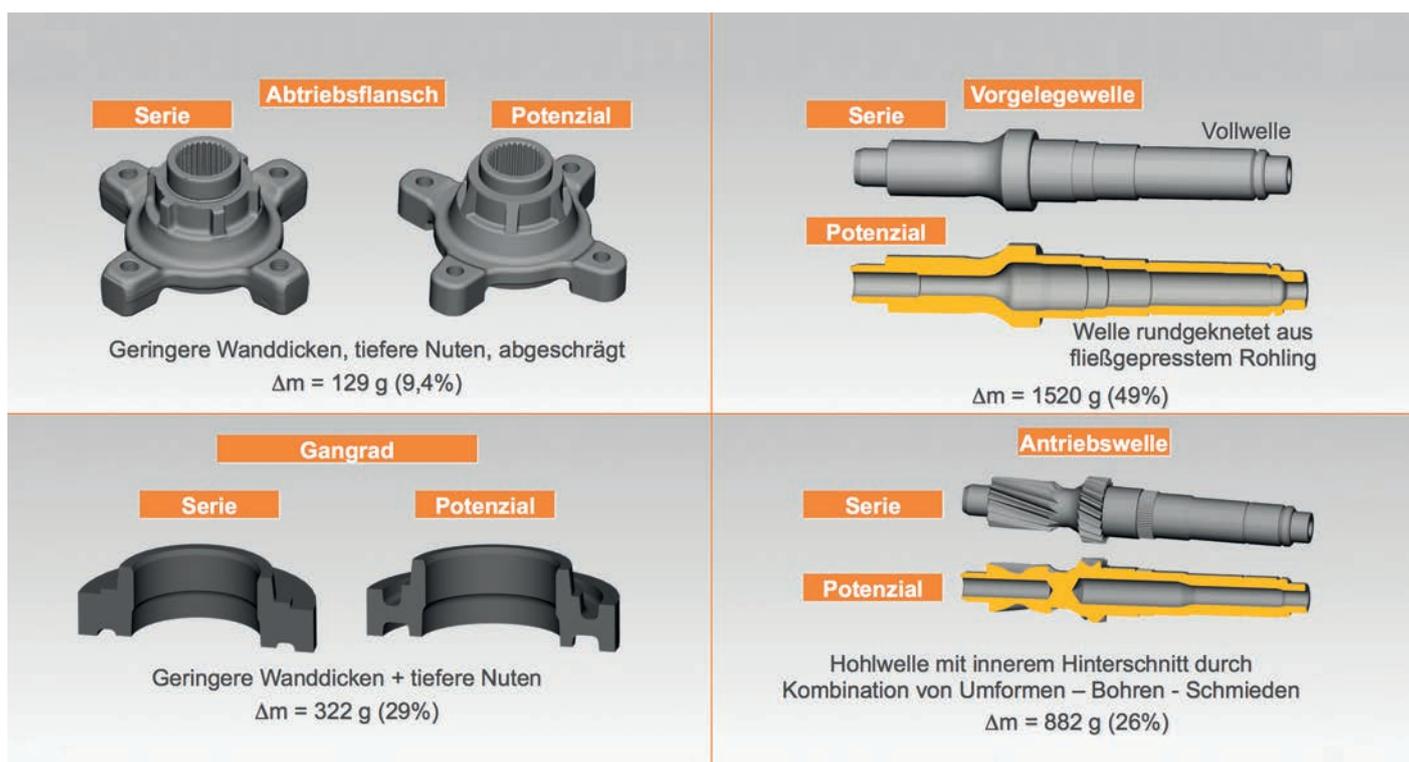


Bild 2: Leichtbaupotenzial am Schaltgetriebe.

Bilder: Hammerwerk Fridingen, Felss Group, Hirschvogel Automotive Group, Linamar Seissenschmidt Forging

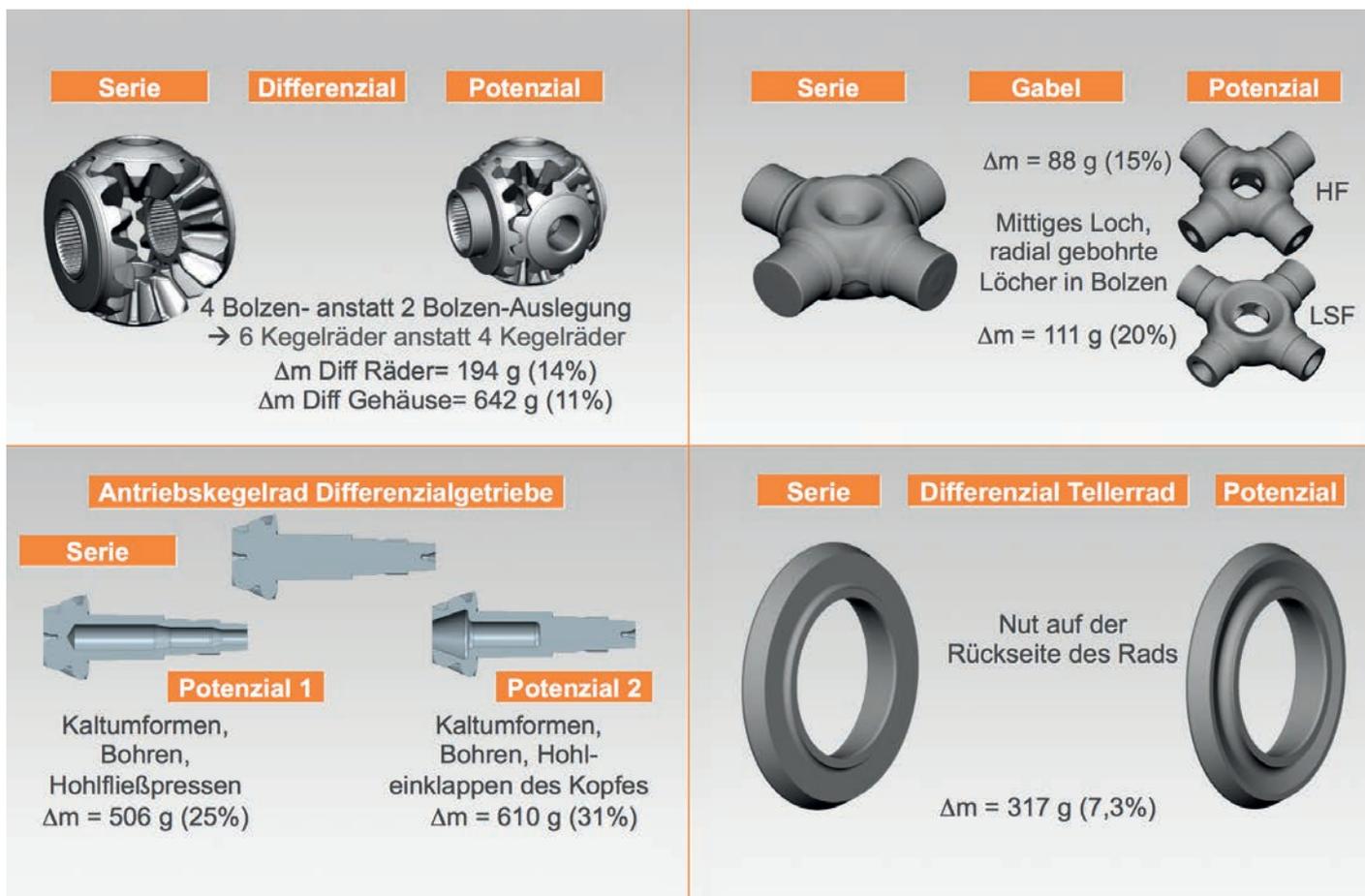


Bild 3: Leichtbaupotenzial im Antriebsstrang.

Bilder: Metaldyne, Hammerwerk Fridingen, Linamar Seissenschmidt Forging, Hay Group, Hirschvogel Automotive Group

fahrzeug ein enormes Leichtbaupotenzial von 65 Kilogramm allein durch die auf dem Werkstoff Stahl beruhenden Leichtbaupotenzial-Vorschläge ergeben. Weitere 34 Kilogramm können durch den Einsatz von Nichteisenwerkstoffen erreicht werden. Hochfester Stahl bleibt jedoch der wichtigste Leichtbauwerkstoff. Das Gewicht von Antriebsstrang und Fahrwerk liegt beim untersuchten Fahrzeug 13,3 Prozent über dem durch Umsetzung des besten Leichtbauvorschlages erreichbaren (oder: das Gewicht kann um 11,7 Prozent reduziert werden).

Im Folgenden werden einige Leichtbaupotenziale präsentiert, um die Auswirkung von Werkstoff und Schmiedetechnologie auf Bauteil- und Systemgewicht zu demonstrieren. Bei Angabe prozentualer Gewichtsverhältnisse ist stets die vorgefundene Komponente x Prozent schwerer als die Leichtbauvariante.

Motor

Der Motor ist direkt auf der Vorderachse platziert und trägt zusammen mit dem Getriebe entscheidend zum Fahrzeuggewicht bei. Diese Bauteile sind großen Belastungen und sehr hohen Ermüdungszyklen ausgesetzt. Dennoch sind Gewichtseinsparungen an diesen Komponenten möglich. In Bild 1 sind einige Beispiele von Leichtbauvorschlagen dargestellt. Pleuelstangen im Verbrennungsmotor weisen in nahezu allen Motoren weltweit eine

ähnliche Form auf. Kürzlich wurden neue Geometrien zur Gewichtsreduzierung vorgeschlagen, die jedoch eine ähnliche Steifigkeit, Knicklast und Belastbarkeit aufwiesen. Zusammen mit einem optimierten Stahl könnte das Pleuelstangengewicht um 10 Prozent verringert werden. Die Kurbelwelle ist eine der schwersten Einzelkomponenten im Motor. Neue Stähle und geometrische Optimierungen könnten, insbesondere in Kombination, zu bedeutenden Gewichtsreduzierungen führen. Im Kraftstoffeinspritzsystem können sowohl beim Dieselpumpengehäuse als auch beim Hochdruckpumpendeckel durch Ausschöpfen des vollen Potenzials der freien Gestaltungsmöglichkeiten der Umformtechnik Gewichtseinsparungen realisiert werden. In Bild 1 nicht dargestellt, aber dennoch erwähnenswert: Das Common-Rail dieses Fahrzeugs kann 293 g leichter sein, was bedeutet, dass das Serienbauteil 27 Prozent schwerer ist als die Leichtbauversion. Dies wäre erreichbar, wenn das Rail nicht wie bisher als Rohr mit zusätzlichen Funktionsgeometrien, sondern als Freiform mit unterschiedlichen Durchmessern und dennoch exakt gleicher maximaler Spannung in höchstbelasteten Bereichen gestaltet werden würde.

Getriebe

Das Schaltgetriebe dieses Fahrzeugs wiegt 60,8 kg. Die Schmiedekomponenten dieses Systems tragen nahezu 22 kg hierzu bei. Fol-

lich kann durch Gewichtseinsparungen an Wellen, Zahnradern oder dem Abtriebsflansch das Systemgewicht signifikant gesenkt werden (Bild 2).

Der Abtriebsflansch des Fahrzeugs verfügt bereits über komplexe Formen zur Gewichtseinsparung. Tiefere Nuten und zusätzlich abgeschrägte Seiten können dennoch mehr Masse einsparen (Bild 2). Die Wellen lassen eine hohle Ausführung entweder durch Rundkneten vom Rohr oder vom fließgepressten Rohteil zu. Eine alternative Fertigungsmethode für ein Hohlteil stellen Kaltumformung, Bohren und ein anschließendes Hohlfließpressen dar, was ebenso einen inneren Hinterschnitt ermöglicht. Es zeigt sich, dass verschiedene Herstellprozesse zu signifikanten Gewichtseinsparungen führen können. Letztendlich werden das Endgewicht, die Produktionskosten und der Gesamtmaterialeinsatz – sofern Ressourceneffizienz bewertet wird – betrachtet werden müssen, um die endgültige Fertigungsmethode auszuwählen. Die letzte Idee in diesem System betrifft die Zahnradern, hier meist rotationssymmetrisch: Bei diesen Teilen führen geringere Wandstärken und tiefere Nuten, die umformtechnisch machbar sind, zu entscheidenden Gewichtseinsparungen.

Weiterer Antriebsstrang

Vom Getriebe bis zur angetriebenen Radnabe übertragen viele Komponenten das Drehmo-



Bild 4: Leichtbaupotenzial im Fahrwerk – überwiegend Vorderachse.

Bilder: Otto Fuchs, Felss Group, Leiber Group, Fuchs Schraubenwerk, Kamax Automotive

ment. Die Gewichtseinsparung dieser Bauteile reduziert einerseits die translatorisch beschleunigte Masse, andererseits darf jedoch in Getriebe und Antriebsstrang deren Rotationsfähigkeit nicht unbeachtet bleiben. Hier trägt das Einsparen von Masse zweifach zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs bei.

Im Differenzialgetriebe stellen die Kegelräder, heutzutage meist net-shape geschmiedet, das zentrale Subsystem dar. Ein Vorschlag ist die Umstellung des Zwei- auf ein Vier-Bolzen-Subsystem mit Erhöhung der Anzahl der Kegelräder um zwei. Durch die geringere Belastung der Zähne könnte das Gesamtgewicht der Kegelräder so um 194 g reduziert werden. Durch den geringeren Einbauraum kann auch die Größe des Gehäuses verringert und um ein geschätztes Gewicht von 642 g gesenkt werden (Bild 3). Das Kreuz in der Kardangabel wird, abhängig von der Drehmomentbelastung mittels eines zentralen Lochs und einer Radialbohrung durch die Bolzen gewichtsreduziert. Das Tellerrad im Differenzialgetriebe kann durch Einbringen einer geschmiedeten Nut an der Rückseite und gleichzeitigem Belassen von genügend Material unter den Zähnen Gewicht verlieren. Schließlich ist es möglich, das Antriebskegelrad teilweise hohl zu fertigen. Die Kombination aus Schmiede- und Zerspanntechnik bietet unterschiedliche Lösungen, die verschiedene Mengen an Gewicht einsparen können und für verschiedene Aufspan- und

Zerspankonzepte auf Kundenseite geeignet sind. Auch in der Kardanwelle bietet sich ein bemerkenswertes Leichtbaupotenzial durch Umgestaltung eines Subsystems an: Es wird vorgeschlagen, die konventionell verzahnte Nabe-Welle-Verbindung durch eine Hirthverzahnung an beiden Bauteilen (Gabel/Flansch) zu ersetzen. Dies könnte erhebliches Gewicht durch Materialreduzierung weit entfernt von der Rotationsachse und möglicherweise einige Schrauben und Muttern einsparen.

Fahrwerk

Das Fahrwerk trägt das Fahrzeug und ist als sicherheitsrelevantes System ausgelegt. Dennoch ist hier die Leichtbaugestaltung aufgrund eines hohen Anteils ungefederter Masse besonders vorteilhaft.

Geschmiedete Aluminiumräder können die zurzeit beschichteten Stahlblechräder ersetzen. Aus EN AW 6082 geschmiedete Räder in T6 wärmebehandeltem Zustand weisen eine Streckgrenze ($R_{p0,2}$) von 330 MPa und eine Zugfestigkeit (R_m) von 360 MPa bei guter Duktilität auf. Das vorgeschlagene Al-Rad ist für eine Radlast von 975 kg ausgelegt (Bild 4). Heute findet man geschmiedete Aluminiumräder hauptsächlich in der Pkw-Oberklasse. Die Entscheidung für einen Werkstoff zur Ausschöpfung von Leichtbaupotenzialen hängt in jedem Fall insbesondere von den Kosten und

zusätzlichen Kriterien wie Ressourceneffizienz und dem CO₂-Ausstoß in der Produktion ab. Das vordere Dämpfersystem der Achse beinhaltet einen massiven Dämpferkolben, der durch eine rundgeknietete hohle Ausführung mehr als die Hälfte des derzeitigen Gewichts einsparen könnte. Ein weiterer Materialaustausch wird für das Schwenklager vorgeschlagen: Gusseisen ($R_{p0,2}$ 250 MPa, R_m 400 MPa) könnte durch geschmiedetes Aluminium ($R_{p0,2}$ 360 MPa, R_m 400 MPa) ersetzt werden. Nach bionischer Optimierung (Topologieoptimierung und linearelastische FEM gegen plastisches Fließen) ist das gegenwärtig eingesetzte Bauteil 174 Prozent schwerer als der Leichtbauvorschlag.

Schrauben und Muttern sind im gesamten Fahrzeug allgegenwärtig. Die Optimierung dieser Teile spart jeweils nur wenige Gramm ein. Multipliziert mit ihrer großen Anzahl, ist dennoch eine erhebliche Gewichtseinsparnis möglich. Dies gilt für die Schrauben zum Befestigen der Räder an den Bremsscheiben und Radnaben, wobei die Gesamtmenge an Schrauben nur 24 Stück beträgt. Allerdings liegt die Gewichtseinsparnis pro Teil bei 12 g je Schraube, was sich pro Fahrzeug auf 288 g summiert, eher hoch (Bild 4). Ein weiterer Vorschlag betrifft eine gering ausgeprägte Vertiefung im Kopf der Schrauben, die aber an Schrauben jeglicher Größe angebracht werden kann. Die Gewichtseinsparung je Schraube liegt zwischen

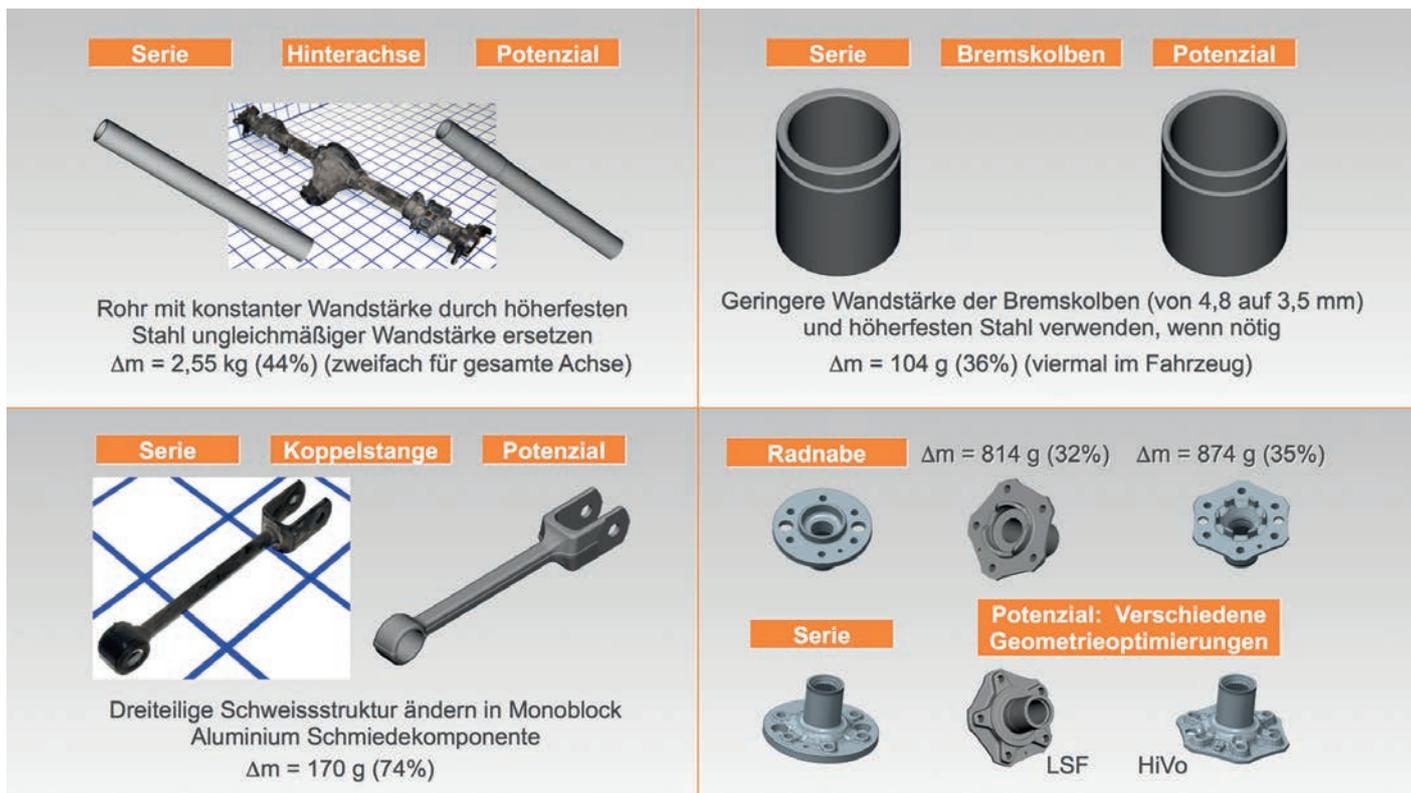


Bild 5: Leichtbaupotenzial im Fahrwerk – Hinterachse.

Bilder: voestalpine Metal Engineering, Schondelmaier Presswerk, Hirschvogel Automotive Group, Linamar Seissenschmidt Forging, Otto Fuchs

0,52 g und 10,2 g (bei Schlüsselweiten von 10 bis 27 mm). Die Verminderung des Gewichts für das gesamte Fahrzeug wird auf zirka 700 g bei einem gleichzeitigen Kostenanstieg von nur zirka 5 Prozent geschätzt. Zudem wurden im gesamten Fahrzeug nur Verbindungselemente mit einer Festigkeit unterhalb der Klasse 10.9 gefunden. Das Ausnutzen der Festigkeitsklasse 10.9 könnte sogar noch weiteres Leichtbaupotenzial einbringen.

Bild 5 stellt einige Vorschläge des Leichtbaupotenzials der Hinterachse dar. Das Rohr, welches das Differenzialgetriebegehäuse beidseitig mit den Radträgern verbindet, stellt einen großen Gewichtsanteil dieses Teilsystems dar. Derzeit wird dieses Rohr aus St52 mit einer Streckgrenze $R_{p0,2}$ von 420 MPa gefertigt. Die Umstellung des Stahlwerkstoffs auf 20MnV6, thermomechanisch gewalzt, steigert die Streckgrenze auf 600 MPa und erlaubt so die Verringerung der Wandstärke in nicht geschweißten Bereichen. Das derzeitige Rohr ist um 44 Prozent schwerer als der Leichtbauvorschlag. In der Bremse lässt sich die Wandstärke des Kolbens von 4,8 auf 3,5 mm reduzieren. Für die im Fahrzeug vierfach vorhandene Radnabe wurden unterschiedliche Ansätze vorgeschlagen, abhängig von den Produktionsmöglichkeiten der jeweiligen Zulieferer. Grundsätzlich überwiegen unrunde, steifigkeitsoptimierte Geometrien. Die derzeitigen Bauteile sind mehr als 30 Prozent schwerer als die Leichtbauvorschläge. In Bild 5 ist unten links ein möglicher Werkstoffersatz dargestellt. Tauscht man eine dreiteilige geschweißte Stahlbaugruppe ge-

gen ein Monoblock Aluminium-Schmiedeteil aus, erweist sich das Stahlbauteil im Vergleich zu dem Leichtbauvorschlag als 74 Prozent schwerer. Das Aluminiumbauteil bedarf jedoch einiger Zerspanungsvorgänge, ist aber von den Ideen die prozesstechnisch interessanteste.

Leichtbaupotenzial Werkstoffe

- **Materialentwicklung im Allgemeinen**
Obwohl Schmieden und Stahlproduktion seit langer Zeit angewandte Technologien sind, gibt es fortwährende Verbesserungen auf diesem Gebiet. Etablierte und genormte Stahlqualitäten werden permanent optimiert. Ein weiterer starker Trend der Schmiedeindustrie ist derzeit die Einführung bainitischer Stähle, die die Festigkeit vergüteter Stähle mit hoher Kosteneffizienz, erzielt durch kontrollierte Abkühlung nach der Umformung anstelle des Härteprozesses, vereinen [3].
- **Stärkere Stähle – leichtere Getriebe (und andere Verzahnungsanwendungen)**
Leichtbau muss auf dem gesamten Gebiet der Fahrzeugtechnik angewendet werden. Daher findet es die Initiative Massiver Leichtbau lohnenswert, das Verhältnis zwischen der Kostensteigerung durch Legierungselemente oder höher entwickelte Stahlerzeugungsprozesse (zur Verbesserung der Stahlreinheit) und möglichem erzielbarem Leichtbau von Getrieben zu untersuchen. Mit Gestaltungsparametern der DIN 3990/ISO 6336 und sinnvoller Nutzung von Festigkeitswerten, wie von der FVA [6] für hier verwendete mittellegierte Stähle vorgeschlagen, errechnet ein mit MS Excel erstelltes

Getriebemodell ziemlich genau das Gewicht des Getriebes, welches in dem hier untersuchten leichten Nutzfahrzeug analysiert wurde.

Anhand dieser Tabelle lässt sich der Gewichtsvorteil im Vergleich zu den Mehrkosten für Stahlwerkstoff leicht auswerten.

Um dies realistisch durchzuführen, wurde ein Modell für ein Doppelkupplungsgetriebe eines anderen Fahrzeugherstellers (aus Phase I der Initiative Massiver Leichtbau [1]) erstellt. Dieses setzt auf einen hoch legierten Einsatzstahl. Wieder berechnet das Modell Getriebe-gewicht und -größe ziemlich zutreffend.

Wäre das Schaltgetriebe aus dem hoch legierten Stahl, der im Doppelkupplungsgetriebe eingesetzt wird, müssten zirka 21 kg Wellen und Zahnräder durch höher legierten Stahl ersetzt werden. Bei einem Anstieg der Stahlkosten um 5 Euro wäre ein Einsparpotenzial von 2,45 kg am Getriebe möglich. Dies entspricht 2 Euro pro kg Gewichtsersparnis.

Angenommen das Einsatzgewicht für Schmiedebauteile sinkt im gleichen Maß um 2,45 kg, kann die finale Schlussfolgerung gezogen werden, dass eine Gewichtsreduzierung von 2,45 kg bei einer Kostensteigerung von weniger als 1 Euro pro kg erspartem Gewicht erreicht werden kann.

Fazit und Ausblick

Die Initiative Massiver Leichtbau demonstriert anhand von zwei unterschiedlichen

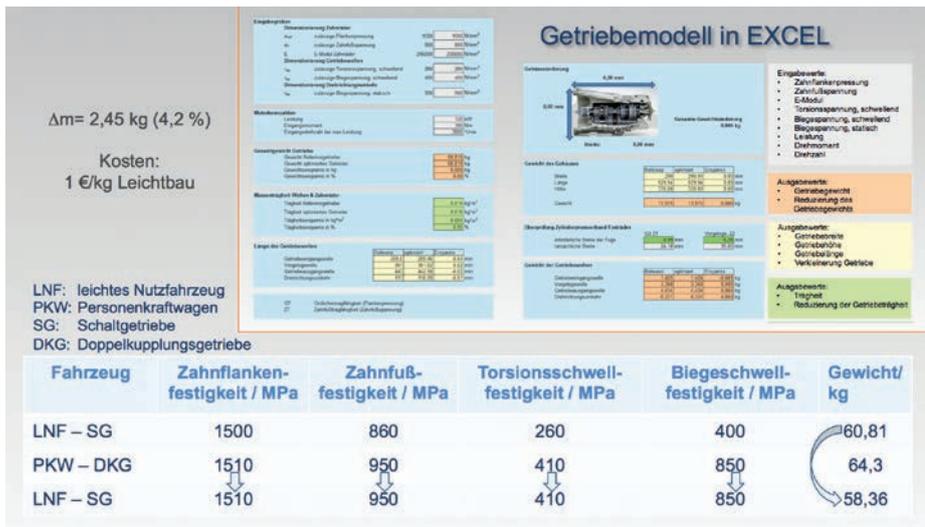


Bild 6: Getriebemodell in MS Excel.

Bild: IPEK – Institut für Produktentwicklung des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), Initiative Massiver Leichtbau

Fahrzeugen (Personenkraftwagen und leichtes Nutzfahrzeug), dass moderne Schmiedewerkstoffe und Schmiedetechnologie einen entscheidenden Beitrag zu den Leichtbauanforderungen der Automobilindustrie leisten können. In Phase II wurde die Bedeutung und Leistungsfähigkeit hochwertiger Stähle in Getriebeanwendungen intensiv hervorgehoben. Die optimale Abstimmung von Bauteilgestaltung, Werkstoff und Fertigungstechnik

ermöglicht die Entwicklung von Leichtbaulösungen hoher Qualität für die Massenproduktion zu wettbewerbsfähigen Kosten.



Dr. Hans-Willi Raedt



Frank Wilke



Dr. Christian-Simon Ernst

Literatur

[1] Raedt, H.-W., Wilke, F., Ernst, C.-S.: The Lightweight Forging Initiative - Automotive Lightweight Design Potenzial with Forging. Springer, ATZ 03|2014, Volume 116.

[2] Ernst, C.-S., Busse, A., Göbbels, R.: Massiver Leichtbau 2.0: Leichtbaupotenziale massivumgeformter Komponenten im leichten Nutzfahrzeug (LNF). fka, Initiative Massiver Leichtbau, interne Präsentation. Aachen, 19. März 2015.

[3] Raedt, H.-W., Speckenheuer, U., Vollrath, K.: New Forged Steels – Energy-efficient Solutions for Stronger Parts. Springer, ATZ 03.2012.

[4] Gladhstein, L.I., Filippov, G.A.: Strong bolts with increased resistance to delayed brittle failure. Springer, Steel in Translation 2009-07.

[5] Pohl, M.: Hydrogen in Metals: A Systematic Overview. Hanser, Pract. Metallogr. 51 (2014).

[6] www.fva-net.de

[7] Krauss, C., Andersohn, G., Oechsner, M.: Umgebungseinfluß auf den korrosionsbedingten Wasserstoffeintrag in hochfeste Stähle bei Anwendung von modernen Korrosionsschutzsystemen auf Zinkbasis. Zentrum für Konstruktionswerkstoffe, TU Darmstadt, Interim Project Report, 17. Nov 2014.

[8] www.massiverLEICHTBAU.de (Stand 12. Juli 2015)

Informationen zur Initiative und zum im Mai 2015 gestarteten Forschungsverbund „Massiver Leichtbau“ auf www.massiverLEICHTBAU.de