

ATZ extra

Oktober 2014



Das Projekt **ThyssenKrupp InCar plus**

Lösungen für automobiler Effizienz

INNOVATION

Liebe Leserin, lieber Leser,

im 111. Jahrgang der ATZ, und zwar 2009, erschien unsere erste Dokumentation eines firmeninternen Forschungs- und Entwicklungsprojekts: InCar. Der Grund war, dass ThyssenKrupp damals nicht nur einzelne Innovationen, sondern einen ganzen Baukasten von Lösungen entwickelt und vorgestellt hat. Diesen Ansatz hat der Konzern mit InCar plus jetzt weiter ausgebaut. Denn 2009 stellten noch die Bereiche Karosserie und Fahrwerk einen deutlichen Schwerpunkt dar. Heute teilen sich die in interdisziplinären und geschäftsreichsübergreifenden Teams entwickelten Lösungen gleichgewichtig auf die drei Themenfelder Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie auf. In InCar plus steckt damit das gesamte automobile Know-how des Konzerns.

Ausdrückliches Ziel der Weiterführung war es, den bisherigen Stand der Technik zu übertreffen, und zwar in mindestens einem der Kriterien Nachhaltigkeit, Gewicht, Wirtschaftlichkeit und Performance. Dabei standen umweltschonende Lösungen rund um Energieeffizienz, Elektromobilität und Leichtbau im Mittelpunkt. Sie alle dienen dem übergeordneten Ziel, Fahrzeughersteller zu unterstützen und ihnen Wettbewerbsvorteile zu verschaffen.

Und was ThyssenKrupp in über 30 Teilprojekten mit mehr als 40 Einzellösungen auf die Beine gestellt hat, ist wirklich sehr bemerkenswert. Viele weisen einen sehr hohen Reifegrad auf und sind meist leicht in die Serienproduktion integrierbar. Teilweise entwickelte ThyssenKrupp an der einen oder anderen Stelle die entsprechende Fertigungs- und Montageverfahren für eine Umsetzung in die Großserie gleich mit.

Doch auch das Thema Verantwortung wird großgeschrieben, denn mit vielen Lösungen kann die Ökobilanz verbessert werden. Nicht zuletzt, weil der Konzern den gesamten Lebenszyklus der Produkte und Komponenten im Blick hat, statt nur auf Teilabschnitte zu schauen.

Mit diesem ATZextra erhalten Sie einen Einblick in die Ergebnisse des größten herstellerunabhängigen Forschungsprojekts eines Zulieferers und gleichzeitig des größten Einzelprojekts von ThyssenKrupp. Ich wünsche Ihnen viel Spaß bei der spannenden Lektüre.



DR. ALEXANDER HEINTZEL, Chefredakteur
Wiesbaden, 12. September 2014





EINLEITUNG

- 8 InCarplus: Lösungen für automobiler Effizienz

ANTRIEB

- 12 Neue Ideen für sparsamere Motoren
- 13 Reibungsreduzierung bei Nockenwellen
- 16 Nockenwellenintegriertes Ölabscheidesystem
- 19 Hybrid-Schiebenocken verbessern Hubumschaltssysteme
- 21 Nockenwellenmodule – Optimierung durch Hybridbauweise
- 24 Warmfeste, dichterduzierte Stähle für Abgasanlagen
- 26 Interdisziplinäre Expertise optimiert Elektroantriebe
- 27 Hochfestes, nicht kornorientiertes Elektroband

- 32 Bondal E verbessert die Akustik von Elektromotoren

- 34 Leichtbau-Rotor mit integrierter Kühlung

- 38 Bauraum- und kostenoptimierte Wellen für elektrische Antriebe

- 41 Leichte, elektrifizierte Hinterachse aus Stahl

- 43 Plasmamodifizierte bipolare Platten für Brennstoffzellen

FAHRWERK UND LENKUNG

- 48 Effizientere Fahrwerksteile

- 49 Mit ThermoTecWire Gewicht und Bauraum sparen

- 51 Funktionsoptimierte Stoßdämpferrohre

- 57 Dämpfungsverstellsystem für mehr Fahrkomfort und Agilität

- 60 Lenken leicht gemacht

- 61 Wirtschaftliche Leichtbau-Lenk-säulen mit CFK-Bauteilen

- 66 Hybrid-Lenkwellen: 35 % weniger Gewicht

- 69 Leichte, gebaute Blechzahnstangen

- 72 Lenkwinkelsteller: High-Performance zu attraktiven Kosten

- 76 Column-EPS für Kompakt- und Mittelklassefahrzeuge

- 80 Entwicklungsplattform für künftige Steer-by-Wire-Lenkungen

ALLGEMEINER HINWEIS:

Angaben über die Beschaffenheit oder Verwendbarkeit von Materialien beziehungsweise Erzeugnissen dienen der Beschreibung. Berechnungen und technische Bewertungen beziehen sich ausschließlich auf die Referenzstruktur oder die genannten Referenzprodukte und bedürfen bei einem konkreten Einsatz des jeweiligen Materials oder Produkts einer nochmaligen Überprüfung oder ausdrücklichen Bestätigung. Zusagen in Bezug auf das Vorhandensein bestimmter Eigenschaften oder einen bestimmten Verwendungszweck bedürfen stets besonderer schriftlicher Vereinbarung.

OKTOBER 2014

Das Projekt ThyssenKrupp InCar plus

InCar steht für die automobilen Technologiekompetenz von ThyssenKrupp. 2009 hat der Konzern erstmals seine Entwicklungen in den drei Bereichen Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie vorgestellt. Mit dem InCar plus-Projekt wird das Innovationsprogramm nun fortgesetzt. Präsentiert werden seriennahe oder serienreife Lösungen, die schnell in laufende Projekte integriert werden können.

KAROSSERIE

- 86 Benchmark 2.0: die aktualisierte Referenzstruktur
- 89 Neu im Leichtbau-Fokus: der Cockpitträger
- 90 Stoßfängersysteme optimiert in puncto Fertigungsprozess, Gewicht und Kosten
- 95 Leichte Längsträger durch optimierte Fertigungsverfahren
- 99 Schlanke A-Säule: bessere Sicht, weniger Gewicht
- 102 Gewichtsreduktion durch warm- und kaltumgeformte B-Säulen

- 105 Warmumformung maßgeschneidert
- 108 Einsatzpotenzial von Litecor in der Karosserie
- 112 Innovative Leichtbaukonzepte für Motorhauben
- 115 Leichtbau bei Tür-Außenhaut
- 119 Wirtschaftliche Leichtbau-Sitzstrukturen aus Stahl
- 124 Neue Räder aus Stahl – leicht und stylisch

NACHHALTIGKEIT

- 130 Umweltperformance als wichtiges Kriterium

STAHLWERKSTOFFE

- 136 Werkstoffkompendium

RUBRIKEN | SERVICE

- 3 Editorial
- 138 Autorenverzeichnis
- 139 Impressum, Wissenschaftlicher Beirat

BILDQUELLEN:

Alle Bilder in diesem ATZextra wurden vom ThyssenKrupp Konzern zur Verfügung gestellt.

DANKSAGUNG:

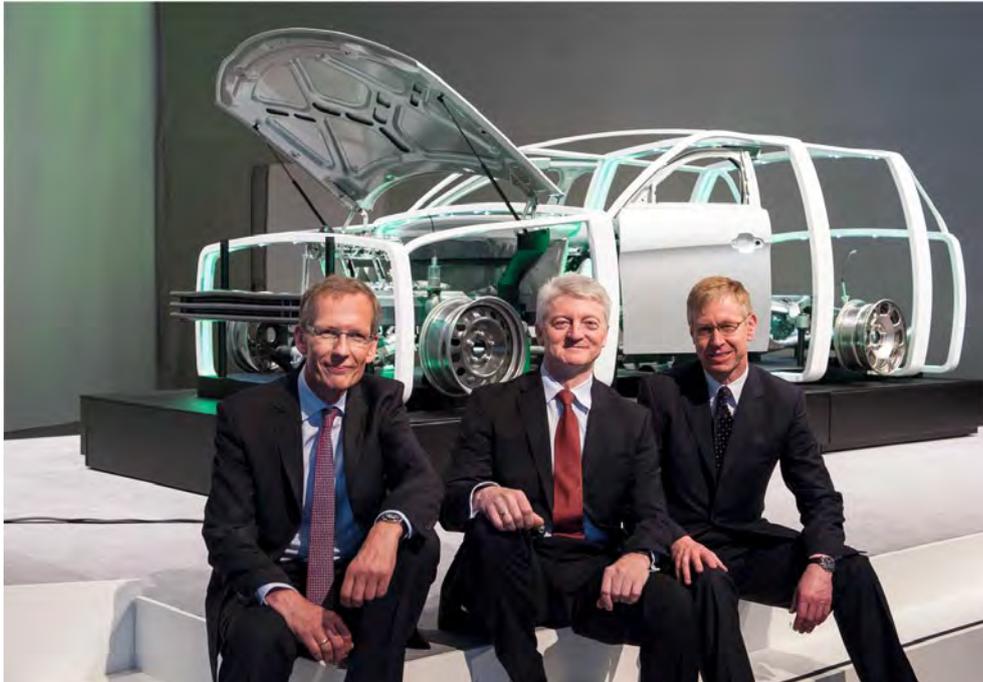
Dieses ATZextra wurde mit freundlicher finanzieller Unterstützung des ThyssenKrupp Konzerns realisiert.



VORWORT

- 6 InCar plus: hoher Reifegrad für hohe Ansprüche
Karsten Kroos,
Heinrich Hiesinger,
Heribert R. Fischer





DR. KARSTEN KROOS
Vorsitzender des Bereichsvorstands
Components Technology der
ThyssenKrupp AG

DR. HEINRICH HIESINGER
Vorstandsvorsitzender der
ThyssenKrupp AG

DR. HERIBERT R. FISCHER
Mitglied des Vorstands der
ThyssenKrupp Steel Europe AG

(von links nach rechts)

INCAR PLUS: HOHER REIFEGRAD FÜR HOHE ANSPRÜCHE

Der Automobilssektor verändert sich rasant. Globaler Wettbewerb, hohe Wachstumsraten in vielen Teilen der Welt und ein starkes Bewusstsein für eine möglichst umweltfreundliche Mobilität sind die Treiber dieser Veränderung. Dahinter stehen Trends wie demografische Entwicklung, fortschreitende Urbanisierung und Klimawandel. Für die Automobilindustrie ergeben sich daraus enorme Herausforderungen, aber auch große Chancen. Als diversifizierter Technologiekonzern und langjähriger Partner der Automobilbranche gestalten wir diesen Veränderungsprozess mit und entwickeln Produkte und Dienstleistungen, die den Bedarf nach dem „Mehr“ auf eine „bessere“ Art und Weise erfüllen.

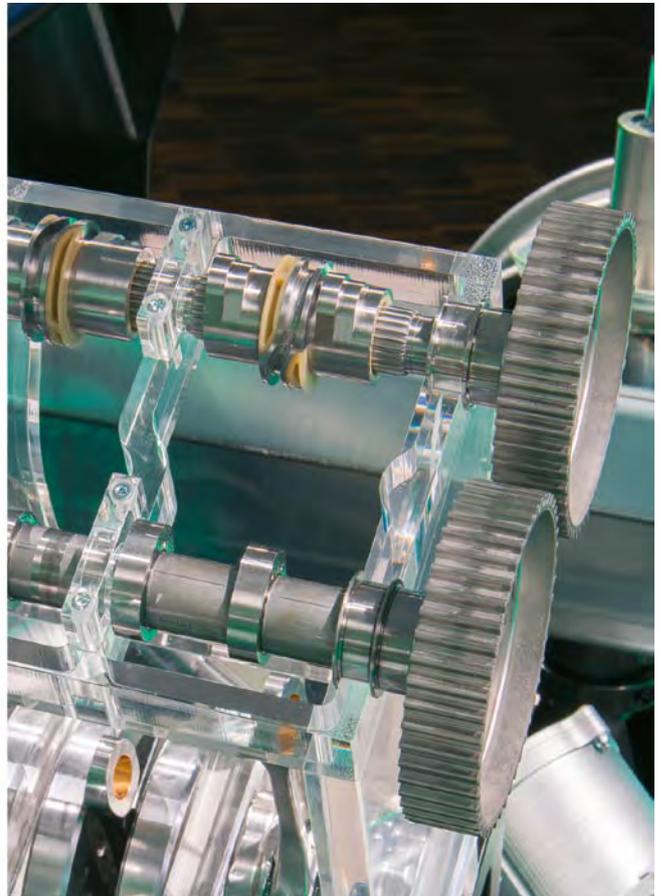
Die Automobilindustrie ist seit jeher ein wichtiger Kunde von ThyssenKrupp. Rund ein Viertel unseres Umsatzes entfällt auf diesen Sektor. So sind wir heute weltweit einer der führenden Werkstoff- und Komponentenzulieferer für die Automobilhersteller und ein wichtiger Entwicklungspartner.

Unter dem Motto „ThyssenKrupp InCar plus – Lösungen für automobile Effizienz“ haben wir das größte herstellerunabhängige Entwicklungsprojekt eines Zulieferers umgesetzt. Zugleich ist InCar plus das derzeit umfassendste Forschungsprojekt von ThyssenKrupp überhaupt. In mehr als 30 Teilprojekten mit über 40 Einzellösungen haben unsere Ingenieure neue Produkte für die Bereiche Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie

entwickelt. Dabei stehen umweltschonende Lösungen rund um Energieeffizienz, Elektromobilität und Leichtbau im Mittelpunkt. Ob Gewicht, Wirtschaftlichkeit, Nachhaltigkeit oder Performance: In mindestens einem dieser Punkte wird jede unserer InCar plus-Innovationen den heutigen Stand der Technik übertreffen.

Die Weiterentwicklung des Ventiltriebs steht im Zentrum des Teilprojekts Antrieb. Unser Ziel war es, die Effizienz des Verbrennungsmotors zu steigern und den Kraftstoffverbrauch und damit die Emissionen deutlich zu senken. Ein Beispiel dafür ist unsere innovative Nockenwellentechnologie. Mit alternativen Lagerungskonzepten können wir innermotorische Energieverluste verringern. Die Integration weiterer Funktionen, wie der Ölabscheidung in die Nockenwelle, eröffnet unseren Kunden neue Optionen. So spart diese Neuerung Bauraum und verringert zusätzlich Emissionen. Mit unseren Innovationen zum Elektroantrieb begeben wir uns auf neues Terrain im Bereich der E-Mobilität. Dabei kommt dem hochfesten Elektroband mit seinen verbesserten magnetischen Eigenschaften eine zentrale Bedeutung zu: Denn es steigert den Wirkungsgrad der E-Maschinen.

Als Werkstoffspezialist haben wir uns beim Teilprojekt Karosserie ganz dem wirtschaftlichen Leichtbau verschrieben. Durch den Einsatz neuer Stahlsorten, innovativer Werkstoffverbünde und



Der InCarplus-Technologieträger umfasst mehr als 30 Innovationen aus den Bereichen Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie

moderner Verarbeitungsverfahren, wie der Warmumformung, ist es uns gelungen, die steigenden Anforderungen unserer Kunden an Leichtbau, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit mit neuen Produkten zu erfüllen. Das gilt sowohl für die klassischen Strukturbauteile wie Längsträger oder B-Säule als auch für Anbauteile wie Motorhaube oder Türen. Karosserienahe Themen wie Sitze und Räder haben wir ebenso in die Entwicklungen mit einbezogen und dabei mit hochfesten Stählen exzellente Ergebnisse in puncto Wirtschaftlichkeit und Gewichtsreduktion erzielt.

Im Teilprojekt Fahrwerk und Lenkung liegt unser Augenmerk in erster Linie auf der Weiterentwicklung elektronischer Lenksysteme. Die elektrisch unterstützte Lenkung ist die Eintrittskarte in die Welt des teil- oder vollautonomen Fahrens und das verbunden mit einer deutlichen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zu konventionellen hydraulischen Lenkungen. Unsere InCarplus-Innovationen helfen, diese Lenksysteme noch effizienter einzusetzen und für neue Fahrzeugklassen zu erschließen. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt liegt auf der Multimaterialbauweise von Stoßdämpferrohren und Lenkungskomponenten. Für eine Umsetzung in Großserien haben wir entsprechende Fertigungs- und Montageverfahren gleich mitentwickelt.

In ThyssenKrupp InCar plus ist das gesamte automobiler Know-how des Konzerns gebündelt. Die Business Areas Components

Technology, Industrial Solutions und Steel Europe haben ihre Kompetenzen eingebracht. Das Ergebnis sind Innovationen, die über die gesamte Wertschöpfungskette erprobt und abgesichert sind. Darin enthalten sind sämtliche Umform- und Bearbeitungsschritte des Werkstoffs, der Werkzeug- und Prototypenbau sowie die Füge- und Montagetechnologie für Großserien. Diese interdisziplinäre Herangehensweise hat zu einzigartigen Ergebnissen geführt. So können zahlreiche InCar plus-Lösungen die Ökobilanz entscheidend verbessern. Diese umfasst alle Phasen des Produktlebens – von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung über die Materialproduktion und Bauteilherstellung bis hin zur Nutzung und dem Recycling der Endprodukte. Ein weiterer Vorteil für unsere Kunden ist die umfassende Absicherung der Neuentwicklungen. Unser Ziel ist eine möglichst reibungslose Integration unserer Bauteile und Komponenten in die Serienproduktion. Dafür sind wir in Vorleistung gegangen und haben Werkzeuge entwickelt, Prototypen gebaut und eine Vielzahl von Tests durchgeführt. Das Ergebnis ist ein ausgesprochen hoher Reifegrad fast aller entwickelten InCar plus-Lösungen für unsere anspruchsvollen Kunden im Automobilsektor.

Überzeugen Sie sich selbst von unserer automobiler Kompetenz. Wir wünschen Ihnen eine anregende Lektüre und viele spannende Einblicke in das InCar plus-Projekt.

INCAR PLUS: LÖSUNGEN FÜR AUTOMOBILE EFFIZIENZ

InCar steht für die automobilen Technologiekompetenz von ThyssenKrupp. In den drei Bereichen Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie entwickelt der Konzern seriennahe oder serienreife Lösungen, die schnell in laufende Projekte integriert werden können. Das Ziel ist, Fahrzeughersteller zu unterstützen und ihnen Wettbewerbsvorteile zu verschaffen.

Bereits im Jahr 2009 wurden die Ergebnisse des ersten InCar-Projekts präsentiert. Das Projekt war ein voller Erfolg, vor allem für Kunden, die von dem breiten Spektrum automobiler Innovationen nachhaltig profitieren konnten. Mit dem InCar plus-Projekt wird das Innovationsprogramm für die Automobilindustrie fortgesetzt. In mehr als 30 Projekten mit über 40 Einzellösungen entwickelt ThyssenKrupp neue Produkte für die Bereiche Antrieb, Fahrwerk und Lenkung sowie Karosserie, ①. Das Motto lautet: Lösungen für automobilen Effizienz.



Effizienz bedeutet, Fahrzeuge von morgen noch leichter zu machen.

Neue Stahlwerkstoffe und -halbzeuge, Werkstoffverbünde, Magnesium, kohlefaserverstärkte Kunststoffe oder Aluminium leisten wesentliche Beiträge zum werkstofflichen Leichtbau. Werkstoffgerechtes Design und innovative Konstruktionen bringen diese Potenziale zum Tragen. Neue Fertigungs- und Fügetechnologien werden auf Grundlage der Engineering- und Werkstoffkompetenz von ThyssenKrupp entwickelt. Dabei steht die einfache Integration innovativer InCar plus-Lösungen in die Serienfertigung bei den Automobilherstellern im Fokus der Entwicklungen.

InCar plus-Lösungen zeichnen sich durch einen hohen Reifegrad und ein

hohes Maß an wirtschaftlicher und fertigungstechnischer Absicherung aus. Basis hierfür ist die Kompetenz des ThyssenKrupp Konzerns als Werkstoff- und Komponentenhersteller sowie als Partner für Werkzeug- und Fertigungstechnologie.

Beispiel kohlefaserverstärkte Kunststoffe: Mit dem ThyssenKrupp Kompetenzzentrum Carbon Composites hat ThyssenKrupp ein neues Unternehmen gegründet, das vor allem die wirtschaftliche CFK-Bauteilproduktion in großen Stückzahlen untersucht. In Kooperation mit ThyssenKrupp System Engineering sowie den Bauteil- und Komponentenexperten von ThyssenKrupp Presta konnten neue, wegweisende Entwicklungen in Serienprodukte überführt werden.

So wurde die gebündelte Expertise des Konzerns für die Konzeption neuer Lenksäulen im Superleichtbau genutzt. Bis zu 60 % Gewicht bei einzelnen Komponenten lassen sich durch den Einsatz von CFK in serientauglichen Lenksäulen einsparen.



WIRTSCHAFTLICHER

Effizienz bedeutet, Fahrzeuge von morgen noch wirtschaftlicher zu machen.

Auch die Fahrzeuge von morgen müssen bezahlbar bleiben – und das trotz ständig steigender Sicherheitsanforderungen, Komfort- und Funktionsverbesserungen. Hier spielt der intelligente Stahl-Leichtbau eine bedeutende Rolle:

ThyssenKrupp Steel Europe entwickelt höchstfeste Stahlwerkstoffe, die den weiter zunehmenden Leichtbau- und Sicherheitsanforderungen moderner Fahrzeugkarosserien gerecht werden. Sie ermöglichen deutliche Gewichtsreduktionen bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit.

Ihre Verarbeitung in der Großserie erfordert eine werkstoffgerechte Auslegung der Bauteile. Das beginnt bei der Bauteilkonzeption und -konstruktion und reicht über die strukturmechanische Absicherung bis zu den fuge- und umformtechnischen Fragestellungen. Hier kommt die Kompetenz von ThyssenKrupp System Engineering zum Tragen – bis hin zum Werkzeug- und Prototypenbau für innovative Bauteile. So bündelt ThyssenKrupp das gesamte automobilen Know-how des Konzerns, um den Automobilherstellern die beste Lösung anzubieten.



PERFORMANTER

Effizienz bedeutet, die Fahrzeuge von morgen noch performanter zu machen.

Innovative Dämpfungssysteme von ThyssenKrupp Bilstein steigern Fahrkomfort und Sicherheit. Die neue Generation elektrischer Lenksysteme bis hin zu Steer-by-Wire wird einen Beitrag zur Komfort- und Sicherheitssteigerung liefern. Nicht zuletzt, weil sie Fahrerassistenzsysteme unterstützt, die einen Mehrwert für den Endkunden bieten.



Effizienz bedeutet, die Fahrzeuge von morgen noch nachhaltiger zu machen.

Die Nachhaltigkeitsperformance von Fahrzeugen gewinnt in der Automobilindustrie als Wettbewerbsfaktor immer weiter an Bedeutung. ThyssenKrupp betrachtet Nachhaltigkeit als Innovationsmotor und legt besonderen Wert auf umweltfreundliche und recyclingfähige Werkstoffe, Komponenten und Systeme.

Mit innovativen Lösungen rund um die Nockenwellentechnologie wird ein Beitrag zur Optimierung des Verbrennungsmotors geleistet. Leichtbau und Reibungsreduzierung stehen dabei im Fokus der Arbeiten der ThyssenKrupp Camshafts Gruppe, um den Kraftstoffverbrauch und somit die CO₂-Emissio-

nen im Fahrbetrieb nachhaltig zu senken.

Die aktuelle Gesetzgebung konzentriert sich zwar auf die Emissionen im Fahrbetrieb, nimmt aber weder die Emissionen bei der Herstellung von Werkstoffen und Bauteilen, noch die Recyclingfähigkeit am Ende des Produktlebenszyklus in den Blick. ThyssenKrupp hingegen betrachtet den gesamten Lebenszyklus.

Die Ökobilanzen für InCar plus-Lösungen weisen die Emissionen für alle Phasen des Produktlebens aus – von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung über die Materialproduktion und Bauteilherstellung bis hin zur Nutzung und dem Recycling der Endprodukte.

Wichtig ist ein solcher Ansatz unter anderem bei der Werkstoffauswahl. Stahl-Leichtbaukonzepte ermöglichen Verbesserungen der Umweltauswirkun-

gen über den gesamten Lebenszyklus. Alternative Werkstoffe bieten vielfach zwar Verringerungen bei den Fahremissionen, in der Herstellungsphase aber belasten sie die Umwelt in einem Maße, das im Laufe der Nutzungsphase nur teilweise kompensiert werden kann.

Alle InCar plus-Lösungen weisen in mindestens einem Effizienzaspekt einen deutlichen Vorteil gegenüber dem heutigen Stand der Technik aus. Viele Lösungen sind serienreif entwickelt und umfangreich in Hardware getestet worden, sodass die Innovationen schnell in laufende Projekte und Entwicklungen integriert werden können. Bei Zukunftsthemen wie Steer-by-Wire positioniert sich ThyssenKrupp als innovativer Entwicklungspartner. Die Entwicklungsarbeit ist konsequent an den Zielen der Automobilproduzenten ausgerichtet: für mehr Effizienz und nachhaltige Wettbewerbsvorteile.

Antrieb

- Reibungsreduzierte Nockenwelle
- Ölabscheidesystem POSS®
- Hybrid-Schiebenockenelement
- Hybrid-Zylinderkopf-Haubenmodul
- Abgasanlage
- Hochfestes Elektrobänd
- Akustikoptimierter Elektromotor
- Gebauter Rotor
- Gebaute Getriebewelle eTDC
- Elektrifizierte Hinterachse
- Brennstoffzelle

Fahrwerk & Lenkung

- ThermoTecWire®-Federn
- Funktionsoptimierte Stoßdämpferrohre
- Dämpfungsverstellungssystem
- CFK-Leichtbau-Lenksäule
- Hybrid-Lenkwellen
- Gebaute Blechzahnstange
- Lenkwinkelsteller
- C-EPS für Kompaktklasse
- Steer-by-Wire-Lenkung

Karosserie

- Update Referenzstruktur
- Cockpitträger
- Stoßfängersysteme
- Längsträger
- A-Säule
- B-Säulen
- Tailored-Tempering-Technologie
- LITECOR®-Potenzialanalyse
- Motorhauben
- Tür
- Sitzstrukturen
- Räder



1 Übersicht über alle InCar plus-Projekte

ANTRIEB





Mehr Effizienz, weniger Emissionen: Auf diesen einfachen Nenner lassen sich die Ziele von ThyssenKrupp für das Teilprojekt Antrieb von InCar plus bringen. Für den Verbrennungsmotor steht dabei die Weiterentwicklung des Ventiltriebs im Zentrum. Etwa in Form innovativer Nockenwellentechnologien sowie von alternativen Lagerungskonzepten zur Reduzierung der innermotorischen Reibungsverluste. Die Integration weiterer Funktionen, wie etwa der Ölabscheidung in die Nockenwelle, eröffnet der Automobilindustrie neue Optionen. Mit zahlreichen Innovationen rund um den Elektroantrieb besetzt ThyssenKrupp auch dieses wichtige Zukunftsthema. Für die E-Mobilität hat hochfestes Elektroband mit seinen verbesserten magnetischen Eigenschaften eine zentrale Bedeutung: Es steigert den Wirkungsgrad der Elektromotoren.

NEUE IDEEN FÜR SPARSAMERE MOTOREN

Neben Effizienzgewinnen durch Downsizing, Aufladung und Direktein-spritzung leistet die Detailoptimierung aller Motorenbauteile einen wichtigen Beitrag für sparsame und emissionsarme Verbrennungsmotoren. Besondere Bedeutung hat die Minimierung der durch Reibung verursachten innermotorischen Verluste, was im Projekt InCar plus durch optimierte Ventiltrieblösungen zum Ausdruck kommt. Ergänzende Potenziale werden durch Leichtbau-lösungen mit innovativen Werkstoffkombinationen und eine funk-tionale Integration erschlossen.

REIBUNGSREDUZIERUNG BEI NOCKENWELLEN

Stetig höhere Effizianzorderungen an den Verbrennungsmotor machen es mehr denn je notwendig, seine Reibungsverluste zu senken. Die Reibung des Ventiltriebs hat an der gesamten Motorreibung einen Anteil von etwa 15 %. Hier existieren wirtschaftlich interessante Potenziale für eine signifikante Reduzierung. ThyssenKrupp hat systematisch neue Ansätze auf der Basis weiterentwickelter Herstellungs- und Beschichtungsverfahren an den Nocken und den Nockenwellenlagern untersucht. Speziell entwickelte Prüfstände ermöglichen zukünftig einen objektiven, schnellen Vergleich für unterschiedliche Motorenarten.

Nockenwellen weisen in der Regel zwei Arten von reibungsbehafteten Kontaktstellen zu ihrer Umgebung auf: die Nockenwellenlager und die Nocken. An beiden Kontakten kann durch eine gezielte Bearbeitung der geschliffenen Standardoberfläche die Reibung reduziert werden.

Der Reibkontakt des Nockens wird bevorzugt optimiert, wenn es sich um einen Gleitkontakt handelt – also etwa bei Tassenstößeln. Eine Beschichtung dieses Gegenkörpers, insbesondere mit Schichten aus amorphen Kohlenstoff (diamond

like carbon = DLC), ist Stand der Technik. Die zusätzliche Beschichtung der Nocken verspricht weitere tribologische Vorteile, setzt jedoch das Beschichten einer einbaufertig geschliffenen Nockenwelle mit Maskierung der nicht zu beschichtenden Oberflächen voraus. Dieser aufwendige und teure Vorgang verhinderte bisher, unter Betrachtung des im Markt erwarteten Kosten-Nutzen-Verhältnisses, die Beschichtung der Nockenflächen in großen Stückzahlen.

ThyssenKrupp hat seine Montagetechnologie dahingehend weiterentwickelt,

dass nun auch fertig geschliffene und vor Montage beschichtbare Nocken kraft- und formschlüssig gefügt werden können. Dies schließt eine hundertprozentige Inline-Qualitätskontrolle der Fügeverbindung als Alleinstellungsmerkmal mit ein. Dank dieser Innovationen ist die wirtschaftliche Fertigung einer DLC-beschichteten Nockenwelle jetzt möglich, **1**. Erste Untersuchungen zeigen, dass durch die Beschichtung über weite Drehzahlbereiche das Reibmoment etwa 30 % geringer wird.

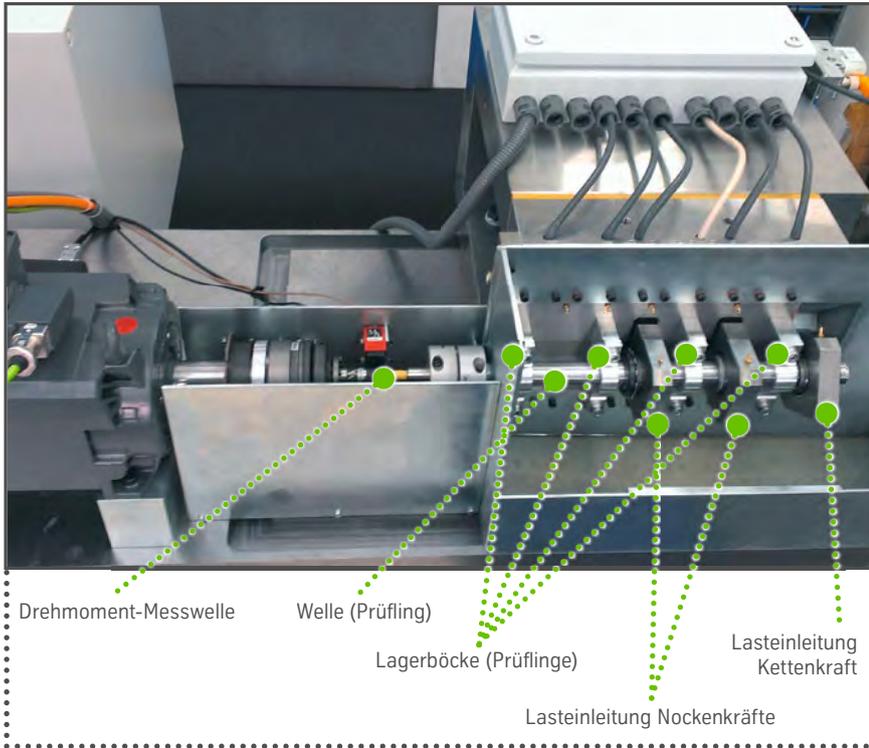
NOCKENWELLENLAGER – HYBRIDISIERUNG FORDERT VERBESSERTE LÖSUNGEN

Nockenwellen haben heute üblicherweise druckölgeschmierte, hydrodynamische Gleitlager. Dabei rotiert eine Nockenwelle aus Stahl mit geschliffener Oberfläche in geteilten Lagern aus Aluminium. Typischerweise wird diese in einem aufwendigen Bearbeitungsprozess ausgespindelt. Anschließend wird die Nockenwelle in der Lagergasse montiert. Das Motoröl wird durch eine Druckölbohrung entgegen des Vektors der Nockenkraft in das Lager gefördert, von der drehenden Welle mitgenommen und trennt so die Reibpartner.

InCar® plus-Lösung



1 Reibungsoptimierte Nockenwelle mit DLC-beschichteten Nocken



2 Laborprüfstand für Reibleistungsmessung an Nockenwellen

Während des Motorstarts wird ein Mischreibungsbereich durchfahren, bei dem die Welle und die Lagerbohrung in direkten Kontakt treten. Mit zunehmender Relativgeschwindigkeit zwischen Welle und Lagerbohrung nimmt der hydrodynamische Traganteil zu, bis er die beiden Reibpartner vollständig trennt. Dieser Punkt liegt nach bisherigen Untersuchungen typischerweise oberhalb der Leerlaufdrehzahl. Motoren mit Start-Stopp-System durchlaufen dieses StartszENARIO deutlich häufiger als

Motoren ohne diese Technik. Folglich arbeiten sie für längere Zeiträume im ungünstigen Mischreibungszustand.

Hinzu kommt, dass die dabei entstehende Reibungswärme über das Öl und die Bauteile aus dem Lagerbereich abgeleitet werden muss. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um eine klassische geteilte Nockenwellenlagerung oder um eine ungeteilte Nockenwellenlagerung handelt. Die ungeteilte Lagerung ist in Modulen möglich, bei denen eine gebaute Nockenwelle in einem geschlos-

senen Lagerrahmen oder in der Zylinderkopfhaut gefügt wird.

Ziel dieser Untersuchung ist die Optimierung einzelner Parameter des tribologischen Systems sowie die Entwicklung einer Messmethodik, die unter anderem eine ausreichende Messgüte und Vergleichbarkeit sicherstellt. Dabei stehen die Lagergeometrie und -oberfläche, die Materialkombination sowie die wirk-same Lagerlast im Vordergrund. Andere Einflussgrößen, wie Schmierstoff, Temperatur oder Relativbewegung, werden als unveränderlich betrachtet.

Über Lösungsansätze zur Verbesserung des tribologischen Systems gibt es bereits eine Reihe von Veröffentlichungen. Teils bestehen sie aus konstruktiven Details, teils sind es kommerzielle Marktlösungen wie Beschichtungen oder Wärmebehandlungen. Zudem werden auch Lösungen im Forschungsstadium betrachtet, aufgrund von fehlender Einsatzreife aber weniger intensiv untersucht. Häufig sind die Lösungsansätze jedoch technisch und kommerziell nicht vergleichbar, da die Entwicklungen auf unterschiedlichen Motoren basieren. Daher hat ThyssenKrupp einen von der Motorenbauart unabhängigen, aber an die motorspezifischen Belastungen adaptierbaren Prüfstand für Reibungsmessungen entwickelt, der vergleichbare Aussagen ermöglicht, 2.

VERGLEICHENDE REIBUNGS-ANALYSE DURCH WEITER-ENTWICKELTE PRÜFTECHNIK

Das zu prüfende System besteht aus einem Nockenwellenrohr ohne Nocken und vier Lagerböcken. Ein Elektromotor treibt die Welle an, das Schleppmoment

Welle	Lagerbock										
	Grauguss	Sinterstahl	Aluminiumdruckguss (Basis)								
			Basis, unverändert	Gleitlack	Aluminium-Beschichtung mit Mikroporosität	Einge-presste Buchsen Keramik	Einge-presste Buchsen PTFE	Wälzlager	Einge-gossene GJL-Ringe	Basis, veränderte Lager-geometrie I	Basis, veränderte Lager-geometrie II
Geschliffen	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●
Wolframdisulfid			●								
DLC			●								
Nitriert	●	●	●								
Lagerwerkstoff									●		

3 Auszug untersuchter Designvarianten

nimmt eine Messwelle auf. Die Normalkräfte werden nicht, wie im realen Motorbetrieb, durch den Ventiltrieb und dessen Antrieb erzeugt, sondern von zwei Piezoaktoren eingebracht. Sie bilden die dynamischen Nockenkräfte nach. Hinzu kommt noch ein Pneumatikzylinder, der die als konstant angenommene Vorspannkraft von Kette oder Riemen des Antriebs nachbildet. Dank einer gezielten Anordnung dieser Aktoren wird eine Biegelinie der Welle erreicht, die der einer Nockenwelle im Zylinderkopf nahekommt. Die Prüfstandsteuerung ermöglicht zudem eine Anpassung des Kraftsignals in Abhängigkeit der Drehzahl und damit die Abbildung realistischer Drehzahlverläufe. Die Prüfung ist bis zum Stillstand möglich, Motorstart und Hochlauf aus dem Stillstand können nachgefahren werden. Ebenso lässt sich das Öl vorkonditionieren und so der Druck an den Lagerstellen der Betriebsituation anpassen. Verschiedene Heizelemente und thermische Isoliermaßnahmen temperieren die Prüflinge und bilden die Betriebsbedingungen am Motor nach. Diese Maßnahmen schaffen in Summe konstante Randbedingungen für vergleichbare Versuche.

Aufgrund des geringen Messbereichs, der Konzentration auf den untersuchten Reibkontakt und der Vermeidung von dynamischen Anregungen aus dem Ventiltrieb durch Weglassen der Reibpartner im Zylinderkopf (Tassen oder Rollenabgriff) kann dieser Prüfstand auch kleine Drehmomentunterschiede von bis zu 0,006 Nm messen. Da die Prüflinge für die Testläufe in reduzierter Form und somit kostengünstig aufgebaut sind, kann ThyssenKrupp eine umfangreiche Matrix inklusive der Wiederholungsversuche sehr wirtschaftlich prüfen. Die in einer ersten Versuchsreihe geprüften Varianten zeigt ③.

WENIGER REIBUNG DURCH PASSENDE ALTERNATIVEN

Als Referenz für die Prüfstanduntersuchungen dient eine geschliffene Welle, die alternativ in Gleitlagern aus Aluminiumgusslegierungen beziehungsweise in Nadellagern läuft. Beide Lagervarianten sind etablierte Serienlösungen und die Welle entspricht den in der Serienfertigung gängigen Vorgaben.

ThyssenKrupp variiert davon abweichend die Werkstoffe der Lager. Bei-

spielsweise werden Lagerböcke aus einem für Gleitlager entwickelten Sinterwerkstoff eingesetzt sowie Lagerböcke aus Grauguss. Darüber hinaus werden Veränderungen der Oberflächengestalt und -eigenschaften untersucht, etwa mithilfe von marktgängigen Lösungen wie etwa Beschichtungen mit Gleitlack oder DLC, Nitrieren oder Buchsen aus Keramik oder PTFE. Hinzu kommen einige neue Ansätze wie etwa die Veränderung der Lager-Makrogeometrie, eine Behandlung mit in die Kavitäten der Oberfläche eingebrachtem Wolframdisulfid sowie das Aufbringen einer mikroporösen Schicht aus Aluminium.

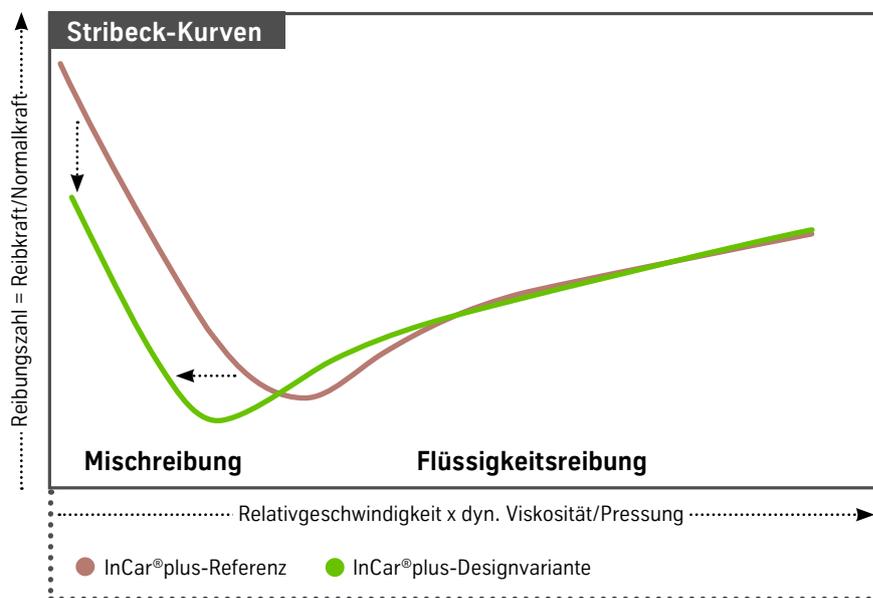
Das Ziel dieser Oberflächenbearbeitungen und Prüfstandsversuche lässt sich anhand einer skizzierten Stribeck-Kurve darstellen, ④. Zum einen soll der Reibbeiwert im Mischreibungsgebiet sinken. Die Oberflächenoptimierung zielt dabei auf unterschiedliche Effekte ab. So kann das Abscheren von Bindungen im direkten Körperkontakt vereinfacht oder durch eine geänderte Oberflächenstruktur die plastische Deformation von Rauheiten vermindert werden. Auch eine Anhebung der Oberflächenhärte und dadurch reduzierte abrasive Furchung ist überlegenswert.

Zum anderen will ThyssenKrupp auch den Ausklinkpunkt, an dem sich der Wechsel von Mischreibung zu Flüssig-

keitsreibung vollzieht, hin zu niedrigeren Drehzahlen verschieben. Dies geschieht mit einer glatteren Oberflächenstruktur. Vereinfacht gesagt, soll das Aufeinandertreffen von Materialspitzen bei geringeren Drehzahlen verhindert werden. Ein anderer Ansatzpunkt ist die Vergrößerung der Öläffinität der Oberflächen. Infrage kommende Bearbeitungsverfahren machen sich jeweils einen oder mehrere dieser Mechanismen zunutze.

AUSBLICK

Mit der entwickelten Prüftechnik und -systematik zur Reibleistungsmessung an Nockenwellenlagern steht nun ein flexibel einsetzbares Werkzeug zur Verfügung. Es ermöglicht eine systematische und mit wiederholbaren Prüfparametern durchführbare Untersuchung der potenziell zielführenden Ansätze zur Reibungsreduzierung. Diese weiterführenden Versuche sollen nicht nur die größtmöglichen Reibungsreduzierungspotenziale ermitteln, sondern auch Lösungen mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis identifizieren. Besonders erfolgversprechende Lösungen werden anschließend in geschleppten Zylinderkopfversuchen eingehender untersucht und bewertet. Auch wird eine Übertragung der erarbeiteten Lösungen auf Nockenwellen für Nutzkraftfahrzeuge in Betracht gezogen.



④ Ziel der Oberflächenbearbeitung (schematische Darstellung)

NOCKENWELLENINTEGRIERTES ÖLABSCHEIDESYSTEM

ThyssenKrupp ist es gelungen, das Ölabscheidesystem für Blow-by-Gas als Bestandteil der Pleuellgehäuseentlüftung in eine Pleuellwelle zu integrieren. Die Presta Oil Separation System (POSS) genannte Technologie übertrifft trotz ihres geringen Bauraumbedarfs die Abscheideleistung der meisten heutigen passiven Ölabscheidesysteme, die am Pleuellgehäuse angeschraubt oder in Pleuellhauben integriert sind. Es leistet damit einen wesentlichen Beitrag sowohl zur Einhaltung zukünftiger Emissionsanforderungen als auch zur Bauraumverkleinerung des Motors. Belegt wird dies bereits mit einer Serienanwendung.

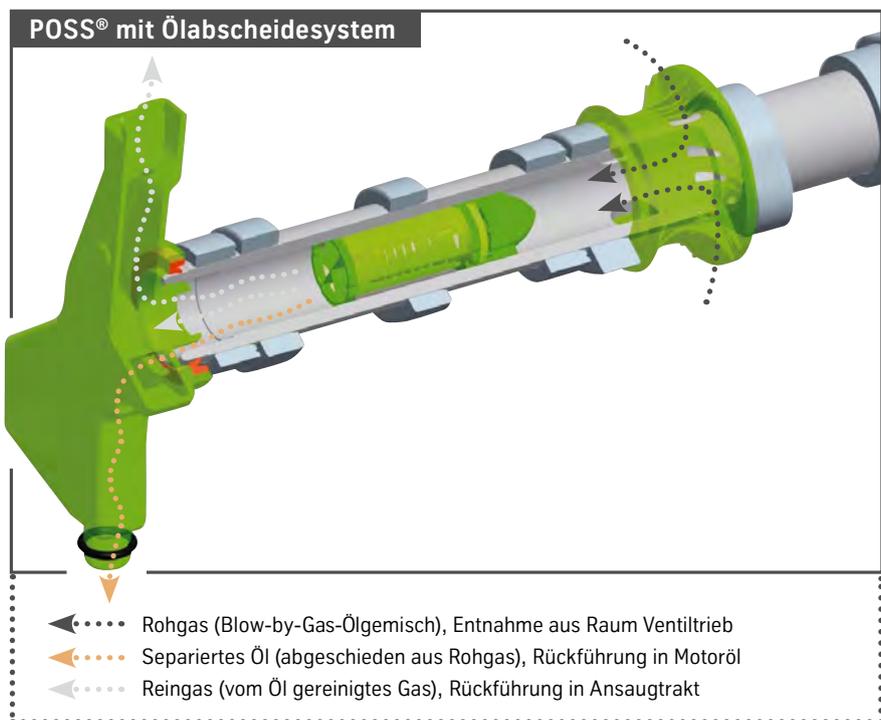
Die Ölabscheidung aus dem Blow-by-Gas wird ein immer wichtigerer Bestandteil des Pleuellgehäuse-Entlüftungssystems im Pleuellmotor. Denn zum einen wirken sich Downsizingmaßnahmen auf die Menge und Aerosol-Zusammensetzung des Blow-by-Gases aus, zum anderen forcieren verschärfte Emissionsgesetze die Anforderungen an Ölabscheidesysteme.

Beim Pleuellprozess entweicht Blow-by-Gas durch den konstruktionsbedingten Spalt zwischen Pleuell(-ringen) und Pleuellwand aus dem Pleuellraum in das Pleuellgehäuse beziehungsweise entlang der Pleuellschafldichtungen in den Pleuellraum. Darin sind unter anderem Pleuellöl, Kraftstoffreste und Kondensat in Form von Aerosolen enthalten. Dieses Gasgemisch muss aus dem Pleuellgehäuse kontrolliert abgeführt und in einem geschlossenen Kreislauf wieder dem Pleuelltrakt und so dem Pleuellprozess zugeführt werden.

Damit Pleuellmotoren weiter optimiert werden können und dennoch die steigenden Emissionsanforderungen einhalten, muss das Blow-by-Gas vor der Pleuellung besser von den Aerosol-Bestandteilen gereinigt werden. Stand der Technik sind Ölabscheider mit zusätzlichem Bauraumbedarf am

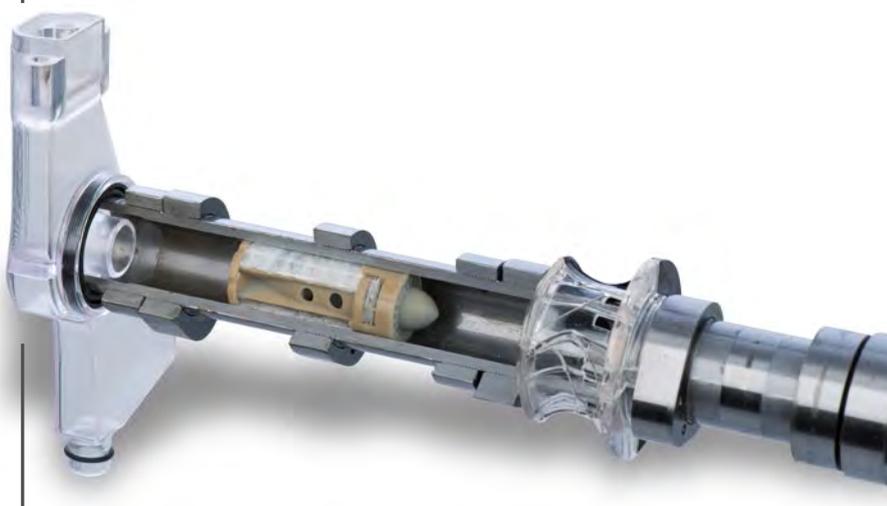
Pleuell, da diese entweder als externes Modul am Pleuellgehäuse angeschraubt werden oder Bestandteil der Pleuellkopfhaube sind. Hybridisierung, Abgas-

rückführsysteme, Fußgängerprallschutz und Leichtbau erfordern immer kompaktere Motoren. Funktions- und Bauteilintegration bekommt einen grö-

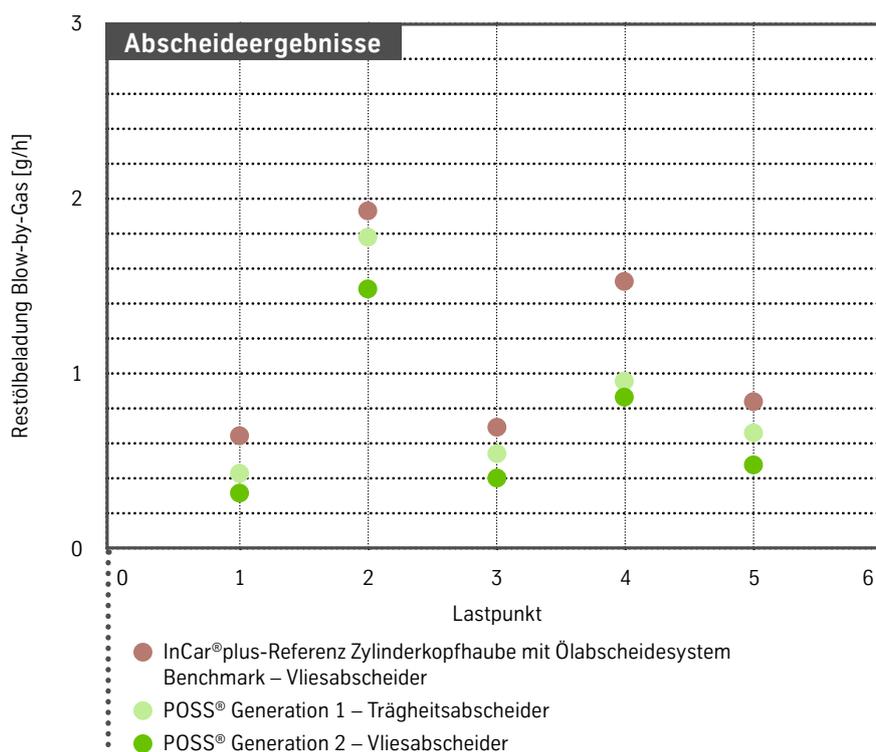


1 POSS-Funktionsprinzip in der Pleuellwelle

Schnittmodell



2 Schnittmodell des nockenwellenintegrierten Ölabscheidesystems



3 Restölbeladung des gereinigten Blow-by-Gases für verschiedene Ölabscheidesysteme

ßeren Stellenwert. POSS liefert einen überzeugenden Beitrag dazu, 1.

Nockenwellen in gebauter Ausführung besitzen, anders als gegossene oder geschmiedete Varianten, ein hohles Trägerrohr. In diesem steht Bauraum für die Integration von zusätzlichen Funktionen zur Verfügung, wie zum Beispiel einer Ölabscheidung, 2.

MASSGESCHNEIDERTE FUNKTIONSENTWICKLUNG

ThyssenKrupp hat das Ölabscheidesystem im Rahmen von InCar plus entwickelt. Als Ergebnis liegt ein System vor, das die Teilfunktionen Rohgasentnahme, Ölabscheider sowie Reingas- und Ölabführung in die Nockenwelle und den

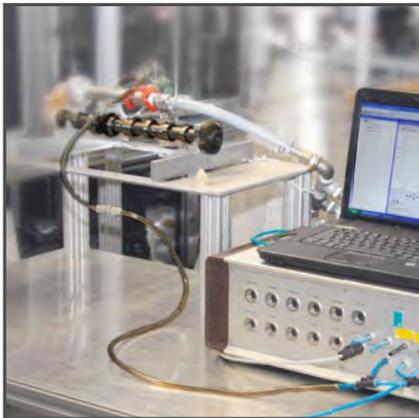
Ventiltrieb integriert. Die Abscheideergebnisse übertreffen nicht nur die im Markt befindlichen Systeme in wesentlichen Leistungsmerkmalen. POSS bietet darüber hinaus auch noch einen deutlichen Bauraumvorteil. So wird die Restölbeladung des gereinigten Blow-by-Gases lastpunktabhängig um 30 bis 50 % reduziert, 3.

Das innermotorisch in den Ventilraum geleitete Blow-by-Gas gelangt durch radiale Bohrungen in die Nockenwelle. Der Gaseintritt ist mit einem auf der Nockenwelle montierten Spritzschutz versehen. Er hält im Ventilraum erzeugtes Spritzöl und grobe Ölpartikel vom Gaseintritt fern. Bei der Auslegung sind Einflüsse durch die Beölung benachbarter Ventiltriebkomponenten zu berücksichtigen.

Im Inneren der hohlen Nockenwelle passiert das Rohgas den eigentlichen Ölabscheider. Das im InCar plus-Projekt entwickelte System POSS bietet hier durch die Kombination der Trägheitsabscheidung mit Vliesstoffen sehr großes Potenzial. Bei dieser Konfiguration kommen zusätzlich noch Sperr- und Diffusionseffekte zum Tragen, die eine Abscheidung von Kleinstpartikeln selbst bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten unterstützen.

Eine zentrale Anforderung an Ölabscheidesysteme ist die Wartungsfreiheit auf Lebensdauer. Der kombinierte Trägheits-Vlies-Abscheider erfüllt diese Anforderung ohne Einschränkungen; Wechsel- oder Wartungsintervalle sind nicht vorgesehen. Im Gegensatz zum üblichen Filtrationsprinzip der Durchströmung wird das Vlies lediglich angeströmt. Der Abscheider ist so ausgelegt, dass bei einem möglichen Blockieren der Vliesoberfläche die Entlüftung des Kurbelgehäuses sichergestellt ist.

Je nach Applikationsanforderung sind Konstruktionsvarianten anwendbar, die das Öl vom Gas mithilfe des Trägheits-, Sperr- oder Diffusionseffekts separieren. Unterstützt durch die Zentrifugalkräfte der rotierenden Nockenwelle wird das separierte Öl aus dem Aerosol als Wandfilm an der Rohrinne wand an Wellenende abtransportiert. Dort ist ein Reingaskanal angeflanscht, der durch einen reibungsarmen Radialwellendichtung abgedichtet wird. Ein Mitreißen des abgeschiedenen Öls wird durch eine gezielte Querschnittsgestaltung des Reingaskanals und die daraus resultierenden veränderten Gasgeschwindigkeiten bis



4 Laborprüfstand zur Ermittlung von Fraktions- und Gesamtabscheidegrad sowie Druckverlust



intensiv untersucht. Auf ihm wird das Ölablaufverhalten mit einem transparenten Nockenwellen-Dummy und verschiedenen transparenten Varianten des Reingaskanals visualisiert. Besondere Aufmerksamkeit erfahren dabei strömungskritische Bereiche wie die Schnittstelle von Reingaskanal und Nockenwellenrohr, die Innengeometrie des Kanals sowie der Ölablauf.

Ergänzend zu den Untersuchungen am Laborprüfstand erfolgt ein umfangreiches Versuchsprogramm auf einem Motorenprüfstand, 5. Hier werden auf einem speziell umgebauten Versuchsmotor umfangreiche Testreihen gefahren und dabei zum Beispiel das Ölablaufverhalten, die Belastbarkeit des Systems sowie dessen Langzeitstabilität analysiert.

Dieser Prüfaufbau ermöglicht auch Belastungstests nach Vorgaben der Automobilhersteller und die Ermittlung der Systemgrenzen. Einer dieser „Grenztests“ untersucht, ab welchem Volumenstrom Öl aus dem Ventilraum in das Abscheidesystem mitgerissen wird und somit das System überlastet. Mit gezielten konstruktiven Maßnahmen und parallelen Absicherungen am Laborprüfstand wird die für den Versuchsmotor definierte Zielgröße des Volumenstroms von 200 l/min trotz engerer Querschnitte erreicht. Die mögliche Versottung oder Verschmutzung des Vlieses wird in Langzeittests untersucht. Diese belegen, dass sich die Abscheideleistung gegen Ende des Tests nicht verschlechtert und auch der Druckverlust über das Gesamtsystem sich nicht erhöht.

AUSBLICK

Die Integration des Ölabscheidesystems in eine Nockenwelle bietet den Fahrzeugherstellern mehr gestalterischen Freiraum in der Motorenarchitektur. Mit der vereinfachten Integration in bestehende Motorenkonzepte, mit der Kombinierbarkeit mit variablen Ventiltriebssystemen, die anstelle konventioneller hohlgebauter Nockenwellen vorgesehen sind, als auch mit der weiteren Funktionsverbesserung beschäftigt sich ein Folgeprojekt. Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung als nicht-rotierendes und volumenstromabhängig geregeltes System. Erste Prototypen sind bereits auf einem Komponentenprüfstand erfolgreich getestet worden.

zu einem motor- und lastpunktabhängigen Grenzwert verhindert.

Die Auslegung des Ölabscheiders basiert auf Messungen an einem Motorenprüfstand. Referenz ist dabei das Blow-by-Rohgasspektrum (Zusammensetzung des ungereinigten Gases) eines modernen, aufgeladenen 2,0-l-Dieselmotors. Die Analyse des Rohgasspektrums zeigt, dass der Motor, typisch für hochaufgeladene Motorenkonzepte, unter Vollast viele Partikel kleiner 1 µm bildet. Diese kleinen Partikel stellen dabei jedoch einen großen Anteil der Gesamtmasse des Rohgasspektrums dar.

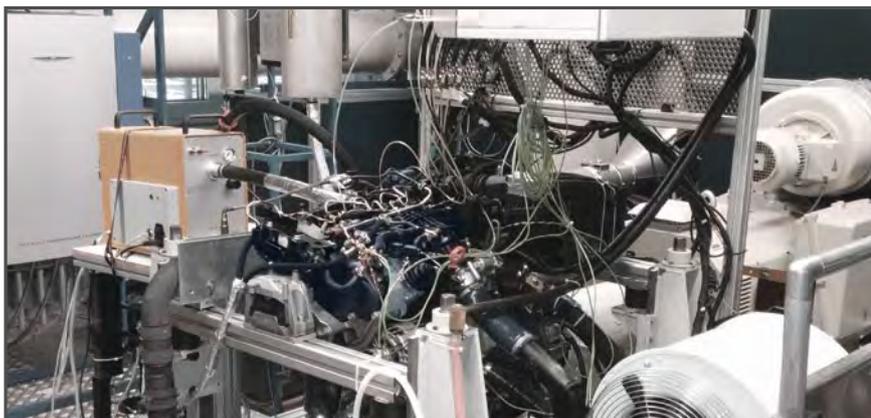
Zusätzliche Anforderungen an die Systementwicklung bestanden durch eine Druckpulsationsverträglichkeit sowie einen maximalen Druckverlust von 10 mbar bei 60 l/min Volumenstrom. Dies ergibt sich in einem

Betriebspunkt mit hoher Last bei niedriger Motordrehzahl. Hier erzeugt der Turbolader nur geringen Unterdruck, gleichzeitig entsteht aber ein hoher Blow-by-Volumenstrom.

UMFANGREICHE ANALYSE UND VALIDIERUNG

Die wichtigen Ergebnisgrößen zur Beurteilung der Effizienz eines Abscheidesystems sind der Fraktions- und Gesamtabscheidegrad bezogen auf den Druckverlust des Gesamtsystems. Die Optimierungsschleifen zur Verifizierung der Konstruktionsvarianten werden an dem in 4 dargestellten Laborprüfstand durchgeführt.

Das Ableiten von abgeschiedenem Öl wird an einem weiteren, speziell für dieses Projekt entwickelten Laborprüfstand



5 Systemerprobung auf dem befeuerten Motorenprüfstand

HYBRID-SCHIEBENOCKEN VERBESSERN HUBUMSCHALTSYSTEME

ThyssenKrupp hat für schaltbare Ventilhubsysteme ein Leichtbau-Schiebenockenelement entwickelt, das durch seine hybride Bauweise bis zu 30 % leichter ist als ein aus dem Vollen zerspantes Referenzbauteil aus Stahl. Dieser Gewichtsvorteil ermöglicht eine Anhebung der Drehzahlgrenze für die Hubumschaltung, woraus ein Kraftstoff-Einsparpotenzial von bis zu 5 % resultiert. Die neu entwickelte Hybridbauweise verbindet durch ein Kunststoff-Spritzgussverfahren wirtschaftlich und innovativ Stahlkomponenten miteinander.

Aufgrund ihrer weitestgehend bauraumneutralen Umsetzbarkeit zu konventionellen Ventiltrieben haben Hubumschaltssysteme auf der Basis von axial verschiebbaren Schiebenockenelementen seit ihrer Markteinführung vor einigen Jahren ein weltweites Interesse erlangt. ThyssenKrupp hat durch sein Produkt-, Prozess- und Werkstoff-Know-how Optimierungspotenziale der Schiebenockenelementen als Schlüsselfaktor solcher schaltbaren Hubumschaltssysteme untersucht und deren Umsetzung vorangetrieben. Stand der Technik sind zweistufige Schaltssysteme. Häufig wird dabei das zweite Nockenprofil für eine Zylinderabschaltung genutzt.

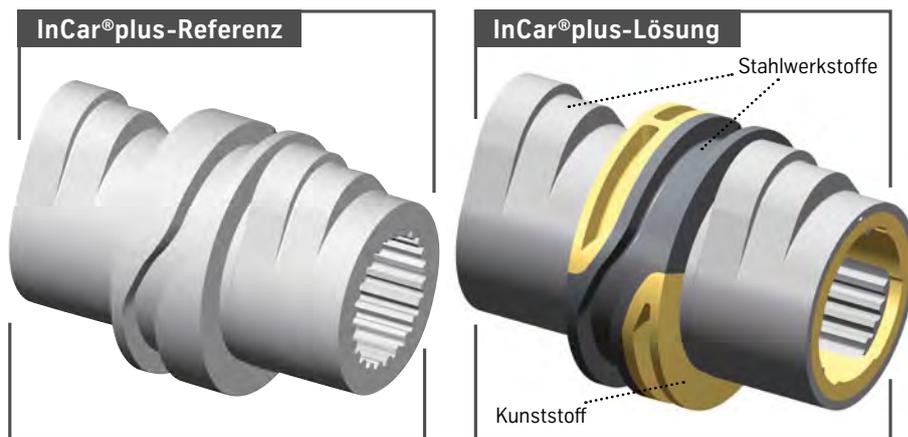
Mit zunehmendem Downsizing und dem damit verbundenen Anstieg der Mitteldrücke ergibt sich die Notwendigkeit für ein dreistufiges Schaltssystem. Die Aufteilung des Kennfelds in drei Ventilhubbereiche zieht eine Verschiebung der Schaltpunkte zu höheren Drehzahlen nach sich. Höhere Drehzahlen und Massen belasten aber die Schaltkulissee und den Aktuator stärker als bisher. Die gegebene mechanische Belastbarkeit beider Komponenten begrenzt allerdings die zulässige Schaltdrehzahl. Dieser Zielkonflikt lässt sich durch eine andere Konstruktion, etwa der Schaltkulissee, nicht lösen. Der deut-

lich limitierte Bauraum in diesem Bereich schränkt die konstruktiven Freiheiten stark ein.

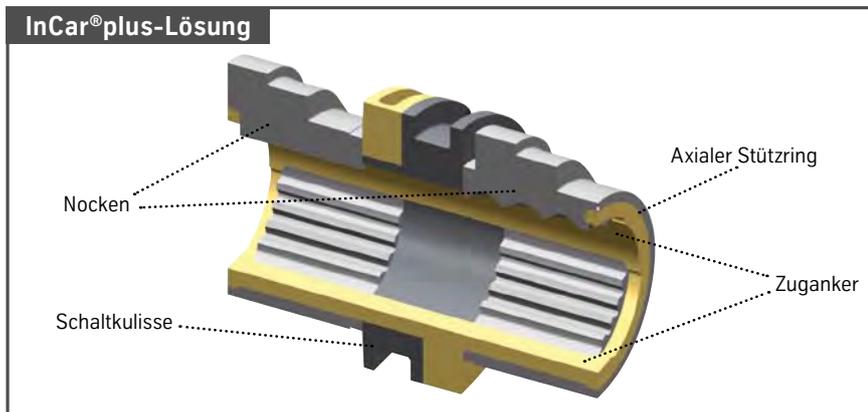
WENIGER MASSE IST DIE LÖSUNG

Hingegen erweist sich eine Massereduzierung am Schiebeelement als plausibler Ansatz für die Realisierung eines dreistufigen Schiebenockensystems, ❶. Darüber hinaus eröffnet sie die Gelegenheit für einen eigenständigen Designansatz in Ergänzung zu den bestehenden Schutzrechtsanmeldungen bezüglich solcher Hubumschaltssysteme.

Für diese Gewichtsreduzierung am Schiebenockenelement sorgt eine belastungsoptimierte Kombination von Stahlbauteilen mit einem Hochleistungskunststoff, ❷. Den axialen Zusammenhalt zwischen den Nocken und der Schaltkulissee stellen drei Zuganker aus Kunststoff und axiale Stützringe an den Enden des Schiebenockenelements aus einem faserverstärkten, wärmestabilisierten Kunststoff sicher. Die gewichtsoptimierte Schaltkulissee aus 31CrMoV9 ist mit Kunststoff umspritzt. Ihre Wandstärken können unter Berücksichtigung der resultierenden 20 % geringeren Betriebslast und der



❶ Dreistufiges Schiebenockenelement in monolithischer (links) und Hybridbauweise (rechts)



2 Schnittdarstellung hybrides Schiebenockenelement

erforderlichen Sicherheiten auf ein Minimum reduziert werden. Aussparungen in den Nocken schaffen den erforderlichen Freiraum für die Zuganker und die Stützringe. Radial verstärkt der kulisenumgebende Kunststoff zusätzlich die Zuganker.

Einen weiteren Vorteil bietet die Hybridbauweise bezüglich der Werkstoffauswahl. Durch die damit mögliche separate Fertigung der einzelnen Komponenten können für die Stahlbauteile unterschiedliche Werkstoffe gewählt und individuelle Wärmebehandlungen durchgeführt werden. Damit ist eine optimale Anpassung des Bauteils an die Beanspruchung möglich.

INNOVATIVES WERKSTOFF- UND PRODUKTIONSKONZEPT

Der form- und kraftschlüssige Zusammenhalt zwischen Kulisse und Nocken entsteht im Spritzgussverfahren. Zur Entwicklung des dafür erforderlichen Werk-

zeugkonzepts wurden umfangreiche Moldflow-Simulationen durchgeführt. Dadurch gelang ein belastungsgerechtes, homogenes Werkstoffgefüge in allen kunststoffgefüllten Bereichen. 3

In Abhängigkeit von den anstehenden Belastungen kommen dabei kohle- oder glasfaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz, die eine signifikante Gewichtsreduktion von bis zu 30 % und damit wesentlich geringere Lasten während des Schaltvorgangs erlauben.

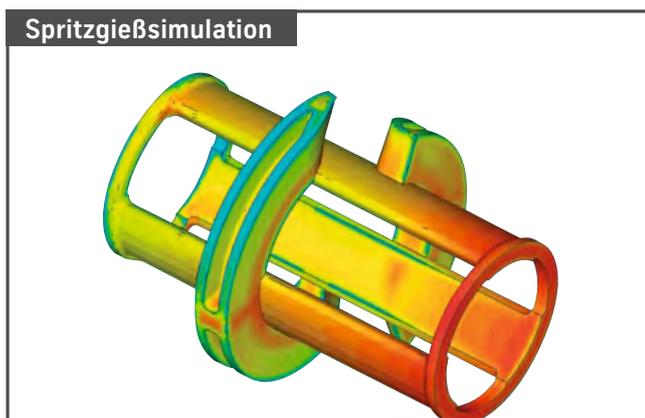
Das hybride Schiebeelement ist für eine maximale Nennschaltdrehzahl von 4000/min und 4×10^6 Lastwechsel ausgelegt. Nach oben ist eine Überdrehzahlgrenze von 5000/min definiert. Die resultierenden Belastungen wurden mithilfe einer MKS-Simulation ermittelt. Sie berücksichtigt unter anderem die Einflüsse der Rastierungs- und Reibungskräfte sowie des Spiels im System. Die ermittelten Belastungen bilden die Basis für eine detaillierte FEM-Bewertung.

Die Abstützung der axialen Beschleunigungskräfte erfolgt über den axialen Stützring sowie die kulisenumgebenden Kunststoffelemente in Interaktion mit den Zugankern. Bei dieser Konstellation treten in den jeweiligen Übergangsbereichen die höchsten Spannungen auf, 4. Eine gezielte konstruktive Gestaltung und harmonische Querschnittsübergänge in diesen Bereichen gewährleisten aber die erforderliche Bauteilsicherheit.

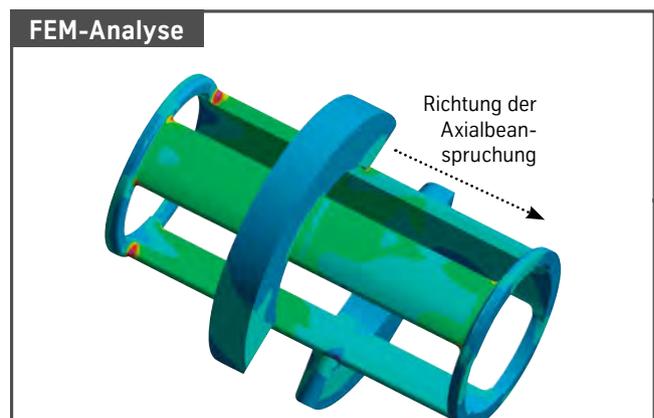
Für die erste mechanische Erprobung des hybriden Schiebeelements wurde ein spezieller Prüfstand konzipiert. Die Berücksichtigung der wirkenden Reibungskräfte im Ventiltrieb erfolgt durch die konstruktive Integration des Ventilspielausgleichs und der Rollenschlepphebel. Die versuchstechnische Absicherung der mechanischen Haltbarkeit für die erforderliche Lastwechselanzahl erfolgt in einer speziell thermisch konditionierten Umgebung. Parallel dazu werden die real auftretenden Beschleunigungen mithilfe eines Lasermessverfahrens ermittelt und das Simulationsmodell validiert.

AUSBLICK

Eine erste mechanische Erprobung unter Einwirkung der realen Belastungen fand auf einem Komponentenprüfstand statt und bestätigte das Leichtbaupotenzial von 30 %. Bei einer definiert zulässigen Belastung des Aktuatorpins im Referenzbauteil ergibt sich die Möglichkeit, die Grenzschaltdrehzahl um 1000/min zu erhöhen. Mit befeuerten Motorentests wird ThyssenKrupp zyklusbezogene Untersuchungen zur Absicherung der Aussagen über die Höhe der weiteren Kraftstoffreduktion durchführen.



3 Moldflow-Simulation Kunststoffverbund



4 Resultierende Spannungen in der FEM-Analyse

NOCKENWELLENMODULE – OPTIMIERUNG DURCH HYBRIDBAUWEISE

Die Entwicklung von Zylinderkopf-Haubenmodulen mit integrierten, gebauten Nockenwellen erschloss signifikante Gewichts-, Reibungs- und Kostenvorteile. ThyssenKrupp zeigt mit einem hybriden Materialansatz aus Kunststoff-, Aluminium- und Stahlkomponenten, wie sich weitere 15 % Gewichtsvorteil erzielen lassen. Hybride Nockenwellenlager, bestehend aus Aluminium-Lagerbrücken mit eingegossenen Lagerringen, senken die Reibleistung um 10 bis 15 W sowie den Ölvolumenbedarf in den Gleitlagern um 30 bis 40 %.

Seit der Markteinführung von Zylinderkopf-Haubenmodulen mit integrierten, gebauten Nockenwellen im Jahr 2011 ist die klassische Nockenwellenlagerung mit geteilten Gleitlagern revolutioniert und um einen modularen Ansatz für Diesel- und Ottomotoren erweitert worden.

Nockenwellen können seitdem in monolithischen Aluminium-Zylinderkopfhauben oder -Leiterrahmen zu einbaufertigen Modulen gebaut werden. Hierbei wurden bereits deutliche Gewichtsreduzierungen erreicht. Auch reibungsreduzierende Maßnahmen wie verringerte Lagerdurchmesser, geschlossene Gleitlager oder der Einsatz von Wälzlagern konnten umgesetzt werden. Die Herstellkosten fallen durch Einsparung von Dichtungselementen sowie Befestigungsmitteln deutlich geringer aus. Insbesondere die Ausführung mit Leiterrahmen und separater aufgesetzter

Kunststoffhaube erzielte außerdem positive Akustikeffekte.

Allen bisherigen Nockenwellenmodulen ist gemein, dass die Gleitlagerung der Stahlwelle in einer Lagergasse aus Aluminium erfolgt. Da im Motorbetrieb Temperaturen von -40 bis 150 °C im Bereich der Nockenwellenlagerung möglich sind, führen die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Aluminium und Stahl bei steigender Motortemperatur zu einer Vergrößerung des Lagerspalts. Gleichzeitig sinkt mit der Erwärmung des Motoröls dessen Viskosität. Die Folge ist ein steigender Öldurchsatz durch die Lagerspalte, der von der Ölpumpe zu Lasten der Motoreffizienz kompensiert werden muss.

Das von ThyssenKrupp konzipierte Nockenwellenmodul in Hybridbauweise, **1**, verbindet die Vorteile von monolithi-

scher Zylinderkopfhaube und Leiterrahmen-Bauweise. Hybridbauweise bezeichnet dabei die einbaufertige Herstellung eines Moduls aus Hauptkomponenten unterschiedlicher Materialien. Hauptkomponenten sind Lagerbrücken aus Aluminium mit funktionsoptimierendem Kern, **2**, und die Kunststoffhaube. Alle Komponenten sind material- und beanspruchungsgerecht optimal ausgelegt.

LAGERBRÜCKEN MIT FUNKTIONSOPTIMIERENDEM KERN

Einzelne Lagerbrücken bieten gegenüber monolithischen Aluminium-Zylinderkopfhauben durch geringere Geometrieinschränkung im Gießprozess ein Leichtbaupotenzial, da diese besser auf die Kraftflussrichtung der auftretenden Steuertriebs- und Ventiltriebskräfte hin ausge-



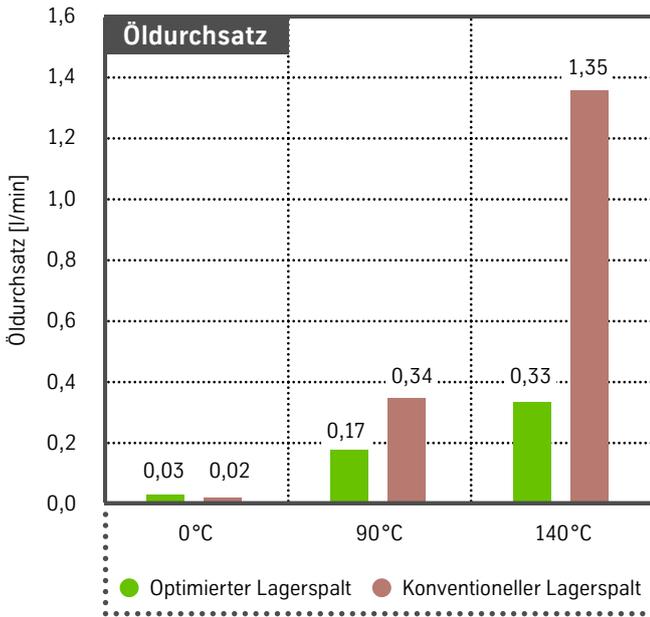
1 Nockenwellenmodul in Hybridbauweise



2 Lagerbrücke mit funktionsoptimierendem Kern

Werkstoff	Dichte	Wärmeausdehnungskoeffizient
Aluminium	2,70 g/cm ³	23,1·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Stahl	7,81 g/cm ³	11,8·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Sinterstahl	5,00 g/cm ³	11,8·10 ⁻⁶ K ⁻¹
Verbund (60 % AlSi ₉ Cu ₃ , 40 % Al ₂ O ₃)	3,21 g/cm ³	12,9-14,3·10 ⁻⁶ K ⁻¹

3 Vergleich der Dichten und Wärmeausdehnungskoeffizienten



4 Öldurchsatz bei konventionellem und optimiertem Lagerspalt

legt werden können. Die deutlich einfachere Gestaltung der Lagerbrücken erleichtert ihre weitere Optimierung. So können zum Beispiel funktional unnötige Materialanhäufungen vermieden werden, wie sie bei einer monolithischen Aluminiumhaube gießtechnisch erforderlich sind. In den nicht funktions- und festigkeitsrelevanten Bereichen ist es möglich, die Materialquerschnitte zu reduzieren. Die Auszugsrichtung der monolithischen Haube lässt hier keine Hinterschnitte zur Materialreduzierung zu.

Lagerbrücken mit funktionsoptimierendem Kern sind Aluminiumussteile mit partiellen Lagereinsätzen aus porösen Materialien basierend auf Keramik oder Eisenwerkstoffen. Diese gleichen die Wärmeausdehnung der Lagerstellen einer Nockenwelle zu dieser an, 3.

Mikrogeometrische, formschlüssige Verbindungen wurden mit Keramik- und Sinterwerkstoffen im Druckgussprozess entwickelt und dabei auch neue Infiltra-

tionsprozesse analysiert. Während extremer Leichtbau mit dem Keramik-Werkstoff möglich ist, stellt der Sintermetallring eine kosteneffiziente und zeitnah einsetzbare Serienlösung dar. Makrogeometrische, formschlüssige Verbindungen wurden ebenso mit Stabilisierungsringen aus Eisenwerkstoff erzielt, die vollständig von Aluminium umgossen sind.

Bei allen Lagerbrücken mit funktionsoptimierendem Kern ist die Nockenwelle im Aluminium gelagert und der Verstärkungsring, mit seinem thermischen Ausdehnungskoeffizienten äquivalent zu dem der Nockenwelle, hält das Lagerspiel über alle Temperaturbereiche annähernd konstant. FEM-Analysen belegen, dass die auftretenden Spannungen in der Lagerbrücke in allen Temperaturbereichen unkritisch sind. 4 zeigt die simulierte Reduzierung des Öldurchsatzes. Neben der Senkung des Öldurchsatzes an den Lagerstellen ist mit zusätzlichen Maßnahmen an der Nockenwelle die Reibleistung weiter zu

reduzieren. Mögliche kombinierbare Lösungen werden im Einzelprojekt „Reibungsreduzierung bei Nockenwellen“ entwickelt, da diese auch für Einzelnockenwellen eingesetzt werden können (siehe Beitrag ab Seite 13).

KUNSTSTOFFHAUBE OHNE ZUSÄTZLICHEN MONTAGEAUFWAND

Die Kunststoffhaube ist die zweite Hauptkomponente des Nockenwellenmoduls in Hybridbauweise. Sie erfüllt folgende, bei der Bauteilgestaltung und Materialauswahl berücksichtigten Funktionen:

- : Abdichtung gegenüber Zylinderkopf und Umwelt durch eine Acrylat-Kautschuk-Dichtung
- : Ausrichtung der Lagerbrücken im Modul und Positionierung des Moduls auf dem Zylinderkopf durch toleranzausgeglichenes Fügeverfahren
- : Aufnahme von Anbauteilen mithilfe eingegossener Gewindebuchsen
- : Aufnahme von Befestigungselementen und Verschlüssen in der Haubengeometrie.

Die im Rahmen des Projekts entwickelte Kunststoffhaube orientiert sich geometrisch an der Referenz-Zylinderkopphaube und stellt somit eine nahezu bauraumneutrale Alternative zum Stand der Technik dar. Durch das wesentlich geringere spezifische Gewicht des Kunststoffs ist die neue Haube mit Lagerbrücken rund 500 g leichter als die monolithische Referenzhaube aus Aluminium. Zur Gewährleistung einer hohen Formstabilität sind nur geringfügige Änderungen an der Haubengeometrie notwendig. Um die geforderte Temperatur- und Medienbeständigkeit sowie Verarbeitbarkeit im Spritzgussprozess sicherzustellen, wurde als Werkstoff PA66 GF35



5 Umlaufende Elastomerdichtung

Temperatur [°C]	Nockenwelle Stahl	Aluminium-Lagerbock	Δ Lager-spiel	Hybrid-Lagerbock mit Verstärkungsring aus Eisenwerkstoff	Δ Lager-spiel	Optimierung Lagerspiel
-40	-18 μm	-36 μm	-18 μm	-33 μm	-15 μm	3 μm ▶ Potenzial Verringerung Minimalspiel
150	37 μm	66 μm	+29 μm	53 μm	+16 μm	13 μm ▶ Verringerung temperaturabhängige Lagerspielvergrößerung

6 Lagerspalt in Abhängigkeit der Motor-Betriebstemperatur

ausgewählt, das als Standardpolymer für Anwendungen im Verbrennungsmotor in vielfältiger Weise eingesetzt wird.

Eine umlaufende Elastomerdichtung dichtet die Kunststoffhaube gegen die Lagerbrücken und den Zylinderkopf ab. Die Dichtung entkoppelt gleichzeitig die Haube von den Schwingbeschleunigungen des Motors, 5.

Für das Fügen der Hauptkomponenten Lagerbrücken und Kunststoffhaube entwickelte ThyssenKrupp ein neues Verfahren. Es entlastet nicht nur den Motorenhersteller vom Montageaufwand für die Kunststoffhaube, sondern reduziert auch den Bearbeitungsaufwand im Vergleich zu monolithischen Aluminiumhauben. In die Lagerbrücken eingepresste Buchsen stellen mit der Kunststoffhaube eine kraft- und formschlüssige Verbindung her. Diese Buchsen werden mit dem neu entwickelten thermischen Verfahren mit der Kunststoffhaube verbunden.

UMFASSENDE VIRTUELLE UND REALE ABSICHERUNG

Parallel zur Entwicklung sichern analytische und numerische Berechnungen die Auslegung der Hauptkomponenten ab. Dabei wurden Kräfte und Momente aus dem Ventiltrieb in den FE-Berechnungen berücksichtigt. Bei der Auslegung der Verbindung zwischen Nockenwellenmodul und Kunststoffhaube wurden auch die auf die Lagerbrücken wirkenden Kräfte der Elastomerdichtung analysiert. Die in einer FEM-Analyse berechneten Hauptspannungen im Kunststoff betragen maximal 10 % der zulässigen Werte im Bereich der Verbindung von Kunststoffhaube und Nockenwellenmodul.

Eine weitere FEM-Berechnung analysierte die Lagerspaltbildung bei Betriebstemperaturen von -40 bis 150 °C. Unter Berücksichtigung der Verschraubung erfolgte die Berechnung des Lagerdurchmessers für einen Aluminium-Lagerbock und einen Hybrid-Lagerbock mit Verstärkungsringen aus Eisenwerkstoff. In 6 sind die Durchmesseränderungen exemplarisch bei Temperaturen von -40 und 150 °C für die Stahlnockenwelle, den Aluminium- und Hybrid-Lagerbock dargestellt. Es ist zu erkennen, dass beim Hybrid-Lagerbock der Verstärkungsring sowohl das Schrumpfen als auch die Ausdehnung des Aluminiums reduziert.

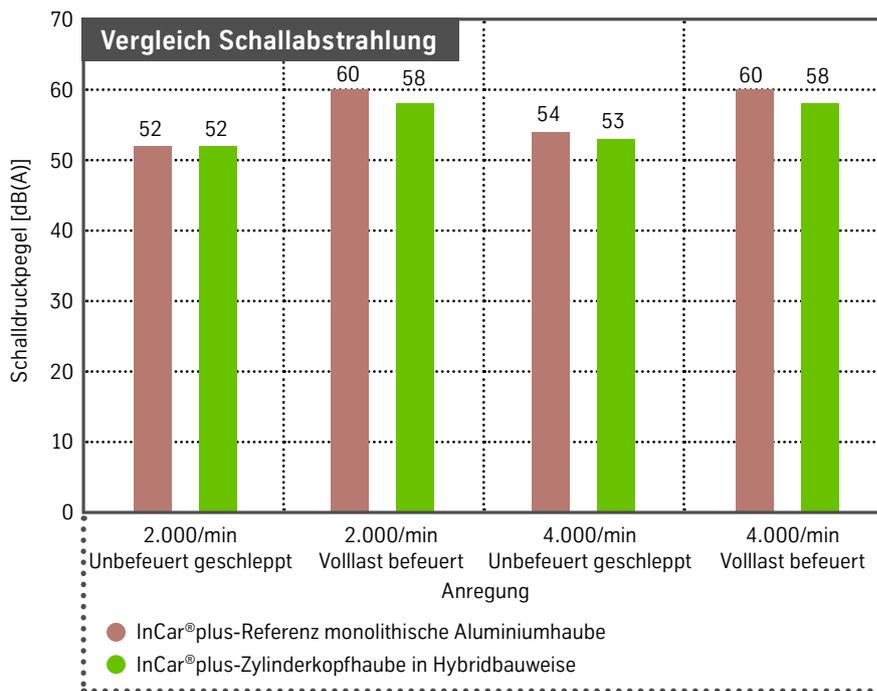
Vorversuche zeigen, dass mit einer Angleichung des Wärmeausdehnungskoeffizienten von Nockenwelle und Lager der Ölverbrauch um 30 bis 40 % reduziert werden kann. Die Berechnungsergebnisse überprüft ThyssenKrupp aktuell auf einem geschleppten Zylinderkopfprüfstand.

Zur Funktionsabsicherung der Kunststoffhaube dient ein Validierungsprogramm aus Modalanalyse, Festigkeitsprüfungen, Temperaturwechseltests zur Alterung des Kunststoffs, Dichtheitsprüfungen und Akustikuntersuchungen.

Die akustische Entkopplung, die strukturelle Optimierung sowie die guten eigendämpfenden Eigenschaften des Kunststoffs ermöglichen eine Reduzierung der Schallabstrahlung im Vergleich zur monolithischen Referenzhaube, 7.

AUSBLICK

Das Projekt zeigt, dass Zylinderkopf-Haubenmodule mit integrierten, gebauten Nockenwellen erheblich weiterentwickelt werden können. Schon heute sind weitere Funktionsintegrationspotenziale sichtbar, die konzeptionell am Beispiel Aktuatoren für variable Ventiltriebe, nicht rotierende Blow-by-Gas-Ölabscheider oder Vakuumpumpen untersucht werden. Auch in puncto Gewichtsreduktion sind neue Ideen bereits in Prüfung.



7 Reduzierung der Schallabstrahlung durch die Kunststoffhaube

WARMFESTE, DICHTEREDUZIERTE STÄHLE FÜR ABGASANLAGEN

Warmfeste, dichterereduzierte Stähle weisen aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung für Abgasanlagen besonders günstige Eigenschaften auf. Zwar ist ihre Werkstoffentwicklung noch nicht abgeschlossen, dennoch zeichnet sich ein vorteilhaftes Eigenschaftsprofil ab. Neben der hohen Festigkeit bei niedrigen und hohen Temperaturen sowie der hohen Korrosionsbeständigkeit sind insbesondere die geringe thermische Leitfähigkeit und ihre geringere Dichte hervorzuheben.

Seit den frühen 1970er-Jahren bestehen Abgasanlagen aus ferritischen, rostfreien Stählen. Die Einführung der Abgasentgiftung, immer strengere Abgasgrenzwerte und gewandelte Kundenansprüche erfordern aber vermehrt Leichtbaukonstruktionen, die nicht nur den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen mindern, sondern auch langlebig und optisch ansprechend sind. Der aktuell für diese Anwendung gebräuchliche ferritische Chromstahl 1.4509 (X2CrTiNb18) zeichnet sich durch sehr hohe Zunderbeständigkeit und Warmfestigkeit aus. Er dient bei diesem Entwicklungsprojekt als Referenz. Insbesondere eine noch höhere Warmfestigkeit und verbesserte Heißgas-Korrosionswiderstände sind zwei wichtige Anforderungen an die Werkstoffe künftiger Abgasanlagen.

Eine interessante Werkstoffentwicklung mit vielversprechenden Ansätzen hat jetzt ThyssenKrupp im Fokus. Dieser warmfeste Flachstahl ist zurzeit noch in der Entwicklung, bietet aber nach den vorliegenden Untersuchungen vielversprechende positive Eigenschaften: etwa eine hohe Festigkeit bei niedrigen und hohen Temperaturen, die geforderte hohe Korrosionsbeständigkeit und eine geringe thermische Leitfähigkeit. Das alles erreicht er bei einer vergleichsweise geringen Dichte (etwa 8 % weniger als rostfreie Edelstähle), was ihn als Werkstoff für Leichtbau-Komponenten prädestiniert.

ThyssenKrupp fertigt aufgrund des Prototypencharakters des neuen Werkstoffs einzelne Coils bisher in semi-industrieller Weise. Werkstoffspezifische Fertigungsparameter werden aufgrund der besonderen chemischen Zusammensetzung bisher mithilfe von Simulationstechniken abgeleitet und umgesetzt. Der erprobte Herstellungsprozess wird unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten weiter optimiert. Aufgrund der geringen Legierungskosten sowie optimierbarer Bauteilgeometrien wird ein Sparpotenzial beim Einsatz des neuen Werkstoffs erwartet.

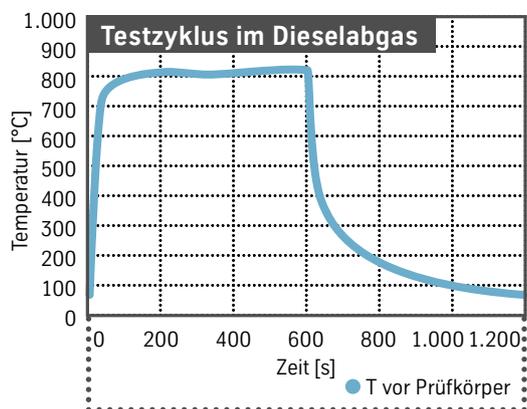
In einem umfassenden Untersuchungsprogramm hat ThyssenKrupp den neuen Werkstoff bei Raumtemperatur und maximalen Einsatztemperaturen auf seine relevanten Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften hin getestet. Testumgebung war eine Abgaskammer

mit realen Dieselabgasen unter thermischer Wechselbeanspruchung zwischen Raumtemperatur und 800 °C, ❶. Optisch fällt sofort die nur schwache, auf Anlauf farben begrenzte Oxidation auf, ❷. Im Vergleich zu der wesentlich dickeren grauen Zunderschicht des Referenzwerkstoffs unter gleichen Testbedingungen zeugt die nur leichte Verfärbung des neuen Stahls von seiner enormen Heißgas-Oxidationsbeständigkeit.

Weitere Grundlagenuntersuchungen der zyklischen Oxidation zeigen, dass der neue Werkstoff auch in anderen aggressiven Medien einen hohen Korrosionswiderstand aufweist. So sind bei 900 °C Temperatur in feuchter Luft nur dünne und langsam wachsende Oxidschichten feststellbar. Diese sehr hohe Oxidationsbeständigkeit verlängert die Lebensdauer und sorgt für ein besseres optisches Erscheinungsbild der Abgasanlage. Der



❶ Test des Heißgaskorrosionsverhaltens in der Diesel-Abgaskammer (links) und Halterung für die Werkstoffproben (rechts)



2 Testzyklus im Dieselabgas (links) und Anlauffarben nach Dauerwechselversuch (rechts)

Referenzwerkstoff Chromstahl 1.4509 verzeichnet im Oxidationsversuch dagegen eine etwa viermal schneller wachsende Oxidschicht (Gewichtszunahme), die zum Abplatzen neigt (Gewichtsabnahme), 3. Eine so freigelegte metallische Oberfläche oxidiert bei weiterer Beanspruchung beschleunigt weiter.

Zusätzlich zu den Werkstoffuntersuchungen hat ThyssenKrupp aus dem Material auch einige Prototypen-Komponenten für die Abgasanlage eines Dieselaggregats hergestellt und bei Vollast/Leerlauf-Wechseln getestet, 4. Im Vergleich zu einem Abgasstrang aus dem Referenzwerkstoff weisen die Komponenten aus dem neuen Werkstoff bei gleicher Wandstärke deutlich geringere Außenflächentemperaturen auf. Verantwortlich hierfür ist die deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit des entwickelten Werkstoffs, die bei Raumtemperatur um etwa 40 % unter der des Referenzwerkstoffs liegt.

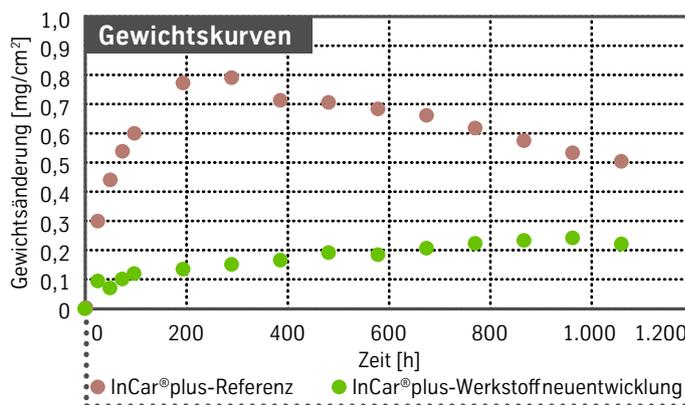
Dies führt dazu, dass weniger Wärme aus dem Abgassystem entweicht und damit ein früheres „Anspringen“ von Katalysator und Partikelfilter ermöglicht. Hierdurch können mit geringem Aufwand wichtige Emissionspotenziale erschlossen werden. Gleichzeitig wird so das Abkühlen des Abgasstrangs bei Stillstandsphasen des Motors verzögert, was weniger Sekundärmaßnahmen (etwa Dämmung und Abschirmung) notwendig macht.

Andere für den Automobilhersteller relevante Eigenschaften dieses neuen Materials sind vergleichbar mit dem Referenzwerkstoff. Dazu zählt beispielsweise die Festigkeit in einem breiten Temperaturintervall zwischen Raumtemperatur und 900 °C. Zu den Themengebieten

Umform- und Fügeverhalten laufen derzeit umfangreiche, weiterführende Untersuchungen. Deren Ziel ist es, den Werkstoff in etablierten Fertigungsprozessen bei Herstellern von Abgasanlagen ohne weitergehende Prozessanpassungen einsetzen zu können. Die etwa 8 % geringere Dichte des neuen Stahls verringert das Gewicht der Abgasanlage und leistet damit einen wichtigen Beitrag zur Kraftstoff- und Emissionsreduzierung.

Die semi-industrielle Erzeugung des Werkstoffs und erste Grundlagentests von Prototypenteilen haben seine grund-

sätzliche Produzierbarkeit und attraktive Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften bestätigt. ThyssenKrupp wird auf Basis dieser Ansätze weitere Entwicklungen durchführen, um das unzweifelhaft vorhandene Potenzial für die Serienanwendung zu erschließen. Über die primär betrachtete Anwendung im Abgasstrang hinaus werden weitere automobiler Einsatzmöglichkeiten untersucht. Daneben besitzt der Werkstoff auch außerhalb des Automobils potenzielle Einsatzfelder, etwa im Rohrleitungs- und Anlagenbau.



3 Gewichtskurven bei Grundlagenuntersuchungen zur zyklischen Oxidation an feuchter Luft



4 Die Prototypenbauteile Zwischenrohr (links) und Schalldämpfer für Vollast/Leerlauf-Wechseltests (rechts)

INTERDISZIPLINÄRE EXPERTISE OPTIMIERT ELEKTROANTRIEBE

Elektrifizierte Antriebe, als reine Elektrotraktionsmotoren oder in hybridisierten Antriebskonfigurationen, tragen wesentlich zum Erreichen zukünftiger Emissionsziele bei. Automobiltaugliche Elektromotoren müssen deshalb in ihren Kerneigenschaften Wirkungsgrad und Leistungsgewicht weiter optimiert werden, um die Reichweiten der Antriebe zu erhöhen. ThyssenKrupp entwickelt neue, innovative Lösungen durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Produktbereiche gepaart mit hoher werkstofftechnischer Expertise.

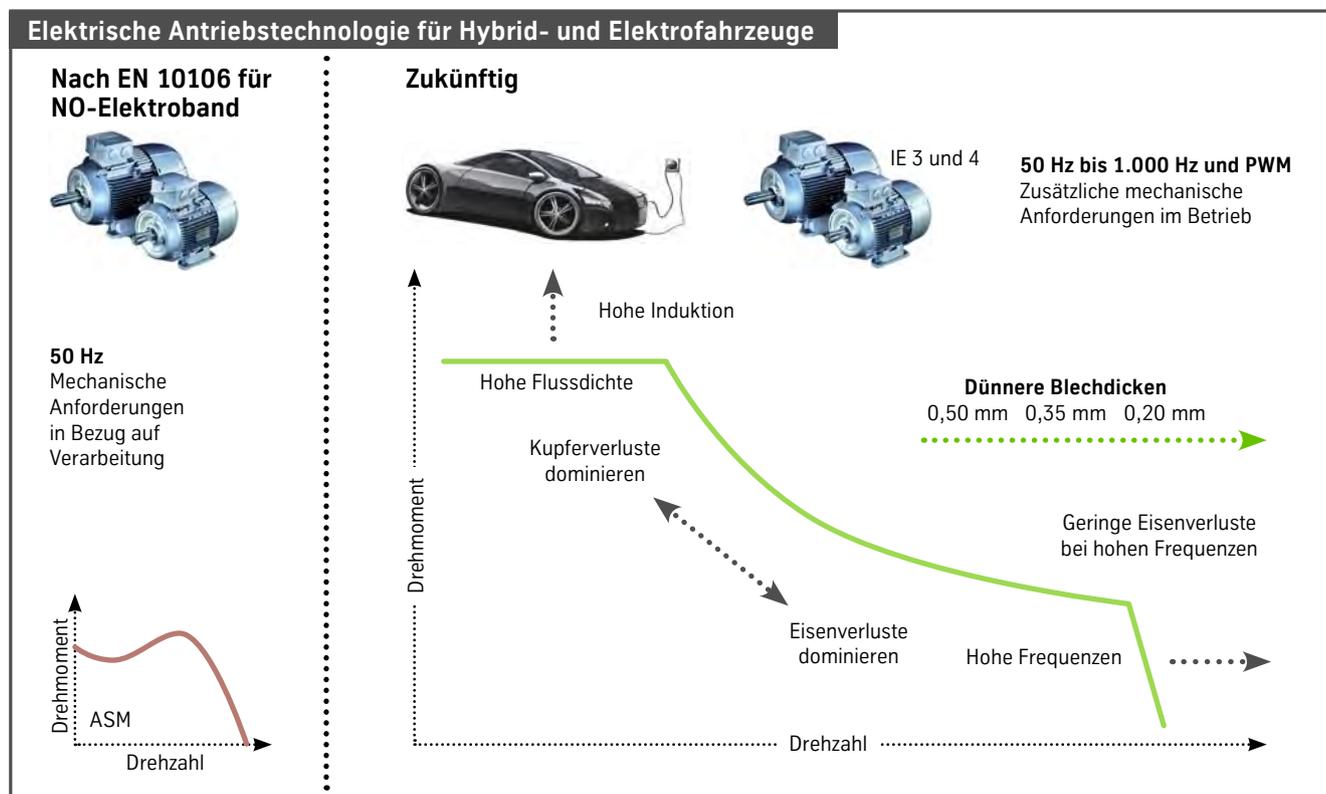
HOCHFESTES, NICHT KORNIORIENTIERTES ELEKTROBAND

Antriebsmotoren für Hybrid- und Elektrofahrzeuge müssen höchste Effizienz, ein geringes Gewicht und ein optimales Package aufweisen. Hieraus resultieren noch höhere Anforderungen an das nicht kornorientierte Elektroband. ThyssenKrupp hat dafür neue Elektrobandsorten entwickelt, mit deren Hilfe sich das Drehmoment der elektrischen Maschine im Vergleich zu der besten genormten Standardsorte M 235-35 A signifikant erhöhen lässt. Des Weiteren weisen diese Sorten magnetische Garantien für höhere Frequenzen von zum Beispiel 400 Hz bei gleichzeitig garantierter Streckgrenze von mehr als 420 MPa auf.

Elektromotoren mit immer höheren Drehzahlen und weiter gesteigerten Drehmomenten sind die Antwort auf Trends im Pkw wie Energieeffizienz, Ressourcenschonung und Gewichts-

gen an zukünftige Elektrobandsorten, ❶. ThyssenKrupp hat diese Anforderungen schon lange aufgegriffen und entwickelt für das InCar plus-Projekt Funktionsmuster mit neuen Elektrobandsorten für Antriebsmotoren. Die

Elektrobandsorte 280-30 AP zeichnet sich beispielsweise durch geringere Verluste bei hohen Frequenzen und eine geringere Schädigung der weichmagnetischen Eigenschaften im Fertigungsprozess zu Rotoren und Statoren aus.



❶ Heutige Anforderungen an nicht kornorientiertes Elektroband (NO) nach Norm EN 10106 (links) und zukünftige Anforderungen (rechts)

Sorte	Nach EN 10303	Standardsorten nach EN 10106			
	NO 20	M 235-35 A	M 250-35 A	M 270-35 A	M 330-35 A
Nennstärke [mm]	0,2	0,35	0,35	0,35	0,35
P 1,0 50 Hz [W/kg]	0,9	1,0	1,0	1,0	1,2
P 1,5 50 Hz [W/kg]	2,4	2,3	2,4	2,4	2,7
P 1,0 400 Hz [W/kg]	11,7	16,6	18,6	18,4	20,9
P 1,0 1.000 Hz [W/kg]	43,0	70,0	82,0	80,0	91,0
R _{p0,2} typisch [MPa]	360	425	370	360	330
R _{p0,2} garantiert [MPa]	Auf Nachfrage	≥ 360 bzw. 390	≥ 350	≥ 350	≥ 320
R _m [MPa]	450	525	480	500	450
HV5	190	220	200	200	165

Sorte	Anwendungsoptimierte Sorten		Hochfeste Sorten			Extra hochfeste Sorten
	330-30 AP	270-27 AP*	280-30 AP	260-27 AP*	xxx-35 AP*	550Y40-35 HS**
Nennstärke [mm]	0,30	0,27	0,30	0,27	0,35	0,35
P 1,0 50 Hz [W/kg]	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	Auf Nachfrage
P 1,5 50 Hz [W/kg]	2,8	2,6	2,5	2,4	3,0	Auf Nachfrage
P 1,0 400 Hz [W/kg]	18,0	15,0	16,0	15,0	22,0	< 40
P 1,0 1.000 Hz [W/kg]	75,0	59,0	62,0	57,0	80,0	Auf Nachfrage
R _{p0,2} typisch [MPa]	330	390	440	430	450	520-620**
R _{p0,2} garantiert [MPa]	≥ 300	≥ 350	≥ 420	Auf Nachfrage	≥ 420	≥ 520**
R _m [MPa]	450	510	550	530	560	670-800**
HV5	168	180	200	200	200	200

Typische Werte für Standardsorten und indikative Werte für anwendungsoptimierte Sorten. Mechanische Kennwerte gemessen bei Raumtemperatur (RT) in Walzrichtung. * Neue Versuche ** Verschiedene Sorten in der Entwicklung

② Vergleich relevanter nicht kornorientierter Sorten für den Einsatz im Traktionsmotor eines Pkw (* und ** bezeichnet Sorten im Versuchsstadium beziehungsweise in bisher geringen gefertigten Mengen, weshalb ihre Werte stärker schwanken können)

Die Entwicklung neuer nicht kornorientierter (NO) Elektrobandsorten begann ThyssenKrupp mit verschiedenen Ansätzen.

Diese neuen Werkstoffe zeichnen sich durch garantierte weichmagnetische und mechanische Eigenschaften aus. Zur

Auslegung der Elektromotoren standen Elektrobandsorten, die bereits heute in Traktionsantrieben zum Einsatz kommen, sowie neue anwendungsoptimierte Sorten zur Verfügung. ②

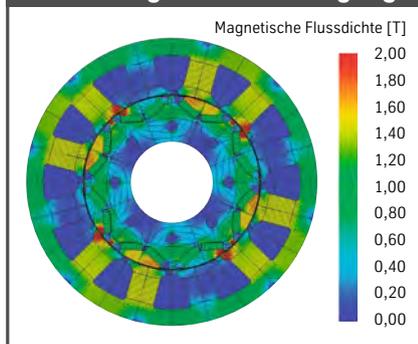


③ Motorenprüfstand im neuen E-Mobility Center Drives bei ThyssenKrupp in Bochum

NEUES TESTZENTRUM FÜR ELEKTROMOTOREN

Zur Validierung der neu entwickelten Elektrobandsorten wurden im Rahmen des InCar plus-Projekts drei unterschiedliche Funktionsmuster der Elektromotoren aufgebaut und im E-Mobility Center Drives bei ThyssenKrupp in Bochum untersucht. Dieses Entwicklungszentrum unterstützt seit 2013 die anwendungsorientierte Weiterentwicklung von nicht kornorientiertem Elektrobänd; von der FEM-Simulation über die Charakterisierung der weichmagnetischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften bis hin zur Validierung auf modernen Prüfständen. Zur Fertigung von

Elektromagnetische Auslegung



Kenndaten der Motoren	
Nennleistung P_N	35 kW
Nennzahl n_N	4.000/min
Maximalzahl n_{max}	12.000/min
Schleuderzahl $n_{Schleuder}$	14.400/min
Nutenanzahl n	12
Polzahl p	4

4 Kenndaten der drei Synchronmaschinen

DREI MOTORENKONFIGURATIONEN IM VERGLEICH

Die drei permanentmagneterregten Synchronmaschinen weisen Kenndaten gemäß 4 auf und bestehen aus Statorn aus Elektroband der Sorte 280-30 AP. Dessen Vorteile sind die geringere Veränderung der weichmagnetischen Eigenschaften im Fertigungsprozess sowie die geringen Wirbelstromverluste bei hohen Frequenzen. Die Rotoren bestehen aus den nicht kornorientierten Elektrobandsorten M 235-35 A, xxx-35 AP und 550Y40-35 HS, die jeweils verschiedene Streckgrenzen aufweisen.

Besonderes Augenmerk bei der Entwicklung gilt der Auslegung der magnetischen Stegbreiten im Rotor der Funktionsmuster, 5. Im linken Teilbild wird die mechanische Simulation der Sorte xxx-35 AP dargestellt. Der Steg wird so gewählt, dass die Vergleichsspannung im Steg bei der Schleuderzahl von 14.400/min unterhalb der Streckgrenze des jeweiligen Materials liegt.

Hieraus resultieren die drei unterschiedlichen Rotorgeometrien, 5 (links). Für die beste genormte Sorte M 235-35 A mit typischen Verlusten von 16,6 W/kg und garantierter Streckgrenze von 360 MPa resultieren Stegbreiten von 1,1 und 0,9 mm. Diese können beim hochfesten Elektroband xxx-35 AP auf 0,8

und 0,7 mm verringert werden; beim extra hochfesten Elektroband 550Y40-35 HS sogar auf 0,6 mm.

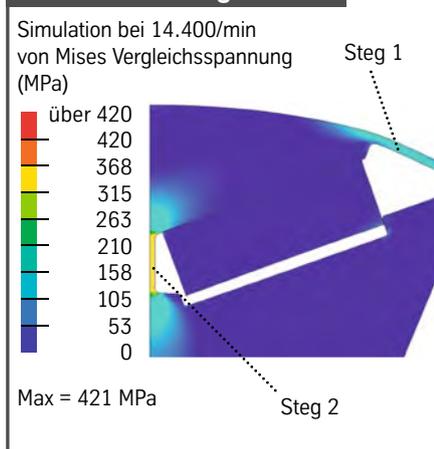
HOCHFESTES ELEKTROBAND IST BESTE MATERIALALTERNATIVE

Diese Auslegung bietet viele Vorteile. Beispielsweise erhöht sich das Bemessungsmoment in der Simulation durch den Einsatz des hochfesten Materials xxx-35 AP bei gleicher Stromstärke im Vergleich zur besten Standardsorte M 235-35 A. Wird das extra hochfeste Elektroband 550Y40-35 HS verwendet, steigt das Drehmoment weiter an, 6. Diese Simulationsergebnisse berücksichtigen sowohl eine identische Eisenlänge als auch eine identische Masse an Permanentmagnetmaterial.

Aufgrund der geringeren Stegbreiten im Rotor verringern sich die Streuflüsse, was den gewünschten Drehmomentanstieg bewirkt. Das bewirkt eine bessere Ausnutzung der Permanentmagnete und bringt weitere Vorteile für die Motoroptimierung. Bei identischer Eisenlänge kann weniger Permanentmagnetmaterial eingesetzt oder bei einer geringeren Gesamtlänge eine vergleichbare Motorperformance erreicht werden. Das erfordert aber eine Neuauslegung der E-Maschine, was jedoch weitere Vorteile hinsicht-

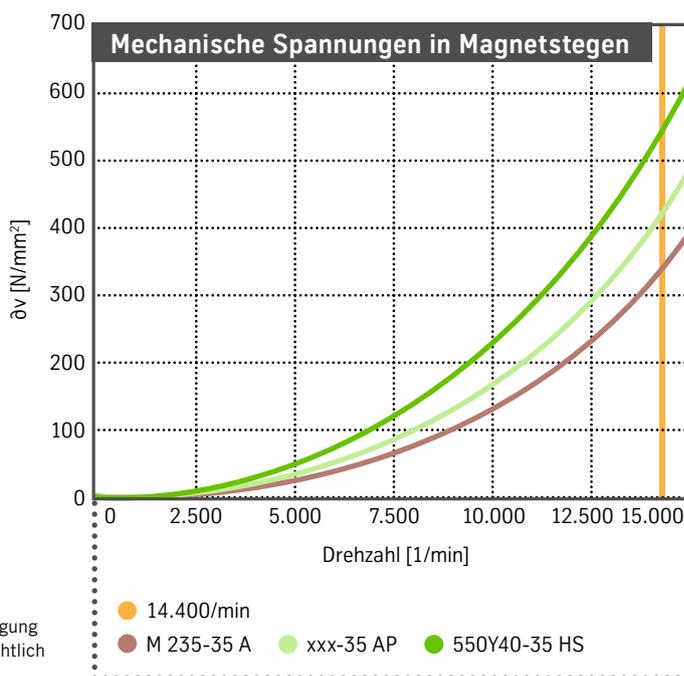
Blechschnitten für Versuche steht eine moderne CO₂-Laserschneidanlage zur Verfügung. Herzstück des Entwicklungszentrums ist ein automobiltauglicher E-Maschinen-Prüfstand mit einer Leistung von 140 kW bei einem Drehmoment von 230 Nm. Die Maximalzahl des Prüfstands beträgt 18.000/min, 3.

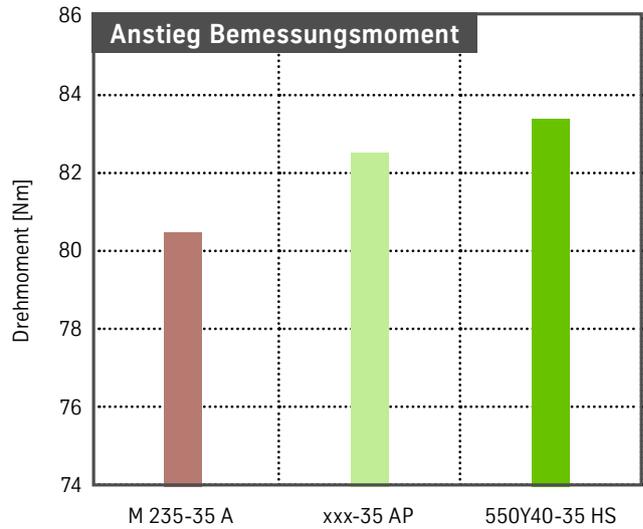
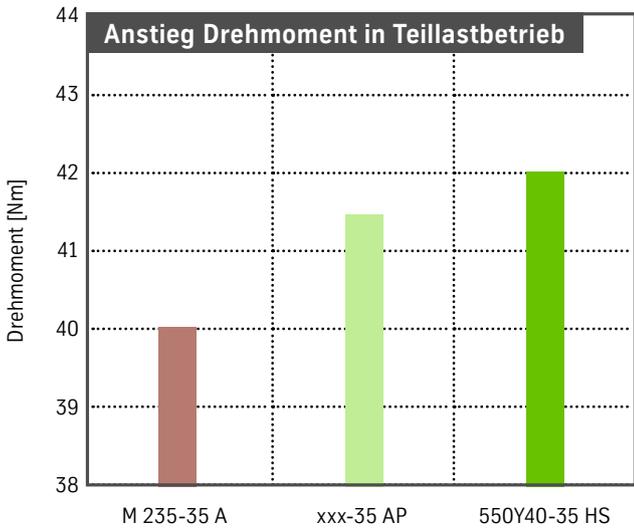
Berechnete Stegbreiten



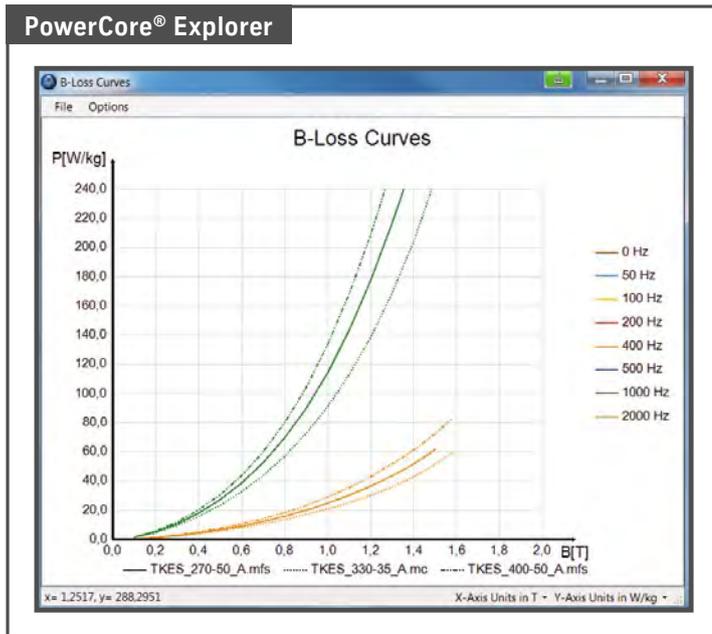
	Steg 1	Steg 2
M 235-35 A	0,9 mm	1,1 mm
xxx-35 AP	0,7 mm	0,8 mm
550Y40-35 HS	0,6 mm	0,6 mm

5 Mechanische Auslegung der drei Rotoren hinsichtlich der Magnetstege





6 Ergebnisse der Simulation für die Eckdrehzahl 4000/min



7 Screenshot des Powercore Explorer

lich Kosten, Gewicht, Bauraumbedarf und Energiebedarf erschließt. Bei InCar plus wird der Ansatz des Drehmomentanstiegs verfolgt.

Als Expertensystem zur Auswahl der am besten geeigneten, nicht kororientierten Elektromotorsorte und zur Unterstützung der FEM-Simulationen steht das Tool Powercore Explorer zur Verfügung, 7. Es umfasst die weichmagnetischen Eigenschaften beziehungsweise Daten verschiedener Elektromotorsorten an im Epsteinrahmen gemessenen Proben, ebenso für hohe Frequenzen von zum Beispiel mehr als 400 Hz. Das Tool bietet außerdem die Möglichkeit, die jeweiligen Materialdaten direkt in gängige FEM-Simulationsprogramme zu exportieren. Auf diese Weise ließen sich die bei InCar plus gemessenen Magnetisierungs- und Verlustdaten der Materialien schnell in die Simulation einbinden.

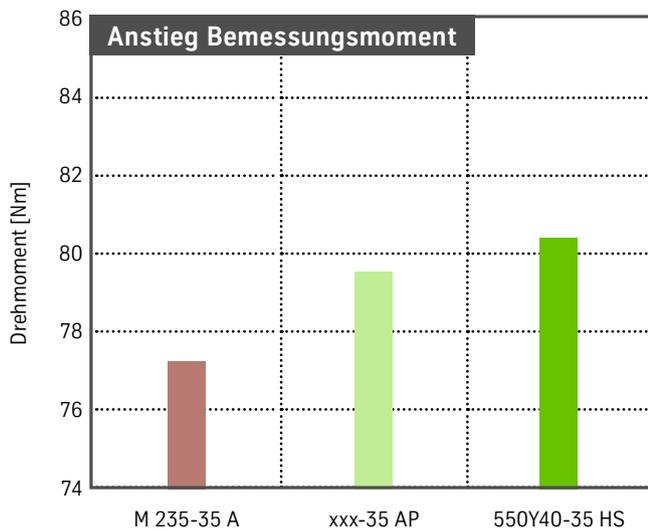
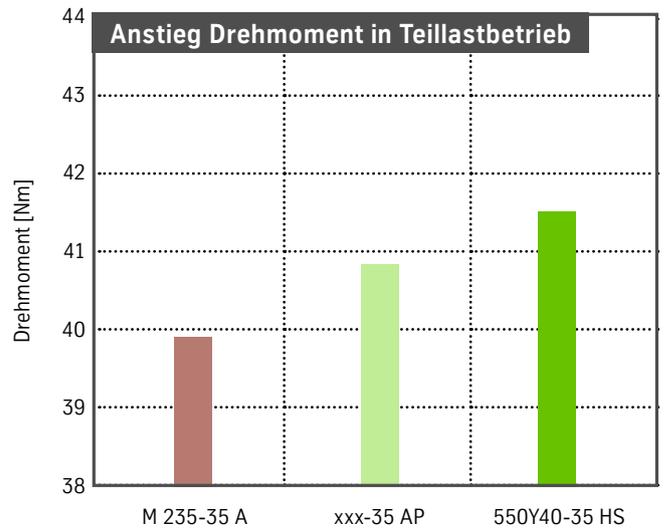
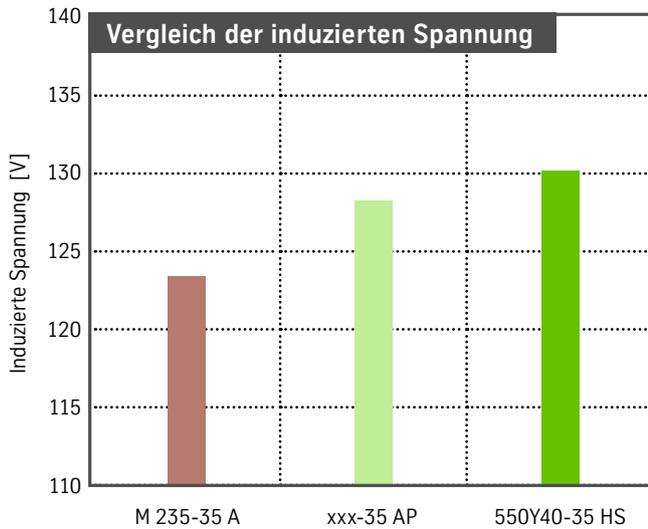
Zur Validierung der Simulationen wurden drei Funktionsmuster aufgebaut und auf dem Motorprüfstand des E-Mobility Center Drives in Bochum vermessen, 8.

Die Messwerte der drei Motoren am Prüfstand untermauern die Simulationsergebnisse. Anstiege der induzierten Spannung und des Drehmoments verdeutlichen die Vorzüge des hochfesten Elektromotors, 9. Als nächster Schritt werden die Messergebnisse der Maschinen zur Verfeinerung der Simulationsmodelle herangezogen.

Ergänzend zur mechanischen Simulation bei 14.400/min wurden alle drei



8 Blechpakete inklusive Wicklung am Stator (links) sowie funktionsbereite E-Maschine (rechts)



⑨ Gemessene Kennwerte bei der Eckdrehzahl von 4000/min

Rotoren bei unterschiedlichen Drehzahlen bis zum Bersten geschleudert und dann die Aufweitung ebenfalls am Bauteil gemessen. Die Untersuchung erfolgte sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 150 °C, da sich die mechanischen Eigenschaften wie Streckgrenze oder Zugfestigkeit bei steigenden Temperaturen verschlechtern. Die Schleuderesultate decken sich mit den Erkenntnissen der mechanischen Simulation. Mit den Schleuder- und Simulationsdaten verbessert ThyssenKrupp gleichzeitig sein Know-how über die Zusammenhänge zwischen Materialprüfungen und Bauteilprüfungen.

BONDAL E VERBESSERT DIE AKUSTIK VON ELEKTROMOTOREN

Der dreischichtige Werkstoffverbund Bondal E im Stator eines Elektromotors reduziert die Schallemission um bis zu 10 dB(A). Ausschlaggebend dafür ist die hohe Körperschalldämpfung von Bondal E. Sie wird durch eine sehr dünne Zwischenschicht aus Kunststoff erreicht. So bleibt der Eisenfüllfaktor nahezu unverändert und die Leistungsdichte des Elektromotors gewahrt. Aufgrund der verminderten Schallemission des Elektromotors können sekundäre Schallschutzmaßnahmen entfallen, sodass mit Package-, Gewichts- und Kostenreduktionen im Gesamtsystem zu rechnen ist.

Bondal E wird derzeit speziell für den Einsatz in Elektromotoren entwickelt und kann aufgrund seiner guten Dämpfungseigenschaften die Akustik deutlich verbessern. Der Werkstoffverbund hat einen dreischichtigen Aufbau aus zwei Deckblechen mit einer viskoelastischen Zwischenschicht. Bondal E kann mit üblichen Stanzwerkzeugen gestanzt und anschließend pakettiert werden.

Für die Anwendung im Stator einer Asynchronmaschine bestehen die Deckbleche von Bondal E exemplarisch aus nicht kornorientiertem Elektroband der Güte M 235-35 A mit einer C5-Beschichtung (Stabolit 20) und einer Blechdicke von 0,35 mm, ❶. Die viskoelastische Zwischenschicht hat eine sehr geringe

Stärke und ist öl- und temperaturbeständig. Der für den Wirkungsgrad eines Elektromotors wichtige Eisenfüllfaktor wird durch die gewählte Kombination nur um etwa 0,7 % reduziert.

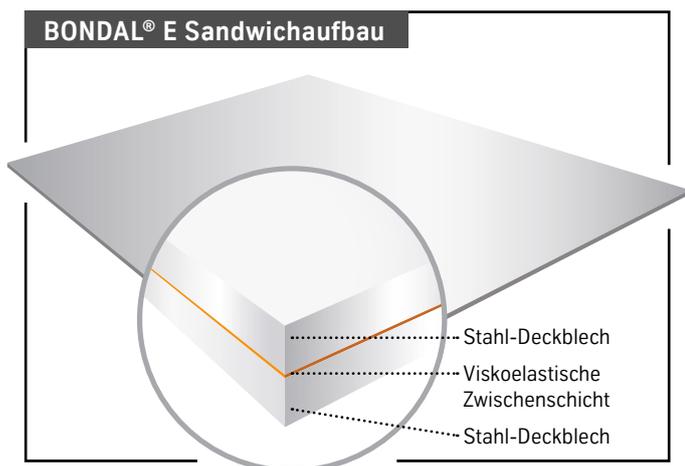
Ausschlaggebend für die geringere Schallabstrahlung der Asynchronmaschine ist die Körperschalldämpfung von Bondal E. Für den Werkstoffverbund wird nach Norm EN ISO 6721 ein Verlustfaktor $\eta = 0,05-0,11$ im typischen akustischen Frequenz- und Temperaturbereich gemessen. Nicht kornorientiertes Elektroband ohne diese Schicht weist nur einen Verlustfaktor von $\eta < 0,001$ auf.

Zum genauen Vergleich ist ein Elektromotor mit einem Stator aus Bondal E auf-

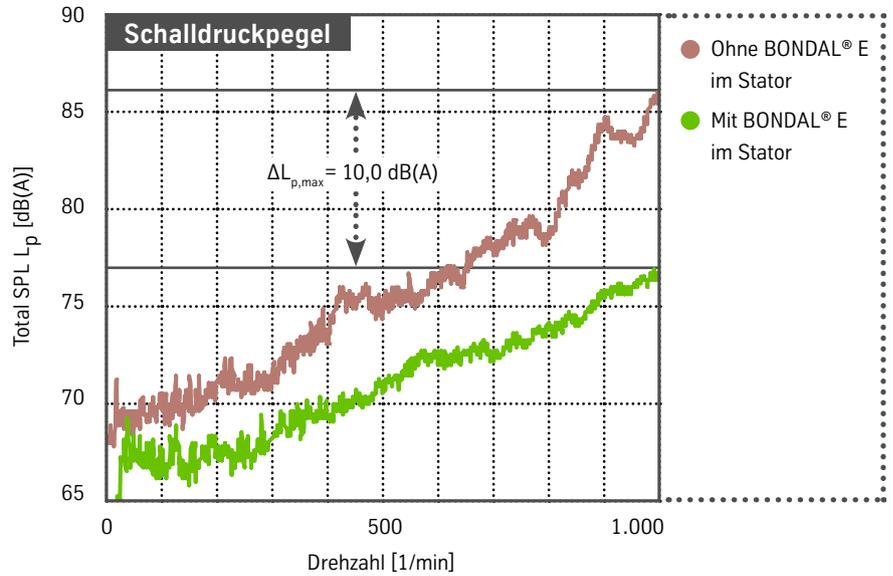
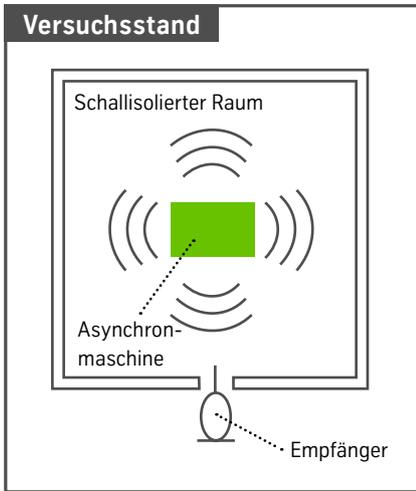
gebaut. Ein baugleicher Elektromotor verfügt als Referenz über dieselbe Elektrobandgüte M 235-35 A ohne viskoelastische Zwischenschichten. Die beiden Asynchronmaschinen sind in einer akustisch definierten Umgebung eingebaut und der Schalldruckpegel wird während des Hochlaufens der Maschinen gemessen, ❷. Dazu wird bei beiden Maschinen innerhalb von 45 s die Drehzahl von 0 auf 1000/min hochgefahren. Der absolute gemessene Schalldruckpegel wird dabei durch den Einsatz von Bondal E um bis zu 10 dB(A) reduziert.

Geräusche lassen sich aber nicht nur über die rein physikalische Messgröße Schalldruck beschreiben. Darüber hinaus bestimmt die Tonalität, ob Geräusche mehr oder weniger angenehm klingen. Die psychologische Wahrnehmung spiegelt sich im Campbell-Diagramm wider, ❸. Enge und dominante Frequenzbänder führen zu einer starken und unangenehmen Tonalität. Bei der konventionell aufgebauten Referenz-Asynchronmaschine treten bei etwa 500 und 950 Hz zwei dominante Frequenzbänder auf. Bei Einsatz von Bondal E im Stator sind keine dominanten Frequenzbänder messbar, das Geräusch wird breitbandiger und wirkt dadurch angenehmer.

Die gute Wirksamkeit des neuen Werkstoffs wird auch durch die Darstellung der Schwingformen der Transferpfadanalysen nachgewiesen. Die Ampli-



❶ Aufbau von Bondal E: Elektroband als Decklagen mit viskoelastischer Zwischenschicht



2 Schematischer Aufbau des Versuchsstands und Vergleich des totalen Schalldruckpegels der Hochlaufmessung

tuden der Schwingformen in den dominanten Frequenzbändern sind durch Einsatz von Bondal E deutlich reduziert.

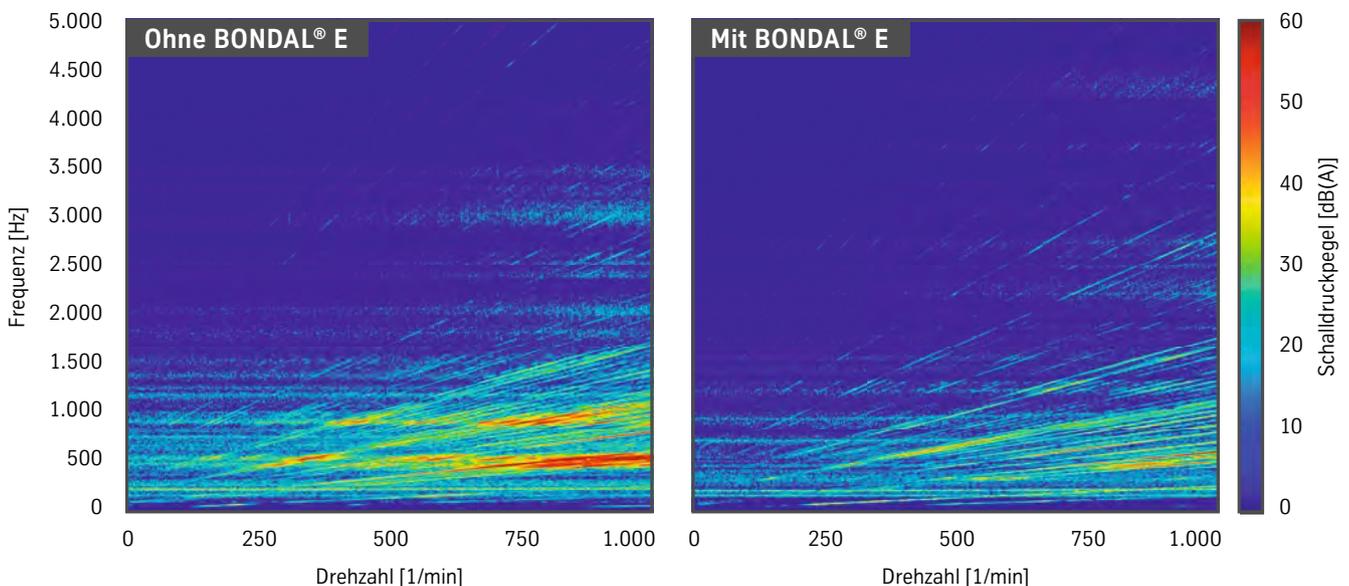
Die Charakterisierung der weichmagnetischen Eigenschaften erfolgt anhand einer Ringkernprobe. Ermittelt werden die spezifische Magnetisierungsenergie und die Permeabilität. Ein Vergleich dieser Kennwerte zeigt keine signifikante Verschlechterung des neuen Bondal E zum konventionellen, nicht kornorientierten Elektroband.

AUSBLICK

Aufgrund dieser sehr interessanten Ergebnisse sind weiterführende Untersuchungen von Bondal E geplant. Vor allem die Ermittlung einer großserientechnischen Erzeugungsrouten sowie der technischen Grenzen für die verarbeitbaren Blech- und Zwischenschichtdicken stehen dabei im Fokus der Arbeiten.

Zur Steigerung der Effizienz von Elektromotoren, insbesondere von Hochleistungs-

motoren für Pkw, werden derzeit die Blechstärken des nicht kornorientierten Ausgangsmaterials für Statoren weiter reduziert. Dünnere Bleche bedeuten jedoch einen höheren Verarbeitungsaufwand in der Statorenfertigung. Durch Bondierung zweier dünner Bleche wird die Platinensteifigkeit erhöht und die Verarbeitung erleichtert. In Entwicklung sind neue Kombinationen aus Isolierlack und Zwischenschicht, um somit den Eisenfüllfaktor weiter zu steigern.



3 Campbell-Diagramm der Hochlaufmessung, links konventionelle Asynchronmaschine mit dominanten Frequenzbändern bei 500 und 950 Hz, rechts mit neuem Bondal E im Stator

LEICHTBAU-ROTOR MIT INTEGRIERTER KÜHLUNG

Elektrische Maschinen als zentrale Energiewandler in elektrifizierten Fahrzeugen spielen eine Schlüsselrolle bei der Erschließung von Effizienzpotenzialen. Im Rahmen von InCar plus verfolgt ThyssenKrupp den ganzheitlichen Ansatz einer hohlzylindrischen Leichtbau-Rotorarchitektur: Der mehrteilige, modulare Aufbau des Rotors spart bis zu 16 % Gewicht und generiert, bezogen auf die Referenzmaschine, im Rotorinneren einen frei nutzbaren Bauraum von mehr als 800 cm³. In diesen kann eine aktive Rotorkühlung zur weiteren Wirkungsgradverbesserung integriert werden.

Elektromotoren für stationäre Anwendungen sind üblicherweise nicht auf Leichtbau ausgelegt, da hierfür meist keine Notwendigkeit besteht. Anders bei Fahrzeugantrieben, bei denen die rotatorischen und translatorischen Massen der Elektromotoren den Energiebedarf und somit die Batteriegröße maßgeblich beeinflussen. Hier sollten die Massen so gering wie möglich sein.

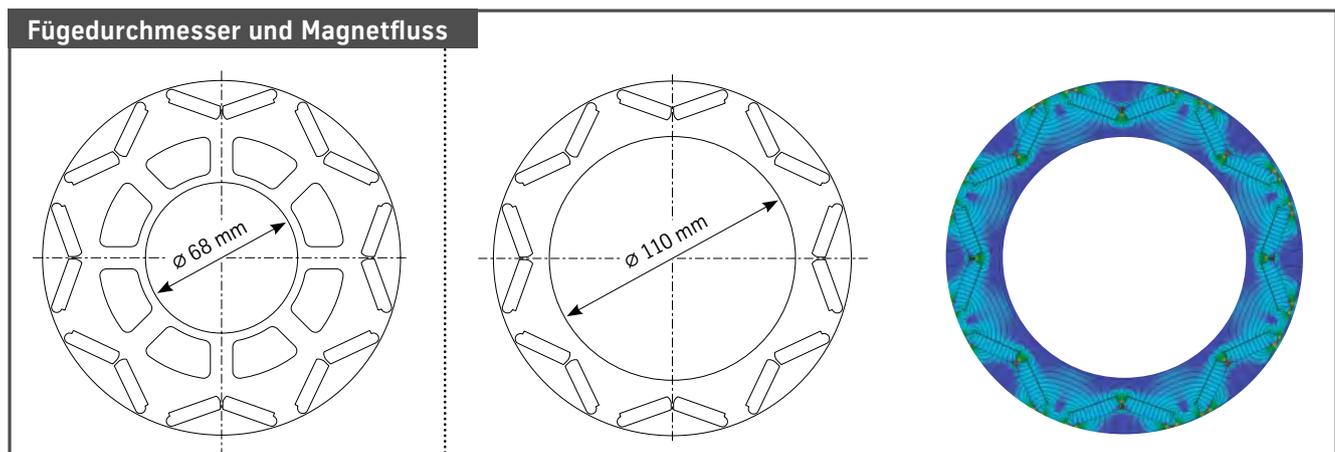
Allerdings verfügen die am Markt erhältlichen Elektroantriebe überwiegend über einteilige, oft massive Wellen geringen Durchmessers. Zwar haben bei dieser Bauform die Wellen kein hohes Gewicht, bauartbedingt jedoch die Gesamtrötoren mit den montierten Blechpaketen. Ein bekannter Ansatz zur

Gewichtsreduzierung ist, Teilbereiche der inaktiven Blechzonen auszustanzen. Häufig wird dafür ein Speichendesign gewählt, ❶ (links). Im Ergebnis sind diese Rotoren nur wenig leichter als vergleichbare Rotoren für stationäre Anwendungen, etwa für Werkzeugmaschinen.

Eine Architektur, die sich auf einen aktiv magnetflusslenkenden Blechpaket-Querschnitt beschränkt, kann das Gewicht hingegen signifikant senken. Dabei wird ein maximal großer Bohrungsdurchmesser des Blechpakets wie auch Wellen-Außendurchmesser gewählt, ❷ (Mitte). Auf inaktives Füllmaterial zwischen Rotorwelle und aktivem Elektroblechmaterial wird hingegen konsequent verzichtet, ❸ (rechts). Ein so konstruiertes Blechpaket

ist 1,9 kg leichter als das eines ansonsten vergleichbaren Rotors. Dieses geringere Gewicht ist von besonderem Wert für die Antriebseffizienz, da es sich um ein rotierendes Bauteil handelt. Denn das rotatorische Massenträgheitsmoment des magnettragenden Blechpaketes ist bei dieser Bauweise um mehr als 6 % geringer. Dieser Faktor bietet beim Beschleunigungsvorgang Effizienzvorteile.

Seit mehr als einem Jahr fertigt ThyssenKrupp bereits solche gebauten Rotorwellen auf spezifischen Montage- und Schleifanlagen und liefert sie in Serie, ❷. Die für ein batterieelektrisch angetriebenes Kleinfahrzeug ausgelegte Rotorwelle hat gehärtete Wellenzapfen mit Außenrändel für eine kraft- und



❶ Rotorblechschnitte und Magnetflussverlauf im Betriebspunkt 4000/min, 150 Nm

Gebaute Rotorwelle



2 Serienlösung einer mehrteilig gebauten Rotorwelle

formschlüssige Fügeverbindung zum Rohr-Mittelstück. Diese Gestaltung erlaubt auch bei Presslängen von weniger als 15 mm die Übertragung sehr hoher Drehmomente aus den Rotorpaketen mittels einer Innensteckverzahnung hin zum Abgriff.

E-MASCHINENKOMPETENZ

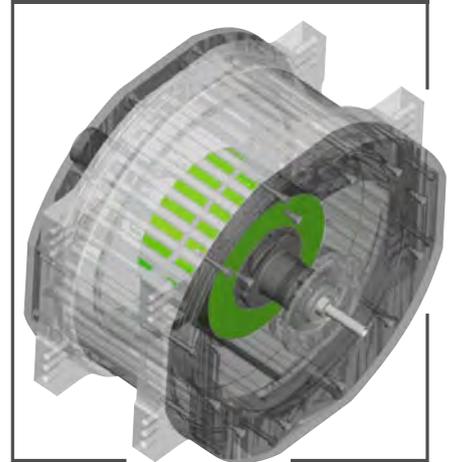
Basierend auf der Serien-Rotorwelle entwickelt ThyssenKrupp den Aufbau des Gesamtrors mit Blechpaketen weiter und nutzt die bauartbedingten Vorteile für die Integration ausgewählter Funktio-

nen aus. Als Antrieb für dieses Projekt dient, aufgrund der Vorteile bei Leistungsdichte und Wirkungsgrad sowie der aktuellen Marktdurchdringung, eine permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) mit 600 V Betriebsspannung. Projektziel ist neben Leichtbau und Funktionsintegration auch die Nutzung der Materialkompetenz im Unternehmen. Die in den Blechpaketen von Rotor und Stator verarbeiteten, nicht kornorientierten Elektrobleche sowie die NdFeB-(Neodym-Eisen-Bor-)Permanentmagnete sind Produkte aus dem Unternehmen.

Die interdisziplinäre Technologiekompetenz generiert noch weitere wertvolle Erkenntnisse für die Entwicklungsarbeit. Mithilfe der elektromagnetischen Simulation wurde die E-Maschine achtpolig mit 1,45 kg NdFeB-Magnetmasse und einem gewichtsoptimierten Blechpaket von 5,8 kg ausgelegt. 3. Unterstützt hat ThyssenKrupp dabei das Institut für elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen.

Der Antrieb ist für die Erprobung und Umrichter-Parametrierung als „Stand-Alone“-Maschine aufgebaut und kommt im eTDC-Getriebe zum Einsatz, einem weiteren Entwicklungsprojekt von InCar plus (siehe Beitrag „Bauraum- und

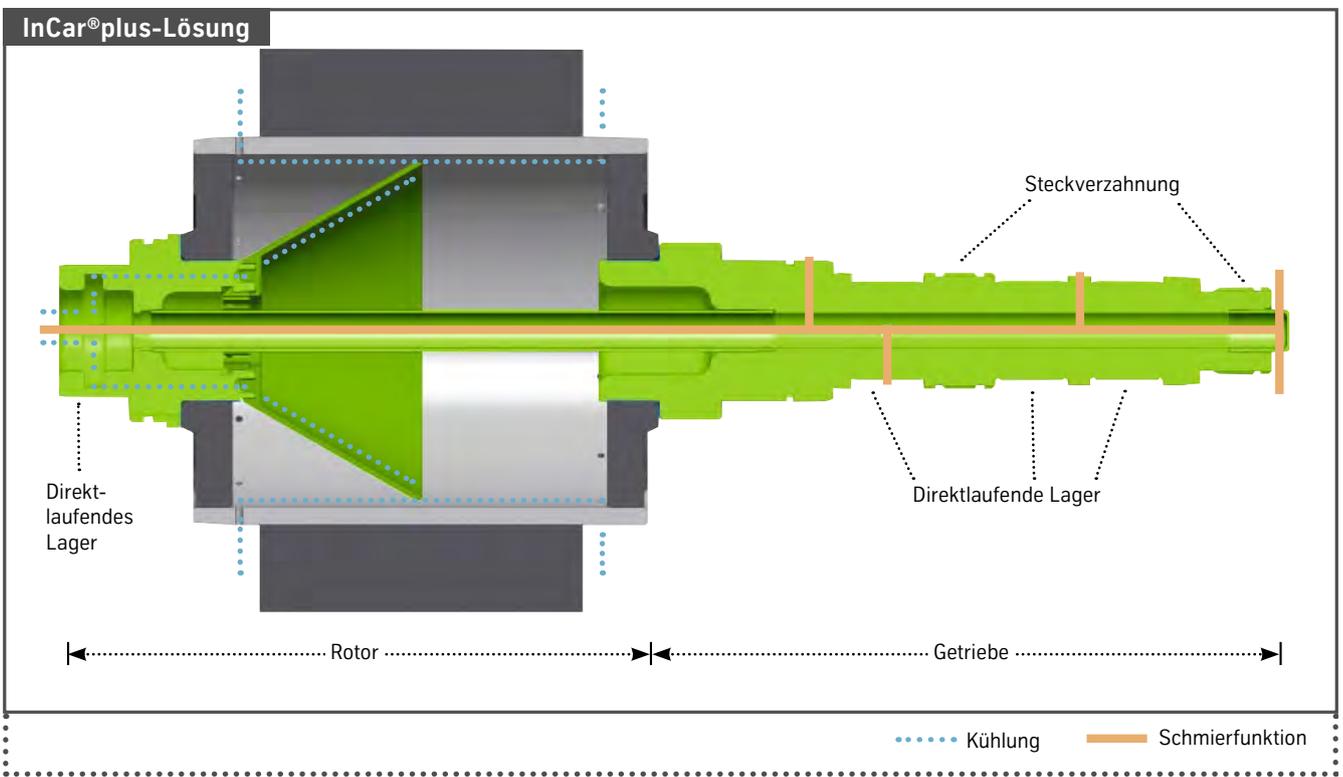
InCar®plus-Entwicklungsbasis



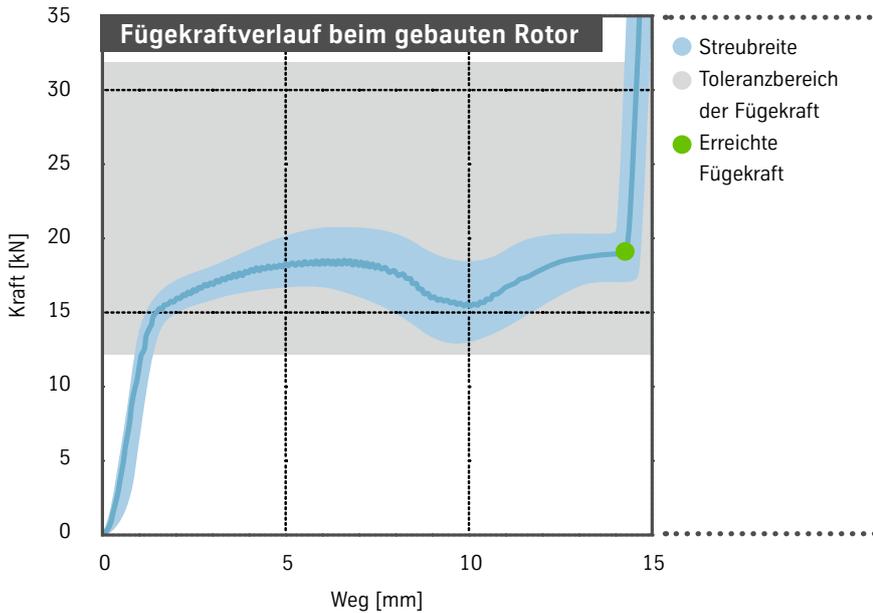
3 Aufbau der elektrischen PMSM-Maschine

kostenoptimierte Wellen für elektrische Antriebe“ ab Seite 38). Aus dem eTDC-Getriebe sind auch die Auslegungsparameter der E-Maschine sowie die spezifische Rotorwellengestaltung abgeleitet. So beträgt die Nennleistung 50 kW, die Spitzenleistung 80 kW. Das Drehmoment wird mit 220 Nm (Nennwert) und 300 Nm (Spitzenwert) festgelegt. Die maximale Motordrehzahl beträgt 8000/min.

InCar®plus-Lösung



4 Funktionsbereiche der gebauten integralen Rotor- und Getriebewelle



5 Beispielhafte Prozesskontrolle durch Kraft-/Weg-Überwachung

von 110 mm für das Blechpaket bei 160 mm Luftspaltdurchmesser errechnen sich die Rohrwanddicke und Pressverbände.

Für die beidseitigen Flanschplatten besteht ein Gleichteilkonzept. Bei der Serienfertigung sind sie beispielsweise als Warmpressteile kosteneffizient und nahezu in Endgeometrie herstellbar. Für die Presspassungen der Fügedurchmesser innen wie außen sind bei den Flanschplatten spanend herstellbare Toleranzen ausreichend. Besondere Merkmale an den Platten sind die Speichen zur Gewichts- und Steifigkeitsoptimierung sowie eine axiale Erhebung für das Wuchten der Gesamtrotores in zwei Ebenen. Die Zapfen der Rotorwelle bestehen aus hochwertigem, legiertem CrNiMo-Stahl, der direktlaufende Lager sowie gehärtete Verzahnungsprofile ermöglicht. Für die Passungen der Querpressverbände sind Einflüsse, wie etwa der Temperaturgradient zwischen betriebswarmem Blechpaket bei kalter Welle, die Glättung der Oberflächenrauheit sowie die drehzahlabhängige Zentrifugalkraft, bereits berücksichtigt. Sie verringern den Pressfugendruck.

Die Fügeverbindungen der Rotorwelle werden im Längspressverband bei Raumtemperatur hergestellt und für jede Komponente durch Kraft-/Weg-Überwachung aufgezeichnet. Die Aufpresskraft am Ende des Fügewegs ist dabei ein zentrales Prozessmerkmal, mit dem die spezifikationsgemäße Bau-

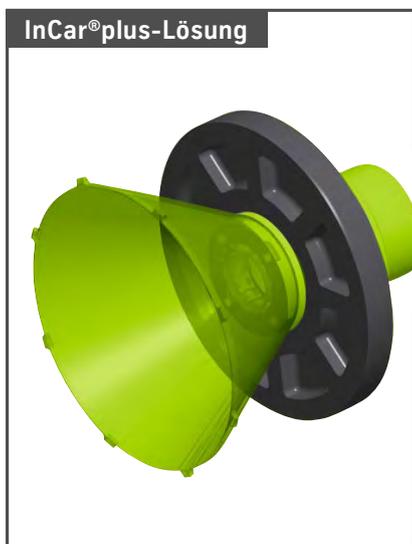
MODULARES ROTORKONZEPT

Für den Leichtbaurotor hat ThyssenKrupp folgende Entwicklungsziele formuliert:

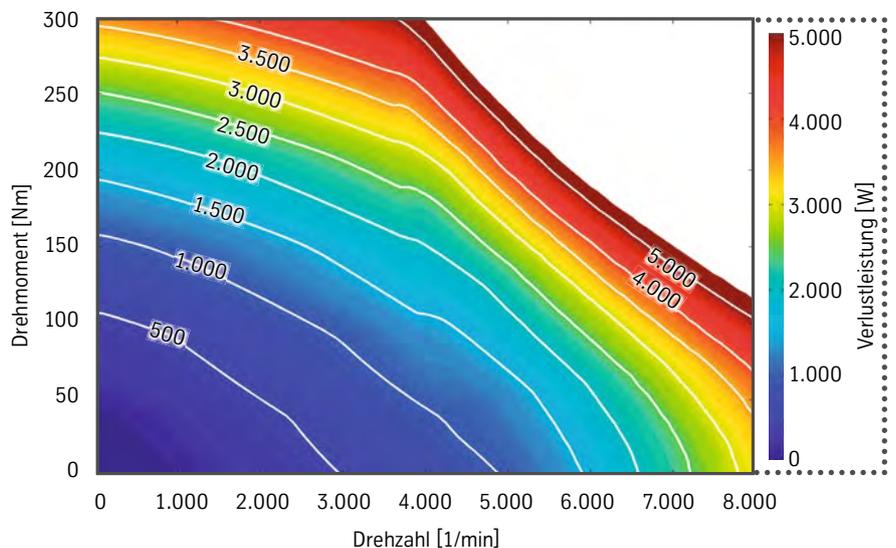
- : integrierte Funktion einer Getriebewelle mit zwei Steckverzahnungen und Sitzen für Loszahnräder
- : direktlaufende Lagerung (Wälzkontakt direkt auf geschliffener Wellenoberfläche)
- : Übernahme, Durchleitung und Abgabe von Schmieröl und die Kühlung der Rotor-Innenoberfläche in einem separaten, schaltbaren Kreislauf.

Ein wesentlicher Fertigungsvorteil dieser innovativen Rotorarchitektur liegt in der Mehrteiligkeit. Da die Lagerstellen und andere Funktionen auf den beiden Wellenenden deutlich kleinere Durchmesser aufweisen, ist ein fünfteiliger Grundaufbau sinnvoll, 4.

Das Mittelstück besteht aus einem Rohr aus kostengünstigem, endmaßnah blankgezogenem Baustahl. Durch eine Variation der Rohrlänge ist zudem die Skalierbarkeit der Maschinenlänge gegeben. Auf Basis des per Simulation ermittelten Bohrungsdurchmessers



6 Aufgesteckter Ölleitkegel



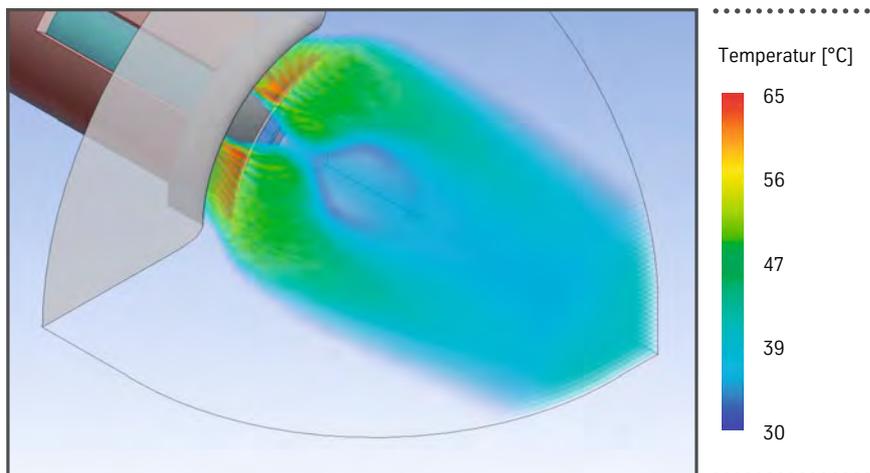
7 Verlustkennfeld der E-Maschine

teilerstellung sicher bestimmt werden kann, ⑤. Eine aufwendige Messung der Komponentenmerkmale kann damit entfallen. Zudem liegt mit der Aufpresskraft für jede Fügeverbindung auch die Absicherung des zu übertragenden Drehmoments vor.

INTEGRIERTE KÜHLUNG

Es gibt nur wenige umgesetzte Beispiele für eine Rotorinnenkühlung. Sie basieren meist auf einteiligen, dünnen Wellen. Dadurch sind die Wellen im Hinblick auf die Abführung der Wärme aber konstruktiv limitiert. Solche Konzepte beschränken sich oft auf das Durchströmen einer durchgehenden Bohrung, was neben dem Bearbeitungsaufwand auch einen hohen Volumenstrom des Kühlmediums erfordert.

Bei der Kühlung zeigt sich ein weiterer Vorteil der mehrteiligen Welle. So können zum Beispiel spezifische Bauteile wie ein Ölleitkegel während der Montage im Rotorinneren eingebaut werden, ⑥. Dieses trichterförmige Bauteil soll eine Benetzung mit Kühlmedium, hier Getriebeöl, auf der gesamten Rotorinnenoberfläche bei geringen Volumenströmen gewährleisten. Somit stehen eine große Oberfläche und mit dem Öl ein leistungsstarkes Medium zur inneren Kühlung der E-Maschine zur Verfügung. Der drehzahlabhängige Kühlstrom beträgt etwa 500 ml/min und orientiert sich an den Betriebspunkten im Verlustkennfeld der E-Maschine, ⑦.



⑥ Ausströmseite des gasgekühlten Rotors

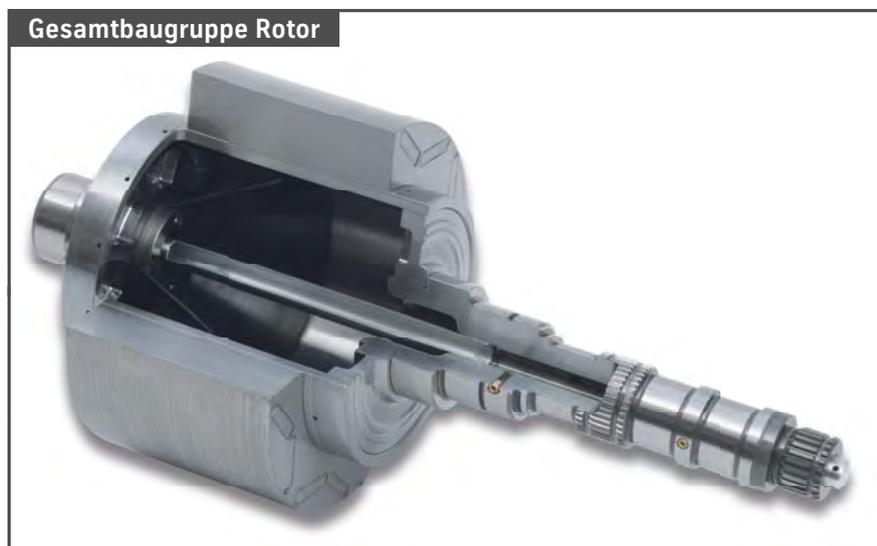
Das Entwicklungsteam untersuchte auch eine Gaskühlung mit Umgebungsluft. Der benötigte Volumenstrom liegt mit etwa 3,5 l/s wesentlich höher. Im Rotorinneren vergrößert ein Kühlkörper aus einem Aluminium-Strangpressprofil die Oberfläche. Prüfstandsversuche weisen nach, dass eine schnelle und turbulente Gasdurchströmung ausreichend Erwärmung bringt, ⑧. Ein passiv am Rotorwellenende mitlaufender Diagonalläufer erzeugt die Strömung mit einem Aufwand von weniger als 2 W Leistung. Die angesaugte Luft sollte in einem Filter mit 60 ppi gereinigt werden, um den Eintrag von Staubpartikeln sicher zu verhindern. Temperaturmessungen der ausströmenden Luft zeigen Erwärmungsra-

ten von mehr als 30 K im Vergleich zur zugeführten Umgebungsluft.

AUSBLICK

Neben der Kühlung sind weitere Funktionen im Rotorinneren integrierbar. Vorteilhaft ist der Einbau von Systemen, die im Zentrum der ohnehin thermisch limitierten E-Maschine keine zusätzlichen thermischen Verluste erzeugen. Das können etwa motoreigene Sensoren zur Winkellage- und Drehzahlerkennung sein oder eine mechanische Feststellbremse, die vom Gesetzgeber auch für elektrisch betriebene Fahrzeuge vorgeschrieben ist.

Besondere Aufmerksamkeit erfordert zukünftig das Fügen der Blechpakete, insbesondere vor dem Hintergrund der Hochdrehzahl-Konzepte. Als kostengünstigere Alternative zum thermischen Schrumpfsitz sind für die InCar plus-Rotoren die Backlack-Pakete im Längsaufpress-Verfahren mit Kraftüberwachung gefügt. Untersucht wird auch ein neu entwickeltes Konzept: das Fügen von Stanzpaketen im axialen Klemmsitz. Diese Innovation erlaubt das Übertragen hoher Drehmomente ganz ohne radialen Kontakt zwischen Welle und Blechlamellen, indem der Drehmomentfluss über die endseitigen Druckscheiben gelenkt wird. Derzeit befinden sich solche Funktionsmuster in der statischen und dynamischen Erprobung. ThyssenKrupp hat sich mit der vorliegenden Entwicklung umfassende Kompetenzen erarbeitet, die die Grundlage für eine künftige Serienlieferung der Gesamtbaugruppe Rotor bilden, ⑨.



⑨ Baugruppe des Rotors mit integrierter Getriebewelle

BAURAUM- UND KOSTENOPTIMIERTE WELLEN FÜR ELEKTRISCHE ANTRIEBE

Kernanforderungen an alle elektrischen Antriebe sind maximale Effizienz sowie optimale Leistungsabgabe bei minimalen Kosten und geringer Größe. Im Projekt eTDC (electromobile ThyssenKrupp Drivetrain Components) zeigt ThyssenKrupp, wie eine intelligente Antriebsstruktur mit innovativen Leichtbaukomponenten diesen Zielkonflikt lösen kann. Die gebaute integrale Rotor-/Getriebewelle ermöglicht eine maßgeschneiderte Materialauswahl bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit. Durch den Einsatz eines optimierten, kraft- und formschlüssigen Fügeverfahrens, den Entfall der Getriebechnittstelle und durch Funktionsintegrationen hat dieses Konzept essenzielle Vorteile hinsichtlich Gesamtpackage, Gewicht und Wirkungsgrad.

In batterieelektrisch angetriebenen Pkw sind aktuell überwiegend eingängige Getriebe mit einer festen zweistufigen Untersetzung und einem hochdrehenden Elektromotor eingebaut. Diese Konfiguration wird überwiegend aus Kosten- und

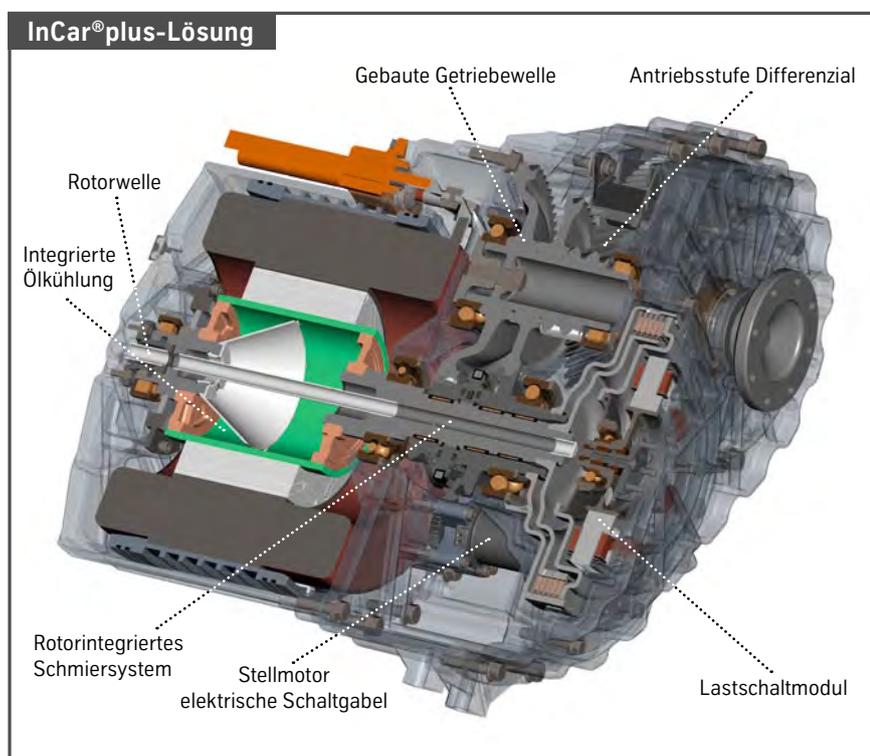
Gewichtsgründen gewählt. In puncto Effizienz, Beschleunigung und erreichbarer Fahrzeuggeschwindigkeit ist diese Konfiguration allerdings mit Kompromissen behaftet. Zweiganggetriebe können mehr Effizienz, Beschleunigung und eine

höhere Endgeschwindigkeit bieten, aber bisherige Konzepte wurden aus Kosten- und Gewichtsgründen vom Markt nicht angenommen.

Im Rahmen von InCar plus hat ThyssenKrupp Rotor- und Getriebewellen für innovative elektrifizierte Fahrzeugantriebe optimiert, ❶. Zur umfassenden Bewertung der Anforderungen sowie Quantifizierung der Potenziale entstand dafür eine eigenständige Antriebsstruktur, ❷. Die wesentlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen an den Antrieb sind:

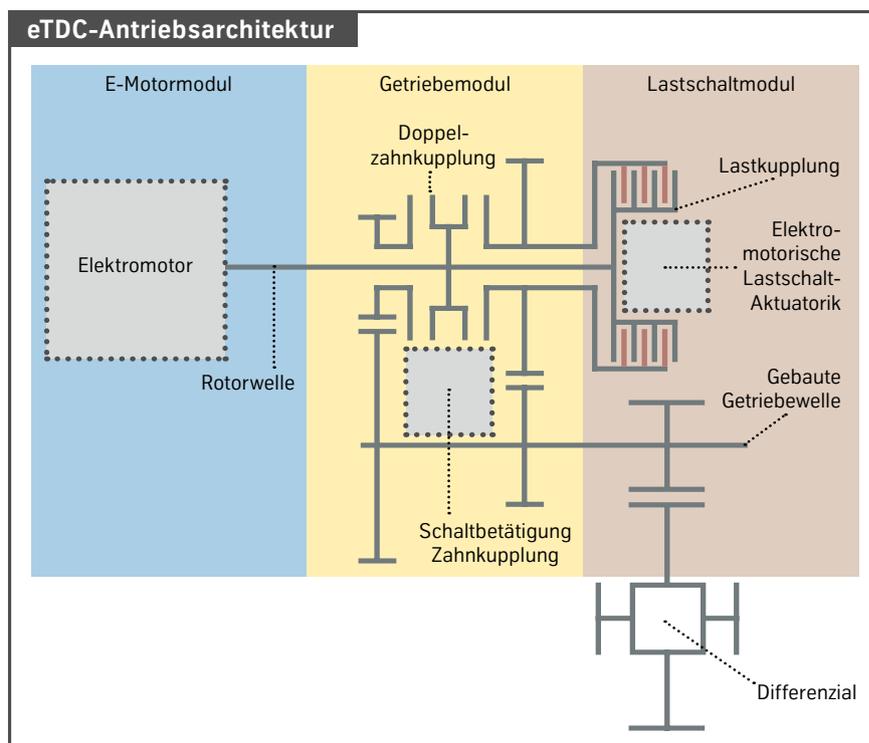
- : Kleinwagen (B-Segment)
- : Leergewicht einschließlich Batterie 1450 kg
- : maximale Fahrzeuggeschwindigkeit 140 km/h
- : Beschleunigung 0-100 km/h in weniger als 10 s
- : Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung
- : konzeptionelle Flexibilität und Modularität
- : minimales Gewicht und Package.

Die eTDC-Antriebsstruktur basiert auf einer Stirnradstufen-Architektur, die eine maximale Übersetzungsflexibilität bei gleichzeitig einfachem Systemaufbau ermöglicht. Die Losräder des ersten und zweiten Gangs sind auf der gebauten, integralen Rotor-/Getriebewelle angeordnet. Zwischen den beiden Losrädern befindet sich die formschlüssig schal-



❶ Schnitt durch den eTDC-Antrieb

tende Doppelzahnkupplung für beide Gänge. Ihre Integration und der zeitgleiche Entfall von Synchronringen sind aufgrund der exakten Drehzahlregelung der elektrischen Traktionsmaschine möglich. Diese Konstruktion bietet signifikante Vorteile bezüglich Wirkungsgrad, Systemkomplexität und Kosten. Eine stirnseitig an die Rotorwelle angebundene Lamellenkupplung sorgt für die Schaltvorgänge ohne Zugkraftunterbrechung. Die zeitgleiche Aktuierung beider Schaltelemente ermöglicht eine kosteneffiziente und bauraumneutrale Parksperre. Auf Zusatzkomponenten kann hierbei verzichtet werden. Beide Schaltelemente werden elektrisch betätigt und senken so die Verluste der Nebenaggregate wesentlich. Die Zwischenwelle mit den Feststrädern ist als gebaute Leichtbaukonstruktion ausgeführt, ③. Die resultierende konzeptionelle Modularität und Flexibilität ermöglicht den Einsatz des hocheffizienten Antriebs in unterschiedlichen Fahrzeugapplikationen.

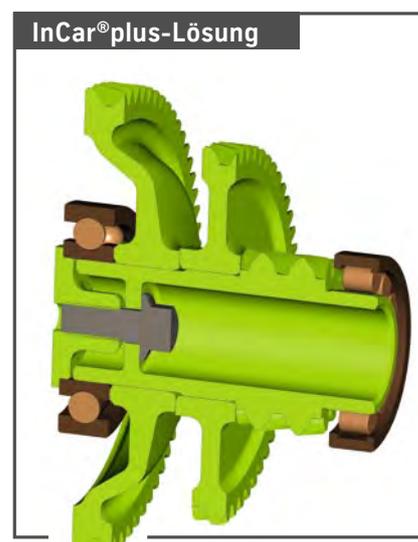
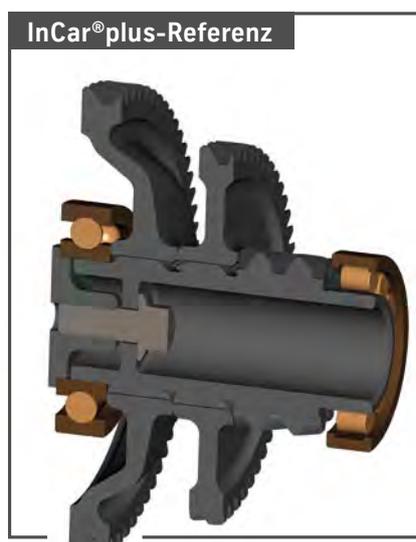


② Funktionale Gliederung der eTDC-Entwicklungsbasis

ANTRIEBSEIGENSCHAFTEN UND KONSTRUKTIVE AUSFÜHRUNG

Für eine hohe Leistungsdichte sorgt die effiziente, permanenterregte Synchronmaschine mit einer Nennspannung von 600 V und einer gegenwärtigen Maximaldrehzahl von 8000/min. Sie entwickelt eine elektrische Dauerleistung von 50 kW sowie ein Drehmoment von 220 Nm. Kurzzeitige Spitzenwerte von 80 kW und 300 Nm sind möglich. Die fünfteilige gebaute Rotorwelle (siehe auch Beitrag „Leichtbau-Rotor mit integrierter Kühlung“ ab Seite 34) ist die zentrale Komponente des Antriebs. Sie besteht aus drei unterschiedlichen Werkstoffen und ist das integrale Bindeglied zwischen dem E-Maschinen- und Getriebemodul.

Durch die getriebeseitige Funktionserweiterung und den Entfall einer toleranzempfindlichen und damit fertigungstechnisch aufwendigen Getriebeschnittstelle kann das Schmiersystem in die Rotorwelle integriert werden. Zusätzlich ist die neu entwickelte Ölkühlung in die Rotorwelle integriert. Sie nutzt die kinetische Energie des Rotors und führt die Wärme sehr effektiv aus dem Rotor einschließlich Blechpaket und den thermisch belasteten Wickelköpfen ab. Die Ölkühlung ist abhängig vom Betriebspunkt zuschaltbar und ermöglicht zudem während der Warmlaufphase ein

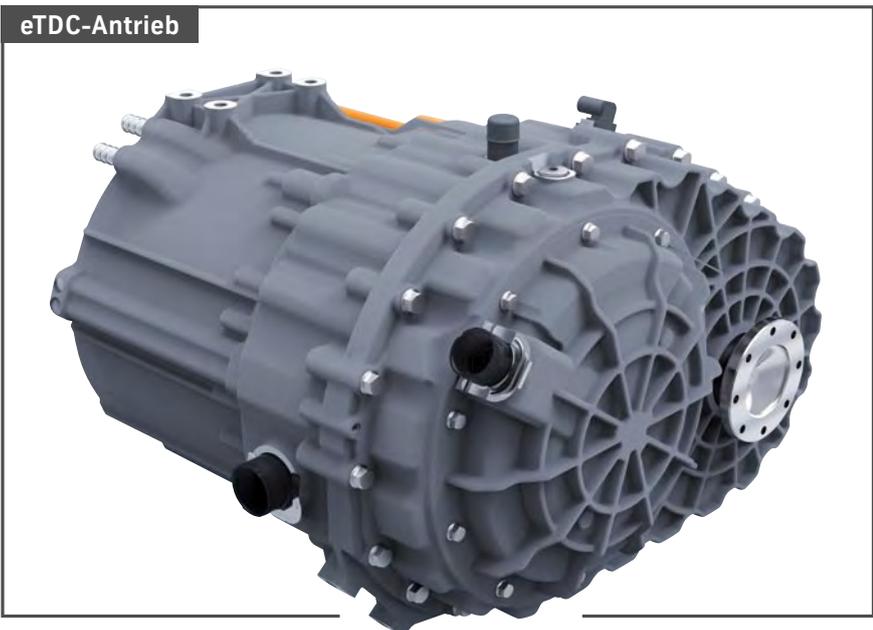


③ InCar plus-Referenz-Getriebewelle (links) sowie InCar plus-Gebaute-Getriebewelle (rechts)

schnelleres Aufheizen des Getriebeöls auf Betriebstemperatur. Diese doppelte Funktionsintegration verbessert die elektrische und mechanische Effizienz des Antriebs und minimiert Package sowie Gewicht. Die Rotorwelle einschließlich Blechpaket wiegt nur 11,4 kg.

In ③ ist die gebaute Getriebewelle im Schnitt dargestellt. Die Feststräder sind mit einem kraft- und formschlüssigen Füge-

verfahren angebunden, das sich für die Fertigung von Motorkomponenten bewährt hat und das auf die speziellen Anforderungen einer Getriebeanwendung hin optimiert wurde. Das maximale Drehmoment von 900 Nm wird mit einer dynamischen Sicherheit von 2 über eine kurze Flügelänge übertragen. Das schafft eine geringe axiale Baulänge der Gesamtkomponente und eine gleichzeitig hohe



eTDC-Antrieb

ergibt sich ein kompaktes, modulares Antriebslayout mit einer sehr geringen Anzahl an Bauteilen und einem Gesamtgewicht von weniger als 100 kg, 4.

VIRTUELLE ABSICHERUNG UND ERPROBUNG

Das Gesamtsystem ist in mehreren Entwicklungsstufen umfangreich analytisch und numerisch abgesichert. Hierzu wurden umfangreiche statische Komponentenauslegungen, FEM-Bewertungen, Modalanalysen sowie MKS-Untersuchungen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk galt der Detektion von Resonanzgebieten im gesamten Drehzahlband und der Ermittlung der resultierenden dynamischen Belastungen. Letzteres erfolgte unter Berücksichtigung der Lager-, Gehäuse- sowie der wechselnden Verzahnungssteifigkeit.

Die höchsten zyklischen Auslastungsgrade erzielt das Gesamtsystem im Bereich der Rotorwelle im ersten Gang. Dies resultiert unter anderem aus den gekoppelten Baugruppen des zweiten Gangs bei einer Drehzahl von 3800/min. Es wird eine Sicherheit größer 2 für den Belastungsfall erreicht.

Zur Ermittlung der erforderlichen mechanischen, elektrischen und thermischen Parameter erfolgte eine Erprobung der elektrischen Aktuatoren und des Ölsystems auf Teilsystemprüfständen, 5. In Verbindung mit validierten Simulationsmodellen ließen sich auf diese Weise die Funktionalität und der Einsatz im Gesamtprototyp entsprechend absichern.

Für eine erste Quantifizierung der Gesamtsystemeffizienz führten die Ingenieure eine ganzheitliche Antriebsstrangsimulation auf Basis der Verlustleistungsmodelle aller im Energie- und Kraftfluss befindlichen Komponenten und Systeme durch. Auf Basis der vorab definierten Fahrzeugmasse von 1450 kg wird ein Energieverbrauch von 11,3 kWh/100 km im NEFZ ermittelt. Somit bietet eTDC ein nennenswertes Effizienzpotenzial bei einem gleichzeitig geringen Package und Gewicht.

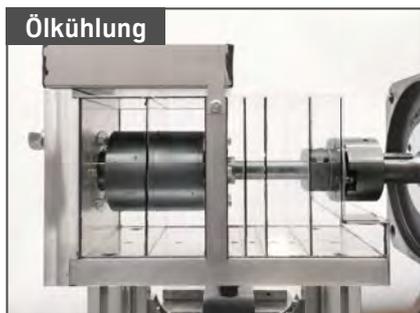
Im Herbst 2014 wird das Antriebssystem einer umfangreichen Systemerprobung auf Prüfständen unterzogen. Dort werden in intensiven Versuchen die Ergebnisse aus Simulation und Komponententests weiter abgesichert. Schwerpunkte werden die Betriebsfestigkeit und das Betriebsverhalten des Gesamtsystems sein.

4 eTDC hat ein zweigängiges Getriebe als Entwicklungsbasis

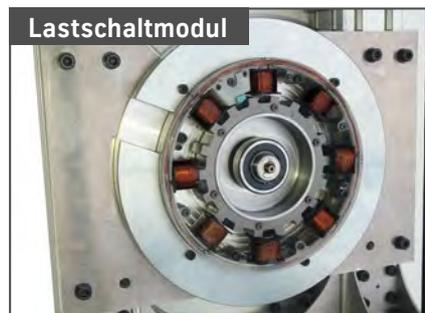
Betriebsfestigkeit. Zusätzlich reduzieren optimierte Wellenwandstärken das Gewicht der Grundwelle wirkungsvoll. Die Erfassung der Aufpresskraft für jede Komponente garantiert eine vollständige Qualitätsüberwachung bei der Fertigung.

Ein weiterer Effizienzbaustein des Antriebs ist das passive Ölsystem. In Verbindung mit der Förderwirkung des Differenzials, dem Schweredruck sowie

der Saugwirkung der Rotorwelle versorgt es in nahezu allen Betriebszuständen, ohne einen aktiven Druckerzeuger, das Schmiersystem und das Kühlsystem mit ausreichend Öl. Abhängig von der Fahrgaugauslegung können Fahrsituationen mit hohen Querbeschleunigungen eine elektrische Zusatzpumpe erforderlich machen. Diese ist konstruktiv in die Getriebestruktur integrierbar. In Summe



Ölkühlung



Lastschaltmodul



Elektrische Schaltgabel

5 Entwicklungsprüfstände für die Teilsysteme

LEICHTE, ELEKTRIFIZIERTE HINTERACHSE AUS STAHL

Stahl ist mit seinen vielen positiven Eigenschaften auch für elektrifizierte Fahrzeuge unverzichtbar. Eine Konzeptstudie zeigt am Beispiel einer elektrifizierten Hinterachse als Teil eines Hybridantriebs konkrete Leichtbaupotenziale mit Stahl auf. Dazu wird die elektrische Antriebseinheit in einen bauraum- und gewichtsoptimierten Hinterachsträger integriert.

Die elektrifizierte Hinterachse ist in der Konzeptstudie Bestandteil eines Hybridantriebs. Hauptziel ist ihre Integration in ein bestehendes Fahrzeugkonzept ohne wesentliche Änderungen an der Gesamtstruktur des Fahrzeugs. Die Unterbringung der anderen größeren Komponenten wie etwa der Batterie und der Leistungselektronik ist ebenfalls berücksichtigt.

Als Referenz für diesen Antrieb greift ThyssenKrupp auf einen Sechszylinder-Verbrennungsmotor mit Allradantrieb zurück. Er wird durch einen Vierzylindermotor mit Frontantrieb und einen in den Hilfsrahmen der Mehrlenker-Hinterachse integrierten Elektromotor ersetzt, der bei Bedarf die Hinterachse antreibt. Diese Kombination bietet vergleichbare Fahrleistungen und ein ähnliches Beschleunigungsvermögen. Außerdem

ist eine rein elektrische Reichweite von mindestens 50 km im normalen Straßenverkehr vorgesehen.

Der modifizierte Hilfsrahmen ist so konstruiert und berechnet, dass er sich in das Package des Referenzantriebs einfügt und die gleichen Anforderungen wie dieser erfüllt. Die Batterie wird im Mittel-tunnel untergebracht, da hier durch die Umstellung auf Frontantrieb die Kardanwelle entfällt. In diesem Bauraum lässt sich nach Berücksichtigung der zurzeit möglichen Energiedichte eine Batteriekapazität von etwa 10 kWh unterbringen. Kleinere Zusatzkomponenten wie etwa die Leistungselektronik sind entweder im Kofferraumboden oder neben dem kleineren Verbrennungsmotor im Vorderwagen untergebracht. Der Elektromotor ist wassergekühlt und kann am Kühlkreislauf

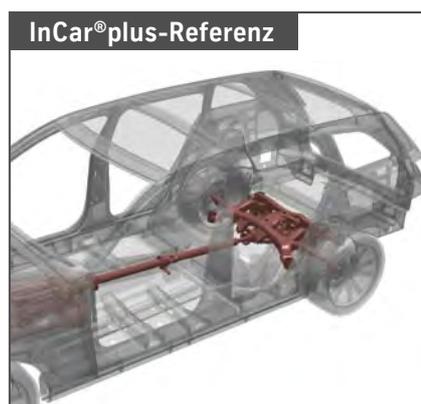
des Verbrennungsmotors angeschlossen werden, da dieser für den deutlich größeren, ursprünglichen Sechszylindermotor ausgelegt ist. Somit sind alle für den Hybridantrieb notwendigen zusätzlichen Komponenten im Bauraum der bestehenden Fahrzeugstruktur untergebracht, ❶.

AUSLEGUNG DES ELEKTROMOTORS

Der Elektromotor mit Getriebe ist in den Hilfsrahmen der Hinterachse integriert. Um die geforderten Beschleunigungswerte zu erreichen, wird eine Spitzenleistung von etwa 90 kW benötigt, ❷. Da der Elektromotor nicht ausgekuppelt wird und bis zur Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h mitläuft, wurde aufgrund ihrer sehr geringen Schleppverluste eine Asynchronmaschine gewählt.

Der bauraumbedingt maximale mögliche Außendurchmesser des Stators beträgt 210 mm. Zum Erreichen der geforderten Spitzenleistung von 90 kW ist eine Paketlänge von ebenfalls 210 mm notwendig, eine maximale Drehzahl von 15.000/min zugrunde gelegt. Werkstoff für Stator und Rotor ist nicht korrosionsbeständiges Elektromagnetisches Material der Güte 440-35 AP mit hoher Polarisation und guter Magnetisierbarkeit. Der Rotor hat einen Käfig aus Aluminiumdruckguss. Zur Verbesserung des Wirkungsgrads ist auch die Implementierung eines bekupfernten Rotors vorgesehen.

Nach dem Berechnen eines Verlustleistungskennfelds werden mit einer Längsdynamiksimulation die Fahrleistungen und der Energiebedarf ermittelt.



❶ Vergleich von Referenzstruktur mit konventionellem Antrieb (links) und hybridisierter InCar plus-Lösung (rechts)

	InCar®plus-Referenz	InCar®plus-Konzeptstudie Hybridantrieb
Verbrennungsmotor		
Leistung	225 kW	135 kW
Drehmoment	400 Nm	270 Nm
Zylinder	6	4
Hubraum	3,0 l	2,0 l
Elektromotor		
Leistung (Dauer/Spitze)	Nur verbrennungsmotorischer Antrieb	40/90 kW
Drehmoment (Dauer/Spitze)		100,6/226,3 Nm
Maximale Drehzahl		15.000/min
Fahrleistungen und Energieverbrauch		
Beschleunigung 0-100 km/h (Verbrennungsmotor bzw. Hybrid/rein elektrisch)*	5,6 s	5,9 s/13,1 s
Streckenverbrauch NEFZ (rein elektrisch)	Nur verbrennungsmotorischer Antrieb	15,1 kWh/100 km
Batteriekapazität		10 kWh
Elektrische Reichweite (Nutzung von 80 % der Batteriekapazität)		53 km
*Zielwerte: Hybrid: < 6,0 s/rein elektrisch < 16,0 s		

② Technische Daten und Fahrleistungen von Referenz und Konzeptstudie

Aufgrund des limitierten Bauraums und der Kosten ist das Getriebe zweistufig mit fester Untersetzung ausgelegt. Die Gesamtuntersetzung beträgt 8,811 (1. Stufe: 2,033; 2. Stufe: 4,333). Das Getriebe ist virtuell mit den aus der Längsdynamiksimulation ermittelten Kennwerten vollständig abgesichert. Seine Lagerstellen und Zahnräder sind belastungsgerecht für den hybriden Ein-

satz ausgelegt. Die Schmierung der Bauteile stellt eine passive Schmierölvorsorgung sicher. Eine zuschaltbare Ölpumpe kann bei Bedarf den Rotor aktiv von innen kühlen. Der Asynchronmotor wird mit im Gehäuse eingegossenen Kühlleitungen wassergekühlt, ③. Zur Bauraumoptimierung erfolgt der Abtrieb koaxial, daher muss die Rotorwelle hohl sein. Die effizienteste Lösung dafür ist

eine aus einem Rohr und weiteren Komponenten gebaute Hohlwelle.

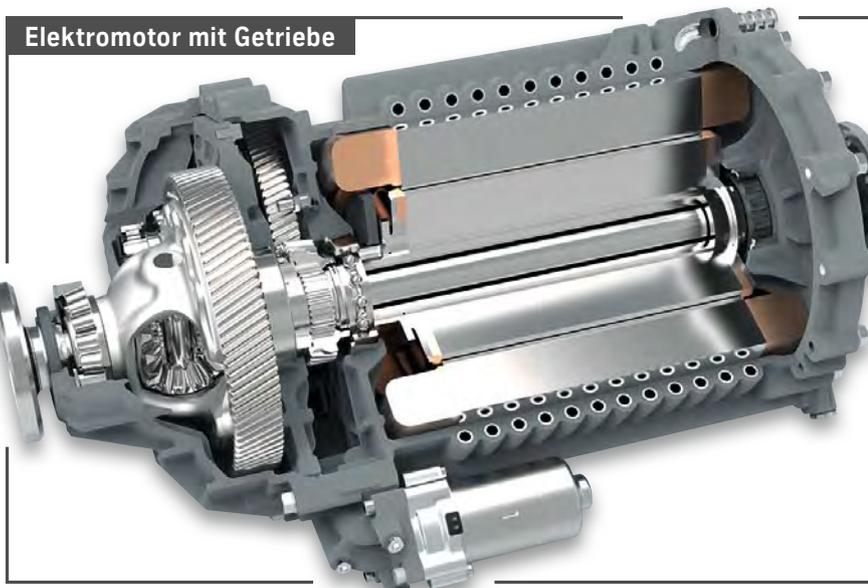
AUSLEGUNG DES HINTERACHSTRÄGERS

Die Geometrie des Hinterachsträgers ist an den Elektroantrieb angepasst. Die Querträger sind deutlich reduziert gestaltet, damit auch im stark begrenzten Bauraum die Leitungen und die Anschlüsse für Steuerungs- und Leistungselektronik sowie Kühlwasser zugänglich bleiben. Hochfeste Stahlsorten, wie Komplexphasen- und Scalur-Stähle, sind für den Hinterachsträger ideale Werkstoffe, da sie aufgrund ihrer hohen Festigkeit mit schlanken Querschnitten und geringen Blechstärken den hohen Belastungen und Spannungen standhalten können. Die Schweißnähte sind in den Anfangs- und Endpunkten so gestaltet, dass dort Kerbwirkungseinflüsse minimiert werden. Weiteres Potenzial zur Verbesserung der Schweißverbindungen bietet Laserhybridschweißen. Auch der Einsatz flanschlos gefügter Profile führt dazu, dass die Belastungen der Schweißnähte auf ein Minimum reduziert werden. Aus der Kombination hochfester Stahlsorten und moderner Fertigungs- und Fügetechnologien resultiert im Vergleich zur Referenz mit konventionellen Stahlsorten eine Gewichtsreduktion. Diese kompensiert den Gütenaufpreis für die neuen Stahlsorten, sodass mit Kostenneutralität zu rechnen ist.

Da die Anbindungspunkte zur Karosserie und auch die Kinematik identisch zur Referenz sind, ist der Elektroantrieb samt Hinterachsträger mit nur geringem Anpassungsbedarf im bestehenden Fahrzeug integrierbar. Dies hat den Vorteil, dass sich der Hybridantrieb modular in ein konventionelles, verbrennungsmotorisches Fahrzeug einfügt und keine speziell entwickelte Fahrzeugstruktur notwendig ist.

AUSBLICK

Stahl ist aufgrund seiner zukunftsfähigen Werkstoffigenschaften auch für elektrifizierte Fahrzeuge von morgen erste Wahl. Moderne Füge- und Fertigungsverfahren ermöglichen neue Konzepte und Bauweisen für weiteres Leichtbaupotenzial. Ergänzend führen Fortschritte in der Oberflächentechnik zu verbesserten Korrosionseigenschaften und ermöglichen damit eine weitere Blechdickenreduktion.



③ Schnittdarstellung des Elektromotors mit Wasserkühlung und Getriebe

PLASMAMODIFIZIERTE BIPOLARE PLATTEN FÜR BRENNSTOFFZELLEN

Brennstoffzellen-Stapel mit bipolaren Platten aus oberflächenmodifiziertem rost- und säurebeständigem (RS-) Stahl überzeugen durch eine platz- und gewichtssparende Bauweise. Damit ist perspektivisch ein elektrischer Zero-Emission-Antrieb mit Reichweiten von mehr als 500 km möglich. Diese Vorstudie zeigt Entwicklungsansätze für bipolare Platten aus RS-Stahl, die durch Plasmamodifikation eine hohe Korrosionsbeständigkeit und elektrische Leitfähigkeit aufweisen. Sie sind im Vergleich zu mit Gold beschichteten bipolaren Platten aus RS-Stahl etwa 60 % kostengünstiger. Verglichen mit bipolaren Platten aus Graphitkomposit-Werkstoffen sind die bipolaren Platten aus RS-Stahl etwa 5 % leichter und ungefähr 25 % kleiner.

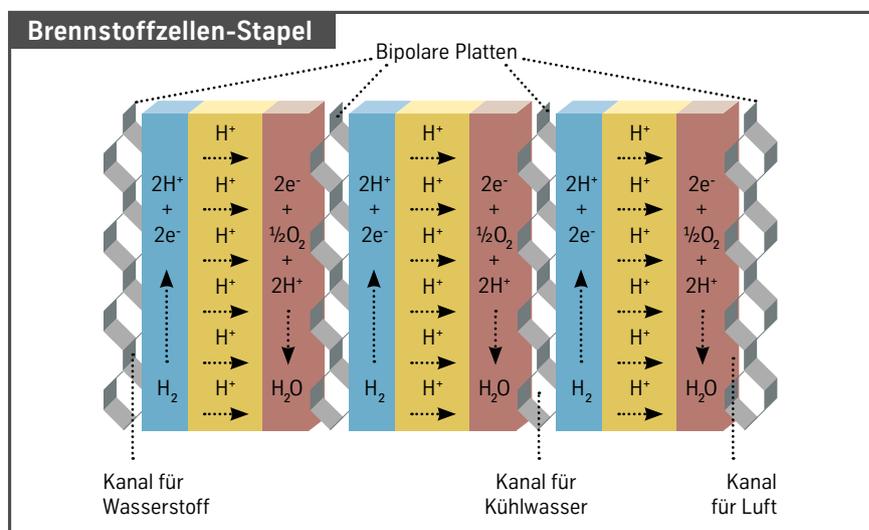
Bipolare Platten verbinden mehrere hundert einzelne Brennstoffzellen zu einem leistungsfähigen Stapel, **1**. Dabei stellen sie nicht nur den elektrischen Kontakt der Zellen untereinander sicher, sondern leiten auch den Wasserstoff sowie die Luft zu den Zellen und führen dort entstehendes Wasser und Wärme ab. Die Anforderungen an bipolare Platten ergeben sich aus diesen Aufgaben: Sie müssen in sauren Elektrolyten sehr korrosionsbeständig und elektrisch gut leitfähig sein. Gleichzeitig sollten sie eine sehr kompakte Bauweise ermöglichen, um den Platzbedarf und das Gewicht so gering wie möglich zu halten. Technisch gibt es derzeit zwei Lösungen: Bipolare Platten aus Graphitkomposit-Werkstoffen oder aus goldbeschichtetem RS-Stahl. Erstere sind vergleichsweise schwer und benötigen viel Bauraum, letztere sind selbst in der Massenfertigung sehr teuer. Daher wird eine kosteneffiziente Modifikation der Stahloberfläche mit einer sehr guten elektrischen Leitfähigkeit angestrebt. Sie darf aber nicht die für den Einsatz in Brennstoffzellen wichtige Korrosionsbeständigkeit des RS-Stahls in sauren Elektrolyten beeinträchtigen. Für die Perspektive einer Serienproduktion ist eine grundlegende Entwicklung und Bewertung des

gesamten Fertigungsprozesses inklusive der plasmaunterstützten Beschichtung des Stahls notwendig.

Diese Vorstudie zeigt im Vergleich zu den oben angesprochenen Referenzlösungen alternative Entwicklungsansätze für eine oberflächenmodifizierte bipolare Platte aus RS-Stahl. Ihr wesentliches Charakteristikum ist die plasmaunterstützte Behandlung der Stahloberfläche mit Kohlenstoff und Stickstoff. Wichtige

Eigenschaften im Vergleich zu den beiden Referenzlösungen sind in **2** zusammengefasst.

Der Entwicklungsschwerpunkt der Vorstudie liegt auf der Korrosionsbeständigkeit und elektrischen Leitfähigkeit. Benchmark für diese Eigenschaften sind die Entwicklungsziele des US Department of Energy (DOE). Um eine wirtschaftliche Produktion zu erreichen, werden zwei unterschiedliche Fer-



1 Schematischer Ausschnitt aus einem Brennstoffzellen-Stapel inklusive bipolarer Platten und ihrer Aufgaben

Merkmal	InCar®plus-Lösung			InCar®plus-Referenzen		
	Plasmodifizierter rost- und säurebeständiger Stahl	Mit Gold beschichteter rost- und säurebeständiger Stahl	Graphitkomposit-Werkstoff	Plasmodifizierter rost- und säurebeständiger Stahl	Mit Gold beschichteter rost- und säurebeständiger Stahl	Graphitkomposit-Werkstoff
Korrosionsbeständigkeit	●●○	●●○	●●●	●●○	●●○	●●●
Elektrischer Kontaktwiderstand	●●○	●●○	●●○	●●○	●●○	●●●
Bauraumreduzierung	●●●	●●●	●○	●●●	●●●	●○
Gewichtsreduzierung	●●○	●●○	●○	●●○	●●○	●○
Kostenreduzierung	●●○	●●○	●○	●○	●○	●●○

2 Eigenschaftsvergleich verschiedener bipolarer Platten

●●● Sehr gut ●●○ Gut ●○ Neutral

tigungsprozesse untersucht. Erstens die Plasmodifikation umgeformter bipolarer Plattenhälften und anschließendes Fügen zur fertigen bipolaren Platte. Zweitens die Plasmodifikation des Stahlflächprodukts mit anschließendem Umformen und Fügen der bipolaren Platte. Der zweite Fertigungsprozess ist an die Abläufe einer kontinuierlichen

Bandveredelung mit einem hohen Potenzial an Produktivität und Wirtschaftlichkeit angelehnt.

ENTWICKLUNG IN KOOPERATION

3 zeigt zwei fertige bipolare Platten als Vorprototypen-Bauteil, die nach dem zweiten Fertigungsprozess hergestellt

werden. Ihre Oberflächen weisen exzellente elektrische Eigenschaften (flächenspezifischer elektrischer Kontaktwiderstand < 20 mΩ*cm² bei 16 bar) sowie eine sehr gute Korrosionsbeständigkeit unter typischen Bedingungen einer Polymer-Elektrolyt-Membran-(PEM-) Brennstoffzelle auf (Korrosionsstromdichte < 10⁻⁶ A/cm² bei +0,9 V_{SHE} (bezogen auf die Standard-Wasserstoffelektrode SHE)). Damit erreichen sie die vom Department of Energy (DOE), USA, definierten Anforderungen für metallische bipolare Platten in automobilen Brennstoffzellen.

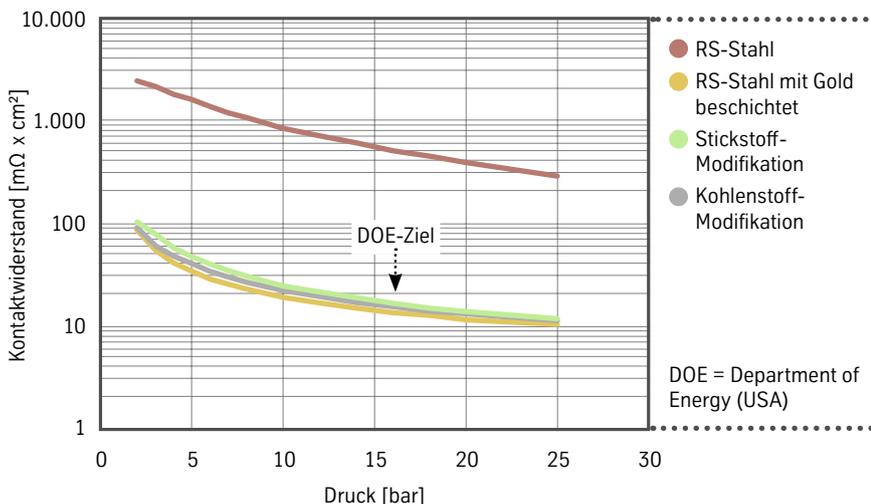
Die plasmaunterstützte Optimierung der Vorprototypen-Bauteile sowie das Schweißen der bipolaren Platten erfolgt in Zusammenarbeit mit einem Hochschul- und einem Fraunhofer-Institut aus dem Bereich der Oberflächenveredelung und der Fügetechnik. ThyssenKrupp bewertet die angestrebte Optimierung von Kontaktwiderstand und Korrosionsbeständigkeit in umfangreichen Untersuchungen und treibt so die Entwicklung voran. Konzeption, Umformung und Zuschnitt des Vorprototypen-Bauteils werden gemeinsam mit einem Partner aus der Umformtechnik durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurden bereits zuvor plasmodifizierte bipolare Halbplatten ohne sichtbare Defekte erfolgreich umgeformt. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für einen kontinuierlichen Prozess im Pilotmaßstab.

GETESTET UNTER REALEN EINSATZBEDINGUNGEN

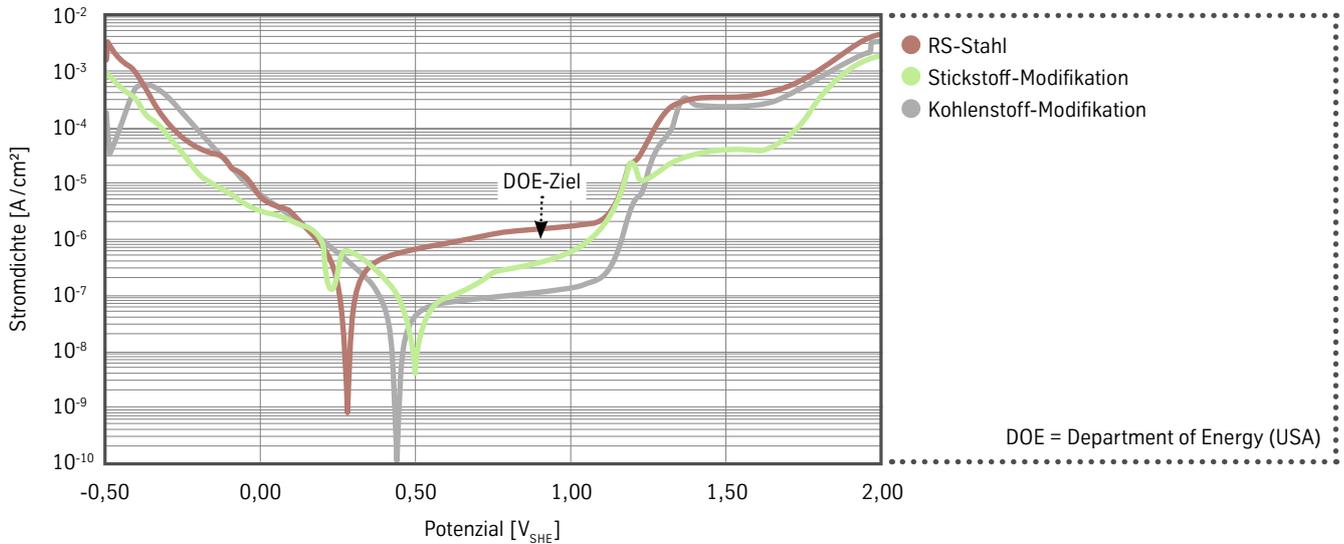
Der an der Oberfläche modifizierte RS-Stahl durchläuft vor der weiteren Verarbeitung typische Anwendungstests, um seine Einsatzfähigkeit in einer automobilen Brennstoffzelle zu überprüfen. Wichtigste Kriterien sind der elektrische Kon-



3 Bipolare Platten mit unterschiedlicher Oberflächenmodifizierung



4 Messung des elektrischen Kontaktwiderstands in Abhängigkeit vom Anpressdruck



5 Stromdichte-Potenzialmessung in verdünnter Schwefelsäure, Potenzialvorschubgeschwindigkeit 0,5 mV/s

taktwiderstand sowie die Korrosionsbeständigkeit in verdünnter Schwefelsäure unter realen Einsatzbedingungen. Bei der Messung des elektrischen Kontaktwiderstands wird der flächenspezifische Kontaktwiderstand als Funktion des Anpressdrucks ermittelt, 4. Im Vergleich mit der goldbeschichteten Referenzprobe weist der mit Kohlenstoff und Stickstoff modifizierte RS-Stahl annähernd identische Widerstandswerte auf. Im Vergleich zum unbehandelten RS-Stahl 1.4404 ist der Kontaktwiderstand um den Faktor 30 besser. Diese deutliche Verbesserung ist notwendig, um die elektrischen Leistungsverluste innerhalb eines Brennstoffzellen-Stapels auf ein Minimum zu reduzieren. Die Minimierung der elektrischen Leistungsverluste durch Wärme ist besonders wichtig, um den Bedarf an gewichts- und platzintensiver Kühlung gering zu halten und den Wirkungsgrad eines Brennstoffzellen-Antriebssystems zu maximieren.

Für eine präzisere Einschätzung der Korrosionsbeständigkeit wird der modifizierte RS-Stahl unter Luftsauerstoff einem elektrochemischen Belastungstest mit verdünnter Schwefelsäure unterzogen. 5 zeigt das Ergebnis der nachfolgenden Stromdichte-Potenzialmessung. Im typischen Betriebsbereich einer Brennstoffzelle verhält sich der mit Stickstoff und Kohlenstoff modifizierte RS-Stahl im Vergleich zur unbehandelten Referenz signifikant besser. Auch diese Verbesserung ist unbedingt erforderlich, damit die Oberfläche der bipolaren Platte der Korrosionsgefahr im mobilen Betrieb einer Brennstoffzelle standhält.

Bereits jetzt erfüllen die untersuchten oberflächenmodifizierten bipolaren Platten aus RS-Stahl die Entwicklungsziele des DOE für automobiler Brennstoffzellen im Hinblick auf Korrosion und Kontaktwiderstand, 6.

AUSBLICK

Mit dem vorliegenden Vorprototypen-Bauteil einer bipolaren Platte aus RS-Stahl hat ThyssenKrupp gemeinsam mit Partnern eine im Vergleich zur mit Gold beschichteten Referenz kosteneffiziente Lösung entwickelt. Sie erfüllt bereits heute wichtige Anforderungen für den Einsatz in einer PEM-Brennstoffzelle im Automobil. Dies ist ein sehr guter Ausgangspunkt für die zukünftige Prozessentwicklung, deren Tauglichkeit in Brennstoffzellen-Stapeln erst noch im Rahmen weiterer Entwicklungs- und Optimierungsarbeiten bewiesen werden muss. Vor allem aber gilt es, einen wirtschaftlichen industriellen Fertigungsprozess zu gestalten. Im Vergleich zu bisher verfügbaren Prozesslösungen besteht eine gute Perspektive, bipolare Platten in einem effizienten, kontinuierlichen Verfahren in Serie herzustellen.

	Elektrischer Kontaktwiderstand [$m\Omega \times cm^2$] bei 16 bar	Korrosionsstromdichte bei dynamischer Korrosionsbelastung bei $0,9V_{SHE}$ [A/cm^2]
Ziel des DOE 2015	20	$< 1,0 \times 10^{-6}$
1.4404 unbeschichtet	500	$< 1,5 \times 10^{-6}$
1.4404 + Kohlenstoff-Modifikation	16	$< 0,1 \times 10^{-6}$
1.4404 + Stickstoff-Modifikation	18	$< 0,5 \times 10^{-6}$

6 Vergleich der Eigenschaften der Vorprototypen-Bauteile mit den Zielwerten des DOE

FAHRWE

& LEN



ERK



Elektrisch unterstützte Lenksysteme sind gleichsam die Eintrittskarte in die Welt des teil- oder vollautonomen Fahrens und reduzieren zudem den Kraftstoffverbrauch im Vergleich zu konventionellen hydraulischen Lenkungen. Im InCar plus-Teilprojekt Fahrwerk und Lenkung haben die Ingenieure von ThyssenKrupp daher das Ziel, die elektrisch unterstützten Lenksysteme noch effizienter zu gestalten und für neue Fahrzeugklassen auszulegen. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt ist die Multimaterialbauweise für Stoßdämpferrohre und Lenkungskomponenten. Für ihre Umsetzung in Großserie stehen neben innovativen Produktlösungen auch die passenden Fertigungs- und Montageverfahren bereit.

LENKUNG

EFFIZIENTERE FAHRWERKSTEILE

Ultraleichte und kostenoptimierte Dämpferrohre, leichtere und noch kompaktere Fahrzeugfedern sowie ein neues integriertes Dämpfungsverstellsystem: Das sind einige Innovationen, mit denen ThyssenKrupp Effizienz- und Performancesteigerungen bei Fahrwerkskomponenten realisiert. Die Fahrzeughersteller erwarten heute, diese Komponenten in zunehmend komplexere Systeme integrieren zu können. Daher stehen neben Leichtbau und Funktionsoptimierung auch eine optimale Bauraumgestaltung sowie die Kompatibilität mit aktiven, vernetzten Fahrwerkssystemen im Vordergrund der Entwicklungsaktivitäten.

MIT THERMOTECWIRE GEWICHT UND BAURAUM SPAREN

Fahrzeugtragfedern aus ThermoTecWire sind fast 20 % leichter als bisherige Tragfedern und leisten dadurch einen herausragenden Beitrag zum Leichtbau im Fahrwerk. Zusätzlich zum Verbrauchs- und Emissionsvorteil resultiert eine Packageoptimierung, da die Feder aus dem innovativen Federdraht deutlich kürzer als bisher ist – und das alles ohne Leistungseinbußen trotz höherer Beanspruchung des Federwerkstoffs. Unterstützt wird der Leichtbau bei Tragfedern durch die neu entwickelte Oberflächenbeschichtung ElastoProtect, die die Federoberfläche auch unter verschärften Umweltbedingungen effektiv vor Beschädigungen schützt.

Die bekannten und im Markt bewährten ThermoTecSpring-Tragfedern sind durch die thermomechanische Umformung – den sogenannten ThermoTecProcess – bis zu 15 % leichter als konventionelle Federn und erreichen die gleiche Lebensdauer wie diese. ThyssenKrupp entwickelt in InCar plus den ThermoTecProcess nun konsequent weiter und fertigt daraus ThermoTecWire, einen neuen Federdraht mit verbesserten Eigenschaften. Die ThermoTecSpring aus dem neuen Federdraht ist nochmals 3 % leichter als Tragfedern der ersten Generation und bis zu 20 % leichter als konventionelle Tragfedern. Zusätzlich bietet die ThermoTecSpring mit Federdraht aus ThermoTecWire einen Bauraumvorteil, der entweder über die Federlänge oder den Federkörperdurchmesser umgesetzt werden kann.

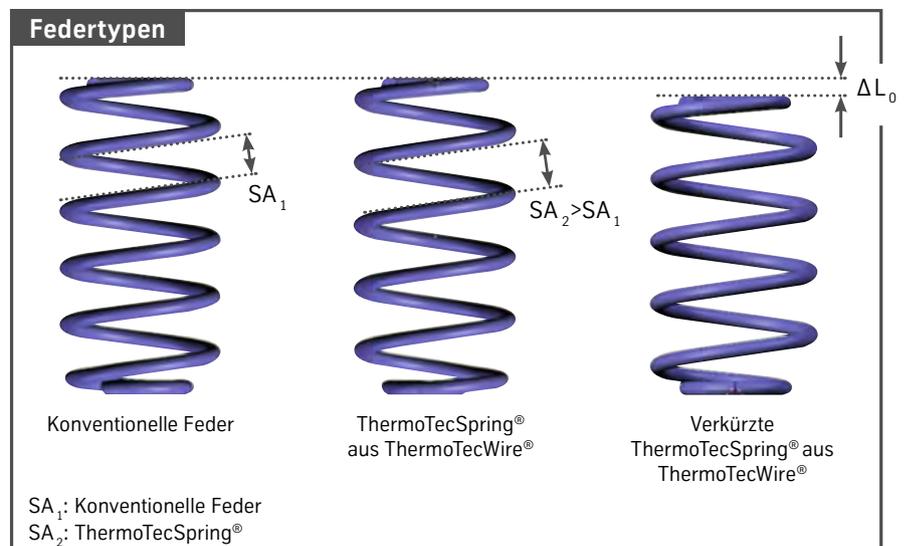
Tragfedern sind hochbelastete, gewichtsoptimierte Bauteile. Grundlage jeder weiteren Gewichtsreduzierung ist die Optimierung des Federwerkstoffs bezüglich der ertragbaren Spannungen unter statischer und dynamischer Belastung. Damit die Feder höhere Spannungen ertragen kann, muss die Festigkeit des Werkstoffs angehoben werden, ohne dabei seine Zähigkeit zu verschlechtern. Ein solchermaßen verbesserter Werkstoff ermöglicht Schraubenfedern mit kleinerem Drahtdurchmesser und geringerer Windungszahl bei gleicher Lebensdauer, ①.

SEPARATER PROZESS FÜR NOCH MEHR ZÄHIGKEIT

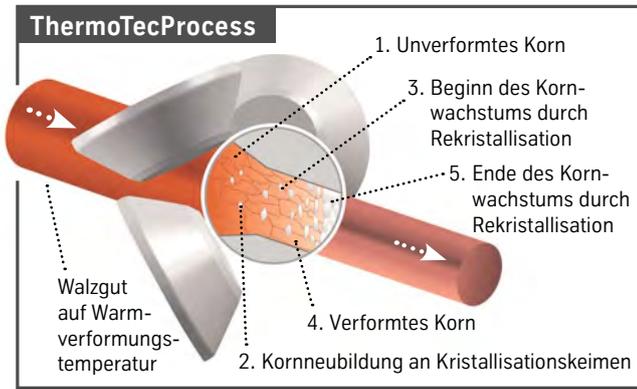
Mit ThermoTecWire bezeichnet ThyssenKrupp Federstahl, dessen Zähigkeit durch eine thermomechanische Umformung gesteigert wird. Dieser Umformprozess ist eine Kombination aus mechanischer Umformung und definierter Wärmeführung des Federdrahts. Temperatur- und zeitabhängige Rekristallisationsprozesse im Werkstoff führen während und nach dem Umformen

zur Ausbildung eines feineren Gefüges, ②. Dieser Effekt entsteht nach Überschreiten eines kritischen Umformgrads. Das feinkörnigere Gefüge und die damit verbundene höhere Zähigkeit lässt Festigkeiten von bis zu 2200 MPa im Werkstoff zu – ohne Lebensdauer-Nachteile. Standard sind derzeit 1900 bis 2050 MPa.

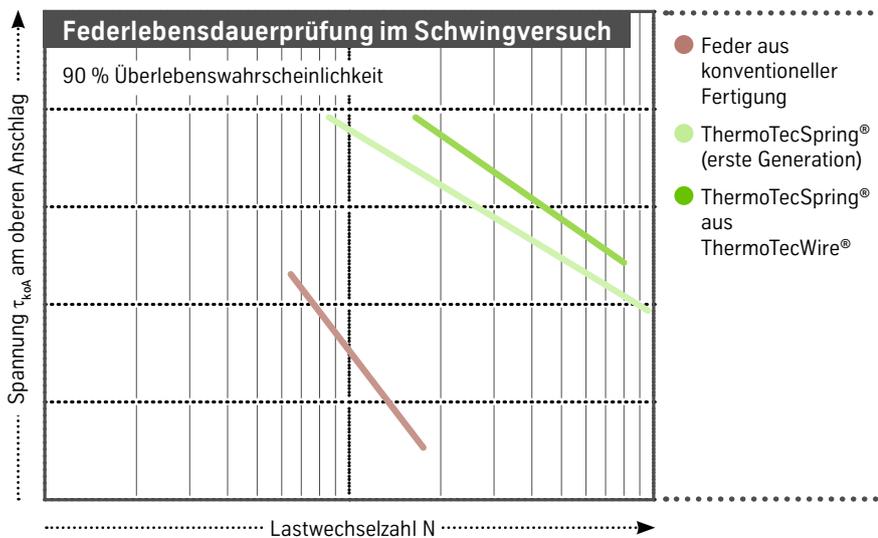
Bei bisherigen ThermoTecSpring-Tragfedern besteht die thermomechanische Behandlung aus einem einstufigen Walzvorgang zwischen Erwärmen und



① Leichtbaufedern mit ThermoTecWire im Vergleich zu konventioneller Feder



2 Gefügeveränderungen beim ThermoTecProcess



3 Federn aus ThermoTecWire haben eine höhere Lebensdauer

tiven Federdrahts für alle Schraubenfedern unabhängig vom Herstellverfahren und der Federgeometrie.

INNOVATIVER OBERFLÄCHENSCHUTZ

Die höhere Materialfestigkeit und damit zulässige Beanspruchung machen den Federstahl allerdings empfindlicher für Schädigungen im Oberflächenbereich. Diese können, besonders in Verbindung mit Korrosion, prinzipiell zur Rissbildung führen, weil an der Oberfläche und in den oberflächennahen Bereichen des Drahtquerschnitts die höchsten Spannungsbelastungen auftreten. Da die Feder je nach Einsatzgebiet widrigen und wechselnden Umweltbedingungen wie Steinschlag, Nässe oder Streusalz ausgesetzt sein kann, ist der Schutz der Federoberfläche wichtig.

ThyssenKrupp entwickelt dafür eine neue Lackierung mit der Bezeichnung ElastoProtect. Diese Einschichtlackierung besteht aus einem modifizierten Epoxy-Pulverlack mit erhöhtem Energieabsorptionsvermögen, der das Durchschlagen von Partikeln auf den Federstahl verhindert. Auch unter extremen Bedingungen wie im Kälteschlagtest bei -40 °C treten keine Lackablösungen auf, 4.

ElastoProtect schützt daher die Feder wirkungsvoller vor mechanischen Oberflächenverletzungen als heutige dünne Pulverbeschichtungen. Außerdem kommt ElastoProtect, anders als moderne Zweischichtlackierungen, ohne zusätzliche Zinkschicht (Primer) aus. Federn aus ThermoTecWire sowie die neue Lackierung ElastoProtect werden in Kürze weltweit an den Standorten von ThyssenKrupp zur Verfügung stehen.



4 Einschlagkrater ohne Lackablösung

Wickeln des Federdrahts. Bei ThermoTecWire findet dieser zusätzliche Fertigungsschritt jetzt separat schon am Vormaterial statt. Der Effekt auf das Gefüge wird durch den veränderten Prozessablauf sogar verbessert. Schwingversuche belegen einen zusätzlichen Lebensdauererfolg der aus ThermoTecWire gefertigten Federn, 3.

Dieser Lebensdauererfolg kann bei einer konsequent leichtbauorientierten Federauslegung in eine Gewichtersparnis von bis zu 20 % im Vergleich zu einer konventionellen Feder umgesetzt werden. Hinzu kommt der in 1 dargestellte Bauraumgewinn. Konkrete Werte hängen jeweils vom Einzelfall ab. Einfluss haben zum Beispiel Randbedingungen wie die Kennlinie, der Bauraum, die Querkraftkompensation, die Einbausituation und die Lebensdauer. Natürlich kann mit ThermoTecWire auch die

Robustheit der Feder verbessert werden, ohne das Gewichtspotenzial zu nutzen.

Auf der Kostenseite schlägt vor allem der geringere Materialbedarf positiv zu Buche. Dem stehen aber die zusätzlichen Kosten der separaten thermomechanischen Behandlung gegenüber. Auch hier hängen die Leichtbaukosten stark vom Einzelfall ab. Tendenziell ist Kostenneutralität eher mit zunehmendem Federgewicht zu erwarten, da dann die absolut eingesparte Materialmenge zunimmt.

Ein weiterer Vorteil des neuen Verfahrens ist der breite Einsatzbereich. Während die ThermoTecSpring der ersten Generation auf warmgeformte Schraubendruckfedern mit zylindrischem Draht beschränkt ist, eignet sich der Federdraht aus ThermoTecWire für alle Drahtgeometrien, etwa auch für Drähte mit konischen Enden. Ziel weiterer Entwicklungsarbeiten ist der Einsatz des innova-

FUNKTIONSOPTIMIERTE STOSSDÄMPFERROHRE

ThyssenKrupp hat neue Stoßdämpferrohre für individuelle Packageanforderungen, maßgeschweißte Varianten mit einem optimalen Kosten- und Funktionsniveau sowie eine gewichtsoptimierte Leichtbauvariante entwickelt. So ist beispielsweise das Dämpferrohr aus kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) bis zu 45 % leichter als ein Aluminium-Dämpferrohr. Neu entwickelte Edelstahlrohre bieten eine erhöhte Korrosionsbeständigkeit für Einrohr- und Zweirohr-Stoßdämpfer. Einige Lösungen sind direkt für die Serienanwendung umsetzbar.

Dämpfer, die zwischen Abgasanlage und Bremse positioniert sind, unterliegen sehr hohen thermischen Beanspruchungen. Um beispielsweise die durch Nachheizen angestaute Wärme nach Abstellen des Motors oder die Wärme der Bremsen im Stand besser abzuleiten, müssen die Dämpfer ein größeres Ölvolume oder eine größere Rohroberfläche aufweisen. Eine dauerhafte Dichtfunktion kann ansonsten nicht gewährleistet werden.

T³-STOSSDÄMPFERROHR MIT INDIVIDUELLEM PACKAGE

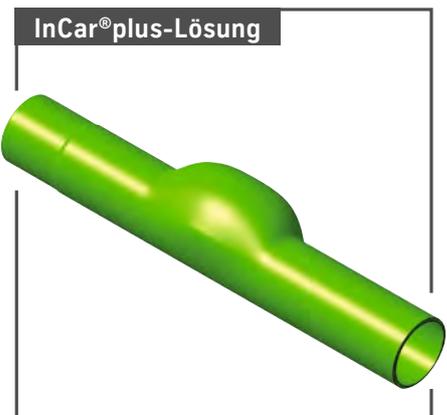
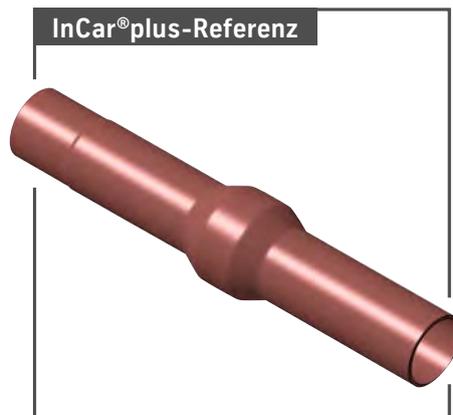
Im Fall des Referenzrohrs wurde diese größere Oberfläche durch eine Ausbeulung realisiert, ❶ (links). Dabei wird das Rohr in einem mehrstufigen Umformprozess aufgeweitet und anschließend wieder eingezogen. Für dieses besondere Package hat ThyssenKrupp eine funktions- und kostenoptimierte Lösung entwickelt, ❷ (rechts).

Das Rohr wird in einem innovativen Fertigungsprozess, der T³-Technologie, als Stanz-Umformteil produziert. Dieses Herstellungsverfahren ermöglicht bei eingeschränktem Package vielfach eine Funktionsintegration, die mit der herkömmlichen Fertigungstechnologie nicht möglich ist. So kann das Rohr in jedem Bereich gezielt geformt und dem Package angepasst werden. Auch die direkte Integration von Rohreinschnürungen im oberen Bereich ist möglich, um Standardkomponenten für die Rohraufnahme verwenden zu können. Abhängig von der Geometrie und den zu übertragen-

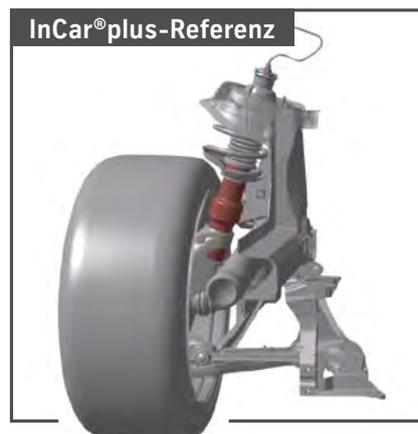
den Lasten ist auch der Federtellersitz direkt in das Rohr integrierbar.

Die radiale Aufweitung des Referenzrohrs ist durch den Radträger und die Felge stark limitiert, ❷ (links). Dieser

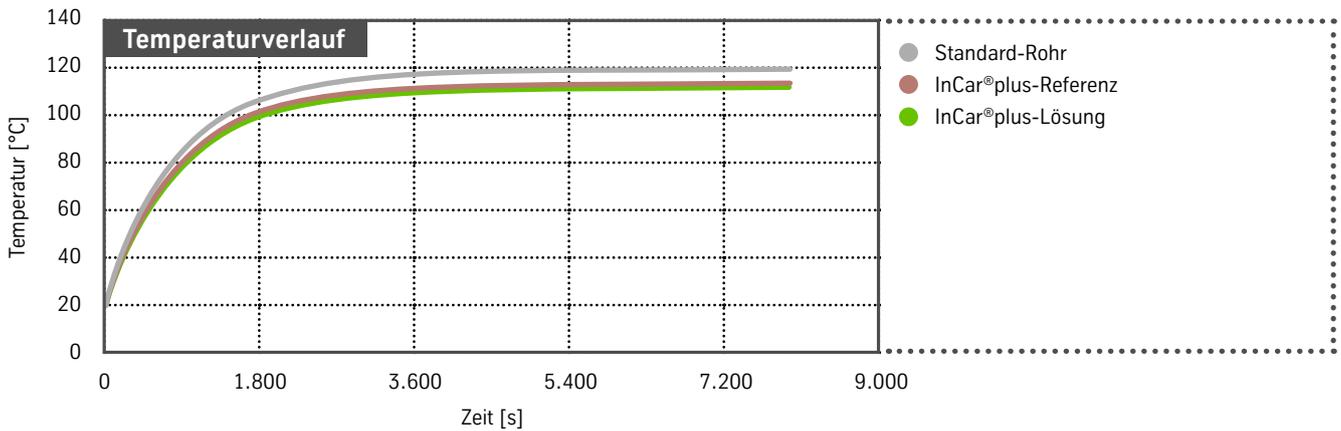
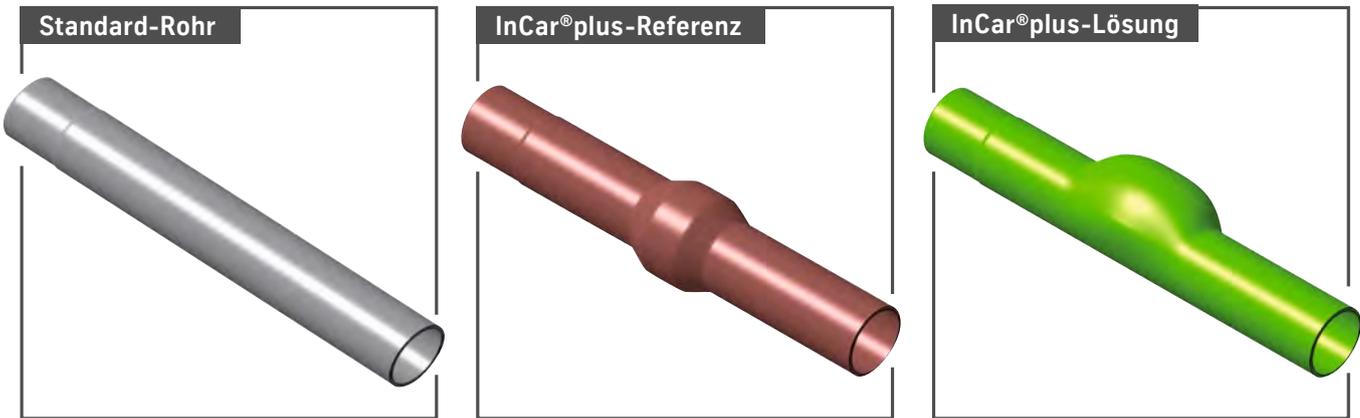
Bauraumkonflikt besteht beim T³-Rohr nicht, da das Zusatzvolumen unter Berücksichtigung der Bauraumsituation optimal positioniert werden kann, ❷ (rechts).



❶ InCar plus-Referenzrohr (links) und InCar plus-T³-Stoßdämpferrohr (rechts)



❷ Schematischer Einbau des Referenz-Dämpferrohrs (links) und des T³-Dämpferrohrs (rechts)



3 Wärmesimulation der Rohrvarianten im Vergleich

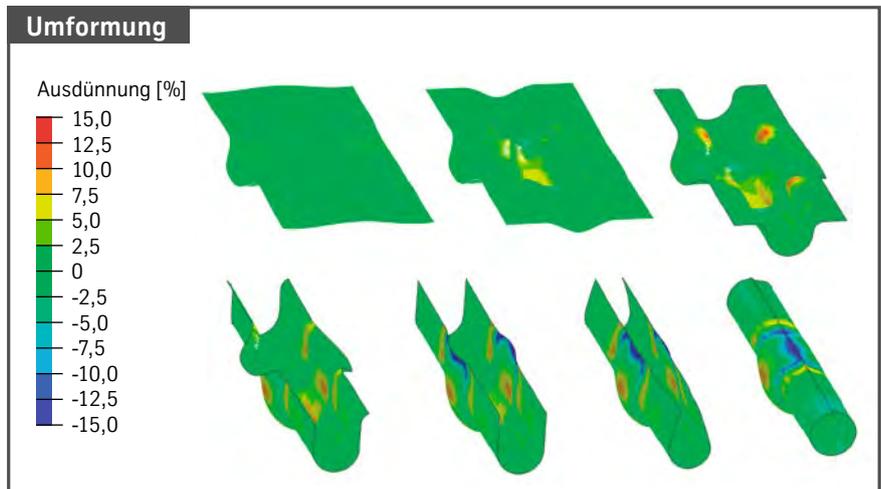
Weiterhin sollten die Wandstärken bei der Umformung möglichst konstant bleiben, um das Bauteil nicht zu schwächen. Durch den Wechsel vom klassischen Rohrziehen hin zum T³-Bauteil ist es möglich, das Ausdünnen des Materials an belastungskritischen Stellen, etwa direkt oberhalb des Radträgers, zu vermeiden. Somit kann das Stoßdämpferrohr mindestens das gleiche Temperaturniveau halten wie das Referenzrohr, jedoch mit einer erheblich größeren Gestaltungsfreiheit. Dies belegen umfangreiche Simulationen, die eine im Vergleich zum Serienstand sogar etwas bessere Wärmeabführung zeigen, 3.

Die Vergrößerung der Oberfläche sowie des Ölolumens müssen mit der Einhaltung bestimmter Bauteileigenschaften einhergehen, etwa der Rundheit und des Durchmessers sowie der Schweißnahtqualität im Klemmbereich. Diese Eigenschaften sind für eine einwandfreie Montage der Dichtungsführungseinheit sowie für die Montage im Radträger notwendig und lassen sich mit der T³-Technologie sehr gut einhalten.

Bei dieser Technologie wird das Rohr – vereinfacht gesagt – nach dem Umformprozess durch lasergestütztes Längsnahtschweißen verschlossen.

Vor der Herstellung der ersten Prototypen wird per Simulation der erste Platinezuschnitt ermittelt. Dazu wird

begleitend die Kantenanformung des U-Profils optimiert, um eine prozesssichere und lasergerechte Stoßfuge für die Schweißnaht zu erzeugen, 4. Anschließend wird das Rohr per Laser längsnahtgeschweißt – ohne Zusatzwerkstoff und mit kontrolliertem Nahteinfall auf der



4 Umformsimulation der T³-Technologie

Innen- und Außenseite, um die Montierbarkeit im Radträger zu sichern. Die dabei erzeugte Schweißnahtqualität ermöglicht ein dauerhaft dichtes Verschließen des Dämpfers mittels Rollverschluss nach der Umformung.

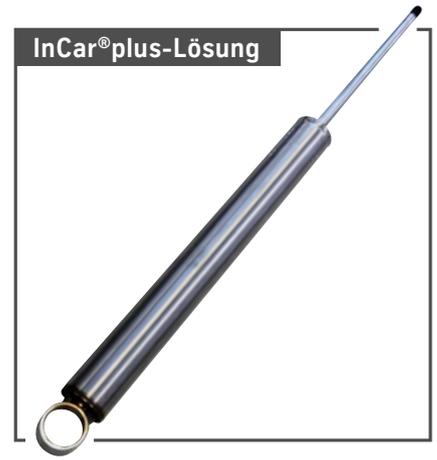
Als nächste Projektschritte hat ThyssenKrupp alle weiteren Prozesse zur Herstellung eines einbaufertigen Dämpferrohrs untersucht. Dazu gehört zum Beispiel das Anschweißen von Bodenstück und Federteller, die Montage der Dämpfungseinheit sowie das Verschließen und Lackieren des Dämpfers. Zur Absicherung der Betriebsfestigkeit und Dichtheit finden abschließend statische und dynamische Tests statt.

Neben den klassischen Aus- und Abreißtests für den Rollverschluss und den Federteller wird die Dauerhaltbarkeit des kompletten Federbeins mit verschiedenen dynamischen Belastungstests untersucht. Ein Drucksensor im Rohr überwacht permanent die Dichtheit und registriert im Fall eines Schweißnahtversagens sofort Undichtigkeiten. Die Federteller-Schweißnaht und der Rollverschluss werden durch eine schwellende Lasteinleitung geprüft. Den Funktionsnachweis im Zusammenbau gewährleistet ein Moduldauerlauf, bei dem das komplette Federbeinmodul mit einem aufgezeichneten Lastkollektiv beaufschlagt wird.

DÄMPFERROHR AUS EDELSTAHL

Eine weitere Lösung des InCar plus-Projekts befasst sich mit der Entwicklung eines korrosionsfreien Dämpferrohrs. Es soll allen zukünftigen Anforderungen und auch schwierigen Randbedingungen standhalten, wie etwa schlechten Straßenverhältnissen, dem Offroad-Einsatz und dem erhöhten Korrosionsrisiko durch Streusalz. Die hierfür entwickelte Edelstahllösung ist für Einrohr- und Zweirohr-Anwendungen gleichermaßen geeignet.

Das Referenzrohr, ⑤ (links), hat eine klassische Lackierung aus Tauchlack beziehungsweise elektrostatem Spritzlack. Diese Standardverfahren geraten durch die gestiegenen Anforderungen an den Korrosionsschutz immer mehr an ihre Grenzen. Der angestrebte weltweite Einsatz von Gleichteilen und Verfahren funktioniert nur noch bedingt. In Ländern mit extremen klimatischen Verhältnissen, wie etwa Russland oder



⑤ Lackiertes (links) und Edelstahl-Dämpferrohr (rechts)



⑥ Ansicht des Edelstahlrohrs nach verschiedenen Zugphasen

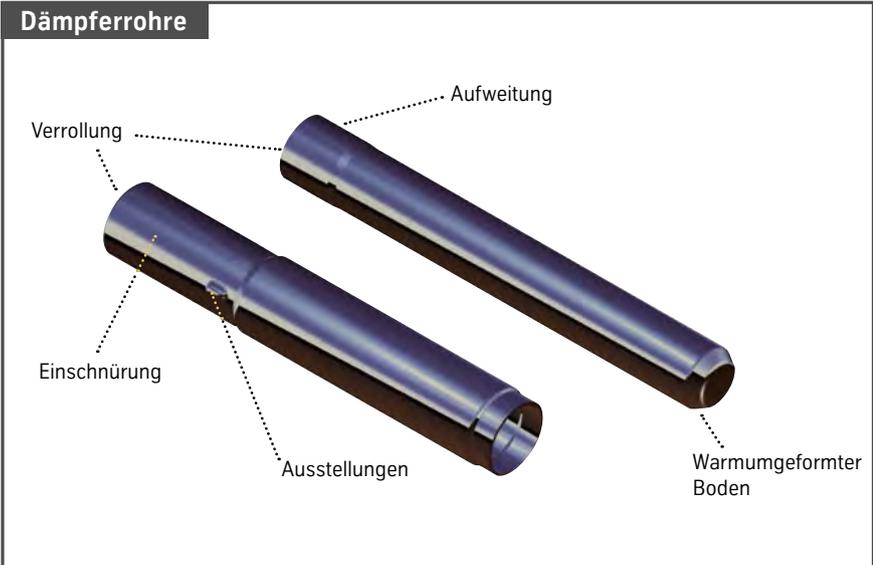
China, muss ein erheblicher Mehraufwand betrieben werden, um den Anforderungen gerecht zu werden. So müssen teilweise Schweißnähte vor dem Lackieren gebürstet, Lackierschatten durch aufwendige Vorlackierungen ausgeschlossen und schwer zugängliche und korrosionsanfällige Stellen zum Teil nachträglich gewachst werden.

Bei der InCar plus-Lösung, ⑤ (rechts), sind diese kostenintensiven Zusatzprozesse nicht erforderlich, da der Edelstahl korrosionsfrei ist und zusätzlich eine ansprechende Optik bietet. Letzteres spielt insbesondere bei Geländewagen und Pickups eine wesentliche Rolle, da hier der Dämpfer in der Regel direkt sichtbar ist. Fahrzeug-Sonderserien mit besonders hohen Korrosionsschutzanforderungen sind weitere denkbare Einsatzgebiete der Edelstahl-Dämpferrohre.

Die Edelstahlrohre müssen zusätzlich die erforderliche Dichtheit und Oberflächenqualität für Einrohr-Anwendungen

aufweisen. Dies führt beispielsweise zu sehr kleinen Toleranzen beim Durchmesser. Auf Basis eines 36 mm dicken Standard-Achsdämpfers werden zusammen mit einem auf Edelstahl spezialisierten Rohrerhersteller entsprechende Prototypen entwickelt, ⑥. Die Herausforderung liegt darin, die Schweißnaht durch Ziehvorgänge komplett zu entfernen. Dazu muss das Rohr in mehreren Zügen hergestellt werden, bis sich die erforderliche Genauigkeit einstellt.

Am besten eignet sich dafür ein austenitischer, nicht rostender Edelstahl. Seine mechanischen Werte entsprechen den heute eingesetzten Standard-Kohlenstoffstahl-Rohren. Abgesichert wird das Rohr mit Standard-FEM-Berechnungen. Dabei werden Knick- und Zuglasten in der Rohrbaugruppe mit unterschiedlichen Wandstärken und Rohrböden eingeleitet. Ferner erfolgt eine Bewertung des Dämpferschlusses. Die nicht ausgeprägte Streckgrenze dieser Rohre ist



7 Maßgeschweißte Rohre

durch die hohe Dehnung des Materials bedingt. Dies hat keinen Einfluss auf die Festigkeit des Rohrs.

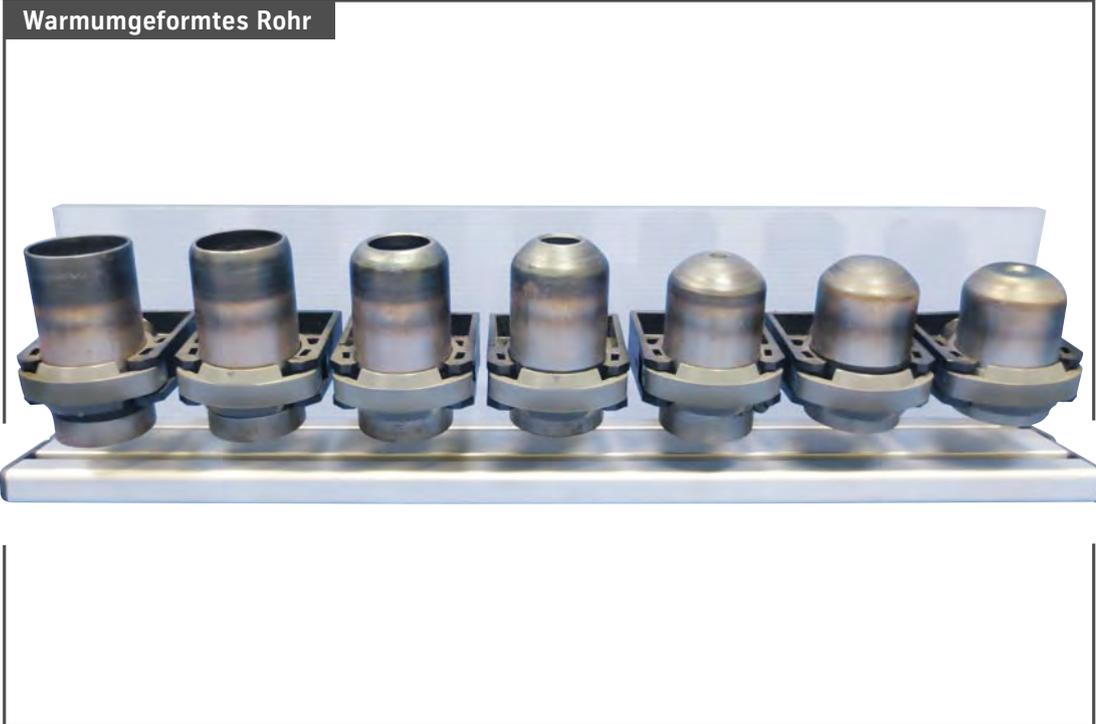
Erste Fertigungsversuche zeigen, dass ein eingeschweißter Boden im Vergleich zu einem standardmäßig warmgeformten Boden bessere Eigenschaften aufweist. Der Rohrboden besteht aus dem gleichen Material wie das Rohr und wird per

Laserschweißen ohne Zusatzwerkstoff an das Rohr gefügt. Die untere Anbindung zur Aufnahme der Lagerung sowie die Schweißnaht sind ebenfalls aus Edelstahl. Das im oberen Bereich des Dämpfers sitzende Verschlusspaket ist wie bei der Referenz mit einem Aluminium-Führungskörper ausgestattet. Deshalb musste das Gehäuse hart anodisiert werden, um

der bei dieser Materialpaarung entstehenden Kontaktkorrosion entgegenzuwirken. Diese Beschichtungsart hat sich seit vielen Jahren bei ThyssenKrupp bewährt.

Im Rahmen der Erprobung bestanden die Rohre einen 240 h dauernden Salzsprühnebel-Test ohne Anzeichen von Korrosion. Die Zerreißversuche zeigten ein vergleichbares Bild wie die Referenz. Im Überlagerungsdauerlauf wird der fertig montierte Dämpfer einem Langzeitest unterzogen. Eine Doppel-Exzentermaschine sorgt dabei für eine Millionen Grundhübe und zwölf Millionen überlagerte Kurzhübe. Neben den klassischen Betriebsfestigkeitsprüfungen werden mit dem Edelstahlrohr auch Funktionsprüfungen durchgeführt. Hierbei wird die Haft- und Umkehrreibung zwischen der inneren Rohrwand und dem Führungsdichtungsband des Ventilsystems untersucht. Ebenso wird die Kälte-dichtigkeit und Hochtemperatur-Tauglichkeit der statischen Verschlusspaketdichtung zum Edelstahlrohr nach einem Korrosionsdauerlauf bewertet.

Diese Lösung ist kurzfristig ohne größeren Aufwand serientauglich umsetzbar und für alle Achsdämpfer geeignet. Grundsätzlich ist eine spätere Anwendung auch bei Federbeinen mit Anbauteilen machbar.



8 Verschiedene Stadien des Warmumformprozesses

MASSGESCHWEISSTES DÄMPFERROHR

Für neue Zweirohr-Dämpferlösungen untersucht ThyssenKrupp maßgeschweißte Dämpferrohre in Verbindung mit allen gängigen Rohr-Umformoperationen. In diesem von den Produktkosten getriebenen Umfeld stellt sich die Frage, ob und unter welchen Bedingungen der Einsatz von kostengünstigeren Rohren möglich ist.

Vielfältige Versuche zeigen, dass die wirtschaftliche Verarbeitung solcher Dämpferrohre möglich ist und deren hoher Reifegrad den Serieneinsatz unterstützt, 7. Im Vergleich zum Referenz-Stoßdämpferrohr, einem gezogenen Bauteil, entfallen bei maßgeschweißten Rohren die zusätzlichen Ziehprozesse. Der Fokus liegt hier auf der Längsschweißnaht. Anders als bei gezogenen Referenzrohren wird diese nur geschabt und weist somit eine leichte Vertiefung auf. Die Schweißnaht und das nachgeschaltete Glühen müssen exakt definiert werden, um bei allen formgebenden Arbeitsgängen Risse und Undichtigkeiten zu vermeiden.

Aufgrund unterschiedlicher Kundenanforderungen führt ThyssenKrupp viele verschiedene formgebende Arbeitsgänge an den Rohren durch. In der Regel legen die Steifigkeits-, Package- und Betriebsfestigkeitsanforderungen schon im Vorfeld bestimmte Rohrdurchmesser und Wandstärken nahe. Um dadurch keine Sonderlösungen für Standardbauteile, wie etwa die Dichtungs- und Führungseinheiten sowie Anschlagkappen, zu generieren, wird der Durchmesser oft aufgeweitet und eingeschnürt. Teilweise wird der Dämpfer auch an seinem unteren Ende eingeschnürt, um seine Montierbarkeit in geklemmten Radträgern zu verbessern oder das Rohr auf der eingezogenen Kante im Radträger abzulegen (Höhenanschlag).

Ebenso werden auf Rohreinzüge Federteller abgelegt. Zur lagerichtigen Montage der Federteller und als Sicherung gegen ihr Verdrehen wird eine zusätzliche Ausstellung in das Rohr eingeformt. Hier gilt es sicherzustellen, dass diese massive Umformung auf kleinstem Raum die Schweißnaht nicht beschädigt. ThyssenKrupp hat dazu umfangreiche Versuche durchgeführt und Materialschliffe angefertigt.

Eine wichtige Eigenschaft ist die Eignung der maßgeschweißten Rohre ohne

InCar®plus-Lösung



9 Schnittdarstellung des Ultra-Leichtbau-Stoßdämpfers

Einschränkungen für den Warmumformprozess. Beim Warmumformen wird das Rohr induktiv erhitzt und mit einer Drehbewegung in eine Form gepresst, bis das Rohrende vollständig und gasdicht geschlossen ist. Den Nachweis dafür erbrachten mehrere Probefertigungen unter seriennahen Fertigungsbedingungen, 8.

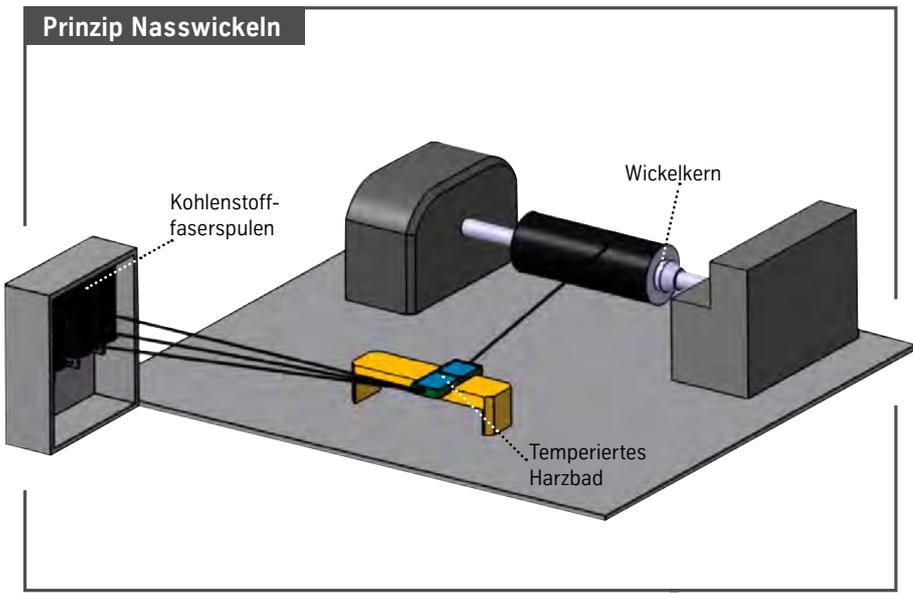
Die Tauglichkeit der maßgeschweißten Rohre für radiale und axiale Standard-Dichtungssysteme ist ebenfalls gegeben. Die definierte Schweißnahtschabung ermöglicht es, den Schwingungsdämpfer dauerhaft an der Dichtstelle zwischen Behälterrohr und Führung zu dichten. Sowohl bei axialen als auch bei radialen Dichtungs-Führungssystemen reicht die Elastizität des Dichtungswerkstoffes aus, um die leichte Vertiefung der abgeschabten Schweißnaht des Rohrs zu füllen. Dauerläufe und Kälte-dichtigkeitserprobungen beweisen, dass diese Technik über den gesamten Temperaturbereich eines Zweirohr-Dämpfers von -40 bis 80 °C (kurzfristig bis 120 °C) zuverlässig funktioniert.

GEWICHTSOPTIMIERTES CFK-DÄMPFERROHR

Eine weitere Entwicklung im Projekt InCar plus ist das „Ultra-Leichtbau-Stoßdämpferrohr“. Hier stehen eine maximale Gewichtsreduzierung bei einem Einrohr-Dämpfer und die technische Machbarkeit von CFK-Strukturen im

Mittelpunkt der Entwicklung. Der aktuelle Prototyp ist im Vergleich zu einem Serien-Dämpferrohr in Aluminium-Leichtbauweise 33 bis 45 % leichter. Zum einen kommt dieser Dämpfer komplett ohne jegliche metallische Funktions-beziehungswise Lauffläche aus und ist daher sehr leicht. Zum anderen sorgt die geringe Dichte und große Festigkeit der Kohlenstofffasern gemeinsam mit einer lastspezifischen Faserausrichtung für ein sehr steifes und dennoch leichtes Rohr. In diesem Prototypen sind die Fasern in radialer und axialer Richtung lastgerecht in wechselnden Winkellagen zur Dämpferachse angeordnet. Besonderes Augenmerk gilt dabei den Lasteinleitungselementen, die eine fasergerechte Einleitung der Betriebslasten in die Rohrstruktur gewährleisten müssen.

Für die Materialauswahl spielt neben der mechanischen Belastung (hier mit dynamischen Betriebslasten von +/-30 kN) vor allem die thermische Beanspruchung des Bauteils eine große Rolle. Die in der Realität möglichen Betriebstemperaturen von Einrohr-Dämpfern von -35 °C bis hin zu mehr als 160 °C stellen hohe Anforderungen an den Verbund aus Matrix, Inlay und Fasern. Erschwerend kommt noch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Faser-verbundwerkstoffes hinzu, die einen deutlichen Unterschied zwischen der außen messbaren und der tatsächlichen inneren Temperatur des Rohrs zur Folge



10 Von der Spule bis zum Rohr: schematische Darstellung des Wickelprozesses

hat. Die ohnehin angestrebte Minimierung der Wandstärke hilft dabei, die inneren Komponenten vor Überhitzung zu schützen und den Temperaturunterschied gering zu halten.

Damit das System selbst bei starken Temperaturschwankungen und unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der Lasteinleitungselemente und des CFK-Rohrs dauerhaft dicht bleibt, wird im Gegensatz zu einem herkömmlichen Einrohr-Dämpfer unterhalb der

Lasteinleitungselemente gegen die innere Rohrfläche abgedichtet, 9.

Die grundsätzliche Tauglichkeit der unterschiedlichen CFK-Werkstoff- und Anbindungskonzepte wurde schon im Jahr 2012 auf den Dämpfer-, Komponenten- und Dauerlaufprüfständen bewiesen. Anschließend entwickelten CFK-Experten von ThyssenKrupp ein serientaugliches Industrialisierungskonzept.

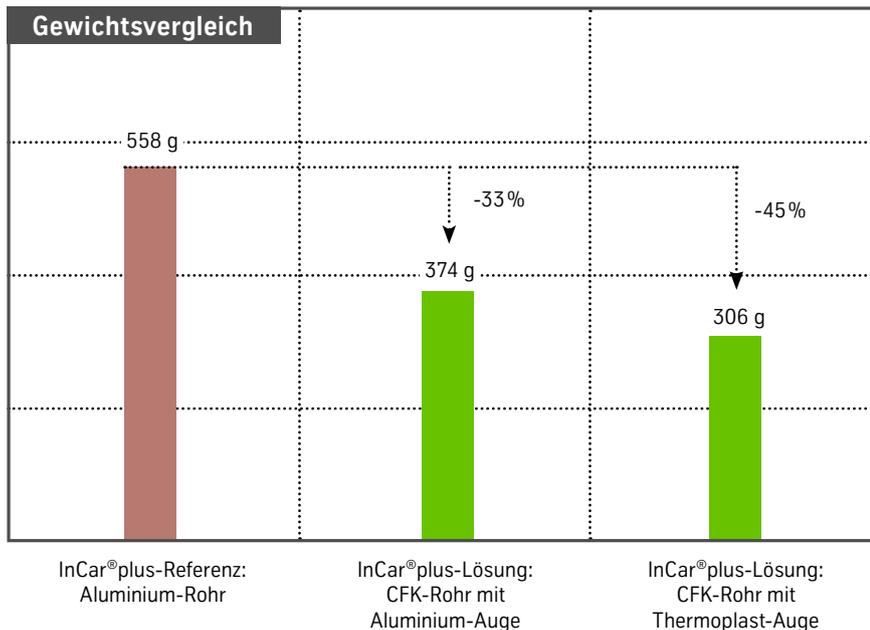
Gefertigt werden die Dämpferrohre aktuell im Nasswickelverfahren, 10. Die-

ses „Filament Winding“ ist ein gängiges Verfahren, bei dem die Kohlenstofffasern ohne den Umweg der Halbzeugfertigung ins Bauteil gebracht werden und gleichzeitig auch das Matrixsystem online dem Prozess zugeführt wird. Der Zwischenschritt über Preforms, Prepregs oder Halbzeuge entfällt. Die Fasern werden von den Spulen abgewickelt und durch ein temperiertes Harzbad geführt. Der Harzanteil in den Fasern ist dabei auf den gewünschten Betrag einstellbar.

Anschließend werden die getränkten Fasern CNC-gesteuert mit definierter Spannung auf dem Wickelkern abgelegt. Die Lasteinleitungselemente werden bei diesem Prozess vorab auf dem Kern positioniert und mit dem Nasswickelverfahren ins Kohlefaserlaminat eingeschlossen. Nach dem Aushärten und dem Tempern der Matrix wird der Kern aus den fertigen Rohren entformt. Die Oberflächenqualität des Kerns und der vorher aufgetragenen Medien ist darauf abgestimmt, dass direkt nach dem Aushärten die gewünschte Dicht- und Funktionsfläche vorhanden ist.

In die Gewichtsbilanz geht das CFK-Dämpferrohr inklusive der unteren Anbindung sowie der Anbindungsmöglichkeit für das Verschlusspaket mit ein. Da alle anderen Komponenten im Vergleich zur Referenz aus Aluminium identisch sind, gilt die festgestellte Gewichts-differenz für den Gesamtdämpfer. Das vergleichbare Aluminium-Rohr hat ein Gesamtgewicht von 558 g, das CFK-Rohr von 374 g. Die Gewichtersparnis beträgt somit 184 g pro Dämpferrohr beziehungsweise 33 %, 11.

Wird das CFK-Dämpferrohr weiter optimiert, fällt dieser Gewichtsvorteil in Zukunft noch größer aus. Aktuell wird an einer Integration der unteren Aluminium-Augen-Anbindung sowie an einer Anbindung aus einem glasfasergefüllten Kunststoff (Thermoplast-Auge) gearbeitet. Erste Versuche lassen darauf schließen, dass so weiteres Gewicht eingespart werden kann. Im Vergleich zur Aluminium-Referenz wäre das CFK-Dämpferrohr dann sogar 45 % leichter. Die Erprobung des CFK-Dämpferrohrs mit Aluminium-Augen-Anbindung am Prüfstand ist bereits abgeschlossen. Erste Prototypen des Dämpfers befinden sich bereits auf Erprobungsfahrt bei einem Automobilhersteller und haben schon mehrere zehntausend Kilometer erfolgreich zurückgelegt.



11 Vergleich der CFK-Lösungen mit der Referenz aus Aluminium

DÄMPFUNGVERSTELLSYSTEM FÜR MEHR FAHRKOMFORT UND AGILITÄT

Das neue, integrierte Dämpfungsverstellsystem von ThyssenKrupp erweitert das Portfolio an verstellbaren Dämpfern um ein stufenloses, schnell schaltendes, vorgesteuertes Druckbegrenzungsventil. Die breite Spreizung der Dämpfungskraft in Zug- und Druckstufe sowie die hohe Verstelldynamik lösen den Zielkonflikt zwischen Fahrkomfort, Fahrsicherheit und Agilität noch besser auf. Ein per Magnet betätigtes Pilotventil steuert präzise den Druck für die beiden unabhängigen Hauptventile der Zug- und Druckstufe. Dieser Ansatz ermöglicht auch in der Druckstufe eine hohe Spreizung zwischen Weich- und Hartkennlinie.

Verstellbare Dämpfungssysteme sind mittlerweile bereits in Fahrzeugen der Kompaktklasse verfügbar und bieten dem Autofahrer höheren Fahrkomfort und gleichzeitig mehr Agilität beziehungsweise Fahrsicherheit. Dazu kann das Steuergerät der Fahrwerksregelung mit Daten unter anderem von den Beschleunigungs- und Wegsensoren für jedes Rad die Dämpfkraften in wenigen Millisekunden individuell anpassen. Eine entsprechende Regelstrategie hält die störenden Anregungen der Straße möglichst von den Passagieren fern und steuert gleichzeitig die Dämpfer so an, dass die Karosseriebewegungen bestmöglich stabilisiert werden. Um die unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Fahrzeuge und Fahrzeughersteller bestmöglich zu erfüllen, werden sowohl kolbenintegrierte (Ventil befindet sich am Ende der Kolbenstange innerhalb des Dämpfers) als auch am Außenrohr des Dämpfers angebrachte Stellventile eingesetzt, ①.

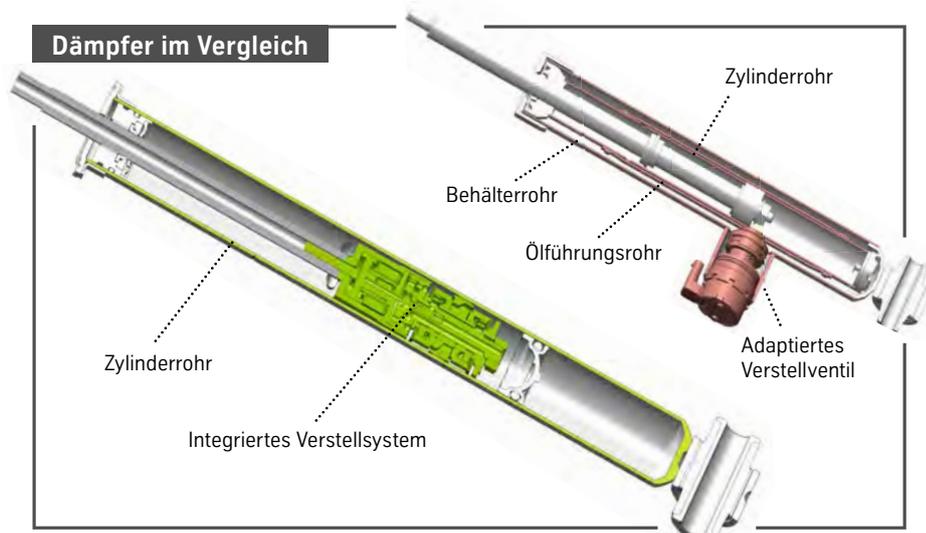
VORGESTEUERTES DRUCKBEGRENZUNGSVENTIL

In InCar plus hat ThyssenKrupp ein neues, stufenlos verstellbares Dämpfungsventil entwickelt. Ein kolbenintegriertes Stellventil bietet dabei im Vergleich zur Außenrohr-Lösung erhebliches

Einsparpotenzial beim Dämpfergewicht. Denn zum einen entfällt das zur Kanalisierung von den Arbeitsräumen des Dämpfers zum außenliegenden Ventil notwendige Ölführungsrohr, zum anderen entfällt bei Einsatz des Ventils im Einrohr-Dämpfer das Innenrohr eines Zweirohr-Dämpfers. Beides sorgt dafür, dass sich zu vergleichbaren Dämpfern bis zu 600 g einsparen lassen.

Mit seinen kompakten Abmessungen ist das proportionale Stellventil für den

Einsatz in Rohren ab 36 mm Innendurchmesser geeignet. Damit ist die Integration in eine Vielzahl von McPherson-Federbeinen möglich. Für ein höheres Dämpfkraftniveau, das oftmals für ungünstig angelenkte Achsdämpfer erforderlich ist, steht eine Variante mit 40 mm Durchmesser zur Verfügung. Durch das Baukastenprinzip der Stellventile unterscheiden sich bei beiden Varianten nur wenige Teile. Dank einer hohen Funktionsintegration bleibt die



① Vergleich eines kolbenintegrierten (links) mit einem am Außenrohr (rechts) angebrachten Stellventil

Baulänge des Ventils unter 100 mm, wodurch es in zahlreichen Achskonzepten eingesetzt werden kann.

Vor der Festlegung des Verstellprinzips diskutierte ThyssenKrupp mit den Fahrzeugherstellern in Workshops die individuellen Gewichtungen einzelner Funktionseigenschaften. Die dabei ermittelten Anforderungen an Kennfeldgestaltung, Schaltzeiten und Regelbarkeit führten zur Entwicklung eines vorgesteuerten Druckbegrenzungsventils. Mit diesem Ventilprinzip lässt sich vorzugsweise ein Dämpfungskraft-Kennfeld erzeugen, in dem die Dämpfungskraft durch sehr flache Druckbegrenzungsgradienten in weiten Bereichen unabhängig von der Dämpfergeschwindigkeit ist, 2.

Dieses Verhalten spiegelt sich in einem weitgehend linearen Dämpfungskraft-Stromverhalten wider und begünstigt die Regelbarkeit des proportionalen Verstellsystems entscheidend. Eine weitere wichtige Anforderung, die das neue Ventil erfüllt, ist die große Spreizung der Druckstufenkräfte. Da auch in der Druckstufe das Vorsteuerprinzip angewendet wird, sind geringe Dämpfungskräfte in der Weichkennlinie und hohe Dämpfungskräfte in der Hartkennlinie möglich.

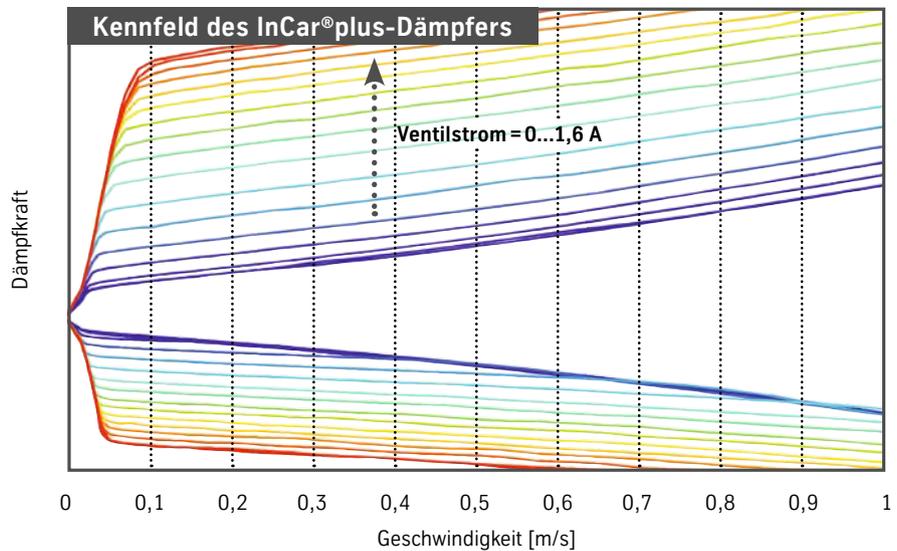
PILOTSTUFE STEUERT HAUPTSTUFEN

Die magnetkraftbetätigte Pilotstufe regelt in Abhängigkeit des elektrischen Stroms den Druck, mit dem die Hauptstufen beaufschlagt werden, 3. Beim Einsatz dieses Ventilprinzips im Dämpfer sind mehrere Herausforderungen zu lösen. Der Dämpfer bewegt sich im Fahrzeug sowohl in Aus- als auch in Einfederichtung. Dies hat zur Folge, dass das Dämpferöl das kolbenintegrierte Ventil wechselseitig durchströmt. Da für beide Richtungen eine gemeinsame Pilotstufe vorhanden ist, die allerdings nur einseitig wirksam ist, muss der Volumenstrom gleichgerichtet werden. Dies übernehmen Rückschlagventile in Form von federbelasteten oder eingespannten Scheibenventilen. Beide Bauformen bieten mit ihren geringen Massen und großen druckbeaufschlagten Flächen die geforderte hohe Schaltdynamik. Da es keine externe Druckversorgung gibt und daher die Pilotstufe aus dem vom Dämpfer selbst erzeugten Druck gespeist wird, muss diese Funktion auch bei niedrigem Druck gewährleistet sein. Dies ist

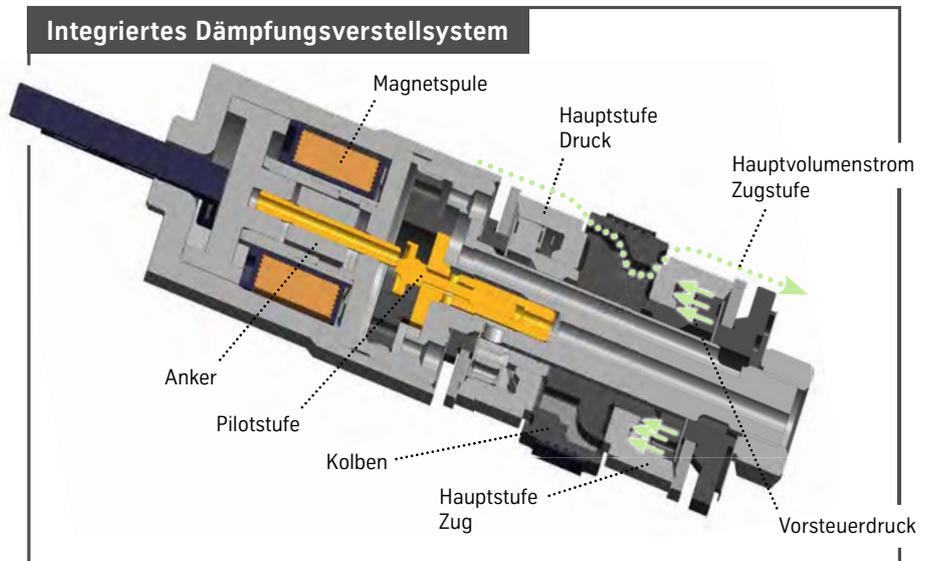
beispielsweise beim Betrieb in der Weichkennlinie oder bei niedriger Anregungsgeschwindigkeit der Fall.

Um den Energieverbrauch des Systems zu minimieren, ist der Proportionalmagnet so ausgelegt, dass er im stromlosen Zustand keine Kraft auf die Pilotstufe ausübt. Der Dämpfer ist damit in der Weichkennlinie. Während der Fahrt wird der Dämpfer überwiegend im Bereich niedriger Dämpfungskräfte und damit bei geringer Bestromung betrieben, beispielsweise bei ruhiger Fahrt über eine relativ ebene Fahrbahnoberflä-

che. Dann sorgen geringe Dämpfungskräfte für eine gute Isolation des Aufbaus von Fahrbahnanregungen. Hohe Dämpfungskräfte, beispielsweise zur Stabilisierung des Aufbaus bei dynamischen Fahrmanövern, werden nur kurzzeitig eingestellt. Bei höchster Dämpfungskraft fließt ein Ventilstrom von 1,6 A, was zu einer maximalen Verlustleistung von 13 W führt. In Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand und den Anforderungen an die Fahrdynamik ergibt sich im Mittel eine elektrische Verlustleistung von etwa 2 W pro Dämpfer.



2 Gemessenes Dämpfungskraft-Kennfeld



3 Schnitt durch das Ventil

Optional ist in das Stellventil eine Fail-Safe-Funktion implementierbar, die im Falle eines elektrischen Fehlers eine fest eingestellte mittlere Dämpfungskraft-Kennlinie bereitstellt. Im stromlosen Zustand, der sich etwa durch einen Leitungsdefekt ergeben kann, regelt ein zusätzliches passives Druckbegrenzungsventil den Pilotstufendruck für Zug- und Druckstufe.

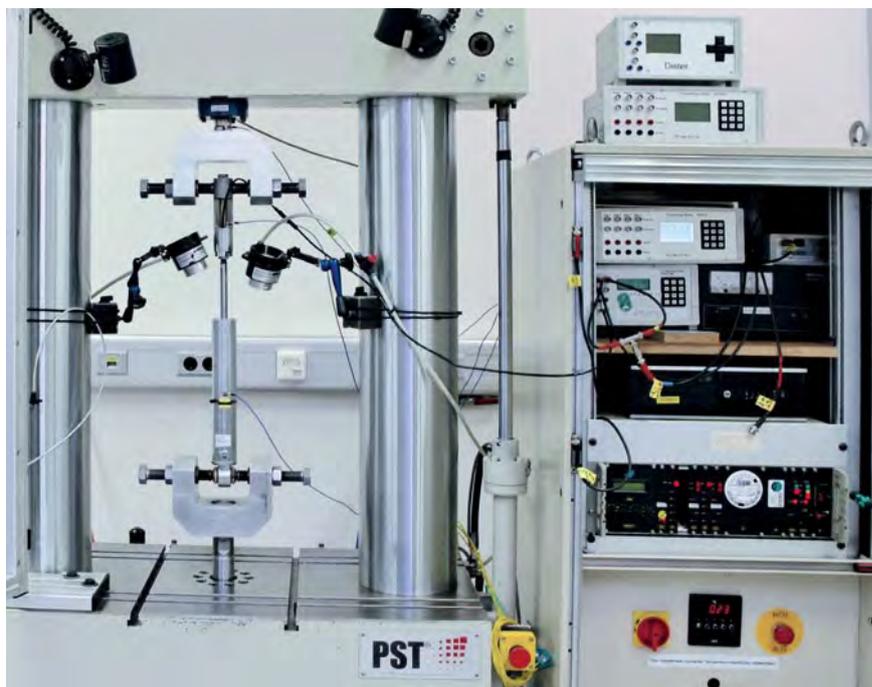
ZUG- UND DRUCKSTUFE WEITGEHEND UNABHÄNGIG

Die Hauptstufen sind als Druckkammern ausgeführt, die der vom Pilotventil geregelte Druck über Kanäle erreicht. Der Druck führt über die präzise dimensionierten, druckbeaufschlagten Flächen zu einer definierten Vorspannung der Hauptstufenkolben auf die Ventilsitze. Die Hauptventile bleiben so lange geschlossen, bis der Dämpfdruck auf den öffnenden Flächen die Vorspannungen übersteigt. Erst dann nehmen die Hauptventile für Zug- und Druckstufe die Druckregelfunktion auf.

Die stabile Funktion des Ventils beruht auf einer entsprechenden Abstimmung von Flächenverhältnissen, Zu- und Abströmwiderständen und weiteren wichtigen Ventileigenschaften. Besondere Anforderungen ergeben sich für die Weichkennlinie des Ventils. Um eine gute Isolation der Störkräfte von der Karosserie zu erreichen, sollten die Dämpfungkräfte möglichst gering sein. Um auf bestimmte Ereignisse wie etwa die Radunruhe auch ohne Eingriff des Reglers reagieren zu können, ist eine in ihrer Charakteristik abstimmbare Weichkennlinie erforderlich. Das Weichkennpotenzial stellen große Strömungsquerschnitte und ein ausreichender Abhubweg der Hauptstufe sicher. Die Charakteristik wird durch ein abstimmbares Paket von Scheibenfedern eingestellt und lehnt sich damit an die bewährte Abstimmung konventioneller Dämpfer an.

Hydraulisch bietet die kolbenintegrierte Bauform des Stellventils den Vorteil, dass die Zug- und Druckstufe weitgehend unabhängig zu gestalten sind. Dies ist insbesondere bei der Weichkennlinie ein großer Vorteil im Vergleich zu Zweirohr-Dämpfern nach dem Uni-Flow- oder Umpumper-Prinzip mit einem adaptierten Ventil.

Das innovative, kolbenintegrierte Stellventil von InCar plus ist prädestiniert für



4 Funktions- und Lebensdauererprobung

die Anwendung im Einrohr-Dämpfer. Es bietet die Möglichkeit, das Verhältnis von maximaler Zug- zu maximaler Druckstufenkraft in weiten Bereichen der Fahrzeugabstimmung anzupassen. Diese Eigenschaften lassen aber auch unter hydraulisch restriktiven Randbedingungen bei Zweirohr-Dämpfern und McPherson-Federbeinen eine hohe Abstimmflexibilität zu.

Neben umfangreichen Erprobungen am Prüfstand, 4, wird das Ventil bereits in verschiedenen Konzeptfahrzeugen erfolgreich erprobt, 5. Um die Vorteile des großen Verstellpotenzials und die

hohe Stelldynamik des Systems zu nutzen, ist auch die Ansteuerung des Ventils angepasst. ThyssenKrupp entwickelt dazu seinen eigenen Fahrwerksregler umfassend weiter. Dieser wird bereits bei verschiedenen Fahrzeugen in Serie eingesetzt. Das Zusammenspiel und die Wechselbeziehungen von Stellventil und Dämpferregelung bieten dem Fahrer spürbar mehr Fahrkomfort und Agilität.

Der weit fortgeschrittene Entwicklungsstand dieses Dämpfersystems legt die Grundlage für eine rasche Serienentwicklung in Zusammenarbeit mit den Automobilherstellern.



5 Erprobung im Konzeptfahrzeug



LENKEN LEICHT GEMACHT

Wirtschaftliche Gewichtsreduzierungen von bis zu 60 % bei Lenkungs-komponenten! Das ist besonders bemerkenswert, da viele einfach zu erschließende Leichtbaupotenziale schon ausgeschöpft sind. Hinzu kommt, dass elektrifizierte Lenksysteme der nächsten Generation deutlich erweiterte Einsatzmöglichkeiten bieten. Das sind aber noch längst nicht alle Vorteile der ThyssenKrupp Innovationen aus dem Bereich der Lenksysteme. Komponenten in Multimaterialbauweise, neue Technologien für vernetzbare Lenksysteme sowie eine Plattform zur Entwicklung kundenspezifischer Steer-by-Wire-Lösungen runden das vielseitige Portfolio ab. So will ThyssenKrupp den strengeren Emissionsanforderungen sowie den wachsenden Sicherheits- sowie Komfortansprüchen der Fahrzeughersteller und Autofahrer bei gleichzeitigem Kostendruck Rechnung tragen.

WIRTSCHAFTLICHE LEICHTBAU-LENKSÄULEN MIT CFK-BAUTEILEN

Ziel des InCar plus-Projekts CFK-Leichtbau-Lenksäule ist die Validierung unterschiedlicher Fertigungsprozesse für Leichtbaustrukturen aus CFK für die Klein-, Mittel- und Großserie mit Fokus auf Gewichtsreduzierung und Wirtschaftlichkeit. Mit der Wickel-Pultrusion für den Führungskasten und dem RTM-Verfahren (RTM = Resin Transfer Molding) mit gestickten Preforms für Konsolen liegen automotive-taugliche Serienfertigungsprozesse vor. Bei Lenksäulenkomponenten wird damit eine maximale Gewichtsreduktion von bis zu 60 % und bei einer kompletten Lenksäule von bis zu 25 % bei vergleichbarer Performance erreicht. Die Komponenten sind modular einsetzbar.

Im InCar plus-Projekt CFK-Leichtbau-Lenksäule (CFK = kohlefaserverstärkter Kunststoff) bündeln Konstrukteure, Simulationsexperten, Fertigungs- und Automatisierungsspezialisten sowie Materialexperten mit langjährigen CFK-Erfahrungen aus verschiedenen Bereichen von ThyssenKrupp ihre Kompetenzen. Ziele sind die Entwicklung von CFK-Lenksäulenkomponenten mit maximaler Gewichtsreduktion sowie die Entwicklung von wirtschaftlichen Fertigungsprozessen für die Großserie. Ausgangspunkt der Entwicklung ist eine ausgewählte Serienlenksäule aus Stahlblech. Aus dieser werden zwei typische Bauteile ausgewählt, die in ähnlicher Form bei allen Lenksäulen zu finden sind: die geometrisch komplexe Konsole und der profilähnliche Führungskasten, ❶. Diese Bauteile stehen stellvertretend für die Belastungen und geometrische Komplexität vieler Automotive-Komponenten.

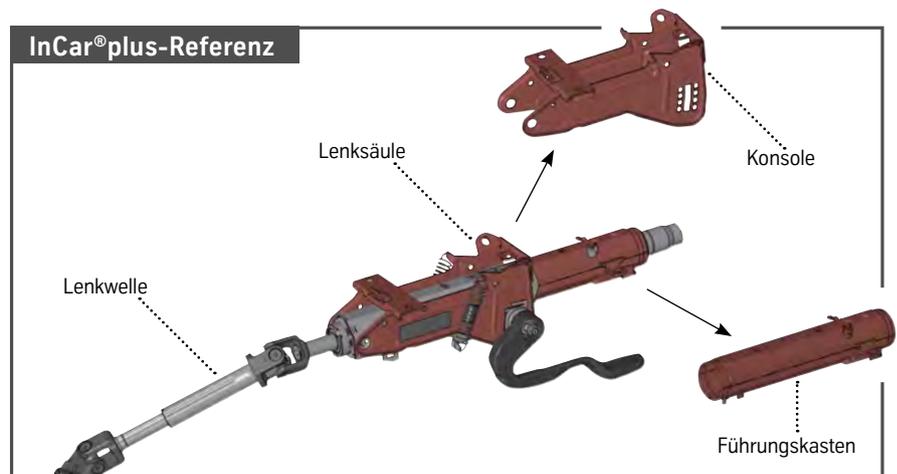
Bisher weisen Lenksäulen überwiegend Strukturkomponenten aus Metall auf, je nach Konstruktion, Anforderungen und Zielkosten aus Stahl oder aus Aluminium und Magnesium. Fahrzeugkomponenten aus CFK sind bisher vor allem in Kleinstserien, wie zum Beispiel im Motorsport und in Super-Sportwagen

mit Straßenzulassung im Einsatz. Einer der Gründe ist der immer noch vorhandene Mangel an wirtschaftlichen Fertigungskonzepten für CFK-Bauteile.

FÜHRUNGSKASTEN

Der Führungskasten der Referenz-Lenksäule besteht aus längsgeschweißten Stahlblechen und nimmt das Lenkstangenrohr mit dem Lenkrad auf, ❶. Über

das Lenkstangenrohr werden sowohl Lenkmomente übertragen als auch die Kräfte, die ein Fahrer über das Lenkrad, etwa beim „Mantelrichten“, in die Lenksäule einbringt. Diese Kräfte und Lenkmomente können mehrere hundert Newton beziehungsweise Newtonmeter betragen. Im Crashfall entstehen durch das Zünden des Airbags und den Aufprall des Fahrers sogar Kräfte im Kilonewton-Bereich.



❶ Lenksäule mit Konsole und Führungskasten sowie Lenkwelle

Die Spannungsanalyse im Bauteil ist der Ausgangspunkt für die Entwicklung einer optimalen Konstruktion samt wirtschaftlicher Fertigungstechnik, ②. Zunächst wird mithilfe der Spannungsanalyse der Spannungszustand im Bauteil bestimmt und daraus der Lagenaufbau abgeleitet. Für den Führungskasten ergibt sich ein mittelkomplexer Spannungszustand, da durch die Einleitung von Radialkräften und Biegemomenten an der Schnittstelle zum Lenkrad sich Zug-, Druck- und Schubspannungen im Bauteil überlagern. Des Weiteren existieren Lagervorspannungen, die bei der Gestaltung des CFK-Lagenaufbaus mitberücksichtigt werden müssen.

Die Fertigung von CFK-Bauteilen für Automobile erfolgt zurzeit überwiegend durch Preforms aus Geweben und Gelegen, die auf die Bauteilkontur zugeschnitten werden müssen. Die Preforms werden im nächsten Prozessschritt in ein Werkzeug eingelegt und im RTM-Verfahren mit Harz getränkt. Das RTM-Verfahren wurde in Kombination mit geflochtenen Preforms für den Führungskasten angewandt. Das schwierige Handling der biegeschlaffen Preforms und die notwendige Fertigung von Kernen zur Herstellung des Hohlprofils verhindern aber eine wirtschaftliche Fertigung von profilähnlichen Bauteilen.

Als Alternative zur Produktion des Führungskastens im RTM-Verfahrens erweist sich die Pultrusionstechnologie. Aufgrund des hohen Automatisierungsgrads, der geringen Verschnittmengen und der Vermeidung von Halbzeugen durch Verwendung von kostengünstigeren Kohlenstofffaser-Roving-Spulen eignet sich diese Technologie besonders gut. Die Pultrusion, bei isotropen Werkstoffen auch als Strangziehen bezeichnet, ist ein automatisierter Prozess zur kontinuierlichen Herstellung von GFK-/CFK-Endlosprofilen mit konstantem Querschnitt. Die Faserbündel werden von Spulen abgezogen und nachfolgend durch ein Harzbad beziehungsweise in einer Injektionsbox direkt vor dem Pultrusionswerkzeug mit Harz injiziert. Im Pultrusionswerkzeug, das die Negativform des gewünschten Profils aufweist, wird das Harz ausgehärtet. Das fertige Profil wird kontinuierlich aus dem Werkzeug gezogen und entsprechend der Einbaulänge abgetrennt. Diese Technologie ist sowohl für kleine als auch für große Stückzahlen interessant,

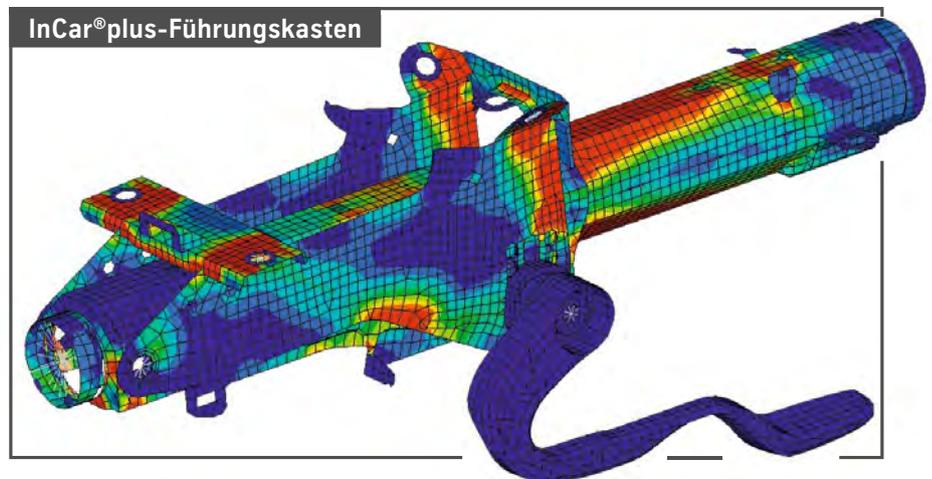
da die Werkzeugkosten vergleichsweise niedrig sind.

Die axialorientierten Fasern stellt der Pultrusionsprozess in gestreckter Ausrichtung bereit. Ein Wickelprozess bringt die umfangsorientierten Fasern auf. Kombiniert man den Pultrusionsprozess mit dem Wickelprozess, spricht man von Wickelpultrusion (Pullwinding). Durch dieses Verfahren können alle am Führungskasten wirkenden Kräfte berücksichtigt werden.

FEM-Analysen ergeben, dass ein CFK-Wickelpultrusionsprofil mit moderaten geometrischen Änderungen ein

2-mm-Stahlprofil ersetzen kann. Die Gewichtsreduktion von 600 g (Referenzbauteil) auf 260 g (CFK-Führungskasten) beträgt 56 %, bei akzeptablen Leichtbaukosten. Die mechanischen Eigenschaften der pultrudierten Bauteile sind sehr gut, da der kontinuierliche und automatisierte Ziehprozess die genaue Faserausrichtung der 0°-Lagen sicherstellt. Die Geometrie der pultrudierten Bauteile ist so genau, dass eine mechanische Nachbearbeitung meist nicht mehr erforderlich ist.

Die Steifigkeiten des Wickelpultrusionsprofils sind vergleichbar mit denen



② FEM-Analyse des Führungskastens zur Definition des Lagenaufbaus



③ Versuchstechnischer Nachweis der geforderten Biegesteifigkeiten

des Stahlprofils, ③. Überlast- und Crashtests bestätigen ausreichend hohe Festigkeiten.

CFK-KONSOLE

Konsolen verbinden die Komponenten der Lenksäule mit dem Fahrzeug und übertragen die vom Lenkrad über den Führungskasten in die Konsole einwirkenden Kräfte auf das Fahrzeug. Die Höhenverstellung der Lenksäule wird mithilfe eines Schlitzes und Drehpunkts in der Konsole realisiert. Die Fixierung der Höhen- und Längsverstellung in der Lenksäule erfolgt mit einem Klemmsystem. Klemmkraft, die vom Hebel über die Klemmschraube in die Konsole eingeleitet werden, überlagern die Kräfte und zugehörigen Spannungen im Bauteil. Diese Faktoren bewirken in Summe einen komplexen Spannungszustand, ④.

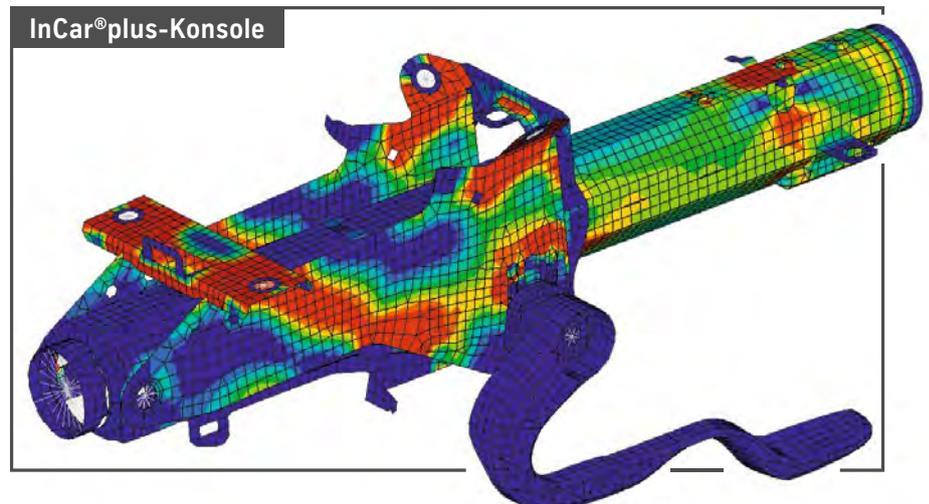
Die Hauptlastpfade in der Konsole sind deutlich zu erkennen, wobei im Bereich des Hebels wegen der Klemmkraft und der Anschraubkräfte ein komplexer Spannungsfall herrscht. Die Lagenaufbauten im Bauteil werden auf Basis der Spannungsfälle definiert.

Für die Fertigung komplexer Geometrien haben sich Preforms aus Gelegen und Geweben in Kombination mit dem RTM-Verfahren als Stand der Technik durchgesetzt. Es ergeben sich folgende Prozessschritte:

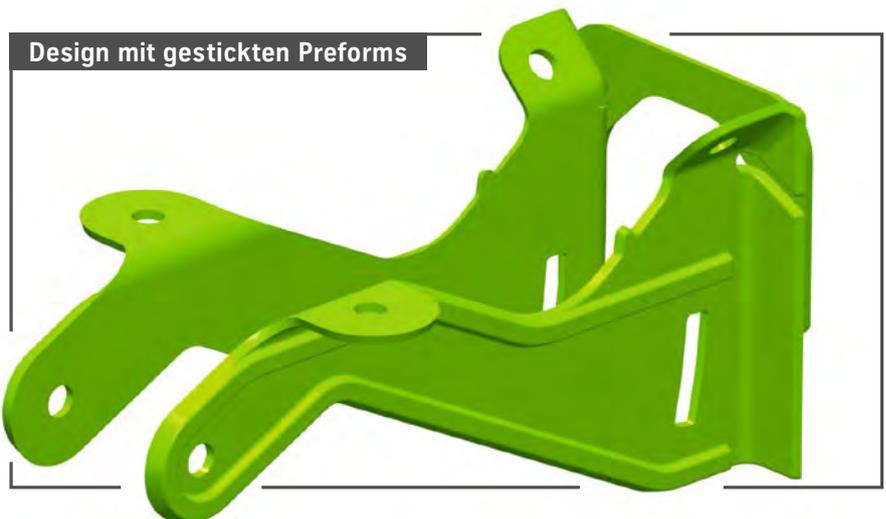
- : Zuschnitt von Gelegen/Geweben
- : Preformerstellung durch Drapieren
- : Preformbeschnitt
- : RTM-Prozess
- : mechanische Bearbeitung.

Sollen die Konsolen in einem Stück gefertigt werden, ist ein komplexes mehrteiliges Werkzeug notwendig. Das erhöht die Investitionskosten, insbesondere bei mehreren Werkzeugen zwecks höherer Ausbringleistung. Durch den doppelten Beschnitt der Bauteile mit Lasern und den Endbeschnitt der ausgehärteten Bauteile per Fünffachs-Fräszentrum liegt die Materialausnutzung der Kohlenstofffaser im günstigen Fall bei 42,5 %. Diese Baustufe 1 weist somit hohe Investitionskosten für das Fertigungszubehör, einen hohen Materialeinsatz und lange Taktzeit auf. Dem steht eine Gewichtsreduktion von 53 % im Vergleich zu einer Konsole in herkömmlicher Metallbauweise gegenüber.

Im Rahmen von InCar plus werden deshalb diese Prozessschritte weiterentwi-



④ FEM-Analyse der Konsole zur Definition des Lagenaufbaus



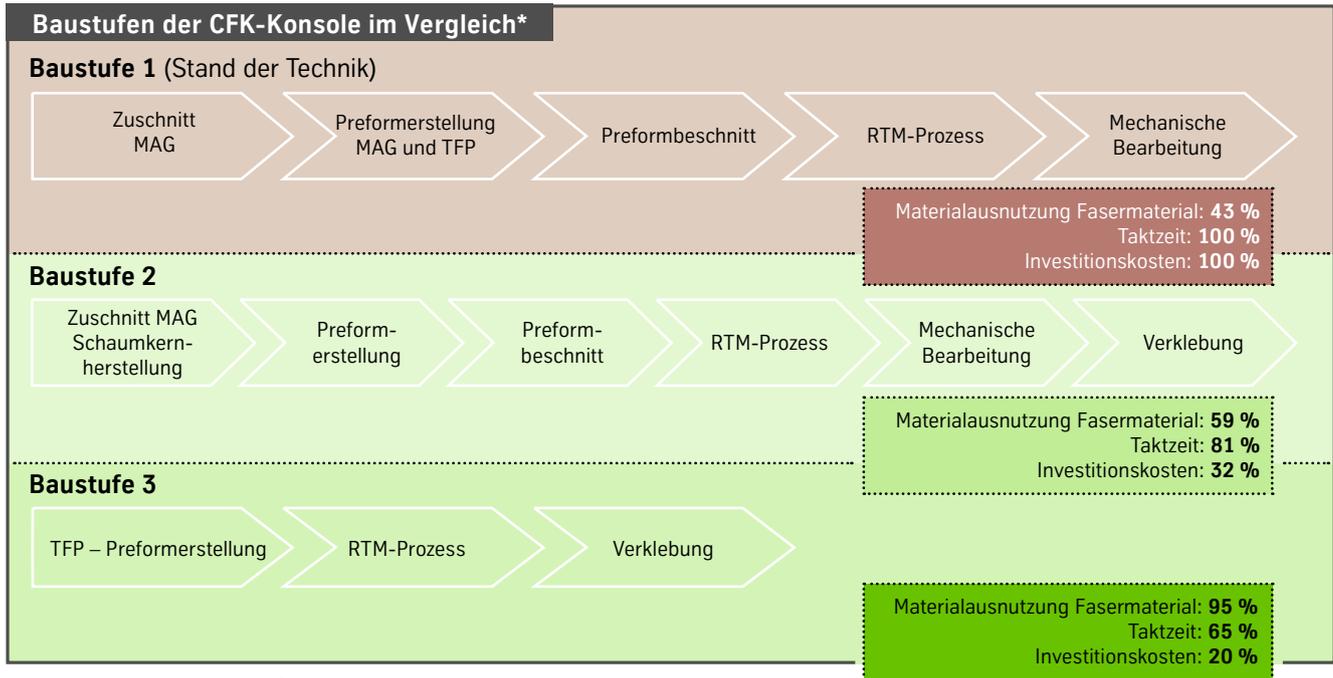
⑤ Lastpfadgerechter und verschnitterter Lagenaufbau durch gestickte Preforms

ckelt. Die Konsole der Referenz-Lenksäule besteht aus mehreren Biege-Stanzblechen, die miteinander verschweißt sind. Dieses Konzept wird auch für die CFK-Konsole angewandt, um ebene Bauteile und dadurch günstige Werkzeuge zu erhalten. Die Konsole ist in mehrere separate Unterbaugruppen gegliedert. Dank dieser Konstruktion ist eine reduzierte Konturbearbeitung möglich und der Materialverlust der Kohlefaserteile gering. Zudem sind von diesen konstruktiv einfacheren CFK-Unterbaugruppen gleichzeitig mehrere in einem Mehrkavitäten-Werkzeug herstellbar, was die Taktzeiten des RTM-Prozesses reduziert. Um die Seitenteile lokal zu verstärken, wird in ihre Mitte ein PU-Schaumkern integriert und so die Struk-

turstufigkeit erhöht. Diese Baustufe 2 erzielt eine Gewichtseinsparung von 60 % (von 622 auf 250 g).

Der Fertigungsprozess für diese Multi-axialgelege-(MAG-)Variante umfasst folgende sechs Arbeitsschritte:

- : Den Zuschnitt der einzelnen Textillagen übernimmt ein Hochleistungs-cutter, der die Faserhalbzeuge unter Berücksichtigung der berechneten Faserorientierung und eines Offsets des Bauteils ausschneidet. Der Schaumkern wird mit einer Dosieranlage in einem Mehrkavitäten-Schaumwerkzeug hergestellt. Dabei wird das vorbereitete Werkzeug geschlossen und das vorgemischte und exakt dosierte Material ins



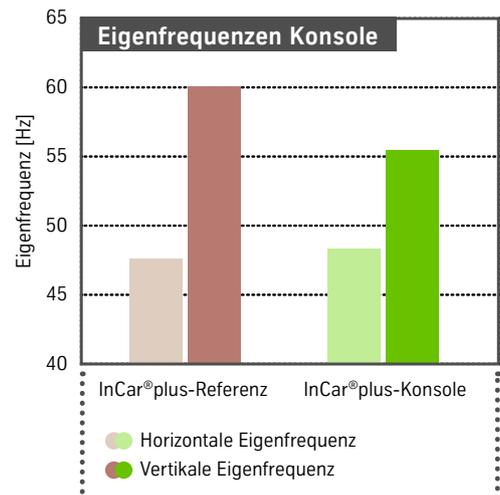
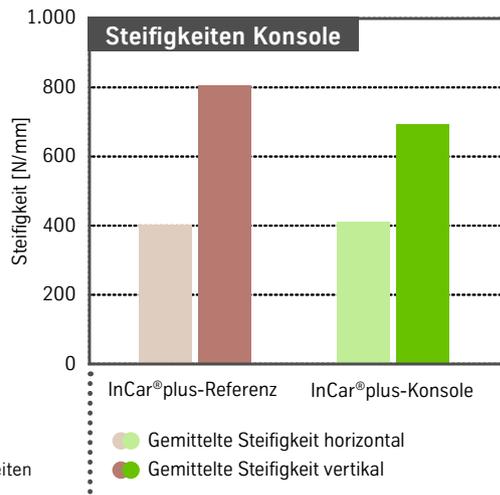
*Jahresproduktion: 50.000 Stück

6 Verbesserte Prozesskette im Vergleich zum Stand der Technik

- Werkzeug injiziert. Nach kurzer Aushärtezeit kann der Schaumkern entnommen werden.
- Die Herstellung der Preforms erfolgt im sogenannten Preformcenter. Hier werden die vorkonfektionierten Lagenpakete (Einzellagen mit Binderpulver) und der Schaumkern auf ein Preformwerkzeug gelegt, wo sie in Form gebracht und erhitzt werden. Dabei schmilzt das Binderpulver auf und hält den Preform zusammen.
- Im Anschluss beschneidet ein Laser den Preform auf Endkontur.

- Im RTM-Prozess wird das Mehrkavitäten-Werkzeug mit den Preforms bestückt und anschließend mit dem Harzsystem infiltriert. Nach einer Aushärtezeit von etwa 10 min können die Bauteile entformt werden.
 - Die mechanische Bearbeitung beschränkt sich bei dieser Baustufe auf das Einbringen von Bohrungen.
 - Der letzte Arbeitsgang ist das Verkleben der Unterbaugruppen.
- Nach den guten Ergebnissen der Baustufe 2 war es das Ziel, in einer weiteren Baustufe die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Durch detaillierte FE-Analysen der Konsole sowie Simulationen von verschiedenen Lagenaufbauten können ausschließlich gestickte Preforms (TFP = Tailored Fiber Placement) verwendet werden, 5. Diese TFP-Preforms werden direkt aus Kohlenstofffaser-Rovings kraftflussgerecht abgelegt. Der Vorteil im Vergleich zu Preforms aus textilen Halbzeugen ist das kostengünstigere Ausgangsmaterial, die hohe Materialausnutzung von etwa 95 %, die Herstellung von Endkonturpreforms inklusive Durchbrüchen und die Reduzierung der Arbeitsschritte, 6. Außerdem



7 Horizontale und vertikale Steifigkeiten sowie Eigenfrequenzen der Konsole

können Mehrkopf-Stickmaschinen mehrere Preforms gleichzeitig herstellen und so die Taktzeiten wesentlich reduzieren.

Die so hergestellten Preforms können direkt, ohne Beschnitt, in das RTM-Werkzeug eingelegt und mit einem Harzsystem infiltriert werden. Nach der Aushärtung werden die Bauteile entnommen, in einer Vorrichtung fixiert und mit Zweikomponenten-Klebstoff miteinander verbunden. Die Variante TFP bietet eine Gewichtseinsparung von 60 % bei wesentlich niedrigeren Kosten als die Variante 2.

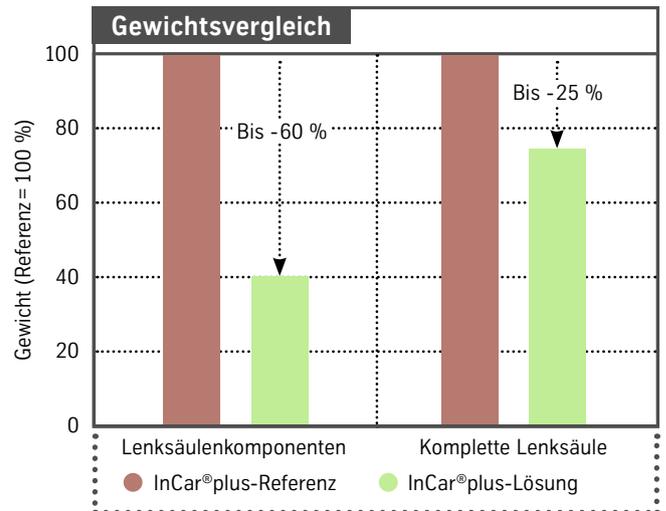
Die Messergebnisse der Konsolen zeigen eine leichte Verbesserung der horizontalen Steifigkeit und Eigenfrequenz im Vergleich zum Referenzbauteil, **7**. Dessen vertikale Steifigkeit und Eigenfrequenz sind bereits überdimensioniert, sodass die CFK-Konsolen in dieser Hinsicht das Lastenheft erfüllen.

Durch die intensive Verfahrens- und Materialentwicklung der unterschiedlichen Prozesse ist es auch gelungen, eine Kompetenzbasis für die optimale Auslegung für vielfältige Anwendungsfälle zu schaffen. Gekoppelt mit dem optimalen Fertigungsprozess ist somit immer die wirtschaftlichste Lösung verfügbar.

LENKSÄULE

Den Führungskasten und die Konsole aus CFK verwendet ThyssenKrupp in Leichtbau-Lenksäulen im Multimaterial-Design und senkt damit deren Gewicht um 25 %, **8**. Die CFK-Komponenten können je nach Anforderungen und akzeptierten Kosten modular eingesetzt werden. Zur Absicherung der Bauteilentwicklung und der Fertigungskonzepte wurden diese CFK-

8 Deutliche Gewichtsreduktion durch InCar plus-CFK-Lenksäule



Lenksäulen erfolgreich Lebensdauer- und Crashtests am Fallturm, **9**, Fahrzeugtests sowie Akustiktests im Labor und im Fahrzeug unterzogen. Der fehlende Abfall von Steifigkeiten und Eigenfrequenzen belegt, dass die Eigenschaften der Lenksäule auch nach harten Prüfungen konstant bleiben. ThyssenKrupp bestätigt damit die Eignung von CFK auch für komplexe, sicherheitskritische Leichtbaustrukturen im Bereich Lenksäule.

Die beschriebenen Fertigungstechnologien und daraus resultierenden Bauteile wurden in verschiedenen Lenksäulen-Projekten erprobt und in Fahrzeugversuchen erfolgreich getestet. Daneben haben die Ingenieure auf Schnittstellen zu anderen Materialien wie Metallen großen Wert gelegt, da hier Phänomene wie Wärmeausdehnung und Kontaktkorrosion zu beachten sind.

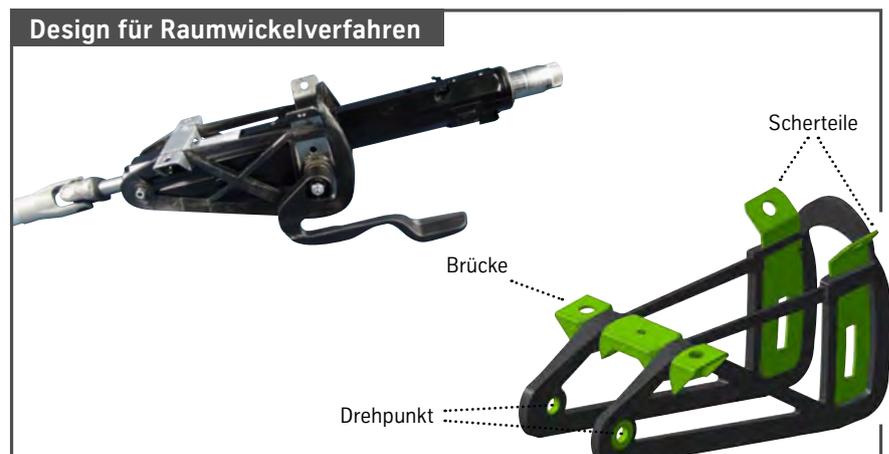
AUSBLICK

Für Konsolen wird das TFP-Verfahren zur Ausbildung eines räumlichen Bauteils derzeit weiterentwickelt. Anstatt die Fasern eben auf einem Stickgrund abzulegen, werden sie räumlich durch Roboter kraftflussgerecht auf Einleger gewickelt. Die Einleger wiederum befinden sich auf einem Werkzeug, das geschlossen werden kann, um Harz zwischen die Fasern zu injizieren. Die einbaufertige Konsole wird nach dem Aushärten des Harzes aus dem Werkzeug entnommen und muss nicht nachbearbeitet werden, **10**. Rovings direkt von Spulen haben sehr wenig Verschnitt und eine hohe Wirtschaftlichkeit.

Die vorgestellten Fertigungstechnologien eignen sich nicht nur für andere Bauteile in Lenksystemen, sondern auch für andere Fahrzeuganwendungen.



9 InCar plus-Lösung im Fallturm-Crashtest



10 Lastpfadgerechte Faserablage in drei Dimensionen

HYBRID-LENKWELLE: 35 % WENIGER GEWICHT

35 % weniger Gewicht bei weniger als 5 €/kg Leichtbaukosten: Die neue Hybrid-Lenkswelle, eine Rohr-in-Rohr-Leichtbaulösung mit kraftflussgerecht entwickelten Aluminiumgabeln, ist ein deutlicher Fortschritt zur Referenz-Lenkswelle. Ihre modulare Bauweise bietet zudem maximale Flexibilität. Abhängig von spezifischen Kundenanforderungen können die Aluminiumgabeln des Kreuzgelenks teilweise oder auch komplett durch Stahlgabeln ersetzt werden. Das verwendete Hochleistungspolymer befähigt die Schiebeverbindung, kurzzeitig Temperaturen von bis zu 200 °C standzuhalten.

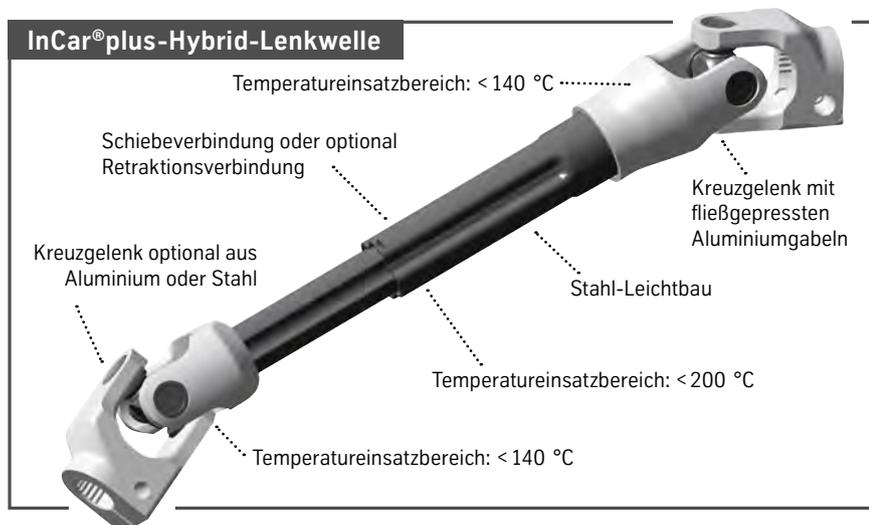
Für die Optimierung bekannter Lenkwellen-Konzepte haben die Entwickler von ThyssenKrupp ein anspruchsvolles Ziel definiert: Das Ergebnis soll eine signifikant leichtere Lenkswelle mit mindestens gleicher Performance zu minimalen Leichtbaukosten sein. Eine als Referenz herangezogene Serienlenkswelle aus eigener Produktion weist ein

Welle-in-Rohr-Schiebesystem und kaltfließgepresste Stahlgabeln auf. Fließpressen ermöglicht die Fertigung komplexer Geometrien zu günstigen Kosten. Die Stahlbauweise verkraftet hohe Betriebstemperaturen. Mit einem Gewicht von bis zu 2,0 kg ist bei der Lenkswelle aber noch ein signifikantes Potenzial für Gewichtsreduktion vor-

handen. Hier setzt die neue Hybrid-Lenkswelle an, ❶.

WERKSTOFF-SUBSTITUTION MACHT VIELES LEICHTER

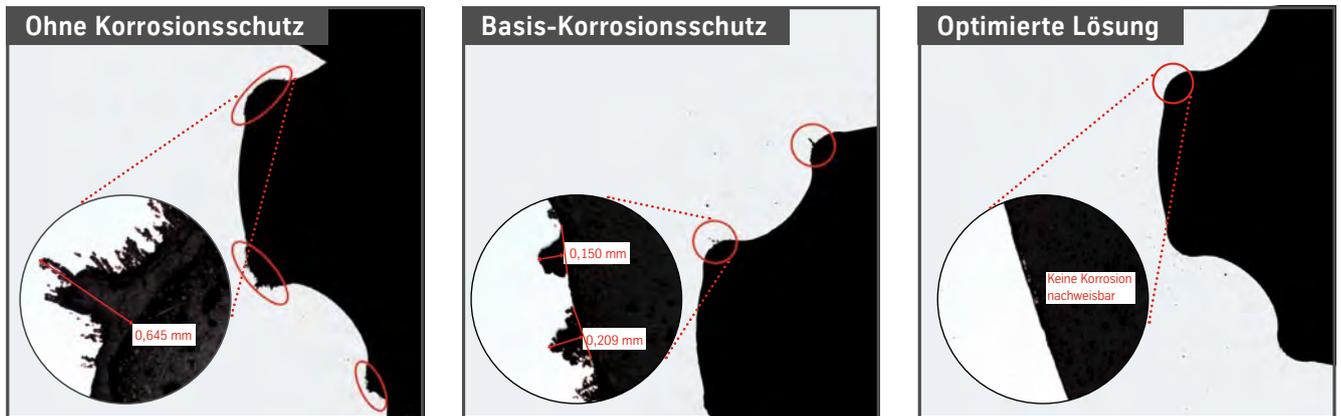
Die Schiebeverbindung und die Gabeln einer herkömmlichen Lenkswelle aus Stahl sind für knapp 90 % ihres Gewichts ver-



❶ Hybrid-Lenkswelle in Leichtbauweise



❷ Leichtbau-Kreuzgelenk aus Aluminium



3 Schliffbilder der Korrosionstests

Werkstoff	Stahl	Stahl-Aluminium-Hybridlösung	Aluminium
Gewicht	1,50 kg	0,98 kg	0,78 kg
Kosten	Referenz	10–15 % höher als Referenz	10–20 % höher als Referenz
Temperaturbereich	Gesamte Lenkwelle: ≥ 200 °C	Rohrbereich: kurzzeitig bis 200 °C Kreuzgelenk: kurzzeitig bis 140 °C dauerhaft bis 130 °C	Gesamte Lenkwelle: kurzzeitig bis 140 °C dauerhaft bis 130 °C

4 Vergleich der verschiedenen Lenkwellenkonzepte und ihrer Eigenschaften

antwortlich. Folglich stehen diese Komponenten im Fokus der Leichtbauaktivitäten. Dabei verfolgen die Ingenieure zwei Ansätze: Materialleichtbau im Kreuzgelenk, 2, und Strukturleichtbau in der Schiebeverbindung.

Die Stahlgabeln des Kreuzgelenks sind bisher vor allem auf die Fertigung im Kaltfließprozess hin optimiert. Durch den relativ hohen E-Modul von Stahl ist eine steifigkeitsoptimierte Auslegung bisher nicht in gleichem Maß erforderlich. Die Substitution der Stahlgabeln durch Aluminiumgabeln erfordert hingegen eine Steifigkeitsoptimierung der Gabelgeometrie. Allerdings verspricht der Werkstoffwechsel in Kombination mit einer kraftflussoptimierten Gabelausslegung ein sehr hohes Leichtbaupotenzial. Mit dem Werkstoff Aluminium ist dann beispielsweise ein Kreuzgelenk realisierbar, das deutlich leichter ist als bisher und das dieselben statischen und dynamischen Festigkeitsanforderungen erfüllt wie das Referenzbauteil. Ähnliches gilt für den Bauraumbedarf und den Rotationsbeugewinkel.

Die Schiebeverbindung, bisher eine Stahlvollwelle mit Rohr, wird durch eine Rohr-in-Rohr-Lösung ersetzt. Durch den

Einsatz eines Rohrmaterials mit höheren Festigkeitskennwerten lässt sich gleichzeitig die Wandstärke auf ein Minimum reduzieren. Als Resultat sinkt das Gewicht bei gleichzeitiger Erhöhung der Torsionssteifigkeit. In Summe senken diese Maßnahmen das Gesamtgewicht der Referenz-Lenkwelle von 1,5 kg auf nur noch 0,98 kg. Dies entspricht einer Gewichtseinsparung von gut 0,5 kg beziehungsweise etwa 35 %.

FERTIGUNG UND KORROSION

Die Montageprozesse der Hybrid-Lenkwelle basieren auf den jahrelangen Erfahrungen von ThyssenKrupp mit der Herstellung von Lenkwellen aus Stahl. Somit kann auf bestehende und bewährte Prozesse zurückgegriffen und eine wirtschaftliche Produktion der Lenkwelle sichergestellt werden. Als Fertigungsverfahren für die Aluminiumgabeln setzt man auf das Kaltfließpressen, einen Prozess, der besonders bei hohen Stückzahlen eine kostengünstige Herstellung gewährleistet. Außerdem ermöglicht er ohne zusätzliche spanende Nachbearbeitung der Ausgangsgeometrie hohe Rotationsbeugewinkel und sehr

geringe Bauteilmaße. Aluminiumgabel und Stahlrohr werden mit einer Füge-technik verbunden, die der von Stahl-Lenkwellen ähnlich ist. Um eine Fehlfunktion auszuschließen, sichert eine zusätzliche mechanische Versteifung die Fügeverbindung redundant ab.

Die Hybridbauweise bringt in der Lenkwelle zwei Werkstoffe mit unterschiedlichem elektrochemischem Potenzial zusammen. Erschwerend befindet sich die Lenkwelle zum Teil oder komplett im Motorraum und ist dadurch einem starken Schmutz- und Salzwasser-eintrag sowie Temperaturbelastung ausgesetzt. Somit besteht grundsätzlich die Gefahr von Kontaktkorrosion. Die vorgestellte Lösung sieht ein spezielles Schutzkonzept vor, das Korrosion komplett verhindern kann. In 3 sind Schliffbilder von verschiedenen Proben nach einem Langzeit-Korrosionstest dargestellt. Die linke Probe zeigt ein Bauteil ohne jeglichen Schutz und eine entsprechend starke Korrosion. Die mittlere Probe hat einen Basisschutz, der die Korrosion zwar reduziert, aber nicht grundsätzlich verhindert. In der rechten Probe ist die optimierte Lösung zu sehen. Hier ist kein Korrosionsangriff nachweisbar.



KOSTENGÜNSTIGE GEWICHTSREDUZIERUNG DURCH MATERIALMIX

Unter dem Strich stehen Leichtbaukosten von weniger als 5 €/kg. Somit bietet die Hybrid-Lenkwellen Leichtbau für hohe Temperaturanforderungen zu geringen Kosten. Ein Vergleich mit anderen Lenkwellenkonzepten bestätigt die günstigen Eigenschaften, 4. So ist eine herkömmliche Lenkwelle aus Stahl zwar etwas kostengünstiger, aber auch deutlich schwerer als die Hybridlösung. Eine Lenkwelle aus Vollaluminium kann zwar noch etwas leichter sein, ihre Kosten liegen aber zum Teil über denen einer Hybrid-Lenkwellen. Ein gravierender Nachteil der Vollaluminium-Lenkwellen ist ihre begrenzte thermische Belastbarkeit.

HOHE TEMPERATUREN ZU VERKRAFTEN

Je nach Fahrzeugkonzept kann die Lenkwelle sehr nah an den Auslasskrümmer rücken, sodass Oberflächentemperaturen von 200 °C nicht ungewöhnlich sind. Bei diesen Temperaturen kann die Hybrid-Lenkwellen eingesetzt werden. Die Vollaluminium-Variante ist für diese Einsatzbedingungen nicht geeignet. Genau in diesem stark belasteten Bereich befindet sich die Schiebeverbindung der Lenkwelle, 5 (Mitte). Trotz der hohen Temperaturen und den damit veränderten Materialeigenschaften muss die Schiebeverbindung

aber voll funktionsfähig bleiben. Dank einer hochtemperaturfähigen Verschiebehülse und einem Spezialfett ist dies bei der Hybrid-Lenkwellen auch bei Spitzentemperaturen bis 200 °C gewährleistet.

Soll der Schiebeverbund bei einer definierten Crashkraft kollabieren, muss die geforderte Kennlinie auch bei diesen hohen Temperaturen dargestellt werden können. Die InCar plus-Lösung sieht dafür eine Stahl-auf-Stahl-Retraktionsverbindung vor. Hier befindet sich kein Kunststoffelement zwischen den Rohren, das die Temperatur limitiert. Dadurch verkräftet der Schiebeverbund kurzzeitig sogar Temperaturen von mehr als 200 °C.

Die Gelenkgabeln der Kreuzgelenke sind aus Aluminium gefertigt. Sie bieten bis zu einer festgelegten Einsatztemperatur von 130 °C die geforderte Performance. Kurzzeitig werden auch Temperaturen von bis zu 140 °C toleriert.

MODULARES KONZEPT MIT ENTWICKLUNGSPOTENZIAL

Die Hybrid-Lenkwellen ist ein modulares und flexibles System und kann den Gegebenheiten in verschiedenen Fahrzeugen angepasst werden. Sollten es die Einsatztemperaturen erfordern, werden die Aluminiumgabeln der Kreuzgelenke komplett oder teilweise durch Stahlgabeln ersetzt, 5 (links und rechts). Die Schnittstelle zum Lenkgetriebe und zur Lenksäule wird für jeden Fahrzeughersteller individuell angepasst.

Bei Einsatz eines Komplettsystems von ThyssenKrupp, bestehend aus Lenksäule und Lenkwelle, lässt sich durch eine effiziente Anbindung der Montageaufwand beim Fahrzeughersteller reduzieren. Je nach Fahrwerk-, Montage- und Crashkonzept ist eine Schiebeverbindung oder eine Retraktionsverbindung die Lösung.

Für Einsatztemperaturen bis 80 °C reicht eine Standard-Schiebeverbindung aus, bis 200 °C muss es die oben angesprochene Hochtemperatur-Schiebeverbindung sein. Dieses nur zweistufige Konzept reduziert die Variantenvielfalt innerhalb einer Plattform entscheidend. Länge und Phasenwinkeladjustierungen der Lenksäule sind ebenfalls variabel.

Die Hybrid-Lenkwellen ist für alle Fahrzeuge mit dynamischen Drehmomenten bis 50 Nm geeignet. Dementsprechend besteht für die statischen und dynamischen Tests der Hybrid-Lenkwellen ein Lastenheft, das die momentan härtesten Tests der Fahrzeughersteller für Anwendungen im Nicht-Column-EPS-Bereich umfasst. Alle diese Anforderungen erfüllt die Hybrid-Lenkwellen.

Um ihren Mehrwert noch weiter zu steigern, plant ThyssenKrupp Module mit weiteren Funktionsintegrationen. Beispielsweise könnte ein Dämpfersystem Schwingungen und Vibrationen im Lenkstrang zusätzlich filtern. Für den Einsatz bei geringeren Temperaturanforderungen könnten weitere Bauteile aus Aluminium gefertigt werden, um so zusätzliches Leichtbaupotenzial zu erschließen.

LEICHTE, GEBAUTE BLECHZAHNSTANGEN

Die im InCar plus-Projekt entwickelten gebauten Blechzahnstangen sind im Vergleich zu gefrästen Zahnstangen wegen ihres hohlen Querschnitts 0,5 kg beziehungsweise 25 % leichter und ermöglichen sowohl konstante als auch variable Verzahnungen. Damit steht für Lenkgetriebe eine attraktive Leichtbaulösung zur Verfügung, die mit einer abgestimmten Übersetzung für eine optimale Lenkcharakteristik und gegebenenfalls einen kleineren Unterstützungsmotor der elektromechanischen Lenkung genutzt werden kann. Im Vergleich zu konventionell hergestellten variablen Zahnstangen liegen die Herstellkosten etwa auf gleichem Niveau.

Zahnstangen sind eine zentrale Komponente des Lenkgetriebes. Sie wandeln die Drehbewegung des Lenkrads in eine lineare Verschiebung um, die wiederum über die Spurstangen auf die Räder wirkt. Mit mehreren Kilogramm Gewicht tragen Zahnstangen erheblich zum Gesamtgewicht eines Lenkgetriebes bei, wodurch sie ins Visier der Leichtbaustrategien geraten. Hauptziele für die InCar plus-Lösung sind ihre generelle Herstellbarkeit, geringe Herstellkosten und Toleranzen, eine hohe Beanspruchbarkeit der Teile, ihre akustische Unauffälligkeit im Fahrzeug sowie ein Anlagenkonzept für die Serienproduktion.

Basis der Prototypen ist eine vierteilige Zahnstangen-Konstruktion, ❶ mit einem umgeformten Zahnsegment als Herzstück. An ihm wird auf der einen Seite ein Endstück mit dem Gewinde für die Spurstangenanbindung angeschweißt. Auf der anderen Seite wird ein geschliffenes Rohr zur gleitgelagerten Führung der Stange angefügt und anschließend noch ein Endstück mit Gewinde. Der Durchmesser der Gewinde ist frei wählbar. Eine denkbare Alternative ist das Einbringen des Gewindes direkt am Ende des Zahnsegments und des Rohrs. Dann muss der Gewindedurchmesser aber an den jeweiligen Bauteildurchmesser angepasst sein. Auch die Spurstangengewinde müssen gegebenenfalls angepasst werden.

Eine mögliche Prozesskette zur Herstellung dieser gebauten Blechzahnstange umfasst folgende Schritte, ❷.

Sie beginnt mit der Herstellung einer Blechplatte aus Coilmaterial und dem Biegen zum U-Profil. Hier entsteht durch Scherschneiden und Gesenkbiegen eine offene Profilform. Die Zuschnitte werden per FEM-Stoffflussimulationen über die gesamte Stadienfolge hinweg ermittelt.

Zweiter Prozessschritt ist das Prägen der Verzahnung. Es erfolgt abhängig von der Werkstückgröße mit Pressenkräften von 800 bis 1500 t. Da die Verzahnungsgesenke sehr hoch beansprucht werden, sind sie in einer Armierung gelagert. Die Verzahnungsgesenke werden durch HSC-Fräsen hergestellt, die Formtoleranzen liegen in der Größenordnung einiger Mikrometer.

Danach wird das Profil inklusive Verzahnung zum geschlossenen Körper umgeformt. Dieser Vorgang ist auf mehrere Schritte aufgeteilt. Die Umformung erfolgt wiederum als Biegen im Gesenk, wobei eine Deformation der Verzahnung

beim Schließen durch die Querschnittsform vermieden wird. Anschließend werden die Verzahnungssegmente, Endstücke und Rohre spanend fertig bearbeitet.

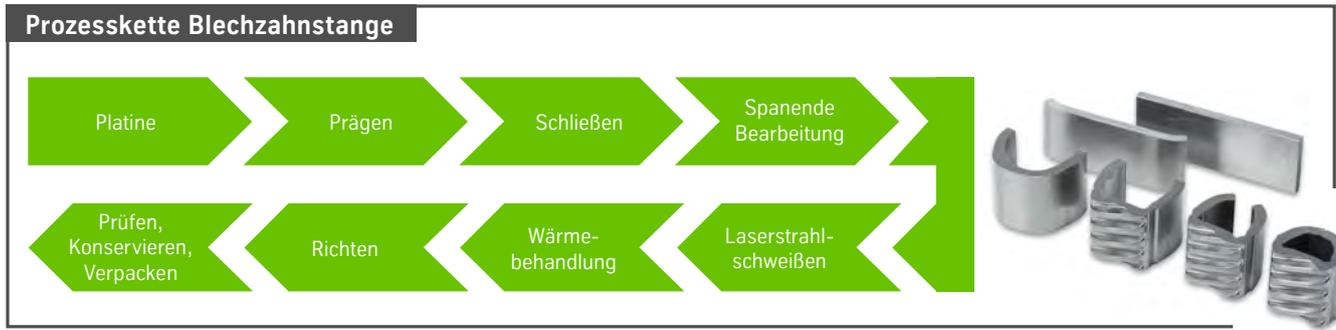
Fünfter Schritt ist das Laserstrahlschweißen. Für das exakte Ausrichten der Komponenten zueinander, insbesondere der Rohrachse zur Verzahnung, sorgt eine präzise Spannvorrichtung. Da der Werkstoff des Zahnsegments einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist, ist ein induktives Vor- und Nachwärmen der Wärmeeinflusszone erforderlich. Der eigentliche Schweißprozess dauert nur etwa 2 s pro Naht. Wichtig für eine gute Nahtqualität ist die Reinigung aller Komponenten vor dem Schweißen.

Sechstens wird die Verzahnung wärmebehandelt. Für eine höhere Verschleißfestigkeit und Bauteilfestigkeit wird das Zahnsegment induktiv auf Werte von 500 HV10 gehärtet und angelassen. Dies ist sowohl im Vorschubver-

InCar® plus-Lösung



❶ Gebaute, vierteilige Blechzahnstange



2 Prozesskette für die Herstellung der gebauten Blechzahnstange

fahren als auch mit einem Gesamtflächeninduktor möglich.

Zu guter Letzt werden die Zahnstangen nach dem Härten gerichtet, um den Schweiß- und Härteverzug zu kompensieren und die Verzahnung gegenüber der Rohrachse in horizontaler und vertikaler Richtung zu orientieren. Diese sieben Schritte werden in der Praxis noch um weitere Prozesse wie etwa eine Rissprüfung oder Konservieren ergänzt.

HOHE KRÄFTE, WENIG GERÄUSCHE

Die Konstruktion der prototypisch hergestellten Zahnstangen ist der Serienzahnstange eines Kleinwagens sehr ähnlich. Damit sind direkte Vergleiche zwischen beiden Konzepten möglich. Für das Lenkverhalten wesentliche Größen sind die Durchschiebekraft und das sogenannte Fahrspiel.

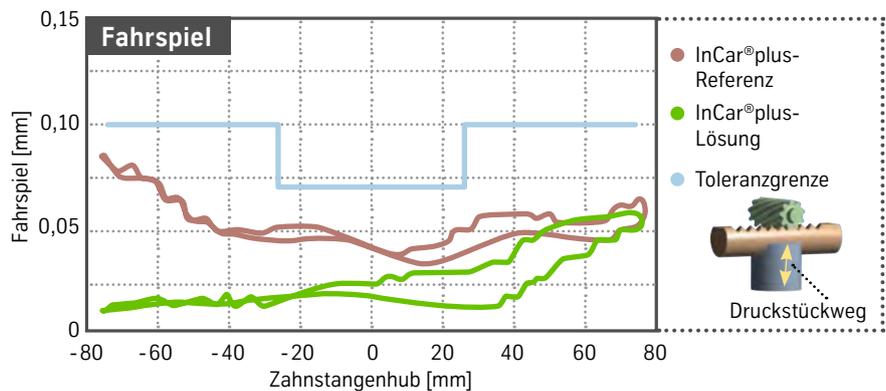
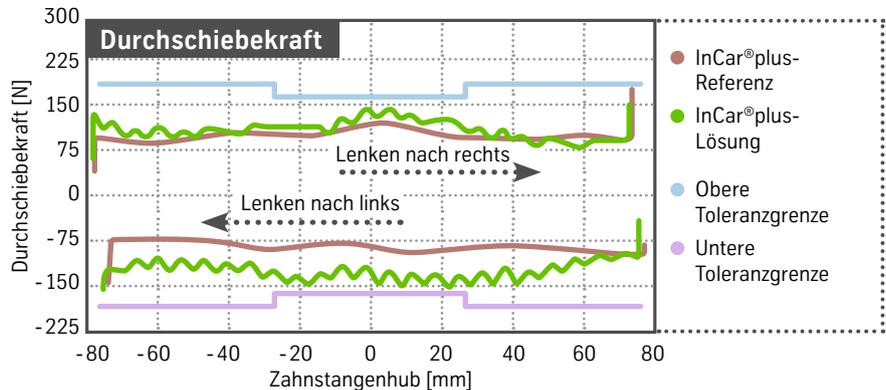
Die Durchschiebekraft wird über den Zahnstangenhub in beide Richtungen ermittelt. Dazu wird die Zahnstange durch das Lenkgetriebe geschoben. Das Niveau des Kraftverlaufs des Blechzahnstangengetriebes entspricht dem eines Seriengeriebtes, 3.

Das Fahrspiel kennzeichnet den Weg des Druckstücks über den Zahnstangenhub. Das Druckstück drückt die Zahnstange gegen das Lenkritzell und kann Schwankungen der Zahnstangendicke ausgleichen. Wird die Zahnstange dünner, erhöht sich das Druckstückspiel, was zu akustischen Auffälligkeiten führen kann. Die Messungen belegen, dass Blech- und Serienzahnstange hinsichtlich des Spiels vergleichbar sind. Um das Akustikverhalten des Getriebes zu prüfen, wird es in eine Prototypenlenkung eines Serienfahrzeugs eingebaut. Kriterien für die Akustikbewertung sind beispielsweise das Geräusch beim Fah-

ren über eine Rüttelstrecke oder beim ruckartigen Lenken im Stand. Die Bewertung nehmen Testfahrer nach subjektivem Empfinden vor. Sie bescheinigen Blechzahnstange und Serienzahnstange ein vergleichbares akustisches Verhalten.

Nach dem Nachweis der generellen Machbarkeit von gebauten Blechzahnstangen am Beispiel eines Kleinwagen-Lenkgetriebes wird sich die weitere Entwicklung auf gebaute Blechzahnstangen in Rack-EPS-Systemen (Electric Power

Steering) für größere Fahrzeugklassen konzentrieren. Bei ihnen wird die Unterstützungskraft über einen Kugelgewindetrieb oder eine zweite Verzahnung aufgebracht. ThyssenKrupp erwartet Vorteile beim Gewicht sowie bei den Fertigungskosten – und zwar durch die Kombination einer fahrzeugspezifischen Verzahnung auf der Fahrerseite mit einem standardisierten Kugelgewindetrieb oder einer für verschiedene Systeme gleichen Verzahnung der Lenkunterstützung.



3 Durchschiebekraft (oben) und Fahrspiel (unten) der Zahnstangen im Vergleich



ThyssenKrupp InCar[®]plus

finden Sie online unter incarplus.thyssenkrupp.com

ThyssenKrupp AG
ThyssenKrupp Allee 1
45143 Essen
incarplus@thyssenkrupp.com

Wir entwickeln die Zukunft für Sie.



ThyssenKrupp

LENKWINKELSTELLER: HIGH-PERFORMANCE ZU ATTRAKTIVEN KOSTEN

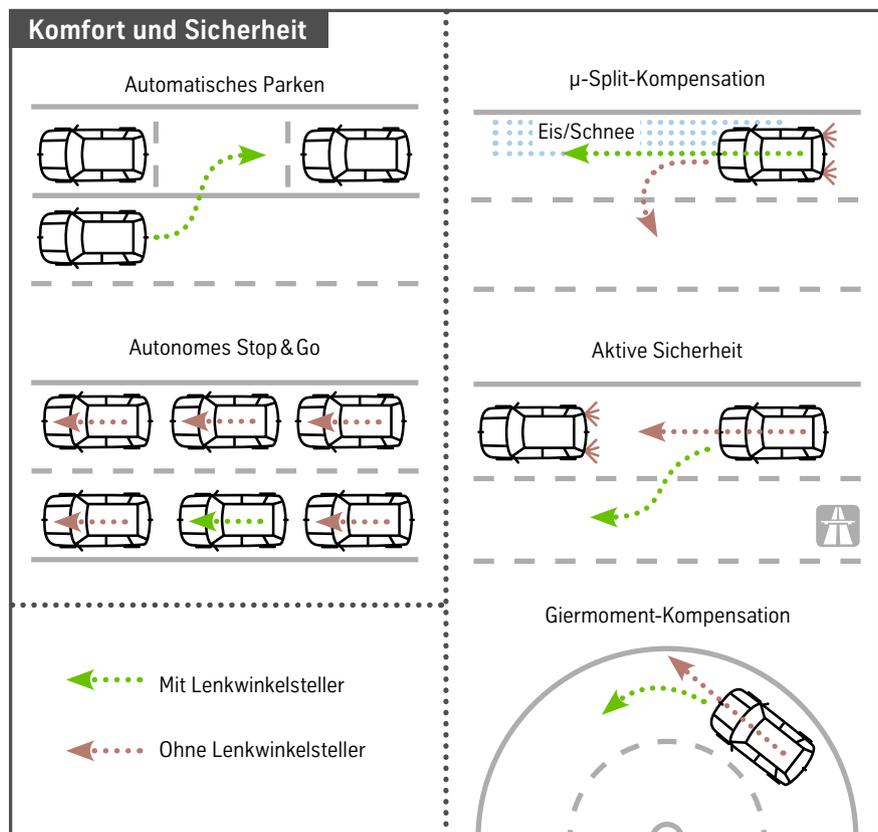
Der Lenkwinkelsteller ist ein wichtiger Bestandteil der elektromechanischen Lenkung. Er verfügt über eine frei programmierbare Lenkübersetzung und ermöglicht so eine Vielzahl von Assistenz-Lenkfunktionen. Technische Basis des aktiven Lenkeingriffs sind ein Elektromotor und ein Überlagerungsgetriebe, das als Herzstück des Lenkwinkelstellers wesentlich die akustischen Eigenschaften beeinflusst. Zahnräder aus Kunststoff bieten zu wettbewerbsfähigen Preisen ein ausreichend hohes Leistungsvermögen für das Überlagerungsgetriebe. Die Systemperformance des komplexen mechatronischen Systems hat ThyssenKrupp schon unabhängig vom Motor nachgewiesen.

Eine frei programmierbare Lenkübersetzung ist grundlegende Voraussetzung für eine Vielzahl von Assistenz-Lenkfunktionen zur Erhöhung von Fahrstabilität und Fahrkomfort:

- : mehr Komfort durch deutlich geringeren Lenkwinkel beim Rangieren oder Parken, ❶
- : mehr Agilität durch direkte Lenkübersetzung beispielsweise im Stadtverkehr bei niedrigen Geschwindigkeiten
- : mehr Stabilität bei hohen Geschwindigkeiten
- : Beitrag zu mehr Sicherheit durch aktive Lenkeingriffe in kritischen Situationen (Spurstabilität bei μ -Split-Situationen, Seitenwindkompensation oder Spurhalten), ❶
- : individuelle Ausprägung der Lenkübersetzung, etwa abhängig von Fahrdynamik-Modi des Fahrzeugs.

LEISER FORTSCHRITT

Da heutzutage die Fahrzeughersteller von mechatronischen Systemen immer bessere akustische Eigenschaften erwarten, muss auch der im Innenraum zwischen Lenksäule und Lenkwelle positionierte



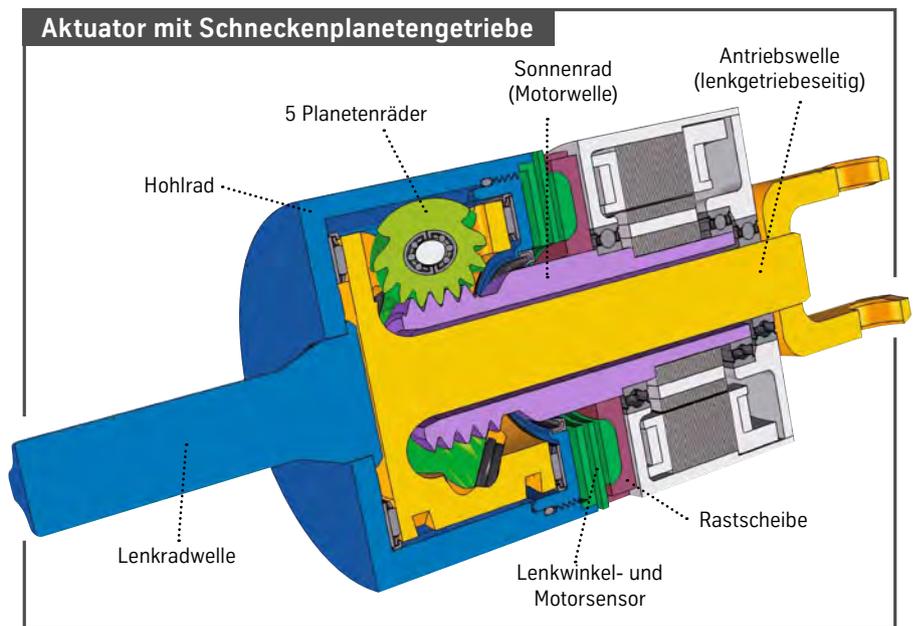
❶ Mehr Fahrsicherheit und Komfort durch Integration des InCar plus-Lenk Winkelstellers in das Lenksystem

Lenkwinkelsteller hohe Akustikanforderungen erfüllen. Ein modularer Aufbau des Aktuators erfüllt die Funktions- und Wirtschaftlichkeitsanforderungen am besten, da so die einzelnen Module wie Überlagerungsgetriebe, Elektromotor und Sicherheitsbremse unabhängig voneinander entwickelt, getestet und optimiert werden können. Damit ist die Systementwicklung kürzer und die akustischen Eigenschaften lassen sich gezielter analysieren und verbessern.

Das Überlagerungsgetriebe als Kernelement des Aktuators beeinflusst aufgrund der komplexen Bewegungsabläufe der Zahneingriffe maßgeblich dessen Performance. Zunächst untersucht und bewertet ThyssenKrupp verschiedene Getriebekonzepte mit symmetrischem und unsymmetrischem Kraftfluss. Ein Planetengetriebe mit symmetrischem Kraftfluss, bei dem das Sonnenrad (Motorwelle) als Schnecke fungiert, erfüllt die Lastenheftanforderungen im vorgegebenen Bauraum ideal, ②.

Die Vorteile des Planetengetriebes sind seine kompakte Bauweise und der symmetrische Kraftfluss, wodurch Getriebevibrationen in den Lenkstrang nur minimal eingeleitet werden. Die Verteilung der Lenkkräfte auf mehrere Planetenräder reduziert die jeweiligen Belastungen, sodass Planetenräder aus Kunststoff ideal eingesetzt werden können, ③ und ④.

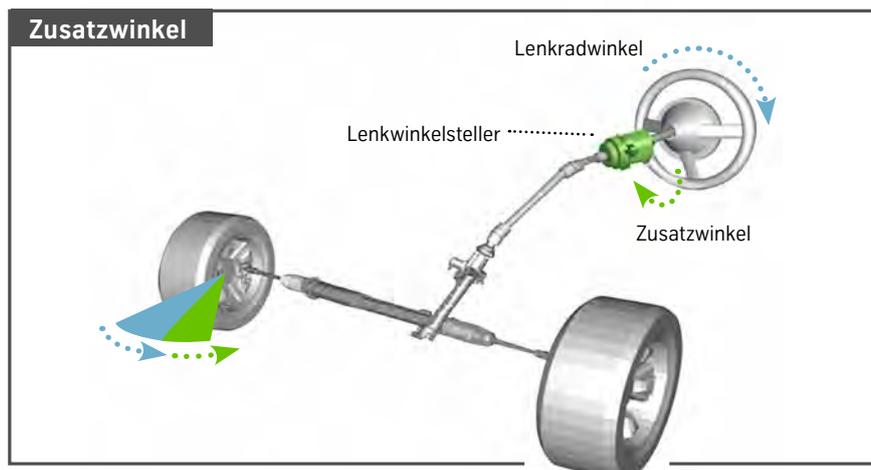
Diese Planetenräder rollen sehr geräuscharm im Hohlrads beziehungsweise auf der Schnecke (Sonnenrad) ab. Die geringere Steifigkeit des Kunststoffs im Vergleich zu Stahl bedeutet, dass die Toleranzanforderungen der Verzahnungen im Hohlrads, an der Schnecke und



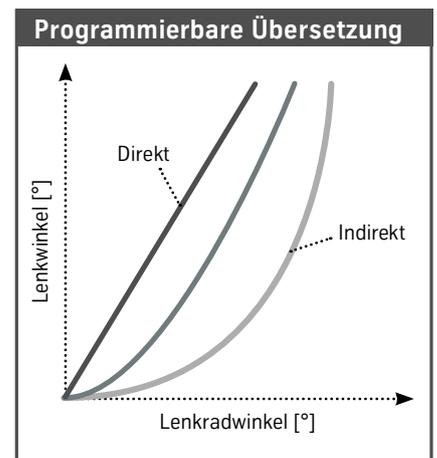
② Schnittdarstellung des Aktuators

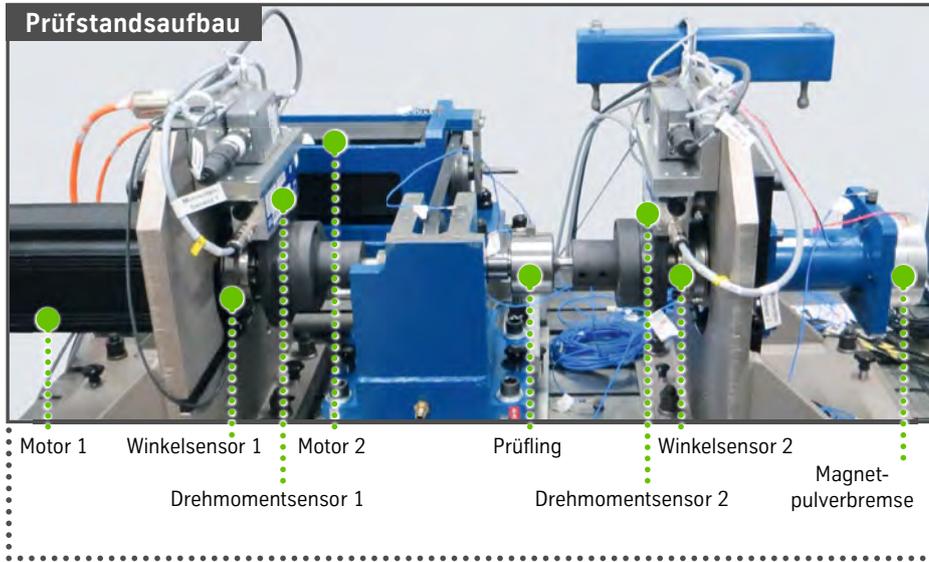


③ Getriebe des Lenkwinkelstellers mit Kunststoff-Zahnradern



④ Der Lenkwinkelsteller ermöglicht mit seiner frei programmierbaren Lenkübersetzung ein variables Verhältnis von Lenkwinkel zu Lenkwinkel





5 Lenkwinkelsteller im Prüfstand für Akustik- und Verschleißuntersuchungen

den Planetenrädern deutlich reduziert werden können. Das verbessert die Wirtschaftlichkeit, ebenso wie die geringeren Fertigungskosten der Kunststoff-Zahnäder im Vergleich zu Zahnädern aus Stahl. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Getriebeübersetzung in der ersten Getriebeübersetzung in der ersten Getriebestufe (Schnecke – Planetenräder). Dadurch beschränkt sich die Zahl der schnelllaufenden Aktuatorbauteile auf die Motorwelle mit Schnecke und die Motorlager, mit entsprechenden akustischen Vorteilen.

und überzeugen durch eine uneingeschränkte Serientauglichkeit.

Akustikmessungen verdeutlichen, dass der direkt am Hohlrad gemessene Körperschall des Schneckenplanetengetriebes über den gesamten Frequenzbereich bis 2000 Hz meistens deutlich unter dem der Referenz-Getriebekonzepte liegt, 6. Die im Fahrbetrieb üblichen Handmomente von <5 Nm übertragen Kunststoff-Zahnäder problemlos.

Die Absicherung umfasst aber auch die Untersuchung von Missbrauchs-

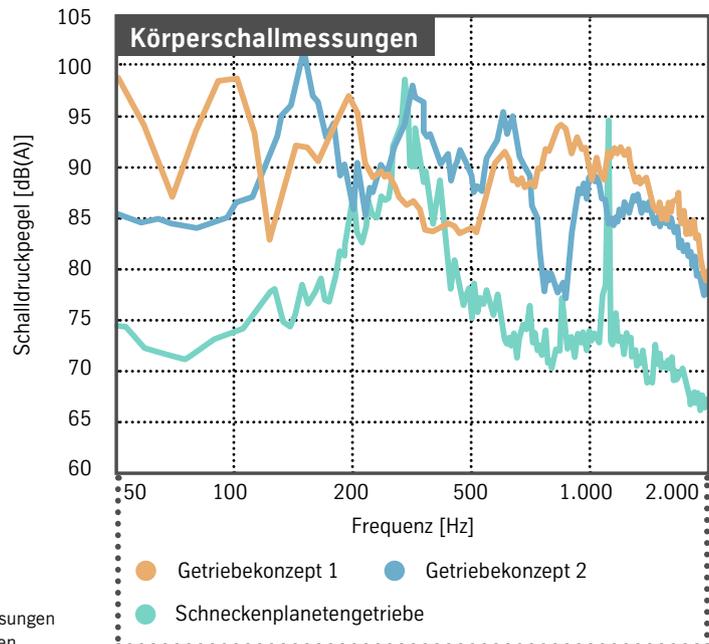
Szenarien bis hin zum Bruch von Komponenten. In 7 sind die Hysteresebreiten und die zugehörige Auswertung beim maximal geforderten Drehmoment von 250 Nm bei Nennlast und im Nulldurchgang dargestellt. Auch bei deutlich mehr Lastzyklen halten die Kunststoff-Zahnäder der Belastung erfolgreich stand. Sie erreichen erst bei einer Überbelastung von 130 % der maximalen geforderten Bruchlast ihre Belastungsgrenze, was die hohe Sicherheit des Getriebes bestätigt.

GETRIEBEKONSTRUKTION VIRTUELL UND EXPERIMENTELL FÜR GUT BEFUNDEN

Abgesichert hat ThyssenKrupp die Getriebe konstruktion mit FEM-Berechnungen und Prototypentests am Prüfstand. Der Prüfling wird dazu zwischen Lenkrad und Lenkgetriebewelle eingespannt und an den Wellen mit Brems- und Antriebsmomenten beaufschlagt. Die Winkelgeschwindigkeiten und Drehmomente werden an den Wellen erfasst. Der modulare Aufbau erlaubt den Antrieb der Getriebe prototypen durch einen separaten Motor (Motor 2), 5. Dieser treibt die Schnecke über einen Keilriemen an.

Die Getriebe prototypen erfüllen alle Lastenheftanforderungen mehrerer europäischer Fahrzeughersteller bezüglich Akustik, Lebensdauer und Verschleiß. Für alle Versuche sind die Zahnäder bereits aus PEEK in einem seriennahen Spritzgussprozess gefertigt

6 Körperschallmessungen an Getriebe prototypen



Die optimalen Reib- und Verschleißwerte der Verzahnungsflächen ermittelt ThyssenKrupp in einem gestuften Prozess. Zuerst wurden in Modellversuchen unterschiedliche Kombinationen von Kunststoffen und Oberflächenbeschichtung untersucht und diejenigen mit den besten Reib- und Verschleißwerten ermittelt. Die besten Kombinationen wurden als Getriebeprototypen aufgebaut und in Dauerläufen untersucht.

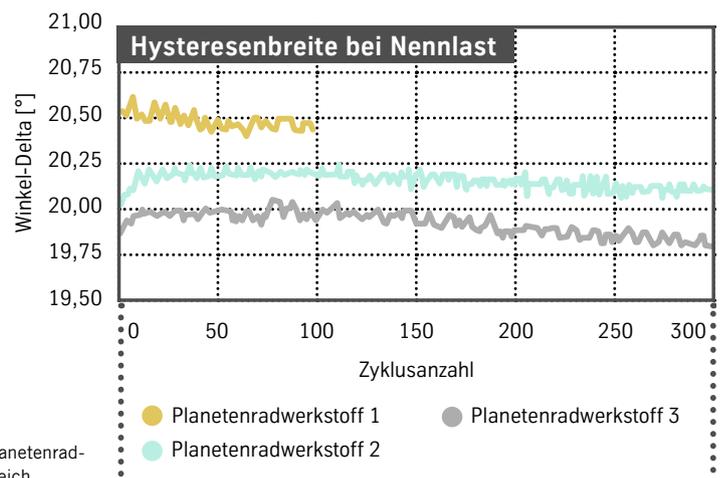
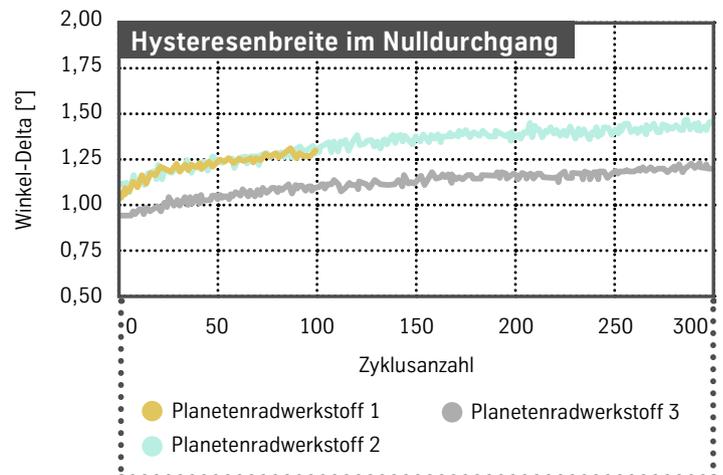
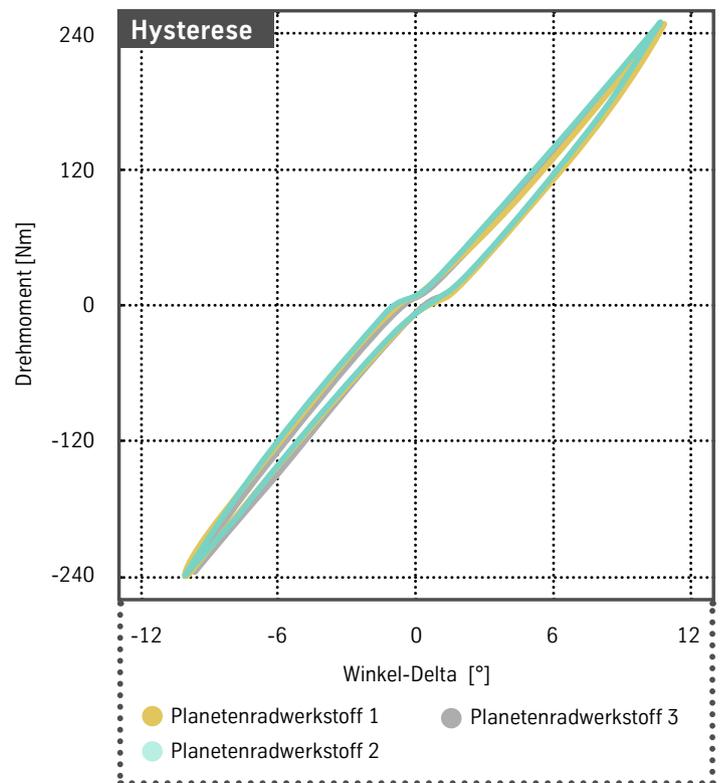
KOSTEN UND KUNDEN IM FOKUS

Der Einsatz von Kunststoff-Zahnradern im Getriebe bietet einige Kostenvorteile. Zunächst sind ihre Herstellungskosten im Spritzgussverfahren sehr günstig. Außerdem sind sie bei der Montage weniger toleranzempfindlich als Metallzahnäder. Überhaupt ist die Montage des Schneckenplanetengetriebes relativ einfach. Nach der Montage der Achse und Lagerung im Planetenrad wird dieses Modul in den Planetenträger eingesetzt. Als letzter Schritt wird der Planetenträger in das Hohlrad eingelegt und mithilfe des Deckels die Vorspannung auf den Planetenträger eingestellt. Eine weitere kostendämpfende Maßnahme ist der Aufbau des Getriebes aus vielen Normteilen und auf dem Markt verfügbaren Großserienbauteilen wie etwa Distanzscheiben und Planetenradachsen.

Der Gesamtaktuator des Lenkwinkelstellers ist so aufgebaut, dass der Elektromotor akustisch vom Fahrer abgewandt auf der Abtriebsseite (Lenkgetriebeseite) platziert ist. Zusätzlich ist die Möglichkeit vorgesehen, neben dem Motorpositionssensor optional einen hochauflösenden Lenkwinkelsensor zu integrieren. Der Lenkwinkelsteller samt Winkelsensorsignalen, Bremse und Elektromotor kann durch ein Column-EPS-Seriensteuergerät betrieben werden.

Die Lastenheftanforderungen für das Gesamtkonzept des Lenkwinkelstellers und für das Schneckenplanetengetriebe wurden in der Simulation und am Prüfstand erfüllt. Nächster Schritt ist der Aufbau eines seriennahen Aktuators, der in einem Versuchsfahrzeug getestet werden soll. Damit spezifische Fahrzeuganforderungen in die Weiterentwicklung des Lenkwinkelstellers einfließen können, wird eine Kooperation mit einem Fahrzeughersteller angestrebt.

7 Verschiedene Planetenradwerkstoffe im Vergleich



COLUMN-EPS FÜR KOMPAKT- UND MITTELKLASSEFAHRZEUGE

Das im InCar plus-Projekt entwickelte Column-EPS-(Electrical Power Steering-)System mit zwei Ausbaustufen für Zahnstangenkräfte von 9 beziehungsweise 11 kN ist für den Einsatz in der gehobenen Kompaktklasse und der unteren Mittelklasse konzipiert. Sowohl Lenkgefühl als auch Geräuschverhalten sind verglichen mit heutigen Column-EPS-Serienanwendungen deutlich verbessert. Zudem zeigt sich die im Innenraum platzierte Column-EPS deutlich kostengünstiger als im Motorraum angeordnete Rack-EPS- und Pinion-EPS-Systeme. Darüber hinaus baut sie kompakter im Bereich von Antriebsstrang und Vorderachsträger. Dadurch stellt die Column-EPS eine echte technische und wirtschaftliche Alternative zu den bisher in diesem Segment dominierenden Systemen dar.

Seit dem Technologiewechsel von hydraulisch zu elektromechanisch unterstützten Lenksystemen werden Fahrzeuge der gehobenen Kompaktklasse und unteren Mittelklasse vorwiegend mit Pinion-EPS beziehungsweise Rack-EPS ausgestattet. Herkömmliche Column-EPS erfüllten bisher bei den Zahnstangenkräften und Lenkleistungen nicht die bei höherwertigen Fahrzeugen üblichen

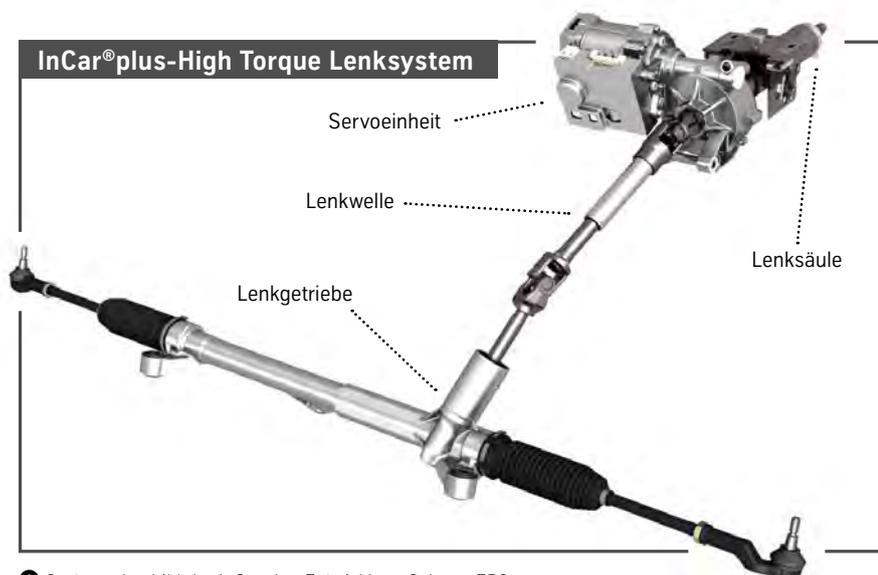
Anforderungen an Lenkgefühl und Akustik. Das Lenkgefühl der Column-EPS wird vor allem durch die hohe Reibung der Servoeinheit und die geringe Steifigkeit der Lenkwelle beeinträchtigt. Daher ist diese Bauart aktuell eher in Kleinwagen und leichteren Kompaktfahrzeugen zu finden.

In InCar plus wurden zwei neue Ausbaustufen der Column-EPS mit höheren

Unterstützungsmomenten und Zahnstangenkräften entwickelt, ❶: High Torque mit 90 Nm Ausgangsmoment und Ultra High Torque mit 110 Nm. Die ohne Kompromisse beim Lenkgefühl darstellbare Zahnstangenkraft beträgt abhängig von der gewählten Übersetzung des mechanischen Lenkgetriebes 9 beziehungsweise 11 kN. Beide Ausbaustufen verwenden bewährte Elemente des EPS-Modulbaukastens von ThyssenKrupp, die an die erhöhte Leistung angepasst sind. Andere Komponenten wurden neu entwickelt beziehungsweise tiefgreifend modifiziert. Als erfahrener Systemlieferant verfügt ThyssenKrupp über Kompetenz in Entwicklung und Validierung sämtlicher Hardware- und Softwarekomponenten.

SELBSTNACHSTELLENDEN SERVOEINHEIT

Für die Akzeptanz in höherwertigen Fahrzeugen muss die Column-EPS neben der Darstellung von Zahnstangenkräften und Lenkleistung ein möglichst ähnliches Lenkgefühl und Geräuschverhalten wie die Rack- beziehungsweise Pinion-EPS bieten. Der hochentwickelte Lenksäulen-Momentenregler von ThyssenKrupp bildet die Basis für ein hervorragendes Lenkgefühl. Schwerpunkt der Optimierungsar-



❶ Systemschaubild der InCar plus-Entwicklung Column-EPS

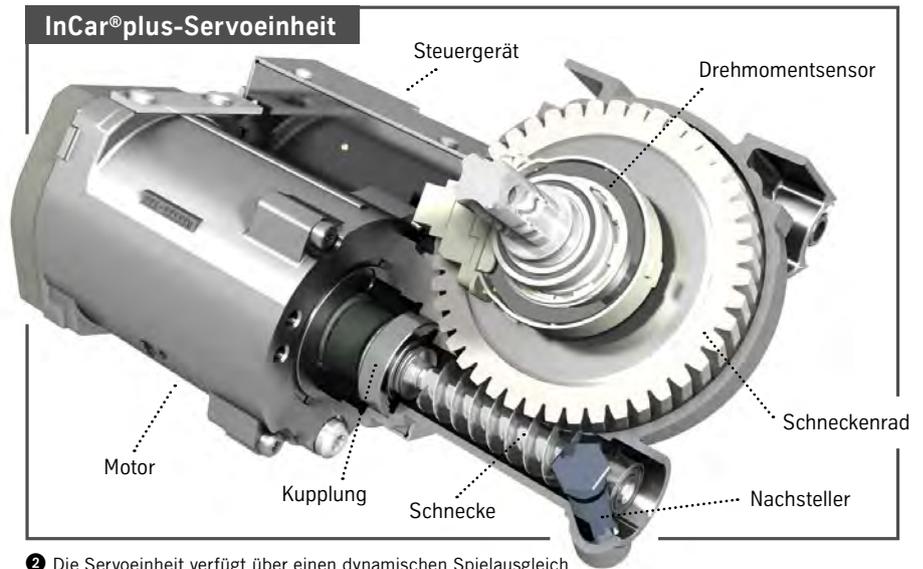
beiten am Lenkgefühl sind daher eine geringe Reibung der Servoeinheit, ②, und eine hohe Steifigkeit der Lenkwelle. Reibung und Elastizität verfälschen die Rückmeldung von der Straße und führen zu einem insgesamt unpräzisen und nervösen Lenkgefühl. Jedoch konnte durch umfangreiche Feinarbeit an mechanischen Schlüsselkomponenten die Reibung der Servoeinheit reduziert und die Steifigkeit der Lenkwelle erhöht werden.

In der Servoeinheit überträgt das Schneckengetriebe (Schnecke) das Unterstützungsmoment des Motors auf die Ausgangswelle (Schneckenrad), ③. Wird ein gewisses Spiel im Schneckengetriebe überschritten, führt dies zu Klappern und Umlenkklöpfen. Gleichzeitig erfordert der Ausgleich von Verzahnungstoleranzen und unterschiedlicher Wärmedehnung der Bauteile ein gewisses Minimalspiel. Wird dies unterschritten, steigen Reibmoment und dessen Schwankungsbreite exponentiell an.

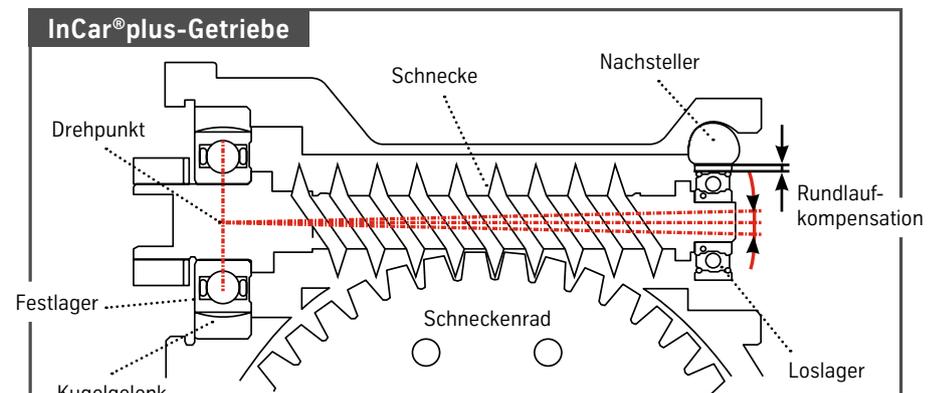
Soll das System über die Lebensdauer des Fahrzeugs frei von Klappern und Umlenkklöpfen bleiben, ist ein dynamischer Spielausgleich zur Kompensation von Toleranzen und Verschleiß erforderlich. Bei kleineren Systemen drückt meist ein vorgespanntes Federelement die Schnecke gegen das Schneckenrad und stellt so einen spielfreien Verzahnungseingriff sicher. Die Vorspannung des Federelements ist so ausgelegt, dass die Schnecke auch bei hoher Last nicht vom Schneckenrad abhebt. Dies führt ab einer gewissen Systemgröße zu inakzeptabel hoher Reibung.

Beim neu entwickelten, dynamischen Spielausgleich kompensiert eine automatische Nachstelleinrichtung Toleranzen und Verschleiß, ④. Das Spiel wird nur in lastfreien Phasen nachgestellt, was die erforderliche Vorspannkraft minimiert. Dazu drückt der mit einer geringen Federkraft vorgespannte Nachsteller die Schnecke in den Eingriff mit dem Schneckenrad, bis dieser spielfrei ist, ⑤.

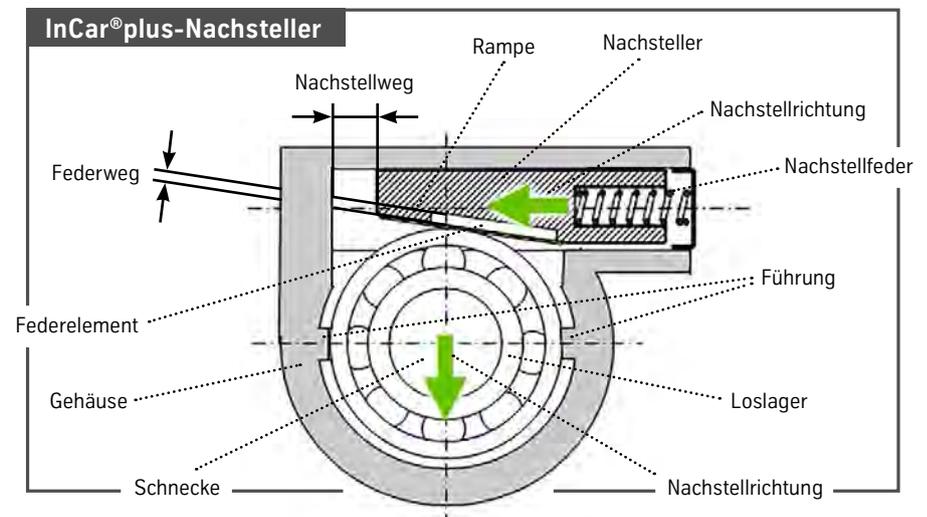
Der Nachsteller ist selbsthemmend und bewegt sich auch unter Last nicht mehr zurück, weshalb nicht mit der maximalen Betriebslast vorgespannt werden muss. Dies reduziert das Reibmoment deutlich. Ein weiteres Federelement im Nachsteller gewährleistet im Zusammenspiel mit einem Festanschlag ein exakt definiertes Minimalspiel. Dadurch werden Verzahnungstoleranzen und Unterschiede im Achsabstand ausge-



② Die Servoeinheit verfügt über einen dynamischen Spielausgleich



③ Der Nachsteller drückt die Schnecke in das Schneckenrad



④ Der Nachsteller ist selbsthemmend und bewegt sich auch unter Last nicht zurück

glichen, die sich aus den Wärmedehnungen der Bauteile ergeben. Somit sinken die Schwankungen des Reibmoments.

STEIFIGKEITSOPTIMIERTE LENKWELLE

Bei der Neuentwicklung der Lenkwelle steht die Schiebeverbindung im Mittelpunkt. Ziel ist ein dynamischer Längenausgleich bei gleichzeitig möglichst geringer Losbrechkraft unter Last, da eine hohe Losbrechkraft zu störenden Knackgeräuschen führt. Die bisherigen technischen Lösungen auf dem Markt erfüllen diese Anforderungen bei einem Unterstützungsmoment von 110 Nm nicht beziehungsweise nicht über die Fahrzeuglebensdauer.

Die neu entwickelte Schiebeverbindung besteht aus einem Außenrohr mit Trapezoidverzahnung mit großem Modul und einem Innenrohr, dessen Verzahnung mit einem tribologisch optimierten Kunststoff beschichtet ist. Die Abstimmung der Zahngeometrien und des tribologischen Systems aus Beschichtung und Fett ermöglicht eine deutlich höhere Steifigkeit in Verbindung mit signifikant reduzierter Losbrechkraft unter Last. Mit neu entwickelten, hochpräzisen Gelenk Kreuzen sinkt die Rollreibung um 25 % bei gleichzeitig erhöhter Steifigkeit.

BEWÄHRTE ELEKTRISCHE UND ELEKTRONISCHE HOCHLEISTUNGSKOMPONENTEN

Aus dem EPS-Modulbaukasten von ThyssenKrupp stammt der bewährte dreiphasige Permanentmagnet-Synchronmotor der Servoeinheit. Die Ausgangsleistung des stärksten Motors liegt mit 760 W

und 5,8 Nm in einem für Rack-EPS üblichen Bereich. Zur Sicherheit gegen elektromagnetisches Blockieren sind verschiedene Vorkehrungen implementiert, um die Phasen zuverlässig voneinander zu trennen. Beispielsweise ist das Statorblechpaket im Bereich der Wicklungen mit Kunststoff umhüllt. Wicklungsgeometrie und Füllungsgrad gewährleisten, dass sich die Windungen verschiedener Phasen nicht berühren. Um ein mechanisches Blockieren durch Partikel gebrochener Magnete im Luftspalt zu vermeiden, sind die Rotormagnete vollständig umhüllt.

Zur Minimierung von Rastmomenten und Momenten-Ungleichförmigkeit ist der Rotor geschränkt und das Nut/Pol-Verhältnis beträgt 3:2. Die Phasenströme werden vektoriell geregelt mit einer Strombegrenzung im ISO-Torque- und einer Feldschwächung im ISO-Power-Bereich. Die Frequenz der Pulsweitenmodulation liegt oberhalb des relevanten Hörbereichs. Der steifigkeitsoptimierte Stator, die Erhöhung der Eigenfrequenz und die gleichzeitige Reduzierung der Schwingungsamplituden minimieren die Körperschallemission im Arbeitsbereich.

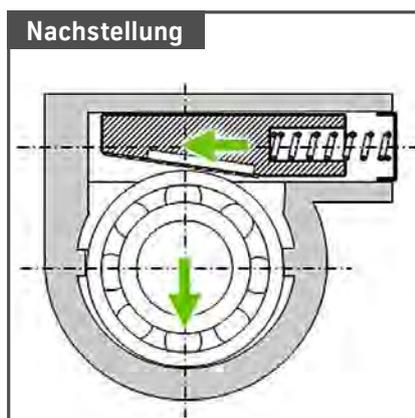
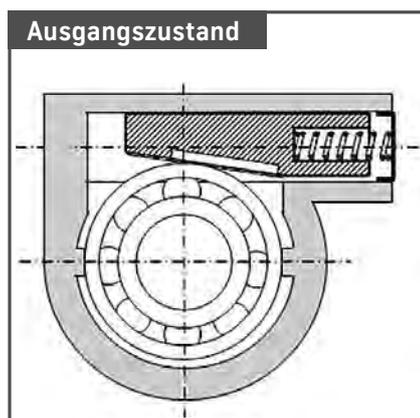
Die Steuergeräte sind eine komplette Eigenentwicklung und Teil des modularen ECU-Baukastens der neuesten Generation. Neben einer Neuentwicklung des Leistungsteils ist auch die Steuerelektronik weiter verkleinert und noch robuster geworden, . Die komplette Entwicklung erfolgt nach IEC 61508 und ISO 26262, das Gesamtsystem entspricht ASIL D.

Die Ansteuerung der Motorphasen erfolgt über sechs sehr niederohmige MOSFET mit geringer Verlustleistung. Dies ist bei hohen Strömen eine Voraussetzung

für hohen Wirkungsgrad und thermische Stabilität. Zur optimalen Kühlung sind die MOSFET direkt auf dem IMS-Board mit seiner ausgezeichneten Wärmeabfuhr aufgebracht. Im Kurzschlussfall sind alle Motorphasen über drei zusätzliche MOSFET abschaltbar. Diese ersetzen die mechanischen Phasen- beziehungsweise Sternpunktrelais und steigern dadurch die Robustheit und Zuverlässigkeit des Systems erheblich. Eine Detektionsschaltung erkennt und verhindert den Lawineneffekt, der beim Ein- und Ausschalten der MOSFET auftreten und zu Kurzschlüssen der Phasenrelais führen kann. Für gute elektromagnetische Verträglichkeit sorgen eine stromkompensierte Drossel und zwei Kondensatoren.

Der Haupt-Mikroprozessor hat zwei Rechenkerne, die im Lockstep-Modus arbeiten und im Verbund mit weiteren Software-Maßnahmen den Sicherheitsstandard ASIL D erfüllen. Sie arbeiten mit 180 MHz Taktfrequenz, der Flash Speicher fasst 1 MB. Sicherheitsrelevante Funktionalitäten überwacht ein robuster Watchdog-Prozessor, der im Fehlerfall den Leistungsteil mithilfe der Gate Driver Unit (GDU) abschaltet. In der GDU sind auch Unterspannungsdetektion, Gate und Drain Source Monitor implementiert. Weitere Diagnosefunktionen im Steuergerät überwachen interne Spannungen, Temperaturen und Ströme. Das emulierte Flash EPROM reduziert die Komponentenanzahl und Komplexität. Zur Stromversorgung dient ein selbst entwickeltes Power ASIC.

Mit dem Fahrzeug wird über eine CAN-Schnittstelle kommuniziert, auf Kundenwunsch auch per Flexray. Der Drehmomentsensor ist per zweikanaliger



 Funktionsweise des Nachstellers

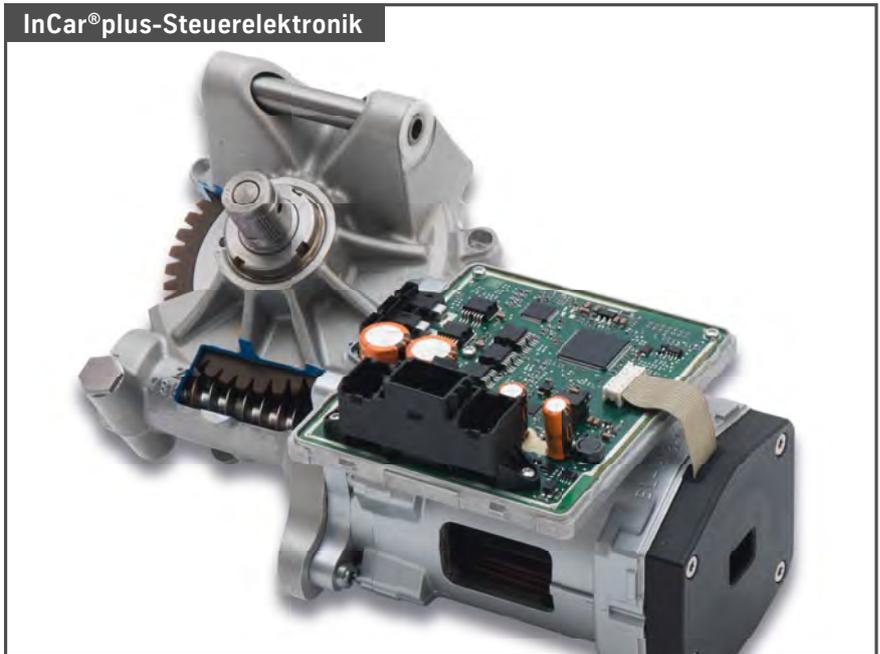
SENT-Schnittstelle mit Überwachung der Stromversorgung angebunden, sodass Fehler zuverlässig erkannt werden. Der Rotorpositionssensor ist per UART-Schnittstelle vernetzt. Das Einschalten des Systems erfolgt verzögerungsfrei beim Einschalten der Zündung.

ROBUSTE UND PRÄZISE SENSORIK

Der kompakte und millionenfach in EPS-Systemen von ThyssenKrupp bewährte Drehmomentsensor misst das Lenkmoment. Durch das magnetische Messprinzip ist er robust gegen Verschmutzung. Ein mehrpoliger Magnetring auf der Eingangswelle erzeugt ein Magnetfeld, das der Magnetflusssammler auf der Ausgangswelle durch den Magnetflusssensor im Gehäuse leitet. Ein- und Ausgangswelle sind durch einen Drehstab miteinander verbunden. Bei Einleitung eines Moments verdrehen sich beide Teile des Sensors gegeneinander. Der mit Drehwinkel und damit Drehmoment veränderliche Magnetfluss wird gemessen und ausgewertet. Für die Signalübertragung von der drehenden Welle auf das stillstehende Gehäuse sind weder Schleifkontakte noch Wickelfeder erforderlich. Dadurch ist der Sensor verschleißfrei und alterungsbeständig.

Ein Magnet auf dem hinteren Ende der Motorwelle dient als Rotorpositiongeber. Das mit der Welle drehende Magnetfeld wird von Sensoren mit einer Kombination verschiedener Messverfahren ausgewertet. Dies ermöglicht eine sehr genaue Bestimmung der Rotorposition und damit eine exakte Motorregelung. Diese Anordnung von Sensor und Magnet ist sehr robust gegen axiale und radiale Positionstoleranzen und externe Magnetfelder. Somit lassen sich eine hervorragende Akustik und geringe Momentenschwankungen über den gesamten Last- und Drehzahlbereich erzielen.

Der absolute Lenkwinkel wird aus internen Signalquellen wie dem Motorpositionssensor errechnet und mit externen Signalen, beispielsweise den Rad-drehzahlen, plausibilisiert und korrigiert. Der Rotorpositiongeber stellt von sich aus ein sehr genaues Winkelsignal zur Verfügung. Durch die hohe Übersetzung zwischen Motor und Lenksäule wird es nochmals verfeinert. Zur Bestimmung des absoluten Lenkwinkels wird daher kein separater Lenkwinkelsensor benötigt, was Vorteile bei Kosten, Robustheit und Bauraum bietet.



6 Servoeinheit der Column-EPS mit Steuerelektronik

AUTOSAR-KOMPATIBLE SOFTWARE

Als einer der ersten Hersteller von elektrisch unterstützten Lenkungen setzte ThyssenKrupp AUTOSAR 3.1-kompatible Software in Serienprojekten um. Von externen Zulieferern entwickelte AUTOSAR-Softwaremodule werden mit eigenen Softwaremodulen, wie etwa der Motorsteuerung und Applikationssoftware, integriert. Das verkürzt die Entwicklungszeiten und verbessert die Softwarequalität. Zur schnellen und flexiblen Umsetzung kundenspezifischer Software wurde eine eigene AUTOSAR 4.0-Basissoftware samt Toolkette entwickelt. Auf diese Weise sind Softwaremodule des Kunden oder von Drittanbietern schnell und sicher implementierbar.

Alle Column-EPS-Systeme von ThyssenKrupp weisen den patentierten Lenksäulen-Momentenregler auf. Dieser hat bereits in den Rack-EPS-Systemen seine Leistungsfähigkeit bewiesen und ist mit seiner klaren Rückmeldung von der Straße und hervorragenden Abstimmbarkeit aktuell Benchmark. Er enthält Basisfunktionen wie eine geschwindigkeitsabhängige Unterstützung, aktive Rückstellung, aktive Dämpfung, Trägheitskompensation und adaptiven Endanschlag. Durch diesen lassen sich per Bandende-Programmierung verschiedene maximale Lenkwinkel für ver-

schiedene Radgrößen mit dem gleichen Lenkgetriebe einstellen.

Über die Lebensdauer des Fahrzeugs sorgen eine adaptive Reibungserkennung und Kompensation für die Stabilität des modellbasierten Lenkgefühls. Schnittstellen für die Detektion und Kompensation von Unter- und Übersteuern unterstützen Fahrdynamiksysteme und Funktionserweiterungen des ESP. Parkassistenten und Spurhalteassistenten erhalten ihre Signale von der Zahnstangen-Positionsregelung. Darüber hinaus stehen Komfortfunktionen wie Personalisierung, eine Pull-Drift-Kompensation und eine Korrektur des Geradeauslaufs zur Verfügung. Diese und andere Module werden je nach Kundenanforderung konfiguriert und implementiert.

Die neuentwickelte Column-EPS für den Bereich von 9 bis 11 kN Zahnstangenkraft ist für Fahrzeuge der gehobenen Kompaktklasse und unteren Mittelklasse eine echte technische und wirtschaftliche Alternative zu Rack-EPS- und Pinion-EPS-Systemen. Durch Optimierung ihrer mechanischen Schlüsselkomponenten sind Lenkgefühl und Akustik deutlich besser als bisher, außerdem bietet sie Package- und Kostenvorteile. Der ganzheitliche Ansatz von ThyssenKrupp hilft den Kunden, das volle Potenzial der Column-EPS individuell für den jeweiligen Anwendungsfall voll zu erschließen.

ENTWICKLUNGSPLATTFORM FÜR KÜNFTIGE STEER-BY-WIRE-LENKUNGEN

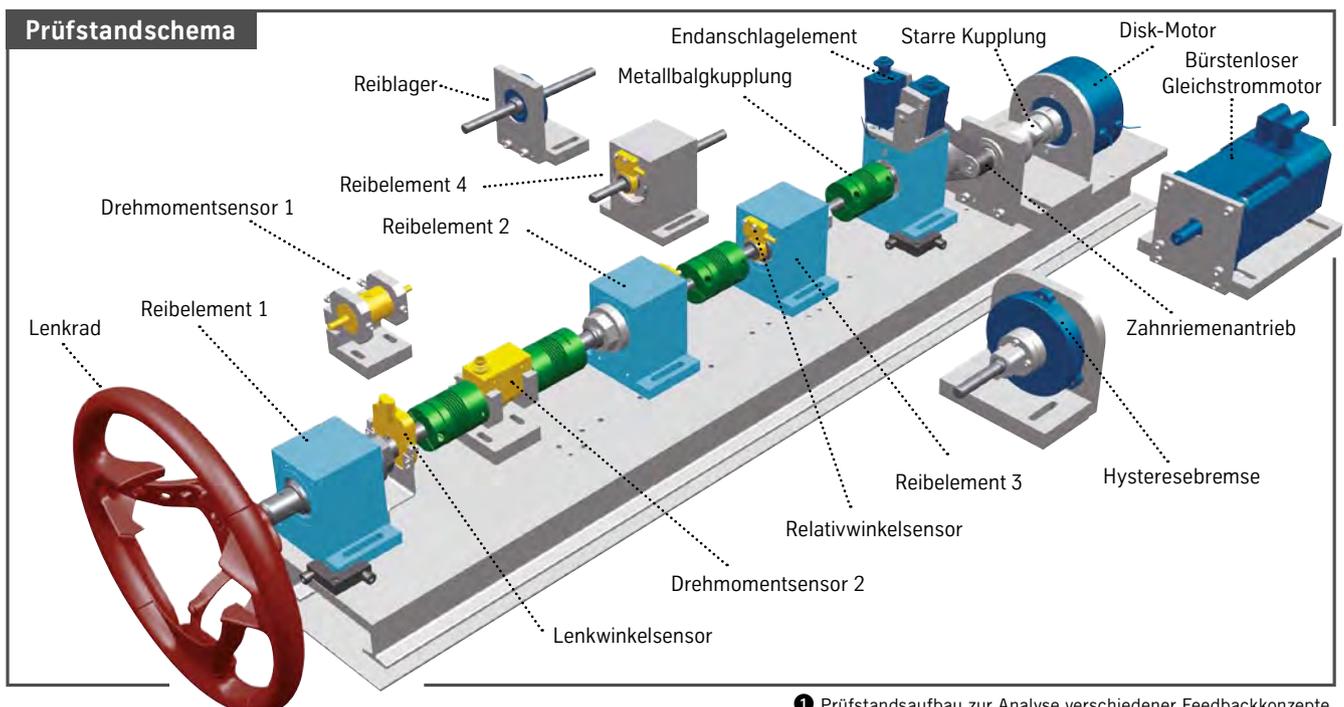
Steer-by-Wire-Systeme ermöglichen eine Vielzahl von Lenk- und Assistenzfunktionen und bieten das Potenzial, den vorhandenen Bauraum besser auszunutzen und die Variantenvielfalt zu reduzieren. ThyssenKrupp hat einen flexiblen Fahrzeug-Versuchsträger aufgebaut, dessen modulares Lenkgetriebe und Feedbackaktuator sowohl eine mechanische Rückfallebene als auch fehlertolerante Systeme darstellen können. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Implementierung eines konsistenten und natürlichen Lenkgefühls. Mit dieser Entwicklungsumgebung lassen sich komplexe Anforderungen bezüglich Aktuatorik, Sensorik, Fehlertoleranz sowie Regelung definieren und zu modernen, kundengerechten Steer-by-Wire-Systemen weiterentwickeln.

Eine der größten Herausforderungen bei der Entwicklung eines Steer-by-Wire-Systems ist das Simulieren eines authentischen Lenkgefühls. Neben einem Versuchsträger nutzt ThyssenKrupp deshalb einen Prüfstand, um die Feedbackaktuatorik und deren Komponenten im Detail

zu analysieren, ❶. Die eingebaute Sensorik weist eine sehr hohe Genauigkeit und Auflösung auf, um kleinste Momenten- und Winkeländerungen erfassen zu können. Der Drehmomentsensor ist kein weicher Drehstab, wie sonst üblich. Zur Momentmessung kommt vielmehr ein

Verfahren mit einer differentiellen Magnetfeldmessung in einem steifen Gesamtsystem zum Einsatz.

Auf dem Prüfstand lassen sich sämtliche Einflüsse einzelner Komponenten und deren Interaktion darstellen und analysieren. Die einzelnen Komponenten



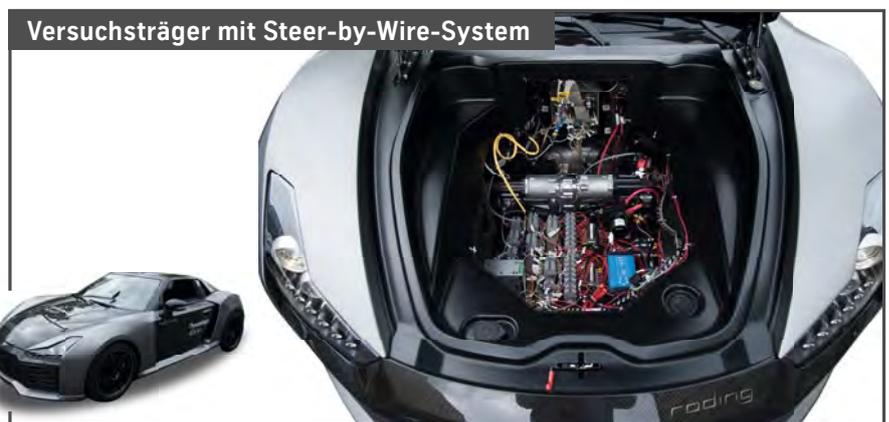
❶ Prüfstands Aufbau zur Analyse verschiedener Feedbackkonzepte

sind variabel kombinier- und austauschbar. Folgende Bauteile und Konzepte sind unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen objektiv und subjektiv vergleichbar:

- : Reibung an verschiedenen Positionen
- : Steifigkeiten
- : Sensorkonzepte und Spezifikationen
- : Aktuatorkonstruktionen und -konzepte
- : Direktantrieb und andere Getriebe-konzepte (Riementrieb, Schnecken-getriebe, etc.)
- : Lösungen, um hohe Momentenanfor-derungen abzubilden
- : Softwarefunktionen und Reglerstra-tegien.

ENTWICKLUNGSFAHRZEUG MIT VIELEN FREIHEITEN

Die Prüfstandergebnisse können im Fahrzeug-Versuchsträger direkt nachge-stellt und erprobt werden. Um Lösungs-konzepte und Funktionalitäten zu testen und zu validieren, die nicht im CAE oder am Prüfstand entwickelt werden können, sind das Entwicklungsfahrzeug und die Lenkungs-komponenten weitgehend modular aufgebaut. Das Entwicklungsfahrzeug auf Basis eines „Roding Roadster“, ②, einem Kleinserien-Sportwagen, bietet aufgrund seines Mittelmotorkon-zepts eine außerordentliche Gestaltungs-



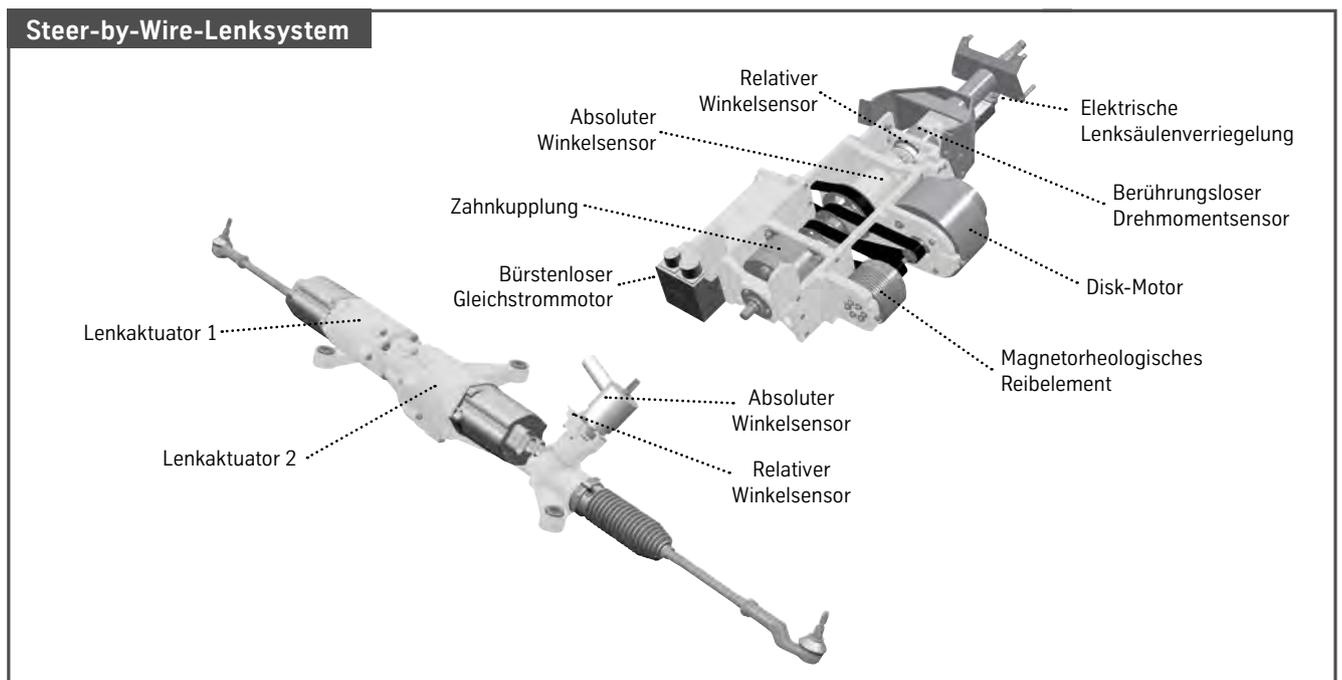
② Fahrzeug-Versuchsträger „Roding Roadster“

freiheit hinsichtlich Lenkgetriebe, Lenk-säule und Feedbackaktuator.

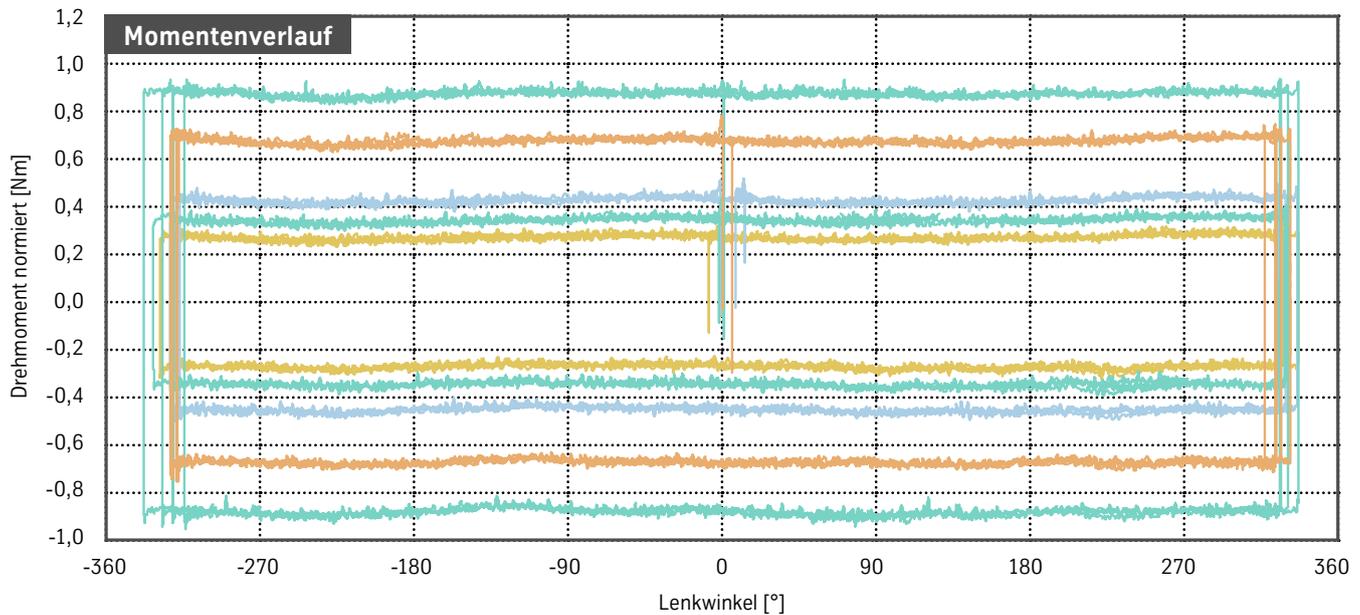
Der Feedbackaktuator, ③, ist analog zum Prüfstand aufgebaut und bietet neben hochpräzisen Winkel- und Dreh-momentsensoren die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Aktuatoren direkt mit-einander zu vergleichen, da diese über eine elektronisch schaltbare Kupplung mit dem Lenkrad verbunden sind. Um bei Geradeausfahrt kein künstlich wirkendes Lenkgefühl um die Nulllage (On-Center-Gefühl) zu erhalten, ist eine gewisse Reibung im Feedbacksystem notwendig. Diese ist im Versuchsfahr-

zeug per Software einstellbar und wird von einem speziell entwickelten Reibe-element abgebildet, ④. Mit dem verwen-deten Reibelement lässt sich ein homo-gener Momentenverlauf ohne Stick-Slip-Effekte beim Richtungswechsel abbilden. Die so generierte, nahezu „mechanische“ Reibung lässt sich von 0,05 bis 10 Nm stufenlos einstellen.

Das Lenkgetriebe basiert auf einem Rack-EPS-System von ThyssenKrupp. Es ermöglicht mit seinem mittig angeord-neten Kugelgewindetrieb die Analyse von redundanten Systemen mit zwei Power-packs. Auf diese Weise lassen sich mit



③ Lenkgetriebe (links) mit Feedbackaktuator (rechts)



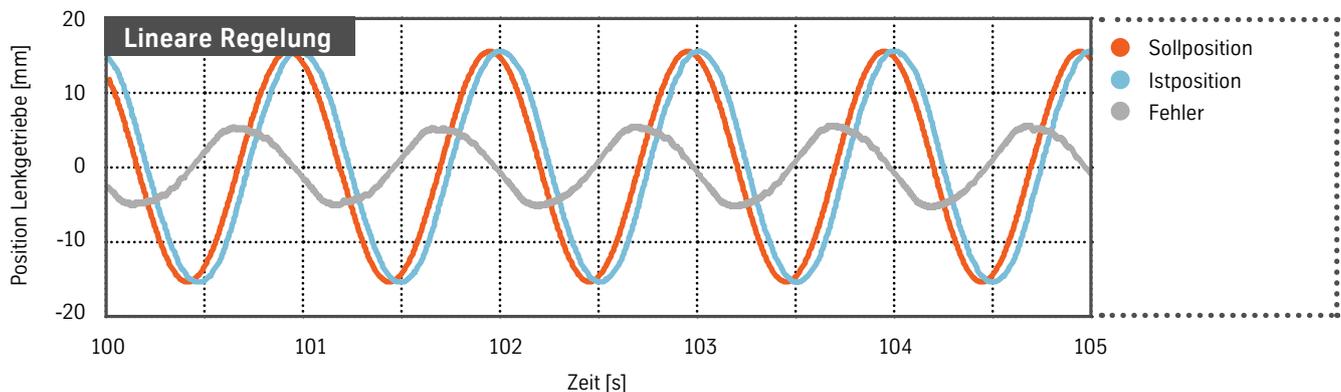
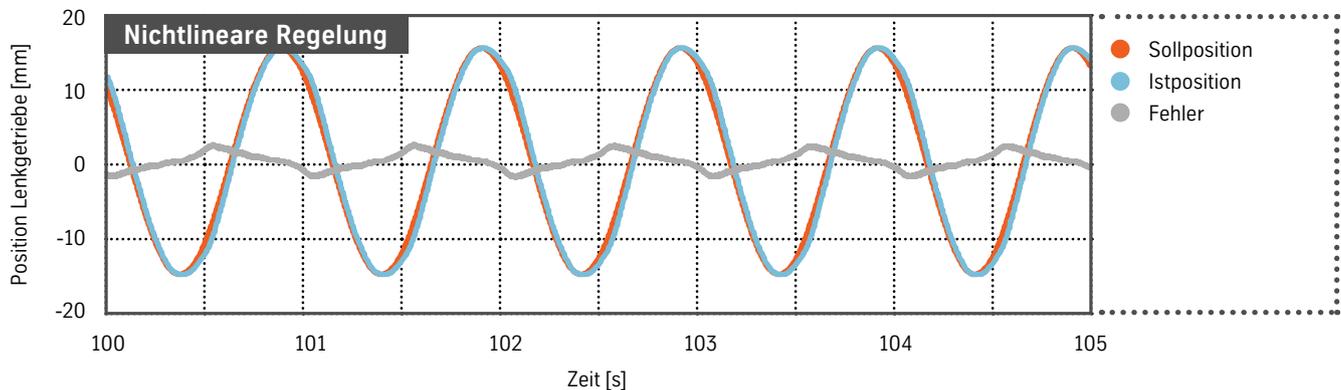
4 Normierte Darstellung des Momentenverlaufs bei unterschiedlicher Bestromung des magnetorheologischen Reibelements

einer Hardware unterschiedliche redundante Lösungs- und Regelungsansätze entwickeln und erproben. Die Powerpacks können über eine definierbare Steifigkeit bis hin zum Spiel gekoppelt werden oder unabhängig voneinander agieren. Um die Prototypen- und Ausfallsicherheit zu

gewährleisten, ist der Feedbackaktuator über eine aktiv geöffnete Kupplung mit dem Lenkgetriebe verbunden.

Neben den für Steer-by-Wire spezifischen Sensoren verfügt das Fahrzeug über Messtechnik, die weitere Signale wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Querbe-

schleunigung und Gierrate präzise erfasst. Als Echtzeitsystem zur Verarbeitung dieser Informationen und Umsetzung in entsprechende Steuer- und Regelbefehle dient eine AutoBox. Der Versuchsträger verfügt sowohl über ein CAN- als auch ein Flexray-Bussystem,



5 Regelung Lenkgetriebe

die die Kommunikation zum Lenkgetriebe, Feedbackaktuator und Fahrzeug sicherstellen. Diese Gesamtkonfiguration ermöglicht eine flexible Entwicklung und Erprobung unterschiedlicher Softwarefunktionen auf Fahrzeugebene.

REGELUNGSKONZEPTE DES LENKGETRIEBES

Die Regelung der Zahnstangenbewegung des Lenkgetriebes ist dafür verantwortlich, der vom Fahrer gewünschten Lenkbewegung in Position und Geschwindigkeit präzise zu folgen. Entwickelt und angewendet wurden dafür zwei unterschiedliche Regelungskonzepte. Eines basiert auf der konventionellen linearen Zustandsregelung, das andere auf der erweiterten nichtlinearen Lyapunov-Regelung. Beiden Konzepten liegt die mathematisch-physikalische Beschreibung des mechanischen Lenkgetriebes mittels Differenzialgleichungen zugrunde. Die meisten in der Natur vorkommenden Systeme sind nichtlinear, können jedoch exakt genug durch lineare Modelle beschrieben werden. Hierbei gibt es allerdings Grenzen. Außerhalb dieser reicht das Modell nicht mehr aus

und das theoretische Verhalten weicht vom realen zu stark ab. Erste Simulationen und Versuche am Prüfstand zeigen den Einfluss der Nichtlinearitäten im höheren Dynamikbereich der Sollposition, wie in 5 zu sehen ist.

Der vorgestellte Versuchsträger bildet die Basis für die methodisch orientierte Vorgehensweise, um die komplexen Anforderungen an ein Steer-by-Wire-System zu verstehen und individuelle Lösungen entwickeln zu können. Nur durch abgestimmte Entwicklungsschritte ist es möglich, maßgeschneiderte Komponenten-Lastenhefte zu erstellen, den maximalen Kostenvorteil zu erzielen und gleichzeitig ein natürliches Lenkgefühl zu implementieren.

Im Rahmen von InCar plus werden auch von der Lenkung unabhängige Redundanzen und Rückfallebenen entwickelt. Eine Strategie ist das Torque Vectoring als Rückfallebene für das Lenksystem. Dabei „lenken“ gezielte Antriebs- und Bremsmomente an den Rädern das Fahrzeug. Zur Entwicklung dieser Strategie hat ThyssenKrupp eine Simulationsumgebung samt entsprechendem Fahrzeugmodell aufgebaut und damit verschiedene Strategien und deren Einfluss

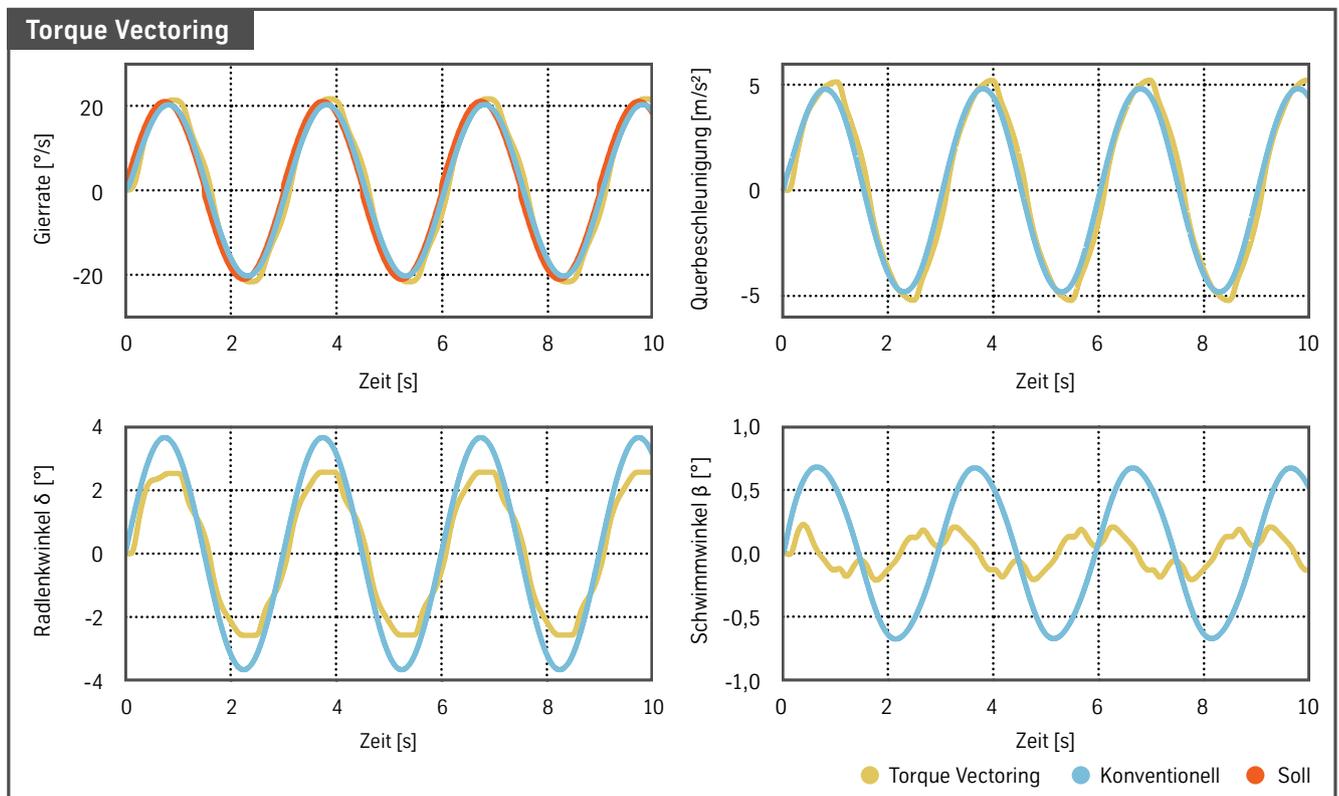
auf die Fahrzeugreaktion analysiert, 6. Die erste Validierung der Simulationsergebnisse erfolgt am Formula Student Race Car der ETH Zürich, das über einen elektrischen Einzelradantrieb verfügt.

ZUKÜNFTIGE AUFGABEN

Der Aufbau dieser Forschungs- und Entwicklungsplattform ist ein erster Schritt zur Entwicklung moderner Steer-by-Wire-Systeme. ThyssenKrupp wird damit folgende Systeme und Konzepte entwickeln und analysieren:

- : unterschiedliche Konzepte für Redundanz und funktionale Sicherheit
- : Konzepte und Anforderungen an die Sensorik und Aktuatorik
- : lineare und nichtlineare Regleransätze
- : verschiedene Ansätze und Funktionen zur Gestaltung des Lenkgefühls
- : erweiterte Fahrerassistenzfunktionen
- : kostenoptimierte Komponentenauswahl.

Diese Aufzählung stellt nur einen Teil der gegebenen Möglichkeiten dar. Das Projektteam hat mit seiner Arbeit umfassendes Know-how im Bereich Steer-by-Wire generiert und setzt es gemeinsam mit Fahrzeugherstellern um.



6 Vergleich zwischen einem konventionellen Pkw mit marktüblicher Achsgeometrie und einem Fahrzeug mit Torque Vectoring

KAROSS



SERIE



Im InCar plus-Teilprojekt Karosserie steht für ThyssenKrupp der wirtschaftliche Leichtbau im Fokus. Das vollkommene Zusammenspiel von neuen Stahlsorten, innovativen Werkstoffverbänden und modernen Verarbeitungsverfahren, wie etwa der Warmumformung, schafft dabei die Grundlagen für leichte, sichere und wirtschaftliche Produkte. Das gilt sowohl für die klassischen Strukturbauteile wie Längsträger oder B-Säule als auch für Anbauteile wie Motorhaube oder Türen. Karosserienahe Systeme wie Sitze und Räder sind ebenso mit einbezogen. Bei all diesen Produkten erzielen hochfeste Stähle exzellente Ergebnisse in puncto Wirtschaftlichkeit und Gewichtsreduktion. Neben dem Werkstoff-Engineering hat sich ThyssenKrupp auch in der Umform- und Füge-technik sowie in dem entsprechenden Anlagen- und Werkzeug-Know-how eine sehr hohe Kompetenz entlang der Wertschöpfungskette erarbeitet und ist deshalb ein hervorragender Entwicklungspartner für die Automobilhersteller.



BENCHMARK 2.0: DIE AKTUALISIERTE REFERENZSTRUKTUR

Für das InCar-Projekt im Jahr 2009 hatte ThyssenKrupp eine kundenunabhängige, neutrale Rohbaustruktur entwickelt, die als Referenzkarosserie für die Analysen der unterschiedlichen Bauteillösungen diente. Im Rahmen von InCar plus wurden zunächst der Anforderungskatalog an die Entwicklung aktualisiert und etliche neue Crashlastfälle berücksichtigt. Dargestellt werden viele der neuen InCar plus-Lösungen in einem Demonstrator.

Potenziale zur Gewichts- und Kostenreduktion von Karosseriebauteilen können nur im Umfeld einer Gesamtkarosserie umfassend abgesichert werden. Um die Referenzstruktur auf den aktuellen technischen Stand zu bringen, hat ThyssenKrupp die Karosserien unterschiedlicher Automobilhersteller über die letzten fünf Jahre analysiert. Aus diesen Erkenntnissen heraus wurden für 2014 wettbewerbsfähige Werte für die Steifigkeiten und das Gewicht der Referenzstruktur – einer repräsentativen Karosserie der oberen Mittelklasse – abgeleitet. Beispielsweise war InCar 2009 mit einer Leichtbaugüte von 2,8 Best-in-Class. InCar plus hält 2014 mit einer Leichtbaugüte von 2,7 diesen hohen Anspruch weiter aufrecht. Dieser sehr gute Wert beruht im Wesentlichen auf der verbesserten Gestaltung der Bauteile in den Lastpfaden, die aus dünnwandigen, hochfesten Stählen bestehen. Zusätzlich reflektiert InCar plus den Markttrend und setzt vermehrt auf die Warmumformung sowie höher- und höchstfeste kalt umformbare Stähle, ①.

Die einzelnen Lösungen in den folgenden Beiträgen werden immer mit dem Stand der Referenzstruktur 2014 verglichen, um die Vorteile bezüglich Gewicht, Kosten oder Performance aufzuzeigen. Zielvorgabe ist ein höherer Reifegrad im Vergleich zu bereits vorgestellten Lösungen des Vorgängerprojekts, wie etwa bei der Tür, Motorhaube, B-Säule und dem Längsträger. Darüber hinaus stehen für diese Bereiche neue Werkstoffe ebenso im Fokus wie innovative Konzepte und Fertigungstechniken. Zusätzlich werden aber auch neue Konzepte mit großen Potenzialen für wirtschaftlichen Leichtbau vorgestellt – wie beispielsweise ein Stoßfängersystem oder eine A-Säule. Über die Karosserieanwendungen hinaus gibt es neue Konzepte für Cockpitträger, Sitze und Räder. Für Sitzstrukturen werden besonders wirtschaftliche Leichtbaulösungen vorgestellt, während bei den Rädern neben dem Leichtbau mit Design ein zweiter, emotionaler Aspekt gleichwertig im Fokus steht. Somit ist InCar plus nicht nur das Nachfolgeprojekt von InCar, sondern erweitert das Spektrum des größten konzernübergreifenden Forschungsprojekts von ThyssenKrupp.

HERAUSFORDERUNG AUS DEN USA

2013 konfrontierte das US-amerikanische IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) die Automobilentwickler mit einem neuen Crashlastfall, dem Small Overlap Rigid Barrier Test (SORB). Da die neue starre Barriere des SORB nur eine Überdeckung von 25 % aufweist (Euro NCAP: 40 %), trifft sie bei den meisten Fahrzeugen die untere Längsträgerebene nicht mehr. Letztere kann deshalb viel weniger Bewegungsenergie aufnehmen, und die Barriere verformt mit hoher kinetischer Energie die vordere Radaufhängung und die A-Säule, ②. Dieser neue Lastfall war Anlass für eine komplette Überarbeitung des Vorderwagens der Referenzstruktur von 2009.

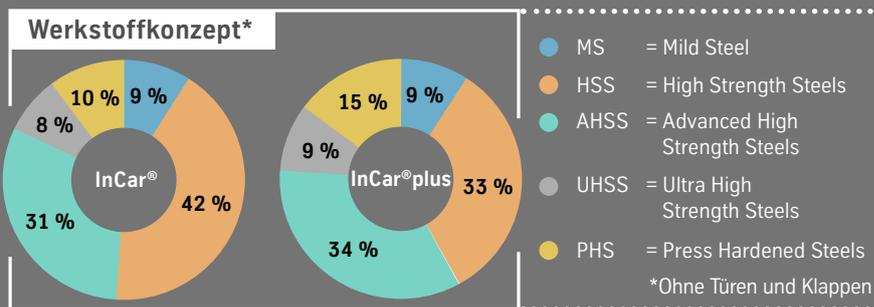
Um die untere Längsträgerebene wieder in die Energieumwandlung einzubeziehen, haben die Ingenieure ein zusätzliches Bauteil auf der Außenseite des unteren Längsträgers angebracht. Dieser Absorber stützt sich mit seiner geradlinigen Struktur auf dem unteren Längsträger ab, wird im SORB-Crashfall von der Barriere erfasst und verformt gezielt den Längsträger. Auf diese Weise liegen die Stirnwandintrusionen unter den erlaub-

ten Maximalwerten, ③. Das Mehrgewicht zur Erfüllung des SORB-Lastfalls beträgt bei InCar plus 8,2 kg.

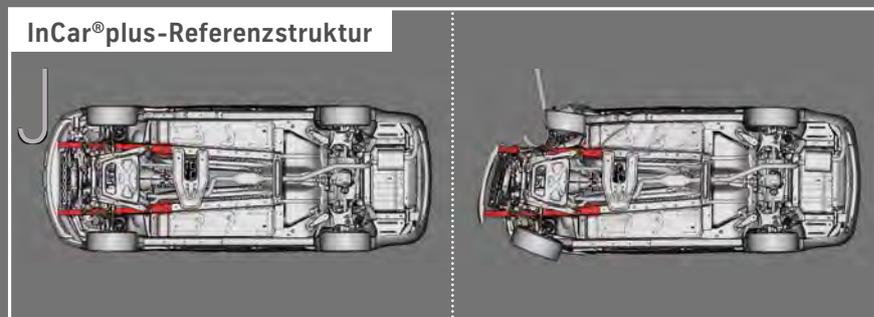
FLEXIBLER ROHBAU, KOSTENGÜNSTIGE REFERENZSTRUKTUR

Auch die Planung des Karosserierohbaus für InCar plus orientiert sich an aktuellen automobiltypischen Standards. Ein wichtiger Aspekt ist zum Beispiel die komplett automatisierte Bauteilzuführung. Da die neue Referenzstruktur im Vergleich zu InCar zahlreiche Verbesserungen bezüglich Aufbau und Bauteilgeometrie aufweist, ist eine komplett neue Rohbananlage geboten. Als Ausgangspunkt trugen Bauteilentwickler, Füge techniker und Rohbauplaner alle Daten zur Referenzstruktur zusammen. Die anschließende Fertigungsplanung berücksichtigt bereits die Integration der optimierten InCar plus-Bauteile in die neuen Fügeprozesse.

Eine detaillierte Kostenbewertung der verschiedenen Karosserielösungen und der Referenzstruktur flankiert die technischen Weiterentwicklungen von InCar plus. Folgendes Szenario dient als

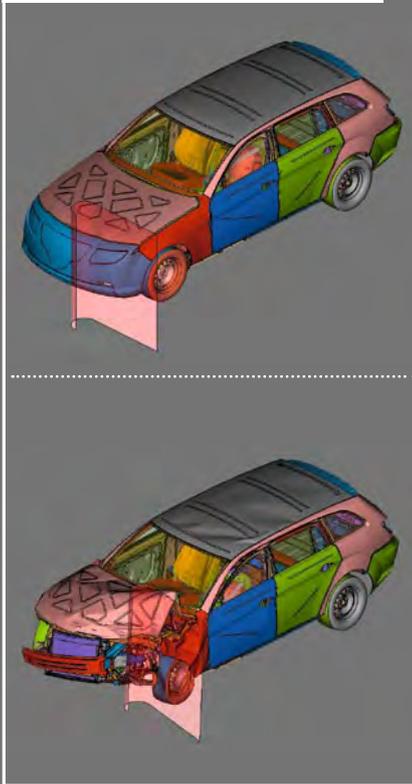


① Die Werkstoffkonzepte von InCar und InCar plus im Vergleich



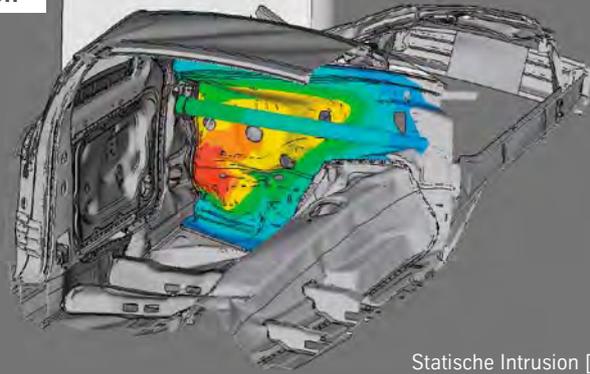
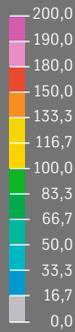
② SORB-Lastfall der Referenzstruktur ohne SORB-Maßnahmen

InCar®plus-Referenzstruktur



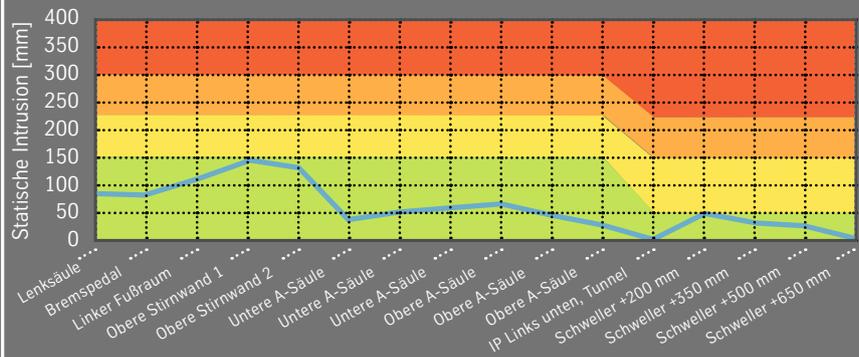
3 InCar plus-Referenzstruktur mit SORB-Maßnahmen

Stirnwandintrusion



Statische Intrusion [mm]

Statische Intrusion



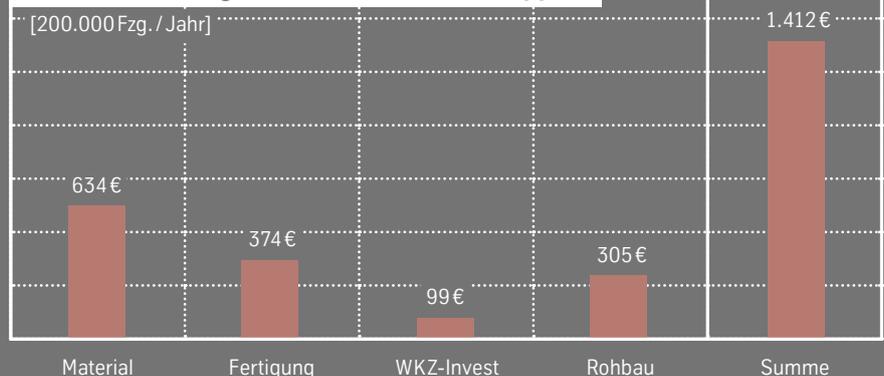
Basis: 200.000 Fahrzeuge pro Jahr bleibt bestehen, die Produktionslaufzeit wird von acht auf sechs Jahre verkürzt. Die Wirtschaftlichkeitsrechnung basiert auf einem „Greenfield“-Ansatz, einer realistischen Auslastung der Fertigungsanlagen und einem für Deutschland üblichen Lohnniveau. Die Fertigungskosten werden mithilfe eines eigenen Kalkulationstools bestimmt, die Werkstoffkosten auf Basis der Materialpreise Anfang 2014.

Die Investitionssummen für Werkzeuge und Rohbauanlagen stammen von Experten innerhalb von ThyssenKrupp und sind in der Kalkulation mit einer entsprechenden Verzinsung auf Kosten pro Fahrzeug umgelegt. Der in der Kalkulation berücksichtigte Umfang umfasst neben den direkten Fertigungskosten (Material, Maschinenstunden-satz, Personal) auch prozentuale Zuschläge für Material- und Fertigungsgemeinkosten. Nicht enthalten sind die überbetrieblichen Logistikkosten und der Gewinn. Alle Kostenangaben sind kundenneutral gehalten und dienen dem qualitativen Vergleich.

Auf dieser Basis ergeben sich für die InCar plus-Rohkarosserie Kosten in Höhe von 1412 € für Rohkarosserie, Türen, Klappen und Anschraubteile, 4. Im Vergleich zur InCar-Referenzstruktur liegen die Kosten auf einem vergleichbaren Niveau. Durch die Verkürzung der Laufzeit auf sechs Jahre sind die Kosten für

Werkzeuge (Umlage) und den Rohbau etwas gestiegen, dafür sind Material- und Fertigungskosten etwas geringer ausgefallen. Die dargestellten Kosten hängen stark von den gewählten Randbedingungen ab. Automobilhersteller werden aufgrund ihrer spezifischen Fertigung auf abweichende Ergebnisse kommen.

Detailkostenvergleich inkl. Türen und Klappen



4 Verteilung der Gesamtkosten der InCar plus-Referenzstruktur

NEU IM LEICHTBAU-FOKUS: DER COCKPITTRÄGER

Im Rahmen des Projekts InCar plus werden zum einen die bereits 2009 vorgestellten Leichtbaulösungen von ThyssenKrupp weiterentwickelt. Zum anderen bietet die zweite Auflage von 2014 auch neue Lösungsansätze – etwa einen Cockpitträger, der circa 3,4 kg leichter als derzeitige Stahllösungen ist. Mit Leichtbaukosten von 5,30 €/kg bietet er leicht erschließbares Gewichtseinsparpotenzial.

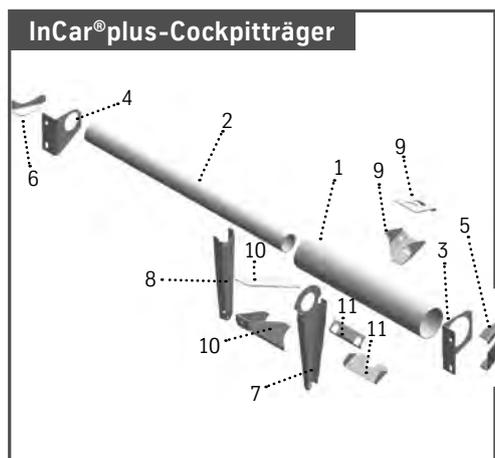
Bei der Aktualisierung der InCar plus-Referenzstruktur wurden die Karosserie sowie karosserienahe Bauteile, wie etwa Anbauteile, auf ihre Gewichtseinsparpotenziale hin untersucht. Eine Komponente, bei der sich Leichtbaumaßnahmen besonders lohnen, ist der Cockpitträger. Um einen Überblick über die Trends und Produkte in diesem Feld zu bekommen, verglichen die ThyssenKrupp Ingenieure fast 300 unterschiedliche Cockpitträger. Wichtige Parameter sind der Materialeinsatz, die Anbindungs- und Abstützungspunkte sowie Gewichte. Stahl ist bei 64 % der untersuchten Cockpitträger der bevorzugte Werkstoff, gefolgt von Magnesium-Druckguss und Aluminium. Das durchschnittliche Gewicht der untersuchten Cockpitträger liegt bei 7,5 kg (Stahl), 4,5 kg (Aluminium) und 3,5 kg (Magnesium).

Um die Gewichtsvorteile von Magnesiumblech aufzuzeigen, entwickelte ThyssenKrupp ein alternatives Konzept aus Magnesium-Flachprodukten. Dieser neue Cockpitträger besteht aus einem Zweirohrsystem mit zusätzlichen Bauteilen aus Magnesiumblech und wird per MAG-Schweißverfahren gefügt, ❶.

Die Gebrauchseigenschaften des Cockpitträgers sind virtuell abgesichert. Für die numerischen Untersuchungen wird der Cockpitträger um eine weit verbreitete Lenksäule und eine Ersatzmasse für das Lenkrad ergänzt. Die Integration in einen starren Rahmen gewährleistet eine herstellerneutrale Einbausituation. Globale Eigenfrequenzen sind der laterale Mode mit 42,0 Hz und der vertikale Mode mit 45,0 Hz. In den hohen Eigenfrequenzen spiegelt sich das gute Steifigkeits-Gewichts-Verhältnis des Cockpitträgers

wider. Zusätzlich ist gewährleistet, dass die Spreizung zwischen den ersten globalen Moden mit 3 Hz ausreichend groß ist. Als weiterer Nachweis der Gebrauchseigenschaften wird eine vertikale Last von 100 kg auf das Lenkrad aufgebracht. Die dadurch induzierten Spannungen im Cockpitträger sind mit 95 MPa etwa 44 % unterhalb der Fließspannung von Mg AZ31. Somit ist gewährleistet, dass im täglichen Gebrauch keine plastischen Deformationen auftreten werden.

Der in InCar plus entwickelte Cockpitträger aus Magnesiumblechen hat ein Gewicht von 2,4 kg. Vergleicht man diesen mit einem optimierten Stahl-Cockpitträger mit 5,8 kg Masse, so betragen die Leichtbaukosten 5,30 €/kg. Damit bieten Bauteile aus Magnesiumblech ein großes Potenzial zur Gewichtsreduzierung bei Fahrzeugen.



❶ Cockpitträger aus Magnesiumblech

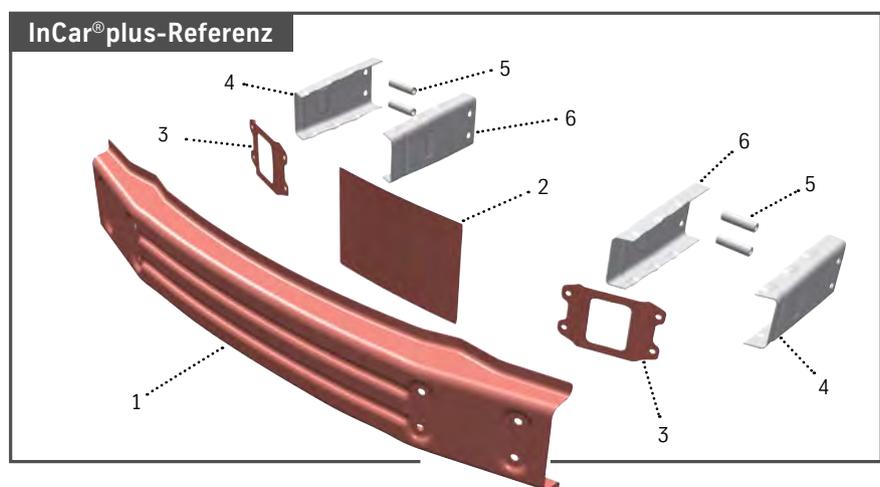
Nr.	Bauteil	Werkstoff	Dicke
1	Querträger links	AZ 31	2,30 mm
2	Querträger rechts	AZ 31	1,00 mm
3	Konsole Querträger links	AZ 31	2,50 mm
4	Konsole Querträger rechts	AZ 31	1,00 mm
5	Verstärkung Konsole Querträger links	AZ 31	2,50 mm
6	Verstärkung Konsole Querträger rechts	AZ 31	1,00 mm
7	Tunnelstütze links	AZ 31	1,30 mm
8	Tunnelstütze rechts	AZ 31	1,00 mm
9	Konsolen Lenksäule	AZ 31	2,50 mm
10	Stirnwandstützen	AZ 31	2,50 mm
11	Konsolen Lenksäule vorn	AZ 31	2,50 mm

STOSSFÄNGERSYSTEME OPTIMIERT IN PUNCTO FERTIGUNGSPROZESS, GEWICHT UND KOSTEN

Stoßfänger bergen noch hohes Leichtbaupotenzial im Vorderwagen. Im Rahmen von InCar plus entsteht ein neues Stoßfängersystem mit einem warmumgeformten Stahl-Biegeträger, das bei vergleichbaren Kosten 19 % leichter als die Referenzlösung ist. Damit wird das Gewicht durchschnittlicher Aluminiumlösungen bei wesentlich geringeren Kosten erreicht. Zusätzlich wurden modulare sowie rollprofilierter Biegeträger entwickelt, die bis zu 17 % leichter sind und den Vorteil der flottenübergreifenden Flexibilität bieten. Bei den Crashboxen sind dank neuer Stahlsorten Gewichtseinsparungen von etwa 13 % möglich. Ein einfach in vorhandene Fahrzeugstrukturen integrierbares und auf den IIHS-Lastfall Small Overlap Rigid Barrier (SORB) abgestimmtes Stoßfängerkonzept rundet die Ergebnisse ab.

Das Referenz-Stoßfängersystem besteht aus einem warmumgeformten Biegeträger mit Schließblech und per Anschlussplatten angebrachten, in die Längsträger eingesteckten und dort verschraubten Crashboxen, ❶. Es entspricht damit dem Stand der Technik im Jahr 2014. Aufgrund des Gesamtgewichts des Referenzfahrzeugs von etwa 1860 kg besteht der Querträger aus hochfestem Manganbor-Stahl MBW 1500 mit 2,0 mm Blechdicke. Die Crashboxen sind aus zwei lasergeschweißten Halbschalen (DP-W 330Y580T, Blechdicke 2,2 mm) gebildet. Das Schließblech verbessert die Systemstabilität bei punktuell wirkenden Lastfällen, wie etwa dem Pfahlaufprall. Damit kommt die Referenzlösung auf ein Gesamtgewicht von 10,21 kg.

Beim Entwurf der InCar plus-Konzepte wird insbesondere auf die Erfüllung der vielfältigen Crashlastfälle in Kombination mit der umformtechnischen Machbarkeit geachtet. So bestehen Zielkonflikte zwischen einer crashoptimierten Konstruktion und dem umformtechnisch Machbaren. Beim offenen Biegeträger



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Biegeträger	MBW® 1500	AS150	2,00 mm	5,48 kg
2	Schließblech	CR300LA	GI40	1,00 mm	0,51 kg
3	Prallplatten	CR240LA	GI40	2,00 mm	0,44 kg
4	Crashbox-Schalen außen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,20 mm	1,50 kg
5	Hülsen für Crashboxen (4 Stk.)	C22	U		0,44 kg
6	Crashbox-Schalen innen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,20 mm	1,60 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug (inkl. 0,24 kg Befestigungsmittel)					10,21 kg

❶ Referenz-Stoßfängersystem

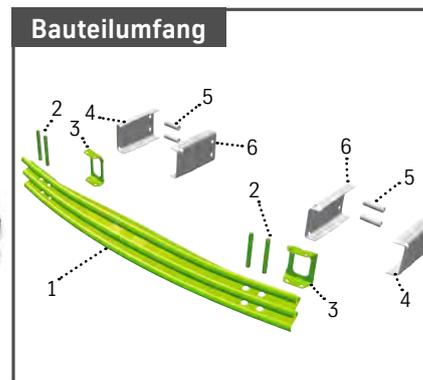
beispielsweise konnte durch Optimierungsschleifen eine Bauteilgeometrie erzielt werden, die man so vor Beginn des Projekts nicht für realisierbar gehalten hätte. Weitere Ziele sind ein minimales Gesamtgewicht der Stoßfängerlösungen, geringe Systemkosten und die möglichst einfache Integration in bestehende Rohbau- und Fertigungsstrukturen. Zur Absicherung der virtuellen Ergebnisse werden die Stoßfängersysteme einem ausgiebigen Testprogramm unterzogen.

Die Craschanforderungen an ein Stoßfängersystem sind sehr komplex. Einerseits muss das System auf die Lastfälle mit geringer Aufprallgeschwindigkeit wie den RCAR Bumper Test und den Versicherungseinstufungstest AZT bis 15 km/h abgestimmt sein. Andererseits gilt es, den Euro-NCAP-ODB-Lastfall mit 64 km/h Aufprallgeschwindigkeit zu erfüllen.

Für den Lastfall RCAR Bumper Test wird die maximale Intrusion in Richtung Motor für die virtuelle Auslegung begrenzt, damit das Kühlsystem, die Scheinwerfer und die angrenzende Aufnahmestruktur nach einem leichten Aufprall nicht ausgewechselt werden müssen. Der Euro-NCAP-ODB-Lastfall definiert im Vergleich zum US-NCAP-Lastfall schärfere Anforderungen, weshalb er bei den Automobilherstellern als maßgeblicher Lastfall für die Entwicklung angesetzt wird. Für den ebenfalls geprüften Lastfall eines mittigen Pfahlaufpralls definieren die Hersteller jeweils unterschiedliche Testbedingungen. Im Rahmen der hier betrachteten Lösungen gilt der Test als bestanden, wenn sich ein genügend hohes Kraftniveau einstellt und das Material des eingesetzten Biegeträgers nicht versagt.

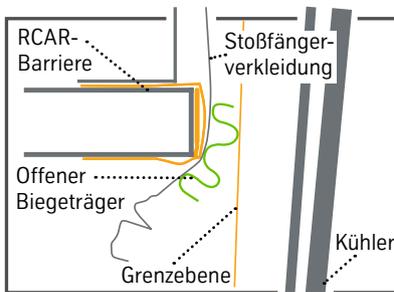
OFFENER BIEGETRÄGER

Der offene Biegeträger besteht aus einem wellenförmig ausgeprägten Grundkörper und verzichtet bewusst auf verstärkende Bauteile wie etwa Schließbleche, ❷. Der Träger erhält seine Performance allein aus der geometrischen Gestaltung und den Werkstoffeigenschaften. Die Crashboxen sind über Anschlussplatten mit dem Biegeträger verschraubt, Distanzhülsen nehmen die Schrauben auf. Für andere Bausituationen zwischen Crashbox und Längsträger kann auch eine kostengünstigere Schweißverbindung genutzt



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Offener Biegeträger	MBW® 1500	AS150	1,70 mm	4,29 kg
2	Hülsen für Biegeträger (4 Stück)	S355J	U		0,16 kg
3	Anschlussplatten Crashboxen	CR300LA	GI40	2,50 mm	0,42 kg
4	Crashbox-Schalen außen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,30 kg
5	Hülsen für Crashboxen (4 Stück)	C22	U		0,44 kg
6	Crashboxen-Schalen innen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,36 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug (inkl. 0,28 kg Befestigungsmittel)					8,25 kg

❷ Bestandteile des offenen Biegeträgers und ihre Eigenschaften



❸ Ergebnisse der Crashtestsimulation RCAR Bumper Test, Schnitt mit Grenzebene und Versuchsaufbau

werden. Neben dem bewährten Werkstoff MBW 1500 werden für den Biegeträger auch die Warmumformstähle MBW 1900 und Tribond 1400 sowie kaltumgeformte Materialien wie Eisen-Mangan-Stähle oder der Dualphasenstahl DP-K 780Y1180T HF (dieser Stahl ist in der Entwicklung) untersucht. Im Folgenden werden die mit MBW 1500 erzielten Ergebnisse im Detail vorgestellt.

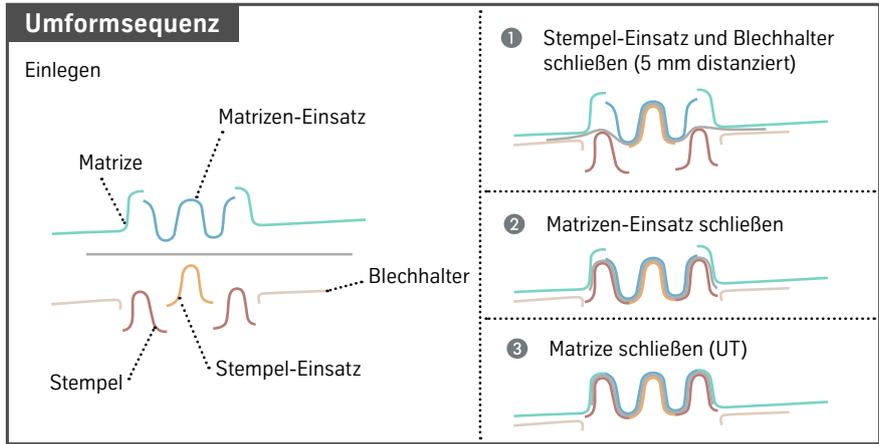
Durch seine Wellenform bildet der Biegeträger sechs Stege in Aufprallrichtung der Barrieren und hat somit eine entsprechend hohe Biegesteifigkeit. Die Tiefe der Stege nimmt zur Mitte hin zu, um so am Aufprallpunkt den größten Widerstand gegen Durchbiegen und Knicken zu erzielen. Im RCAR Bumper Test trifft die Barriere, bedingt durch die vorgegebene Höhe der Längsträger, oberhalb der

Crashbox-Mittelebene auf den Biegeträger, was ein zusätzliches Belastungsmoment um die Fahrzeug-Querachse erzeugt, ❸. Gezielt im Grund der Wellenform eingebrachte Versteifungsfelder erhöhen für diesen Fall die Steifigkeit des Trägers gegen Aufbiegen. Die globale Krümmung des Trägers nach vorn, die Tiefe der Stege sowie die Anzahl und Ausformung der Versteifungsfelder ermöglichen durch ihr gezieltes Zusammenspiel eine auf 1,7 mm reduzierte Blechdicke. Auf diese Weise entsteht ein Gewichtsvorteil von 2 kg im Vergleich zum Referenzsystem.

Die Warmumformung ermöglicht bei sehr geringer Rückfederung (Abweichungen von der Werkzeuggeometrie) hohe Umformgrade, sodass mit ihr komplexe Bauteilformen realisierbar sind. Die von

den betrachteten Crashlastfällen abgeleitete Form des Biegeträgers ist umformtechnisch sehr anspruchsvoll. Denn die Wellenform des Trägers erfordert in Verbindung mit seiner Profiltiefe und den eingebrachten Versteifungsfeldern normalerweise mehrere Ziehstufen. Dies wäre beim Warmumformen, wenn überhaupt, nur mit großem Aufwand realisierbar. ThyssenKrupp ist es jedoch gelungen, die komplexe Bauteilgeometrie für Warm- und Kaltumformstähle mit einem intelligenten Werkzeugkonzept und mit nur einem Pressenhub zu erzeugen.

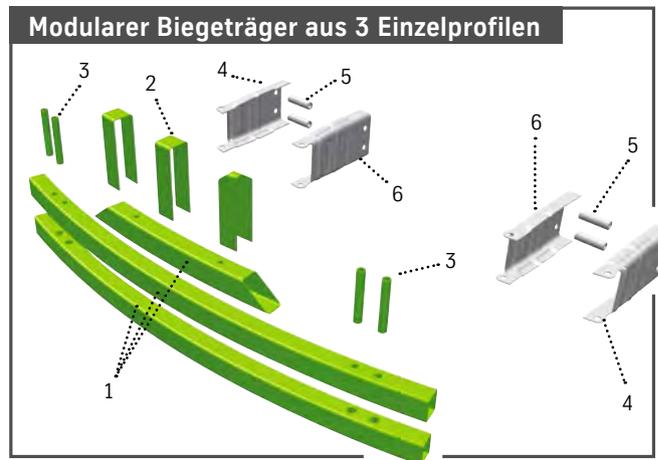
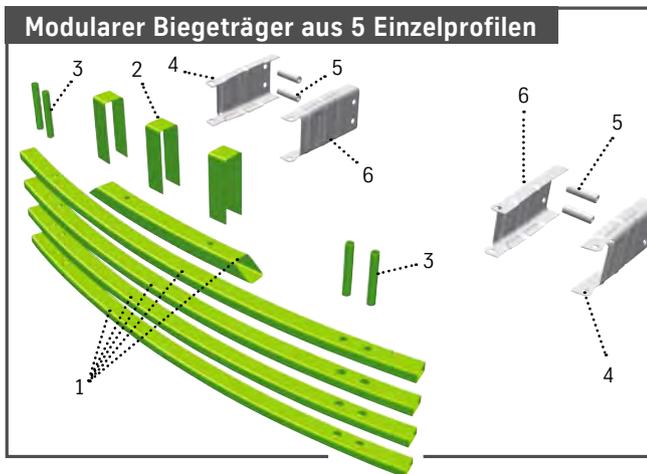
Um auch für die Warmformgebung den eigentlich erforderlichen Umformprozess mit zwei bis drei Werkzeugstufen zu erreichen, wurde ein neues, fünfteiliges Werkzeugkonzept mit abgestimmter Kinematik entwickelt. Es erzeugt in einem einzigen Zug die kom-



4 Schematische Darstellung des Werkzeugkonzepts und Prozessablauf der Warmformgebung

plexe Bauteilgeometrie. Beim Durchlaufen der einzelnen Prozessschritte wird mit mehreren, entgegengesetzt wirken-

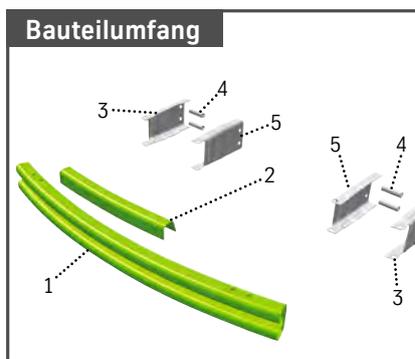
den Ziehrichtungen umgeformt. Das Werkzeug ist im Oberteil zweiteilig und im Unterteil dreiteilig, um das schritt-



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Modularer Biegeträger (5 Profile)	DP-K® 590Y980T	GI40	1,00 mm	4,47 kg
2	Blechspangen	CR300LA	GI40	1,00 mm	0,27 kg
3	Hülsen für Biegeträger (4 Stück)	S355J	U		0,28 kg
4	Crashbox-Schalen außen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,40 kg
5	Hülsen für Crashboxen (4 Stück)	C22	U		0,44 kg
6	Crashbox-Schalen innen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,48 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug (inkl. 0,52 kg Befestigungsmittel)					8,86 kg

Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Modularer Biegeträger (3 Profile)	DP-K® 590Y980T	GI40	1,30 mm	4,46 kg
2	Blechspangen	CR300LA	GI40	1,00 mm	0,30 kg
3	Hülsen für Biegeträger (4 Stück)	S355J	U		0,28 kg
4	Crashbox-Schalen außen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,40 kg
5	Hülsen für Crashboxen (4 Stück)	C22	U		0,44 kg
6	Crashbox-Schalen innen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,48 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug (inkl. 0,52 kg Befestigungsmittel)					8,88 kg

5 Modulare Stoßfängersysteme aus fünf (links) beziehungsweise drei Einzelprofilen (rechts)



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Biegeträger als Rollprofil	MS-W® 900Y1180T	EG53	1,60 mm	4,59 kg
2	Aufsatz Biegeträger	MS-W® 900Y1180T	EG53	1,60 mm	0,64 kg
3	Crashbox-Schalen außen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,40 kg
4	Hülsen für Crashboxen (4 Stück)	C22	U		0,44 kg
5	Crashbox-Schalen innen	DP-W® 330Y580T	EG53	2,30 mm	1,48 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug (inkl. 0,24 kg Befestigungsmittel)					8,79 kg

6 Rollprofilierter Biegeträger

weise Formen der Wellen von innen nach außen zu ermöglichen. Der Einzug der Platine in die Form wird allein durch die relative Position der einzelnen Werkzeigteile zueinander eingestellt und kann somit im Prototyping feinjustiert werden. Dazu gehört insbesondere die genaue Dosierung des über die Prägefelder eingebrachten Materialüberschusses beim Schließen des Matrizeneinsatzes, 4.

Insgesamt ist es mit diesem neu entwickelten Prozess gelungen, auch in stark beanspruchten Bereichen die Materialausdünnung unter 25 % zu halten. Die Durchgangslöcher für die Befestigungshülsen der Crashbox werden bereits in die Formplatte eingebracht, nach dem Warmumformen und Aushärten erfolgt der finale Beschnitt per Laser.

MODULARER BIEGETRÄGER

Eine zunehmende Variantenvielfalt im Modellangebot der Automobilhersteller erfordert neue, modulare Konzepte. Attraktiver Leichtbau in Verbindung mit leicht variierbaren Fertigungsmethoden als gemeinsame Basis für alle Fahrzeuge ist ein überzeugender Ansatz. Der modulare Biegeträger ist eine solche Lösung. Er ist bis zu 17 % leichter und, je nach Anzahl der Modulträger, bis zu 5 % kostengünstiger als der Referenz-Biegeträ-

ger. Aufgebaut aus möglichst einfachen Teilkörpern, erfüllen die modularen Systeme durchweg die Craschanforderungen. Sie sind aus drei oder fünf aufeinander gestapelten Einzelprofilen aufgebaut, 5. Die Profile haben einen einfachen Rechteckquerschnitt und werden mit konstantem Radius inline nach dem Rollprofilieren gebogen, um Kosten zu sparen.

Zur Erreichung der notwendigen Überdeckung im Crashlastfall RCAR Bumper schließt der Profilverbund nach oben hin jeweils mit einem kürzeren Profilaufsatz ab. Aus Stabilitätsgründen sind die Profile sowohl untereinander verklebt als auch mit drei verschweißten Blechspannen verbunden. Hierbei kommen sowohl herkömmliche Schweißverfahren wie Metall-Schutzgasschweißen als auch ein weiterentwickeltes, einseitiges Widerstandspunktschweißen zum Einsatz. In Verbindung mit den doppelwandigen Stegen entwickelt der Profilverbund so eine hervorragende Steifigkeit bei Intrusionslastfällen. Die Crashboxen sind mithilfe von Distanzhülsen und ohne zusätzliche Anschlussplatte mit dem Profilverbund verschraubt.

Der Vorteil des modularen Aufbaus liegt auf der Hand: Durch Variation von Profilanzahl, Blechdicke, Stahlsorte oder Profilquerschnitt lässt sich das Stoßfängerkonzept flexibel auf Variablen wie Fahrzeuggewicht oder Bauraum abstim-

men. Dabei ist auch eine Mischung verschiedener Stähle und Blechdicken in einem Modulpaket denkbar. Die maximale Gewichtsreduzierung von etwa 17 % wird mit einem Verbund aus fünf Profilen erzielt, die im unteren Bereich aus MBW 1500 und im oberen Bereich aus DP-K 590Y980T bestehen. Aber auch durchgängig aus dem Werkstoff DP-K 590Y980T (fünf Profile mit 1,0 mm Dicke oder drei Profile mit 1,3 mm Dicke) gefertigte Lösungen zeichnen sich durch einen Gewichtsvorteil von mehr als 13 % im Vergleich zur Referenz aus. Die Kosten schwanken im Vergleich zur Referenz zwischen moderaten Leichtbaukosten von 0,80 €/kg für den Verbund aus fünf Profilen und einem Kostenvorteil von etwa 5 % für den Verbund aus drei Profilen.

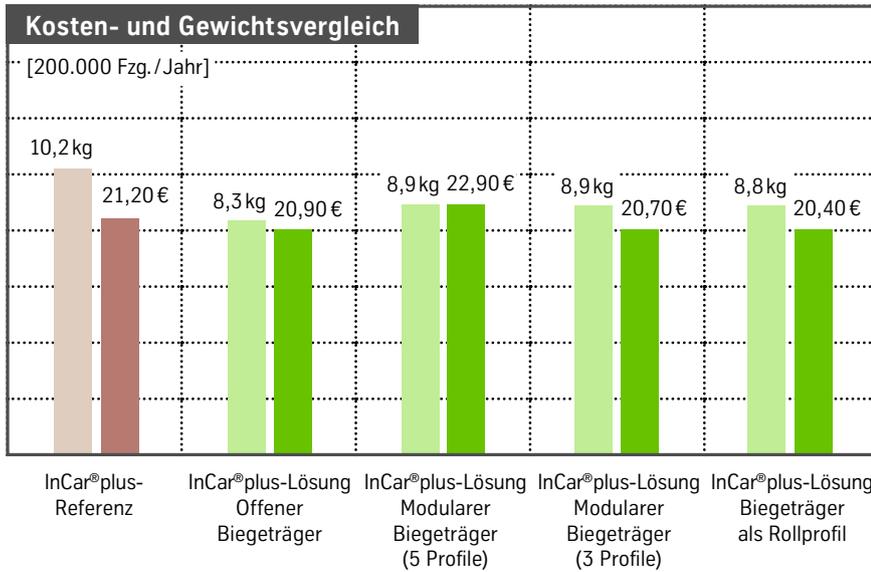
BIEGETRÄGER ALS ROLLPROFIL

Der InCar plus-Biegeträger aus einem Rollprofil zeichnet sich durch seinen einfachen Aufbau und ein Leichtbaupotenzial von 14 % bei einem Kostenvorteil im Vergleich zur Referenzlösung aus. Er besteht aus dem höchstfesten Stahl MS-W 900Y1180T mit einer Dicke von 1,6 mm, einem Aufsatz für die notwendige Überdeckung im RCAR Bumper Test und der Crashbox, 6. Dieses Konzept besticht durch die einfache Fertigung der Einzelkomponenten. Der Querschnitt des Biegeträgers in Form eines „B“ erhöht die Steifigkeit in Intrusionsrichtung beim RCAR Bumper Test und beim Lastfall Pfahlaufprall, sodass alle Tests bestanden werden.

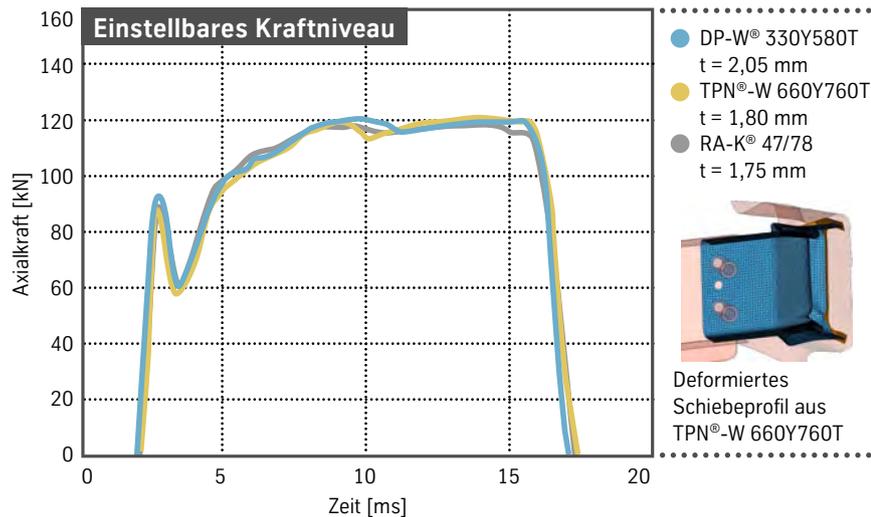
KOSTENVERGLEICH DER BIEGETRÄGER-KONZEPTE

Der Kostenvergleich der Trägerkonzepte basiert auf den in InCar plus definierten Stückzahlen, 7. Sowohl die Herstellung der Einzelteile als auch deren Zusammenbau zu montagefertigen Systemen sind auf ihre Machbarkeit hin überprüft. Die dazu erforderlichen Fertigungsanlagen entsprechen realistischen Vorgaben. Eine Analyse der Werkzeuginvestitionen zeigt die Vorteile der flexiblen modularen Biegeträger im Vergleich zu Einzelkonzepten, die auf unterschiedliche Fahrzeugkonzepte übertragen werden.

Biegeträger aus verschiedenen Schalenbauteilen benötigen für jede neue Geometrie auch neue Werkzeuge. Dage-



7 Kosten- und Gewichtsvergleich der untersuchten Biegeträgersysteme



8 Deformiertes Schiebepprofil und Axialkraftverlauf für verschiedene Stahlsorten und Blechdicken

gen ist ein modularer Verbundaufbau mit gleichen Fertigungsanlagen für Träger in verschiedenen Fahrzeugsegmenten geeignet. Denn bei ihm lassen sich Blechdicke, Länge, Krümmung und Stapelung der Einzelprofile ohne großen Mehraufwand skalieren. Dadurch entsteht, je nach Stückzahlenszenario, ein zusätzlicher Kostenvorteil – und das trotz des höheren Aufwands für den Zusammenbau durch die höhere Anzahl von Einzelteilen.

KONZEPTE FÜR DIE CRASHBOXEN

Die Crashboxen sind bis auf den Endenbeschnitt für alle oben vorgestellten Bie-

geträger gleich. Sie bestehen aus dem Werkstoff DP-W 330Y580T, die Bleche sind 2,3 mm dick und wirken als sogenannte *Faltbox*. Die beim AZT auftretende Axialkraft wird vom Sickenbild und der Blechdicke so aufgefangen, dass sich keine plastischen Dehnungen >2 % im Längsträger ausbilden. Der beanspruchte Deformationsraum entspricht dabei dem der Referenz. Durch Einsatz von Werkstoffen mit höherer Festigkeit, wie dem Dreiphasenstahl TPN-W 660Y760T oder dem Complexphasenstahl CP-W 660Y760T, sind bis zu 13 % geringere Blechdicken und damit verbunden weitere Gewichtseinsparungen möglich.

Eine zweite Variante der Crashboxen, mit gänzlich anderer Wirkweise, ist das Schiebepprofil, auch *Sliding Absorber Box* genannt, ⑧. Hier baut nicht ein *Faltprozess*, sondern das gleichmäßige Eintauchen der abgestuften Crashboxbereiche ineinander die Aufprallenergie ab. Dieser Vorgang bewirkt ein *Walken* des Materials über einen fortlaufenden S-Schlag und damit ein sehr gleichmäßiges Kraftniveau in Axialrichtung.

Die Halbschalen dieser Crashbox-Variante entstehen in einem dreistufigen Verfahren. Beim Schließen des Oberteils gegen den Luftboden wird der Boden des Bauteils geprägt, und im weiteren Prozess werden die seitlichen Flansche des Bauteils frei hochgestellt.

Die Untersuchungen mit verschiedenen Werkstoffgüten und Blechdicken zeigen, dass ein Schiebepprofil relativ einfach auf unterschiedliche Kraftniveaus eingestellt werden kann. Dank der über den Deformationsweg weitgehend konstanten Energieaufnahme sind geringere Blechdicken als bei einer *Faltbox* möglich. Bei gleicher Stahlsorte lässt sich die Blechdicke um 0,25 mm (11 %) verringern, beim Einsatz höherfester Werkstoffe wie etwa CP-W 660Y760T oder RA-K 47/78 sogar um bis zu 0,55 mm (24 %).

INTEGRATION DES ABSORBERS

Das Funktionsprinzip des in der Referenzstruktur eingesetzten Absorbers ist auch in das folgende, virtuell untersuchte Stoßfängerkonzept integriert. Beim IIHS-Lastfall SORB trifft die 25%-Barriere den unteren Längsträger normalerweise nicht. Der Absorber bezieht jedoch die tragende Vorderwagenstruktur mit in die Energieabsorption ein und begrenzt somit die Deformation der Fahrgastzelle (siehe auch Beitrag „Benchmark 2.0: die aktualisierte Referenzstruktur“ ab Seite 86). Während in der Referenz der Absorber-Keil am Längsträger angeschweißt wird, ist er im virtuellen Stoßfängerkonzept direkt am Biegequerträger angebunden und damit ohne Eingriff in den Rohbau als Anbauteil realisierbar. Auf diese Weise sorgt der Absorber im Vergleich zur Referenzlösung für eine um 19 % verminderte Stirnwandintrusion. Gleichzeitig ist diese Lösung leichter und vermindert somit das durch den Lastfall SORB eingebrachte Zusatzgewicht um etwa 8 % bei vergleichbaren Kosten.

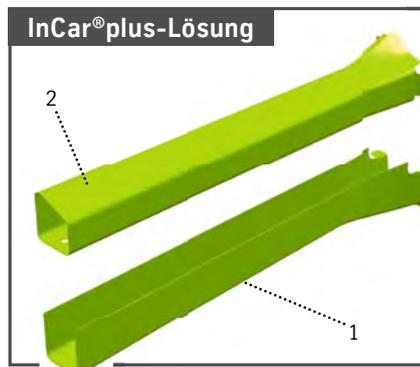
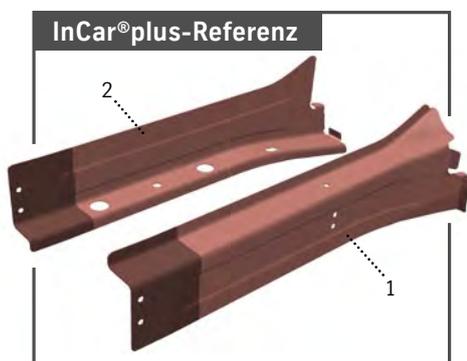
LEICHTE LÄNGSTRÄGER DURCH OPTIMIERTE FERTIGUNGSVERFAHREN

Der Längsträger von InCar plus ist ein völlig neuartiges Stahl-Mehrkammerprofil. Bei der Kombination eines Schalenbauteils und eines T³-Profils kommen für den Serieneinsatz entwickelte Fertigungstechnologien zum Einsatz, mit denen die Herstellung hochpräziser Bauteile möglich ist. Durch den modularen Aufbau ist ein solches System leicht auf andere Fahrzeugklassen adaptierbar. Am Beispiel des Längsträgers werden damit 23 % Gewichtsreduktion und 10 % Kostenvorteil bei gleichzeitig überzeugender Performance bezüglich Crash, Steifigkeit und globalen Eigenmoden erreicht. Mit einer besonders progressiven Werkstoffkombination steigt der Gewichtsvorteil sogar auf bis zu 31 % an, bei einem Kostenvorteil von 8 %.

Die unteren Längsträger sind zentrale Einheiten jeder Vorderwagenstruktur und tragen bei einem Unfall im Hauptlastpfad wesentlich zum Schutz der Fahrgastzelle bei. Zusätzlich beeinflussen die Längsträger die Torsions- und Biegesteifigkeiten des gesamten Fahr-

zeugs. Längsträger sind üblicherweise Schalenkonstruktionen mit Aufnahme- punkten für Hilfsrahmen, Fahrwerk und unter Umständen Motorlager. Querschotte, Verstärkungsbleche und ein abgestimmtes Sickenbild optimieren Crashperformance und Steifigkeit.

Ziele bei der Entwicklung neuer Längsträger sind Gewichts- und Kostenreduzierung bei gleichbleibender Performance. Bei der Fertigung stehen der einfache Zusammenbau der Längsträgereinheit sowie die leichte Integration in den Rohbau im Vordergrund.

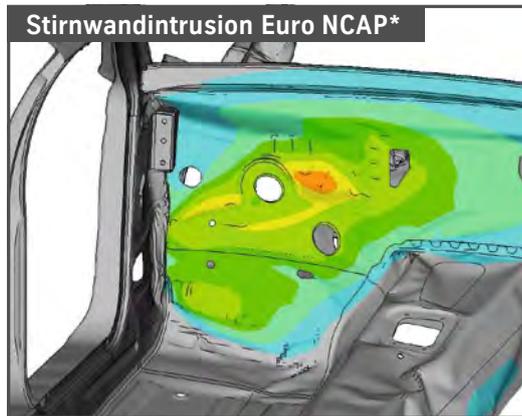


1 InCar plus Referenz-Längsträger (oben) und das entwickelte Stahl-Mehrkammerkonzept (unten)

Nr.	InCar [®] plus-Referenz	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Längsträger links außen	DP-K [®] 440Y780T	GI40	2,00 mm / 1,80 mm	3,75 kg
2	Längsträger links innen	DP-K [®] 440Y780T	GI40	2,00 mm / 1,80 mm	3,81 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug					15,12 kg

Nr.	InCar [®] plus-Lösung Variante 1	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Längsträger links unten, U-Schale	CP-W [®] 660Y760T	EG53	1,50 mm	2,98 kg
2	Längsträger links oben, T ³ -Profil	MHZ 500	GI40	1,40 mm	2,85 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug					11,66 kg

Nr.	InCar [®] plus-Lösung Variante 2	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Längsträger links unten, U-Schale	DP-K [®] 700Y980T	GI40	1,40 mm	2,78 kg
2	Längsträger links oben, T ³ -Profil	CP-K [®] 570Y780T	EG53	1,20 mm	2,44 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug					10,44 kg



2 Deformationsverhalten und Stirnwandintrusion beim Lastfall Euro NCAP mit deformierbarer Barriere

Die Referenz-Längsträger repräsentieren den aktuellen Stand der Technik und sind aus zwei tiefgezogenen L-Schalen zusammengesetzt, 1 (links oben). Die Crashboxen werden in den Längsträger eingesteckt und dort verschraubt. Aufnahmehülsen für die Anbindung zum Fahrwerk stützen sich an zwei Schottblechen ab und erreichen so die geforderte lokale Steifigkeit. Die Referenzstruktur berücksichtigt bereits den neuen IIHS-Lastfall SORB (siehe Beitrag „Benchmark 2.0: die aktualisierte Referenzstruktur“ ab Seite 86).

Der InCar plus-Längsträger, 1 (links unten), besteht aus einem geschlossenen T³-Profil und einer darunter angeordneten U-Schale. Das Mehrkammerprofil spart nicht nur Gewicht, sondern bietet auch durch die Längstrennung im Vergleich zu einteiligen Profillösungen eine bessere Zugänglichkeit für das Fügen von Verstärkungsbauteilen vor dem Zusammenbau der Unterbaugruppe des Längsträgers. So können die beiden Achsaufnahmen einfach in der U-Schale per Widerstandspunktschweißen fixiert werden. Zum Einstellen der lokalen Steifigkeiten ist die Blechdicke der U-Schale im Vergleich zum T³-Profil erhöht. Lochmuster, Mittelsteglage und Wandstärke sowie die Wahl der eingesetzten Werkstoffe hängen vom Gewicht des Fahrzeugs ab.

CRASHTESTS VIRTUELL ERFOLGREICH ABSOLVIERT

Die Fahrzeughersteller legen die Fahrzeugstrukturen unter anderem anhand der AZT-Crashreparaturtests aus. Versicherungen bewerten in Crashtests die

Beschädigungen am Fahrzeug und nehmen anhand der daraus resultierenden Reparaturkosten die Typklasseneinstufung vor. Bei geringen Aufprallgeschwindigkeiten sollten deshalb in der Fahrzeugstruktur keine plastischen Dehnungen >2 % auftreten.

Bei höheren Geschwindigkeiten ist der Hauptlastpfad so ausgelegt, dass die Aufprallenergie in plastische Verformung umgewandelt wird, damit die Fahrgastzelle möglichst wenig deformiert wird. Als Test ziehen die Automobilhersteller hierfür den Euro-NCAP-Lastfall mit deformierbarer Barriere heran, der höhere Anforderungen als der US-NCAP-Lastfall stellt. Der vom IIHS entwickelte Test Small-Overlap-Rigid-Barrier stellt aufgrund der geringen Überdeckung mit der Barriere von nur 25 % besonders hohe Anforderungen an die Fahrzeugstruktur.

Das Stahl-Mehrkammerprofil wurde anhand dieser Lastfälle untersucht. Beim Lastfall Euro NCAP mit deformierbarer Barriere bildet der Längs-

träger das gewünschte Knickverhalten aus, der Mittelsteg trägt dabei entscheidend zur Energieabsorption bei, 2. Die Intrusionswerte liegen, wie auch beim Lastfall SORB, unterhalb der definierten Grenzwerte. Der AZT-Lastfall wird mit plastischen Dehnungen von weniger als 2 % in der tragenden Fahrzeugstruktur ebenfalls erfolgreich bestanden.

Die Längsträger haben großen Einfluss auf globale Biege- und Torsionssteifigkeiten sowie auf die globalen Eigenmoden. Um die Vergleichbarkeit mit der Referenz weiter zu gewährleisten, ist der Konzeptlängsträger annähernd gleich dimensioniert. Dennoch erreicht er höhere globale Steifigkeiten als gefordert. Der erste globale Eigenwert übertrifft die Performance der Referenz, die angestrebte Spreizung zwischen den globalen Moden von 3 Hz bleibt gewährleistet. Durch die am Mittelsteg angebotenen Fahrwerksaufnahmen liegen die lokalen Steifigkeiten durchgängig über den geforderten Werten.



3 T³-Pressenadapter: aufsprungfreies Halten der U-Schale durch verdrängbare Wände

WIRTSCHAFTLICHER T³-FERTIGUNGSPROZESS

Die Umsetzung der T³-Technologie in der Serie steht im Fokus der Verfahrensauslegung und wurde daher auch im Prototyping durchgängig berücksichtigt. Es sind grundsätzlich drei Prozessschritte erforderlich: Platinschnitt, U-Formung und O-Formung mit prozessintegriertem Abstellen der Schweißflansche. Das Fügen der Profilkanten per Laserstrahlschweißen schließt die Herstellung ab. Auch dafür stehen serientaugliche Spann- und Schweißeinheiten bereit.

Der Prototyp des T³-Längsträgerprofils entsteht in einem sogenannten T³-Pressenadapter auf einer konventionellen Tiefziehpresse. Der Vorteil des Adapters ergibt sich aus dem bereitgestellten Werkzeuggerüst zum automatisierten Ablauf der Formgebung. Die Werkzeuge können für neue Profilformen kostengünstig ausgetauscht werden. Ein Kennzeichen des Prozesses ist der Verbleib der U-Form im Untergesenk und damit rückfederungsfreie Positionierung unter der O-Werkzeugform, ③. Das gewährleistet ein prozesssicheres Schließen und Kalibrieren des Profils. Neben der im Werkstoffkonzept 1 eingesetzten Stahlsorte MHZ 500 wurde zum Nachweis der Machbarkeit auch ein CP-K 570Y780T im Prototyping erprobt. Eine Serienfertigung mit dem T³-Pressenadapter ist bei kleineren bis mittleren Losgrößen wirtschaftlich. Bei großen Stückzahlen ist die Übertragbarkeit des Prinzips auf Transferpressen möglich.

FERTIGUNG DER U-SCHALE

Maßnahmen zur Rücksprungkompensation werden häufig iterativ am beschnittenen Bauteil durchgeführt. Besteht insbesondere bei höherfesten Werkstoffen nicht mehr die Möglichkeit, über Ankonstruktionen die Maßhaltigkeit des Bauteils einzustellen, so muss der elastische Rücksprung in einem Folgeprozess aufwendig kompensiert werden. Bereits bei der Bauteilgestaltung eingebrachte Versteifungsfelder reduzieren zwar den Aufsprung der Zargen, führen als Initialsicken jedoch zum vorzeitigen Faltenbeulen des Bauteils bei Axialbelastung. Diese Instabilität wäre nur durch dickere Bleche und damit mehr Gewicht auszugleichen.

Wenn innerhalb einer konventionellen Prozesskette die Zahl der Beschnittpro-

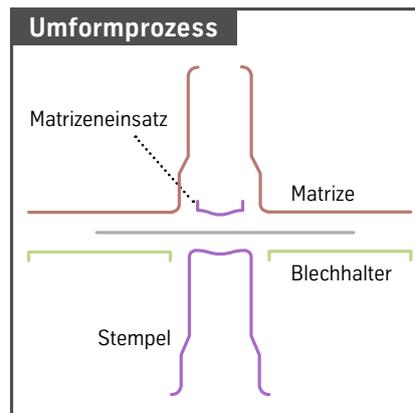
zessionen reduziert werden kann, so sinken Wartungsaufwand, Investitionskosten und Energiebedarf. Die Längsträger-Unterschale wird deshalb durch beschnittreduziertes kalibrierendes Tiefziehen gefertigt. Ausgangspunkt ist eine Minimalformplatte, die im beschnittfreien Bereich bereits ihre Endkontur hat. Dies kann durch eine optimierte Schachtelung den Materialeinsatz erheblich reduzieren. Im ersten Prozessschritt entsteht aus der Minimalformplatte per Tiefziehen zunächst eine Vorform ohne Rückfederungskompensation. Das Ziehteil ist dabei um die für das Kalibrieren notwendige Stauchzugabe vergrößert. Dies wird durch eine Verlängerung der Zargen und eine wellenförmige Verprägung des Bodens erreicht.

Damit auch Bauteile mit Schweißflansch auf diese Weise gefertigt werden können, hat ThyssenKrupp in einem Werkzeugsatz sowohl die für das Stahl-Mehrkammerprofil benötigte, flanschlose Variante der U-Schale als

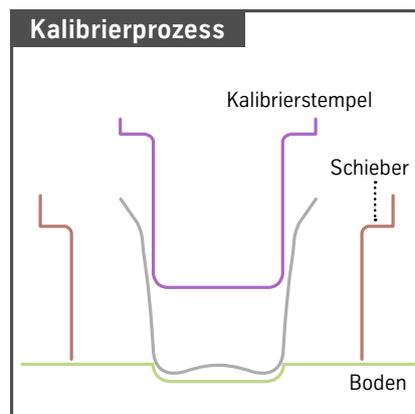
auch eine Variante mit abgestelltem Schweißflansch realisiert. Auch dieses Verfahren ist für die zusätzlichen Werkstoffgüten MHZ 500 und DP-K 700Y980T auf Realisierbarkeit überprüft worden.

Ohne den sonst obligatorischen Randbeschnitt muss die Kontur des vorgezogenen Bauteils möglichst exakt der benötigten Geometrie für das nachfolgende Kalibrieren entsprechen. Prozessbedingte Formabweichungen sind auf ein Minimum zu reduzieren. Dies macht einen modifizierten Ziehprozess erforderlich. Während der Umformung sichert ein Matrizeneinsatz die Platine gegen Verrutschen. Ein vergrößerter Ziehspalt und die permanente, ebenfalls vergrößerte Distanzierung des Blechhalters zur Matrize sorgen zudem für gleichmäßige Ziehbedingungen. Auf diese Weise bleibt der Einfluss von Werkzeugtoleranzen, Werkzeugverschleiß und Chargenschwankungen beim Blech minimal, ④.

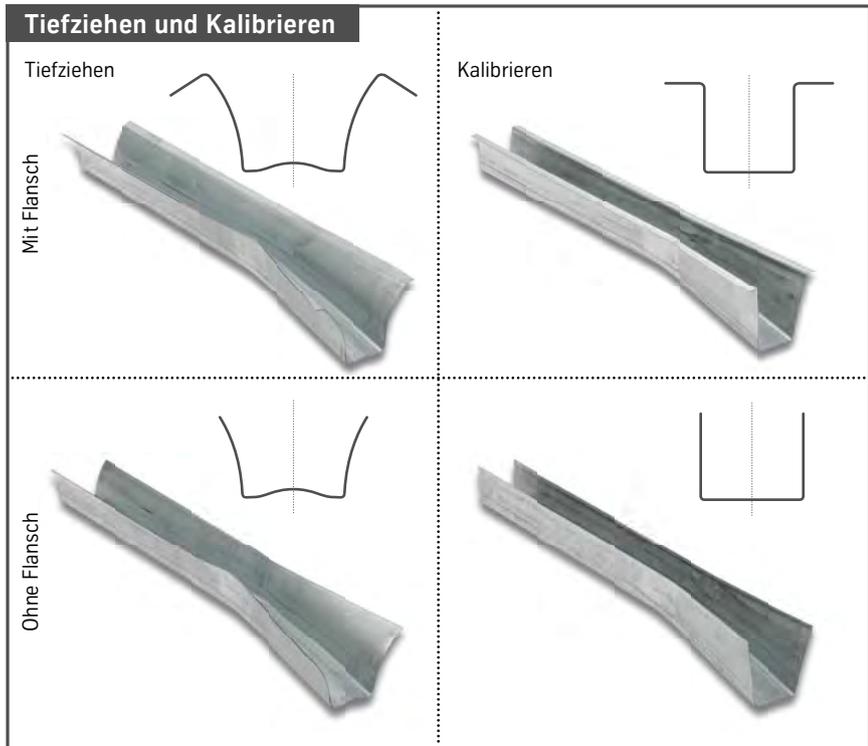
Eine Druckspannungsüberlagerung durch Stauchung kompensiert bei der



④ Aufbau des Ziehwerkzeugs (links), vorgezogene U-Schale ohne Schweißflansch (rechts)



⑤ Aufbau des Kalibrierwerkzeugs (links), Kalibrieren der U-Schale mit Schweißflansch (rechts)



6 Kompensation der Formabweichungen

nachfolgenden Kalibrierstufe die beim Ziehen entstehenden Formabweichungen. Seitliche und stirnseitige Schieber sowie das Werkzeugunterteil bilden die geteilte Kalibriermatrize. Der Stempel wird mithilfe von Einsätzen an die jeweilige Bauteilvariante angepasst. Für das flanschlose Bauteil erhält der Stempel eine Kalibrierkante, für das Bauteil mit Flansch wird eine Schulter eingesetzt, 5.

Stempel und Schieber bewegen sich zunächst gleichzeitig, bis die Schieber mechanisch verriegelt werden. Das

Material ist damit rundum werkzeugseitig abgesperrt. Im weiteren Prozessverlauf fährt der Kalibrierstempel auf den unteren Totpunkt, wobei die verlängerten Flansche und Zargen längs gestaucht und der vorgeprägte Boden eingeebnet werden. Die vorher inhomogene Rückfederung wird in Richtung der Blechebene überführt, wo sie nur noch geringen Einfluss auf die Bauteilmaßhaltigkeit hat, 6. Nicht vermeidbare Beschnitte am breiten Kopfende des Längsträgers erfolgen erst danach.

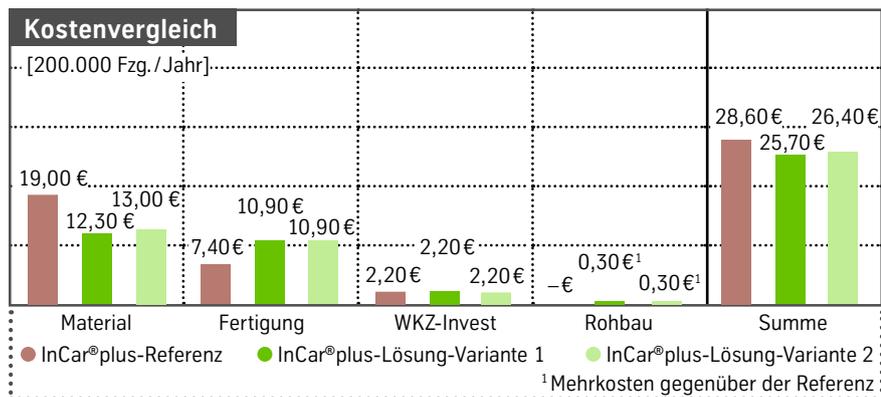
PROZESSVORTEILE SORGEN FÜR KOSTENVORTEILE

Die hohe Maßhaltigkeit, der reduzierte Materialeinsatz, die kurze Prozesskette mit einfachen Werkzeugen sowie weniger Beschnitte sind wesentliche Vorteile im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen. Außerdem sind die beiden Anbindungen für den Hilfsrahmen leicht zugänglich in die U-Schale zu integrieren. Damit vereint das gebildete Stahl-Mehrkammerprofil die Vorteile einer Schalenlösung mit der leichtbau-optimierten Profilbauweise.

Der Längsträger wird als abgeschlossene Unterbaugruppe in den Rohbau integriert. Nach dem Fügen des T³-Profils und der U-Schale werden mit gängigen Verfahren Bauteile wie Prallplatte, Absorber, die Unterbaugruppe Federbeindom, Längsträgerboden vorne und Stirnwand-Querträger gefügt. Anschließend wird diese Gruppe als Ganzes in den Rohbau eingebracht.

Der Kostenvergleich basiert auf dem in InCar plus durchgängig angesetzten Stückzahl- und Fertigungsszenario, 7. Durch die geringeren Blechdicken und den Einsatz von Formplatinen (weniger Verschnitt) sind die Materialkosten der Werkstoffvariante 1 im Vergleich zu den beiden L-Schalen der Referenz um 35 % geringer. Da die Axialkräfte beim AZT-Lastfall auch vom Mittelsteg getragen und damit besser auf den Querschnitt verteilt werden, ist der Einsatz von kostengünstigen monolithischen Platinen möglich. Tailored Blanks, wie bei der Referenz eingesetzt, sind nicht mehr erforderlich. In Summe entsteht so ein Kostenvorteil von 10 % bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion von 3,5 kg pro Fahrzeug im Vergleich zur Referenzlösung.

Eine konsequent auf Leichtbau abgestimmte Material- und Blechdickenwahl und eine hohe Crashperformance schließen sich beim Mehrkammeraufbau nicht aus. Besteht das T³-Profil aus CP-K 570Y780T mit 1,2 mm Dicke und die U-Schale aus DP-K 700Y980T mit 1,4 mm Dicke (Werkstoffvariante 2), so liegen sowohl die Intrusion bei Euro-NCAP- und Small-Overlap-Rigid-Barrier-Test als auch die plastischen Dehnungen beim AZT-Test im akzeptablen Rahmen. Gleichzeitig sorgen diese Werkstoffe im Vergleich zum Hauptkonzept für eine zusätzliche Gewichtsreduzierung von 1,2 kg pro Fahrzeug.



7 Kostenvergleich der Längsträger Referenz und InCar plus

SCHLANKE A-SÄULE: BESSERE SICHT, WENIGER GEWICHT

Die neue InCar plus-A-Säule bietet im Vergleich zu konventionellen A-Säulen zahlreiche Vorteile: ein deutlich größeres Sichtfeld, hohe passive Crashesicherheit und etwa 10 % weniger Gewicht. Ein geringerer Werkstoffeinsatz und innovative Fertigungstechnologien ermöglichen ein Effizienz-Plus zu sehr moderaten Leichtbaukosten von 1,57 €/kg. Kostenvorteile entstehen bei der Integration des A-Säulen-Konzepts in eine modellübergreifende Gleichteilstrategie.

Hohe strukturmechanische Anforderungen sowie das Fahrzeugdesign lassen die A-Säulen aktueller Fahrzeuggenerationen deutlich in die Breite wachsen. Infolgedessen werden größere Zonen des Sichtfelds verdeckt und dadurch wächst die Gefahr, andere Verkehrsteilnehmer nicht oder nicht rechtzeitig zu sehen, ❶. Der deutlich reduzierte Querschnitt der im Rahmen des Projekts InCar plus entwickelten A-Säule vergrößert das freie Sichtfeld und trägt damit erheblich zur Unfallprävention bei. Zusammen mit dem dadurch gesteigerten Fahrkomfort wird ein zusätzlicher Kundennutzen geschaffen, der sich positiv auf die Kaufentscheidung auswirken kann. Ein zweites, nicht weniger wichtiges Ziel ist die Gewichtsersparnis.

Doch Sichtfeldoptimierung und Gewichtsreduktion stehen im Zielkonflikt mit den Erfordernissen der Crashesicherheit. Zudem stellt die komplexe Geometrie typischer A-Säulen hohe Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe und Fertigungsverfahren. Zur Beurteilung des neuen A-Säulen-Konzepts dient eine mehrteilige Schalenkonstruktion als Referenz, die alle heute maßgeblichen strukturmechanischen Anforderungen erfüllt und damit den Stand der Technik 2014 repräsentiert, ❷.

Bei InCar plus werden die Ziele mit einem warmumgeformten, geschlossenen Profil mit integrierter Scheiben-

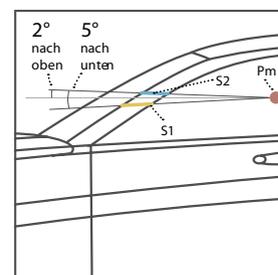
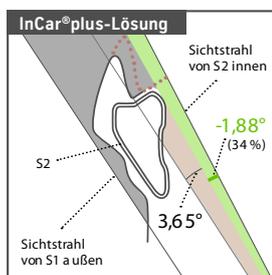
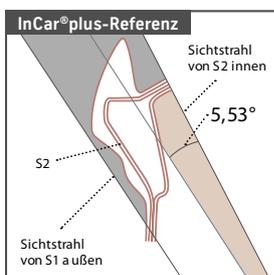
auflage erreicht, das den vorgegebenen Bauraum der Referenz optimal ausnutzt, ❸. Dieses neue A-Säulen-Konzept verringert den Sichtverdeckungswinkel signifikant um 34 % und die Masse um 10 % beziehungsweise 3,2 kg pro Fahrzeug.

Die strukturmechanische Absicherung der A-Säule basiert auf den Vorgaben des Euro-NCAP-, Euro-NCAP-Pole-, IIHS-Small-Overlap-Tests sowie des Dacheindrückttests FMVSS 216a. Insgesamt erfüllt die A-Säule alle Zielwerte der jeweiligen Crashlastfälle und bietet ein der Referenzstruktur vergleichbares Crashverhalten. Gleiches gilt für die

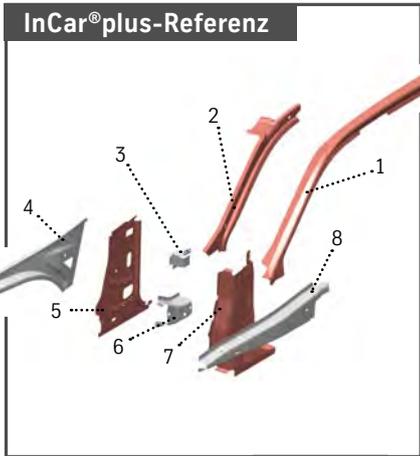
erzielten Torsions- und Biegesteifigkeiten. In Verbindung mit einer optimalen Ausgestaltung der Rückhaltesysteme lassen sich die Verletzungsrisiken so gering halten, dass die Voraussetzung geschaffen wird, im Euro-NCAP-Test fünf Sterne zu erreichen.

NEUE VERFAHREN OPTIMIEREN FERTIGUNG

Die fertigungstechnische Umsetzung der komplexen A-Säulen-Geometrie steht im Fokus der Untersuchung. Das Bauteil startet am Schweller, führt entlang der

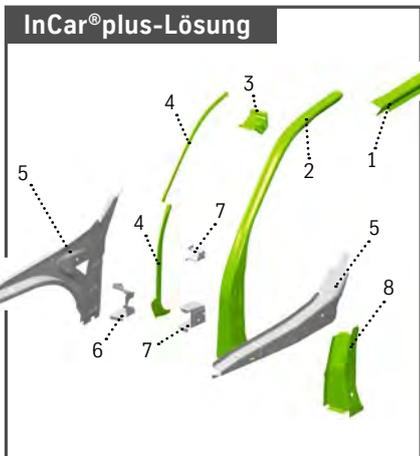


❶ Reduzierung des Sichtverdeckungswinkels



2 Bauteile der Referenz-A-Säule

Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	A-Säule oben außen links	CP-W® 660Y760T	GI40	1,80 mm	4,40 kg
2	A-Säule oben innen links	MBW® 1500	AS150	1,15 mm	1,29 kg
3	Konsole Cockpitträger links	CR300LA	GI40	1,50 mm	0,25 kg
4	Längsträger oben innen links	DP-K® 440Y780T	GI40	1,10 mm	2,07 kg
5	A-Säule unten innen links	RA-K® 400Y690T	GI40	1,10 mm	1,79 kg
6	Verstärkung A-Säule unten links	CR210IF	GI40	1,20 mm	0,64 kg
7	A-Säule unten außen links	MBW® 1500	AS150	1,20 mm	2,53 kg
8	Längsträger oben außen links	DP-K® 440Y780T	GI40	1,10 mm	2,04 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug					30,02 kg



3 Bauteile der InCar plus-A-Säule

Nr.	Bauteil	Werkstoff	Oberfläche	Dicke	Gewicht
1	Dachrahmen seitlich außen links	DP-K® 590Y980T	GI40	1,30 mm	1,00 kg
2	Profil A-Säule links	MBW® 1500	AS150/U	1,25 mm	4,95 kg
3	Konsole Dachquerträger vorne links	CR240LA	GI40	1,15 mm	0,20 kg
4	Flanschabstützung oben/unten links	CR240LA	GI40	0,90 mm	0,36 kg
5	Längsträger oben innen/außen links	DP-K® 440Y780T	GI40	1,10 mm	5,08 kg
6	Schottblech A-Säule unten	DP-K® 590Y980T	GI40	1,20 mm	0,31 kg
7	Verstärkung A-Säule oben/unten links	CR380LA	GI40	1,20 mm	0,50 kg
8	A-Säule unten außen	DP-K® 590Y980T	GI40	1,20 mm	1,01 kg
Gesamtgewicht pro Fahrzeug					26,82 kg

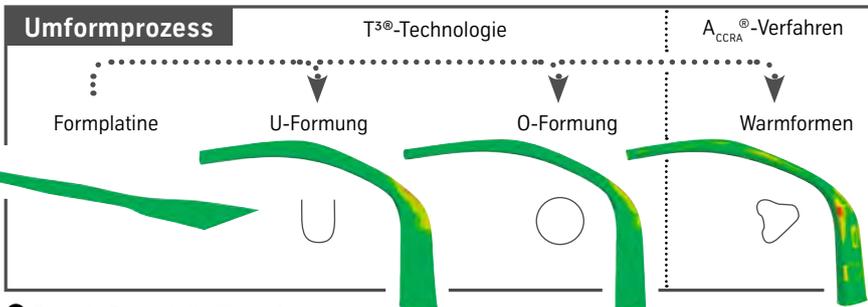
Scharniersäule, der Neigung der Windschutzscheibe, über den Bereich des Dachrahmens und endet an der Anbindung der B-Säule. Das Profil aus höchstfestem Stahl weist alle Anbindungsflächen der Referenzkonstruktion auf und folgt der vom Bauraum vorgegebenen, dreidimensionalen Gestaltung. Notwendige Verstärkungen sind mit konven-

tionellen Rohbaumethoden in das geschlossene Profil integriert. Zur Herstellung kommen zwei sich ergänzende Umformtechniken zum Einsatz, 4. Die T³-Technologie ist ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von dünnwandigen, geschlossenen oder offenen Profilen mit flexiblem Querschnitt. Zunächst wird mithilfe der

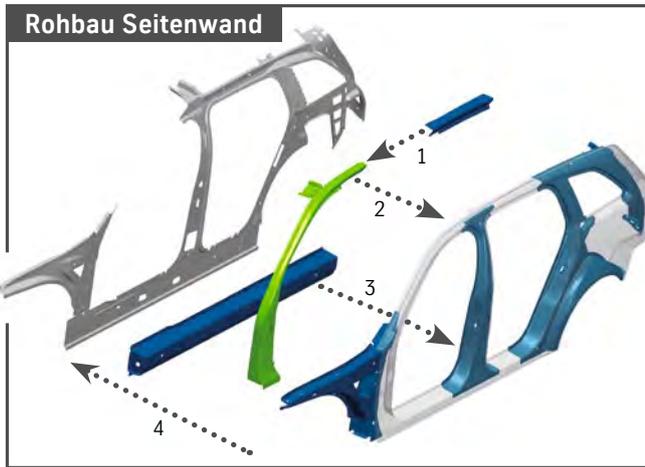
T³-Technologie ein gekrümmtes, rohrförmiges Halbzeug mit variierenden Querschnitten erzeugt. Dieses Halbzeug erhält seine finale Geometrie in einer weiteren, dann warm durchgeführten Umformoperation, dem von Linde + Wiemann entwickelten Accra-Verfahren.

Im Projekt InCar plus haben die Ingenieure ergänzend ein Industrialisierungskonzept entwickelt, das die Fertigung der geschlossenen Profile unter konventionellen Serienbedingungen und Standard-Taktzeiten ermöglicht. Das A-Säulen-Halbzeug kann dabei entweder auf einer Einzelpresse oder auf konventionellen Pressenstraßen gefertigt werden. Durch den Einsatz der Formplatinen und einer optimalen Schachtelung wird eine hohe Materialnutzung erreicht.

Accra ist ein innovatives Fertigungsverfahren für crashoptimierte, ultrahochfeste Strukturbauteile aus geschlossenen Hohl-



4 Gesamte Prozesskette T³ und Accra



Fügeomfänge Seitenwand/ Fahrzeug	InCar®plus-Referenz	InCar®plus-Lösung	Differenz
Anzahl Schweißpunkte	1.325	1.293	-32
MIG-/MAG-Schweißen	700 mm	3.856 mm	+3.156 mm
Laserstrahlschweißen	0 mm	1.440 mm	+1.440 mm
Festigkeitsklebstoff	31.470 mm	28.702 mm	-2.768 mm

5 Integration der InCar plus-A-Säule in die Seitenwand außen/innen (links) mit wichtigen Fügeparametern (rechts)

profilen (Form Blow Hardening = FBH) und vereint die Vorteile aus Innenhochdruck-Umformen und Presshärten. Die mit der T³-Technologie hergestellten Profilhalbzeuge werden beim Accra-Verfahren in einem Ofen auf Austenitisierungstemperatur (880 bis 950 °C) erwärmt und vollautomatisch in ein Warmform-Werkzeug eingelegt. Das Schließen des Werkzeugs formt das Halbzeug in den dreidimensionalen Strakverlauf ein. Abdichtelemente verschließen das Halbzeug beidseitig an den Enden. Anschließend wird das Bauteil durch Innenhochdruck (im einfachsten Fall mit Druckluft) von bis zu 600 bar in die finale Kontur umgeformt. Nach der Umformung sinkt der Innendruck und durch die Abdichtelemente wird das Bauteil von Wasser durchströmt. Die Direktkühlung führt in Abhängigkeit der Materialstärke zu einer

äußerst raschen und gleichmäßigen Abkühlrate von bis zu 350 K/s. Diese gewährleistet eine prozesssichere und reproduzierbare Gefügeumwandlung von Austenit in Martensit. Die Gefügestruktur und somit auch die Eigenschaften des fertigen Bauteils sind mit denen konventionell pressgehärteter Schalenbauteile vergleichbar. Nach der Warmumformung beschneiden Laser die Enden des Bauteils und bringen Löcher und Ausschnitte ein. Rückfederungen sind in der Regel nicht zu erwarten. Die Formtoleranzen des fertigen Bauteils liegen im Bereich von +/-0,5 mm.

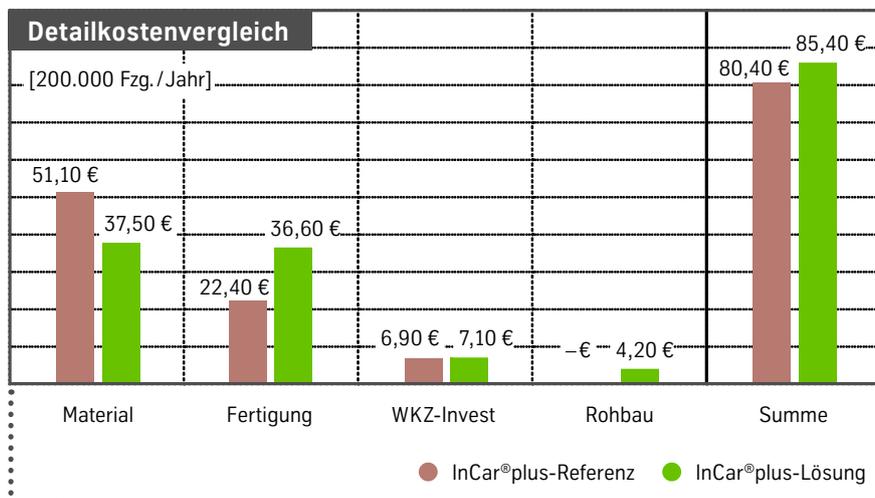
Die Verknüpfung der beiden innovativen Fertigungstechnologien ermöglicht äußerst komplexe Bauteilgeometrien, die bisher mit bekannten Fertigungstechniken und vergleichbaren Materialfestigkeiten nicht herstellbar waren. Im Zusam-

menispiel mit den technischen Merkmalen warmgeformter Hohlprofile aus MBW 1500 leisten beide Techniken einen entscheidenden Beitrag zur Gewichtsoptimierung von Strukturbauteilen. Die so hergestellten Bauteile sind in der Regel, zum Beispiel durch geänderte Fügefolgen und angepasste Fügeverfahren, problemlos in bestehende Rohbauanlagen integrierbar. 5 zeigt beispielhaft die Fügefolge der Seitenwand außen/innen.

Die abschließende Kostenbetrachtung erfolgt unter Berücksichtigung der angepassten Rohbauumfänge. In Verbindung mit dem geringeren Materialeinsatz ergeben sich attraktive Leichtbaukosten von 1,57 €/kg bei einer Gewichtseinsparung von 3,2 kg pro Fahrzeug, 6.

GLEICHTEILSTRATEGIE MIT HALBZEUG UND FERTIGEM BAUTEIL MÖGLICH

Das warmumgeformte A-Säulenprofil hat noch einen weiteren Vorteil: Es ist kundenspezifisch anpassbar – etwa in Bezug auf eine fahrgerechte geometrische Modifikation. Das bedeutet, dass sowohl die Länge der A-Säule variiert werden kann, als auch eine Übertragung des Profils in andere Modelle im Zuge einer Gleichteilstrategie möglich ist. Die Gleichteilstrategie bezieht sich somit nicht nur auf die Verwendung des gleichen Halbzeugs. Dies kann für den finalen formgebenden Fertigungsprozess sowohl eine technisch als auch wirtschaftlich interessante Option darstellen. Zudem lassen sich die Fertigungsverfahren auch auf andere Karosserie-, Fahrwerks- oder Lenkungsbauteile übertragen.



6 Leichtbau-Kostenvergleich von InCar plus-Referenz und InCar plus-Lösung

GEWICHTSREDUKTION DURCH WARM- UND KALTUMGEFORMTE B-SÄULEN

Der für die Warmumformung entwickelte, walzplattierte Stahl-Werkstoffverbund Tribond 1400 ermöglicht eine Gewichtsreduktion von 1,28 kg pro Fahrzeug im Vergleich zu einer Tailored-Tempering-B-Säule aus MBW 1500. Dabei betragen die Leichtbaukosten nur 1,47 €/kg. Auch für die Kaltumformung stehen neue Stahlwerkstoffe zur Verfügung, etwa DP-K 700Y980T, die Leichtbaupotenzial und Kostenvorteile bieten.

Die B-Säulen sind zentrale Bauteile in der Sicherheits-Fahrgastzelle eines Fahrzeugs, **1**. Vor allem beim Seitencrash müssen sie hochbelastbar sein, um den notwendigen Überlebensraum für die Passagiere zu bieten. Im Rahmen von InCar plus entwickelt ThyssenKrupp neue B-Säulen-Außenteile aus einer Reihe von innovativen Stahlprodukten, die entweder durch die Warmumformung oder Kaltumformung ihre endgültige Geometrie erhalten, **2**. Die nachfolgend beschriebenen technischen Lösungen erfüllen dabei die gleichen hohen strukturmechanischen Anforderungen wie die Referenzstruktur.

Im Fokus der Untersuchungen steht dabei die fertigungstechnische Analyse und Umsetzung der realen B-Säulen-Außenteile. Für die Gewichts- und Kostenbewertungen wird zusätzlich zu diesen B-Säulen-Außenteile auch noch eine jeweils auf deren strukturmechanische Performance angepasste B-Säulenverstärkung aus MBW 1500 betrachtet. Die

Bauteile B-Säule innen sowie Dachrahmen, Schweller und Sitzquerträger sind bei allen Varianten identisch mit der Referenz.

Der derzeit noch in der Entwicklung befindliche Tribond 1400 ist unter den warmumgeformten Werkstoffen derjenige mit der vorteilhaftesten Eigenschaftskombination. Das Material wird mit Aluminium-Silizium-Oberflächenveredelung verfügbar sein. Tribond 1400 zeichnet sich im Vergleich zu MBW 1500 durch deutlich verbesserte Biegeeigenschaften aus. Dies bewirkt im Crashfall unter anderem ein verbessertes Energieaufnahmeverhalten ohne Werkstoffversagen. Alternativen auf Seiten der Kaltumformung sind die hochfesten, kaltgewalzten Mehrphasenstähle DP-K 700Y980T (Serie) und DP-K 780YT1180T (in Entwicklung). Sie könnten sowohl als Tailored-Blank-Lösungen als auch, mit leichten geometrischen Einschränkungen, als monolithische B-Säulen-Außenteile dargestellt werden. Trotz der nochmals angehobenen Festigkeit auf

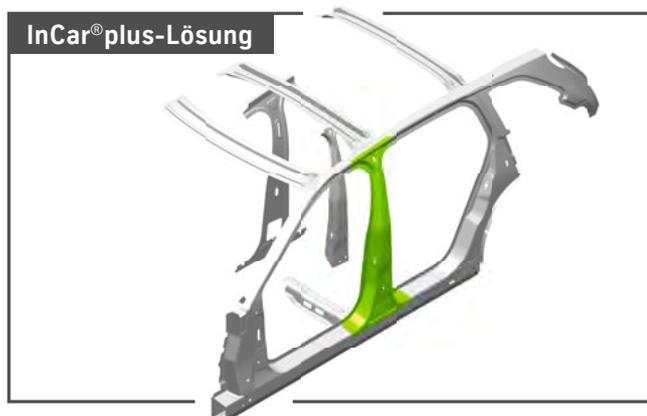
mindestens 1180 MPa zeigt der DP-K 780Y1180T als umformoptimierter Dualphasenstahl in der Festigkeitsklasse 1200 MPa nahezu das gleich Potenzial hinsichtlich der geometrisch möglichen Bauteilkomplexität wie der Stahl in der niedrigeren Festigkeitsklasse.

STRUKTURMECHANISCHE ABSICHERUNG

Alle Lösungen sind auf den Seitencrash-Lastfall IIHS abgestimmt. Die Knicksicherheit im oberen Bereich stellt bei den einzelnen Lösungen jeweils eine in der Materialdicke angepasste Verstärkung aus pressgehärtetem MBW 1500 sicher. Für den fertigungstechnisch anspruchsvollen Fußbereich der B-Säulen-Außenteile bestimmt darüber hinaus die Materialdicke das Umformvermögen des verwendeten Stahls. **3** zeigt exemplarisch die Bewertung des IIHS-Tests für die Lösung aus dem kaltumgeformten neuen Mehrphasenstahl DP-K 700Y980T in der Materialdicke 1,70 mm. Die Verformung der Struktur liegt im grünen Bereich der Bewertungsschablone. Der Insassenschutz ist somit gewährleistet.

UMFORMEIGNUNG UND FÜGETECHNIK NACHGEWIESEN

Die Referenz und alle alternativen Varianten wurden hinsichtlich ihrer fertigungstechnischen Eignung für die Warmumformung beziehungsweise Kaltumformung und Fügen grundlegend untersucht. Durch das hohe Festigkeitsniveau der Referenzlösung ist bei den kaltumgeform-



1 B-Säule außen im Seitenrahmen der Karosserie

Variante	Oberer Bereich		Unterer Bereich (Fuß)		Verstärkung		Gewicht
Referenz	MBW® 1500 1,70 mm Tailored Tempering				MBW® 1500	2,10 mm	15,42 kg
Warmumformung							
Variante 1	MBW® 1900 1,50 mm Tailored Tempering				MBW® 1500	2,10 mm	14,22 kg
Variante 2	TriBond® 1400 1,30 mm				MBW® 1500	2,55 mm	14,14 kg
Kaltumformung: B-Säule außen in Tailored-Blank-Ausführung							
Variante 3	DP-K® 700Y980T	1,70 mm	DP-K® 330Y590T	1,80 mm	MBW® 1500	2,10 mm	15,70 kg
Variante 4	DP-K® 700Y980T	1,70 mm	TPN®-W 660Y760T	1,70 mm	MBW® 1500	2,10 mm	15,42 kg
Variante 5	DP-K® 700Y980T	1,70 mm	TPN®-W 700Y870T	1,60 mm	MBW® 1500	2,10 mm	15,14 kg
Variante 6	DP-K® 780Y1180T	1,60 mm	TPN®-W 700Y870T	1,60 mm	MBW® 1500	2,10 mm	14,82 kg
Kaltumformung: B-Säule außen in monolithischer Ausführung							
Variante 7	DP-K® 700Y980T 1,70 mm				MBW® 1500	2,10 mm	15,42 kg
Variante 8	DP-K® 780Y1180T 1,60 mm				MBW® 1500	2,10 mm	14,82 kg

2 Tabelle mit den untersuchten Stahlsorten und Umformverfahren

ten Lösungen nicht mit signifikant dünneren Blechen zu rechnen, da sie dieselben strukturmechanischen Auslegungskriterien erfüllen müssen. Darüber hinaus setzt die geometrische Komplexität der B-Säulen-Außenteile gewisse Gren-

zen bei der umformtechnischen Umsetzbarkeit, bietet dafür aber einen aktiven Korrosionsschutz.

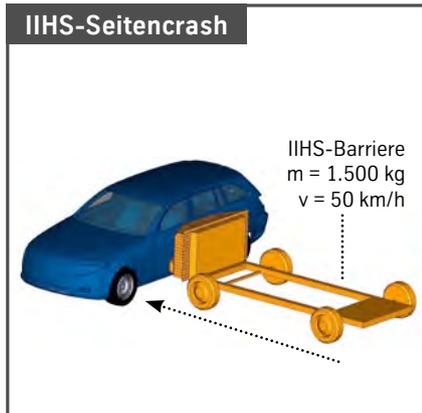
Durch die hohen Festigkeiten in Kombination mit der Kaltumformung sind geometrische Anpassungen, etwa der Über-

gangsradien, erforderlich. Trotz dieser Herausforderungen ist es gelungen, komplexe Bauteile wie die B-Säulen-Außenteile mit den gewählten Werkstoffen zu fertigen. Ein entscheidender Vorteil aller kaltumgeformten Stähle ist die Verfügbarkeit mit Zink-Oberflächenveredelung. Dadurch ist ausreichender kathodischer Korrosionsschutz für die entsprechenden Aufbauten auch ohne Sondermaßnahmen gewährleistet. Die Stähle für die Warmumformung und die neuen kaltumformbaren hochfesten Stähle sind auch auf ihre Schweißeignung hin untersucht worden. Insbesondere für das Widerstandspunktschweißen bestehen ausreichend große Prozessfenster.

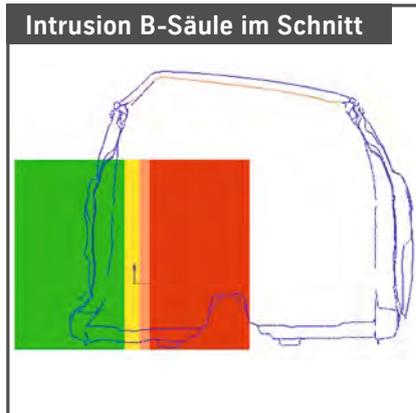
KOMPONENTENTESTS BESTÄTIGEN MATERIALEIGNUNG

Zur Absicherung der virtuellen Ergebnisse werden alle B-Säulen-Außenteile an den Zusammenbauten dynamischen Dreipunkt-Biegeversuchen unterzogen, 4. Der untere Bereich des B-Säulen-Zusammenbaus wird bei dem Fallturmversuch durch den mit 30 km/h auftreffenden massiven Stempel definiert belastet. Dadurch ist für alle Lösungen die Energieeinwirkung gleich und somit sind die Aussagen zur Energieaufnahme vergleichbar. Eine Hochgeschwindigkeitskamera mit einer Bildfrequenz von 1000 Hz dokumentiert die Versuche.

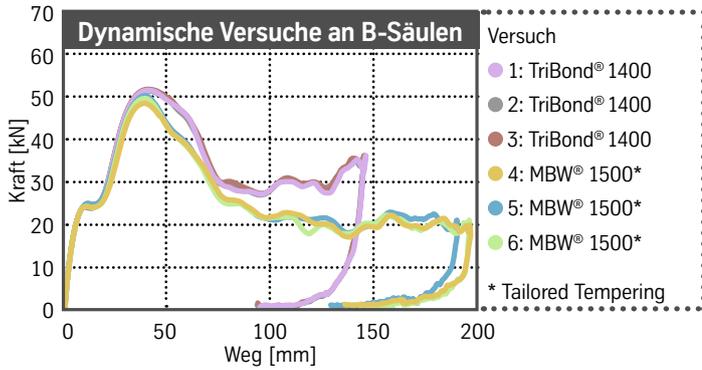
Der Versuch für den Werkstoffverbund Tribond 1400 zeigt eine reproduzierbar hohe Kraftaufnahme im Kraftmaximum und über den gesamten Deformationsweg, 5. Die Energieaufnahme des voll-



3 Simulation des IIHS-Tests für B-Säule aus DP-K 700Y980T mit 1,70 mm Dicke



4 Versuchsaufbau dynamischer Dreipunkt-Biegeversuch (links), Tribond 1400 ohne Versagen (rechts)

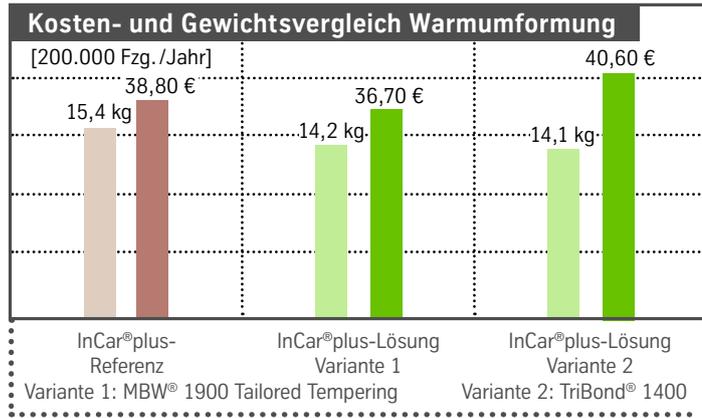


5 Kraft-Weg-Verlauf von Tribond 1400 und Referenz MBW 1500 im dynamischen Dreipunkt-Biegeversuch

ERWEITERTES SPEKTRUM GEEIGNETER, GÜNSTIGER STÄHLE

Den Kosten- und Gewichtsvergleich aller InCar plus-Varianten zur Referenz zeigen 6 und 7. Leichteste Variante ist die B-Säule aus Tribond 1400 (mit 1,28 kg Gewichtsreduzierung). Die B-Säulen-Lösung mit dem per Tailored-Tempering-Verfahren bearbeiteten Stahl MBW 1900 (Dicke 1,50 mm) bietet ebenfalls eine stattliche Gewichtsreduktion von 1,2 kg pro Fahrzeug bei einem Kostenvorteil von etwa 5 %.

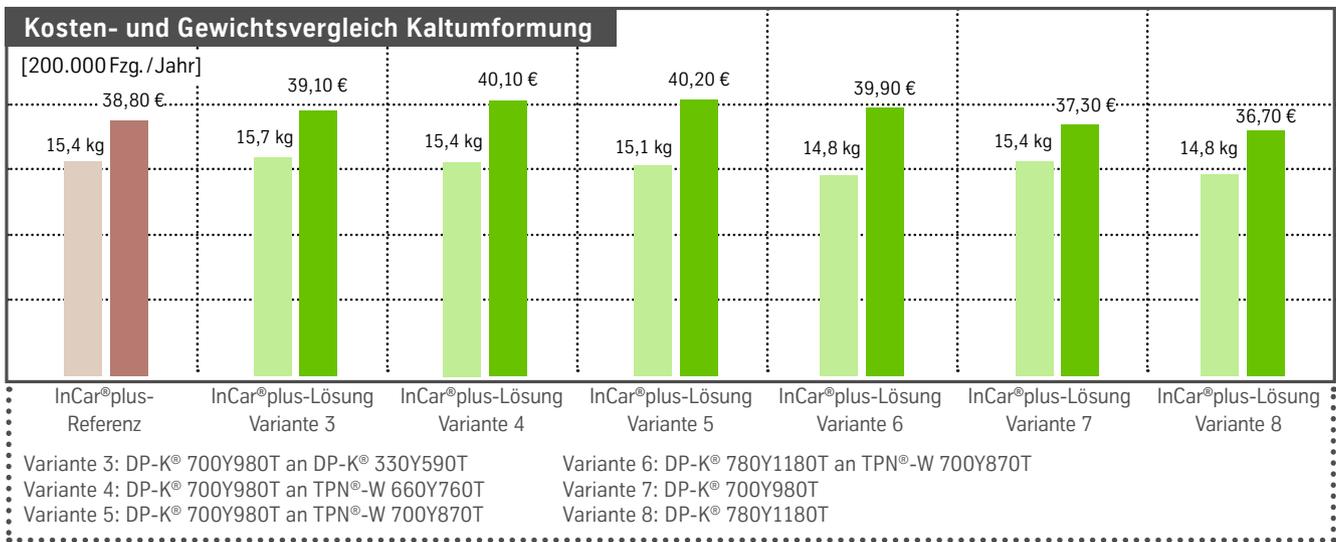
Alternativen sind B-Säulen-Außenteile aus warm- beziehungsweise kaltgewalzten Mehrphasenstählen, die kaltumgeformt werden. Je nach geometrischer Komplexität sind sowohl Tailored-Blank-Lösungen und mit geringfügigen Abstrichen sogar monolithische B-Säulen-Außenteile realisierbar. Die monolithischen Lösungen bieten leichte Kostenvorteile, zum Beispiel DP-K 700Y980T bis zu 4 %. Varianten aus Tailored Blanks bieten hingegen die Möglichkeit, die einzelnen Stahlbleche optimal hinsichtlich der gewünschten Funktionalität miteinander zu kombinieren. Die leichteste Tailored-Blank-Kombination ermöglicht eine Gewichtsreduktion von 0,6 kg bei einem geringfügigen Kostennachteil von weniger als 3 %. Somit steht für die spezifischen technischen und wirtschaftlichen Vorgaben ein erweitertes Spektrum an geeigneten Stählen zur Verfügung.



6 Kosten- und Gewichtsvergleich aller Lösungen mit warmumgeformten Werkstoffen

ständig pressgehärteten Tribond 1400 entspricht der Referenzlösung aus MBW 1500 im Tailored-Tempering-Verfahren (siehe Beitrag „Warmumformung maßgeschneidert“ ab Seite 105). Die Werkstoffe beider Probanden sind jeweils 1,70 mm dick. Der erkennbar verkürzte Deformationsweg für die Tribond 1400-Proben ermöglicht eine

Verringerung der Materialdicke auf 1,30 mm. Als kritisch einzustufende Versagensrisse im Material sind nicht zu beobachten. Durch diesen praxisnahen Komponententest lässt sich die Eignung des innovativen Stahl-Werkstoffverbunds Tribond 1400 für stark crashbelastete B-Säulen-Außenteile zusätzlich absichern.



7 Kosten- und Gewichtsvergleich aller Lösungen mit kaltumgeformten Werkstoffen

WARMUMFORMUNG MASSGESCHNEIDERT

ThyssenKrupp hat die Warmumformung mit dem Tailored-Tempering-Verfahren ergänzt, das die prozesssichere Fertigung von Bauteilen mit maßgeschneiderten und lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften ermöglicht. Das spezifische eigene Know-how umfasst auch eine detaillierte virtuelle Prozessbeschreibung und Gefügeprognose der warmumgeformten Bauteile. Ein seriennahes B-Säulen-Versuchswerkzeug mit präziser Temperatursteuerung und In-Line-Messtechnik ermöglicht die Validierung.

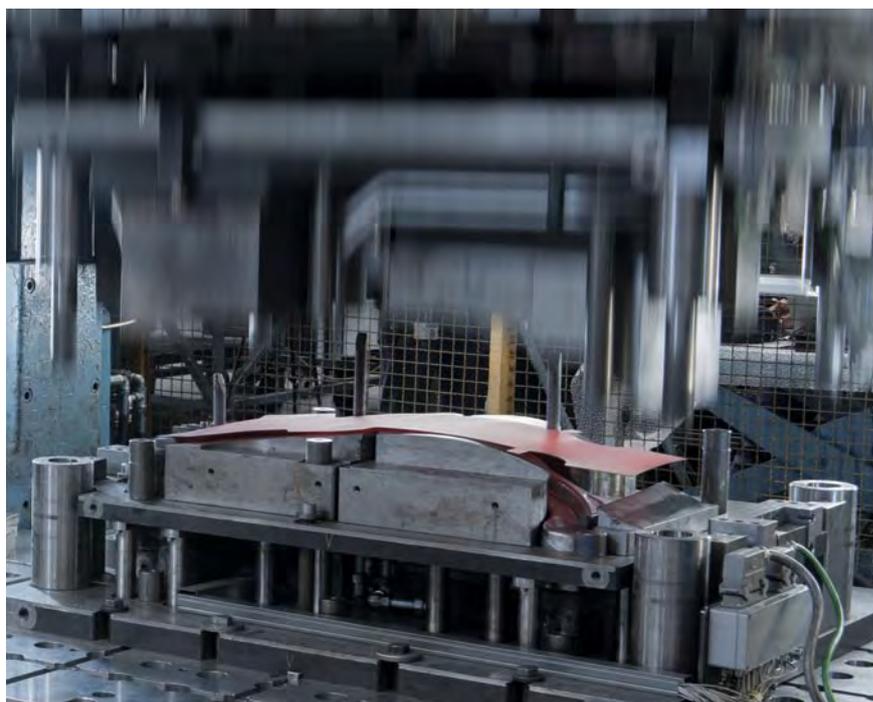
Die im Beitrag „Gewichtsreduktion durch warm- und kaltumgeformte B-Säulen“ (siehe ab Seite 102) warmumgeformten B-Säulen-Varianten Referenz (mit MBW 1500) und Variante 1 (mit MBW 1900) sind im sogenannten Tailored-Tempering-Verfahren entstanden. Nachfolgend wird näher auf die Werkzeugentwicklung und die Methodenplanung bei der Anwendung dieses Verfahrens eingegangen.

Für eine optimierte Crashperformance sollte eine B-Säule im Fußbereich, also etwa unterhalb des Türschlosses bis hin zum Schweller, besonders energieabsorbierend ausgelegt sein, um im Crashfall möglichst viel Aufprallenergie in Deformation umwandeln zu können. Der obere B-Säulenbereich hingegen muss einen hohen Deformationswiderstand aufweisen, um dort Intrusionen zu verhindern. Die Umsetzung dieser Vorgabe gelingt sehr präzise mit dem Tailored-Tempering-Verfahren, ❶.

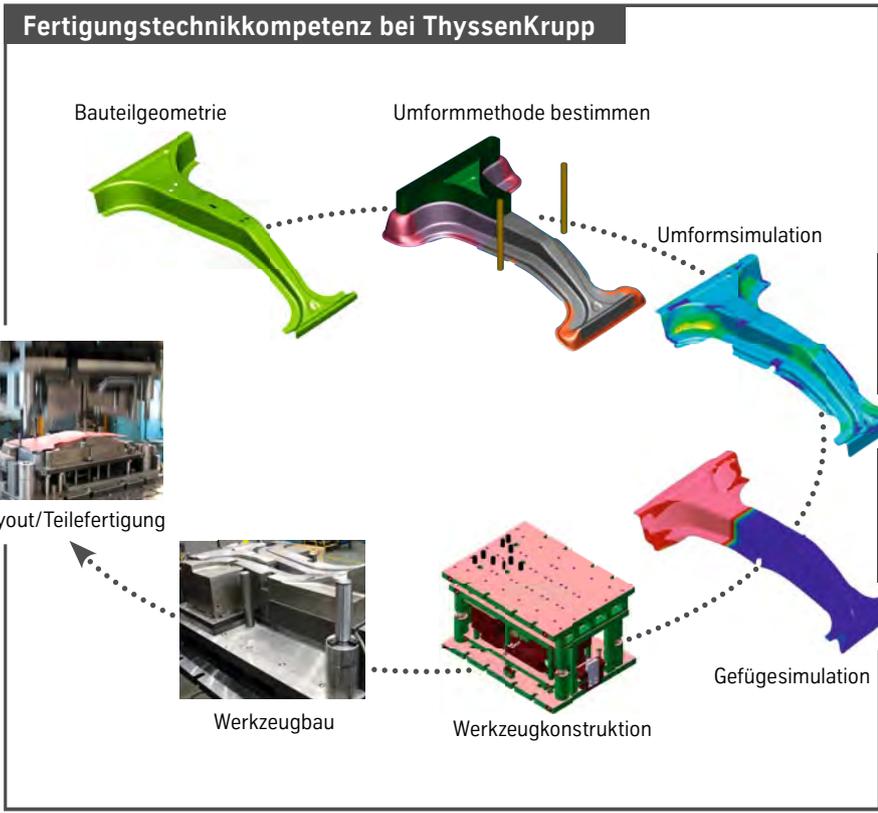
Beim Tailored-Tempering-Prozess werden die Abkühlgeschwindigkeiten im Werkstoff und somit die Gefügeumwandlungen durch partiell beheizte Werkzeugelemente gesteuert. Dies ermöglicht die Ausbildung lokal variie-

render Gefügearten. Es können, geometrisch begrenzt, zum Beispiel martensitische, ferritisch-perlitische oder fer-

ritisch-bainitische Gefüge realisiert werden. Dadurch lassen sich anforderungsgerechte mechanische Eigenschaf-



❶ Pressenhub: Tailored-Tempering-Werkzeug mit eingelegerter Platine



2 Entwicklungsschritte von der Bauteilgeometrie bis zur seriennahen Abpressung

ten im Werkstoff beziehungsweise am Bauteil einstellen. Im konventionellen Warmumformprozess hingegen wird über die gesamte Bauteiloberfläche eine gleichmäßige Abkühlgeschwindigkeit angestrebt, um die Ausbildung eines martensitischen Gefüges im gesamten Bauteil zu erreichen.

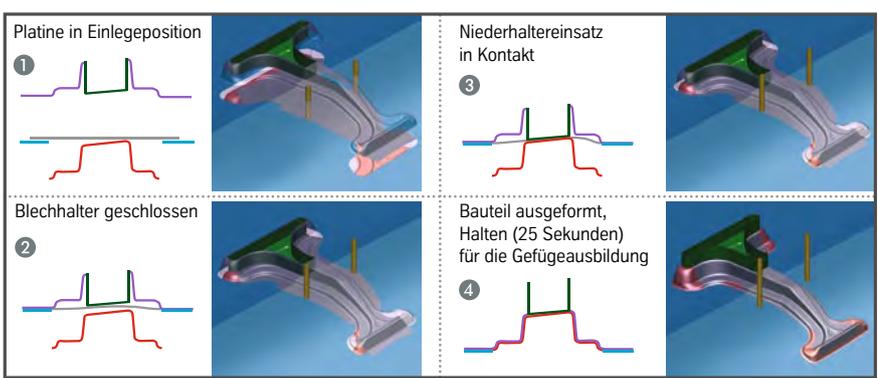
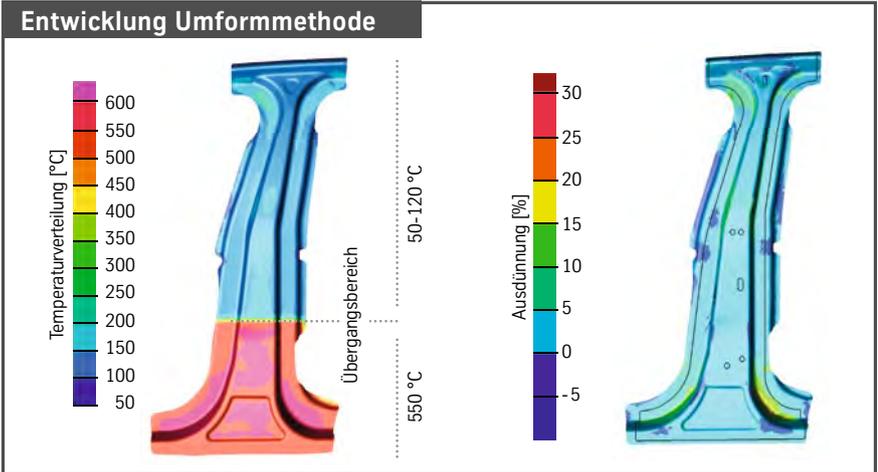
Verfahrensbedingt besteht die Forderung nach einer möglichst homogenen Temperatur an den Wirkflächen des Werkzeugs. Weitere Lastenheftanforderungen an das im Rahmen des Projekts entwickelte Warmumform-Werkzeug sind eine geregelte Temperaturführung der aktiven Werkzeugelemente bis 550 °C, die Prozesskontrolle während der Umformung durch im Werkzeug integrierte Pyrometer-Sensortechnik sowie ein temperatur- und verschleißfester Werkzeugstahl. Hinzu kommt noch ein modularer Werkzeugaufbau für den vollhärtenden und den Tailored-Tempering-Betrieb.

Der Entwicklungsprozess des Warmumform-Werkzeugs besteht aus mehreren Phasen, 2 und 3. Zunächst stehen die Absicherung der Umformmethode und der Nachweis der Herstellbarkeit des Bauteils im Vordergrund. Dazu dienen Standard-FEM-Software-Lösungen, mit denen der Umformprozess detailliert simuliert wird.

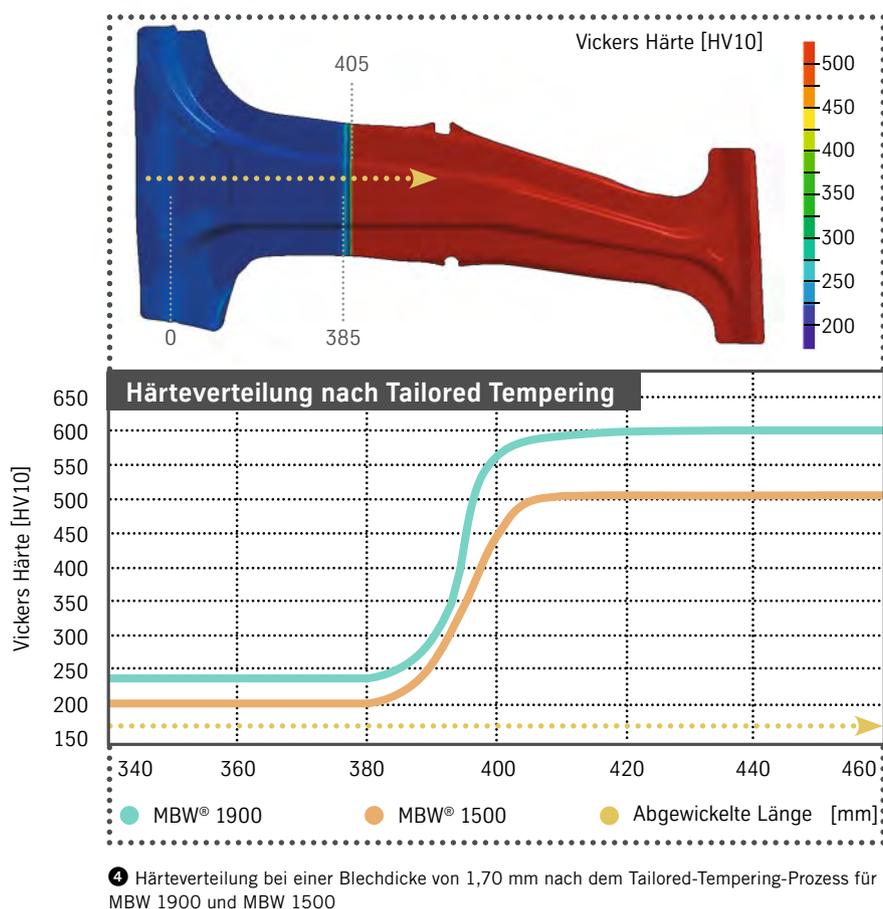
Im Zuge dieser Entwicklung werden mehrere Schleifen durchlaufen, in denen Bauteilgeometrie und Umformprozess sukzessive entwickelt werden, bis der simulative Nachweis für eine prozesssichere Herstellung der B-Säule erbracht ist.

Die unter diesen Gesichtspunkten entwickelte Umformmethode wird anschließend in einer zweiten Simulationsphase bezüglich der Vorhersage der finalen Bauteileigenschaften (Gefügesimulation) weiter optimiert, 3. Auf dieser Basis entsteht dann das komplexe Warmumform-Werkzeug.

Der erste Konstruktionsentwurf ist die Basis für gezielte thermische Simulationen der Heizsysteme. Konkret wird in dieser Phase die Bestückung der Aktivelemente mit Heizelementen und deren Zusammenfassung zu optimal wirksamen Heizkreisen vorgenommen. Außerdem wird die erforderliche Heizleistung unter Berücksichtigung entsprechender Reserven bestimmt. Um das Wissen im Umgang mit auf bis zu 600 °C temperierten Werkzeugen weiter auszubauen, wird begleitend zu den Aktivitäten für das B-Säulen-Serienwerkzeug ein zwei-



3 Simulationsergebnisse und Werkzeugkinematik der umformtechnischen Prozessentwicklung



tes, kompaktes, Versuchswerkzeug aufgebaut.

Dieses „Kalibrierungswerkzeug Thermische Simulation“ bildet weitreichend die geometrischen und physikalischen Gegebenheiten des B-Säulen-Werkzeugs ab.

Es bietet so die Möglichkeit zur Validierung der thermischen Simulation und des Know-how-Aufbaus im Umgang mit hochtemperierten Werkzeugen. Das gleichmäßige Aufheizen des temperaturbeständigen Werkzeug-Werkstoffs wird dort in mehreren Iterationsstufen überprüft und optimiert. Zudem werden weitere Unbekannte, wie die Kompensation der Wärmeausdehnung und die thermische Isolierung zu benachbarten Werkzeugkomponenten an diesem Werkzeug untersucht.

Mit den dabei gewonnenen Erkenntnissen wird die Heizleistung und Homogenität der Wirkflächentemperatur durch Positionsanpassungen der Heizpatronen im Hauptwerkzeug weiter optimiert. Diese Korrekturen fließen in die Konstruktionsmaßnahmen zur Kompensation des Wärmeausdehnungsverhaltens am Hauptwerkzeug ein.

Nach Fertigstellung des Werkzeugs erfolgt das Tryout, in dem die ursprünglich definierten Anforderungen erfolgreich überprüft werden. Mithilfe der im Werkzeug verbauten Sensortechnik kann der Temperaturverlauf der Platine während der Umformung verfolgt und aufgezeichnet werden. Aus diesen Messdaten werden einerseits Rückschlüsse auf die Härte und die Qualität des Bauteils gezogen, andererseits können weitere Optimierungen in der Umformsimulation hinsichtlich der Beschreibung des physikalischen Wärmeübergangs zwischen Platine und Werkzeug erfolgen.

VIRTUELLE GEFÜGEPROGNOSE IST SPEZIFISCHES KNOW-HOW

Ein wesentlicher Aspekt für die Prozessauslegung ist die Vorhersage der geforderten Eigenschaften. Bei Kenntnis der eingestellten Gefüge im Stahl lassen sich Aussagen über die zu erwartende Härte, lokale Festigkeit und Duktilitätseigenschaften treffen.

Dafür ist es zunächst erforderlich, die für das jeweilige Material und dessen Dicke geeigneten Prozessparameter, wie Werkzeugtemperatur, Abkühlraten, Pressenkräfte und Kontaktzeit, zu bestimmen. Diese Parameter stellen letztendlich sicher, dass das Bauteil nach dem Tailored-Tempering-Verfahren die gewünschten lokalen Eigenschaften aufweist. Außerdem wird bei den untersuchten Varianten des B-Säulen-Außenteils ein relativ schmaler Übergangsbereich zwischen pressgehärtetem und getempertem Bereich angestrebt. Die Technologie ermöglicht aber grundsätzlich unterschiedlich breite Übergangsbereiche. Dies lässt sich durch die separate Steuerung der Heizelemente in der Übergangszone über einen entsprechenden Heizkreis umsetzen.

Bei den hier anstehenden Werkzeugtemperaturen von 550 °C ist das Prozessfenster für dieses Fertigungsverfahren sehr robust. Die Härteverteilung im Bauteil für die Stähle MBW 1500 und MBW 1900 wird durch eine virtuelle Vorauslegung ermittelt, ④. Eine Härte von 480 bis 500 HV (Verlauf MBW 1500) im pressgehärteten oberen Bereich entspricht einer Festigkeit von etwa 1500 MPa. Im getemperten B-Säulen-Fuß entspricht eine Härte von etwa 200 HV der gewünschten Festigkeit von etwa 650 MPa. Der Übergangsbereich beträgt bei der gewählten Materialdicke von 1,70 mm nur etwa 20 mm.

Für den Werkstoff MBW 1900 sind sowohl im oberen durchgehärteten Bereich als auch im getemperten Fuß des Bauteils unter vergleichbaren Prozessbedingungen höhere Festigkeitswerte erzielbar.

Diese höhere Festigkeit ermöglicht grundsätzlich eine Verringerung der Materialdicke bei gleichbleibender Funktionalität der Baugruppe. Im vorliegenden Fall der B-Säulen-Außenteile ist die Einsatzdicke um 0,20 mm geringer als bei der Referenzlösung.

Die Möglichkeit, Gefügeanteile im Stahl nach dem Tailored-Tempering-Verfahren virtuell zu prognostizieren und somit bereits in frühen Entwicklungsphasen die Bauteileigenschaften optimal auszuliegen, erweitert die Einsatzbereiche für die etablierten Warmumformstähle MBW 1500 und MBW 1900 beträchtlich. Für den Stahl MBW 1900 sind die Entwicklungsarbeiten in der finalen Phase.

EINSATZPOTENZIAL VON LITECOR IN DER KAROSSERIE

In einer Potenzialanalyse hat ThyssenKrupp neben Außenhaut-Bauteilen auch strukturell relevante Innenteile aus dem Werkstoffverbund Litecor gefertigt. Die umformtechnische Machbarkeit der Bauteile wird in Simulationen überprüft; zusätzlich werden die fügetechnischen Randbedingungen zu den einzelnen Bauteilen beleuchtet. In Steifigkeits-, NVH- und Crashberechnungen wird die technische Performance der Karosserie analysiert. Insgesamt weist die Karosserie in dieser Studie Einsatzpotenzial für 14 Litecor-Bauteile auf. Sie sind bei gleicher Performance insgesamt 19,1 kg beziehungsweise etwa 20 % leichter als herkömmliche Bauteile.

Erklärtes Ziel bei der Produktentwicklung des Werkstoffverbunds Litecor ist kostengünstiger Leichtbau für großflächige Schalenbauteile – sowohl für Innenteile als auch in Außenhautqualität. Litecor ist ein dreilagiges Composite, das die hohe Festigkeit von Stahl mit der geringen Dichte von Kunststoff kombiniert und dabei KTL-beständig ist, ❶. Es besteht aus einem oberen und unteren Stahl-

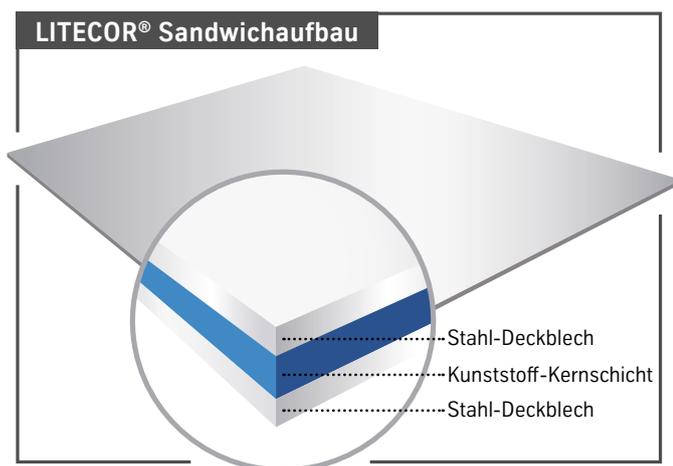
Deckblech von 0,20 bis 0,25 mm Dicke, die mit einer Kunststoff-Kernschicht von 0,30 bis etwa 1,0 mm Dicke flächig verbunden sind. Die in der Dicke variable, thermoplastische Compoundsschicht wirkt als schubsteifer Abstandshalter, sodass bereits durch eine geringfügige Erhöhung der Kerndicke ein überproportionaler Anstieg der Biege- und Beulsteifigkeit erreicht wird. Infolge der geringen Dichte

des Polymers von 1,03 g/cm³ entsteht so gut wie kein Mehrgewicht. Im Vergleich zu Stahlplatten gleicher Biegesteifigkeit beträgt die Gewichtsreduktion bis zu 40 %.

Neben dem Gewichts- und Steifigkeitsvorteil eignet sich Litecor auch, um stahltypische Designmerkmale wie prägnante Designkanten umformtechnisch gut darzustellen. Gleichzeitig ergeben sich im Vergleich zu Leichtmetall-Bauteilen geringere Leichtbaukosten.

Um die zum Teil hohen umformtechnischen Anforderungen zu erfüllen, wird eine entsprechend gut umformbare IF-Stahlsorte eingesetzt. Ihre Festigkeit ist höher als die weicher Tiefziehstähle. Die geforderte Beulfestigkeit, etwa bei Hagel-schlag oder Parkplatzremplern, ist damit gegeben. Die Deckbleche sind beidseitig elektrolytisch verzinkt, um die Korrosionsanforderungen im Automobil zu erfüllen.

Für den Einsatz als Strukturbauteil empfehlen sich höherfeste Stahlsorten als Material für die Deckschicht. Diese bieten im Crashfall energiewandelnde Eigenschaften bei gleichzeitiger struktureller Stabilität der Composite-Strukturen. Mögliche Strukturbauteile aus Lite-



❶ Werkstoffverbund Litecor

cor sind zum Beispiel die Stirnwand und Bodenbleche, ②.

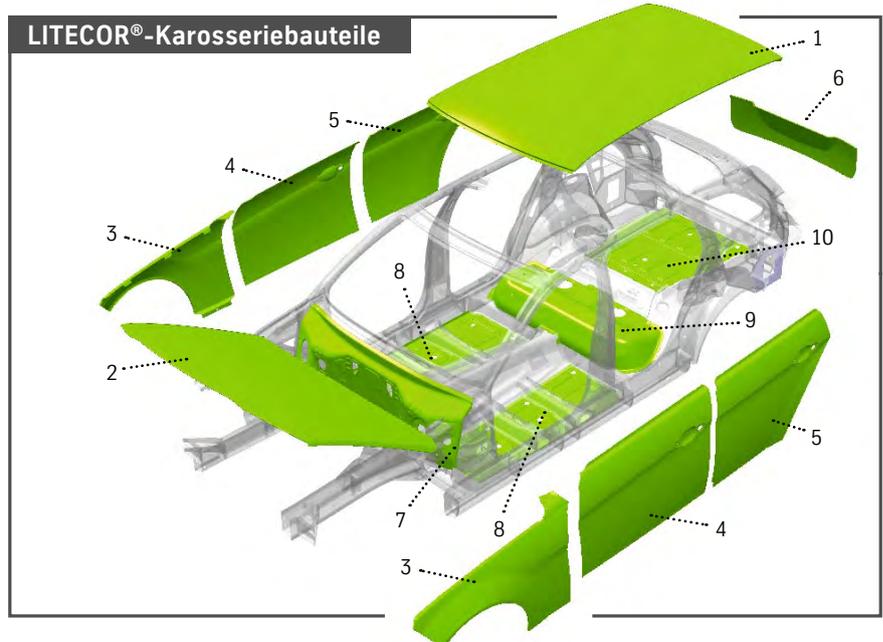
AUSFÜHRLICH VIRTUELL BETRACHTET

Diese Potenzialanalyse betrachtet insgesamt 14 Litecor-Bauteile mit anforderungsgerechtem Sandwichtaufbau. Bei der Auswahl der Litecor-Bauteile kommen aufgrund des hohen Gewichtspotenzials und der Steifigkeitsanforderungen die Außenhäute in Betracht. Diese Bauteile weisen eine außenliegende Stahldeckschicht von 0,25 mm Dicke auf und genügen damit den Beulfestigkeitsanforderungen, etwa bei Hagelschlag. Innenliegend kommt eine 0,20 mm dünne Stahlchicht für maximale Gewichtseinsparung zum Einsatz. Darüber hinaus werden auch Innenteile mit reduzierter Crashrelevanz in Litecor ausgelegt, um weitere Gewichtseinsparungen zu erzielen. Dabei können die Bauteile aus Litecor in bestehende Fertigungsszenarien mit wenig Aufwand integriert werden. Die thermische Ausdehnung von Litecor ist ähnlich wie bei Stahlblech, ebenso der Recyclingprozess.

Die Dimensionierung der einzelnen Sandwich-Bauteile erfolgt im ersten Schritt durch Umformsimulationen. Für Litecor steht ein Umform-Simulationsmodell bereit, das realistische Prognosen zu den klassischen Bewertungskriterien Riss- und Faltenbildung ermöglicht, ③. Auf Basis von Schalen- und Volumenelementen wird das physikalische Verhalten des Sandwichmaterials auch bei komplexen lokalen Umformvorgängen wie dem Falzen plausibel abgebildet. In Kooperation mit Softwareentwicklern entstanden Anpassungen zu Beschnitt und Netzverfeinerungsfunktionen mit Volumenelementen, um dem Methodenplaner ein praxistaugliches Werkzeug für die Umformsimulationen zur Verfügung zu stellen.

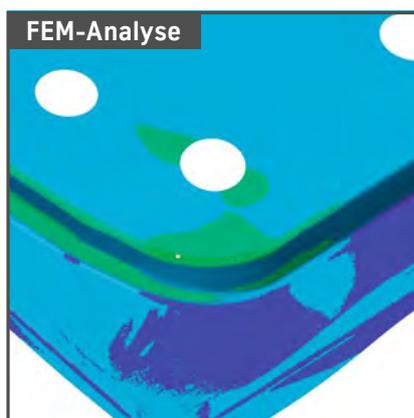
LITECOR FÜGT SICH GUT

Um Litecor effektiv im Karosserierohbau einsetzen zu können, besteht die Anforderung, insbesondere das Widerstandspunktschweißen in Kombination mit dem



Nr.	Bauteil	Aufbau Werkstoffverbund (Dicke der Einzelschichten in mm)
1	Dach Außenhaut	0,25 / 0,40 / 0,20
2	Motorhaube Außenhaut	0,25 / 0,40 / 0,20
3	Kotflügel vorne rechts/links	0,25 / 0,40 / 0,20
4	Tür vorne Außenhaut rechts/links	0,25 / 0,40 / 0,20
5	Tür hinten Außenhaut rechts/links	0,25 / 0,40 / 0,20
6	Heckklappe Außenhaut	0,25 / 0,40 / 0,20
7	Stirnwand	0,25 / 0,40 / 0,25
8	Hauptboden Mitte rechts/links	0,20 / 0,40 / 0,20
9	Bodenblech Fondsitze	0,25 / 0,40 / 0,25
10	Boden hinten	0,20 / 0,40 / 0,20

② Übersicht Litecor-Karosseriebauteile und ihr Schichtaufbau



③ Vergleich von Simulation (links) und Bauteil (rechts) an einer umformkritischen Stelle

Kleben zu verwenden. Aufgrund seines besonderen Materialaufbaus ist Litecor nur bedingt für die im Fahrzeugbau dominierenden thermischen Fügeverfahren (Widerstandspunkt-, Laserstrahl- und Lichtbogenschweißen) geeignet.

Deshalb wurden in einem ersten Schritt kalte mechanische Fügeverfahren wie Stanznieten und Schrauben betrachtet. Beim generell gut geeigneten Halbhohlstanznieten sollte Litecor im Fügeaufbau nicht als unten liegendes Material vom Niet als letztes Element durchstoßen werden. Generell wird empfohlen, Halbhohlstanznieten in Kombination mit dem Kleben einzusetzen. Das Kleben unterliegt hier den gleichen Randbedingungen, die für verzinkte Stahlbleche gelten.

Bei mechanischen Fügeelementen mit Vorspannkraft wie dem Schrauben können unter Einfluss einer thermischen Belastung Kriecheffekte in der Kernschicht auftreten. Diesem Effekt kann

durch lokale Vorkonditionierung der Fügestelle beispielsweise im Umformwerkzeug vor dem Fügen begegnet werden.

MIG- und MAG-Schweißen sowie Laserstrahlschweißen sind aufgrund des Materialaufbaus nicht möglich. Laserlöten mit niedrigen Temperaturen kann nach Anpassen der Prozessparameter und der Zusatzwerkstoffe eingesetzt werden. Die Serienprozesstauglichkeit muss im individuellen Fall nachgewiesen werden.

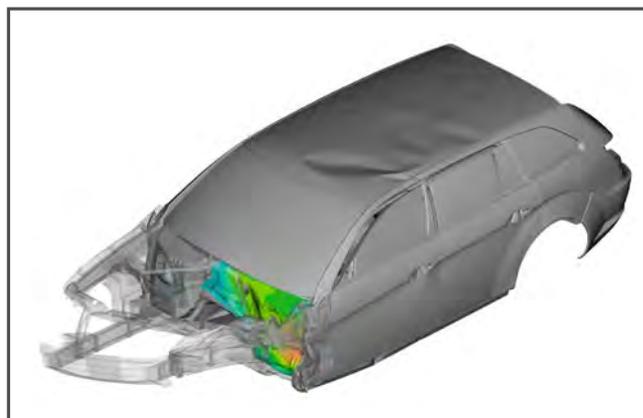
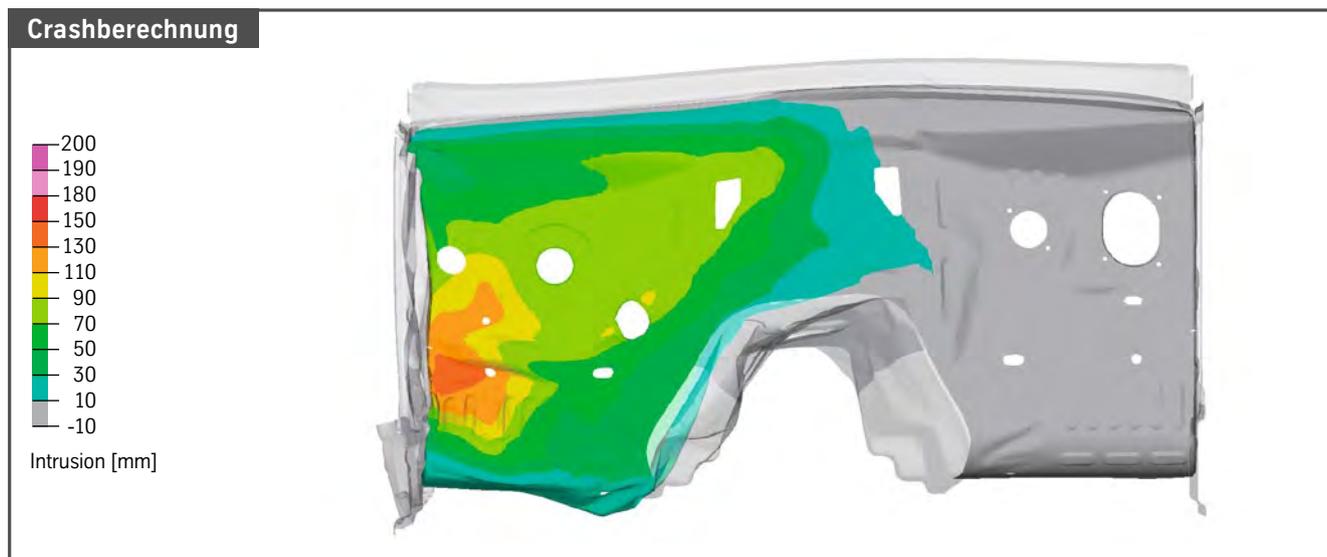
Im zweiten Schritt wurde ein neues Verfahren zum Widerstandspunktschweißen entwickelt, das Litecor für dieses Verfahren und für das kombinierte Punktschweiß-Kleben qualifiziert. In einem praxisingerechten Versuchsprogramm wurde Litecor mit unterschiedlichen Stahlsorten sowohl in Zwei- als auch in Dreiblechpaarungen mit nur moderat modifizierter Standard-Schweißanlage prozesssicher widerstandspunktschweißbar. Die erzielten Verbindungs-

qualitäten und Festigkeitswerte erfüllen die Anforderungen, und die Robustheit des Verfahrens konnte bestätigt werden. Im Hinblick auf einen Serieneinsatz wird bei ThyssenKrupp eine Prototypschweißanlage entwickelt, die eine seriennahe Erprobung und Qualifizierung des Prozesses ermöglicht. Als Demonstrator dient die Stirnwand, die mittels Widerstandspunktschweißen und Kleben mit den umliegenden Stahl-Karosseriebauteilen wie Tunnel, A-Säule, Stirnwand-Querträger und Verstärkungselementen gefügt wird, 4.

ThyssenKrupp empfiehlt für alle Außenhautbauteile IF-Stahlsorten, die in Bezug auf Beulsteifigkeit und Beulfestigkeit den Anforderungen genügen. Für bleibende Beulen, etwa durch Hagel-schlag oder Parkplatzrempler, stehen – wie auch für konventionelle Lösungen – die Methoden der Beulenreparatur („Beulendoktor“) zur Verfügung. Bei den Strukturbauteilen werden in der Regel

Widerstandspunktschweißen	
	<p>1</p> <p>LITECOR® DP-K® 330Y590T</p> <p>2-Blechverbindung: LITECOR® 0,25/0,40/0,25 mm DP-K® 330Y590T, t = 1,0 mm Fügeverfahren: Widerstandspunktschweißen</p>
	<p>3</p> <p>LITECOR® DP-K® 590Y980T BETAMATE 1620</p> <p>2-Blechverbindung: LITECOR® 0,25/0,40/0,25 mm DP-K® 590Y980T, t = 1,0 mm Fügeverfahren: Widerstandspunktschweißen + Kleben BETAMATE 1620</p>
<p>DP-K® 590Y980T LITECOR® MBW® 1500</p> <p>3-Blechverbindung: DP-K® 590Y980T, t = 1,0 mm LITECOR® 0,25/0,40/0,25 mm MBW® 1500, t = 1,0 mm Fügeverfahren: Widerstandspunktschweißen</p>	<p>4</p> <p>LITECOR® MBW® 1500 CR300LA</p> <p>3-Blechverbindung: LITECOR® 0,25/0,40/0,25 mm MBW® 1500, t = 1,0 mm CR300LA, t = 1,0 mm Fügeverfahren: Widerstandspunktschweißen</p>

4 Widerstandspunktschweißen von Litecor mit typischen Materialpaarungen im Karosseriebau



➊ Intrusion Stirnwand aus Litecor nach Euro-NCAP-Frontalcrash

Stahldeckbleche der Dicke 0,25 mm oder mehr gewählt, um den höheren Festigkeitsanforderungen gerecht zu werden. In zwei Fällen kommen darüber hinaus höherfeste Stahlqualitäten zum Einsatz, die das ertragbare Lastniveau im Crashfall steigern. Nach vorliegenden Erkenntnissen bietet Litecor ein Umformvermögen, das kaum hinter dem des monolithischen Blechs gleicher Grundgüte zurücksteht.

SICHER UND LEICHT

Auf Basis des numerischen Steifigkeitsmodells werden auch Noise-, Vibration- und Harshness-Berechnungen (NVH) durchgeführt, um Eigenfrequenzen zu bestimmen und kritische Schwingungsformen zu vermeiden. Im Rahmen dieser Berechnungen sind bei einigen Stahl-

stärkungsteilen in der Karosserie moderate Aufdickungen geboten. Dadurch werden Stützwirkungen und lokale Nachgiebigkeiten konstruktiv optimiert. Das so entstehende Mehrgewicht in Höhe von 2,6 kg ist in der Gewichtsbilanz der Litecor-Karosserie berücksichtigt. Gleichzeitig kann aufgrund der höheren Dämpfung eine gezielte Minimierung an den sekundären Akustikmaterialien erfolgen, wodurch sich ein weiterer Gewichts- und Kostenvorteil mit Litecor ergeben kann.

Parallel zu den NVH- und Steifigkeitsberechnungen wird die Karosserie in Crashanalysen hinsichtlich fünf repräsentativer Crashlastfälle (Euro NCAP Front, IIHS SORB, FMVSS 301, Euro NCAP Pole) geprüft und bewertet. Hier werden in iterativen Schleifen einzelne Stahlbauteile durch Litecor-Bauteile im Crashmodell substituiert und die techni-

sche Performance analysiert. Nach Anpassungen der Schichtdicken und gegebenenfalls der Wahl der Festigkeitsklasse der Stahldeckbleche erfüllt die finale Litecor-Karosserievariante alle Craschanforderungen in ähnlicher Weise wie die Referenzkarosserie, ➋. Allerdings ist sie im Vergleich zu dieser 19,1 kg leichter. Somit eignet sich Litecor bestens, um weiteren Forderungen nach Gewichtsreduktion nachzukommen.

AUSBLICK

Aktuell arbeitet ThyssenKrupp mit Hochdruck am Aufbau einer serienreifen Fertigungsanlage für Litecor. Mittelfristig ist zunächst der Aufbau einer Serienproduktion von Litecor-Material für Innenteile geplant, anschließend für Außenhautmaterial.

INNOVATIVE LEICHTBAUKONZEPTE FÜR MOTORHAUBEN

Moderne Stahltechnologien und Leichtbaukonzepte machen Motorhauben mehr als 20 % leichter. Durch den Einsatz des biegesteifen und leichten Werkstoffverbunds Litecor kann dieses Leichtbaupotenzial gehoben werden, ohne Abstriche bei der Performance oder Sicherheit machen zu müssen. Geringe Leichtbaukosten sorgen zudem für eine hohe wirtschaftliche Attraktivität dieser Lösung. Ein Multimaterialkonzept mit Magnesiumblech ermöglicht sogar einen Gewichtsvorteil von bis zu 40 %.

ThyssenKrupp hat im Rahmen von InCar plus verschiedene Konzepte für leichte und kostenoptimierte Motorhauben untersucht, ❶. Der steifigkeitsopti-

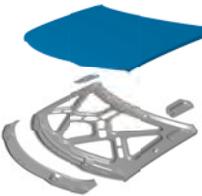
mierte Werkstoffverbund Litecor, der aus zwei sehr dünnen Stahl-Deckblechen und einem Kunststoffkern besteht, eignet sich besonders gut zur Erfüllung der

teilweise gegensätzlichen Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit und Fußgängerschutz. Die Dicke der Stahl-Deckbleche und des Kunststoffkerns lassen sich variieren und ermöglichen so maßgeschneiderte Lösungen für spezielle Anwendungen und Anforderungen.

Zu Beginn des Projekts standen umfangreiche Recherchen, in denen der Stand der Technik sowohl von Aluminium- als auch von Stahl-Motorhauben in der Mittelklasse und oberen Mittelklasse ermittelt wurde. Die für InCar plus entwickelte Referenzhaube aus Stahl orientiert sich hinsichtlich der globalen Steifigkeit und der Beulsteifigkeit an den besten Motorhauben.

Ein wichtiges Kriterium bei der Auslegung einer Motorhaube ist der Fußgängerschutz. Alle Haubenvarianten werden deshalb Aufprallsimulationen nach dem Euro-NCAP-Verfahren unterzogen. An 168 Messpunkten auf der Frontstruktur des Fahrzeugs wird am Beispiel eines Dummy-Kopfaufpralls ermittelt, wie kompatibel die Struktur mit den Zielen des Fußgängerschutzes ist. Die Referenz-Motorhaube von InCar plus und alle untersuchten Konzepte bieten ein Potenzial für fünf Sterne bereits ohne aktive Maßnahmen, wie etwa das Anheben der Motorhaube durch entsprechend gestaltete Scharniere.

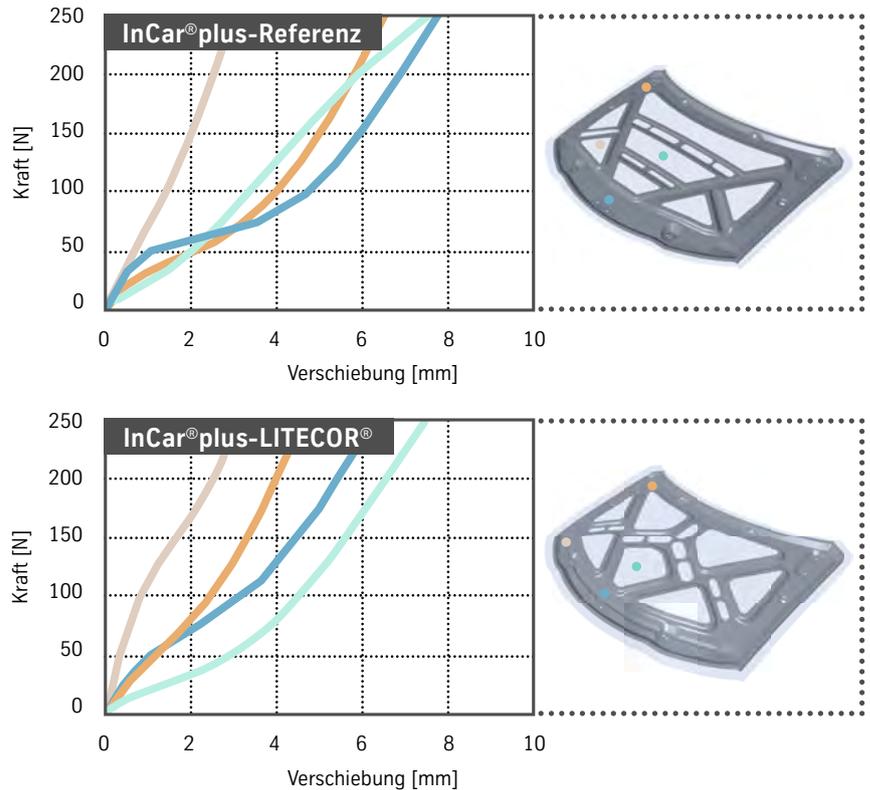
Benchmark Motorhauben						
Segment	Mittelklasse			Obere Mittelklasse		
Werkstoff	Stahl			Aluminium		
Gewicht	20,4 kg	20,1 kg	20,9 kg	11,0 kg	12,2 kg	13,7 kg
Flächengewicht [kg/m ²]	11,0	10,9	11,6	5,7	6,2	6,9

InCar [®] plus	InCar [®] plus-Referenz	InCar [®] plus-Lösung LITECOR [®]	InCar [®] plus-Lösung Stahl-Magnesium-Hybrid
Konzept			
Gewicht	19,3 kg	14,9 kg	11,3 kg
Flächengewicht [kg/m ²]	10,2	7,9	6,0

❶ Benchmark von Motorhauben (oben) und InCar plus-Motorhaubenkonzepten (unten)

AUSSENHAUT AUS LITECOR MIT GEWICHTSOPTIMISierter INNENSTRUKTUR

Die Motorhauben-Außenhaut aus dem Werkstoffverbund Litecor ist aufgrund der hervorragenden Steifigkeitseigenschaften und des geringen Flächengewichts 2,9 kg leichter als die Außenhaut der Referenzhaube. Zusätzlich besteht noch weiteres Gewichtseinsparpotenzial in der Innenstruktur. Im Vergleich zur Referenz-Außenhaut mit einer Blechdicke von 0,70 mm ist der Schichtaufbau von Litecor mit einer Gesamtstärke von 0,85 mm etwas dicker und verfügt daher über eine höhere Beulsteifigkeit. Dadurch kann die Innenstruktur durch eine Verringerung der Blechdicke und Optimierung des Strebenbilds angepasst werden. Das spart im Vergleich zur Referenzstruktur weitere 1,5 kg ein. Insgesamt ist die Motorhaube mit Litecor-Außenhaut und optimiertem Innenteil somit 4,4 kg leichter als die Referenz.



2 Beulsteifigkeit der Referenz-Motorhaube (oben) und der Litecor-Motorhaube (unten)

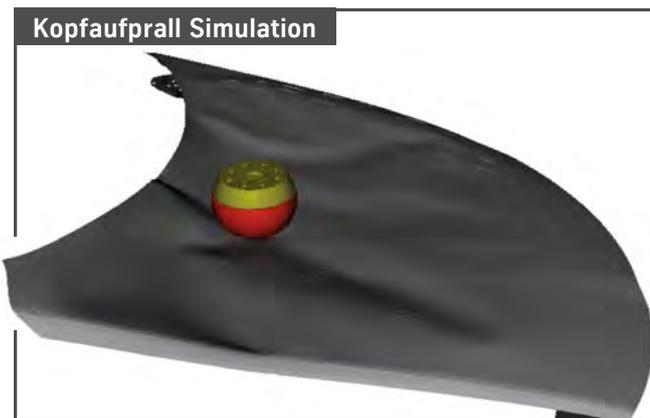
STRUKTURMECHANISCHE AUSLEGUNG

Die Litecor-Motorhaube mit gewichtsoptimiertem Innenteil wurde hinsichtlich der Lastfälle Torsionssteifigkeit, Quersteifigkeit vorne, Längssteifigkeit und Quersteifigkeit hinten überprüft. Sie erfüllt die Zielwerte der globalen Steifigkeit. Die Beulsteifigkeit erreicht ein ver-

gleichbar hohes Niveau wie bei der Referenz-Motorhaube, 2.

Die Euro-NCAP-Fußgängerschutzbewertung wird virtuell am Gesamtfahrzeug bestimmt. Unter Berücksichtigung der HIC-Werte (Head Injury Criterion) aller 168 Aufprallpunkte wird ein

Potenzial für eine Fünf-Sterne-Bewertung erreicht. Um die virtuelle Entwicklung zu validieren, wurden Prüfstandsversuche an Prototypen-Motorhauben durchgeführt. Die Versuchsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Simulation, 3.



3 Vergleich Simulation (links) und Versuch (rechts)

MULTIMATERIALBAUWEISE ALS KONZEPT

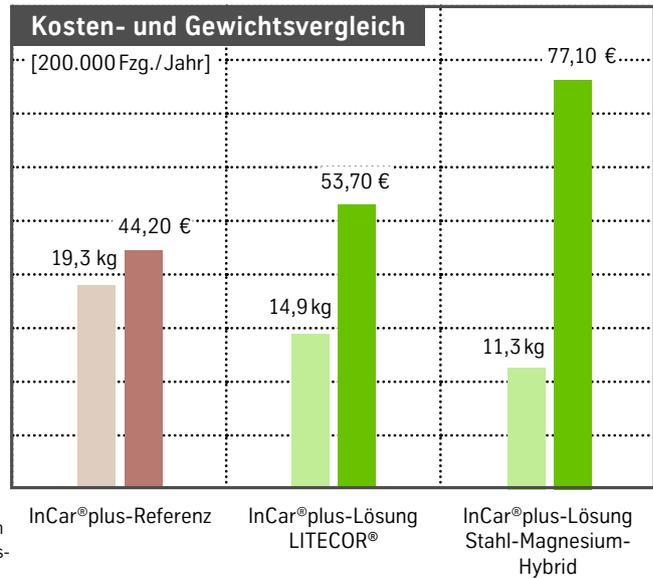
Eine innovative Möglichkeit, Gewicht zu sparen, ist die Kombination von Magnesiumblech für die Innenstruktur und sehr dünnem, aber höherfestem Stahlblech für die Außenhaut. Eine Motorhaube in dieser Multimaterialbauweise wiegt dank der geringen Dichte von Magnesium nur 11,3 kg, mithin etwa 8 kg weniger als die Referenz.

Das Leichtbaupotenzial verbirgt sich unter der Außenhaut in Form einer optimierten Innenstruktur der Motorhaube. Eine Wabengeometrie stützt die Außenhaut flächig ab und ermöglicht den Einsatz besonders dünner Stahlbleche für die Außenhaut. Selbst bei einer nur 0,50 mm dicken Außenhaut bietet das neu entwickelte Konzept eine gute Beulsteifigkeit. Die globalen Steifigkeiten entsprechen den Zielwerten. Im Euro-NCAP-Fußgängerschutz wird ein Potenzial für eine Fünf-Sterne-Bewertung erreicht.

Die fertigungstechnische Machbarkeit des Magnesiumblechbauteils hat ThyssenKrupp vollständig geprüft. Das Umformen von Magnesium erfolgt bei einer Temperatur von etwa 240 °C im beheizten Werkzeug. Eine Umformsimulation bestätigt die Herstellbarkeit der Magnesiumblechbauteile.

Die Scharnier- und Schlossverstärkungen aus Magnesiumblech lassen sich mit dem Magnesiuminnenblech durch Punktschweißen fügen. Die Taktzeiten betragen etwa 0,4 bis 0,65 s pro Schweißpunkt und sind vergleichbar mit denen von Stahlbauteilen. Die Außenhaut aus extrem dünnem Stahlblech wird per Table-Top-Falzen mit der Innenstruktur aus Magnesiumblech verbunden. Des Weiteren ist für die Magnesiumblechbauteile ein zusätzlicher Korrosionsschutz erforderlich. In diesem Fall wird eine Mehrschicht-Nasslackierung für hohe Korrosionsanforderungen verwendet.

Da sich die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Stahl und Magnesium unterscheiden, ist eine werkstoffgerechte Konstruktion unabdingbar. Größere Querschnitte in den umlaufenden Profilen ermöglichen eine individuelle Anpassung der globalen Steifigkeit an die Kundenanforderungen. Damit die Motorhaube weiterhin die Vorgaben zum Fußgängerschutz erfüllt, ist eine gezielte Schwächung der Profile mittels Schlitzten möglich.



4 Die InCar plus-Lösungen bieten bis zu 8 kg Gewichts-vorteil pro Motorhaube

ATTRAKTIVE KOSTEN, POSITIVE AUSSICHTEN

Beide Konzepte sind hinsichtlich Fertigung und Kosten ausführlich bewertet und für die Integration in den konventionellen Rohbau geeignet. Für jedes Konzept existiert eine detaillierte Rohbauplanung samt Kostenaufstellung, 4.

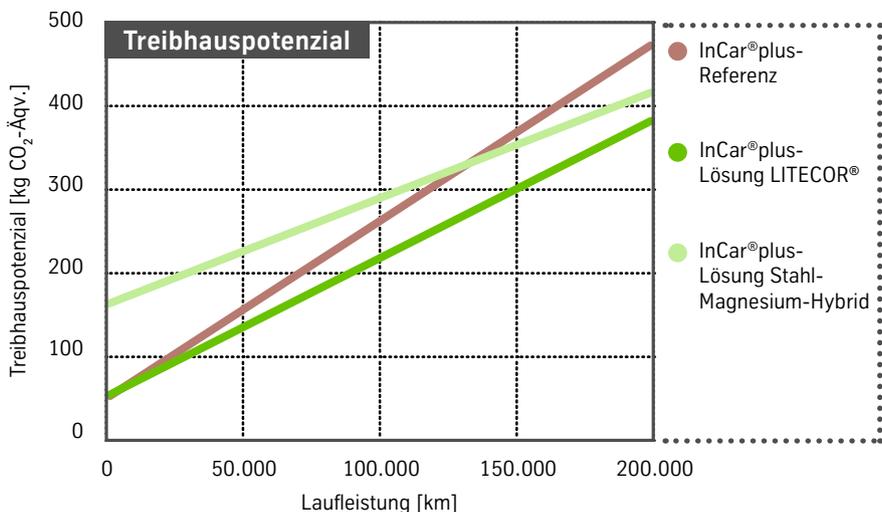
Das Falzen von Litecor erfordert nur geringfügige Anpassungen in der Table-Top-Falzanlage. Bei kleineren Stückzahlen kann auch das Rollfalzen sinnvoll sein.

Insgesamt schlagen für die Litecor-Motorhaube Leichtbaukosten von weniger als 2,20 €/kg zu Buche. Beim Multimaterialkonzept führen die Materialkos-

ten für das Magnesiumblech und dessen Weiterverarbeitung zu Leichtbaukosten von 4,11 €/kg.

Beide Konzepte sind auf ihre Umweltverträglichkeit hin überprüft, 5. Bezieht man die Rohstoffgewinnung, Materialherstellung und das Recycling in die Bilanz mit ein, sind beide Lösungen ökologisch sehr attraktiv.

Die Serientauglichkeit von Litecor wurde bereits erfolgreich an der Motorhaube des VW Polo World Rally Car nachgewiesen. Die Großserienproduktion von Litecor soll mittelfristig zunächst für Innenteile erfolgen, in Außenhautqualität für sichtbare Bauteile im Anschluss.



5 Beide InCar plus-Lösungen sind bezüglich des Treibhauspotenzials besser als die Referenz

LEICHTBAU BEI TÜR-AUSSENHAUT

Innovative Stahlprodukte senken das Gewicht der Außenhaut flächiger Bauteile wie etwa der Türen um bis zu 33 % – und das ohne Verlust an Beulsteifigkeit und -festigkeit sowie zu sehr attraktiven Leichtbaukosten von nur 2,25 €/kg. Die Eignung des Stahl-Polymer-Werkstoffverbunds Litecor für die Großserie hat ThyssenKrupp am Beispiel einer Seitentür exemplarisch nachgewiesen.



1 Leichtbau-Tür aus Litecor, Schichtaufbau 0,25/0,40/0,25 mm

Kostengünstige Leichtbautüren sind besonders im Volumenmarkt gefordert, da hier die hohen Kosten des Aluminiums seinem Einsatz im Weg stehen. Da eine geringere Blechdicke der Außenhaut zu einem Verlust von Beulsteifigkeit und Beulfestigkeit führt, muss diese kompensiert werden. ThyssenKrupp hat dafür den Werkstoffverbund Litecor detailliert untersucht, 1. Um den Stand der Technik beurteilen zu können, wurde zunächst ein Benchmark mit Messungen an acht Serientüren durchgeführt. Wesentliche Bewertungskriterien waren dabei die Beulsteifigkeit und die Beulfestigkeit, 2.

Die InCar plus-Türen orientieren sich hinsichtlich Beulsteifigkeit und Beulfes-

tigkeit an den besten Serientüren des Benchmarks. An der InCar plus-Tür sind 67 Punkte definiert, an denen die Beulsteifigkeit eingehend per Simulation untersucht wird. An zehn ausgewählten Punkten werden zusätzlich am Prüfstand die Beulsteifigkeit und Beulfestigkeit gemessen. Insgesamt ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Versuch.

TÜRKONZEPT MIT LITECOR

Speziell zur Verbesserung der Beulsteifigkeit wurde der Werkstoffverbund Litecor entwickelt, der aus zwei sehr dünnen Stahldeckblechen und einem Kunststoffkern besteht. Die Litecor-Außenhaut

Benchmark Türen		Kleinwagen		Kompaktklasse		Mittelklasse	Obere Mittelklasse		InCar®plus-Referenz	InCar®plus-Lösung
Segment										
Werkstoff		Stahl					Aluminium		Stahl	LITECOR®
Qualitative Bewertung der Beulsteifigkeit	●●○	●○○	●●○	●○○	●●○	●●●	●●○	●○○	●●●	●●●
Qualitative Bewertung der Beulfestigkeit	●●●	●○○	●●○	●●●	●●○	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●
Blechdicke Außenhaut [mm]	0,69	0,70	0,67	0,75	0,72	0,75	1,02	1,01	0,75	0,85
Gewicht Außenhaut [kg]	4,1	3,7	4,0	4,7	4,2	4,8	2,6	2,8	4,9	3,3

● Höhe der Performance
 ○ Performance

2 Türenbenchmark und Vergleich mit InCar plus-Referenz-Tür sowie InCar plus-Litecor-Tür

zeigt eine mit der Referenz vergleichbare Performance bei einer gleichzeitigen Gewichtsreduktion von 33 %, ③.

Anhand eines modular aufgebauten Werkzeugs, das den Bereich der Türgriffmulde abbildet, kann das Umformverhalten verschiedener Werkstoffe unter seriennahen Abpressbedingungen ermittelt werden. Untersucht werden in der ersten Testreihe neben Litecor auch ein konventioneller Bake-Hardening-Stahl CR210BH und Aluminium aus der Gruppe der 6000-Legierungen. Die bei Fahrzeugtüren immer markanteren Designkanten lassen sich mit Litecor gut darstellen. Im Vergleich zu Aluminium bietet dieser Werkstoffverbund eine größere Gestaltungsfreiheit.

UMFORMSIMULATION VON LITECOR

Für Litecor ist die Umformsimulation der gesamten Fertigungsprozesskette als Basis für die Fertigungsplanung beim Kunden von großer Bedeutung. Neue Produkte müssen in der CAx-Welt der Kunden einfach integrierbar sein. Hierzu werden in enger Zusammenarbeit mit Softwareherstellern industriell umsetzbare produktspezifische Lösungen erarbeitet. Bei der Umformsimulation für Litecor müssen für realistische Prognosen neben den Eigenschaften der Stahl-Deckbleche auch die anderen Eigenschaften der Polymer-Kernschicht berücksichtigt werden. Dies war in der Vergangenheit nur sehr unzureichend oder mit sehr hohem Modellierungsaufwand möglich und nicht für die Betrachtung der gesamten Prozesskette geeignet. Schalenelemente für die Deckbleche aus Stahl und Volumenelemente für die Kernschichten aus dem Polymer eignen sich zwar zur Charakterisierung der Litecor-spezifischen Eigenschaften, sind aber auf die 1. Umformstufe beschränkt, da die im Markt verfügbare Software (noch) keine Beschnittoptionen für Volumenelemente aufweist. Folgeoperationen wie Nachformen, Falzen oder Bördeln können somit nicht simuliert werden. In enger Kooperation mit Softwareherstellern wurde auf dieser Basis ein Platinenmodell weiterentwickelt, welches den notwendigen Anforderungen gerecht wird. Dies steht dem ThyssenKrupp Konzern jetzt zur Verfügung. Die hohe Prognosegenauigkeit der beschriebenen Methode wurde bereits an verschiedenen Versuchs- und Praxisbauteilen nachge-

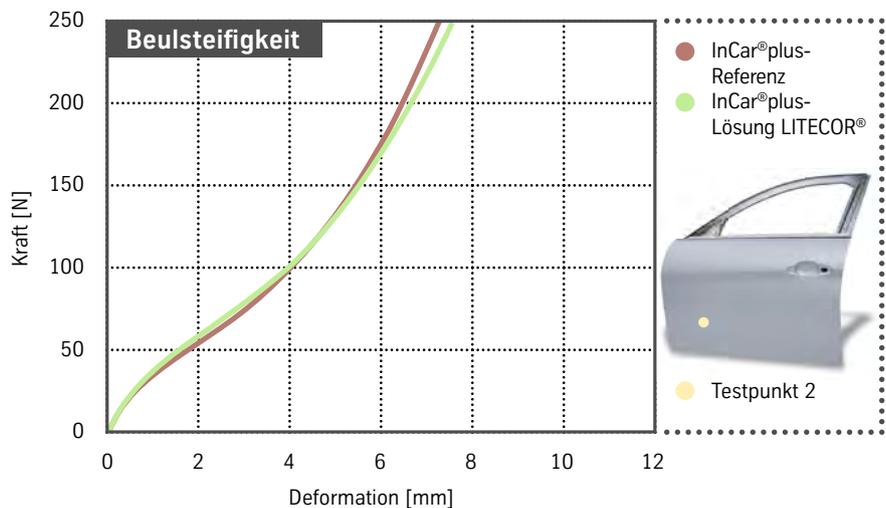
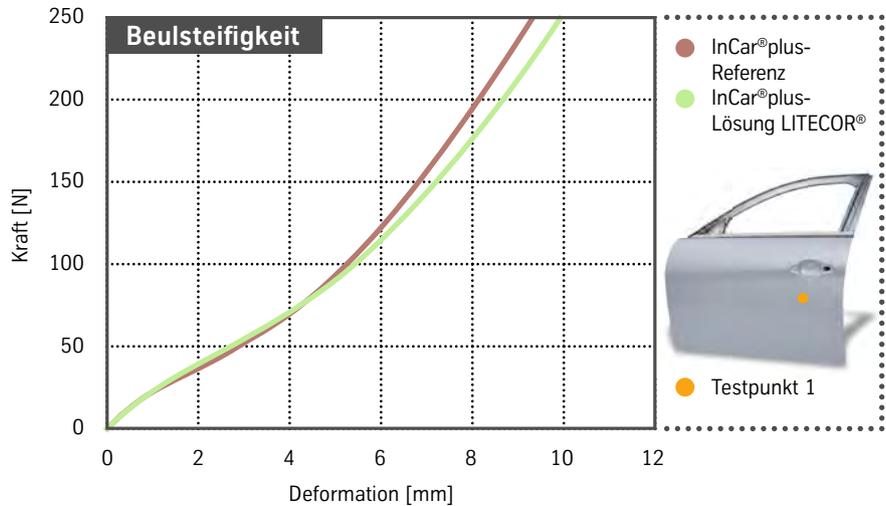
wiesen und für zahlreiche Machbarkeitsanalysen erfolgreich eingesetzt, ④.

Nach erfolgreicher Umformsimulation der gesamten Litecor-Fertigungskette stehen nun fortgeschrittene Netzverfeinerungsalgorithmen zur Reduzierung der Rechenzeit im Fokus weiterer Entwicklungen. Dies ist Voraussetzung für den wirtschaftlichen Einsatz bei hochkomplexen Prozessen, die zum Beispiel Falzoperationen enthalten.

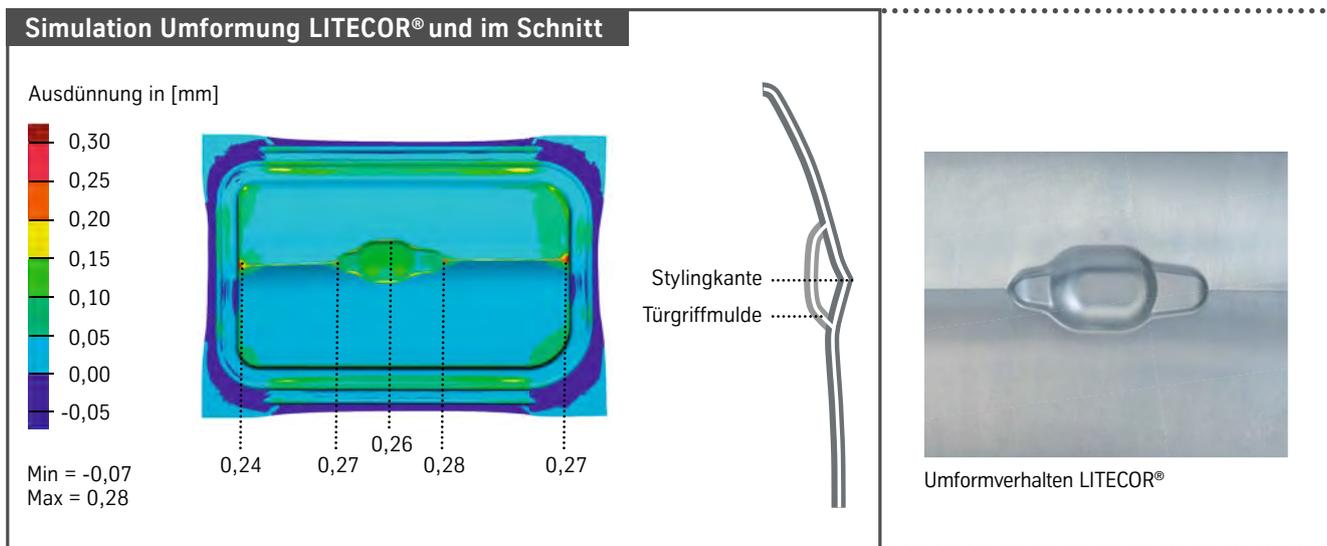
Übliche Verfahren zur Verbindung der Außenhaut mit der Innenstruktur sind das Table-Top-Falzen (Maschinenfalzen) sowie das Rollfalzen mit dem Roboter. Für die Werkstoffe Stahl und Aluminium sind beide Falzverfahren Stand der Technik. Allerdings bedarf es beim Werkstoffverbund Litecor durch die hohe Steifigkeit des Materials besonderer Anpassungen, um eine fehlerfreie Falz-

verbindung zu realisieren. ThyssenKrupp hat eine einfache und wirksame Lösung beim Table-Top-Falzen entwickelt: eine Nut im Abkantstempel, die das Material beim Abkanten der Außenhaut gezielt beeinflusst. Durch die Nut bildet sich beim Abkanten eine definierte weichere Stelle in der inneren Faser. Folglich wird ein Längenausgleich in der inneren Faser beim ersten Falzschritt ermöglicht, sodass die Zugfaser im Falzvorgang außen entlastet wird. Dadurch werden Risse vermieden. Diese Modifikation am Falzwerkzeug hat keinen Einfluss auf die Verarbeitung von monolithischen Blechen.

Die Prozesssicherheit und somit die Serienreife für das Falzen von Litecor wurden an einer neu entwickelten, serientauglichen Table-Top-Falzanlage nachgewiesen, ⑤.



③ Beulsteifigkeitsvergleich an zwei Testpunkten



4 Simulation des Umformvermögens von Litecor (links) und tatsächliches Umformverhalten (rechts)

NEUES TABLE-TOP-FALZWERKZEUG

Wesentliches Augenmerk bei der Neuentwicklung der Table-Top-Falzanlage galt neben zusätzlichen Funktionen in der Maschine den Anforderungen durch Litecor. Hier sind besonders die präzise Regelbarkeit der Prozessgrößen „Kraft“ und „Position“ hervorzuheben. Neben diesen technologischen Verbesserungen war für die Weiterentwicklung der Falzmaschine auch das Thema Energieeinsparung ein wesentliches Ziel. Durch den Einsatz von geregelten elektrischen Antrieben und weitgehendem Verzicht auf die üblichen Pneumatik-Antriebe wird somit auch auf Seite der Betriebsmittel ein wesentlicher Beitrag zur Energiesenkung und Kostenersparnis beigetragen. Des Weiteren ist eine Taktzeitoptimierung unterhalb der üblichen Zeiten wahrscheinlich.

In einer für den Rohbau üblichen Taktzeit sind die Türen in gleichbleibender Qualität rissfrei zu falzen. Es lassen sich mit konventionellen Stahl-türen ähnliche Geometrien darstellen, die nur geringe zusätzliche Anpassungen an der Falzanlage erfordern. Hier ist, neben den geometrischen Anpassungen der Vorfalzoperation, die definierte Falzkraft mit Haltezeit in der Fertigfalzposition zu nennen.

ROLLFALZEN MIT LITECOR

Der Lösungsansatz für das Material Litecor beim Rollfalzen mit dem Robo-

ter ist jedoch ein anderer, da die Umformprozesse hier nicht am gesamten Umfang, sondern nur partiell stattfinden. Die Aufgabe ist nicht die Rissvermeidung in der äußeren Faser, sondern die Reduzierung der Welligkeit im geschlossenen Flansch. Hier werden zum einen andere Angriffspunkte der Rolle am Bauteil als üblicherweise verwendet, zum anderen kann eine weitere Überfahrt zum Glätten mit dem Roboter erforderlich sein. Die Falzbarkeit mit dem Roboter wurde an einzelnen Prototypenteilen nachgewiesen.

KOSTENVERGLEICH UND ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN

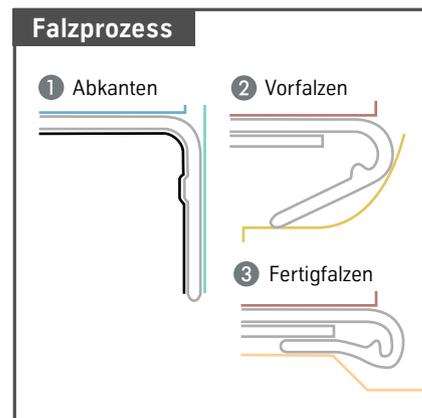
Der Werkstoffverbund Litecor in der Außenhaut spart pro Tür 1,6 kg Gewicht

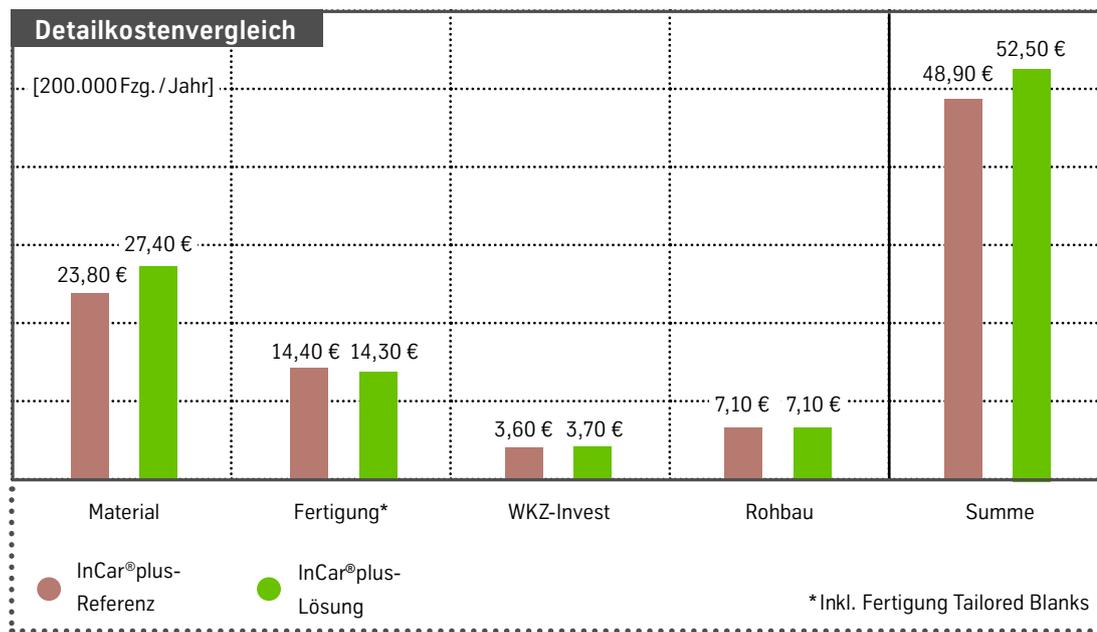
bei attraktiven Leichtbaukosten von 2,25 €/kg ein, 6 und 7. Dabei ist dieses Konzept nahezu ohne Anpassung des Fertigungsprozesses beim Automobilhersteller umsetzbar. Lediglich eine geringfügige Modifikation beim Table-Top-Falzwerkzeug ist notwendig.

Die Untersuchungen zur Anwendung des Werkstoffverbunds Litecor wurden exemplarisch an der Türaußenhaut durchgeführt, lassen sich aber auch auf andere Außenhautbauteile, wie beispielsweise Motorhaube, Heckklappe oder Dach, übertragen. Litecor ist zudem für Bauteile in der Innenstruktur der Karosserie geeignet, etwa im Fahrzeugboden. Die Großserienproduktion von Litecor für Innenteile soll mittelfristig erfolgen. Anschließend ist die Produktion für Außenhautbauteile vorgesehen.



5 Maschinenfalzanlage und Prozessschritte





6 Kostenvergleich der InCar plus-Referenz-Tür mit der InCar plus-Litecor-Tür

AUSBLICK

Eine weitere Möglichkeit, besonders leichte Stahltüren zu bauen, ist der Einsatz von sehr dünnen Blechen in der Außenhaut. Der zwangsläufige Verlust an Beulsteifigkeit und Beulfestigkeit kann beispielsweise durch das gezielte Hinterspritzen mit Kunststoff auf PU-Basis kompensiert werden.

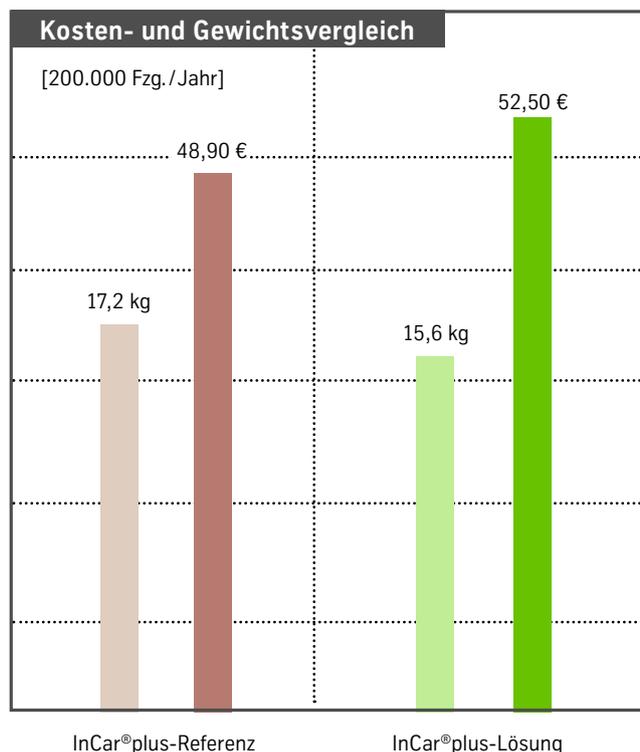
Ein Sprühmischkopf bringt das reaktive Gemisch gezielt auf die Oberflächen auf. Durch die Wahl unterschiedlicher PU-Rezepturen, die Beimischung steifigkeitsfördernder Zusatzstoffe und eine variable Anzahl aufgebrachter Schichten können die Eigenschaften des Hybridmaterials gezielt eingestellt und so ein Maximum an Leichtbau bei gleichzeitig hervorragender Performance erreicht werden. Die Gewichtsreduktion im Vergleich zur Referenz-Tür wird bis zu 1,5 kg betragen.

Im Fertigungsprozess erfolgt das Aufsprühen der Kunststoffschicht(en) direkt nach dem Abpressen der Außenhäute, um das komplexe Handling der sehr dünnen und daher empfindlichen Bauteile zu vereinfachen. Der PU-Kunststoff ist wenige Sekunden nach der Applikation ausgehärtet und hitzebeständig. Diese Eigenschaften sind bei der späteren kathodischen Tauchlackierung (KTL) von enormer Bedeutung. Untersuchungen haben nachgewiesen, dass der Kunststoff das KTL-Bad nicht verunreinigt

und bei 180 °C und 60 min im Ofen seine Haftung und versteifende Wirkung beibehält.

Praktische Versuche am Beulprüfstand weisen eine zur InCar plus-Referenz-Tür vergleichbare Beulsteifigkeit nach. Ferner hat die Außenhaut aus hinterspritzten Dünnblechen das Poten-

zial, aufgrund akustischer Vorteile mit weniger sekundären Akustikmaßnahmen eine vergleichbare Performance zu erzielen, sodass weitere Gewichtsreduzierungen erzielt werden können. Eine Kostenprognose für dieses Konzept stellt Leichtbaukosten von circa 2,0 €/kg in Aussicht.



7 Kosten- und Gewichtsvergleich der InCar plus-Referenz-Tür mit der InCar plus-Litecor-Tür

WIRTSCHAFTLICHE LEICHTBAU-SITZSTRUKTUREN AUS STAHL

Sitzstrukturen sind für den Leichtbau von besonderer Bedeutung, da sie mit einem durchschnittlichen Gewicht von etwa 12,5 kg pro Sitz für insgesamt 40 bis 60 kg Masse im Fahrzeug verantwortlich sind. Durch den Einsatz neuer Stahlsorten können Sitzkomponenten kostenneutral um bis zu 15 % leichter konstruiert werden. Ein neuer Werkstoffverbund wie Litecor eröffnet in der Sitzschale ein Leichtbaupotenzial von bis zu 37 % und das zu Leichtbaukosten von weniger als 3 €/kg.

An die Entwicklung von Sitzstrukturen werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. In InCar plus werden neue Werkstoffe auf ihre Eignung für Sitzstrukturen untersucht, insbesondere in Hinsicht auf die in ❶ blau unterlegten Eigenschaften. Bei Sitzstrukturen ist ein klarer Trend zum Leichtbau mit hochfesten Stählen und Material-Mischbauweise zu erkennen. Gleichzeitig stehen Sitzstrukturen unter einem großen Kostendruck.

Zur Bestimmung des Leichtbaupotenzials wurde eine herstellerneutrale Sitzstruktur entwickelt, die bezüglich Konstruktion, Gewicht und Werkstoffe dem aktuellen technischen Stand entspricht, ❷. Referenz ist ein Vier-Wege-Vordersitz mit einem Gewicht von 12,3 kg, der aus einer Stahlstruktur mit Schienen und Mechanismen besteht. Der Vordersitz ist modular aufgebaut, um den steigenden Anforderungen hinsichtlich Gewichtsreduktion, Crashesicherheit und Bauraum bei kürzer werdenden Entwicklungszeiten gerecht zu werden.

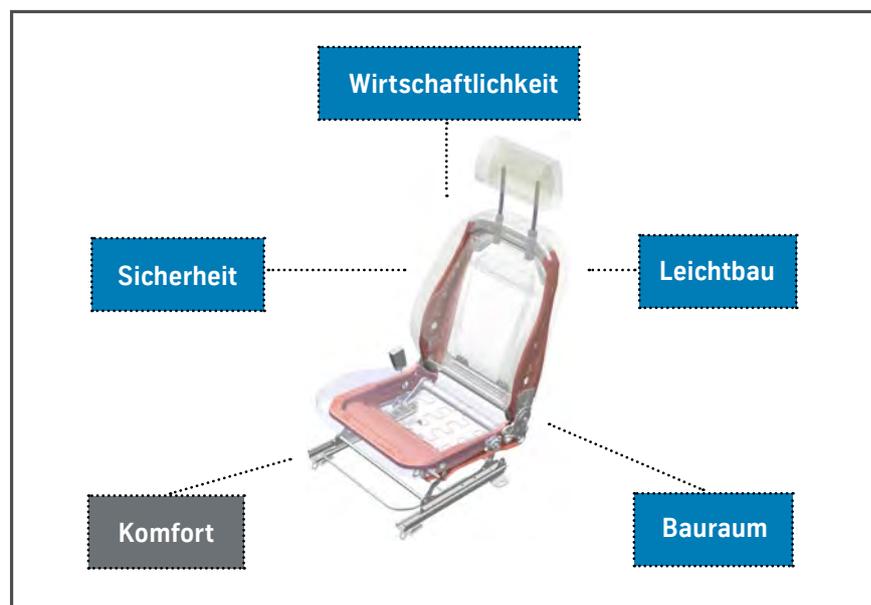
Um die Crashesicherheit der Referenzsitzstruktur zu gewährleisten, wurden folgende Lastfälle untersucht: gesetzliche Anforderungen (wie etwa ECE-R14, ECE-R17, FMVSS 225), Front- und Heckcrashes mit Fahrzeugpulsen aus der InCar plus-Referenzstruktur (für US NCAP beziehungsweise FMVSS 301) und Missbrauchs-Lastfälle (wie etwa ein Kniestest bei der Vordersitz-Sitzschale). Bei einem Fahrzeugcrash muss einerseits

die Belastung in Form von Kräften und Beschleunigungswerten auf den Insassen durch Energieumwandlung gering gehalten werden. Andererseits müssen sich die Sitzstrukturen kontrolliert deformieren und dabei genug Überlebensraum für den Insassen sicherstellen.

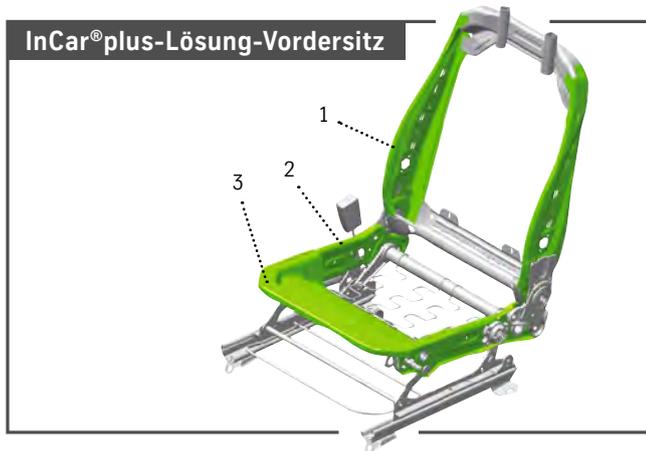
ENTWICKLUNG VON SITZLEHNEN

Bei der Konzeptentwicklung liegt der Fokus auf den Strukturbauteilen, nicht

auf den Mechanismen. Die Vordersitzlehne wird beim Heckcrash durch den Passagier und bei einem Frontcrash durch die Ladung belastet. Dementsprechend sind diese beiden Crashlastfälle bei der Konzeptentwicklung für die Lehne berücksichtigt. Damit die Konzepte eine mit der Referenz vergleichbare Performance aufweisen, bestehen die Lehnenseitenteile aus festeren Werkstoffen, haben aber eine reduzierte Wandstärke. Die beiden Konzepte mit



❶ Anforderungen an die Sitzentwicklung



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Dicke
1 Lehnenseitenteil			
	Referenz	CR420LA	1,10 mm
	Variante 1	MHZ 500	1,00 mm
	Variante 2	DP-K® 590Y980T	0,90 mm
	Variante 3	DP-K® 700Y980T	0,80 mm
2 Unterbau-Seitenteil			
	Referenz	SCALUR® S550MC	1,60 mm
	Variante 1	CP-W® 660Y760T	1,50 mm
	Variante 2	HSM700HD	1,50 mm
3 Sitzschale			
	Referenz	CR380LA	0,80 mm
	Variante 1	LITECOR®	0,20/0,80/0,20 mm

2 Aufbau und Werkstoffvarianten der InCar plus-Vordersitz-Bauteile

den Stahlsorten MHZ 500 und DP-K 590Y980T erzielen so eine vergleichbare Performance bei gleicher Geometrie. Um bei noch höheren Festigkeiten (DP-K

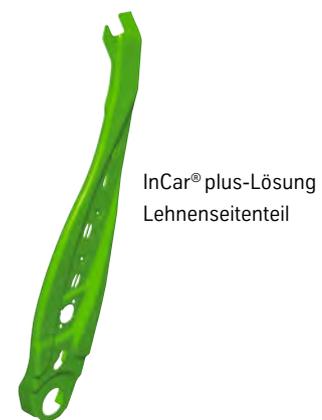
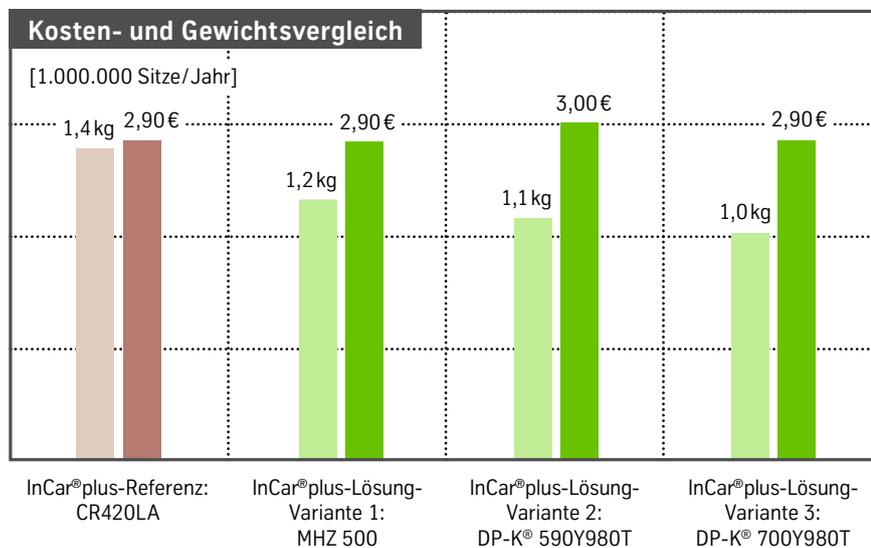
700Y980T) und weiterer Wandstärkenreduzierung ein Einknicken der Lehne zu verhindern, müssen die Geometrien der Lehnenseitenteile modifiziert wer-

den. Die Umformbarkeit der Werkstoffe ist mit Simulationen abgesichert. Eine Herausforderung bei der Konstruktion bestand darin, die komplexe Bauteilgeometrie durch einen Werkstoff dieser hohen Festigkeitsklasse zu realisieren. So ist möglich, durch den Einsatz von höchstfesten Stahlsorten eine Gewichtsreduktion von bis zu 27 % bezogen auf das Lehnenseitenteil beziehungsweise 15 % bezogen auf die Lehne kostenneutral umzusetzen, 3.

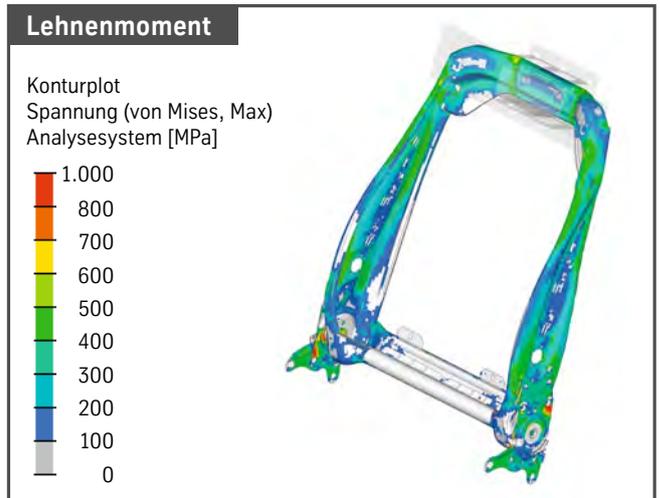
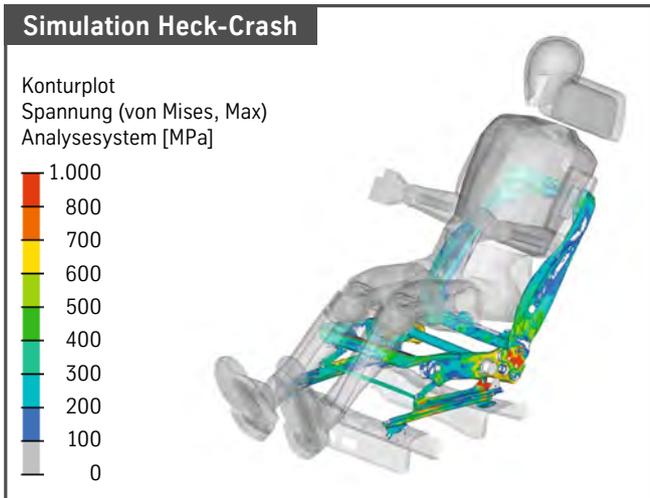
Mit einem aus der Gesamtsitzsimulation abgeleiteten Komponententest sichert ThyssenKrupp zusätzlich die Crashsimulation ab, 4. Bei dieser Heckcrashkonfiguration (95%-Dummy, InCar plus-Fahrzeugschlag) liegt ein maximales Moment von etwa 3000 Nm an der Lehne an. Der Fahrzeugschlag wurde im Vorfeld aus einer Fahrzeugsimulation (im Lastfall Heckaufprall) ermittelt. Dieser Beschleunigungs-Zeit-Verlauf wird wiederum für die Sitzauslegung bei der Heckcrashsimulation verwendet.

Analog zu der Gesamtsitzsimulation wird im Komponententest mit einem Hydraulikzylinder eine Kraft an der oberen Lehnquertraverse eingeleitet. Die Lehne ist dabei mit Verstellmechanismen am Prüfstand verschraubt. Aus dem Vergleich der gemessenen Kraft-Weg-Kurven mit den errechneten Diagrammen ergibt sich eine gute Korrelation für die Simulation des Lehnmoments, 5.

Bestätigt der Komponententest die gute Korrelation der CAE-Modellierung mit dem Versuch, ist auch von einem



3 Das neu entwickelte Lehnenseitenteil ist je nach Werkstoff bis zu 27 % leichter als die Referenz



4 Herleitung des Komponentenversuchs (Lehnenmoment) aus der Simulation (Heckcrash)

aussagekräftigen Ergebnis der Gesamtsitzsimulation auszugehen. Letztere ermittelt für alle Leichtbaukonzepte eine mit der Referenz vergleichbare Crashperformance.

Darüber hinaus wird auch die Füge-situation bewertet, etwa die Schweiß-seignung der jeweiligen Werkstoffe und die Zugänglichkeit für Schweißroboter oder Schweißzangen. Sitzstrukturen bestehen überwiegend aus unverzinkten Stählen. Die häufigsten Fügeverfahren sind Laserstrahl-, MAG- und Widerstandspunkt-schweißen. Die untersuchten Lehnen-konzepte sind für das Laserstrahlschweißen ausgelegt. Um die erforderlichen engen Toleranzen zu realisieren, wird bei der Werkzeugauslegung das unterschiedliche Rückfederungsverhalten berücksichtigt.

ENTWICKLUNG DER UNTERBAU-SEITENTEILE

Die Seitenteile des Unterbaus sind mechanisch hoch belastet und weisen, bedingt durch das enge Package, eine komplexe Formgebung auf. Ideal sind dafür Werkstoffe, die eine hohe Festigkeit mit einer vergleichsweise guten Umformbarkeit kombinieren. Ein für diese Bauteile relevantes umformtechnisches Kriterium ist die geringe Kantenrissempfindlichkeit, die im Labor mit Lochaufweitungsversuchen überprüft wird. Eine geringe Kantenrissempfindlichkeit begünstigt auch die Machbarkeit von Kragenzügen, die häufig für die Montage mit benachbarten Bauteilen wie

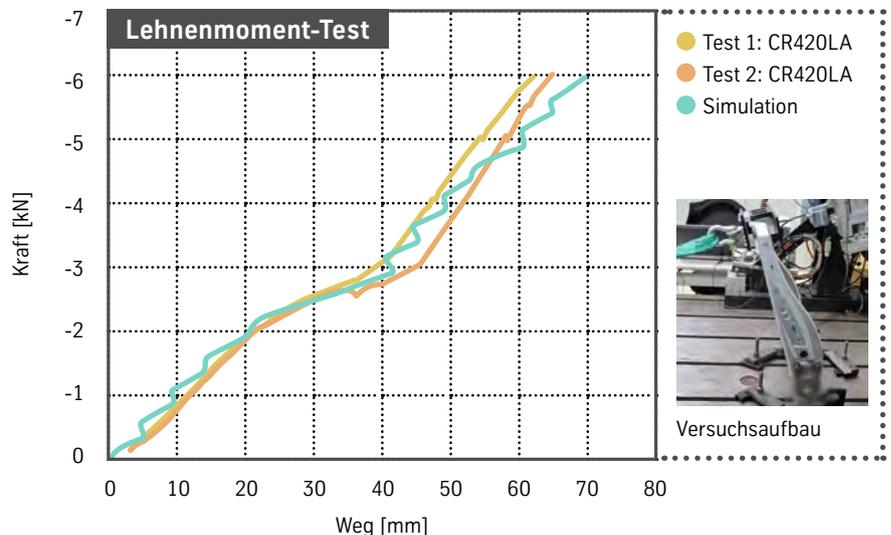
etwa dem Querrohr verwendet werden. Konstruktiv bedingt werden im hier dargestellten Beispiel alternative Fügekonzepte zu den Kragenzügen eingesetzt.

Das Unterbau-Seitenteil besteht in der Referenz aus Scalur S550MC. Die beiden InCar plus-Konzepte bestehen aus den Werkstoffen CP-W 660Y760T und HSM700HD. Sie bieten beide eine mit der Referenz vergleichbare Crashperformance. Die Machbarkeit der Bauteile wurde durch Umformsimulationen sichergestellt und durch prototypisch hergestellte Bauteile bestätigt, 5. Durch den Einsatz höchstfester Stähle lassen sich hier bis zu 6 % Gewicht sparen.

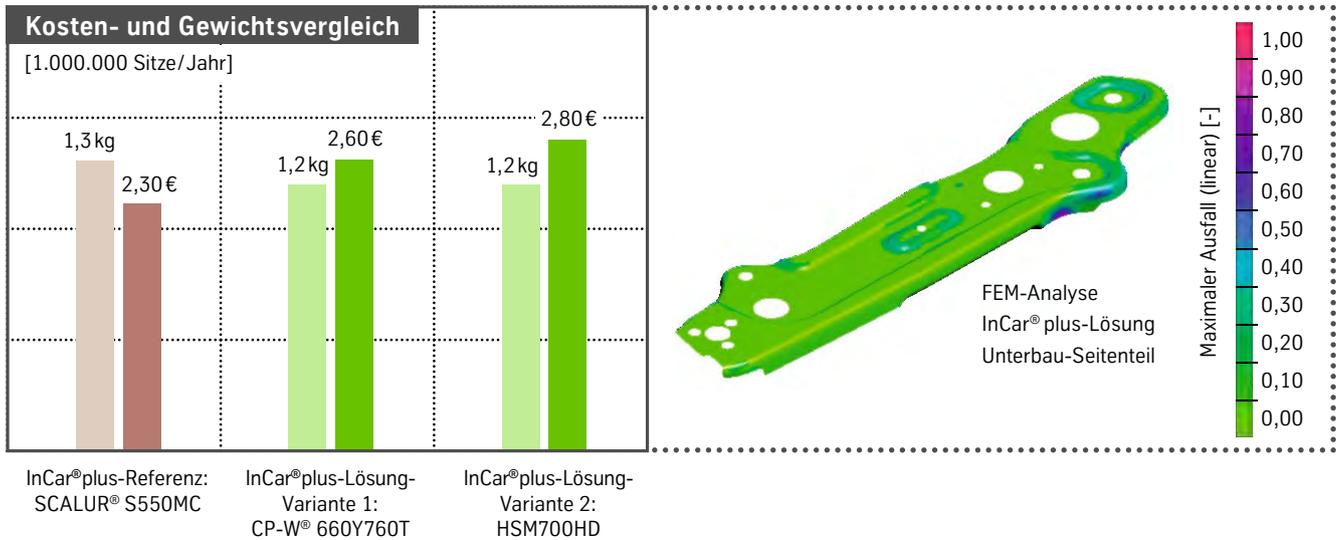
Da angrenzende Bauteile wie etwa Querrohre oder Recliner überwiegend mechanisch mit dem Unterbau-Seitenteil verbunden sind, beschränkt sich die fügetechnische Bewertung auf die MAG-Naht zwischen Unterbau-Seitenteil und Sitzschale.

ENTWICKLUNG DER SITZSCHALE

Beim Frontalcrash muss der Sitzunterbau zusammen mit dem Sicherheitsgurt und dem Airbag verhindern, dass der Insasse unter dem Gurt hindurch taucht (Anti-Submarining). Die Hauptlast überträgt dabei das vordere Querrohr, die Sitzschale wird flächig belastet. Deshalb ist für die-



5 Ergebnis und Versuchsaufbau des Lehnenmoment-Tests



6 Umformsimulation (rechts) und Ergebnisse (links) für Unterbau-Seitenteil

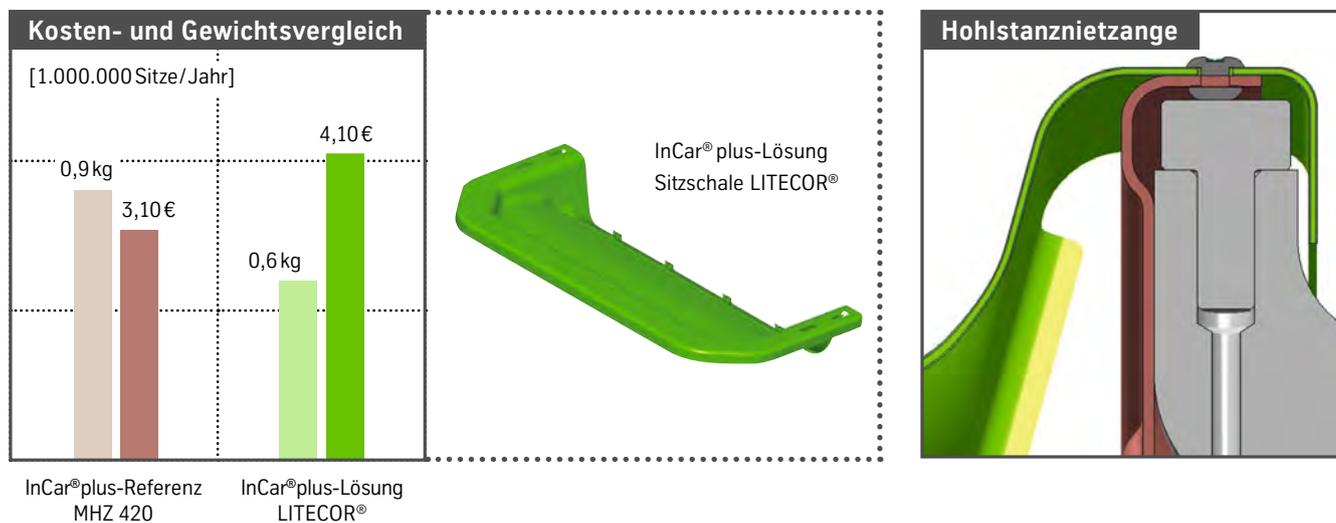
ses Bauteil der Werkstoffverbund Litecor mit Deckblechen aus CR210IF (ein höherfester IF-Stahl) und einer Kunststoff-Kernschicht von 0,8 mm zu empfehlen. Die beiden Deckbleche sind jeweils 0,2 mm dick. Für die Auslegung des Sitzschalenkonzepts wird neben der Gesamtsitzsimulation auch ein Missbrauchstest simuliert. Bei diesem Kniestest wird angenommen, dass sich der Insasse auf dem Sitz mit dem Knie abstützt. Dabei darf sich die Sitzschale nicht plastisch verformen. Der Werkstoffverbund Litecor erreicht bei diesem Missbrauchstest eine mit der Referenz vergleichbare Performance. Die Gewichtseinsparung beträgt 37 % bei Mehrkosten von nur 31 %.

Da ein Werkstoffverbund wie Litecor besondere fügetechnische Anforderungen stellt, liegt bei der Konzeptentwicklung der Fokus auf der Fügesituation. Sitzschale und Unterbau-Seitenteile werden am besten mit Hohlstanznieten und Kleben oder per Widerstandspunktschweißen verbunden. Das im Vergleich zur Referenz geänderte Fügekonzept (Referenz: MAG-Schweißen) erfordert eine leicht geänderte Bauteilgeometrie, um die Zugänglichkeit für die Hohlstanznietzange zu gewährleisten, 7.

Bei der fügetechnischen Bewertung wurde zusätzlich zur Verbindung von der Sitzschale zum Unterbau-Seitenteil auch die Verbindung von der Sitzschale zur

Federmatte untersucht. Die Federmatte wird vorne an der Sitzschale eingehakt und hinten mit dem Querrohr verbunden und beeinflusst den Sitzkomfort. Beim Litecor-Konzept wurde die Verbindung zur Federmatte aus Festigkeitsgründen geometrisch leicht modifiziert.

Abweichend zur üblichen Vorgehensweise in der Kostenkalkulation (siehe Beitrag „Benchmark 2.0: die aktualisierte Referenzstruktur“ ab Seite 86) liegen bei den Sitzen eine geschätzte Stückzahl von 500.000 Fahrzeugen beziehungsweise eine Million Fahrzeugsitze pro Jahr zugrunde. Denn modulare Sitzstrukturen können mit geringen Modifikationen für mehrere Fahrzeuge verwendet werden.



7 Kosten- und Gewichtsvergleich der Sitzschale (links), Bauteildarstellung (Mitte) und Hohlstanznietzange im Schnitt (rechts)

**KONZEPTENTWICKLUNG
RÜCKSITZBANK**

Während Vordersitze über die Modellvarianten hinweg eine gleiche oder vergleichbare Struktur aufweisen, müssen Fondsitze deutlich komplexere Anforderungen erfüllen. Sie reichen von hohem Komfort, etwa in Form von verstellbaren Einzelsitzen, bis hin zu sehr hoher Flexibilität, etwa in Form von Rücksitzanlagen mit ebenem Ladeboden. Da die Vordersitz-Konzepte teilweise auf Einzelsitze im Fondbereich übertragen werden können, wird als Referenz für den Fond eine im Verhältnis 40:60 teilbare Rücksitzbank mit ebenem Ladeboden gewählt. Sie ist modular aufgebaut, ihre Stahlstruktur wiegt 12 kg. Der modulare Aufbau hat den Vorteil, dass die Rücksitzbank bei unterschiedlichen Karosserimaßen schnell angepasst werden kann.

Um an den Vordersitzen einen günstigen Kraftfluss zu erzielen, sind die Gurtanbindungspunkte möglichst an die Karosserie angebunden. Es erfolgt keine Gurtintegration im Sitz, sondern der Gurt-Retractor ist in der B-Säule montiert und das Gurt-

schloss sowie der Gurtendbeschlag sind an den Sitzschienen angebunden.

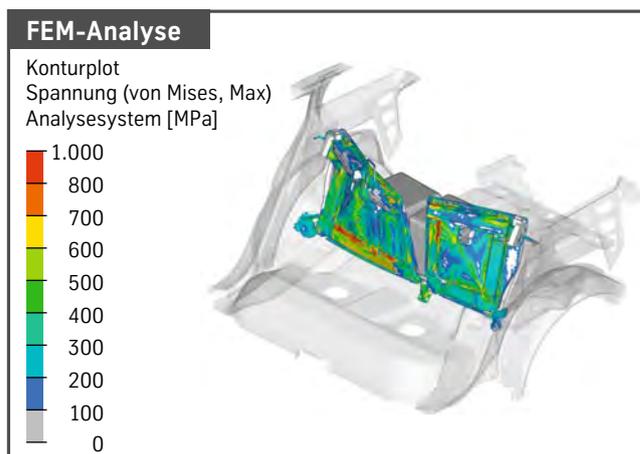
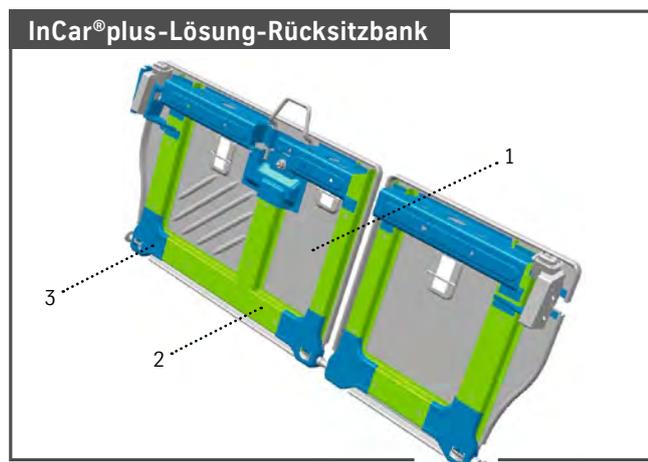
Bei der Auslegung der Rücksitzbank wurde aus Komfortgründen entschieden, die Gurtaufnahme für den mittleren Passagier in die Lehne zu integrieren und nicht wie bei anderen Fahrzeugen in den Querträger oder ins Fahrzeugdach. Daraus resultiert aber eine hohe Belastung der Sitzstruktur. Beispielsweise leiten beim statischen Lastfall ECE-R14 die Prüfkörper Kräfte von bis zu 13,5 kN in das Gurtsystem ein, während gleichzeitig die zulässige Verformung limitiert ist.

Neben den statischen Lastfällen müssen auch Crashanforderungen erfüllt werden. Beispielsweise treffen beim Lastfall „Schutz vor Ladung“ (ECE-R17) zwei Ladungswürfel mit jeweils 18 kg mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf die Rücksitzbank. Diese muss die Würfel zurückhalten und ihre Sitzstruktur darf nur eine limitierte Vorverlagerung ausführen, 8.

Somit lag der Schwerpunkt bei der Konzeptentwicklung auf den Profilen und Verstärkungsblechen. Die Wandstärke der Profile variiert im Bereich von 0,80 bis

1,00 mm und die der Verstärkungsbleche im Bereich von 2,00 bis 2,50 mm. Analog zur Vordersitzlehne wurde auch bei den Profilen der Rücksitzbank das Limit der Wandstärkenreduktion erreicht. Noch weiter ausgedünnte Profile würden einknicken und zu unzulässig hohen Verformungswerten führen. Eine geometrische Kompensation durch Sicken erhöht die Festigkeit der Profile zusätzlich.

Falls die Verstärkungsbleche aus Scalur S550MC bestehen, kann ihre Wandstärke jeweils um 0,10 mm reduziert werden. Der Verlust an Steifigkeit wird dabei durch geringfügige lokale Geometrieänderungen kompensiert. Auch hier wurde die Machbarkeit sowohl der Referenz als auch der Konzepte durch Umformsimulationen abgesichert. Bei der Konzeptentwicklung werden neben statischen Lastfällen (ECE-R14 Gurtverankerungstest sowie FMVSS 225 zur Auslegung der Kinderrückhaltesysteme) auch Crashlastfälle (Front-/Heckcrash und ECE-R17) berücksichtigt. Diese Maßnahmen erzielen in Summe eine Gewichtseinsparung von bis zu 15 % bei günstigen Leichtbaukosten.



Nr.	Bauteil	Werkstoff	Dicke
1	Rückwand		
	Referenz	CR380LA	0,60 mm
2	Profile		
	Referenz	CP-K® 570Y780T	von 0,80 bis 1,00 mm
	Variante 1	DP-K® 700Y980T	ΔDicke Referenz -0,10 mm
3	Verstärkungsbleche		
	Referenz	HR420MC	von 2,00 bis 2,50 mm
	Variante 1	SCALUR® S550MC	ΔDicke Referenz -0,10 mm
	Variante 2	HSM700HD	ΔDicke Referenz -0,20 mm

8 Rücksitzbank: Referenz mit Simulation "Schutz vor Ladung" sowie Darstellung der Bauteilvarianten

NEUE RÄDER AUS STAHL – LEICHT UND STYLISCH

ThyssenKrupp entwickelt durch die Kombination von Hochleistungsstählen und innovativen Fertigungstechnologien kostengünstige Leichtbauräder, die bis zu 20 % leichter als heutige Serienräder aus Stahl sind. Parallel dazu entsteht ein modulares Konstruktionsprinzip für eine ansprechende Optik und hohe Designflexibilität. Die entwickelten Stahlräder sind leichter als heutige Aluminiumräder, kostengünstiger und über den gesamten Lebenszyklus deutlich ökologischer. Ein weiteres Highlight ist das 20-Zoll-Hybridrad aus Stahl und kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK), das neue Maßstäbe in puncto Konzeption, Leichtbau und Design setzt.

Das Rad dient der Verbindung und der Kraftübertragung zwischen Reifen und Achse und muss höchsten Sicherheitsansprüchen genügen. Es unterliegt im Fahrbetrieb wechselnden dynamischen und schlagartigen Belastungen, die es über das Fahrzeugleben dauerhaft ertragen muss. Zusätzlich muss das Rad ein ansprechendes Fahrverhalten garantieren und kompatibel zu allen Anbauteilen im eng begrenzten Radbereich sein. Besonderes Augenmerk gilt dem Radgewicht, da zusätzliche Masse gleich drei negative Auswirkungen hat. So tragen die vier Räder nicht unwesentlich erstens zum Gesamtfahrzeuggewicht sowie zweitens zu den rotatorisch-bewegten Massen bei, was sich ungünstig auf Kraftstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß auswirkt. Drittens zählen die Räder zu den ungefederten Massen, die aus Gründen der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts möglichst gering sein müssen.

Nicht zuletzt ist das Rad ein herausragendes Designmerkmal des Fahrzeugs. Eine ansprechende Radoptik individualisiert das Fahrzeug und ist für den Autofahrer oft ein relevanter Kaufanreiz. Darüber hinaus kann der Automobilhersteller seine Modelle durch das Raddesign vom Wettbewerb abheben, ❶.

UMFANGREICHER BENCHMARK ALS ERFOLGSBASIS

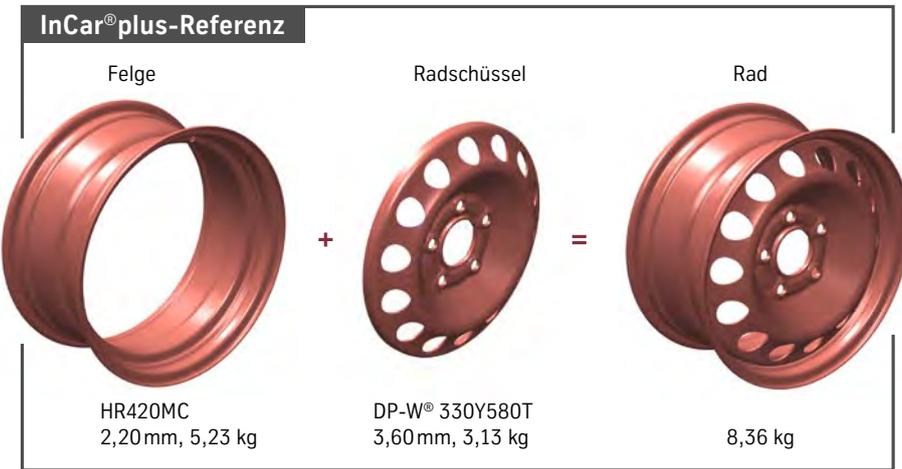
Zu Beginn der Entwicklungsphase wurden der Markt sowie der Stand der Tech-

nik bei Pkw-Rädern intensiv analysiert. Eine Marktstudie ergab, dass das typische Stahlscheibenrad hauptsächlich bis zur Mittelklasse sowie bei Transportern zum Einsatz kommt. Ab der oberen Mittelklasse und bei Radgrößen von mehr als 17 Zoll dominieren Aluminiumräder. Seit einigen Jahren erobern sie auch bei Mittelklasse- und Kompaktfahrzeugen

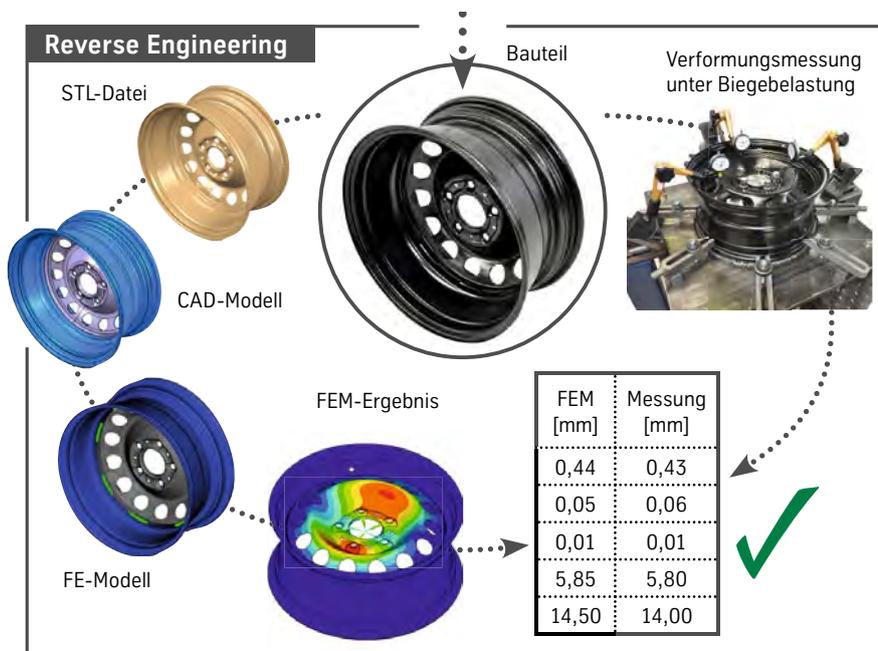
zunehmend Marktanteile. Auffällig ist, dass in der Fahrzeug-Erstausrüstung neben den zahlreichen Aluminiumrädern oftmals nur ein einziges Stahlrad in klassischem Design angeboten wird. Dabei sind Stahlräder um ein vielfaches günstiger als Aluminiumräder, deren Preise mit zunehmender Radgröße progressiv ansteigen.



❶ Übersicht der im InCar plus-Projekt entwickelten Stahlräder



2 Ausgangsbasis für die InCarplus-Radinnovationen



3 Validierung der Referenzstruktur

Bei einem Benchmark wurden 20 repräsentative 16-Zoll-Räder auf ihr Gewicht untersucht. Es stellte sich erstaunlicherweise heraus, dass gegossene Aluminiumräder bei gleicher Radgröße und Tragfähigkeit oft schwerer als konventionelle Stahlräder sind. Dies liegt zum einen daran, dass ein Rad in Blechbauweise im Hinblick auf Performance und Gewicht die optimale Konstruktion darstellt. Zum anderen bewirkt der Fokus auf ein ansprechendes Design oftmals ein Mehrgewicht.

Aus dem Benchmark heraus wird auch das Referenzrad für die innovativen Rad-

entwicklungen definiert. Es handelt sich um das leichteste und tragfähigste 16-Zoll-Serien-Stahlrad mit einer Breite von 7 Zoll und einem äußerst geringen Radgewicht von nur 8,36 kg. 2. Damit ist es leichter als vergleichbare Aluminiumräder, die bei gleicher Größe und Tragfähigkeit im Benchmark bis zu 10,0 kg wiegen.

Die Performance des ausgewählten Referenzrads wird durch quasi-statische und zyklische Belastungsversuche experimentell ermittelt. Die Versuche orientieren sich an den gesetzlich vorge-

schriebenen Testverfahren sowie den Qualitätsprüfungen der Räderhersteller. Der Umlaufbiegeversuch simuliert die Belastung eines Rads unter Kurvenfahrt mit erhöhten Lasten und beansprucht überwiegend die Radschüssel. Zusätzlich wird die Steifigkeit der Felge im Bereich des Felgenhorns gemessen, um die Abrollprüfung und die Verformung beim Reifenaufziehen beziehungsweise Bordsteinanprall vereinfacht abzubilden. Die ermittelten Kennwerte bilden die Zielwerte für die neuen Stahl-Konzepte. Das Referenzrad ist digital vermessen und wurde in CAD überführt. Damit können die Ergebnisse der Simulationswerkzeuge mit den realen Versuchen des Referenzrads abgeglichen werden und damit für die Entwicklungsphase verifiziert werden, 3.

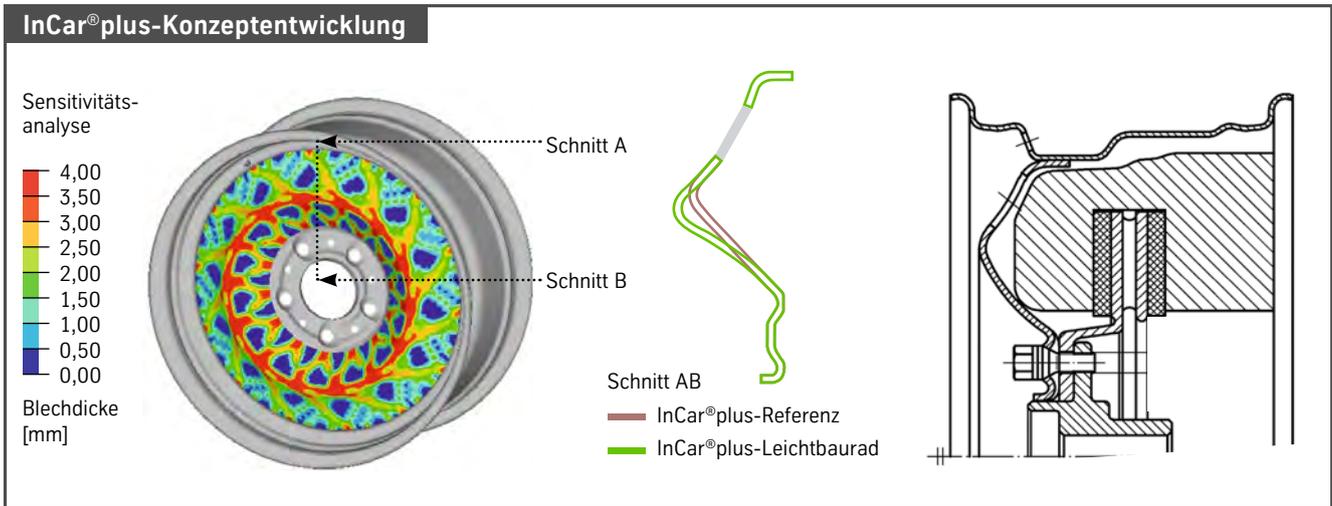
Das bisher genannte Anforderungsspektrum stellt hohe Ansprüche an die Entwicklung neuer Stahlräder. Bei der InCar plus-Radentwicklung steht daher nicht nur die unverzichtbare Gewichtsreduzierung, sondern auch die Schaffung von Designmöglichkeiten zur Ausgestaltung individueller Stahlrad-Optiken im Fokus.

STANDARD-STAHLRAD IN LEICHTBAUWEISE

Bieten diese Rahmenbedingungen noch Raum für ein neues Standard-Stahlrad? Eindeutig ja, denn durch den Einsatz neuer Werkstoffe und Fertigungstechnologien für die Radschüssel und der Drückwalztechnik für eine belastungsoptimierte Felge sinkt das Radgewicht um bis zu 20 %. Dass die Warmumformung zukünftig ein geeignetes Verfahren zur Herstellung der Radschüssel sein kann, zeigen erste Bauteilversuche unter zyklischer Belastung.

Das Gewichtseinsparpotenzial wurde separat für die Radschüssel und Felge betrachtet. Die Radschüssel unterliegt besonders hohen mechanischen Belastungen. Eine geringere Blechdicke wirkt sich hier unmittelbar auf die globale Bauteilsteifigkeit und damit das Fahrverhalten aus. Daher muss eine Blechdickenreduzierung mit einer geometrischen Anpassung kompensiert werden. Einer solchen neuen Geometrie setzt aber der sehr dicht gepackte Bauraum im Radbereich enge Grenzen, 4.

Numerische Sensitivitätsanalysen der Radschüssel zeigen, dass die Verstei-



4 Blechdickenoptimierung (links), Steifigkeitsoptimierung durch Wulst (Mitte) und Bauraumrestriktion (rechts)

fungswelle signifikanten Einfluss auf die Bauteilsteifigkeit hat. Eine „scharfkantigere“ Ausprägung der Versteifungswelle gleicht beim neuen Leichtbaurad mit kaltumgeformter Radschüssel den globalen Steifigkeitsverlust infolge der Blechdickenreduzierung aus. Mit diesem konstruktiven Eingriff ist eine von 3,6 auf 3,3 mm verringerte Blechdicke möglich, die für einen Gewichtsvorteil von über 5 % bei der Radschüssel sorgt.

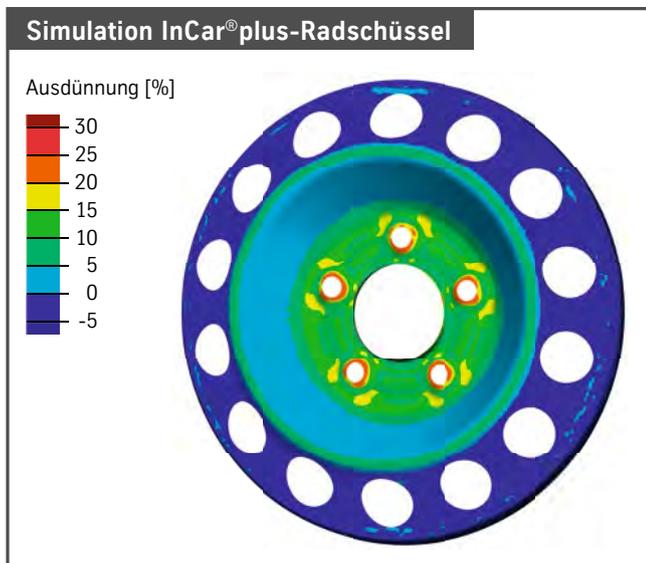
Die Blechdickenverringering ist außerdem nur mit einem Werkstoff mit höherer Streckgrenze sowie Schwingfestigkeit möglich, da die geforderte Dauerfestigkeit der Räder weiterhin sicherge-

stellt werden muss. Die zyklische Werkstofffestigkeit aus Flachprobenprüfungen ist aber nur bedingt auf das komplexe Bauteilverhalten des Rads übertragbar. Aus diesem Grund ist eine experimentelle Überprüfung der Eigenschaften am fertigen Rad unter zyklischer Belastung erfolgt.

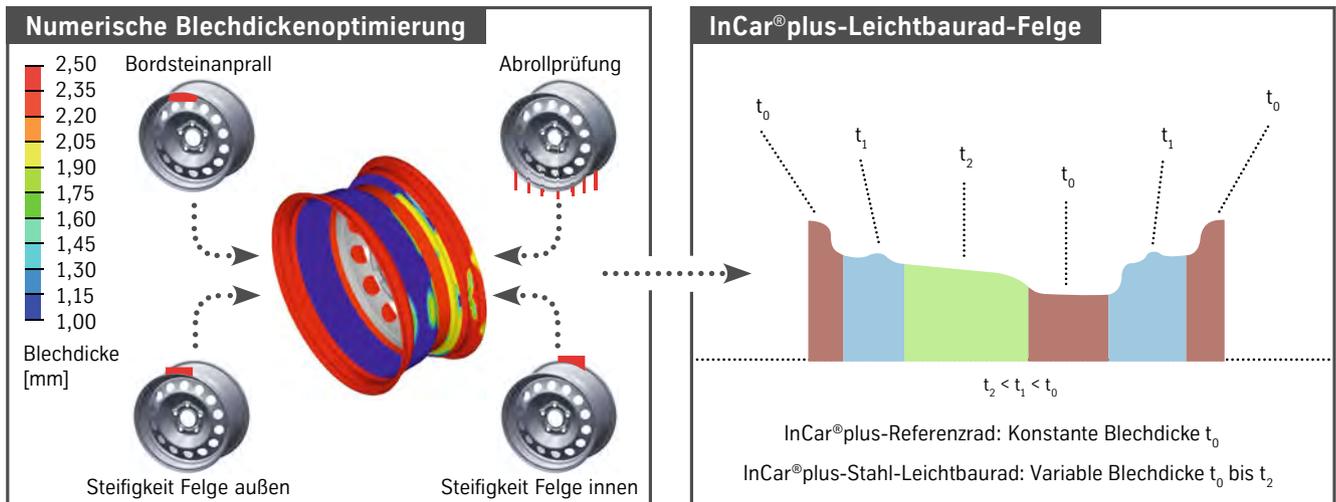
ThyssenKrupp untersucht parallel zum Standard-Werkstoff DP-W 330Y580T in der Kaltumformung noch weitere ein- und mehrphasige Stähle in der Festigkeitsklasse 600-800 MPa sowie einen neuartigen Werkstoffverbund hinsichtlich der Eignung für die Radschüssel. Dabei wurden vielversprechende Stahl-

werkstoffe zur Realisierung einer leichten und gleichzeitig hochfesten Radschüssel identifiziert und es ergaben sich weitere Rückschlüsse auf die signifikanten Werkstoffeigenschaften.

Die Ingenieure achten bereits bei der Herstellung der Räder-Prototypen auf möglichst seriennahe Produktionsprozesse, um bestimmte Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften wie beispielsweise die Kantenrissempfindlichkeit oder Bake-Hardening-Effekte der Stähle zu berücksichtigen. Die Abpressungen der verschiedenen Werkstoffe werden von Formänderungsanalysen begleitet und mit den im Vorfeld zur Prozessaus-



5 Validierung der Umformsimulation



6 Blechdickenoptimierung an der Felge und ihre Ergebnisse

legung durchgeführten Simulationen validiert, 5. Damit ist ein möglicher Einsatz schon im Vorfeld virtuell bewertbar.

Im Allgemeinen reduziert eine Anhebung von Streckgrenze und Festigkeit die Umformbarkeit von Stahlwerkstoffen. Für eine leichte und frei gestaltbare Radschüssel ist es aber wünschenswert, dass Umformbarkeit und Festigkeit gleichermaßen ein sehr hohes Niveau erreichen. Als geeigneter Prozess dafür bietet sich die Warmumformung an. Bei ihr wird die Ausgangsplatte auf eine Austenitisierungstemperatur von etwa 900 °C erwärmt und anschließend im Umform- beziehungsweise Härtungswerkzeug weiterverarbeitet. Die bessere Umformbarkeit bei hohen Temperaturen ermöglicht komplexe Bauteile mit hohen Festigkeiten. Wird zusätzlich das partielle Presshärten angewandt, können lokal unterschiedliche Festigkeits- und Duktilitätseigenschaften eingestellt werden.

INNOVATIVE RADSCHÜSSEL DURCH WARMUMFORMUNG

Bisher werden keine Stahlräder mithilfe der Warmumformung in Serie hergestellt. ThyssenKrupp untersucht dieses vielversprechende Verfahren für die Radschüssel und bewertet es durch zyklische Belastungsversuche am Rad. Im Vergleich zur konventionellen kaltumgeformten Bauteilgeometrie kann die Blechdicke der warmumgeformten Radschüssel auf 3,0 mm verringert werden, wie Simulationsrech-

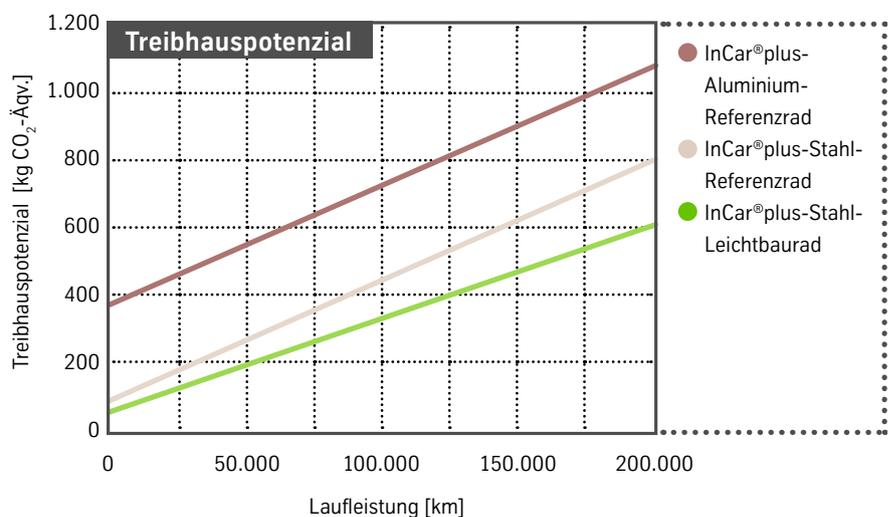
nungen belegen. Dies spart im Vergleich zur kaltumgeformten Referenz-Radschüssel etwa 17 % Gewicht.

Für einen effizienten Warmumformprozess ohne kostspielige Nacharbeiten am gehärteten Bauteil integriert man möglichst alle Verarbeitungsschritte in einem Umformwerkzeug. Dabei ist besonders auf die Radbefestigung zu achten. Denn zum einen wird die Geometrie der Radbolzenlöcher in der Serie durch Massivumformung eingebracht. Zum anderen muss der Radflansch eine ausreichende Duktilität aufweisen, da hier durch den Kontakt mit den Radbolzen und der Radnabe hohe mechanische und thermische Belastungen auftreten. Mit seinem breiten Know-how zur

Warmumformung ist es ThyssenKrupp gelungen, ein Prototypen-Werkzeug zu entwickeln. Damit lassen sich warmumgeformte Radschüsseln im direkten Verfahren mit lokalen Festigkeitsunterschieden herstellen. Durch eine Veränderung der Werkzeugkinematik ist auch eine vollständige Presshärtung der Radschüssel von neuartigen Warmumformstählen und damit eine Verringerung der Zykluszeiten möglich.

FELGE MIT UNTERSCHIEDLICHEN BLECHDICKEN

Die Felge ist der schwerste Teil des Rads. Beim Referenzrad hat sie einen Anteil von 62 % der Gesamtmasse. Dazu



7 Bei gleichem Gewicht gibt es zwischen Stahlrädern und Aluminiumrädern keinen Break-even

kommt, dass weit von der Raddrehachse entfernte Masse aufgrund der Massenträgheit einen überproportional hohen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch hat. Folglich ist eine Gewichtsreduzierung der Felge besonders effektiv.

Durch numerische Optimierungsrechnungen lässt sich die ideale Materialverteilung über der Felgenbreite ermitteln. Dabei zeigt sich, dass eine geringe Blechdicke im Bereich der Felgenhörner und im Tiefbett die lokalen Steifigkeiten und Spannungszustände negativ beeinflusst. Im Bereich der Felgenschulter sowie zwischen Felgenschulter und Tiefbett ist eine Blechdickenreduzierung möglich, 6. Auf Grundlage der Simulationsergebnisse ließ sich eine maximale Gewichtsreduzierung von 27 % ermitteln.

Die berechnete Blechdickenverteilung der Felge ist mit zwei unterschiedlichen Technologien realisierbar: entweder mit Tailored Strips beziehungsweise Tailor Rolled Blanks oder mit der Drückwalztechnik. Bei dieser Technik passen Drückrollen die unterschiedlichen Dickenbereiche des Felgenrohrlings gezielt und kontinuierlich an. Zusätzlich wird bei dieser mechanischen Bearbeitung das Ausgangsmaterial verfestigt und damit die resultierende Festigkeit erhöht. Drückwalzen ist bereits ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von Rädern, speziell für Lkw-Radschüsseln, und somit auch für die Realisierung der belastungsoptimierten Pkw-Felge erste Wahl.

Die virtuelle Auslegung und experimentelle Erprobung des Leichtbaurads

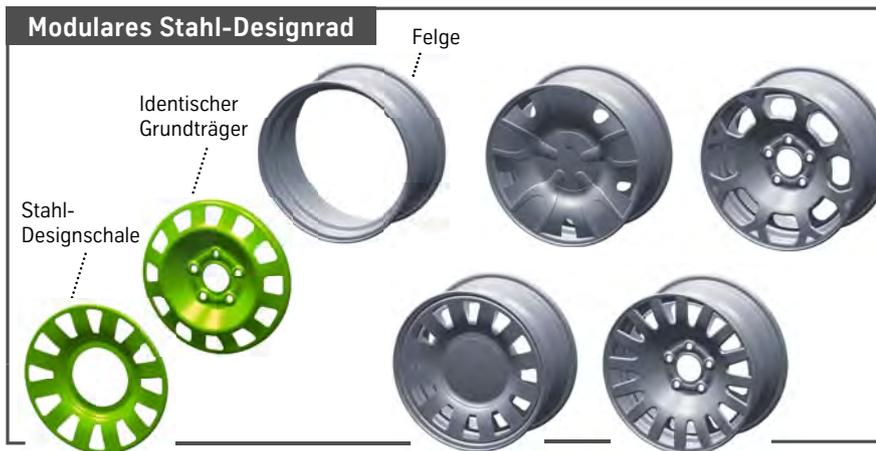
erarbeiten ThyssenKrupp und der Räderhersteller Magnetto Wheels gemeinsam. Insbesondere die Herstellung der gewichtsoptimierten Felge erfolgt auf den Produktionsanlagen des Räderherstellers. Die prototypisch erzeugten Radschüssel-Varianten und die Felgen werden mit üblichen Serienverfahren miteinander verbunden. Biegeumlaufversuche bei 75 % Last zur Dauerfestigkeitsprüfung schließen die Entwicklung ab.

KOSTEN- UND ÖKOBILANZ FÜR DAS LEICHTBAURAD

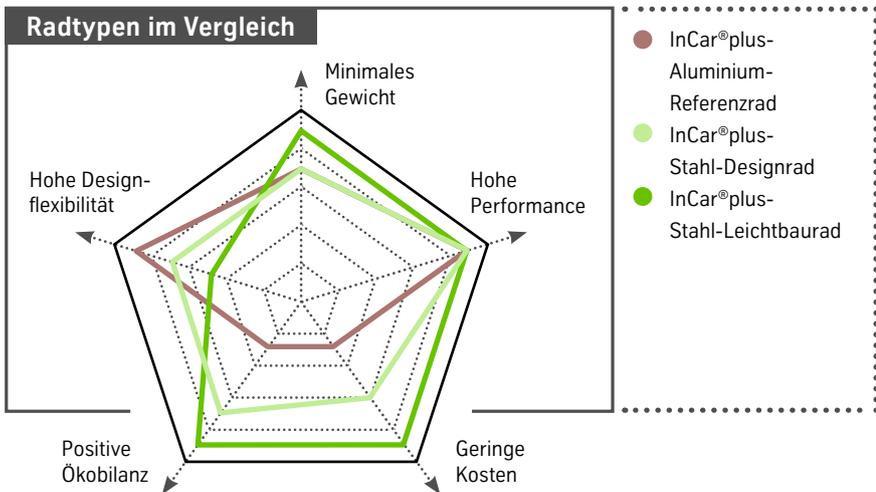
Die Kostenbewertung des entwickelten Leichtbaurads ist positiv. So kompensieren die Materialersparnisse an der Felge den prozessbedingten Mehraufwand der Drückwalztechnik vollständig. Bei der kaltumgeformten Radschüssel hingegen kann die Blechdickenreduzierung den höheren Materialpreis nicht vollständig ausgleichen. Dem eingesparten Gewicht von bis zu 1,3 kg stehen Leichtbaukosten von maximal 1,10 €/kg je nach Werkstoff gegenüber.

Die warmumgeformte Radschüssel belegt auch, dass eine Verlagerung aller Umformoperationen in ein Werkzeug sinnvoll und möglich ist. So können die technologiebedingten Mehrkosten für die Warmumformung durch Materialeinsparungen und weniger Fertigungsschritte in etwa ausgeglichen werden.

Besonders interessant ist der Ökobilanz-Vergleich von Referenzrad und Leichtbau-Stahlrad mit repräsentativen Aluminiumrädern, 7. Dargestellt ist das Treibhauspotenzial der unterschiedlichen Radvarianten über die gesamte Nutzungszeit. Durch den hohen Primärenergieverbrauch der Aluminiumgewinnung entsteht bei der Herstellung von Aluminiumrädern deutlich mehr CO₂ als bei Stahlrädern. Zusätzlich sind die Aluminiumräder im Benchmark schwerer als die dargestellten Stahllösungen, sodass sie auch während der Nutzungszeit keinen Vorteil erzielen. Somit sind Stahlräder deutlich ökologischer und insbesondere für die besonders verbrauchsoptimierten Modelle der Fahrzeughersteller eindeutig die bessere Wahl. Detailliertere Lebenszyklusanalysen für die Räder sind im Beitrag „Umweltperformance als wichtiges Kriterium“ (siehe ab Seite 130) zu finden.



8 Konzept für das neue Stahl-Designrad



9 Vergleich der Stahlrad-Innovationen und von Aluminium-Gussrad im Spinnendiagramm

KONZEPTENTWICKLUNG FÜR DAS STAHL-DESIGNRAD

Aluminiumräder werden im Gussverfahren hergestellt und ermöglichen so zu verhältnismäßig geringen Investitionskosten eine hohe Designvielfalt. Das klassische Stahlrad hingegen zeichnet sich durch Performance, niedriges Gewicht und Wirtschaftlichkeit bei hohen Stückzahlen aus. ThyssenKrupp vereint in seinem neuen Stahl-Designrad die Vorteile beider Produktwelten, ⑧.

Bei diesem modularen Radkonzept übernimmt ein Grundkörper den Hauptanteil der mechanischen Belastung. Seine ansprechende Optik erhält das Rad von einer modularen Stahl-Designschale, die tragend mit dem Grundkörper verbunden ist. Dieses zweiteilige Konzept bietet eine hohe Designvielfalt bei moderaten Mehrkosten – und das auf dem Gewichtsniveau des Referenzrads. Im Vergleich zu Aluminiumrädern ist das modulare Stahl-Designrad sogar deutlich kostengünstiger und in seiner Ökobilanz vorteilhafter, ⑨.

Üblicherweise werden Abdeckungen aus faserverstärktem Kunststoff eingesetzt, um das Stahlrad optisch aufzuwerten. Die Abdeckungen verursachen aber bis zu 10 % des Radgewichts und leisten keinen strukturellen Beitrag. Die Ökobilanz wird zudem durch die Abdeckung aus Kunststoff deutlich verschlechtert. Die mittragende Stahl-Designschale hingegen vermeidet diese Nachteile und bietet viele Gestaltungsfreiheiten.

ThyssenKrupp hat gemeinsam mit Magnetto Wheels die generelle Herstellbarkeit und Funktionsweise an zwei Prototyp-Designvarianten nachgewiesen. Die Prototypen verwenden das Leichtbaurad als Grundträger und werten es mit zwei unterschiedlichen Stahl-Designschalen auf. Die Designschale ist sowohl mit der Radschüssel als auch mit der Felge tragend verbunden und verbessert so die Steifigkeit und den Kraftfluss im Rad. Fügeverfahren sind das Laserstrahl-löten sowie das klassische Laserstrahl-schweißen. Zukünftig denkbar ist auch eine Klebverbindung.

Durch die Anbindung der Designschalen im Bereich der Felgenschulter wirkt das Rad optisch deutlich größer als ein konventionelles, im Tiefbett angebundenes Stahlrad und erzielt damit die Wirkung eines Semi-Full-Face-Scheibenrads. Zusätzlich ermöglicht das Konzept die Unterstützung des aktuellen Trends hin

Stahl-CFK-Hybridrad



⑩ Attraktives 20-Zoll-Leichtbaurad in Multimaterialbauweise

zu eher geschlossenen Radflächen, der von der CO₂-Diskussion (verbesserte Aerodynamik) und aktuellen Elektrofahrzeugen beschleunigt wird.

AUSSERGEWÖHNLICHES STAHL-CFK-HYBRIDRAD

Das Stahl-CFK-Hybridrad ist ein anspruchsvolles 20-Zoll-Rad für die Sport- und Luxuswagenklasse, das in Bezug auf Design und Gewicht mit Schmiederädern aus Aluminium konkurriert. Der Werkstoffmix und die innovativen Fügeverfahren lassen die Vorteile der einzelnen Werkstoffe ideal zur Geltung kommen und erzeugen ein optisch attraktives Leichtgewicht mit nur 10,5 kg Masse.

Die Grundidee des Hybridrads lautet „Der ideale Werkstoff an der richtigen Stelle“. In der Felge konzentriert sich mit maximalem Abstand zur Drehachse der Großteil der Radmasse. Hier ist eine Gewichtsreduzierung besonders effektiv, weshalb die Felge des neuen Hybridrads aus dem Leichtbauwerkstoff CFK besteht. Im Bereich des Radsterns ist der Bauraum eng begrenzt, die mechanische sowie thermische Belastung und die Anforderung an das optische Erscheinungsbild hingegen ausgesprochen anspruchsvoll. Aus diesen Gründen muss hier der ideale Werkstoff hoch verformbar, sehr steif, thermisch hoch belastbar und sehr fest sein – Stahl.

Um den exklusiven Designanforderungen der Käufer von Luxusfahrzeugen und Sportwagen gerecht zu werden, erhält das Hybridrad ein sehr ansprechendes Styling. Unter vielen Entwürfen

wurde für die Realisierung ein filigranes Doppelspeichen-Design ausgewählt, ⑩.

Eine besondere Herausforderung bei der Fertigung von Metall-CFK-Hybridbauteilen sind die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der einzelnen Materialien. Begegnet wird dieser Thematik durch spezielle fertigungs- und materialtechnische Detaillösungen für die Einzelbestandteile des Stahl-CFK-Hybridrads. Damit ist es gelungen, die durch Temperaturschwankungen bei der Herstellung und im Betrieb verursachten Eigenspannungen im Bauteil zu minimieren.

Die strukturaufgelöste Schalenbauweise für den Radstern führt zudem zu einer hohen Bauteilsteifigkeit bei geringem Gewicht. Mit dem dargestellten Konzept konnte erstmals ein Stahl-CFK-Hybridrad der Größe 20 Zoll mit entsprechend hohen Einsparpotenzialen umgesetzt werden. Die ersten Erprobungsversuche mit den hergestellten Prototypen laufen vielversprechend. Die Integration des gebauten Stahl-Radsterns oder der CFK-Felge in weiterführende Konzepte ist möglich.

ThyssenKrupp hat im Rahmen von InCar plus quasi das Rad neu erfunden – und nicht nur eines. Die Optimierung der Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Geometrien der Stahlräder heben deren Wettbewerbsfähigkeit auf eine neue Stufe. Vor allem die neuen Designkonzepte eröffnen dem Stahlrad durch vielfältige Individualisierungsmöglichkeiten breitere Einsatzgebiete. Der Multimaterialansatz des Stahl-CFK-Hybridrads erschließt für Stahl sogar das Segment der hochwertigen Performanceräder mit hohem Designanspruch.

UMWELTPERFORMANCE ALS WICHTIGES KRITERIUM

Die Nachhaltigkeit von Fahrzeugen gewinnt in der Automobilindustrie als Wettbewerbsfaktor zunehmend an Bedeutung. Daher wird im Projekt InCar plus besonderer Wert auf umweltfreundliche Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Fahrzeugkomponenten gelegt. Mit Life Cycle Assessments (LCA) werden über den gesamten Lebenszyklus die potenziellen Umweltauswirkungen der neu entwickelten Lösungen ausführlich analysiert. Für sehr viele von ihnen liegen Ökobilanzen vor, die in allen Wirkungskategorien Verbesserungen zeigen und das über den gesamten Lebenszyklus hinweg.

Nicht nur der Anspruch der Konsumenten an umweltfreundliche Produkte hat in den letzten Jahren zu einer zunehmenden Relevanz von Nachhaltigkeit geführt. Auch auf politischer Ebene beschäftigen sich immer mehr Regelungen mit Themen wie Recycling und Öko-design. In der Automobilindustrie spiegelt sich das vor allem in der Verordnung zur Verminderung der CO₂-Emissionen wider, die seit 2009 immer strengere CO₂-Grenzwerte für Pkw und Nutzfahrzeuge vorschreibt [1]. Diese berücksichtigt bislang nur die CO₂-Emissionen im Fahrbetrieb. Aber auch die Umweltauswirkungen bei der Produktion und die Recyclingfähigkeit der Bauteile haben signifikanten Einfluss auf die Umweltbilanz von Fahrzeugen.

ThyssenKrupp betrachtet in seinen Ökobilanzen alle Lebenszyklusphasen, von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung über die Materialproduktion und Bauteilherstellung bis hin zur Nutzung und dem Recycling der Endprodukte, ❶. Die durch Leichtbau erreichten Gewichtseinsparungen führen zu geringeren Emissionen während der Nutzungsphase. Bei allen Stahlkonzepten, die das Gewicht der Bauteile verringern, verbessern sich somit auch die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebenszyklus. Denn durch den reduzierten Werkstoffeinsatz sinken auch die Emissionen bei der Materialherstellung. Anders verhält es sich bei Werkstoffen wie Aluminium, Magnesium oder CFK. Diese Materialien bieten zwar ein hohes

Leichtbaupotenzial, weisen aber zum Teil hohe Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase auf. Diese müssen dann im Laufe der Nutzungsphase kompensiert werden. Im ungünstigsten Fall lassen sich die Umweltlasten aus der Herstellungsphase selbst über die gesamte Nutzungsdauer nicht amortisieren. Deshalb sollten vorab immer die Konsequenzen einer Werkstoff- und Technologieauswahl geprüft werden.

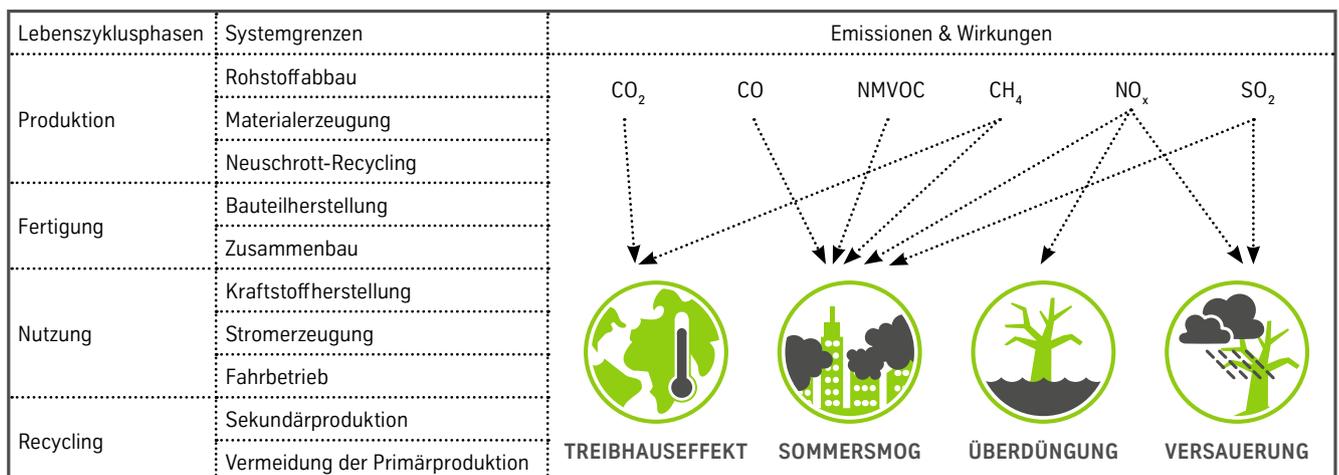
Unter Ganzheitlichkeit versteht ThyssenKrupp nicht nur die Betrachtung aller Lebenszyklusphasen, sondern auch verschiedener Umweltindikatoren. Denn ein Produkt mit guter CO₂-Bilanz muss nicht zwingend umweltfreundlich sein. Der Einsatz eines neuen Werkstoffs kann möglicherweise den Treibhauseffekt verringern, aber gleichzeitig das Versauerungspotenzial erhöhen. Diese Verschiebungen zwischen den Umweltlasten müssen stets berücksichtigt und kritisch hinterfragt werden. Auch der aktuelle Bericht des Internationalen Klimarats verdeutlicht die Bedeutung der Versauerung für unser Ökosystem [2]. Zudem wurde auf EU-Ebene die Ressourceneffizienz als neues Schwerpunktthema festgelegt [3]. Die Verantwortung von ThyssenKrupp für die Umwelt geht weit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus. Deshalb werden in den Ökobilanzen auch weitere Wirkungskategorien, der Primärenergiebedarf, fahrbetriebstypische Einzelemissionen und der Ressourcenverbrauch berücksichtigt.

BELASTBARE DATENBASIS UND FLEXIBLE METHODIK

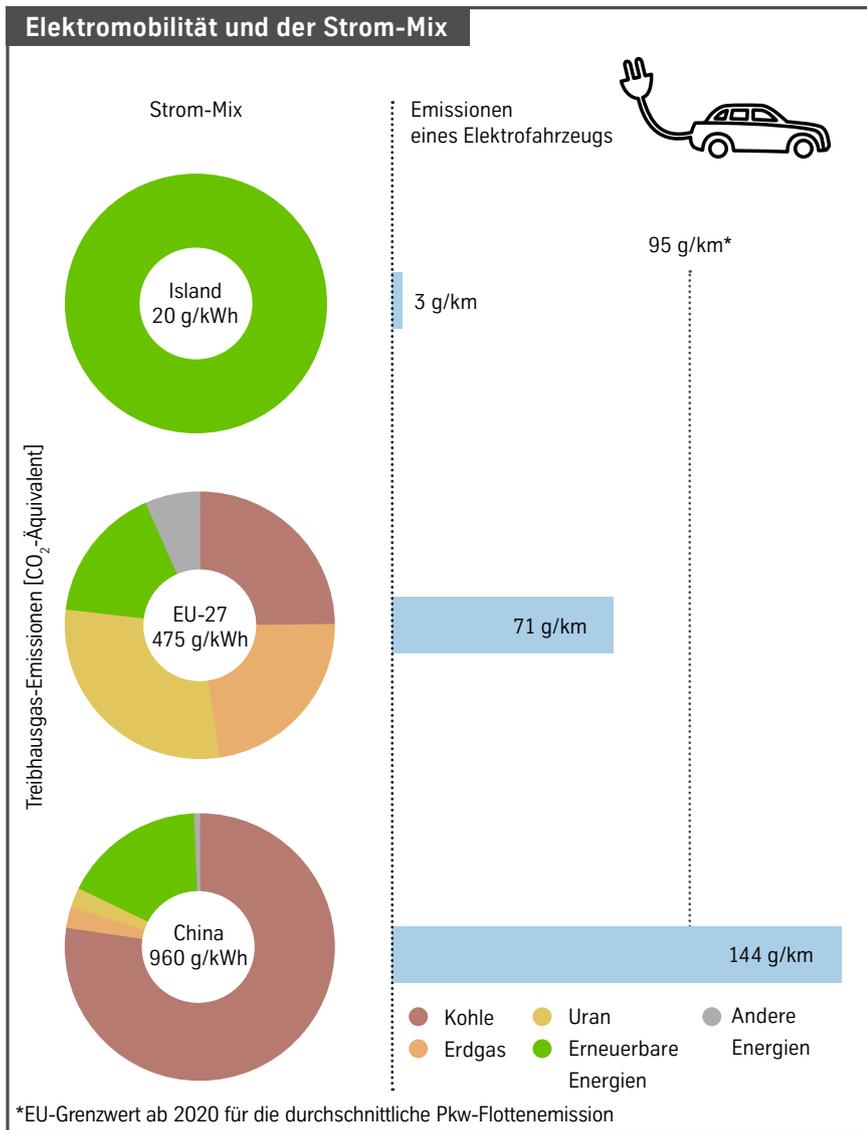
In der Ökobilanz umfasst die Herstellungsphase alle Vorketten der eingesetzten Materialien und Energien, die Produktion der Werkstoffe sowie die eigentliche Bauteilherstellung. Daten für die Stahlproduktion stellt ein ThyssenKrupp-eigenes Stahlmodell mit Messdaten aus 2012 bereit, das die Umweltauswirkungen des integrierten Hüttenwerks abbildet. Datensätze für andere Werkstoffe wie Magnesium oder Aluminium werden allgemein anerkannten Datenbanken entnommen. Bei der eigentlichen Bauteilherstellung erhebt ThyssenKrupp ebenfalls eigene Messwerte.

InCar plus beschäftigt sich mit verschiedenen Antriebskonzepten, was auch besondere Anforderungen an die Modellierung der Nutzungsphase stellt. Bei konventionell betriebenen Fahrzeugen ist vor allem die Verbrennung des Kraftstoffs ausschlaggebend für die Emissionen in der Nutzungsphase. Hingegen liegt der Schwerpunkt bei elektrisch betriebenen Fahrzeugen bei der Stromerzeugung. Für eine konsistente Darstellung der Nutzungsphase werden deshalb nicht nur direkte Emissionen, sondern auch die Kraftstoffherstellung und die Stromerzeugung berücksichtigt.

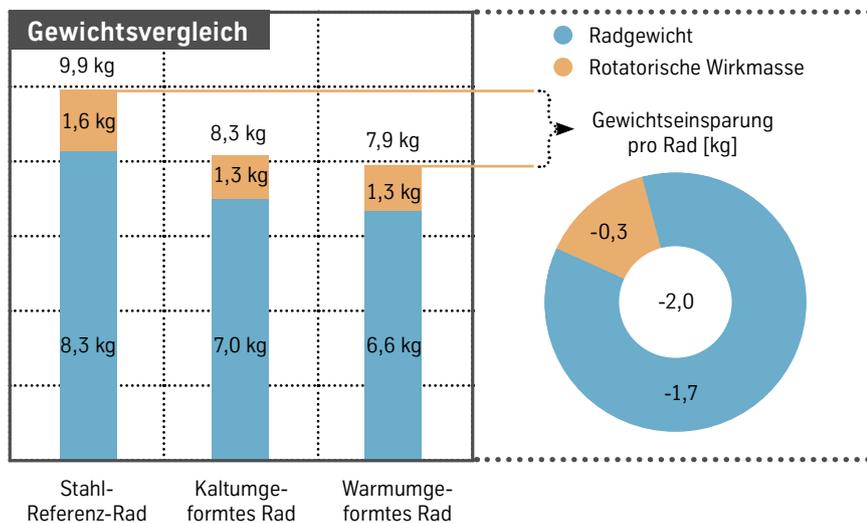
Der länderspezifische Strom-Mix [4] kann dabei von entscheidender Bedeutung für das Ergebnis sein, ❷. Ein herkömmliches Elektrofahrzeug mit einem Energiebedarf von 150 Wh/km verur-



❶ Lebenszyklusphasen und Wirkungskategorien



2 Auswirkungen unterschiedlicher Strom-Zusammensetzungen auf die Emissionen eines Elektrofahrzeugs

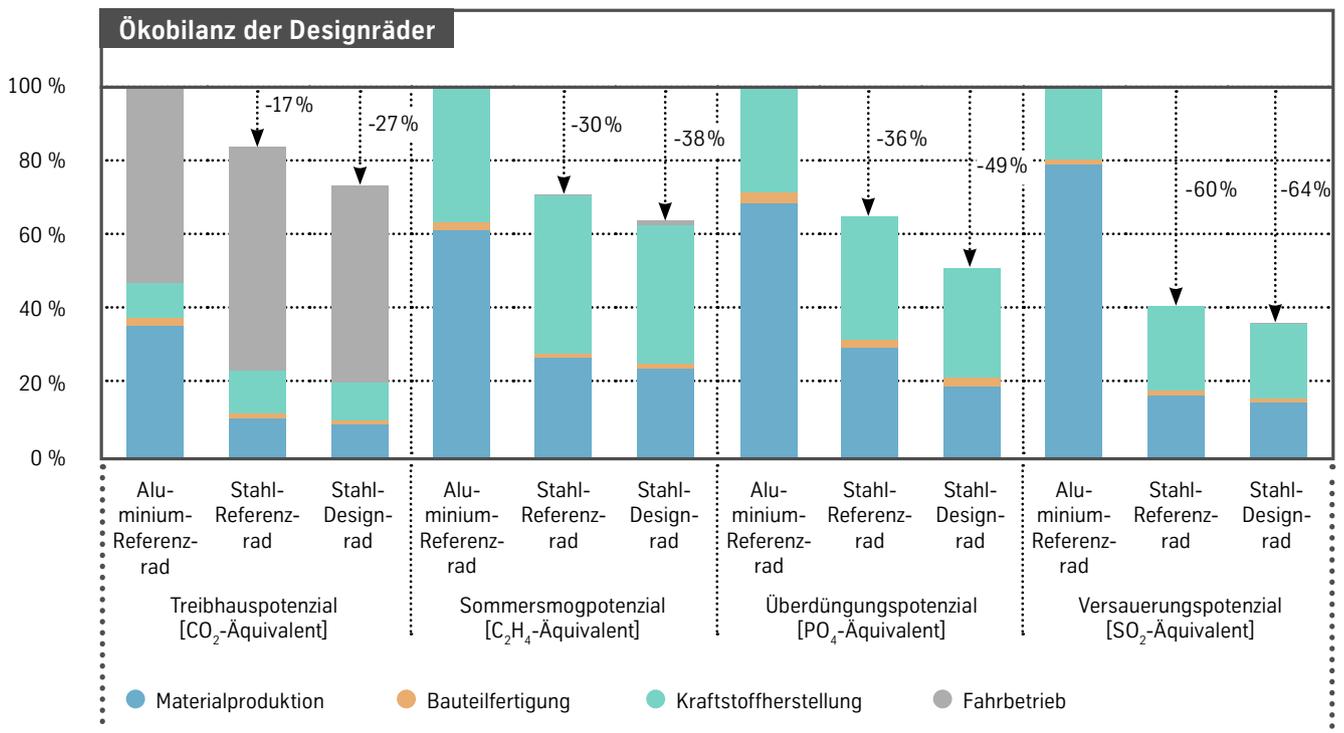


3 Anteil rotatorischer Massen am Gesamtgewicht der Leichtbau-Räder

sacht mit einem kohlelastigen chinesischen Strom-Mix Emissionen von 144 g CO₂/km und liegt damit über den Emissionswerten eines vergleichbaren Ottomotors. Hingegen emittiert ein mit erneuerbarer Energie betriebenes Elektrofahrzeug aus Island nur etwa 3 g CO₂/km. Mit zunehmendem Anteil emissionsarmer oder neutraler Energieträger am Strom-Mix nimmt also die Relevanz der Nutzungsphase eines Elektroautos ab und kann nahezu emissionsfrei sein. Das erhöht die Bedeutung der Produktionsphase. Auch im Herstellungsprozess spielt der Strom-Mix eine wichtige Rolle. Vor allem energieintensive Fertigungsschritte können ausschlaggebend für die Gesamt-Ökobilanz sein. Einige Automobilhersteller verlagern daher ihre energieintensiven Produktionsprozesse in Länder mit einem hohen Anteil erneuerbarer Energien. Im Rahmen der InCar plus-Ökobilanzen liegt im Normalfall ein deutscher Strom-Mix zugrunde.

Eine Herausforderung bei der Modellierung der Nutzungsphase für Elektrofahrzeuge ist die Abschätzung des Leichtbaueffekts auf den Stromverbrauch. Hier werden viele Faktoren wie etwa der Fahrzyklus, die erforderliche Reichweite, die Rekuperation und der Rollwiderstand herangezogen. Die festgelegten Randbedingungen führen bei 100 kg weniger Gewicht zu einem 6,5 Wh/km geringeren Energiebedarf.

Bauteile aus Stahl zeichnen sich durch eine besonders hohe Recyclingfähigkeit aus. Aufgrund der magnetischen Eigenschaften lässt sich Stahlschrott sehr gut von anderem Schrott trennen und ermöglicht eine sehr hohe Rücklaufquote. Zudem sind Primär- und Sekundärstahl technisch gleichwertig. Dadurch können Primärrohstoffe und deren Umweltlasten eingespart werden. In der Ökobilanz werden für diese vermiedenen Lasten Gutschriften erteilt. Es muss darauf geachtet werden, dass die Auswahl der End-of-Life-Allokationsmethode (Gutschrift für Recycling) einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben kann [5]. In der Basisbetrachtung wird für heute anfallenden Produktionschrott, wie etwa Platinenverschnitt aus dem Presswerk, eine Gutschrift in voller Höhe vergeben. Dabei wird von einem vollständigen Recycling des Verschnitts ausgegangen, abzüglich des Recyclingaufwands für beispielsweise das Einschmelzen von Stahlschrott im Elektro-



4 Ökobilanz des Designrads im Vergleich zu Referenzrädern aus Aluminium und Stahl

ofen. Für den zukünftig anfallenden Altfahrzeugschrott wird im Basisszenario keine Gutschrift vergeben. Es wird aber für alle Konzepte ein Recyclingpotenzial ausgewiesen, das Verbesserungen am Lebensende im Falle einer werkstofflichen Verwertung aufzeigt.

Bei allen Untersuchungen arbeitet ThyssenKrupp getreu den Ökobilanzierungs-Normen ISO 14040/44. Diese Konformität ist durch einen unabhängigen Prüfer zertifiziert und in einem umfangreichen

Ökobilanzbericht dokumentiert. Für die Modellierung wird eine Software zur ganzheitlichen Bilanzierung (GaBi 6) verwendet. Hauptziel der LCA-Studien ist eine objektive und realitätsnahe Bewertung der neuen Konzepte. Der Untersuchungsumfang ist stets so gewählt, dass die Produkte gleiche Funktionalität gewährleisten und so miteinander vergleichbar sind. Auch die Parameter sind praxisnah und repräsentativ festgelegt. Um jedoch den spezifischen Bilanzierungsanforderungen der Automobilindustrie gerecht zu wer-



den, sind die Modelle so aufgebaut, dass eine Vielzahl von Parametern wie Strom-Mix, Minderverbrauchsfaktor oder der Umgang mit Recycling-Gutschriften variiert werden können. Nachfolgend werden diese Ökobilanzen anhand ausgewählter Beispiele beschrieben.

VERBRAUCHSOPTIMIERENDE STAHLRÄDER

Die Entwicklung der Stahlräder erfolgt mit zwei unterschiedlichen Ansätzen und einem gemeinsamen Ziel. Zum einen soll gezielter Leichtbau, zum anderen das Design für wettbewerbsfähige Stahlräder sorgen. Die Stahlräder von InCarplus weisen im Vergleich zu Aluminium-Gussrädern erhebliche ökologische Vorteile auf. Das beginnt bereits mit geringeren Umweltbelastungen während der Herstellung und setzt sich über die Nutzungsphase bis zum Recycling fort.

Die Nutzungsphase wird anhand eines Mittelklassefahrzeugs berechnet, das bei einem Kraftstoffverbrauch von 6,2 l/100 km und einem Minderverbrauch von 0,35 l/100 km/100 kg [6] insgesamt 200.000 km zurücklegt. Da es sich bei den Rädern um rotatorisch bewegte Massen handelt, hat das Mindergewicht durch

Leichtbau eine zusätzliche Verbrauchsreduktion zur Folge (siehe Beitrag „Neue Räder aus Stahl – leicht und stylisch“ ab Seite 124). Diese ist vor allem vom Geschwindigkeitsprofil und dem Trägheitsmoment des Rads abhängig. Mithilfe einer Verbrauchssimulation wird der Einfluss rotatorisch bewegter Massen auf Basis des neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) bestimmt.

Die Leichtbauäder mit drückgewaltem Felgenband und optimierter Rad-schüssel sind noch leichter als das Best-in-Class-Stahl-Referenz-Rad aus dem Benchmark. Folglich haben Radlösungen mit einer warmumgeformten Rad-schüssel (WU) um 23 % und das Konzept mit einer kaltumgeformten Rad-schüssel (KU) um 18 % reduzierte Umweltauswirkungen.

Trotz des höheren Energieaufwands bei der Warmumformung kann durch Leichtbau der Materialeinsatz soweit reduziert werden, dass schon am Ende des Herstellungsprozesses eine bessere Ökobilanz erkennbar ist. Die positiven Auswirkungen der geringeren rotatorisch bewegten Massen auf den Kraftstoffverbrauch sorgen dann in der Nutzungsphase für besonders hohe Umweltvorteile. 5 zeigt den Anteil

translatorisch bewegter Masse (blau) und rotatorischer Wirkmasse (orange) der Räder. Das WU-Rad mit einem Trägheitsmoment von 0,2 kg/m² spart neben der Gewichtsreduktion zusätzlich 18 % (0,3 kg) an rotatorischen Wirkmassen ein. Bei einem dynamischeren Fahrstil wird der Rotationseffekt sogar noch größer. Die Ökobilanz zeigt sowohl für das warm- als auch das kaltumgeformte Stahl-Leichtbaurad ganzheitliche Umweltvorteile von der Rohstoffgewinnung bis zur Verwertung.

DESIGNRAD: ELEGANT SPAREN

Beim Designrad ist die Ästhetik ein entscheidendes Kaufkriterium. Das InCarplus-Designrad aus Dualphasenstahl punktet im Vergleich zu Aluminiumrädern mit einem neuartigen Styling. Das Gewicht von Aluminiumrädern variiert in Abhängigkeit vom Styling sehr stark. Im Benchmark zeigt sich, dass bei gleicher Dimension und Tragkraft Aluminiumräder mindestens gleich viel, teilweise sogar 30 % mehr wiegen als Stahlräder. Für den Vergleich werden das Best-in-Class-Aluminiumrad mit 8 kg Gewicht und ein herkömmliches Stahlrad mit einer Radkappe aus 600 g glasfaserverstärktem Polyamid als Referenzen ausgewählt. Das Designrad hingegen besteht vollständig aus Stahl.

Die über den gesamten Lebenszyklus geringeren Umweltauswirkungen des

Stahl-Designrads sind vor allem auf die Materialproduktion zurückzuführen, ④. Denn Stahl benötigt bei der Herstellung wesentlich weniger Energie, Wasser und andere Ressourcen und erzeugt dadurch auch deutlich weniger Emissionen im Vergleich zur Aluminiumproduktion. Ein weiterer Vorteil im Vergleich zur Stahl-Referenz besteht darin, dass auf die Kunststoffkappe verzichtet werden kann.

Die Umweltbelastungen der Aluminiumherstellung sind sogar so hoch, dass sie über die gesamte Nutzungsphase nicht mehr ausgeglichen werden können. Dieses Ergebnis verdeutlicht die Wichtigkeit eines ganzheitlichen Ansatzes, der auch den Herstellungsprozess und weitere Wirkungskategorien neben dem Treibhauspotenzial einbezieht. Die vergleichsweise umweltfreundliche Herstellung von Stahl führt zu eindeutigen Verbesserungen in allen Umweltkategorien.

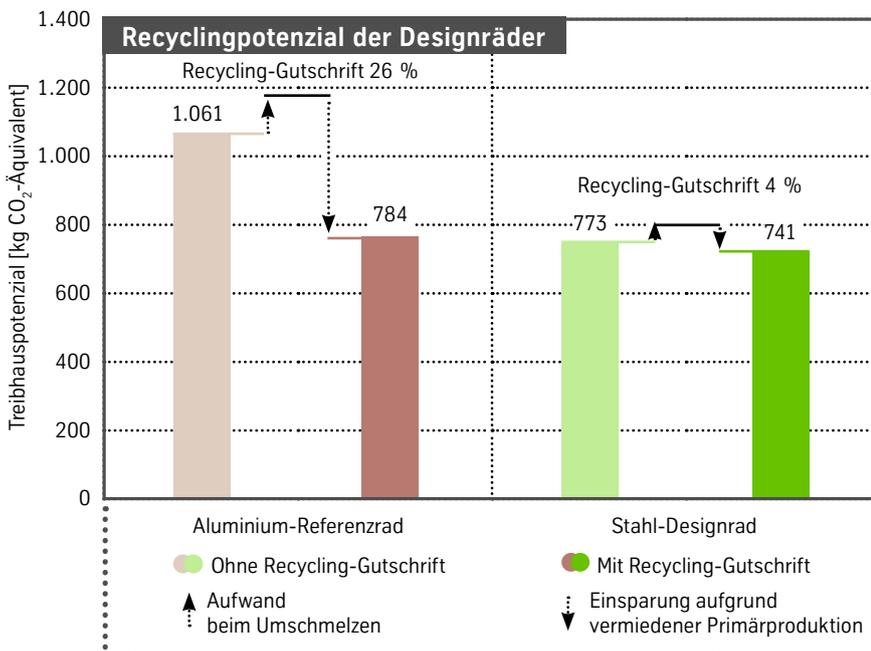
Im Vergleich zu anderen Karosseriebauteilen lassen sich Räder nach der Nutzungsphase leichter demontieren, was theoretisch zu einer höheren Rücklaufquote führt. Ausgehend von einer hundertprozentigen Recyclingfähigkeit von Stahl und Aluminium sowie voller Anrechnung der Gutschriften, entsteht für das Aluminiumrad ein Einsparpotenzial von 26 % bei den Treibhausgas-Emissionen, ⑤. Die Höhe der Gutschrift kommt zustande, da das Umschmelzen von Aluminiumschrott im Vergleich zur

Herstellung von Primäraluminium wesentlich weniger Energie benötigt.

Bei vollständigem Recycling der Stahlräder verbessern sich ihre Treibhausgas-Emissionen zwar nur um 4 %. Bei voller Anrechnung der Gutschriften für Stahl und Aluminium schneiden die Stahlräder aber immer noch in allen Umweltkategorien besser als die Aluminiumräder ab. Sie bieten somit bei ganzheitlicher Betrachtung heute und in Zukunft Verbesserungen in allen Lebenszyklusphasen, Wirkungskategorien und beim Primärenergiebedarf.

OPTIMIERTER ROTOR FÜR DEN ELEKTROMOTOR

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist ein wesentlicher Stellhebel zur Reduktion der CO₂-Emissionen von Automobilen. Allerdings steht das Elektrofahrzeug noch am Anfang der technischen Entwicklung; seine Reichweite, die Batterielebensdauer, die Sicherheit und die Kosten müssen noch optimiert werden. Leichtbau ist beim Elektrofahrzeug ein zentraler Parameter zur Senkung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase. Wie bereits in ② dargelegt, ist dabei der zugrunde gelegte Strom-Mix von entscheidender Bedeutung, sowohl für die CO₂-Emissionen als auch für alle anderen Umweltwirkungen, und damit für die ökologische Nachhaltigkeit des Fahrzeugs. Ein niedri-



⑤ Recyclingpotenzial am Lebensende für Aluminium-Referenzrad und Stahl-Designrad

ger Energieverbrauch ist weniger vor dem Hintergrund der CO₂-Regularien wichtig, sondern weil er vor allem die Reichweite und die Batteriekapazität beeinflusst.

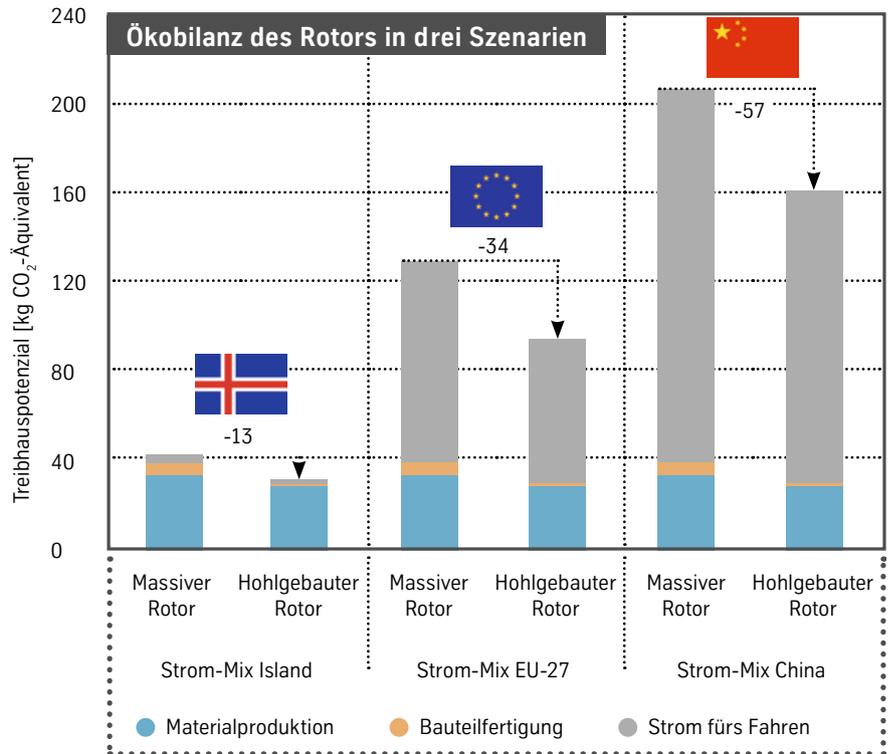
Im Zuge von InCar plus entwickelt ThyssenKrupp auch Lösungen für eine verbesserte Elektromobilität. Ein Highlight ist der hohlzylindrische Rotor mit etwa 2,2 kg (18 %) weniger Gewicht als ein herkömmlicher Rotor. Der Referenzrotor besteht aus einer massiven Stahlwelle mit aufgedrucktem Blechpaket. Innovative Fertigungsverfahren ermöglichen die Konstruktion des kostengünstigen mehrteiligen Rotors. Er besteht aus einem mittleren Rohrstück, welches das Blechpaket aufnimmt, und entsprechenden Endstücken für Lagerung und Kraftabtrieb. Für die einzelnen Teile können unterschiedliche Stahlsorten eingesetzt werden. Für die Ökobilanz werden die Magneten nicht mitbetrachtet, da diese bei beiden Rotoren identisch sind.

Beide Varianten bestehen aus Stahl, daher ist das Ergebnis der Herstellungsphase proportional zur eingesetzten Masse. Die Umweltauswirkungen aus der Bauteilfertigung sind bei der Referenz aufgrund des höheren Verschnitts beim Drehen der Welle größer.

Die Nutzungsphase eines kleinen Elektrofahrzeugs ist mit 150.000 km definiert und stark vom eingesetzten Strom-Mix abhängig. Im Rahmen der Studie wird eine Sensitivitätsanalyse für den chinesischen und den isländischen Strom-Mix durchgeführt. Der EU-Strom-Mix stellt die Basis dar.

Betrachtet man den Referenzfall mit europäischem Strom-Mix, verursacht der gebaute Rotor über den gesamten Lebenszyklus etwa 34 kg CO₂-Äquivalent weniger als ein herkömmlicher massiver Rotor. Dabei sind die CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase um 12 kg geringer. Der Rest ist auf die Verbrauchsdifferenz durch die geringere Masse und das geringere Trägheitsmoment des Rotors zurückzuführen.

6 verdeutlicht, dass die Ergebnisse der Nutzungsphase stark vom eingesetzten Strom-Mix abhängen. Beim isländischen Strom-Mix sinken die potenziellen Umweltwirkungen in der Nutzungsphase



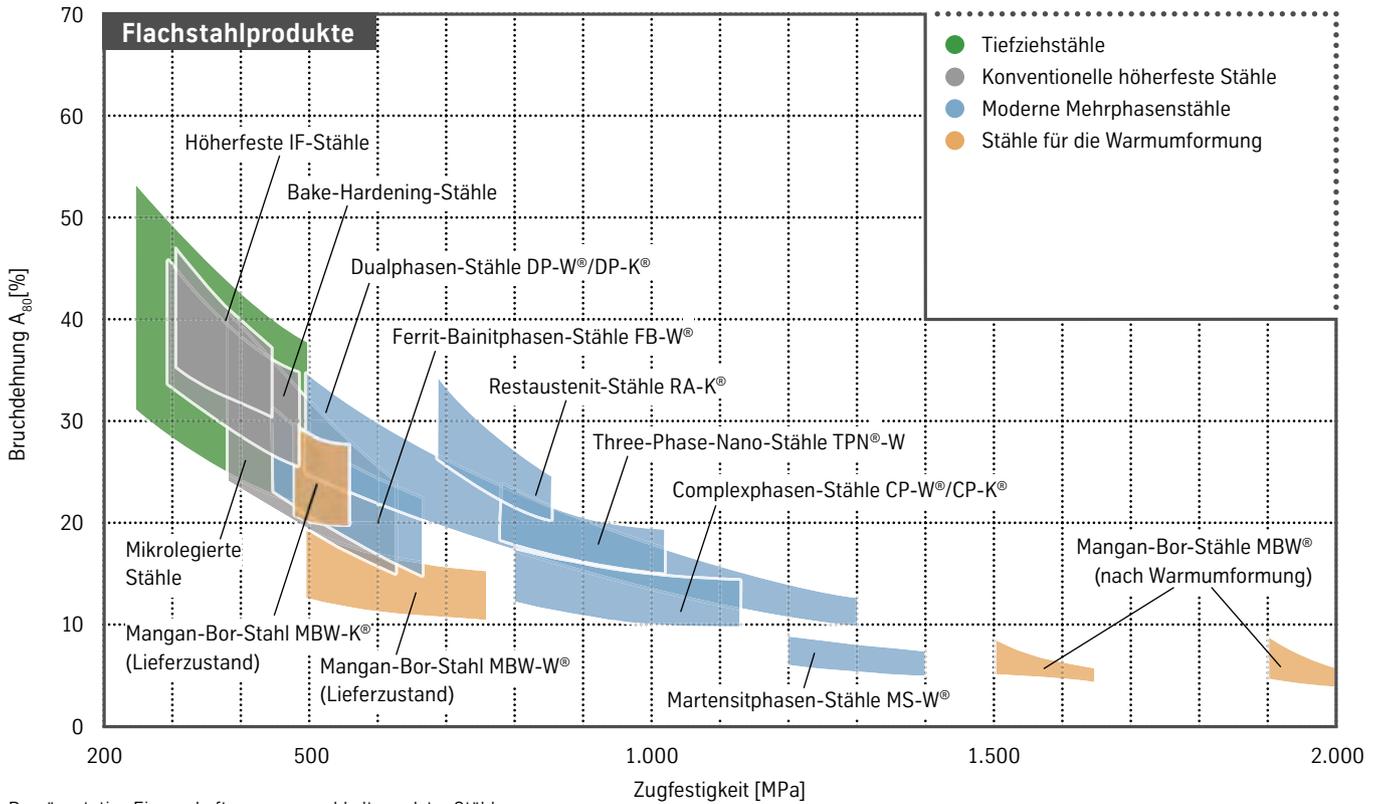
6 Ökobilanzvergleich massiver und hohlgebauter Rotor

nur minimal. Die ökologischen Eigenschaften des Produkts lassen sich demnach hauptsächlich im Herstellungsprozess verbessern. In diesem Fall spart der gebaute Rotor etwa 13 kg CO₂-Äquivalent ein. Als anderes Extrem ist der chinesische Strom-Mix dargestellt. Bedingt durch den hohen Anteil von Kohle bei der Stromerzeugung, sind die Emissionen in China nochmals deutlich höher als beim Strom-Mix der EU. Der gebaute Rotor verursacht in China etwa 57 kg CO₂-Äquivalent weniger Treibhausgase.

Die Reduktion des Treibhauspotenzials ist also stark vom Energiemix des Zielmarkts abhängig. Durch Leichtbau und einen effizienten Antriebsstrang lassen sich die Emissionen in der Nutzungsphase wirkungsvoll reduzieren. Für eine ressourcenschonende und emissionsarme Produktion ist die Werkstoff- und Technologieauswahl entscheidend. ThyssenKrupp leistet mit den InCar plus-Lösungen als umweltbewusster Zulieferer seinen Beitrag für eine nachhaltige Mobilität.

LITERATURHINWEISE

- [1] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO₂-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen
- [2] International Panel for Climate Change, Working Group 3: Der Fünfte IPCC-Sachstandsbericht. Zusammenfassung für Entscheidungsträger. 11. April 2014
- [3] Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Roadmap to a Resource Efficient Europe /* COM/2011/0571 final */
- [4] PE International GaBi 6.106 Professional database (Abruf: 05.Mai.2014). EU-27: Electricity grid mix PE; CN: Electricity grid mix PE; IS: Electricity grid mix PE
- [5] Nicholson, A.L. et al.: End-of-life LCA allocation methods: Open loop recycling impacts on robustness of material selection decisions. Sustainable Systems and Technology, 2009, ISSST '09. IEEE International Symposium, 2009, S. 1-6
- [6] Koffler, C; Rohde-Brandenburger, K.: On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments. International Journal of Life Cycle Assessments. 15 (2010), Nr. 1, S. 128-135



SCALUR

Die Produktfamilie Scalur umfasst warmgewalzte Tiefzieh- und Complexphasen-Stähle sowie mikrolegierte Güten mit besonders engen Toleranzen und geringer Dicke ab 1,20 mm – Eigenschaften, die bislang kaltgewalztem Material vorbehalten waren. Darüber hinaus zeichnen sich die Scalur-Stähle durch ihren geringen Gehalt an Spurenelementen und einen guten sulfidischen Reinheitsgrad aus.

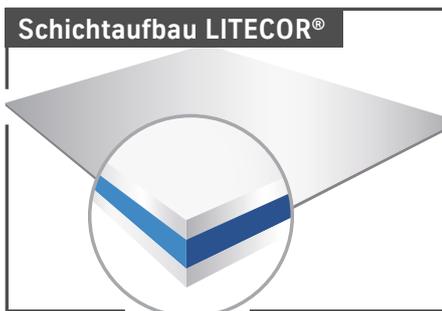
LITECOR

Litecor ist ein biege- und beulsteifer Stahl-Polymer-Werkstoffverbund für den Leicht-

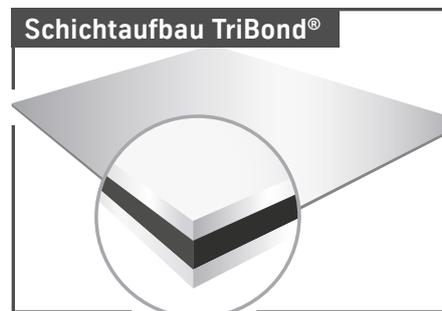
bau flächiger Innen- und Außenhautteile, der die Festigkeit von Stahl mit dem niedrigen Gewicht von Kunststoff kombiniert. Eine vergleichsweise dicke Kunststoffkernschicht wird hierzu schubsteif mit zwei nur etwa 0,2 bis 0,3 mm dicken Stahldeckblechen verbunden. Abhängig vom Einsatzzweck lässt sich das Gewicht flächiger Bauteile dadurch um bis zu einem Drittel reduzieren. Litecor ist ähnlich gut umformbar wie monolithische Stahlbleche und kann in einem modifizierten Prozess punktgeschweißt werden. Der Werkstoffverbund kann darüber hinaus gefalzt und kathodisch tauchlackiert werden.

TRIBOND

Tribond ist eine Familie von dreilagigen Stahl-Werkstoffverbünden für die Warmumformung – in erster Linie ausgelegt für crashrelevante Strukturbauteile. Besondere Merkmale des Materials sind eine hohe Energieaufnahme und hohe mögliche Biegewinkel. Erzielt werden diese Eigenschaften durch Kombination höchstfester mit hoch duktilen Stählen in einem Stahlsandwichwerkstoff mit hohem Leichtbaupotenzial. Das Verarbeitungsverhalten gleicht dabei dem monolithischer Stahlbleche und erfordert keine Prozessanpassungen in der Bauteilfertigung.



- Stahlblech 0,2 bis 0,3 mm
- Kunststoffkern ab ca. 0,3 mm
- Stahlblech 0,2 bis 0,3 mm



- Duktiler Stahl 10 bis 20 %
- Höchstfester Stahl 60 bis 80 % der Gesamtdicke
- Duktiler Stahl 10 bis 20 %

BEZEICHNUNG THYSSENKRUPP STEEL EUROPE	DIN EN	VDA 239-100	USA (ASTM)	JAPAN JFS A
CR210IF	HC220Y, HX220YD	CR210IF	—	JAC390P
CR210BH	HC220B, HX220BD	CR210BH	—	JAC340H
CR240LA	HC260LA, HX260LAD	CR240LA	—	JSC440W
CR300LA	HC340LA, HX340LAD	CR300LA	HSLA Grade 50	JAC440R
CR380LA	HC420LA, HX420LAD	CR380LA	HSLA Grade 60	—
CR420LA	HC460LA, HX460LAD	CR420LA	HSLA Grade 65	—
HR420MC	S420MC	HR420MC	HSLAS-F Grade 60 Class 2	—
MHZ 500	HC500LA, HX500LAD	—	HSLA Grade 70	—
SCALUR® S550MC	S550MC	—	—	—
HSM700HD	—	—	—	—
DP-W® 330Y580T	HDT580X	HR330Y580T-DP	DP590/300Y	JSH590Y
DP-K® 290Y490T	HCT500X	CR290Y490T-DP	DP490T/290Y	—
DP-K® 330Y590T	HCT600X	CR330Y590T-DP	DP590T/340Y	JSC590Y
DP-K® 440Y780T	HCT780X	CR440Y780T-DP	DP780T/420Y	JSC780Y
DP-K® 590Y980T	HCT980X	CR590Y980T-DP	DP980T/550Y	JSC980Y
DP-K® 700Y980T	HCT980X-HY	CR700Y980T-DP	—	—
DP-K® 780Y1180T	—	—	—	—
CP-W® 660Y760T	HDT780C	HR660Y760T-CP	CP780T/620Y	—
CP-K® 570Y780T	HCT780C	CR570Y780T-CP	—	—
MS-W® 900Y1180T	HDT1200M	HR900Y1180T-MS	—	—
TPN®-W 660Y760T	—	—	—	—
TPN®-W 700Y870T	—	—	—	—
RA-K® 400Y690T	HCT690T	CR400Y690T-TR	TRIP690T/400Y	—
RA-K® 47/78	HCT780T	CR450Y780T-TR	TRIP780T/420Y	—
MBW® 1500	—	—	—	—
MBW® 1900	—	—	—	—

GESAMTPROJEKTLEITER: Grünekle, Axel

TEILPROJEKTLEITER ANTRIEB: Rath, Claudius

TEILPROJEKTLEITER FAHRWERK UND LENKUNG: Pudeg, Rainer

TEILPROJEKTLEITER KAROSSERIE: Zörnack, Markus

Böger, Thorsten	(Potenzialanalyse Litecor)
Chan, Jia-Uei	(Umweltperformance)
Dold, Markus	(Steer-by-Wire-Lenkung)
Drewes, Stephan	(Elektromotor)
Eckstein, Ralf	(Blech Zahnstange)
Götz, Ole	(Dämpfungsverstellsystem)
Gorschlüter, Jörg	(A-Säule)
Groß, Marcel	(ThermoTecWire-Federn)
Hofmann, Harald	(Abgasanlage)
Keutz, Andreas	(Motorhaube, Türen, Hinterachse)
Kibben, Martin	(Stoßfängersysteme, Längsträger)
Klekler, Jochen	(Hybrid-Lenkwellen)
Kneiphoff, Uwe	(B-Säulen, Warmumformung)
Kötschau, Christian	(eTDC, Hybrid-Schiebenocken)
Mai, Andreas	(Stoßdämpferrohre)
Meusel, Jürgen	(Nockenwellenmodule)
Paul, Daniel	(Leichtbau-Rotor)
Pieronek, David	(Räder)
Puls, Stefan Peter	(Brennstoffzelle)
Reichelt, Robert	(POSS/Ölabscheidesystem)
Riepold, Thomas	(Column-EPS)
Schacht, Arne	(Lenkwinkelsteller, Leichtbau-Lenksäule)
Tietz, Marco	(Elektroband)
Ulrichs, Andreas	(Sitzstrukturen)
Vajen, Henning	(Nockenwelle)

CO-AUTOREN

Brüggenbrock, Michael
Dams, Rolf
Chergui, Azeddine
Döbber, Johannes
Gaal, Zoltan
Georg, Marcel
Graff, Stéphane
Grunden, Philipp
Herget, Florian
Kahveci, Abdullah
Köhler, Christian
Kreutz, Daniel
Liesner, Jens
Lösche, Jens
Luczak, Hanno
Mann, Bernd
Marx, Arndt
Meincke, Anna
Middelhaue, Oliver
Nierhoff, Daniel
Regner, Sebastian
Ribizsár, András
Rovarino, Davide
Schaaf, Steffen
Sikora, Sascha
Steinkogler, Bernhard
Vogt, Oliver
Winiarz, Jens

WEITERE EXPERTEN

Böcker, Konrad
Buchmann, Patrick
Cornelius, Peter
Dorner, Dorothée
Eiden, Armin
Fischer, Olaf
Großerüschkamp, Thomas
Gulden, Alexander
Heller, Thomas
Heitz, Thomas
Hirschmann, Richard
Hoffmann, Oliver
Klotzbach, Christoph
Latuske, Clemens
Queller, Marco
Microys, Nicolas
Myslowicki, Stefan
Oles, Markus
Overmaat, Bernd
Polmans, Kristof
Röttger, Rolf Peter
Sage, Hendrik
Schilling, Frank
Schramm, Jürgen-Johann
Skowronek, Alexander
Stapelmann, Andreas
Sünkel, Ralf
Telger, Karl

Das Projekt ThyssenKrupp InCar plus

Oktober 2014

Springer Vieweg | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Postfach 1546 · 65173 Wiesbaden · Abraham-Lincoln-Straße 46 · 65189 Wiesbaden

Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE811148419

Geschäftsführer Armin Gross, Peter Hendriks, Joachim Krieger

Managing Director Marketing & Sales Armin Gross | Director Publishing Matthias Urbach | Director Production Olga Chiarcos

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT

ATZ

Dipl.-Ing. Dietmar Bichler, Bertrand AG,
Dipl.-Ing. Kurt Blumenröder, IAV GmbH,
Dr.-Ing. Herbert Diess, BMW AG, Univ.-
Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein, RWTH
Aachen, WKM, Dr.-Ing. Ulrich Eichhorn,
VDA/FAT, Dr. rer. nat. Andreas Eilemann,
Mahle Behr GmbH & Co. KG, Prof. Dr.-
Ing. Burkhard Göschel, Magna Internati-
onal Europe AG, Prof. Dr.-Ing. Peter
Gutzmer, Schaeffler AG, Prof. Dr.-Ing.
Ulrich Hackenberg, AUDI AG, Dipl.-Ing.
Wolfgang Hatz, Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG,
Prof. Dr.-Ing. Pim van der Jagt, Ford-For-
schungszentrum Aachen GmbH, Dipl.-Ing.
Bernd Maierhofer, MAN Truck & Bus AG,
Joachim Mathes, Valeo Schalter und Sen-
soren GmbH, Dr.-Ing. Harald Nauheimer,
ZF Friedrichshafen AG, Dipl.-Ing. Jörg
Ohlsen, Edag GmbH & Co. KGaA, Prof. Dr.
Dipl.-Ing. Peter Pfeffer, Hochschule
München, Dr.-Ing. Peter E. Rieth, Conti-
nental Teves AG & Co. oHG, Wolf-Henning
Scheider, Robert Bosch GmbH, Prof. Dr.-
Ing. Rodolfo Schöneburg, VDI-FVT,
Wolfgang Schwenk, Adam Opel AG, Dr.-
Ing. Christian Wiehen, Wabco GmbH,
Prof. Dr. rer. nat. Martin Winterkorn,
Volkswagen AG

MTZ

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende, Univer-
sität Stuttgart, Prof. Dr. techn. Christian
Beidl, TU Darmstadt, Dr.-Ing. Ulrich
Dohle, Rolls-Royce Power Systems AG,
Dipl.-Ing. Markus Duesmann, BMW AG,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein, RWTH
Aachen, WKM, Dipl.-Ing. Friedrich Eich-
ler, Volkswagen AG, Dipl.-Ing. Dietmar
Goericke, Forschungsvereinigung Verbren-
nungskraftmaschinen e.V., Prof. Dr.-Ing.
Uwe Dieter Grebe, AVL List GmbH, Prof.
Dr.-Ing. Jens Hadler, APL, Prof. Dr.-Ing.
Jürgen Hammer, Robert Bosch GmbH,
Rainer Jückstock, Federal-Mogul Corpora-
tion, Prof. Dr.-Ing. Heinz K. Junker,
Mahle Behr GmbH & Co. KG, Prof. Dr.
Hans Peter Lenz, ÖVK, Prof. Dr. h. c. Hel-
mut List, AVL List GmbH, Dr.-Ing. Ralf
Marquard, Deutz AG, Dipl.-Ing. Wolfgang
Maus, Emitec Gesellschaft für Emissions-
technologie mbH, Prof. Dr.-Ing. Stefan
Pischinger, FEV GmbH, Prof. Dr.-Ing.
Hans-Peter Schmalz, Pankl-APC Turbo-
systems GmbH, Prof. Dr.-Ing. Ulrich
Seiffert, WiTech Engineering GmbH,
Dr.-Ing. Joachim Schommers, Daimler
AG, Dr.-Ing. Michael Winkler, Hyundai
Motor Europe Technical Center GmbH

HERAUSGEBER

Dr. Johannes Liebl, Wolfgang Siebenpfeiffer

CHEFREDAKTEUR

Dr. Alexander Heintzel
tel +49 611 7878-342 · fax +49 611 7878-462
alexander.heintzel@springer.com

STELLVERTRETENDER CHEFREDAKTEUR

Dipl.-Ing. Michael Reichenbach
tel +49 611 7878-341 · fax +49 611 7878-462
michael.reichenbach@springer.com

CHEFIN VOM DIENST

Kirsten Beckmann M. A.
tel +49 611 7878-343 · fax +49 611 7878-462
kirsten.beckmann@springer.com

REDAKTION

Dipl.-Ing. (FH) Richard Backhaus
tel +49 611 5045-982 · fax +49 611 5045-983
richard.backhaus@rb-communications.de
Dipl.-Ing. (FH) Andreas Fuchs
tel +49 6146 837-056 · fax +49 6146 837-058
fuchs@fachjournalist-fuchs.de
Dipl.-Ing. Ulrich Knorra
tel +49 611 7878-314 · fax +49 611 7878-462
ulrich.knorra@springer.com
Roland Schedel
tel +49 6128 853-758 · fax +49 6128 853-759
rschedel@text-com.de
Stefan Schlott
tel +49 8726 9675-972
redaktion_schlott@gmx.net
Markus Schöttle
tel +49 611 7878-257 · fax +49 611 7878-462
markus.schoettle@springer.com
Martina Schraad
tel +49 611 7878-276 · fax +49 611 7878-462
martina.schraad@springer.com

ONLINE | ELEKTRONISCHE MEDIEN

Portalmangerin Automotive
Christiane Brünglinghaus
tel +49 611 7878-136 · fax +49 611 7878-462
christiane.bruenglinghaus@springer.com
Redaktion
Katrin Pudenz M. A.
tel +49 6172 301-288 · fax +49 6172 301-299
redaktion@kpz-publishing.com

SONDERPROJEKTE

Leitender Redakteur
Markus Bereszewski
tel +49 611 7878-122 · fax +49 611 7878-462
markus.bereszewski@springer.com
Redaktion | Koordination
Dipl.-Reg.-Wiss. Caroline Behle
tel +49 611 7878-393 · fax +49 611 7878-462
caroline.behle@springer.com
Christiane Imhof M. A.
tel +49 611 7878-154 · fax +49 611 7878-462
christiane.imhof@springer.com

STÄNDIGE MITARBEITER

Andreas Burkert, Prof. Dr.-Ing. Stefan Breuer,
Hartmut Hammer

REDAKTIONSANSCHRIFT

Abraham-Lincoln-Straße 46 · 65189 Wiesbaden,
Postfach 1546 · 65173 Wiesbaden
redaktion@ATZonline.de

ANZEIGEN

VERKAUFSLEITUNG

Volker Hesedenz
tel +49 611 7878-269 · fax +49 611 7878-78269
volker.hesedenz@best-ad-media.de

KEY ACCOUNT MANAGEMENT

Rouven Bastian
tel +49 611 7878-399 · fax +49 611 7878-78399
rouven.bastian@best-ad-media.de

ANZEIGENDISPOSITION

Susanne Bretschneider
tel +49 611 7878-153 · fax +49 611 7878-78153
susanne.bretschneider@best-ad-media.de

ANZEIGENPREISE

Es gelten die Mediadateninformationen von Oktober 2013.

MARKETING | SONDERDRUCKE

PRODUKTMANAGEMENT AUTOMEDIEN

Jens Fischer
tel +49 611 7878-340 · fax +49 611 7878-407
jens.fischer@springer.com

SONDERDRUCKE

Martin Leopold
tel +49 2642 907-596 · fax +49 2642 907-597
leopold@medien-kontor.de

PRODUKTION | LAYOUT

Kerstin Brüderlin
tel +49 611 7878-173 · fax +49 611 7878-78173
kerstin.bruederlin@springer.com

DRUCK UND VERARBEITUNG

Kliemo, Eupen/Belgien. Gedruckt auf säurefreiem und
chlorarm gebleichtem Papier. Printed in Europe.

ABONNEMENTS

Springer Customer Service Center GmbH
Haberstraße 7 · 69126 Heidelberg
tel +49 6221 3454-303 · fax +49 6221 3454-229
Montag bis Freitag, 8 bis 18 Uhr
springervieweg-service@springer.com

BEZUGSBEDINGUNGEN

Diese ATZextra-Ausgabe ist in Verbindung mit einem
ATZ/MTZ-Abonnement erhältlich und mit dem Abonne-
mentpreis abgegolten. Einzelbezugspreis: 29,90 €
(inkl. Versandkosten). Alle Preise enthalten 7 % MWST.
Jedes Abonnement beinhaltet eine Freischaltung für
das Online-Archiv. Der Zugang gilt ausschließlich für
den einzelnen Empfänger des Abonnements.

HINWEISE FÜR AUTOREN

Alle Manuskripte sind direkt an die Redaktion zu richten.
Durch das Einsenden von Fotografien und Zeichnungen
stellt der Absender den Verlag von Ansprüchen Dritter
frei. Grundsätzlich werden nur solche Arbeiten angenom-
men, die vorher weder im Inland noch im Ausland veröf-
fentlicht worden sind. Die Manuskripte dürfen auch nicht
gleichzeitig anderen Blättern zum Abdruck angeboten
werden. Mit der Annahme des Manuskripts erwirbt der
Verlag das Recht der honorarfreien Anfertigung von Son-
derdrucken. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen
einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrecht-
lich geschützt. Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser
Zeitschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Ver-
lags vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses
Verbot fällt insbesondere die gewerbliche Vervielfälti-
gung per Kopie, die Aufnahme in elektronischen Daten-
banken und die Vervielfältigung auf CD-ROM und allen
anderen elektronischen Datenträgern.

IHR DIREKTER DRAHT
ZUR ATZextra

Redaktion

☎ +49 611 7878-122

Kundenservice

☎ +49 6221 3454-303

Anzeigen

☎ +49 611 7878-269

© Springer Vieweg |
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH,
Wiesbaden 2014

Springer Vieweg ist Teil von
Springer Science+Business Media.

 Springer Vieweg

