

Potenziale hochfester Stähle im Fahrzeuggetriebebau

Im Rahmen diverser Untersuchungen der Initiative Massiver Leichtbau zeigen Wissenschaftler des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie [KIT] an unterschiedlichen Fahrzeuggetrieben sowohl im Pkw- als auch im Schwerlastbereich durch den Einsatz von leistungsfähigeren Stählen Optimierungspotenziale bezüglich Masse, Trägheit und Bauraum auf und stellen die Hürden bei der Markteinführung dieser Stähle dar. Die Optimierung der Fahrzeuggetriebe erfolgt dabei mit einem Softwaretool zur analytischen Getriebeauslegung.

AUTOREN



**Dipl.-Ing.
Uwe Reichert**

ist akademischer Mitarbeiter im Bereich der Antriebssystemtechnik am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



**M. Sc.
Felix Busch**

ist akademischer Mitarbeiter im Bereich Kupplungen und tribologische Systeme am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



**Dipl.-Ing.
Katharina Bause**

leitet die Forschungsabteilungen Antriebssystemtechnik sowie Kupplungen und tribologische Systeme am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)



**Dipl.-Ing.
Sascha Ott**

ist Geschäftsführer des IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Leichtbau ist in der Entwicklung neuer Fahrzeuge allgegenwärtig, um die Fahrzeugmasse und damit den Treibstoffverbrauch und die Abgasemissionen, aber auch den Energieverbrauch von Hybridfahrzeugen (HEVs) oder Elektrofahrzeugen (BEVs) zu reduzieren. Neben den Leichtbauaktivitäten im Bereich Karosserie und Tragstrukturen des Fahrzeugs ersetzen einige Hersteller die klassischen Werkstoffe im Antriebsstrang durch leichtere Materialien. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die Werkstoffsubstitution von Gusseisen durch Aluminiumlegierungen für Motorblöcke und Zylinderköpfe. Es stellt sich die Frage, welches Leichtbaupotenzial durch Werkstoffsubstitution im übrigen Antriebsstrang offengelegt werden kann. Die Initiative Massiver Leichtbau hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, das Leichtbaupotenzial durch die Verwendung von hochfesten Stählen für massivumgeformte Bauteile in Fahrzeugen aufzuzeigen. Mit einer Vielzahl von massivumgeformten Bauteilen bieten Fahrzeuggetriebe enormes Optimierungspotenzial. Im Rahmen mehrerer Studien wurde das Leichtbaupotenzial eines Handschalt-, eines Doppelkupplungs-, eines e-CVT Hybrid- und eines Lkw-Getriebes durch die Verwendung von hochfesten Stählen untersucht. Mittels eines speziell programmierten Softwaretools in Microsoft Excel werden die Wechselwirkungen der Getriebekomponenten dargestellt, um die Auswirkungen der Werkstoffsubstitution durch hochfeste Stähle zu bewerten.

DIE REFERENZGETRIEBE

Zur Berechnung des Einsparpotenzials an Masse, Massenträgheit und Bauraum durch den Einsatz hochfester Stähle sind die Topologien der unterschiedlichen Getriebe von großer Bedeutung. Je nach Topologie des Getriebes müssen unterschiedliche Wechselwirkungen der Komponenten im Softwaretool berücksichtigt werden. Das Handschaltgetriebe ist in Vorgelegebauweise ausgeführt. Die Kraftübertragung erfolgt von der Kupplung über die Eingangswelle und eine Vorstufe

auf die Vorgelegewelle sowie über den eingelegten Gang auf die Abtriebswelle des Getriebes. Im Gegensatz zum Handschaltgetriebe verfügt das Doppelkupplungsgetriebe über zwei Eingangswellen mit jeweils einer Kupplung. Dabei stehen eine Eingangswelle mit den ungeraden Gangrädern und die zweite Eingangswelle mit den geraden Gangrädern im Eingriff. Durch ein gleichzeitiges Öffnen und Schließen der Kupplungen erfolgt der Gangwechsel ohne Zugkraftunterbrechung. Das e-CVT-Hybridgetriebe besteht aus zwei Planetengetrieben mit einem gemeinsamen Hohlrad, welches das Differenzial über eine Zwischenwelle antreibt. Der Verbrennungsmotor treibt den Steg eines Planetengetriebes an. Die beiden elektrischen Maschinen sind mit den beiden Sonnenrädern der Planetengetriebe verbunden. Das Lkw-Getriebe besteht aus drei verschiedenen Teilgetrieben, einer synchronisierten Voreinschaltgruppe mit zwei Gängen, einer nicht synchronisierten Hauptgruppe mit drei Gängen und einem Rückwärtsgang sowie einem synchronisierten Planetengetriebe als Nachfolgruppe mit zwei Gängen.

IMPLEMENTIERUNG UND OPTIMIERUNG DER REFERENZGETRIEBE

Die Stähle und deren für Getriebe auslegungsrelevanten Eigenschaften, wie zum Beispiel Festigkeit, aber auch Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit, werden durch Werkstoffprüfungen und Härtemessungen bestimmt. Hierzu werden unter anderem Pulsationsprüfstände und Härteprüfgeräte eingesetzt. Ergänzend werden die Komponenten der Referenzgetriebe detailliert vermessen.

Die Messwerte bilden die Ausgangslage für die Optimierung des Getriebes durch Redimensionierung der Bauteile mit Werkstoffkennwerten hochfester Stähle unter Verwendung gültiger Normen.

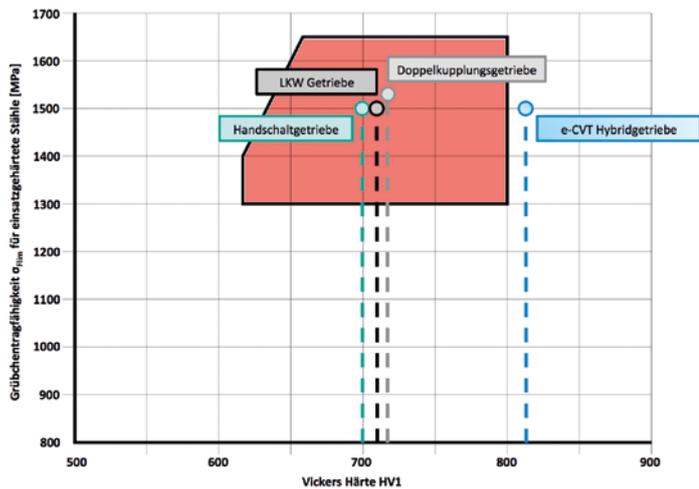


Bild 1: Grübenzugtragfähigkeit einsatzgehärteter Stähle

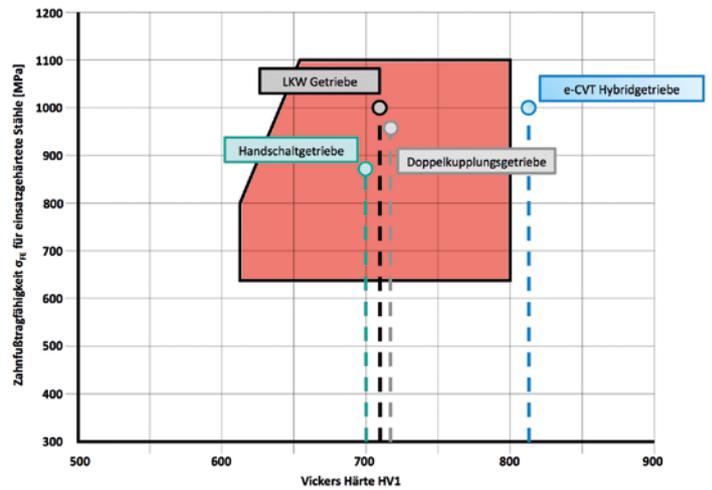


Bild 2: Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Stähle

Die Getriebeoptimierung erfolgt unter Berücksichtigung von Werkstoffparametern, die wiederum vom Herstellungsprozess und den Materialeigenschaften des Stahls abhängen und unter Beachtung von Fahrzeugparametern, wie beispielsweise dem Drehmoment. Die identifizierten Auslegungsgrößen zur Zahnraddimensionierung für die vier Getriebe, nämlich Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit, sind in Bild 1 und 2 dargestellt.

Die Dimensionierung der Zahnräder basiert auf der Norm DIN 3990 unter Berücksichtigung der Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit. Die Getriebewellen werden entsprechend der Norm DIN 743 gegen Biegung und Torsion dimensioniert. Dabei wird der Durchmesser der Getriebewellen bei einem vorgegebenen Sicherheitsfaktor berechnet. Eine Durchmesseränderung der Welle beeinflusst direkt den Zahnradradius um denselben Wert. Nimmt der Wellendurchmesser um einen Millimeter ab, wird der Zahnradradius um denselben Wert verkleinert. Aufgrund des kleineren Zahnradradius bei gleichem zu übertragendem Drehmoment nimmt die resultierende Kraft in der Verzahnung zu, weshalb die Zahnradbreite zunimmt. Durch eine Erhöhung der Werkstoffkennwerte zur Dimensionierung der Zahnräder kann einer Zunahme der Zahnradbreite entgegengewirkt werden. Dadurch können die Masse, die Trägheit und die Abmessungen des Getriebes weiter reduziert werden. Die im Getriebe vorliegenden zylindrischen Pressverbände werden hinsichtlich der Länge des Presssitzes überprüft um sicherzustellen, dass das

Drehmoment ohne Durchrutschen der Verbindung übertragen werden kann. Zusätzlich werden die systemischen Zusammenhänge von Planetengetrieben entsprechend der Norm VDI 2157 bei der Dimensionierung berücksichtigt. Dabei werden über den Durchmesser der beiden Wellen zum Antrieb der Sonnen die Durchmesser der Planeten und bei konstantem Übersetzungsverhältnis der Durchmesser der Planeten bestimmt. Anhand des Durchmessers der Planeten wird der Durchmesser des Planetenträgers und des Hohlrads neu berechnet. Durch die Funktionszusammenhänge des Planetengetriebes kann auf das Potenzial bezüglich Masse, Massenträgheit und Bauraum geschlossen werden.

SOFTWARETOOL ZUR UNTERSTÜTZUNG DES PRODUKTENTWICKLERS

Die Zusammenführung aller Informationen bezüglich der Wechselwirkungen der Getriebekomponenten, DIN-Normen zur Dimensionierung der Komponenten und der ermittelten Materialparameter der Komponenten ermöglicht eine analytische Berechnung des Optimierungspotenzials von Masse, Trägheit und Bauraum mittels eines Softwaretools. Die Differenz zwischen der redimensionierten Geometrie und Masse der Getriebekomponenten und den Messwerten ist kleiner als 15 Prozent. Zum einen ist der Unterschied mit internen Richtlinien bei der Getriebeauslegung erklärbar. Viele Getriebehersteller dimensionieren ihre Getriebe nach DIN 3990, verwenden aber die Normen mit angepassten Anwendungs- und

Sicherheitsfaktoren. Andererseits ist der Unterschied beim Design aufgrund von NVH-Phänomenen erklärbar, die zu einer Abweichung in der Breite der Zahnräder führen, wie aus Festigkeitsgründen notwendig. Um genaue Ergebnisse zu erhalten, werden diese Unterschiede mit einem Korrekturfaktor berücksichtigt, der die berechneten Werte an die Messwerte der Referenzübertragung anpasst.

Bild 3 zeigt die Benutzeroberfläche des Softwaretools am Beispiel des Handschaltgetriebes eines leichten Nutzfahrzeugs. Die Benutzeroberflächen der weiteren Getriebe sind gleichermaßen aufgebaut. In Abhängigkeit der Eingabeparameter werden neben der Masse, Trägheit und Bauraum die Einsparung gegenüber dem Referenzgetriebe ausgegeben. Zudem werden die Massen und Abmessungen der einzelnen Getriebe-komponenten angezeigt, um den Produktentwickler bestmöglich bei der Optimierung zu unterstützen. Darüber hinaus ist beispielhaft das Ergebnis einer Getriebeoptimierung hinsichtlich Bauraum und Masse durch die Verwendung höherfester Stähle aufgezeigt.

ERGEBNISSE DER OPTIMIERUNG

Insgesamt führt die Verwendung von höherfesten Stählen zu einer Reduzierung der Masse, Trägheit und des Bauraums der Getriebe. Dabei ist eine gesamtsystemische Optimierung des Getriebes maßgebend für eine maximale Gewichtsreduzierung. Werden die Referenzstähle der Getriebewellen durch hochfeste Stähle ersetzt, nehmen der Wellendurchmesser und damit die Masse ab. Aufgrund des geringeren Zahnrad-durchmessers bei reduziertem Wellendurchmesser und dem gleichen übertragbaren Drehmoment nehmen die Zahnradbreite und damit die Länge des Getriebes zu. Um einer Zunahme der Zahnradbreite entgegenzusteuern und um maximales Leichtbaupotenzial zu erzielen, müssen neben den Getriebewellen ebenfalls hochfeste Stähle für die Zahnräder eingesetzt werden. Dadurch kann die Zunahme der Breite und Masse der Zahnräder reduziert werden, wodurch die Masse und die Abmessungen des Getriebes weiter reduziert werden können. Das Leichtbaupotenzial bezüglich der Getriebemasse ist in Bild 4 dargestellt und liegt, bei gleichzeitiger Optimierung von Zahnrad und Welle, je nach Getriebe im Bereich zwischen 4,0 und 8,5 Prozent.

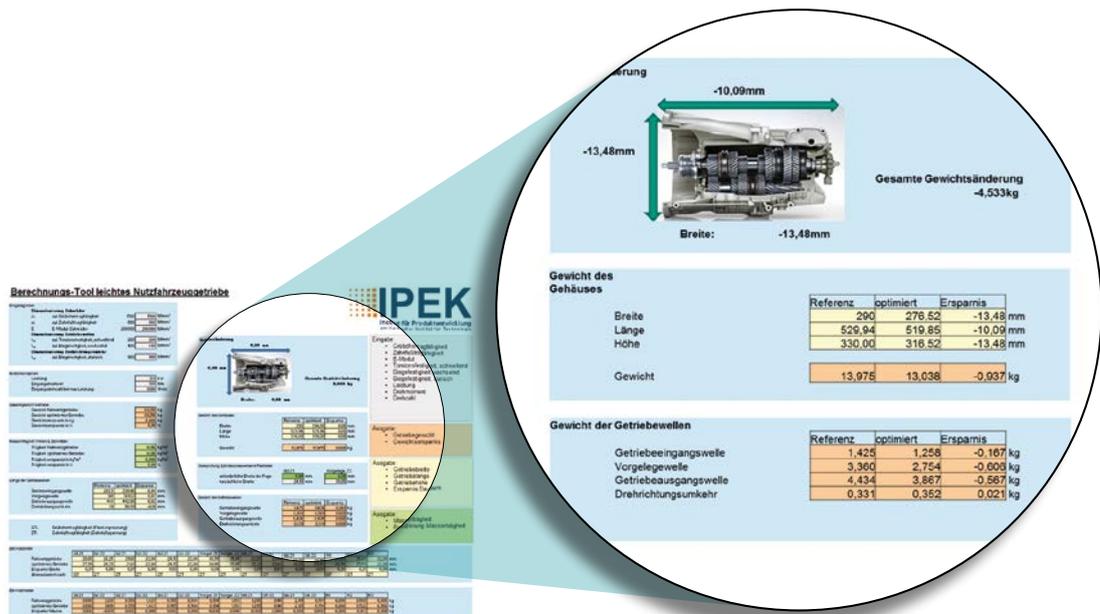


Bild 3: Softwaretool zur Berechnung des Leichtbaupotenzials (Oberfläche) mit beispielhaftem Optimierungsergebnis

Dabei werden die auslegungsrelevanten Parameter bis an die Obergrenzen der DIN-Normen erhöht. Das Leichtbaupotenzial des Doppelkupplungs- und e-CVT-Hybridgetriebes ist geringer als das der übrigen Getriebe. Dies resultiert aus den deutlich komplexeren Abhängigkeiten der Getriebekomponenten im Vergleich zu den beiden anderen Getrieben in Vorgelegebauweise. Aus diesem Grund kann neben der Werkstoffsubstitution weiteres Leichtbaupotenzial, beispielsweise durch eine Neustrukturierung der Getriebekomponenten, erreicht werden, um die Einsparungen an Masse, Trägheit und Bauraum weiter zu erhöhen.

EINFÜHRUNG HOCHFESTER STÄHLE AM MARKT

Wie in den Studien beispielhaft aufgezeigt, ist es durch die Verwendung von höherfesten Stählen möglich, Fahrzeuggetriebe hinsichtlich Leichtbau zu optimieren. Um dieses vorhandene Leichtbaupotenzial in der ingenieurtechnischen Praxis nutzen zu können, wird empfohlen, diese höherfesten Stähle im Getriebeentwicklungsprozess zu etablieren. Häufig sind die Daten dieser hochfesten Stähle in Normen, Datenbanken oder Auslegungsprogrammen zur Getriebeentwicklung nicht hinterlegt, sodass die für die Dimensionierung von Getriebekomponenten notwendigen Parameter sowie deren Existenz häufig unbekannt sind. Um die Leichtbaupotenziale durch

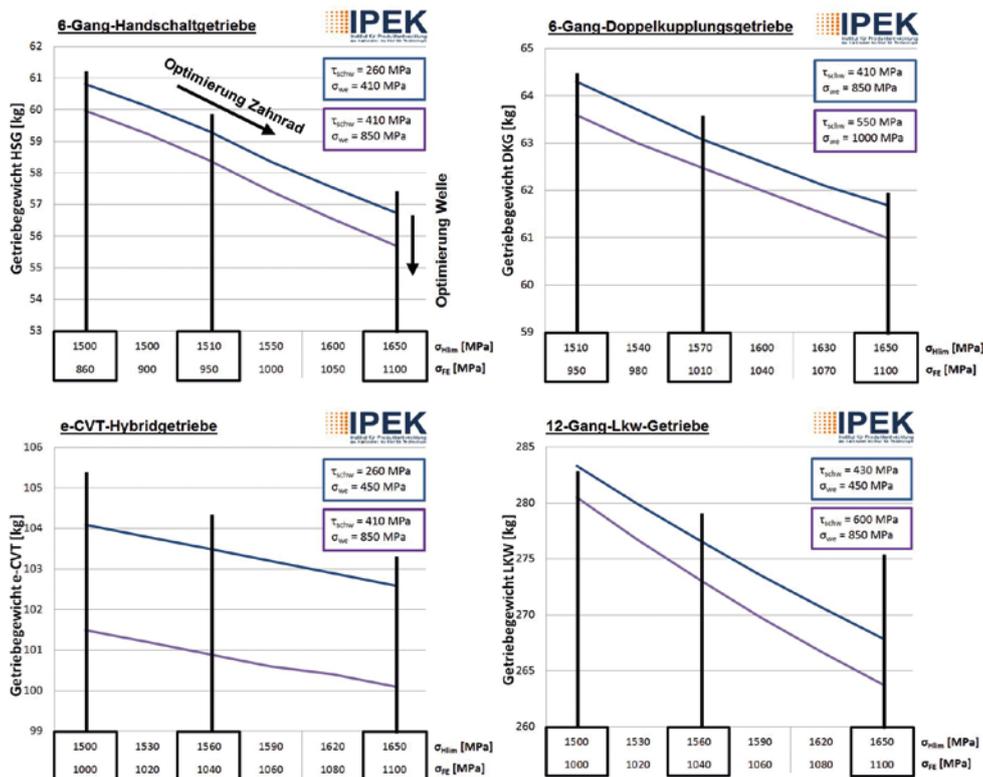


Bild 4: Leichtbaupotenzial der vier untersuchten Fahrzeuggetriebe

Bilder: Autoren

Werkstoffsubstitution zu erhöhen, ist es wichtig, die relevanten Parameter für die Dimensionierung mit hochfesten Stählen bei deren Markteinführung bereitzustellen. Für die erfolgreiche Einführung neuer, hochfester Stähle am Markt ergeben sich mehrere Randbedingungen, um dem Kunden einen barrierefreien Entwicklungsprozess mit neuen Stählen zu ermöglichen. Einerseits sollten die Werkstoffdaten neuer Stähle in die vom Kunden eingesetzten Entwicklerwerkzeuge wie beispielsweise softwarebasierte Auslegungstools, Datenbanken und Normen durch die Hersteller der Entwicklungswerkzeuge und die Stahlhersteller implementiert werden. Dadurch kann die Bekanntheit von im Rahmen der Fahrzeuggetriebeentwicklung neu verwendeten Getriebestählen in der industriellen Praxis erhöht werden. Hierbei stehen wiederum die Zahnfuß- und Grübchen-tragfähigkeit im Fokus der Betrachtung. Um die Bekanntheit der Stähle bei Jungingenieuren zu erhöhen, wird empfohlen die Werkstoffdaten in Fachbücher, die in der Lehre verwendet werden, einzubringen. Dadurch sind Jobneueinsteiger bereits mit der Verwendung höherfester Stähle vertraut, wodurch die

Hemmschwelle zur Verwendung dieser Stähle abgebaut wird. Andererseits sollten die Stähle durch die Stahlhersteller an Getriebe- und Fahrzeughersteller adressiert und durch diese freigegeben werden. Maßnahmen hierfür sind Studien oder prototypische Demonstratoren zum Aufzeigen der Leistungsfähigkeit oder gemeinsame Validierungsaktivitäten zum erfolgreichen Nachweis des Werkstoffkonzepts durch den Stahlhersteller und den Kunden, um eine erfolgreiche Markteinführung zu gewährleisten. Im Rahmen der Getriebeentwicklung ist die Unterstützung des Kunden durch den Stahlhersteller in allen Phasen des Entwicklungsprozesses vom ersten Kundenkontakt bis zur Serienentwicklung von großer Bedeutung. Es ist nicht ausreichend neue Stähle für die Fahrzeuggetriebeentwicklung im klassischen Sinne anzubieten. Vielmehr sind diese als digitale Produkte (Produktzwilling in digitaler Form) und Services anzubieten. Der Stahlhersteller tritt somit nicht mehr nur im klassischen Sinne als Verkäufer von Werkstoffen, sondern als Entwicklungspartner und Dienstleister bei der Getriebeentwicklung auf.