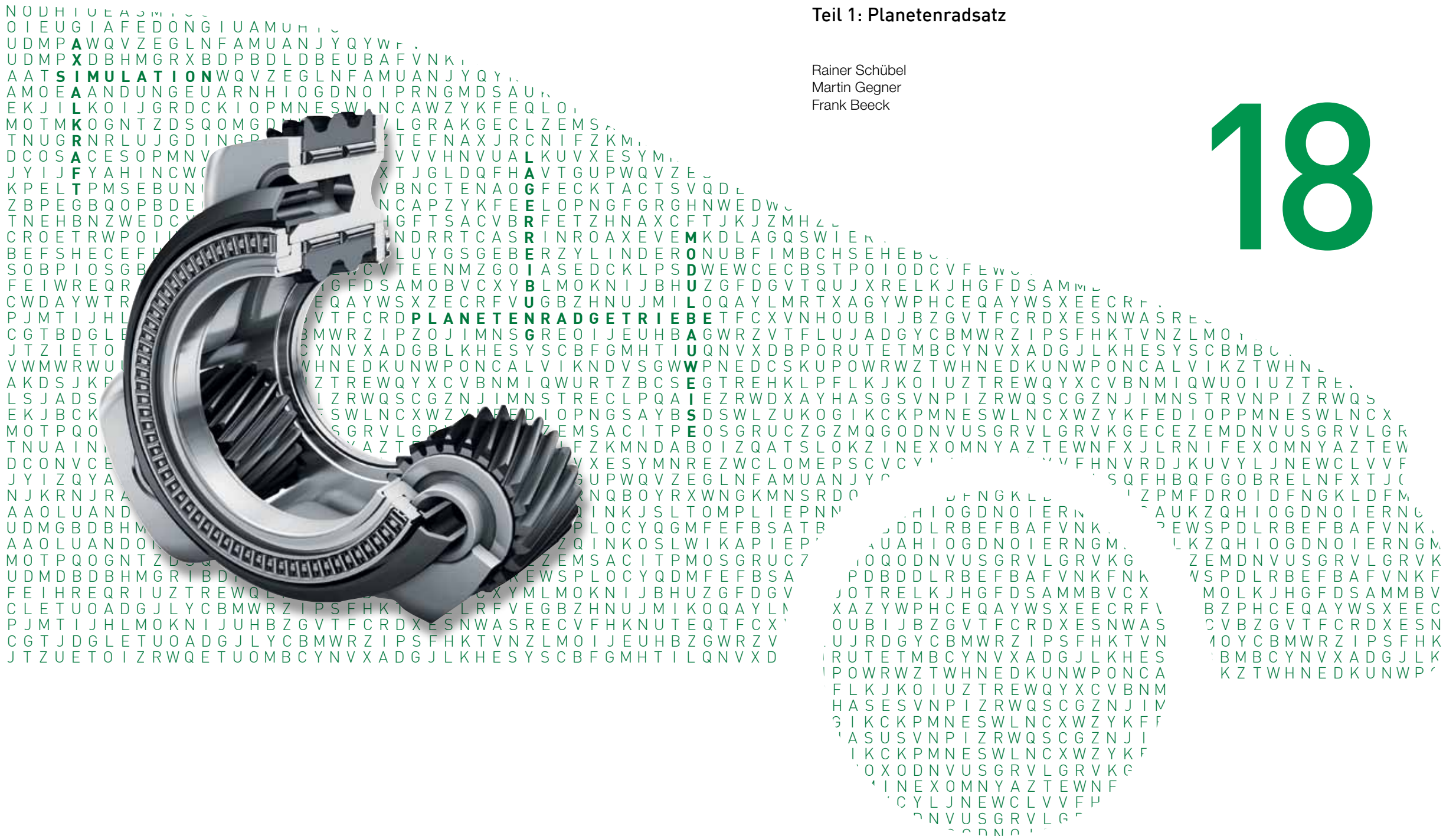


Neue Lösungen im Planetengetriebe zeigen überraschende Potenziale

Teil 1: Planetenradsatz

Rainer Schübel
Martin Gegner
Frank Beeck

18



Einleitung

Im Bestreben, die CO₂-Emissionen des Individualverkehrs zu reduzieren, haben Automobilindustrie und Zulieferer bereits zahlreiche Innovationen umgesetzt. Dazu zählen allgemeine Leichtbaumaßnahmen und Optimierungen des Abgasstrangs ebenso wie zahlreiche Detaillösungen in der Motorentechnik. Auch die Getriebe-technik trägt seit vielen Jahren zu einer kontinuierlichen Reduzierung von Verbrauch und Emissionen bei. Dies ging bislang in der Regel mit einer Erhöhung der Gangzahl einher. Aus dieser Gangzahlerhöhung beziehungsweise kleineren Spreizung ergibt sich ein komfortablerer, weicherer und kaum spürbarer Schaltvorgang. Gleichzeitig wurden mit jedem zusätzlichen Gang Verbrauchseinsparungen und Emissionsreduzierungen in Höhe mehrerer Prozentpunkte realisiert durch die Annäherung an die optimale Zugkrafthyperbel (Bild 1).

Durch die Erhöhung der Gangzahl stieg tendenziell auch die Anzahl der Planetenradsätze im Stufenautomatikgetriebe, wobei dieser Trend durch intelligente Schaltung der Kraftflüsse nicht linear zur

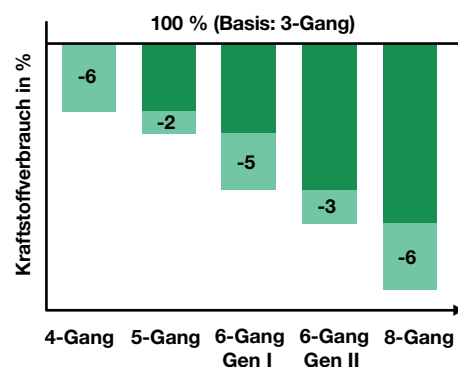


Bild 1 Verbrauchseinsparung entsprechend der Getriebeentwicklung

Gangzahl verlief. Der Bauraum des Getriebes blieb dabei jedoch konstant. Deshalb mussten die einzelnen Getriebekomponenten kleiner beziehungsweise kompakter werden. Aus dieser Forderung entstanden nicht selten besondere Herausforderungen bei Konstruktion und Auslegung der Komponenten. Gleichzeitig stiegen die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe und die Produktionstechnik.

Durch die kontinuierliche Optimierung von Planetenrad- und Axialnadellagern konnte Schaeffler in der Vergangenheit deutliche Beiträge zur Emissions- und Verbrauchsreduzierung leisten. Neuere Untersuchungen zeigen, dass selbst unscheinbar wirkende Neuentwicklungen große Potenziale entfalten können. Jüngstes Beispiel ist ein neues Axialnadellager zur Planetenradabstützung. Die Entwicklung gilt als Novum in der Wälzlagertechnik und kann bei geringen Mehrkosten bis zu 1 g CO₂/km einsparen helfen.

Trends und Herausforderungen

Die Weiterentwicklung der Getriebetechnik hat die nachfolgenden Anforderungen an moderne Planetenradsätze über die Jahre um mehr als 50 % steigen lassen. Denn der Verbrauch lässt sich nur durch kleinere Drehzahlsprünge reduzieren. Dies bedingt im Getriebe eine höhere Spreizung und führt zu einem konstruktiven Mehraufwand innerhalb des Getriebes. Beispielsweise durch einen zusätzlich erforderlichen Planetenradsatz. Um die Kräfte und Momente aus den Übersetzungen zu realisieren, werden zudem die Achsabstände im Planetensatz größer. Aus Achsabstand und Drehzahl des Planetenträgers resultiert in einzelnen Betriebspunkten des Getriebes

Höhere Spreizung	4	10
Mehr Planetenradsätze	3	4
Größere Achsabstände in %	+ 20	
Größere Planetenträger-Drehzahl in min ⁻¹	4.000	10.000
Höhere Planetenrad-Drehzahl in min ⁻¹	10.000	20.000
Höhere Naddrehzahl in min ⁻¹	50.000	100.000
Gesteigerter Beschleunigungswert in g	1.000	6.700

Bild 2 Herausforderungen für das Getriebe und Auswirkungen auf die Komponenten

eine hohe Fliehkraftbelastung. Oftmals vervielfachen sich die Fliehkräfte sogar. Dies bedeutet höhere Belastungen für Planetenträger, Planetenrad und -lager. Die maximale Trägerdrehzahl und die maximale Zentrifugalbeschleunigung liegen heute geringfügig oberhalb der momentan gültigen Grenzen. Diese Werte sind jedoch mit einem entsprechenden Entwicklungsaufwand beherrschbar.

Die Erhöhung der Gangzahl in Stufenautomatikgetrieben kann entweder durch weitere Schaltelemente oder durch mehr Planetenebenen umgesetzt werden. Rückblickend auf das Sechsgang-Stufenautomatikgetriebe konnte eine weitere Gangsteigerung durch einen vierten Planetensatz realisiert werden. Diese weitere Planetenebene hat sich im Hinblick auf gleichbleibende beziehungsweise reduzierte Schleppverluste durch offene Schaltelemente als ideal erwiesen [1].

In bestimmten Fällen ist jedoch eine möglichst platzsparende Bauweise der Stufenautomatikgetriebe gefordert, um zum Beispiel den Einsatz in Front-Quer-Anwendungen zu ermöglichen. Dafür bietet sich vor allem die Schachtelung von Planetensätzen an. Diese Maßnahme bedingt, dass

der außenliegende geschachtelte Radsatz einen vergleichsweise großen Achsabstand aufweist (Bild 2) [2].

Bisherige Anforderungen in den Planetenradsätzen waren durch Lagerungen der Planetenräder nach dem aktuellen Stand der Technik realisierbar. So sind Lagerbelastungen von bis zur 3.500fachen Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$) mit derzeitigen Fertigungsverfahren beherrschbar. Doch für die neuesten Automatikgetriebe (AT) reichen die Vorgaben für die Lagerbelastungen bis zu 6.700 g und in Auslegungen für künftige Getriebe werden bereits bis zu 8.000 g gefordert. Basis dafür ist die Abhängigkeit der Fliehkraftbeschleunigung von der Drehzahl des tragenden Bauteils (Bild 3).

Um sich die auftretenden Kräfte besser vorstellen zu können, sind Vergleiche hilfreich. Bei einer Fahrt im Karussell wirken beispielsweise rund 4 g auf den menschlichen Körper. Ein Kampfpilot erfährt bei Betätigung des Schleudersitzes bis zu 25 g . Die Belastung eines Planetenradlagers mit bis zu 6.700 g lässt sich auch so veranschaulichen: Wenn eine Nadelrolle eines Planetenradlagers ein Gramm wiegt, ergibt sich bei 6.700 g Beschleunigung ein Ge-

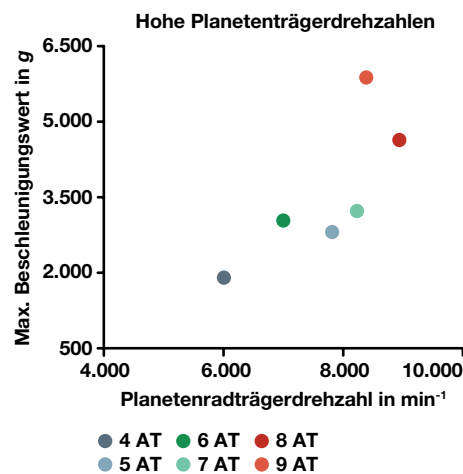


Bild 3 Veränderung der Planetenträgerdrehzahlen

wicht von rund 6,7 kg. Solche Werte treiben Konstruktion und Werkstofftechnik an ihre Grenzen und erfordern innovative Ansätze in der Entwicklung.

Verlustleistungen

Obwohl Getriebe grundsätzlich relativ hohe Wirkungsgrade aufweisen, lassen sich Verluste an den einzelnen Baugruppen nicht komplett vermeiden. Zu den hauptsächlichsten Verursachern zählen zunächst einmal die Überbrückungskupplung und deren Aktivierungssystem im Wandler. Der Freilauf, der das Leitradd abstützt, wird dabei als eher vernachlässigbar angesehen. Die anschließende Ölpumpe wird immer häufiger separat elektromechanisch betätigt. Dies hat zur Folge, dass nur dann Energie aufgewendet werden muss, wenn Ölmenge oder Öldruck benötigt werden. Bei den Planetenradsätzen stehen neben dem Fliehkrafteinfluss die Wälzreibung der Verzahnung, die

Lagerreibung sowie die axiale Gleitreibung der Planetenräder im Fokus. Bei den Lagern der Automatikgetriebebauteile gilt das Hauptaugenmerk den Axiallagern, Kugellagern oder radialen Gleitführungen. Weitere Verluste entstehen durch Öl-Viskosität, Drosselung/Pumpwirkung verschiedener rotierender Bauteile sowie durch Planschverluste.

Reduzierung der Reibleistungen

Planetenradlager allgemein

Die Aufgabe der Planetenradlager besteht im Wesentlichen in der Positionierung der Planetenräder [3]. Zudem müssen die Lager Kräfte und Momente aufnehmen und eine Drehbarkeit bei minimaler Reibung sicherstellen. Aufgrund der Drehzahl- und Fliehkraftanforderung kommen meist Lager mit Nadelkäfig zum Einsatz. Der üblicherweise aus Stahl ausgeführte Käfig hat die Aufgabe, die Wälzkörper zu führen und zu positionieren. Um die hohen Stückzahlen von Automobilanwendungen rationell produzieren zu können, werden die Käfige in der Regel durch Umform-, Stanz- und Schweißprozesse hergestellt.

Die Laufbahnen für das Wälzlager sind direkt auf den Radsatzkomponenten verwirklicht. Die äußere Laufbahn wird durch die Bohrung des Planetenrads gebildet. Als innere Laufbahn dient der fest im Planetenträger fixierte Bolzen. Spezielle Anlaufscheiben ermöglichen einen axialen Anlauf der Planeten und der Lagerkäfige. Eine solche Gestaltung ergibt eine kostengünstige und funktionsfähige Lageranordnung.

Das Lager selbst besteht aus einer bestimmten Anzahl von tragenden Wälzkörpern (Nadeln) und einem sogenannten Käfig, der die Nadeln sowohl axial (Käfigbord) als auch am Umfang (Käfigsteg) führt. An den Käfigstegen befinden sich eine Außen- und eine Innenhalterung, die die Nadeln radial gegen Herausfallen sichern. Die Position dieser Halterungen wurde so optimiert, dass sich eine möglichst geringe Käfigbeanspruchung ergibt. Zusätzliche Optimierungen an den Tascheneckenradien zielen auf eine Reduzierung der Bauteilspannungen ab.

Käfigauslegung

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Auslegung von Planetenradlagern ist das Reibungsverhalten. Eine veränderte Gestaltung von Durchmesser, Länge oder Bestückung der Wälzkörper kann erhebliche Reibungsveränderungen mit sich bringen. Dies zeigt exemplarisch die Gegenüberstellung der rechnerisch ermittelten Reibanteile zweier Lagerauslegungsalternativen unter reiner Fliehkraftbelastung. Gegenüber der Basis konstruktion mit einem 2,5 mm dicken Wälzkörper unterscheidet sich die Alternative durch dünnere Wälzkörper mit 2,0 mm Durchmesser und so durch einen etwas größeren Innenlaufbahndurchmesser. Bei identischen statischen Tragzahlen reduziert sich die Reibung der Wälzkörper mit dem kleineren Durchmesser um rund 11 %.

Die Höhe der Käfigreibung ist abhängig vom gewählten Wälzkörperdurchmesser und bestimmt damit maßgeblich das Reibungsverhalten der Lager. Die Auslegung von Planetenlagern ist deshalb eine vielfältige Herausforderung, bei der eine ausreichende Tragzahl und Käfigfestigkeit sowie minimale Reibung angestrebt werden müssen.

Beschichtung

Einen weiteren Bestandteil zur Leistungssteigerung der Planetenlager stellen angepasste Beschichtungen der Lagerkäfige dar. Aufgrund der auftretenden Belastungen kommt es am Lagerkäfig zu Gleitkontakten. So werden zum Beispiel die Wälzkörper unter Fliehkraft an die Außenhalterungen der Käfigsteg und der Käfig mit seiner Außenmantelfläche in die Planetenbohrung gedrückt.

Simulationen zeigen, dass eine entsprechende Optimierung der Kontaktflächen am Käfig zweckmäßig ist, da dort bis zu 70 % der Reibung entsteht. Die Wälzoberflächen der Nadeln und der Laufbahnen eignen sich dagegen weniger für reibungsreduzierende Beschichtungen, weil sie bereits höchste Oberflächenanforderungen erfüllen, um als Wälzlaufbahn fungieren zu können.

Beschichtungen auf Basis von Zinkphosphat (Durotect-Z) oder Manganphosphat (Durotect-M) verbessern das Gleit- und Verschleißverhalten sich berührender, gegeneinander bewegter Metalloberflächen und tragen überdies zum Korrosionsschutz bei. Durch die ölspeichernde Eigenschaft der Schichten werden diese auch gezielt in Gleitpaarungen eingesetzt. Die bisher verwendete Durotect-Z-Schicht wurde für Planetenlageranwendungen durch die Durotect-M-Schicht ersetzt. Praxiserfahrungen zeigen, dass diese Schicht deutliche Reibungs- und Verschleißvorteile bewirkt.

Sind noch weitere Effizienzsteigerungen gefragt, kommt eine speziell entwickelte Beschichtung auf Basis von Nickel und Phosphor (Durotect-NP) zur Reibungsreduzierung auf den Lagerkäfigen zum Einsatz. Die Schicht bietet sehr gute adhäsive Verschleißfestigkeit sowie ausgezeichnetes Trockenlaufverhalten und Temperaturverträglichkeit in Verbindung mit hervorragenden Gleit- und Antihafteigenschaften.

Die gemessenen Reibleistungen mit Durotect-M liegen um etwa 10 % niedriger als mit der bisher verwendeten Durotect-Z-Schicht. Überdies konnte der Verschleiß nennenswert reduziert werden. Die Durotect-NP-Beschichtung bewirkt eine nochmalige Reibungsreduzierung um weitere 13 %.

Planetenradauslegung

Um mögliche Optimierungen bei der Planetenradauslegung zu untersuchen, variierte Schaeffler bei einem Planetenrad bei gleichbleibender Verzahnung die Parameter der Lagerabstützung. Dabei wurde ein maximal möglicher Planetenrad-Innendurchmesser angestrebt, der damit auch eine minimal mögliche Wanddicke und maximal mögliche Lager-Außenlaufbahn definiert. Variationen der Wälzkörperdurchmesser und ihrer – davon abhängigen – Anzahl im Teilkreisdurchmesser dienten zur Bestimmung einer Geometrie der höchsten Lebensdauer für die radiale Lagerung. Diese Festlegung definiert auch den Laufbahn-Innendurchmesser und die Größe des Planetenradbolzens.

Durch die kleinere Wanddicke verringern sich die Planetenradmasse und die daraus resultierenden Fliehkräfte.

Die Untersuchungen führten zu folgenden Ergebnissen: Die Strategie, einen kleineren Wälzkörperdurchmesser und dafür mehr Wälzkörper zu verwenden, führt zu einer reibungsärmeren und tragfähigeren Lagerung. Berechnungen zeigen eine Lebensdauersteigerung des optimierten Lagers um 55 % bei gleichzeitiger Reduzierung der Planetenradmasse um 30 %. Dies führt zu einer 50-prozentigen Reibungsreduzierung im Radiallager sowie zu einer Fliehkraftreduzierung von 60 %. Die so erzielten Entwicklungserfolge sind in Bild 4 zusammengefasst.

Neueste Erkenntnisse aus der axialen Lagerung des Planetenrads

In einem Planetenradsatz sind Hohlräder, Planetenrad und Sonnenrad miteinander im Eingriff. Dabei spielt das Planetenrad eine besondere Rolle, da es sowohl mit dem Hohlrad als auch mit dem Sonnenrad verzahnt ist. Die Verzahnungen sind als Schrägverzahnung ausgebildet. Am Planetenrad entstehen Verzahnungskräfte

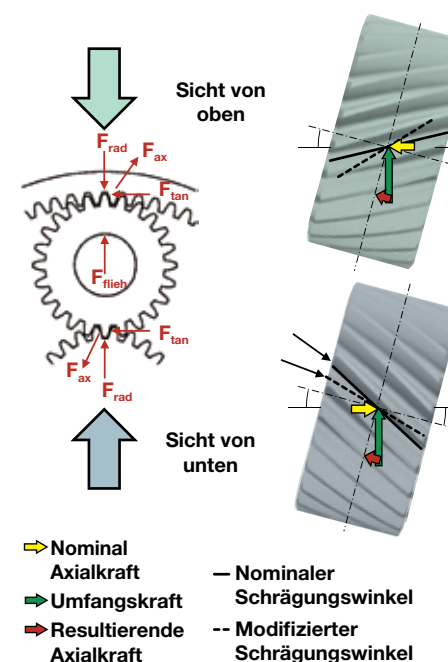


Bild 5 Kräfteverhältnisse am Planetenrad

sowohl im Eingriff mit dem Hohlrad als auch im Eingriff mit dem Sonnenrad. Diese bewirken eine Kraft, die in Umfangsrichtung auf den Planetenradbolzen wirkt (Bild 5).

Zusätzlich treten bei Rotation des Planetenträgers Zentrifugalkräfte auf. Bei Eigenrotation des Planetenrads entstehen Reibkräfte als Resultat aus dem Kontakt mit dem Planetenradlager. Zusätzlich entstehen noch Kräfte aus der Winkelbeschleunigung des Planetenrads und weitere Reibungskräfte aus dem Wälzkontakt selbst. Alle drei Kräfte wirken, je nach Richtung des Leistungsflusses, einer der zwei Verzahnungskräfte entgegen. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht im System Sonne-Planet und Planet-Hohlrad. Dies bewirkt eine axial resultierende Kraft, die sich an den Stirnseiten der Planetenräder abstützt (rote Pfeile).

Im Rahmen von Entwicklungsarbeiten veränderte Schaeffler die letzte nicht wälzgelagerte Abstützung im Planetenradsatz, die derzeit als Gleitpaarung ausgeführt ist. Diese besteht entweder aus einer Buntmetallscheibe, oder einer Stahlscheibe, oder aus beidem. Dabei dient eine Buntmetallscheibe als Reibpartner für den Planetenträger aus ungehärtetem Stahl und eine Stahlscheibe fungiert als Anlaufscheibe für das Planetenrad und dessen Radial-Nadellager.

Die Gleitscheiben sind sehr klein; typische Abmessungen sind zum Beispiel Innendurchmesser = 17 mm, Außendurchmesser = 30 mm, Dicke = 1 mm. Trotzdem verfügen sie über zahlreiche Merkmale wie

- spezielle Ölführungsnuten beziehungsweise Öldurchlässe,
- Halterungen zur einfacheren Endmontage,
- Verdrehsicherungen (um Reibverschleiß zu verhindern) sowie
- diverse Beschichtungen.

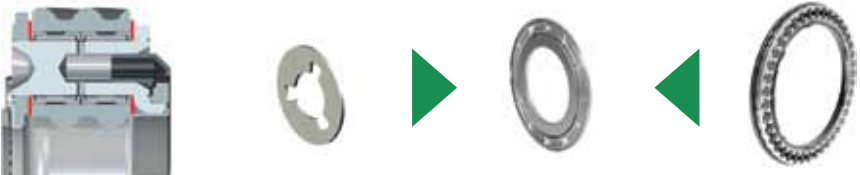
Eine maßgebliche Herausforderung für die Entwicklung eines adäquaten Wälzlagers ist die geringe zur Verfügung stehende Bauraumgröße. Ein sicheres Standard-Axialnadellager hat bisher eine Produktbreite von 2,13 mm. Der Nadeldurchmesser beträgt 1,5 mm und die Scheibendicke 0,63 mm.

Die Aufgabe lautete also, diese filigranen Dimensionen mit einem neuen Axialnadellager klar zu unterbieten. Gelungen ist dies mit dem neuesten Schaeffler-Axialnadellager inklusive Laufbahnscheibe. Sein Innendurchmesser beträgt 17 mm, der Außendurchmesser 29,9 mm und die Dicke 1,2 mm. Der Nadeldurchmesser konnte auf 1,0 mm und die Scheibendicke auf 0,2 mm reduziert werden (Bild 6).

Um die Anforderungen an ein Wälzlager zu erfüllen und den auftretenden Belastungen standzuhalten, stellt diese Ausführung höchste Ansprüche an die Qualität des Werkstoffs sowie seine Oberflächen- und Wärmebehandlung. Die folienartige Schei-

Optimierungen im Vergleich zum bisherigen Stand	Reibungsverhalten zur Basis 100 % Standard	Entwicklungsverantwortung
Optimierte Planetenradlager-Käfigkonstruktion 	-11 %	Schaeffler
Optimierte Planetenradlager-Käfigbeschichtung 	-23 %	Schaeffler
Gewichtsoptimiertes Planetenrad 	-50 %	heute noch Kundenverantwortlichkeit

Bild 4 Zusammenfassung der Verbesserungen



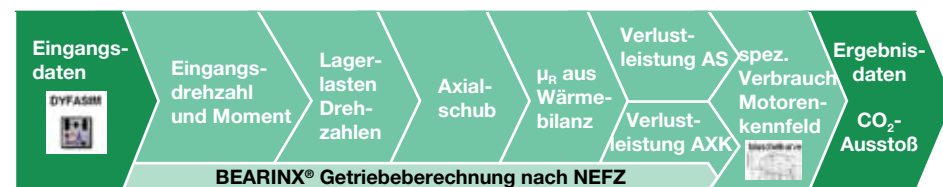
Dimension	Anlaufscheibe	Neues Axialnadellager	Standard-Axialnadellager
Innendurchmesser	17 mm	17 mm	50,8 mm
Außendurchmesser	30 mm	29,9 mm	67,5 mm
Breite	1,0 mm	1,2 mm	4,0 mm
Nadelabmessung	–	1,0 x 2,25 mm	3 x 4,3 mm
Scheibendicke	1,0 mm	0,2 mm	1,0 mm
Nadeldrehzahl	–	500.000 min ⁻¹	120.000 min ⁻¹

Bild 6 Veränderungen an der axialen Planetenradlagerung

bendicke stellt zudem eine große Herausforderung im Produktionsprozess dar. Die Nadel mit einer Abmessung von 1 mm Durchmesser und einer Länge von 2,25 mm ist der kleinste im Getriebebereich jemals eingesetzte Wälzkörper. Um die Nadel sicher zu führen und zu halten, wird zudem ein sehr filigran geformter Axialnadelkäfig benötigt.

Mithilfe von Simulationenwerkzeugen wurde das Verhalten der Axiallagerung im

Planetenradsatz für ein Gesamtgetriebe mit vier verschiedenen Radsätzen untersucht und die Auswirkungen auf den Verbrauch simuliert. Der Simulation lag der NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) mit auf 1.400 reduzierten Lastpunkten zugrunde. Das Motorkennfeld auf Basis des NEFZ und die Massenträgheiten entsprechen dem eines Oberklassefahrzeugs. Die zugrunde gelegten Reibungsparameter sind durch Prüfstandsversuche ermittelt worden (Bild 7) [4, 5].



Zu Grunde gelegte Reibungsparameter μ_r aus Wärmebilanz					
Szenario	Axialschub	Planschen	Verschleiß	P_AXK (Basis)	μ_{r_AS}
1	3,5 %	ja	ja	74,40 W	0,018
2	7,0 %	ja	–	14,88 W	0,070

AS: Axialscheibe AXK: Axialnadelkranz P_AXK: Verlustleistung Axialnadelkranz

Bild 7 Simulation

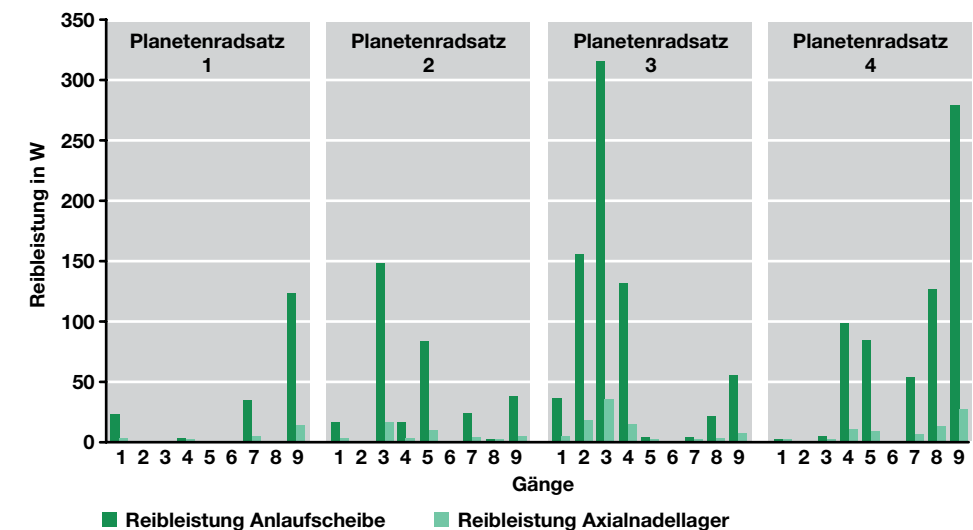


Bild 8 Ergebnisse der Simulation

Die in Bild 8 dargestellten Ergebnisse zeigen im Vergleich von Gleit- und Wälzlager die Verlustleistung der einzelnen Radsätze in den verschiedenen Lastzuständen. Eine Summierung der Werte darf nur für die jeweiligen Gänge erfolgen. Aus den gegebenen Lastzuständen resultieren für das Axiallager bei zwei Radsätzen relativ hohe Werte, die bei geeigneter Wälzlagerung eine hohe Effizienz der Reibungsreduzierung zeigen.

Für die Anlaufscheibe zeigt sich zum Beispiel im dritten Gang eine maximale Reibleistung von 470 W. Für die Axialnadellagerung ergibt sich eine maximale Reibleistung von nur noch 50 W. Dies bedeutet für ein Gesamtgetriebe mit vier Planetensätzen im dritten Gang eine um 420 W geringere Reibleistung und mithin eine Reduzierung um 90 %. Auf Basis der Simulation ist durch Substitution der Gleitscheiben durch Axialnadellager im NEFZ eine Verbrauchsreduzierung von rund 0,5 % zu erwarten.

Auch vergleichende Tests von Axiallager und Gleitscheibe auf einem Axiallagerhochdrehzahlprüfstand zeigten ein geringeres Reibmoment und zusätzlich Temperatur-

differenzen. Um die Drehzahlgrenzen des Axiallagers in Abhängigkeit von Axiallast, Öltemperatur und Öldurchflussrate zu ermitteln, wird auf dem Prüfstand die Axiallast hydraulisch eingeleitet. Das hydrostatische System ermöglicht die Messung von Reibmomenten unter hohen Drehzahlen.

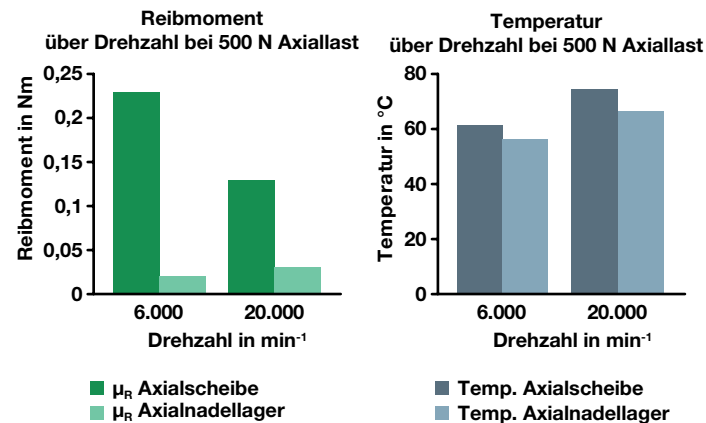
Als Versuchsbedingungen wurden Drehzahlen von 6.000/min beziehungsweise 20.000/min gewählt. Die Axiallast betrug 500 N. Bei einer Drehzahl von 6.000/min kam es zu einer Reduzierung des Reibmoments von 0,23 Nm auf 0,024 Nm. Bei 20.000/min reduzierte sich das Reibmoment von 0,13 Nm auf 0,03 Nm. Mit dem neuen Axialnadellager ist also eine Reduzierung des Reibmoments um gut 90 % möglich. Gleichzeitig sinkt die Temperatur an der Lagerstelle um 5 bis 10 °C (Bild 9).

Als Alternative zu aufwendigen und teuren Tests von Planetenradsätzen im Kompletgetriebe verfügt Schaeffler über einen Komponentenprüfstand mit der Möglichkeit, ganze Planetensätze hinsichtlich Funktion und Lebensdauer unter Fliehkraft und Lastbedingungen zu untersuchen. Die Ein-

leitung eines Moments erfolgt dabei variabel über zwei gekoppelte Planetensätze. Weitere Einflussparameter am Prüfaufbau sind die zugeführte Ölmenge und -temperatur zur Schmierung und Kühlung des Radsatzes. Als Prüfkriterium zur Überwachung hat sich die gemessene Lagertemperatur als zuverlässig erwiesen. Thermofühler erfassen die Temperatur direkt im Radsatz an jeder Planetenlagerung. Dies lässt einen Rückschluss auf die Funktionsfähigkeit und das Verhalten des Systems über die Prüfzeit zu. Kommt es unvermittelt zu einem Temperaturanstieg, ist dies ein zuverlässiges Indiz für einen Schaden an der Planetenlagerung. Meistens ist dann der Lagerkäfig defekt.

Ein solcher Prüfstand dient auch zu vergleichenden Tests von Planetenradsätzen mit Axiallager und Planetenradsätzen mit Gleitscheiben. Für den Prüfaufbau wurden die Hohlräder gegeneinander bis maximal 1.000 Nm verspannt und festgesetzt. Auf die Planetenträger wirkte eine Antriebsdrehzahl von bis zu 6.000/min. Daraus resultierte eine Planetenraddrehzahl von maximal 20.000/min.

Die in Bild 10 dargestellten Messergebnisse zeigen Mittel- und Maximalwerte der Axiallager- beziehungsweise Gleitscheibentemperaturen und die entsprechenden Temperaturdifferenzen. Ein Vergleich der Ergebnisse bei einem Eingangsmoment von 100 Nm und einer Drehzahl von 6.000/min sowie einem Eingangsdrehmoment von



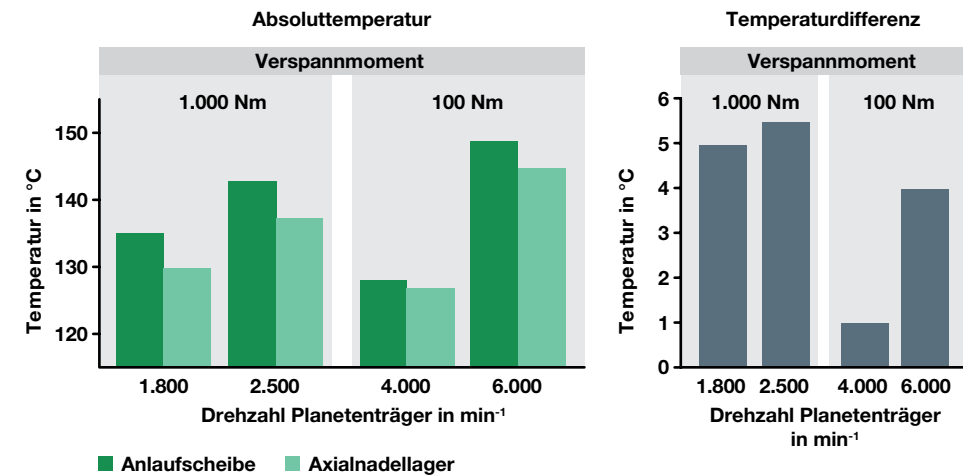
Funktionstests am Axiallager-Hochdrehzahl-Prüfstand

Generell können die Axiallast, Lager- und Öltemperatur, Öldurchfluss, Reibmoment, Drehzahl und Laufzeit gemessen werden.

Bild 9 Analyse von Reibung und Temperatur am Axiallagerhochdrehzahlprüfstand

1.000 Nm und einer Drehzahl von 2.500/min zeigt deutliche Unterschiede der beiden Konstruktionsvarianten. So beträgt die mittlere Temperaturdifferenz im ersten Fall 1,5 °C und im zweiten Fall 3 °C. Die Maximalwerte zeigen sogar eine Temperaturdifferenz von 4 °C beziehungsweise 5 °C.

Die in der Simulation des Gesamtgetriebes und bei realen Komponententests einzelner Lager ermittelten geringeren Temperaturen und Reibmomente (Bild 11), haben deutliche Auswirkungen auf das Emissionsverhalten. So beträgt die rechnerische CO₂-Reduktion des Gesamtgetriebes im NEFZ rund 1 %. Die Substitution der Planetenanlaufscheiben eines aus vier Planetenradsätzen bestehenden Automatikgetriebes durch Axiallager führt zu einer CO₂-Einsparung von 1 % bei Mehrkosten von weniger als zehn Euro.



Auf diesem Prüfstand wurde das System Planetenradsatz mit dem Axiallager und im Vergleich mit den Gleitscheiben getestet.

Bei unserem Prüfaufbau wurden die Hohlräder gegeneinander bis max. 1.000 Nm verspannt und festgesetzt (Drehzahl 0 min⁻¹). Die Planetenträger erreichten eine Antriebsdrehzahl von bis zu 6.000 min⁻¹.

Die Temperatur wurde gemessen am Planetenradbolzen.

Bild 10 Ergebnisse verschiedener Funktionsversuche am Planetenradsatzprüfstand

Untersuchungen	Anlaufscheibe	Axialnadellager	Reibungsreduzierung	Reibungsreduzierung	CO ₂ -Reduzierung
Simulation (3. Gang)	470 W	50 W	420 W	90 %	1 %
Komponententest (6.000 min ⁻¹)	0,23 Nm 62 °C	0,02 Nm 57 °C	0,21 Nm 5 °C	90 %	1 %
Planetengetriebeprüfstand (6.000 min ⁻¹)	150 °C	146 °C	4 °C	–	–



Die Axialnadellager bringen 1 % CO₂-Reduzierung bei nur 10 € Mehrkosten

Bild 11 Auswirkungen auf das Emissionsverhalten

Modulbauweise in Planetenradsätzen

Schaeffler bietet und liefert bereits heute viele Einzelkomponenten und Anbauteile für Planetenradsätze. So zum Beispiel die Planetenradlager, die die radiale Positionierung des Planetenrads übernehmen, die Lagerkräfte und Momente aufnehmen und die Drehbarkeit bei minimaler Reibung sicherstellen. Der Planetenradbolzen stellt die innere Laufbahn des Planetenradlagers dar. Er wird in allen Ölzuführ- und Geometrievarianten von Schaeffler angeboten. Der axiale Anlauf des Planetenrads und des Planetenradlagers wird mit den bereits beschriebenen Gleitscheiben beziehungsweise von den neu entwickelten Axialnadelagern abgestützt. Auch dabei handelt es sich um Schaeffler-Komponenten. Die Ölauffangschale aus Kunststoff sowie die am Planetenradsatz laufenden Axialnadelager passen ebenfalls ins Schaeffler-Portfolio (Bild 12).

Beim Trägerkörper handelt es sich in der Regel um Umformteile, die gezogen, gestanzt und mit spanlos geformten Verzahnungen versehen sind. Diese ferti-

gungstechnischen Kernkompetenzen von Schaeffler werden für die verschiedensten Produkte wie Planetenradträger oder Kupplungslamellenträger genutzt. Die Planetenradträger werden überwiegend geschweißt. Schaeffler besitzt aber auch viel Erfahrung im Bereich der Niettechnik, die unter anderem für Zweimassenschwungräder, Drehmomentwandler oder Hohlradträger zum Einsatz kommt. Diese Fertigkeiten können auch für die Planetenträgermontage genutzt werden. Im Gegensatz zum thermischen Fügen bietet das Nieten die Vorteile, dass kein Wärmeverzug durch das Schweißen auftritt und keine Schweißspritzer entfernt werden müssen. Um umfassende Baugruppen anbieten zu können, erfolgt auch die Entwicklung von Planetenrad-Zahnradern intern. Dabei sammelte Schaeffler viel Erfahrung im Bereich hochleistungsfähiger Planetenradsätze. Dies begründet die Positionierung als Entwicklungspartner und Lieferant für mechanische Baugruppen oder umfassende Planetenradsatzlösungen für den Gesamt-Getriebehersteller.

Für die Planetenradsätze selbst bietet Schaeffler Baukastenlösungen an, die ein-

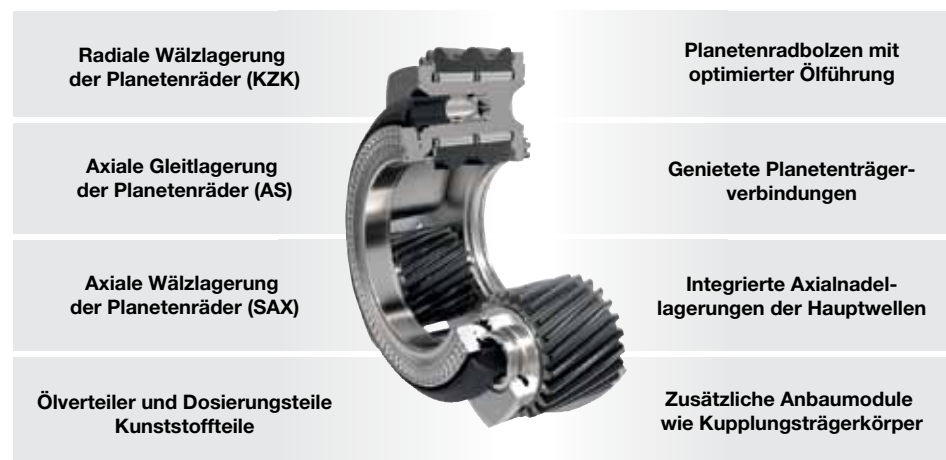


Bild 12 Schaeffler-Komponenten in Modulbauweise für Planetenradsätze



Bild 13 Variation der Planetenradsatzmodule

fach in bestehende Getriebekonstruktionen integriert werden können. Die Radsätze zeichnen sich durch Merkmale wie spanlos hergestellte Verzahnungen (Steckverzahnung, Mitnahmeverzahnung) aus. Der Planetenträger kann als Schweiß- oder Nietlösung ausgelegt und hergestellt werden. Nietlösungen bieten sich aufgrund geringerer Anschaffungskosten und kürzerer Taktzeiten vor allem dann an, wenn Neuinvestitionen erforderlich sind. Der gesamte Radsatz inklusive Anbauteilen ist entsprechend der jeweiligen Anwendung konzipiert, um bestmögliche Beölung und geringste Reibung zu erzielen. Die Planetenträger sind mit Anschlusselementen wie Lamellenkupplungsträger und Hohlradträger ausführbar oder können in Last- und Differenzialstufen integriert werden (Bild 13).

Damit die Baukastenstrategie ihre volle Wirkung entfalten kann, ist eine frühzeitige Zusammenarbeit zwischen den Spezialisten von Schaeffler und dem jeweiligen Getriebehersteller möglichst schon in der Konzeptphase hilfreich.

Literaturverzeichnis

- [1] Scherer, H.; Wagner, G.; Naunheimer, H.; Dick, A.: Das automatische Getriebe 8HP70 von ZF. Getriebesystem, konstruktiver Aufbau und mechanische Bauteile. VDI-Berichte 2029, Düsseldorf: VDI Verlag, 2008
- [2] Greiner, J.; Scherer, H.; Girres, G.; Dick, A.: Transmission Kit for Front-Wheel-Drive Applications from ZF. VDI-Bericht 2013, Düsseldorf: VDI Verlag, 2011
- [3] Pabst, A.; Beeck, F.: Increasing the performance of planetary bearings for modern automatic transmissions. VDI-Berichte 2158, Düsseldorf: VDI Verlag, 2012
- [4] Koch, O., Weber, J., Zintl, G., Gronau, B.: Energieeffiziente Auslegung von Wälzlagerungen. VDI-Tagung Gleit- und Wälzlagerungen, Schweinfurt, 2011
- [5] Koch, O., Gao, G.: Energy-efficient design of rolling bearings: An important contribution towards reducing CO₂-emissions and increasing power density in automotive transmissions. CTI Symposium Innovative Automotive Transmissions and Hybrid & Electric Drives, Shanghai, 2012