

# 12

## Schaeffler's aktives Elektrodifferenzial

Das Getriebe für den  
Antrieb der Zukunft

Dr. Tomas Smetana  
Thorsten Biermann  
Prof. Dr. Bernd-Robert Höhn, FZG München  
Franz Kurth, FZG München  
Dr. Christian Wirth, ZG GmbH Garching

## Vorwort

Auf der Suche nach neuen Mobilitätskonzepten, motiviert durch die globale Klimaerwärmung sowie die Verknappung fossiler Energieträger, tritt der elektrische Fahrzeugantrieb immer stärker in den Vordergrund der Entwicklungen. Nach dem Willen der Bundesregierung soll Deutschland in den kommenden zehn Jahren zum Leitmarkt für Elektromobilität werden. Bis zum Jahr 2020 sollen bereits eine Million am Stromnetz aufladbare Elektrofahrzeuge und sogenannte Plug-In Hybridfahrzeuge auf deutschen Strassen fahren.

Da in den letzten Jahrzehnten, vor allem hinsichtlich der Individualmobilität überwiegend an der Entwicklung verbrennungsmotorisch basierter Antriebskonzepte gearbeitet wurde, besteht momentan ein gewaltiger Aufholbedarf bei der Entwicklung von elektrischen Antriebssträngen. Dabei gibt es nicht nur technische Aspekte zu beleuchten, sondern auch industrielle Strukturen und Lieferketten zu schaffen, um elektrische Antriebsstränge für die Großserie herstellen zu können. Es gilt eine Vielzahl bereits bestehender Kompetenzen bei Zulieferern, Forschungsvereinigungen und Hochschulen zu bündeln und in einem Netzwerk weiter auszubauen. Diese Verflechtung ermöglicht eine effiziente und effektive Nutzung bestehender Ressourcen von der alle Beteiligten profitieren, indem sie zukunftsfähige Systemtechnik für Fahrzeugantriebe entwickeln.

Unabhängig von dem Thema Elektromobilität, steigen die Zulassungszahlen von Straßenfahrzeugen und folglich auch die Verkehrsdichte kontinuierlich an. Um dennoch die Anzahl von Unfällen zu reduzieren, wurde die Kampagne eSafety gestartet, mit dem ehrgeizigen Ziel, die Anzahl der Verkehrstoten in der Europäischen Union innerhalb von nur zehn Jahren bis 2010 zu halbieren. Diese Aufgabe kann nicht nur allein durch verbesserte Straßenverhältnisse bewältigt werden. Auch der Antriebsstrang des Fahrzeugs muss mit der entsprechenden Regelung so intelligent ausgeführt werden, dass menschliche Fehlentscheidungen im Straßenverkehr korrigiert werden können. Die Entwicklung entsprechender Fahrassistenzsysteme wurde bereits eingeleitet. Die eigentliche Hardware, um derartige Systeme auch im elektrischen Antriebsstrang sinnvoll einsetzen zu können, ist allerdings noch Neuland, das Chancen zur Innovation birgt.

## Einführung

### Historie

Während der Entwicklungen zum Stirnraddifferenzial entstand bei Schaeffler bereits sehr früh die Idee, das Differenzial koaxial zu einem Elektromotor anzuordnen. Bereits die ersten Entwürfe zeigten, dass auf diese Weise ein extrem kompakter Antriebsstrang realisiert werden kann. Allein der innovative, Schaeffler-spezifische Gedanke fehlte, da bereits Prototypen mit ähnlichen Anordnungen durch andere Unternehmen aufgebaut worden waren.

In Zusammenarbeit mit der FZG München wurde schließlich die Idee entwickelt, das Getriebe mit einer Überlagerungsstufe zu kombinieren, um zusätzlich eine elektrische Querverteilung der Momente in den Funktionsumfang zu integrieren.

Ein wesentlicher Vorteil dieses innovativen Antriebsystems, das „aktives Elektrodifferenzial“ bzw. „aktives eDifferenzial“ getauft wurde, liegt neben dem deutlich verbesserten Fahrverhalten und der höheren Energieeffizienz in der möglichen Integration einer Fahrassistenz, um Unfälle zu vermeiden und aktiv in die Steuerung des Fahrzeugs einzugreifen.

Die Antriebsachse stellt folglich das eigentliche Werkzeug dar, mit dem eine aktive Quer- und Längsregelung der Antriebsmomente in einem rein elektrisch angetriebenen Fahrzeug realisiert werden kann. Über diese Funktionen können dann in späteren Versuchsfahrzeugen Notausweich- und Bremsmanöver realisiert werden.

### Stand der Technik

#### Raddirektantrieb über Radnabenmotoren

Radnabenmotoren finden sich bereits um die Jahrhundertwende in zahlreichen Personenkraftwagen, versinken aber mit der großindustriellen Gewinnung fossiler Brennstoffe und dem Einzug von Verbrennungsmotoren beinahe in der Bedeutungslosigkeit.

Im Hinblick auf schwindende Erdölreserven wurde in den letzten Jahren die Entwicklung von Radnabenmotoren wieder verstärkt verfolgt. So verfügt ein Konzeptfahrzeug von Volvo (Volvo Recharge Concept) über vier Radnabenmotoren mit einer

mechanischen Spitzenleistung von insgesamt 480 kW. Ist der Energieinhalt der Batterien, die für eine Reichweite von ca. 100 km rein elektrischen Betriebs reichen, erschöpft, so werden diese von einem Range Extender wieder aufgeladen.

Auch Mitsubishi entwickelte für einen Prototyp des Lancer einen Radnabenantrieb. Dieses Fahrzeug wurde mit vier Radnabenmotoren mit einer Maximalleistung von 200 kW ausgestattet. Als Motoren wurden Permanentmagnet-Synchronmaschinen ausgewählt, die ein maximales Drehmoment von 518 Nm pro Rad zur Verfügung stellen. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt in etwa 180 km/h.

#### Raddirektantrieb über Getriebe

Mercedes-Benz hat ein Konzept für den Supersportwagen „SLS“ vorgestellt, bei dem jedes der Räder über ein Getriebe (mit der Übersetzung  $i = 5,5$ ) von einem Elektromotor angetrieben wird. Die gesamte Leistung soll bei 392 kW liegen. Bisher ist für das Fahrzeug eine Hochvoltbatterie mit einem Energieinhalt von 48 kWh vorgesehen. Die Reichweite soll damit aus heutiger Sicht zwischen 150 km und 180 km liegen.

Während die Räder der Mercedes-Benz-Konzeptstudie über Gelenkwellen angetrieben werden, integriert Michelin im „Active Wheel“ E-Motor und Getriebe in eine Einheit. Dabei werden neben einem 30 kW starken Elektromotor das Getriebe und weitere Fahrwerkskomponenten im Rad untergebracht. Dazu gehören die Bremsscheibe, der Bremssattel, eine aktive, elektromechanische Feder-Dämpfer-Einheit sowie eine zusätzliche mechanische Fahrwerksfeder.

#### Achsantrieb mit Differenzial

Mitsubishi strebt zurzeit die Serieneinführung eines rein elektrischen Fahrzeuges an. Angetrieben wird der 4-sitzige „MiEV“ von einer permanent magnetisierten Synchronmaschine, die 47 kW leistet. Der Antrieb erfolgt über ein Achsgetriebe und das Differenzial auf die Hinterräder des Fahrzeugs. Die Höchstgeschwindigkeit wird mit 130 km/h angegeben, die Reichweite soll bei 144 km im EU-Fahrzyklus liegen.

Weitere Beispiele für elektrische Achsantriebe mit Übersetzungsstufe und Differenzial sind der Lexus RX 450 h, der an der Vorderachse über einen Hybridantrieb und an der Hinterachse über einen E-Motor mit 50 kW angetrieben wird, oder der bereits in Serie produzierte Tesla Roadster, der als reines Batteriefahrzeug über zwei 168 kW starke E-Motoren

verfügt, die über Planetengetriebe die Räder der Hinterachse antreiben.

#### Querverteilung der Momente (ohne Elektroantrieb)

Erste kupplungsbasierte Systeme wurden im Mitsubishi Lancer Evo vorgestellt. Im BMW X6 sowie im Audi S4 werden vergleichbare Systeme in Serie produziert. Die speziell entwickelten Achsgetriebe verfügen über zusätzliche Getriebeelemente und regelbare Kupplungen zur aktiven Drehmomentverteilung zwischen den Rädern.



Bild 1 Hinterachsdifferenzial des BMW X6

Mit diesem System werden die Fahrdynamik als auch die Fahrsicherheit erhöht. Mechatronische Systeme mit elektrischem Aktor und mechanischer Verteilung der Drehmomente sind nur im Konzeptstadium bekannt und wurden bislang nicht in Hardware realisiert. Auch der Einsatz als aktives System, um beispielsweise Notausweichmanöver durchzuführen, wurde bisher nicht angedacht. Das Hauptaugenmerk lag bisher auf den Aspekten Fahrdynamik und Fahrspaß.

## Das aktive eDifferenzial

### Grundprinzip

Zur Beschreibung der Funktion des aktiven Differenzials soll im Folgenden zunächst ein herkömmliches, einfaches Kegelraddifferenzial betrachtet werden. Durch die vorgegebenen kinematischen Bedingungen entspricht das arithmetische Mittel

der Raddrehzahlen der Achsantriebsdrehzahl. Bei Kurvenfahrt wird die Differenzdrehzahl an den Rädern durch eine Drehbewegung des Ausgleichskegelrades im Differenzial kompensiert. Durch dieses Ausgleichskegelrad wird auch das Drehmoment (bei Vernachlässigung des Sperrgrades) gleichmäßig auf beide Räder aufgeteilt. Die Aufteilung kann durch einen Waagebalken versinnbildlicht werden, der durch das Ausgleichsrad dargestellt wird und dafür sorgt, dass an den beiden Abtriebskegelrädern des Differenzials gleiche Umfangskräfte und damit gleiche Drehmomente anliegen.

Würde man die Drehbewegung des Ausgleichskegelrades, wie in Bild 2 dargestellt, direkt mit einem Aktuator koppeln, so würde dieser durch die Ausgleichsbewegung angetrieben werden. Umgekehrt könnte durch die Vorgabe einer Drehzahl am Aktuator eine Ausgleichsbewegung am Ausgleichskegelrad erzwungen und damit eine Differenzdrehzahl zwischen den Rädern erzeugt werden. Da der Waagebalken durch das Antriebsmoment des Aktuators von außen verstimmt wird, ändert sich auch die Drehmomentaufteilung im Differenzial. Damit wäre der gewünschte Effekt erreicht, theoretisch beliebige Drehmomente und Drehzahlen an den Rädern vorgeben zu können.

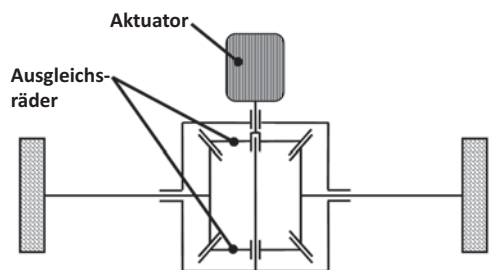


Bild 2 Prinzip des aktiven Differenzials

Ein wesentlicher Vorteil des so aufgebauten aktiven Differenzials besteht darin, dass keine zusätzlichen Baugruppen erforderlich sind, da die Drehmomentverteilung direkt im Differenzial beeinflusst wird. Der Aktuator steht bei gleich schnell drehenden Rädern still und stützt nur bei aktiver Umverteilung Drehmomente ab.

Nachteilig an dem in Bild 2 gezeigten Aufbau sind die geringe Übersetzung, die zwischen dem Aktuatormoment und dem Differenzmoment liegt, sowie die Mitdrehung des Aktuators um die Radachsen. Um die Vorteile ohne die genannten Nachteile nut-

zen zu können, wurde eine deutlich abgeänderte Differenzialbauweise gewählt, die im Folgenden beschrieben wird.

## Prinzip der Drehmomentquerverteilung

Getriebe, wie in Bild 1 dargestellt, ermöglichen eine individuelle Drehmomentverteilung auf die Räder einer Antriebsachse. Durch unterschiedliche Umfangskräfte an den Rädern kann ein Giermoment um die Fahrzeughochachse erzeugt werden, womit die Fahrdynamik und die Fahrstabilität gezielt beeinflusst werden können. Im Unterschied zum ESP wird das Fahrzeug durch den Regeleingriff nicht gebremst. Diese sogenannten Torque-Vectoring-Getriebe, die an der Hinterachse eingesetzt werden, sind im Gegensatz zum heutigen ESP in der Lage, Fahrsituationen, in denen das Fahrzeug über die Vorderräder schiebt (Untersteuern), effektiv zu vermeiden und so die Fahrzeugsicherheit und -dynamik zu erhöhen.

Die Regelung der Radmomente erfolgt grundsätzlich über eine Drehzahlregelung der Räder. Die aufgeprägten Schlupfverhältnisse erzeugen das Differenzmoment zwischen den Rädern. Bild 3 zeigt den Zusammenhang zwischen Raddrehzahl und Antriebsmoment auf. Zunächst wird bei Zustand A von einer Geradeausfahrt ausgegangen, bei der beide Hinterräder gleich schnell drehen und mit gleichem Drehmoment antreiben.

Der Antriebsschlupf ist an beiden Rädern gleich groß. Nun soll das linke Rad abgebremst und das rechte Rad gleichzeitig so stark angetrieben werden, dass das Antriebsmoment am Fahrzeug insgesamt konstant bleibt. Zustand B zeigt den Zusammenhang zwischen dem Bremsmoment des linken Rades und dem dazu nötigen Bremmschlupf. Um trotz des Bremsmoments am linken Hinterrad die Antriebskraft konstant zu halten, ist am rechten Rad das Antriebsmoment zu erhöhen auf Zustand C. Bild 3 zeigt den dazu nötigen Betriebspunkt auf der Schlupfkurve des rechten Rades.

Aus den Betriebspunkten der beiden Schlupfkurven kann gefolgert werden, dass eine Verteilung des Antriebsmoments auf der antreibenden Achse eine Änderung der Raddrehzahlen, und umgekehrt, bedingt. Um das für die Torque-Vectoring-Funktion zu generierende Differenzmoment zu erzielen, ist also eine Beschleunigung des einen Rades gegenüber dem anderen notwendig.

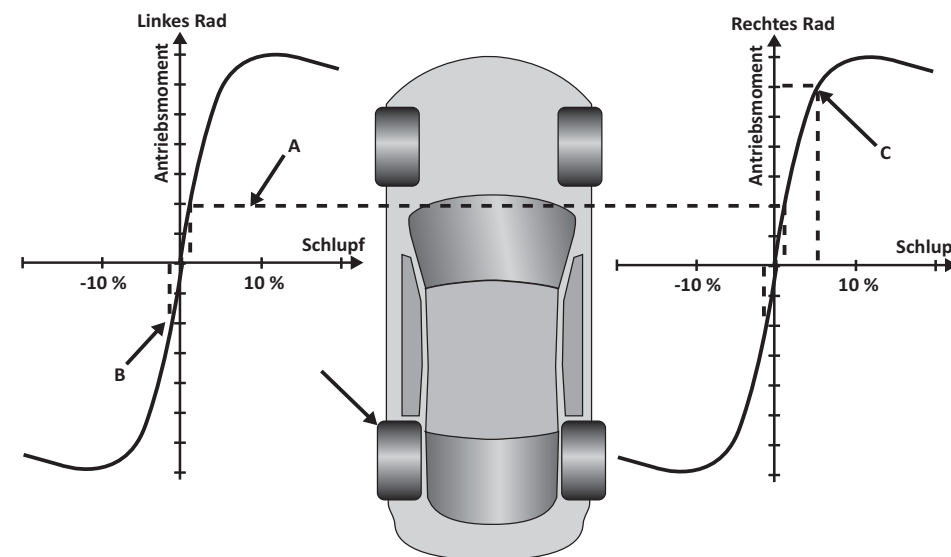


Bild 3 Zusammenhang zwischen Radschlupf und Antriebsmoment

## Der Aufbau des aktiven eDifferenzials

### Überblick

Das elektrische, aktive Differenzial unterscheidet sich grundlegend von heutigen Achsdifferenzialen. Ein Achsgetriebe in der nachfolgend beschriebenen Ausführung ist bisher nicht bekannt. Auch die im dazu gehörenden Getriebe gewählte Kombination der Umlaufgetriebe ist neu. Für die konstruktive Umsetzung des aktiven eDifferenzials ist eine Vielzahl an Getriebeaufbauten möglich, die je nach Anwendungsfall spezifische Vorteile bieten können.

Das in Bild 4 dargestellte Achsgetriebe wurde für ein Mittelklasse-

fahrzeug konzipiert, bei dem beide Achsen über elektrische Traktionsmaschinen angetrieben werden und jeweils eine elektrische Steuermaschine die Differenzmomente zwischen den Rädern der jeweiligen Achse erzeugt. Das aktive Differenzial kann grundsätzlich unterteilt werden in die Baugruppen „Achsumübersetzung“, „Differenzial“ und

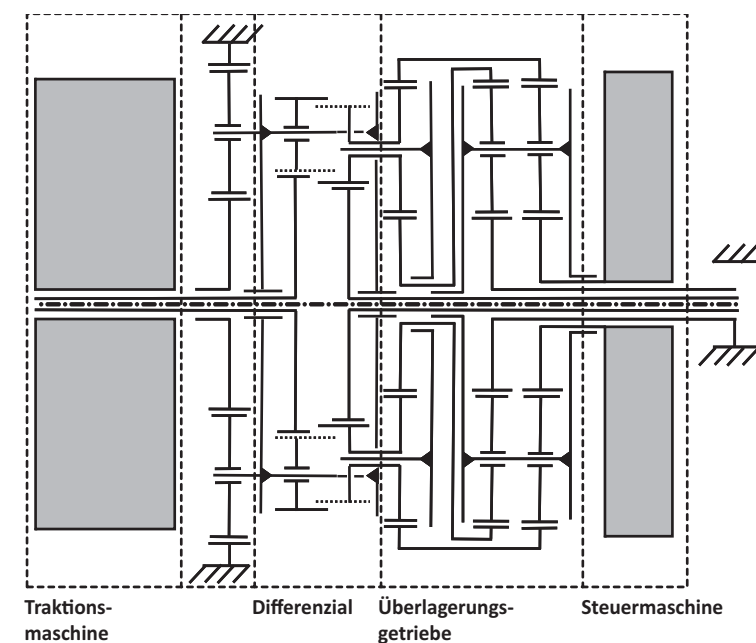


Bild 4 Aufbau des aktiven eDifferenzials

„Überlagerungsgetriebe“. Die Baugruppen sind dabei zusammen mit der Traktions- und der Steuermaschine koaxial zu den Abtriebswellen des Differenzials angeordnet.

## Das Differenzial

Bei nicht aktivierter Regelung übernimmt ein Stirnraddifferenzial die gleichmäßige Verteilung der Radmomente [1]. Dieses kann, wie Bild 4 zeigt, aus einem Planetengetriebe mit zwei Sonnen und drei jeweils miteinander kämmenden Planetenpaaren bestehen, aber auch andere Differenzialkonstruktionen sind generell denkbar. Die Antriebsleistung der Traktionsmaschine wird dem Getriebe über die Achsübersetzung, die als Planetengetriebe ausgeführt sein kann, zugeführt. Die Stege des Achsübersetzungsgetriebes und des Differenzials sind miteinander verbunden. Die Planeten des Differenzials kämmen mit den beiden Sonnen, die jeweils mit einem Rad verbunden sind. Von elementarer Bedeutung ist, dass Stirnraddifferenziale in der beschriebenen Bauform mit weiteren Planetengetrieben kombinierbar sind. Die drei Paare der Ausgleichsplaneten des Stirnraddifferenzials erfüllen prinzipiell die Funktion der Ausgleichskegelräder beim Kegelraddifferenzial. Sie gleichen die Drehzahldifferenzen zwischen den Rädern aus und wälzen dabei gegeneinander ab.

Umgekehrt kann, nach dem Prinzip aus Bild 2, eine Differenzdrehzahl zwischen den Rädern erzeugt werden, indem eine Relativbewegung der Planetenpaare im Stirnraddifferenzial erzwungen wird. Diese Aufgabe übernimmt im vorgestellten Getriebekonzept das Überlagerungsgetriebe. Bei Geradeausfahrt ist keine Relativdrehzahl zwischen den Ausgleichsplaneten des Stirnraddifferenzial vorhanden.

## Das Überlagerungsgetriebe

Das Überlagerungsgetriebe besteht aus drei Planetengetrieben, von denen zwei identisch aufgebaut sind. Das linke Planetengetriebe im Überlagerungsgetriebe in Bild 4 teilt sich mit dem Differenzial den Steg und einen Planeten. Diese Bauart, die eine vergleichsweise einfache Integration eines zusätzlichen Planetengetriebes zulässt, bezeichnet man üblicherweise als „reduziertes Koppelgetriebe“. Das Koppelgetriebe dient zur Unterbrechung der hohen Radmomente,

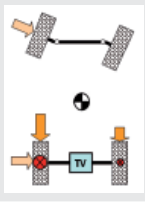
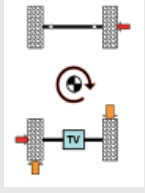
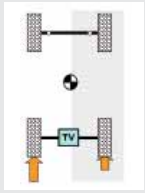
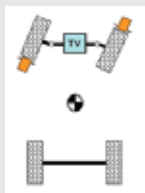
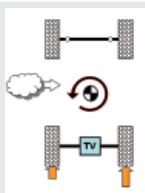
die bei einer Querverteilung erzeugt werden, auf kleinere Momente für die Steuermaschine. Wird die Sonne relativ zum Hohlrad verdreht, wird eine Relativdrehzahl an den Planeten des Stirnraddifferenzials erzwungen, wodurch eine Drehzahldifferenz an den Rädern entsteht. Die Vorgabe einer Drehzahl am radial inneren Planeten des Stirnraddifferenzials entspricht der Vorgabe einer Drehzahl am Ausgleichskegelrad nach Bild 2.

Die beiden baugleichen Teilgetriebe des Überlagerungsgetriebes teilen sich einen gemeinsamen Steg. Die Sonne des einen Planetengetriebes ist gehäusefest, die andere mit der Steuermaschine verbunden. Das Hohlrad des einen Planetengetriebes ist mit der Sonne des Koppelgetriebes verbunden, das Hohlrad des zweiten Planetengetriebes mit dem Hohlrad des Koppelgetriebes.

Wird an der Steuermaschine ein Moment erzeugt, verdreht das Überlagerungsgetriebe die beiden Hohlräder der baugleichen Planetengetriebe zueinander, d. h. an der Sonne des Koppelgetriebes wird bezüglich des Hohlrades ein entgegen gerichtetes Moment aufgebracht. Bei stillstehendem Steuermotor ist eine Ausgleichsbewegung des Differenzialplaneten nicht möglich, da in diesem Fall die Sonne und das Hohlrad des Koppelgetriebes gleich schnell drehen. In der Folge sind zudem die Drehzahlen der Räder gleich. Wird das Überlagerungsgetriebe nicht betätigt, wird also kein Differenzmoment aufgebracht, die Radmomente sind identisch (Getriebeverluste vernachlässigt) und die Steuermaschine stützt kein Drehmoment ab. Die Steuermaschine ist auch bei Kurvenfahrt passiv, wo sie ohne Last umläuft. Wird das Getriebe (z. B. im Fehlerfall) deaktiviert, verhält es sich wie ein konventionelles Differenzial mit einem leicht erhöhten Sperrwert.

## Funktionsumfang des aktiven eDifferenzials

Ziel der Entwicklung des Systems ist es, die funktionalen Vorteile des Raddirektantriebs mit den Vorzügen des Achsantriebs über ein Differenzial zu verbinden, ohne entsprechende Nachteile in Kauf zu nehmen. Dabei führt insbesondere die Realisierung von einer Querdrehmomentverteilung zu einer Reihe von entscheidenden Vorteilen.

	<p><b>Effizienz und Reichweite</b></p> <p>Durch die radselektive Drehmomentzuweisung lässt sich das Bremsmoment zur Rekuperation an der Antriebsachse erhöhen. Ist das Bremsmoment eines Rades z. B. wegen zu geringer Aufstandskräfte beschränkt (kurveninneres Rad), ist durch die Verteilung der Momente innerhalb einer Achse die Steigerung des Bremsmoments am anderen Rad noch möglich. Somit wird das volle Potenzial für eine Rekuperation genutzt, was die Effizienz und die Reichweite verbessert.</p>
	<p><b>Fahrdynamik</b></p> <p>Unterschiedliche Antriebs- bzw. Bremsmomente an den Rädern einer Achse führen zu einem Giermoment um die Hochachse des Fahrzeugs. Dieses Giermoment wird aktiv genutzt, um die Dynamik bei Dreh- und Einlenkbewegungen zu erhöhen. Das agilere Fahrverhalten resultiert nicht nur im gesteigerten Fahrspaß, sondern auch in einem Plus an Fahrsicherheit, beispielsweise im Fall von Ausweichmanövern oder beim Ausbrechen des Fahrzeugs.</p>
	<p><b>Traktion</b></p> <p>Auf unterschiedlich griffigen Belägen (<math>\mu</math>-split) erreicht die gewöhnliche, differenzialgesteuerte Antriebsachse nicht die maximale Traktion, da die Drehmomente beider Räder stets gleich sein müssen und hierbei das niedrigste Raddrehmoment maßgebend ist. Die radselektive Drehmomentzuweisung maximiert die Vortriebsmomente beider Räder und verhindert gleichzeitig das Durchdrehen einzelner Räder.</p>
	<p><b>Lenkunterstützung</b></p> <p>Verschiedene Vortriebskräfte an den Rädern einer gelenkten Achse erzeugen, bei entsprechender Auslegung der Achskinematik, Drehmomente um deren Lenkdrehachse. Somit lässt sich durch eine gezielte Querverteilung der Momente ein Radeinschlag bzw. eine Lenkunterstützung verwirklichen. Ziel ist hiermit andere Lenkhilfesysteme zu ersetzen und auch Notfallausweichmanöver automatisch gestalten zu können.</p>
	<p><b>Komfort</b></p> <p>Mit Hilfe der dynamischen Querverteilung der Momente können Störeffekte wie Seitenwind einflüsse und die Empfindlichkeit für Spurrillen ausgeglichen werden. Des Weiteren lässt sich über die Erzeugung entsprechender Giermomente ein immer gleiches Fahrverhalten einstellen, beispielsweise mit einem immer gleichen Kurvenradius bei vorgegebenem Lenkwinkel, unabhängig vom Beladungszustand oder der Fahrzeuggeschwindigkeit, soweit dies physikalisch möglich ist.</p>

Um den genannten Anforderungen zu entsprechen, wurde das in Bild 4 beschriebene Getriebekonzept entwickelt. Auch der direkte Radantrieb kann die gewünschte Funktion der Querverteilung der Momente abbilden, im Vergleich besticht der innovative Schaeffler Achsantrieb jedoch mit den im Folgenden beschriebenen Merkmalen.

Lediglich eine Traktionsmaschine erzeugt die Antriebsleistung, entsprechend wird nur eine Leistungselektronik benötigt. Die Optimierung des Elektromotors hinsichtlich Wirkungsgrad und/oder Gewicht wird durch die Wahl einer geeigneten Achsübersetzung begünstigt.

Durch die fahrzeuggeste Anbindung des Antriebsaggregates und den Antrieb der Räder über Seiten-

wellen erhöhen sich die ungefederten Massen im Gegensatz zum Radnabenmotor nicht, was sich vorteilhaft auf den Fahrkomfort und die Fahrdynamik auswirkt.

Die Steuermaschine und das Überlagerungsgetriebe können die gewünschten Differenzmomente von in etwa 1000 Nm jederzeit darstellen. Beim Raddirektantrieb sind die Leistungen der jeweiligen E-Motoren entsprechend zu skalieren (z. B. 80 kW je Rad, um übliche Differenzmomenten in üblichen Geschwindigkeitsbereichen darstellen zu können).

Um über eine Querverteilung der Drehmomente verfügen zu können, ist deutlich weniger elektrische Systemleistung erforderlich als bei Antriebs-

systemen mit je einem E-Motor pro Rad. Die Summe der Antriebsmomente an den Rädern ist unabhängig vom Überlagerungssystem, d. h. vom Differenzmoment zwischen den Rädern. Folglich ist eine vergleichsweise einfachere Regelung möglich.

Bei zwei Radnabenmotoren kann die gedrosselte Leistung eines Motors nicht für das zweite, nicht gedrosselte Rad genutzt werden, beim Überlagerungssystem ist diese Funktion möglich. Die E-Motoren können hinsichtlich ihrer Aufgabe getrennt optimiert werden (z. B. Traktionsmaschine für hohen Wirkungsgrad, Steuermaschine für exakte Regelbarkeit).

Der Einsatz des innovativen Achsgetriebes ist sowohl in rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen als auch in Hybrid-Fahrzeugen oder in Kombination mit einem Range Extender denkbar. Weiter ist die Ausführung des Getriebes ohne Steuermaschine und ohne Überlagerungsgetriebe als konventioneller Achsantrieb ohne weitere Modifikationen möglich.

Der Aufbau des Antriebstrangs für das Versuchsfahrzeug ist derart vorgesehen, dass möglichst große Freiheiten im Hinblick auf die Erprobung der Drehmomentverteilung und insgesamt eine große Variabilität erhalten bleiben. Hierzu wird der Achsantrieb mit aktivem eDifferenzial, wie in Bild 5 dargestellt, sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse eingebaut. Auf diese Weise kann das Fahrzeug sowohl als front-, heck- als auch als allradgetriebene Variante getestet und verglichen werden. Ferner ist die Gegenüberstellung zu einem konventionellen Antrieb ohne Überlagerungsgetriebe darstellbar.

Als Plattform für das Versuchsfahrzeug wurde ein Skoda Octavia der aktuellen Baureihe ge-



Bild 5 Fahrzeugaufbau

wählt. Dieser ist als Allradfahrzeug erhältlich, was den Umbau wesentlich vereinfacht. Ebenso besitzt er durch das Platzangebot und die Zulaufung Vorteile gegenüber Fahrzeugen der gleichen Klasse.

In den letzten Jahren ist eine Vielzahl an E-Fahrzeug-Prototypen auf Basis von Kleinwagen entstanden. Kompakt- bzw. Mittelklassefahrzeuge, die auch als Familienfahrzeug genutzt werden können, wurden dagegen bisher nicht als E-Fahrzeug ausgeführt. Auch dies stellt eine Neuheit im vorliegenden Projekt dar.

Um das Fahrzeug unter realitäts- und kundennahen Bedingungen testen zu können, wird seitens Schaeffler ein Tankstellennetz mit drei Testtankstellen im Großraum Nürnberg aufgebaut. Zunächst soll das Fahrzeug bis ca. 2012 als Test- und Kurierfahrzeug bei Schaeffler eingesetzt werden. Danach wird es im öffentlichen Regionalbetrieb zur Verfügung gestellt.

## Technologische Risiken

### Überblick

Neu entwickelte Systeme im Automobilbereich müssen von Beginn an hohen Ansprüchen genügen. Um die Akzeptanz der Kunden zu gewinnen, werden eine unauffällige Akustik sowie die möglichst unauffällige Nutzung aller Systemvorteile, ohne Einschränkung in der Funktion oder im Komfort, erwartet. Dabei sind niedrige Betriebs- und Wartungskosten zu erzielen, eine hohe Fahrsicherheit und nicht zuletzt sollte auch der Fahrspaß nicht auf der Strecke bleiben. Weiterhin sind die Sicherheitsanforderungen des Gesetzgebers einzuhalten. Wichtig für die Hersteller sind, neben der generellen Konkurrenzfähigkeit des Produkts, geringe Herstellkosten, die Möglichkeit der Fertigung mit gleichbleibender Qualität und ein hoher Reifegrad bei SOP.

Die Entwicklung des Antriebskonzepts birgt daher in mehrerlei Hinsicht ein erhebliches technologisches Risiko. Insgesamt liegt das Risiko in der Neuartigkeit des Gesamtsystems, wobei für jede Systemkomponente eigene Herausforderungen formulierbar sind.

## Getriebekonzept und -aufbau

Der in Bild 4 dargestellte Getriebeaufbau wurde gemeinsam von Schaeffler und der FZG erarbeitet und wird in Hardware als Funktionsträger für das Testfahrzeug ausgeführt. Im Hinblick auf eine Serienproduktion lässt das bisherige Konzept wegen der Teileanzahl, der Baugröße und der Komplexität im Aufbau deutliches Verbesserungspotenzial erkennen. Die finale Lösung soll einfacher, kostengünstiger, kleiner und leichter sein. Erfahrungsgemäß sind entsprechend der Erkenntnisse, die während des Projekts gewonnen werden, mehrere Optimierungsschleifen durchzuführen, um beispielsweise die idealen Übersetzungen im Achsgetriebe und Überlagerungsgetriebe zu finden. Dies kann wiederum zu wesentlichen Änderungen im Aufbau bis hin zur Überarbeitung des Konzepts führen, das im Grundsätzlichen aber immer dem Schema aus Bild 4 entsprechen wird.

### Mechanik

Im Grundlegenden ist der mechanische Aufbau überschaubar, wurde bislang jedoch in dieser oder ähnlicher Form noch nicht realisiert. Wie in Bild 4 ersichtlich, weist das Getriebe eine Vielzahl an Zahneingriffen auf, wobei sich nicht jeder dieser Zahneingriffe im Hauptleistungsfluss befindet, und infolgedessen den Wirkungsgrad verschlechtert.

Vor allem die Komponenten der Achsübersetzung müssen einen möglichst hohen Wirkungsgrad bei günstiger Akustik über dem gesamten Betriebsbereich aufweisen, was insbesondere bei batteriebetriebenen Fahrzeugen sehr anspruchsvoll ist, deren Gesamtgeräuschpegel niedriger ist als bei konventionellen Fahrzeugen. Hierzu sind verlustarme Verzahnungen zu entwickeln, die über dem Zahneingriffsgebiet nur geringe Gleitanteile zeigen, gleichzeitig jedoch mit möglichst konstanter Verzahnungssteifigkeit geringe Anregungen im gesamten Getriebe hervorrufen.

Für die Gesamtenergiebilanz spielt der Wirkungsgrad des Überlagerungsgetriebes, aufgrund der verhältnismäßig niedrigen Leistungsflüsse, eine eher untergeordnete Rolle. Es soll akustisch nicht wahrnehmbar und möglichst kostengünstig produzierbar sein. Entscheidend für die Querverteilung der Momente ist die möglichst spielarme Ausführung zusammen mit dem Differenzial. Bei hochdynamischen Regelungen und schnellen Drehmomentrichtungswechseln an der Steuermaschine würde ein zu großes Spiel zu Stößen im Getriebe oder zu einer Verlangsamung im Ansprechverhalten führen. Des Weiteren ist die Regelung der Strecke bei der spielarmen Ausführung einfacher. Unklar hierbei ist, inwieweit eine spielarme Auslegung möglich und nötig ist, um einerseits Funktionsbe-

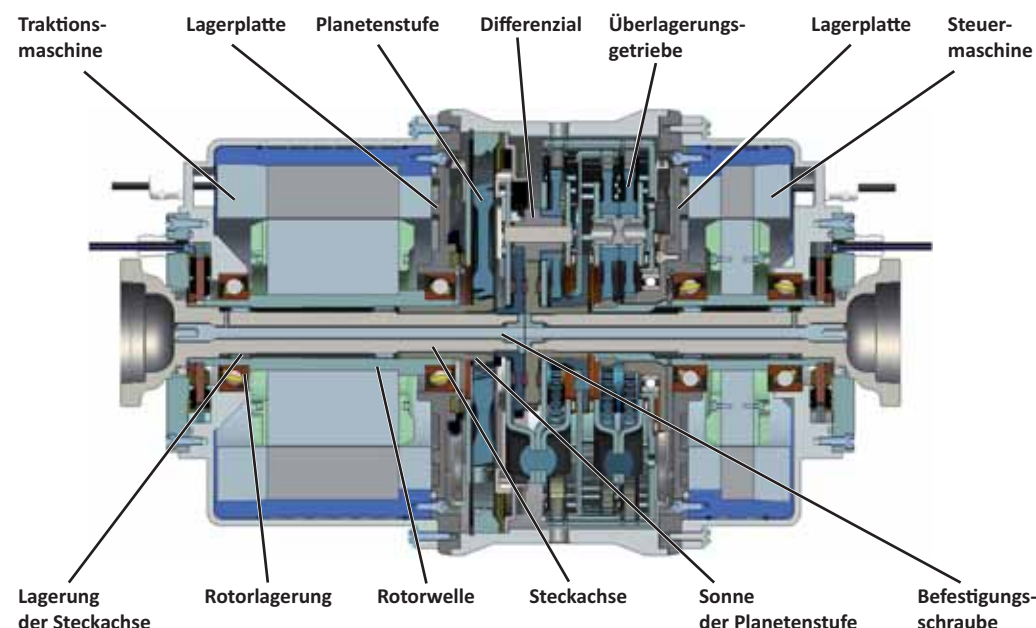


Bild 6 Die Konstruktion des Prototypen

eintrüchtigungen zu vermeiden und andererseits nicht zu unwirtschaftlich hohen Qualitätsanforderungen zu gelangen. Eine Dissertation an der FZG München zu genau diesem Thema ist vorgesehen.

Die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien ist erforderlich, um eine besonders wirtschaftliche Herstellung zu erlauben. Hinsichtlich der Produktfunktionalität müssen neuartige, innovative Schmierungskonzepte ausgearbeitet werden, die sowohl die Kühlung der Bauteile als auch deren Schmierung erlauben und dabei die Verluste so klein wie möglich halten.

## Elektrotechnik, Regelung und Software

Wie zu Beginn erläutert, sind je nach Fahrzustand verschiedene Regelungsstrategien für die Quer- und Längsverteilung der Momente möglich, die sinnvoll in Einklang zu bringen sind:

- Effizienz und Reichweite: Maximierung der Rekuperationsphasen
- Fahrdynamik und Fahrsicherheit
- Traktion
- Lenkunterstützung
- Komfortfunktionen

Bisher gibt es zwar Regelstrategien für konventionelle Antriebe mit Torque-Vectoring (BMW X6, Audi S4, Mitsubishi Lancer Evo), die über Kupplungsaktuatoren verfügen. Jedoch sind Ansteuerungen für Systeme mit E-Motoren kein bereits vorliegender Stand der Technik. Außerdem ist eine entwicklungsintensive Prioritätsregelung zwischen den oben genannten Regelstrategien zu erarbeiten.

Für den Kunden muss die Fahrzeugreaktion schlüssig, reproduzierbar und gut kontrollierbar sein. Das „Bremsgefühl“ des Fahrers muss unabhängig vom Grad der Rekuperation sein. Andere Fahrdynamikregelsysteme wie ABS oder ESP dürfen nicht beeinträchtigt werden. Hier gilt es die Sicherheitssysteme sinnvoll miteinander zu kombinieren.

Hinsichtlich der Elektrotechnik sind höhere Abtastraten der Sensoren gefordert, um bei der Ausregelung der Spurrillen- und Seitenwindempfindlichkeit in einem höheren Taktbereich arbeiten zu können als bei der Fahrzeugstabilisierung. Um exakte Rückschlüsse auf das zu stellende Differenzmoment an den Rädern zu ermöglichen, ist entweder eine Be-



Bild 7 Maße und Gewicht des Prototypen

rechnung der Radmomente anhand von Raddrehzahlen und hinterlegten Kennlinien denkbar, was angesichts der Unsicherheiten nachteilig scheint, oder eine direkte, drehmomentsensitive Aufnahme der benötigten Größen, die jedoch erst zu erarbeiten ist.

Weiterhin ist eine geeignete Traktionsmaschine mit den notwendigen Eckdaten zu entwickeln, die ideal mit dem Getriebe zusammenwirkt. Die Steuermaschine muss sich sehr dynamisch im Bereich niedriger Drehzahlen verhalten, jedoch kostengünstig sein und den Anforderungen an die Regelbarkeit des Getriebes genügen.

## Zusammenfassung

Das aktive eDifferenzial stellt ein Antriebskonzept dar, das die optimale Plattform für zukünftige Regelstrategien bilden könnte. Das Achsantriebsaggregat vereint den Achsantrieb mit einer intelligenten Querverteilung der Momente, bei Einsatz an beiden Achsen ist zudem eine zusätzliche Verteilung der Momente in Fahrzeuginnenrichtung realisierbar.

Schaeffler möchte mit diesem innovativen Ansatz nicht in den Kreis der Getriebehersteller aufsteigen. Technologien, die seitens Schaeffler generell bereitgestellt werden können, sind neben der eigentlichen Getriebebelagerung unter anderem Planetenträger und das bereits beschriebene Leichtbaudifferenzial. Zudem muss auch der Lieferant für Komponenten ein grundsätzliches Verständnis über Antriebstechnologie besitzen, um sinnvolle Entwicklungsarbeit für seine Komponenten leisten zu können und den Kunden so optimal zu unterstützen.

Eine weitere Motivation für die Umsetzung dieses Getriebes sind zukünftige Geschäftsfelder, die optimal die Technologien von Schaeffler als auch Continental vereinen. An dieser Stelle sei auf Regelstrategien verwiesen, die seitens Continental und der TU Darmstadt unter anderem in dem Projekt „Proreta“ verfolgt wurden. Im Rahmen dieses Projektes wurden automatische Brems- und Ausweichmanöver analysiert und in verbrennungsgetriebenen Fahrzeugen umgesetzt. Die Veröffentlichungen zu dieser Thematik trugen nicht unerheblich zu der Idee des aktiven eDifferenzials bei.

Abschließend sei angemerkt, dass das aktive eDifferenzial noch nicht als realer Prototyp, son-

dern lediglich als eine erste Konstruktion vorliegt (Bild 6, 7). Schaeffler befindet sich am Anfang einer Entwicklung, bei der auch aufgrund der technologischen Risiken nach leistungsstarken Entwicklungspartnern bzw. Kunden gesucht wird.

## Literatur

- [1] Biermann, T.; Smetana, T.: Schaeffler Leichtbaudifferenzial – eine Differenzialfamilie mit reduziertem Bauraum und Gewicht; 9. Schaeffler Kolloquium, 2010