

Zusammenfassung

In einem gemeinsamen Vorentwicklungsprojekt haben die Firmen Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG und die Schaeffler KG ein CO₂-Demonstrationsfahrzeug aufgebaut. In diesem Fahrzeug wurden neue, optimierte Komponenten in Antriebsstrang und Fahrwerk eingesetzt, um im Vergleich zum aktuellen Serienfahrzeug den Kraftstoffverbrauch im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) um ca. 10 % zu reduzieren. Die Einsparung teilt sich im Verhältnis 70:30 in den Einsatz energetisch optimierter Technologien und in die reine Reibungsreduzierung an Kontakten auf. Das CO₂-Demonstrationsfahrzeug wurde auf der Basis eines aktuellen Porsche Cayenne mit V8-Motorisierung realisiert, wobei Schaeffler die Auslegung und Verifizierung der Einzelkomponenten und Porsche die Systemabstimmung und Validierung im Gesamtfahrzeug oblag. Alle Einzelmaßnahmen wurden sowohl rechnerisch als auch experimentell abgesichert, die Gesamteinsparung in einem Gesamtfahrzeugmodell und in Fahrzeugmessungen überprüft.

Die Reduzierung der Verluste im Motor bewirkte im NEFZ eine Kraftstoffeinsparung von 5,8 %. Dabei leisteten die Modifikation der Ventilsteuerung VarioCam Plus durch eine elektrische Nockenwellenverstellung und eine optimierte, einlassseitige Schalttasse einen Beitrag von 4,1 %. Die abgesenk-

te Reibleistung im Ventil-, Riemen- und Kettentrieb mit Hilfe von Leichtbaumaßnahmen und beschichteten Motorenbauteile reduzierte den Gesamtkraftstoffverbrauch weitere 1,7 %.

Im Vorder- und Hinterachsdifferenzial wurden die Kegelrollenlager durch zweireihige Schrägkugellager ersetzt und somit der Kraftstoffverbrauch im NEFZ um insgesamt 1,1 % reduziert. Gegenüber dem Seriengetriebe nahm am Hinterachsgetriebe die Reibleistung um 42 %, am Vorderachsgetriebe um 35 %

Im Fahrwerk konnte durch den Einsatz reibungsoptimierter Radlager und durch den Ersatz eines hydraulischen durch einen elektrischen Wankstabilisator der Verbrauch im NEFZ um 3,2 % verringert werden. Die Einsparung am Rollenprüfstand ergibt sich durch den Entfall der Antriebsleistung der hydraulischen Pumpe bereits bei Geradeausfahrt, so dass bei Messungen in kundennäheren Fahrzyklen mit Kurven noch höhere Einsparungswerte zu erwarten sind.

In den nächsten Monaten werden am Demonstrationsfahrzeug noch weitere Optimierungen im Fahrwerk und Antrieb umgesetzt, die bisher noch nicht in die Messungen eingeflossen sind.

Zusammenarbeit Schaeffler und **Porsche**

Heute verfolgen die Techniker von beiden Firmen mit aller Konsequenz von Beginn an eine intensive Zusammenarbeit bei der Bewertung und Umsetzung von Ideen zur Entwicklung neuer Komponenten. Denn nur so lässt sich die Herausforderung



Bild 1 Das Demonstrationsfahrzeug

einer Zukunft bewältigen, die zügig weniger Schadstoff-Ausstoß, geringere CO₃-Emission und geringeren Verbrauch kategorisch fordert. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, dass diese Strategie zu ganz unkonventionellen Lösungen führen kann. Aber es ist in diesem sehr speziellen Fall auch nicht zu übersehen, dass bei einer so jungen und modernen Konstruktion, die der Porsche Cayenne nun einmal ist, der Fortschritt im Detail nur

kleine Schritte machen kann. Eine Senkung des Verbrauchs um ca. 10 % ist das Ergebnis von zahlreichen zum Teil recht tief greifenden Maßnahmen.

Gemeinsam wurden so neue Komponenten vorentwickelt, die in einem Demonstrationsfahrzeug auf Basis des aktuellen Porsche Cayenne untersucht wurden. Das Demonstrationsfahrzeug gibt sich durch die Aufschrift "Coancept-10 %" mit den Darstellungen der neuen Komponenten zu erken-

Hightech verstellt die Ventilzeiten Elektrische Nockenwellenverstellung und optimierte Ventilhubschaltung

Der erste Schritt der gemeinsamen Aufgabe, am Beispiel eines V8-Motors des Porsche Cayenne die Möglichkeiten einer Senkung des Verbrauchs und der CO₂-Emission zu demonstrieren, war eine Optimierung des in bisheriger Form schon sehr erfolgreichen VarioCam Plus-Systems. Zu diesem Zweck wur-

Hydraulisch schaltbarer Nockenwellenverstellung Tassenstößel mit der Ein- und Auslassseite optimierter Ladungsbewegung

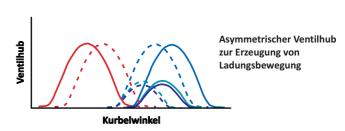


Bild 2 Optimiertes VarioCam Plus-System

de von den Technikern bei Schaeffler und Porsche die in der Serie befindliche hydraulische Nockenwellenverstellung durch ein elektrisches System ersetzt. Bei dieser Lösung verstellen sehr kompakte Elektromotoren die Ventilzeiten der Einlass- und der Auslassnockenwellen. Das dazu erforderliche hohe Drehmoment verdankt der kleine Motor einer hoch übersetzenden Kraftübertragung, die in der Lage ist, die Drehzahl um den Faktor 66:1 zu reduzieren und zugleich das Drehmoment des Elektromotors in diesem Maße anzuheben.

Gegenüber der herkömmlichen hydraulischen Lösung hat die elektrische Verstellung zwei Vorteile:

- Der Einsatz von Energie sinkt, weil die Motoren nur dann arbeiten, wenn eine Verstellung der Ventilsteuerzeiten tatsächlich erforderlich ist. Ferner sind hier dem Verstellwinkel theoretisch keine Grenzen mehr gesetzt. In der Praxis kann also ein größerer Verstellwinkel zum Einsatz kommen.
- Und außerdem wird eine schnellere Verstellung möglich.

Beide Fortschritte senken nicht nur den Verbrauch, denn zugleich wird auch die Kraftentfaltung des Verbrennungsmotors kultiviert.

Neben den Ventilsteuerzeiten spielt auch der Ventilhub auf der Einlassseite im Sparprogramm der Ingenieure eine entscheidende Rolle. Die Ventilstößel verfügen dazu über eine hydraulisch schaltbare Höhenverstellung. Bewirkt wird dieser, sowohl den

368 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 369 Kraftstoffverbrauch als auch die Emissionen zügelnde Effekt, durch zwei variable Größen:

Reibungsreduzierung im Antriebsstrang

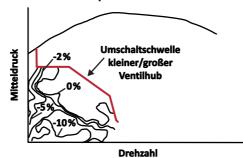
- Geringer Ventilhub und kürzere Öffnungszeiten reduzieren im Teillastbereich die Ladungswechselverluste und erhöhen die Geschwindigkeit der einströmenden Luft zur effektiveren Gemischaufbereitung.
- Des Weiteren macht das System, solange der Motor im unteren Teillastbereich arbeitet eine Einlass-Kanalabschaltung (zur Erzeugung einer hohen Ladungsbewegung) und im höheren Teillastbereich eine ungleich starke Öffnung der beiden Einlassventile eines jeden Zylinders möglich.

Diese trickreichen Maßnahmen lösen in jedem Brennraum einen kleinen Tornado aus, der ein besonders homogenes und zündwilliges Benzin-Luft-Gemisch entstehen lässt, das auch bei geringer Last sehr effiziente Arbeitstakte garantiert.

Der Fortschritt durch das verbesserte VarioCam Plus liegt im Teillastbereich (Bild 3). Die Maßnahmen Ventilsteuerzeitverstellung, Ventilhubverstellung und Ladungsbewegung senken nach aktuellen Ergebnissen den für den NEFZ berechneten Verbrauch um 4,1 %.

Eine sehr aufschlussreiche Grafik zeigt auch die in Zukunft mögliche neue Beschaffenheit der Ventilstößel (Bild 4). Sie könnte nicht mehr rund sein und einer Tasse entsprechen, sondern so geformt sein,

Verbrauchsverbesserung im Vergleich VarioCam Plus zu VarioCam Plus optimiert



ild 3 Verbrauchsverbesserung im Kennfeld mit optimiertem VarioCam Plus

dass nur dort wo eine Funktion erfüllt wird, Kontaktflächen am Stößel vorhanden sind.

Abgesenkte Reibleistung bei den internen Antriebssystemen des Motors

Ihr Durchmesser der Tassen ist im letzten Jahrzehnt deutlich geschrumpft, und zusätzlich durch das neue Design könnte die bewegte Masse auf

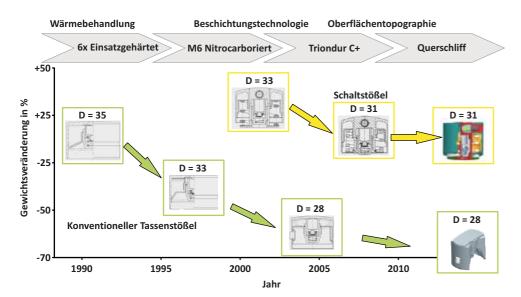


Bild 4 Maßnahmen Ventiltrieb

Antriebsmoment der Ventilsteuerung an einer Schleppattrappe (bei T_{δ_i} - 90 °C)

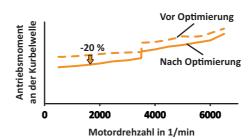


Bild 5 Reduzierung Antriebsmoment durch Maßnahmen am Ventiltrieb

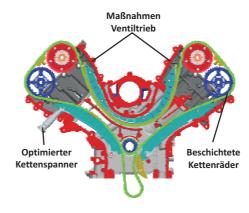


Bild 6 Maßnahmen Steuertrieb

nur 30 % reduziert werden. Für den optimalen Leichtlauf sind die aus Guss gefertigten Nockenwellen ebenso wie die von ihnen betätigten Stößel in ihren Oberflächen behandelt. Ihre Kontaktflächen sind nach einer intensiven Entwicklung heute mit TriondurC+, einem ca. 3 μ m dicken und bis zu 3000 HV harten DLC-Schichtsystem versehen, das

bei höchstem Verschleißwiderstand gleichzeitig die Reibung deutlich senken kann.
Ferner könnten in Zukunft die Ventile des
V8-Motors keinesfalls
kleiner aber deutlich
leichter werden.

Auch diese generelle Verringerung der bewegten Massen fördert nicht allein die Laufkultur und ein temperamentvolles DrehverKettenkraftmessung im Zugtrumm am Attrappenprüfstand

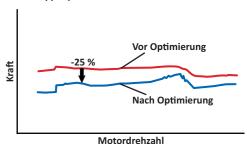


Bild 7 Reduzierung Kräfte im Steuertrieb

mögen des Motors, sondern sie zügelt auch den Verbrauch.

Auch hier ergibt sich eine klare Senkung der Reibmomente um mehr als 20 %.

Mit ähnlichem Feinschliff senkten die Techniker auch die notwendige Antriebsleistung für jenen Kettentrieb, der die vier Nockenwellen in Betrieb hält. Besser abgestimmte Kettenspanner und eine Beschichtung der Zahnräder senkt auch hier die Reibung.

Werden alle Maßnahmen im Steuer- und Ventiltrieb gleichzeitig verbaut, so lassen sich die Kräfte im Steuertrieb um ca. 25 % verringern.

Der Keilriemenantrieb an der Vorderseite der Motoren ist im Laufe der Entwicklung komplexer geworden, weil das Streben nach Fortschritt und Komfort die Zahl der anzutreibenden Aggregate wachsen ließ. Daraus resultiert ein steigender Kraftaufwand, dem es mit gezielten Maßnahmen entgegen zu wirken gilt.

Porsche und Schaeffler haben sich dieser Sache angenommen und die Aufgabe zur Verlustreduzierung

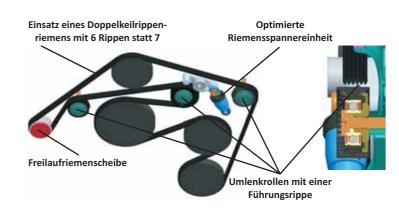


Bild 8 Maßnahmen Nebenaggregatetrieb

28

Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 371

28 Reibungsreduzierung im Antriebsstrang Reibungsreduzierung im Antriebsstrang

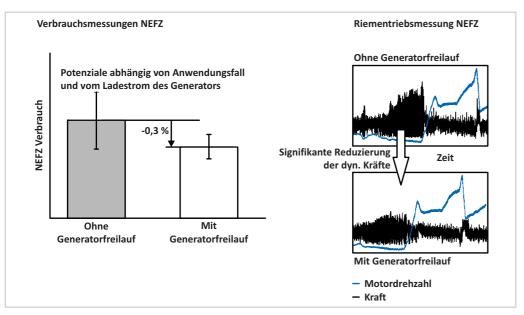


Bild 9 Verbrauchsverbesserung und Kräftereduzierung durch Generatorfreilauf

in der vorgestellten Arbeitsteilung mit einer ganzen Reihe von Maßnahmen gelöst. Effektivere Riemenspanner und der Einsatz eines schmaleren Riemens (sechs statt sieben Rillen) machen diese Kraftübertragung leichtgängiger. Und selbst an den Umlenkrollen ließ sich durch eine Beschränkung auf ein führendes Profil der Bedarf an Antriebskraft reduzieren.

Eine weitere wesentliche Rolle bei dem Streben nach der Senkung der erforderlichen Leistung für den Riementrieb spielt der Generator-Freilauf. Denn der erlaubt der Lichtmaschine ihre Drehzahl annähernd zu halten, trotz der ungleichförmigen Anregung insbesondere aus dem Kurbel- und dem Ventiltrieb. Durch die konstantere Drehzahl des Generators werden die dynamischen Kräfte im Riementrieb und damit die Reibung und die Verlustleistung im System reduziert. Das Potenzial zur Verlustreduzierung hängt aber erheblich von der jeweiligen Anwendung und vom aktuellen Ladestrom des Generators ab, da durch eine hohe Leistungsabgabe ein hohes Bremsmoment im Generator entsteht. Dies wiederum beeinflusst die Dynamik im Riementrieb.

Die Grafik zeigt sehr deutlich, wie hoch die Drehzahlschwankungen des Antriebs und damit die Kräfte im Riementrieb der Lichtmaschine im Stadtverkehr ohne den Generatorfreilauf sind. Das aus mehreren, sehr genauen Messungen im NEFZ gemittelte Ergebnis bei Anwendung eines Generator-

freilaufs ist 0,3 % Verbrauchsreduzierung. Hinzu kommt, dass die Reduzierung der Riemenbelastung durch den Freilauf die Lebensdauer des Keilriemens verlängern kann.

Maßnahmen an Vorderachs-/ Hinterachsgetrieben und Radnaben

Mit den Marken INA und FAG gehört die Schaeffler Gruppe zu den weltweit ausgewiesenen Experten im Bereich der Wälzlagertechnologie. Auch deshalb ist die Schaeffler Gruppe für Porsche ein perfekter Entwicklungspartner in Sachen Leichtlauf. Von Schaeffler kam dann auch die Botschaft, dass sich die Reibungsverluste in den Differenzialen an der Vorder- und an der Hinterachse deutlich senken lassen.

Die empfohlenen Maßnahmen sind der Ersatz der traditionellen Kegelrollenlager auf der Seite des Kardanantriebs durch Tandemkugellager und effizientere einreihige Kugellager links und rechts der Differenzialgehäuse für den Antrieb der Achswellen.

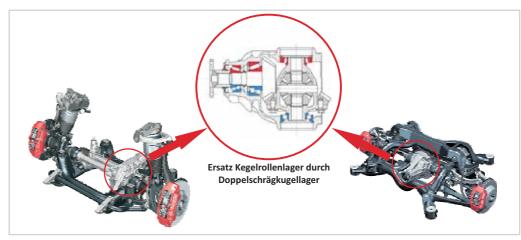


Bild 10 Maßnahmen Vorder- und Hinterachsgetriebe

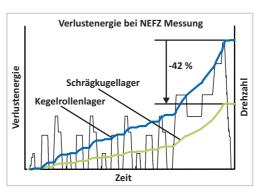


Bild 11 Reduzierung der Verlustenergie durch optimiertes Hinterachsgetriebe

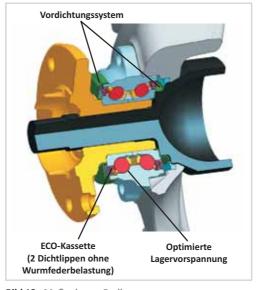


Bild 12 Maßnahmen Radlager

Das Ergebnis ist beachtlich: Die Reibungsverluste sinken an der Vorderachse um 35 %. Bei der höher belasteten Hinterachse sind es sogar 42 %.

Auch bei den Radlagern sorgte die Kooperation von Porsche und Schaeffler für Fortschritt und Leichtlauf.

Ursache des Fortschritts sind hier zum einen die optimierte Vorspannung der zweireihigen Kugellager und zum anderen die Neuauslegung des Dichtungssystems einschließlich Vordichtung. Ein Verzicht auf die Wurmfederbelastung durch moderne Dichtungen ohne Stahlfeder sowie die Reduzierung der Dichtungsüberdeckung führte zusammen

Messergebnisse vom Komponentenprüfstand

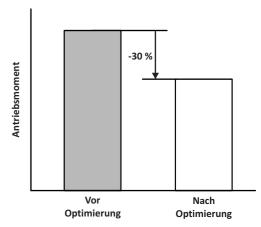


Bild 13 Reduzierung Verlustmoment mit optimierten Radlagern

28

28

Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 373

28

In der Gesamtbilanz liegt das Sparpotential im Verbrauch zwar weit unter 1 %. Da sich Energieeffizienz aus der Summe aller Einzelmaßnahmen ergibt, ist auch die Optimierung von auf den ersten Blick geringer Einzelpotenziale lohnenswert.

Elektrisch verstellbare Wankstabilisatoren

Die Anforderungen an einen sportlichen Geländewagen wie den Porsche Cayenne sind extrem unterschiedlich. Im Straßenverkehr soll er ohne Wankbewegungen die Kurven meistern. Im Gelände ist diese Zähmung unerwünscht: Starke Achsverschränkungen sichern hier Bodenkontakt und Traktion. Bisher ist Porsche dieser Herausforderung mit einer aktiven, hydraulischen Regelung der Stabilisatoren an beiden Achsen begegnet. Diese führt aber durch eine permanente Ölförderung der Hydraulikpumpe zu einer permanenten Pumpleistung und damit zu einem permanenten Verlust.

Aus der Erfahrung, dass sich einige hydraulische Systeme durch Elektrische effizient ersetzen las-

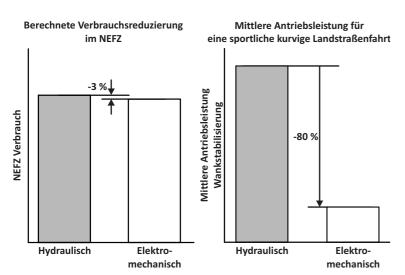


Bild 15 Reduzierung Verbrauch und Antriebsleistung durch optimierte Wankstabilisierung



Bild 14 Maßnahmen Wankstabilisierung

sen, entstand eine Lösung, welche bedarfsgerecht die benötigten Stabilisatormomente einstellt. Dabei nimmt der Elektromotor nur Leistung auf, wenn sich der Schwenkaktor verdreht und dabei ein Moment aufbaut. Beim Halten von Momenten müssen nur die relativ geringen elektrischen Widerstandsverluste ausgeglichen werden. Die Wankstabilisierung hat auf frisch asphaltierter Autobahn so gut wie nichts zu tun, auf Bundesstraßen

je nach Zustand oder Kurvenreichtum und Fahrweise des Fahrers deutlich mehr. Deshalb verfügt die elektromechanische Wankstabilisierung im Vergleich zu einer ungeregelten hydraulischen Variante mit permanenter Ölförderung über ein enorm großes Einsparpotenzial.

Diese elektrische Verstellung der Wankstabilisatoren senkt den Verbrauch im neuen europäischen Fahrzyklus um 3 %.

Die Bilanz in Sachen Verbrauch und Emission: 10 % weniger

Bild 16 mit dem Simulationsmodell zeigt die Vielfalt der Stellhebel, die eine Senkung des Verbrauchs ermöglichen. Alle Maßnahmen wurden vor ihrer Umsetzung in Prototypen und einer experimentellen Erprobung bezüglich ihres Beitrages zur Kraftstoffeinsparung rechnerisch in einem Gesamtfahrzeugmodell bewertet. In den jeweiligen Funktionsblöcken entlang des Antriebsstrangs sind

spezifische Simulationsmodelle für den einzelnen Fahrwiderstand abgebildet. Bei der arbeitsteiligen Vorgehensweise zur Vorentwicklung der Komponenten wurden auf den Komponentenprüfständen bei Schaeffler, auf gefeuerten Prüfstandsversuchen bei Porsche und in Fahrzeugversuchen Daten und Kennfelder ermittelt, die ein physikalisches Abbild des Funktionsverhaltens der Komponente darstellen. Mit diesen Daten wurde schon in einer frühen Entwicklungsphase das Simulationsprogramm abgestimmt und so Aussagen über den Einfluss auf den Verbrauch jeder Einzelmaßnahme möglich. Im weiteren Entwicklungsfortschritt wurden so diese Verbrauchsaussagen weiter präzisiert.

Die Gesamtbilanz dieses an einem bereits existenten Serienfahrzeug verwirklichten Sparprogramms zeigt momentan ca. 10 % bei der Summation der Einzelmaß-

nahmen. Doch damit ist das Ende der Fahnenstange nicht erreicht. Porsche und Schaeffler arbeiten mit wachsender Erfahrung daran, den Verbrauch weiter zu reduzieren. Der bisher erreichte Fortschritt geht zu 70 % auf das Konto energetisch optimierter Technologien und zu 30 % auf die Reibreduzierung in den Antriebssystemen.

Die Berechnungen auf Basis von Messungen auf den Prüfständen ha-

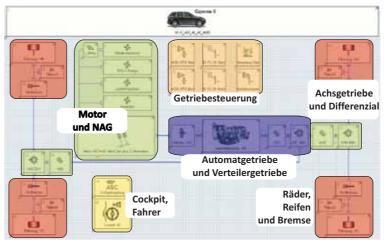


Bild 16 Simulationsmodell für NEFZ-Berechnung

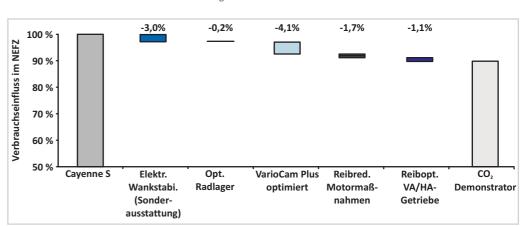


Bild 17 Ergebnisse NEFZ-Berechnung

28

374 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 375

28 Reibungsreduzierung im Antriebsstrang Reibungsreduzierung im Antriebsstrang

ben ergeben, dass beim aktuellem Stand der Vorentwicklung eine Senkung des Verbrauchs und mithin des CO₂-Ausstoßes von ca. 10 % möglich sind. Der Löwenanteil geht dabei auf das Konto einer optimierten Ventilsteuerung. Bemerkenswert sind ferner jene 3 % Ersparnis durch den elektrisch geregelten Wankstabilisator, die im von normierten Prüfstandszyklen abweichenden Alltagsbetrieb vermutlich übertroffen wird. Die Rückwirkungen der Maßnahmen untereinander kann das Verbrauchspotenzial der Einzelmaßnahmen beeinflussen.

Darüber hinaus werden Porsche und die Schaeffler intensiv daran arbeiten, weitere Potenziale erfolgreich zu heben und somit den Kraftstoffverbrauch und die CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Absicherung der Verbrauchsreduzierung im **Fahrzeugversuch**



Für eine Bewertung des Nutzens im Verhältnis zum Aufwand ist es wichtig die Poten-

Messungen

Ver-



Bild 18 Rollenprüfstandmessungen Fahrzeug

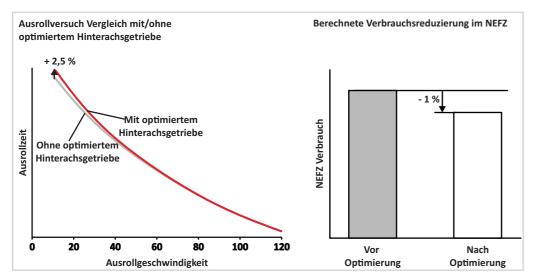


Bild 19 Ergebnisse Fahrzeugmessung

ziale der Einzelmaßnahmen auch im Fahrzeug nachzuweisen. Bei den Vorder- und Hinterachsgetrieben des Porsche Cayenne wurden die Getriebelager wie vorher schon aufgeführt durch optimierte Getriebelager ersetzt. Mit Ausrollversuchen mit Serienachsgetrieben und modifizierten Achsgetrieben auf dem Rollenprüfstand lässt sich dann das Einzelpotenzial dieser Getriebelager ermitteln.

Dabei läuft das Fahrzeug aus einer Geschwindigkeit von 120 h/km auf 5 h/km frei aus. Im Vergleich zwischen dem optimierten Hinterachsgetriebe zum Serienhinterachsgetriebe ist die Auslaufzeit um 2,5 % länger. Wird mit diesem Ergebnis der Funktionsblock Fahrwiderstand Hinterachsgetriebe des Simulationsmodells abgestimmt, so führt dies zu einer berechneten Verbrauchsverbesserung im NEFZ von ca. 1 %. Die vorher aus den Komponentenversuchen ermittelte Verbraucheinsparung in Summe von 1,1 % für Vorder- und Hinterachsgetriebe konnte so bestätigt werden.

Schlusswort

Die Bilanz dieser Zusammenarbeit von Porsche und Schaeffler am Beispiel dieses Cayenne öffnet einen weiten Blick in die Zukunft. Dabei zeigt das Zusammenspiel der dargestellten Maßnahmen zur Minimierung der Verluste, dass eine Verbrauchsreduzierung an einem konventionellen Antrieb mit Ottomotor auch ohne Hybridisierung im zweistelligen Prozentbereich möglich ist. Die vorgestellten Lösungen sind hierbei nicht auf ein Fahrzeug der SUV-Klasse beschränkt, sondern lassen sich auch auf andere Fahrzeugtypen und Antriebsarten übertragen.

Einzelne Verbesserungen, wie die leichtgängigeren Wälzlager, können dabei schnell in die Serie übernommen werden. Andere Komponenten müssen sich noch einer Kosten-/Nutzenanalyse stellen von der es abhängt, ob eine Serienentwicklung beginnen kann.

28

376 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 Schaeffler KOLLOQUIUM 2010 377