

1

LuK Kupplungssysteme und Torsionsdämpfer

Schlüsselemente für
effiziente Antriebsstränge

Matthias Zink
Markus Hausner



Einleitung

Bis vor wenigen Jahren war die Motorenentwicklung stark geprägt durch eine stetige Erhöhung des spezifischen Motormoments bei Dieselmotoren mit neuen Einspritztechnologien kombiniert mit Aufladung. Seit Beginn der 90er Jahre wurden dadurch die auf den Hubraum bezogenen möglichen Motormomente in etwa verdreifacht. Der typische Dieselmotor hatte dabei ein Hubvolumen von etwa zwei Litern und vier Zylinder, womit diese Aggregate heute in der Lage sind 450 Nm und mehr zu erzeugen [1]. Diese Evolution bei den Dieselmotoren steigerte in hohem Maße Fahrspaß und Effizienz. Damit auch bezüglich Komfort kompromislose Ergebnisse erzielt werden können, wuchsen in vergleichbarem Maße die Anforderungen an den Drehschwingungsdämpfer, der zum einen die hohen Momente übertragen und zum anderen die hohen Wechsellastmomente wirkungsvoll vom Antriebsstrang fern halten muss.

Bei der Wahl des Getriebes konnte sich der Kunde bisher im Wesentlichen zwischen einem Handschaltgetriebe oder einem Automatikgetriebe entscheiden, in vergleichsweise seltenen Fällen auch für ein CVT oder ein automatisiertes Handschaltgetriebe.

Seit einigen Jahren wächst nun weltweit der Druck bezüglich Verbrauchsreduzierung und Reduktion des CO₂-Ausstoßes, wobei Fahrspaß und Komfort erhalten bleiben sollen. Beispielsweise soll laut einer Studie [2] der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch in Deutschland bis 2030 von derzeit 7,6 Liter auf min-

destens 6,1 Liter abgesenkt werden (-20 %). Bei hohem Hybridisierungsgrad und beschleunigtem technologischem Wandel, beispielsweise bezüglich alternativen Kraftstoffen und Antrieben, wird sogar eine mögliche Absenkung auf 5,2 Liter vorausgesagt (-31 %).

Global führt dies zu einer Tendenz hin zu kleineren und leichteren Fahrzeugen. Für den Antriebsstrang sind massive Anstrengungen notwendig, um den Gesamtwirkungsgrad zu erhöhen.

Für den Verbrennungsmotor erfolgt dies durch weiteres Downsizing, wobei insbesondere bei Benzinmotoren verstärkt nun auch Aufladung zum Einsatz kommt. Konkret bedeutet dies, eine Drehmomentklasse mit möglichst kleinen Motoren abzudecken (Bild 2). 2,0 Liter Aggregate werden beispielsweise durch 1,5 Liter Aggregate mit vergleichbarem Drehmoment ersetzt. Insbesondere verzeichnen kleine Motoren bis 1,3 Liter Hubraum hohe Zuwächse, dagegen verringert sich der Anteil von Motoren mit über 1,8 Liter Hubraum.

Beim Antriebsstrang soll mit Automatisierung und Elektrifizierung erreicht werden, dass der Verbrennungsmotor bei optimalen Lasten und Drehzahlen betrieben werden kann.

Getriebevielfalt

Trotz der starken Bewegungen bei der Getriebe-technologie hat weltweit nach wie vor das Handschaltgetriebe das größte Produktionsvolumen.

Vorteile dieser Getriebe-technologie sind vergleichsweise geringe Kosten, ein hoher Wirkungsgrad und gute Fahrleistungen. Auch in den nächsten Jahren wird dies weltweit die dominante Getriebevariante bleiben und bis 2018 mit einer prognostizierten Steigerung um 11 Millionen Einheiten den höchsten absoluten Stückzahlzuwachs verzeichnen.

Gegenüber einem Handschaltgetriebe stellte

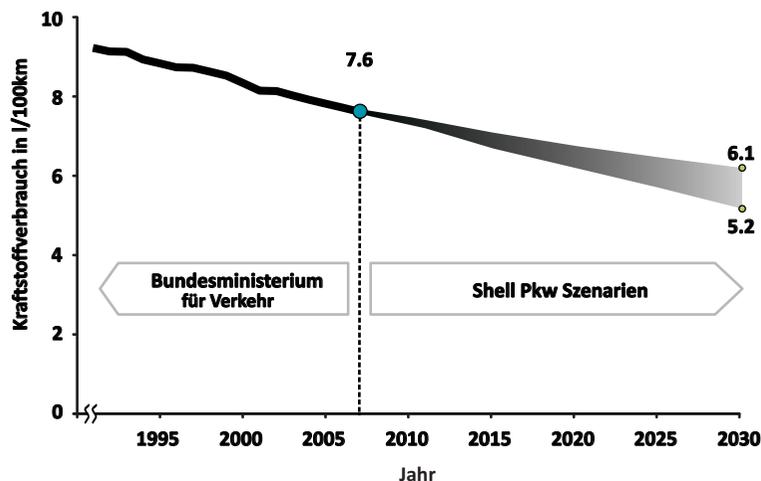


Bild 1 Prognose durchschnittlicher PKW Kraftstoffverbrauch in Deutschland

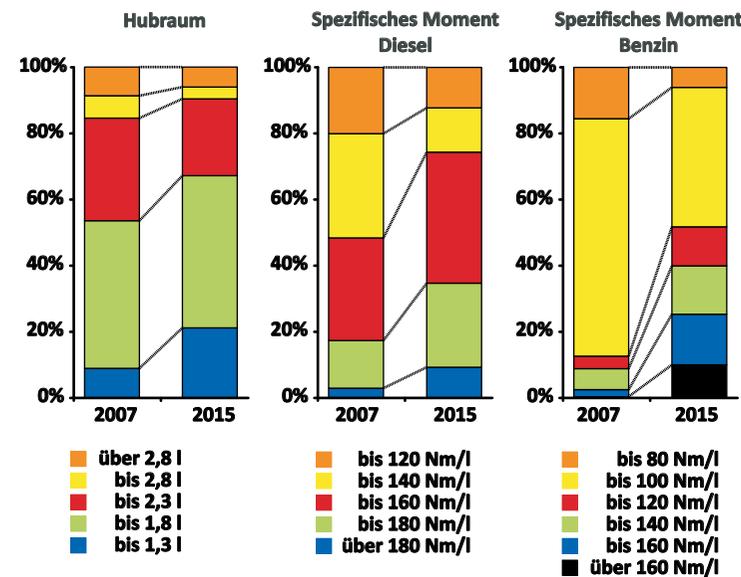


Bild 2 Motorenproduktion in Europa nach Hubraum und spezifischem Moment (Quelle: CSM)

bisher ein Automatikgetriebe flächendeckend die einzige Möglichkeit dar „kuppelfrei“ zu schalten. Dem hohen Komfort des Automatikgetriebes steht bisher ein vergleichsweise hoher Verbrauch gegenüber, da bei tiefen Drehzahlen die Wandlerüberbrückungskupplung aus Komfortgründen geöffnet werden muss. Gerade aber bei niedrigen Drehzah-

len können günstige Verbrauchswerte erzielt werden. Dadurch stellt insbesondere auch für Automatikgetriebe die Dämpfer-technologie eine Schlüsselrolle dar, da die Leistungsfähigkeit des Dämpfers maßgebend bestimmt, ab welcher Drehzahl schlupffrei und damit verbrauchsoptimiert gefahren werden kann. LuK hat bereits gezeigt, was in dieser Hinsicht heute technisch machbar ist. Im Vergleich mit einem konventionellen Dämpfer kann der Isolationsgrad mit Dop-

peldämpfer und Fliehkraftpendel (FKP) um mehr als 60 % gesteigert werden. Dadurch wird die Voraussetzung geschaffen, deutliche Verbrauchsvorteile zu realisieren [3].

Der Wunsch, die Vorteile des Handschaltgetriebes mit denen des Automatikgetriebes zu verbinden,

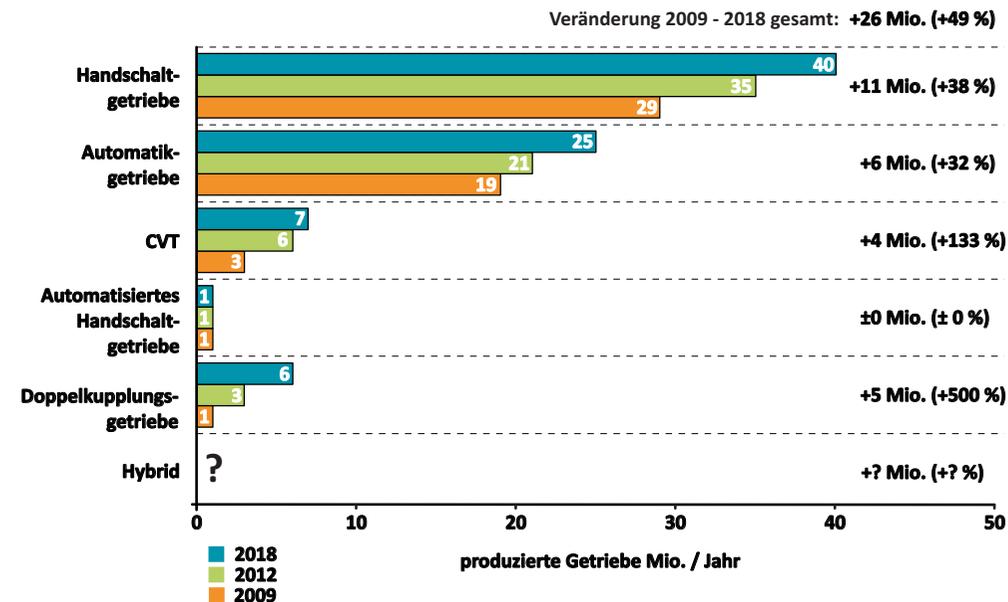


Bild 3 Weltweite Produktionszahlen nach Getriebetypen

fürte zu der Entwicklung von Doppelkupplungsgetrieben. Dieses neue Getriebekonzept zeigt, wie sich Fahrspaß, Verbrauch und Komfort beeindruckend kombinieren lassen. Hier werden in den nächsten Jahren die höchsten relativen Zuwächse realisiert.

Die weitere Automatisierung und Elektrifizierung findet in der Hybridisierung ihre konsequente Fortsetzung. Auch hier ist das Ziel, ohne Abstriche bei Komfort und Fahrspaß den Verbrauch durch Energiemanagement weiter zu senken. Wie stark sich die Marktdurchdringung und mit welchen Hybridkonzepten diese sich entwickeln wird, ist derzeit noch nicht vollständig absehbar. Sicher scheint jedoch, dass sich die Hybridisierung in den nächsten Jahren flächendeckend in den Modellreihen der Automobilhersteller etablieren wird.

Der Beitrag der Getriebe zu günstigen Verbrauchswerten ergibt sich zu einem Großteil durch die Schaffung der Grundlage, den Verbrennungsmotor bei geringem spezifischem Verbrauch zu betreiben. Hierzu nimmt die Anzahl der Gänge sowie die Spreizung zu. Eine Automatisierung sorgt dafür, dass immer der richtige Gang eingelegt ist. Beim Handschaltgetriebe ist Letzteres dem Fahrer überlassen, aber auch hier kann eine visuelle Schalterempfehlung positiv unterstützen, wenn der Fahrer sich in dem empfohlenen Gang wohl fühlt.

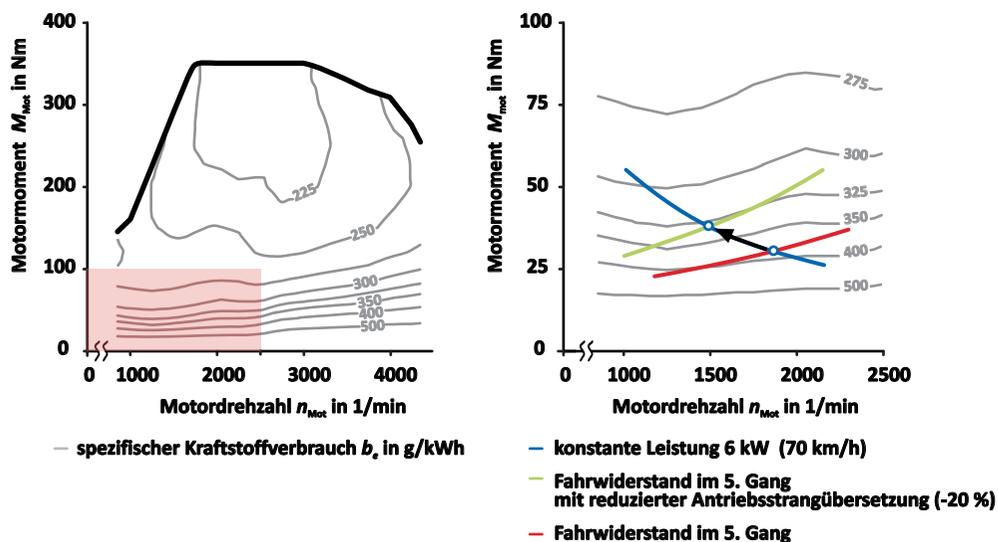


Bild 4 Verbrauchskennfeld 2,0 Liter Dieselmotor – Potenzial Verbrauchsreduzierung durch Drehzahlabenkung (Downspeeding)

Weitere Anstrengungen betreffen den mechanischen Wirkungsgrad. Geringere Reibung und Leichtbau führen jedoch auch zu einer höheren Sensitivität gegenüber Drehschwingungen, da weniger Masse bewegt und Schwingungen weniger gedämpft werden. Insbesondere bei Doppelkupplungsgetrieben steigen die Anforderungen hinsichtlich Drehungleichförmigkeit gegenüber einem Handschaltgetriebe deutlich an, da ein Teilgetriebe nicht im Kraftfluss liegt und daher anfällig für Rasselgeräusche ist. Daher muss gesamthaft berücksichtigt werden, dass diesbezügliche Optimierungen, je nach Ausgangslage, auch mit höheren Anforderungen an die Drehschwingungsdämpfer einhergehen.

Optimale Dämpfer für komfortables Fahren bei geringem Verbrauch

Unabhängig vom Getriebekonzept werden Fahrzeuge, abgesehen vom rein elektrischen Fahren, in absehbarer Zukunft nach wie vor verbrennungsmotorisch angetrieben. Das bedeutet, die grund-

sätzlichen Anforderungen an der Schnittstelle zwischen Motor und Getriebe sind für alle Getriebevarianten zunächst gleich. Neben einem Anfahrerelement und der Übertragung des mittleren Momentes müssen die Wechselmomente bedämpft werden. Dabei steigt die Anforderung an den Dämpfer mit höheren Momenten bei niedrigen Drehzahlen und Reduzierung der Zylinderzahl. Oder anders ausgedrückt: Die Anforderungen an den Dämpfer steigen bei der Zielstellung nach geringem Verbrauch, bei gleichbleibendem Fahrspaß und Komfort.

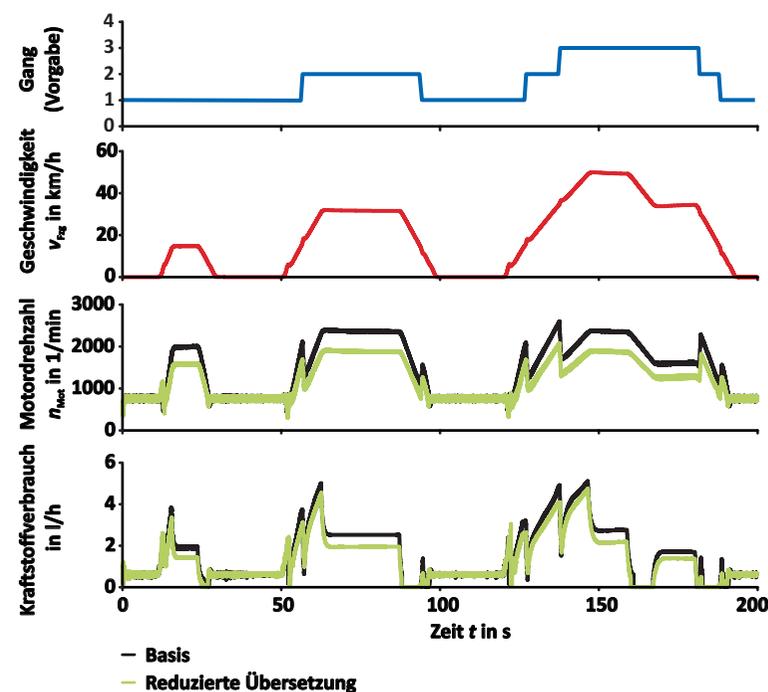


Bild 5 Auswirkungen von Downspeeding im NEFZ – Verbrauchssimulation (Stadtzyklus)

Verbrauchsreduktion durch optimierte Dämpfer

Ein Drehschwingungsdämpfer an sich reduziert selbstverständlich nicht direkt den Verbrauch, allerdings wird in einem einfachen Beispiel verdeutlicht, wie eng die Wahl der Dämpfertechnologie mit dem Kraftstoffverbrauch verknüpft ist. Die Basis bildet hierbei ein aktueller 2 Liter Dieselmotor mit etwa 350 Nm. Die Schwingungen werden mit einem optimal ausgelegten Zweimassenschwungrad (ZMS) wirkungsvoll reduziert. Wird mit diesem Fahrzeug bei gegebener Getriebeübersetzung konstant mit 70 km/h im 5. Gang gefahren, beträgt der spezifische Kraftstoffverbrauch 385 g/kWh. Dies entspricht für dieses Fahrzeug umgerechnet einem Kraftstoffverbrauch von 3,96 Liter auf 100 km. Wird die Gangübersetzung beispielhaft um 20 % reduziert, verringert sich um denselben Faktor die Motordrehzahl. Der spezifische Kraftstoffverbrauch sinkt dadurch auf 330 g/kWh, beziehungsweise der Verbrauch auf 3,39 Liter je 100 km. Dies entspricht einer Reduzierung von 14 %!

Eine vergleichbare Verbesserung wird erreicht, wenn die Geschwindigkeit von 70 km/h im 6. Gang anstatt im 5. Gang gefahren wird.

Zur Ermittlung des erzielbaren Vorteils durch Fahren bei niedrigerer Motordrehzahl im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ) wurden Verbrauchssimulationen durchgeführt. In Bild 5 ist das Ergebnis vergleichend für einen Stadtzyklus dargestellt. Zusammen mit dem Verbrauchskennfeld aus Bild 4 wird für den Stadtzyklus ein Verbrauchsvorteil von 0,92 Liter je 100 km beziehungsweise 11,4 % berechnet. Für den gesamten Zyklus sinkt der Verbrauch von 6,08 auf 5,44 Liter je 100km. Dies ergibt eine Ersparnis von 10,5 %.

Durch die Absenkung der Motordrehzahl steigt in gleichem Maße das Motormoment und beides führt zu einer Verschlechterung des Fahrkomforts, da zum einen die Ungleichförmigkeit der Kurbelwelle zunimmt und zum anderen der Isolationsgrad des ZMS abnimmt. Mit einem leistungsfähigeren Dämpfer kann diese Verschlechterung wieder kompensiert werden. Das von LuK entwickelte FKP bietet hierzu ausreichendes Potenzial [4, 5], um den geschilderten Verbrauchsvorteil ohne Komforteinbußen zu realisieren.

LuK beschäftigt sich schon lange damit, dieses Prinzip zur Schwingungsreduktion im PKW-Antriebsstrang zu nutzen. Schon beim Kolloquium 1990

Das Herzstück der Sprintspar-OP war natürlich an Bord: ein in das Zweimassenschwungrad integriertes Fliehkraftpendel, das unangenehmes Ruckeln im Antriebsstrang bei niedrigen Drehzahlen unterbindet. **AutoStrassenverkehr 19/2009**

Besonders beeindruckt hat uns aber das sogenannte Fliehkraft-Pendel im Zweimassen-Schwungrad. ... Das gefällt uns: Ruckfreies Bummeln ... Selbst bei 1000 Touren muckt der 320d nicht - gut so. **AutoBILD 35/2009**

Und damit der untertourige Diesel nicht holprig läuft wie ein Sack Nüsse, bemüht sich ein schwingungstilgendes Fliehkraftpendel-Schwungrad sehr erfolgreich um Laufkultur. **AutoZeitung 19/2009**

Das ermöglicht ein neuartiges Fliehkraftpendel, das in das bekannte Zweimassenschwungrad integriert wurde. Diese Technik setzt die Schaltdrehzahl um bis zu 400 Umdrehungen herab, weil sich "der Fahrer im niedertourigen Bereich ohne Ruckeln wohler fühlt", ... **AutoMotorSport 19/2009**

Bild 6 LuK FKP – Erfolgreiche Umsetzung in Serie

wurde diese Technik in Verbindung mit einer gedämpften Kupplungsscheibe erläutert [6]. Im Kolloquium 2002 wurde das FKP auf der Sekundärseite eines ZMS vorgestellt [7] und seit 2008 ist diese Technologie erfolgreich in Serie.

Im realen Fahrbetrieb wird das Verbrauchsreduzierungspotenzial bei Einsatz eines ZMS mit FKP bestä-

tigt. Zusammen mit anderen Maßnahmen konnte der Verbrauch bei einem Serienfahrzeug mit Handschaltgetriebe um 0,7 Liter ohne Komforteinbußen gesenkt werden. Ein Erfolg, der ohne leistungsfähigen Dämpfer nicht möglich gewesen wäre.

Dieses Potenzial ist uneingeschränkt übertragbar auf alle anderen Getriebekonzepte (Bild 7). Ein besserer Dämpfer unterstützt auch bei Doppelkupplungsgetrieben oder Automatikgetrieben das Fahren im verbrauchsgünstigen Drehzahlbereich. Bei einem Automatikgetriebe ermöglicht eine bessere Schwingungsabkopplung zusätzlich, dass der Wandler entsprechend früher überbrückt werden kann. So kann nicht nur der Wirkungsgrad des Motors, sondern auch der Wirkungsgrad des Getriebes positiv beeinflusst werden. Insbesondere für Automatikgetriebe sind effektive Dämpfer elementar wichtig, um bezüg-

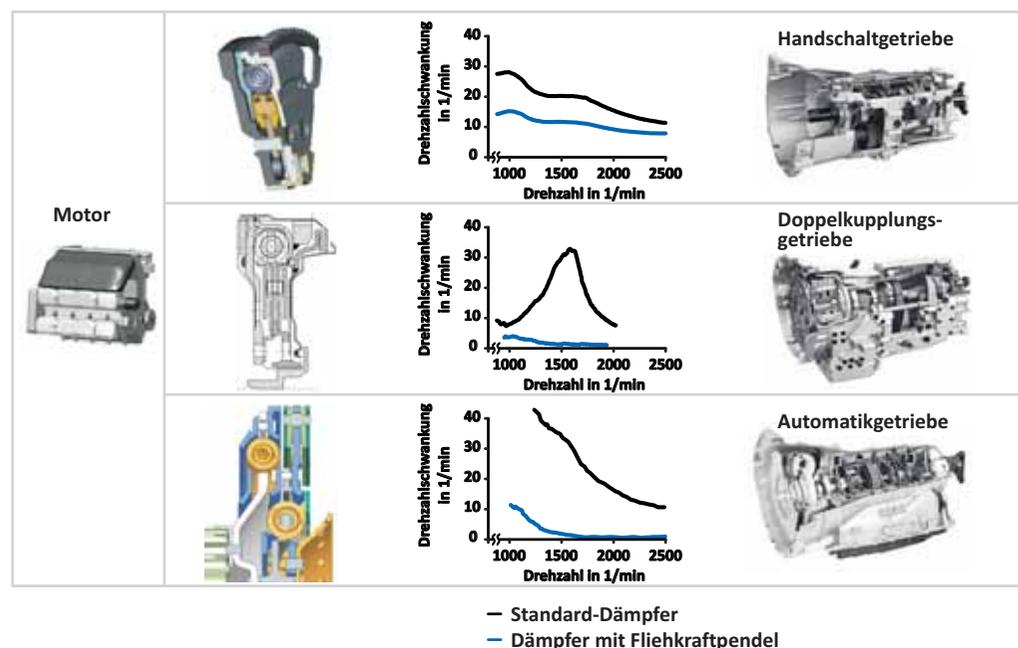


Bild 7 LuK FKP – Maßstab der Drehschwingungsisolierung bei allen Getriebearten

lich Verbrauch gegenüber anderen Getriebekonzepten konkurrenzfähig zu sein.

Die Entwicklung und Optimierung von Drehschwingungsdämpfern war und ist getrieben durch das Streben nach geräusch- und vibrationsarmen Fahrzeugantrieben. Daher können selbstverständlich bessere Dämpfer nach wie vor für eine reine Komfortsteigerung eingesetzt werden. Die Möglichkeiten durch eine effizientere Schwingungsreduzierung sind in Bild 8 qualitativ zusammengefasst. Je nach Ausgangslage und Zielsetzung kann ganz flexibel gewählt werden, zu welchen Anteilen das Potenzial bezüglich Komfortsteigerung oder Verbrauchsreduzierung verwendet werden soll. Wie erwähnt, sind diese Optionen unabhängig vom Getriebetyp. Kompromisse beim Komfort, beispielsweise als Folge von Einsparmaßnahmen, bleiben ohne Einfluss auf die Verbrauchswerte im NEFZ. Im realen Fahrbetrieb werden sie sich jedoch nachteilig auf den Verbrauch auswirken.

Neue Herausforderungen

Eine Systembetrachtung am Beispiel des 3-Zylindermotors

Bei größeren Motoren ist die Reduzierung der Zylinderzahl längst umgesetzt. Heutige 6-Zylinder Aggregate ersetzen die 8-Zylinder vergangener Tage, sowie die 4-Zylinder die 6-Zylinder. Die Vorteile sind naheliegend: Geringere Masse, weniger bewegliche Teile und geringere Reibung führen zu weniger Verlustleistung. Allerdings steht den Vorteilen der zylinderärmeren Motoren zunächst eine schlechtere Laufruhe gegenüber, insbesondere wenn der Motor verbrauchsoptimiert im unteren Drehzahlbereich betrieben werden soll.

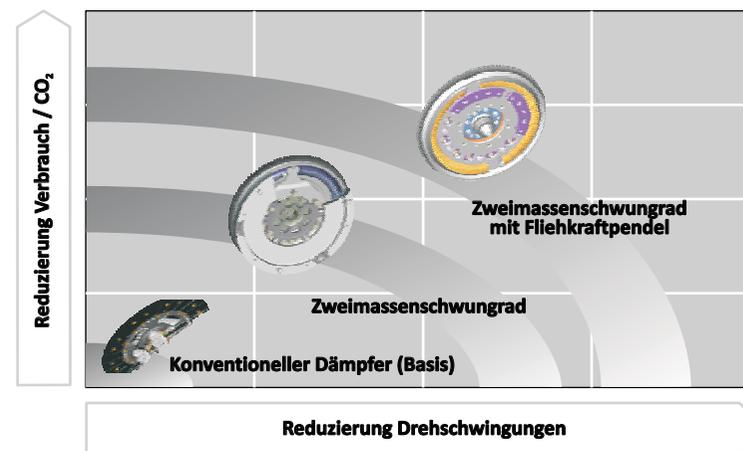


Bild 8 Flexible Optionen in Verbindung mit verbesserter Dämpfertechnologie am Beispiel des Handschaltgetriebes

Dies ist ein möglicher Grund dafür, dass aufgeladene und damit drehmomentstarke Varianten mit 3 oder gar nur 2 Zylindern noch vergleichsweise selten sind. Die Anforderungen an die Geräuschreduzierung steigen überproportional. Wird beispielsweise ein 4-Zylindermotor mit ZMS durch eine 3-Zylindervariante ersetzt, führt dies bei gleicher Dämpfertechnologie in etwa zu einer Verdoppelung der Drehungleichförmigkeit am Getriebeeingang. Der Grund dafür ist die geringere Zündfrequenz, welche zu einer höheren Ungleichförmigkeit der Kurbelwelle und zu einer Verschiebung der Antriebsstrangresonanz näher in den fahrrelevanten Drehzahlbereich führt.

Neben der kritischeren Situation auf der Getriebe-seite verschärft sich ebenfalls deutlich die Anforderung für den Nebenabtrieb. Auch hier steigt die Ungleichförmigkeit für die reduzierte Zylinderanzahl trotz gleichem Motormoment extrem an. Für den Nebenabtrieb wäre ein Einmassenschwungrad (EMS) von Vorteil.

Auf der Antriebsstrangseite verschiebt sich die Resonanz ebenfalls zu höheren Drehzahlen. Dies ist allerdings im Gegensatz zu einem ZMS positiv, da die Resonanz ohnehin im fahrbaren Drehzahlbereich liegt. Durch die Verschiebung zu höheren Drehzahlen wird bei einem EMS die Resonanz weniger stark angeregt, dennoch liegen die Drehschwingungen deutlich über denen eines 4-Zylindermotors (Bild 9).

Um mit konventioneller Dämpfertechnologie bessere Ergebnisse zu erzielen, wäre eine Verschie-

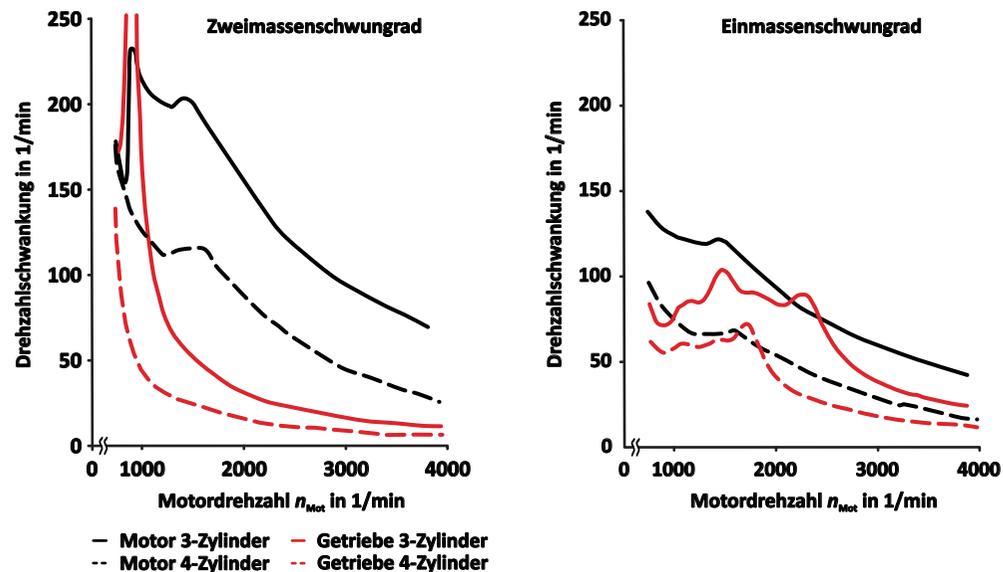


Bild 9 Steigende Anforderungen bei Reduzierung der Zylinderzahl – Beispiel 3 statt 4 Zylinder bei gleichem maximalen Motormoment

bung der Antriebsstrangresonanz hilfreich. Für ein ZMS müsste diese Resonanzfrequenz reduziert und für ein EMS erhöht werden. Konkret würde dies bedeuten, die Steifigkeit des Antriebsstrangs zu modifizieren, um dadurch den Einsatzbereich der Dämpfer zu erweitern (Bild 10).

Das theoretische Potenzial ist erheblich. Sofern es die Randbedingungen und andere Anforderungen zulassen, sollte die Möglichkeit einer Antriebsstrangmodifikation möglichst früh in der Konzeptphase berücksichtigt werden. Ein ZMS könnte bei entsprechender Reduzierung der Antriebsstrangsteifigkeit auch für aufgeladene 3-Zylindermotoren bezüglich Drehschwingungen am Getriebe die erste Wahl bleiben. Hingegen

kann das Potenzial eines EMS durch eine Erhöhung der Antriebsstrangsteifigkeit signifikant gesteigert werden.

Für den Fall, dass eine Anpassung des Antriebsstrangs nicht möglich ist und mit konventioneller Dämpfertechnologie kein befriedigendes Ergebnis erreichbar ist, muss frühzeitig über alternative Konzepte nachgedacht werden. Auch hier kann das Potenzial der von LuK entwickelten Technologie des FKP genutzt werden. In Anbetracht der Gesamtsituation können sowohl Pendel in Kombination mit ZMS als auch mit EMS interessante Lösungen darstellen.

Im Falle eines EMS hat sich gezeigt, dass die doppelte Haupterregung nicht vernachlässigbar

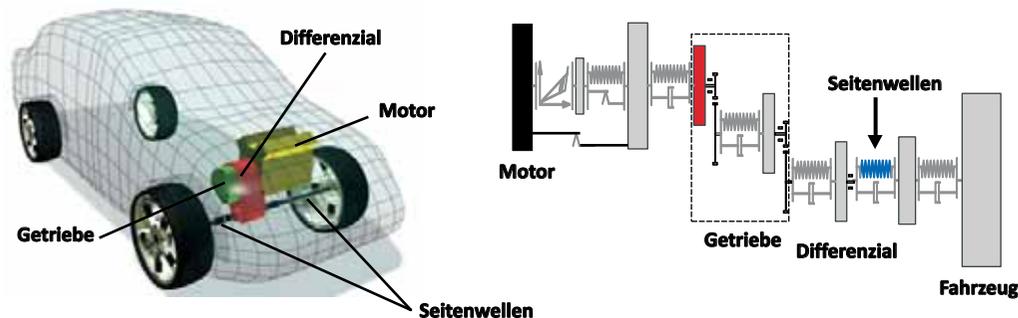


Bild 10 Berücksichtigung Gesamtantriebsstrang zur Reduzierung von Drehschwingungen

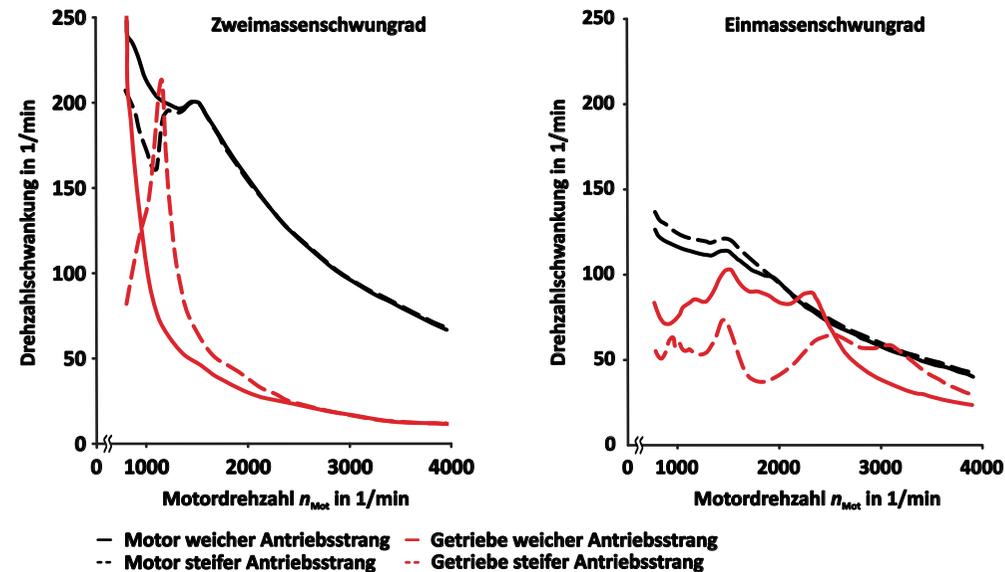


Bild 11 Leistungsgrenzen von Drehschwingungsdämpfern im Gesamtantriebsstrang

ist. Die günstigsten Ergebnisse werden erreicht, wenn mit dem FKP sowohl die einfache als auch die doppelte Haupterregung betitelt werden.

Aus Sicht des Antriebsstrangs stellt das ZMS mit FKP die beste Lösung dar. Ab einer Drehzahl von 1000 1/min werden hervorragende Isolationswerte erreicht. Der Vorteil einer Lösung mit EMS

kommt insbesondere dem Nebenabtrieb zu Gute, da das FKP direkt die Ungleichförmigkeit des Motors reduziert.

Welche Variante für eine konkrete Anwendung die günstigste ist, muss gesamthaf bewertet werden. Für den Antriebsstrang kann auch bei 3-Zylindermotoren mit ZMS ein optimales Ergebnis erzielt

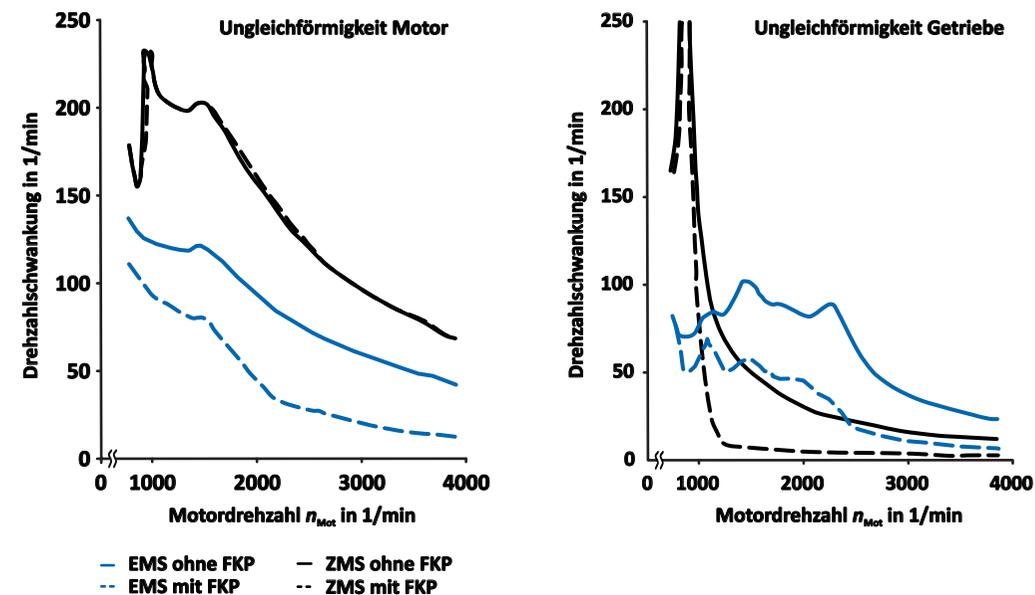


Bild 12 Isolationspotenziale alternativer Dämpfervarianten für 3-Zylindermotoren

werden. Für eventuell kritische Schwingungen auf der Nebenabtriebsseite hat LuK ebenfalls eine Lösung entwickelt, die im folgenden Abschnitt erläutert wird.

Lösung für den Nebenabtrieb

Bei den oben gezeigten Möglichkeiten zur Schwingungsreduzierung bei aufgeladenen 3-Zylindermotoren bieten auch Varianten mit ZMS das höchste Potenzial. Insbesondere kombiniert mit einem FKP können theoretisch beste Isolationsergebnisse schon ab niedriger Motordrehzahl erreicht werden. Ein Nachteil gegenüber Varianten mit EMS sind die größeren Schwingungen auf der Nebenabtriebsseite. Auch hierfür hat LuK eine Lösung, mit der die Schwingungen auf ein geringes Niveau gebracht werden können. Das Vorbild ist das bewährte Prinzip des ZMS. Mit dieser Technologie, in entsprechend kleinerer Ausführung, kann auch für den Nebenabtrieb ein überkritischer Betrieb ermöglicht werden. Bild 13 zeigt eine Konstruktion für einen LuK Riemen-scheibenentkoppler (RSE) [8]. Der RSE ist dabei direkt auf dem freien Kurbelwelle-

nende angeordnet. Dadurch profitiert der gesamte Riementrieb vom Isolationspotenzial. Der RSE ist natürlich nicht nur den 3-Zylindermotoren vorbehalten, sondern kann bei allen Anwendungen eingesetzt werden, wo Wechselmomente möglichst effektiv vom Nebenabtrieb isoliert werden sollen.

In Bild 14 sind Vergleichsmessungen mit einem konventionellen Lichtmaschinenfreilauf an einem 4-Zylinderdieselmotor mit 240 Nm dargestellt. Das Schwingungsniveau an der Lichtmaschine ist mit dem RSE signifikant geringer. Ein weiterer Vorteil ist, dass die dynamischen Momente gleich zwischen Kurbelwelle und Riemen-scheibe isoliert werden. Dadurch muss der Riemen nur noch geringe Wechselmomente übertragen und die Riemenvorspannung kann entsprechend geringer ausfallen. Eine geringere Riemenvorspannung wiederum bedeutet geringere Reibung, wodurch letztendlich die Verluste im Riementrieb reduziert werden können [8]. Der RSE ermöglicht somit neben einem beruhigten Nebenabtrieb ebenfalls einen weiteren Beitrag zur Reduktion von Verbrauch und CO₂-Ausstoß.

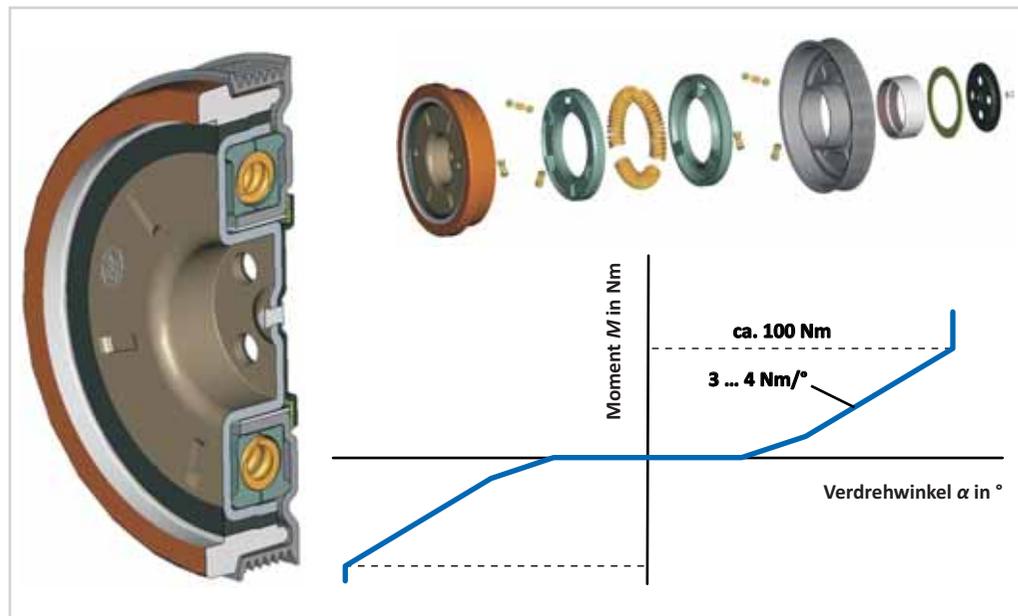


Bild 13 LuK Riemen-scheibenentkoppler (RSE) – das ZMS für den Nebenabtrieb

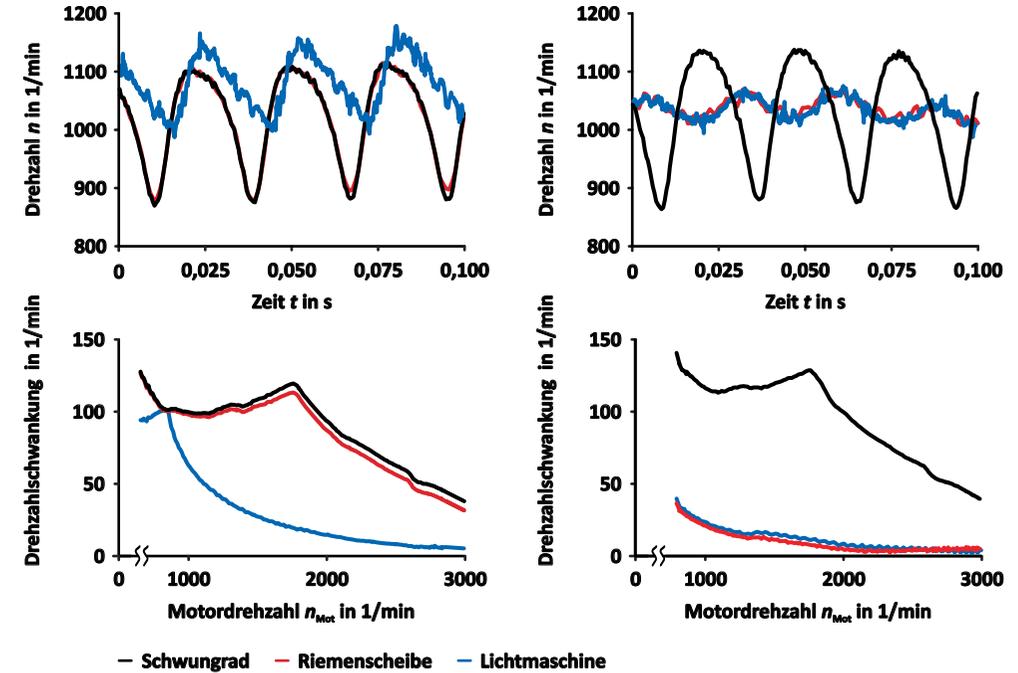


Bild 14 LuK Riemen-scheibenentkoppler (rechts) – Vergleich mit konventionellem Lichtmaschinenfreilauf (links)

Stopp-Start System, der Einstieg in die Hybridisierung

Verbrauchsvorteil durch Stopp-Start System

Bereits heute haben es viele Fahrzeuge an Bord, ein Stopp-Start System als Einstieg in die Hybridi-

disierung. Eine Prognose [9] geht davon aus, dass bereits 2012 jedes zweite Neufahrzeug mit einem solchen System ausgerüstet sein wird. Die Verbrauchsvorteile sind erheblich. Im NEFZ beträgt die Stopp-Zeit in Summe 240 s, das sind 20 % des gesamten Zyklus. Der dafür benötigte Kraftstoffanteil beträgt bis zu 5 %, beziehungsweise im reinen Stadtzyklus sogar bis zu 8 %. Konkret können für das oben betrachtete Fahrzeug mit einem Leerlaufverbrauch von etwa 0,6 L/h (Bild 5) im Gesamtzyklus 4,5 % eingespart werden.

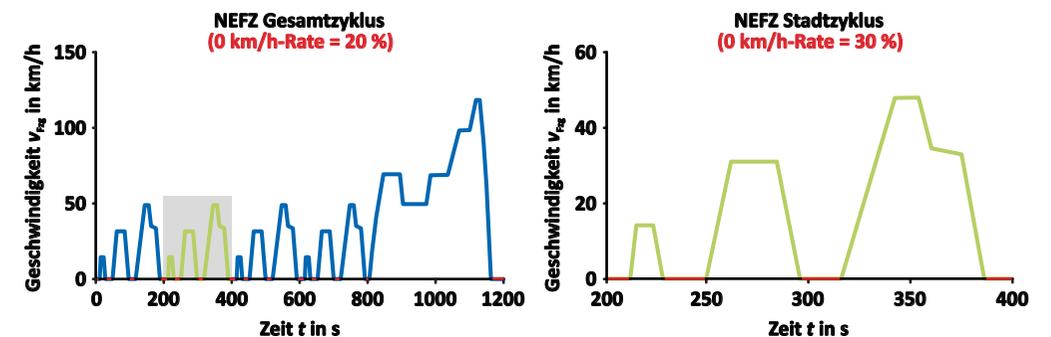


Bild 15 Verbrauchsreduzierungs-potenzial Stopp-Start System im NEFZ

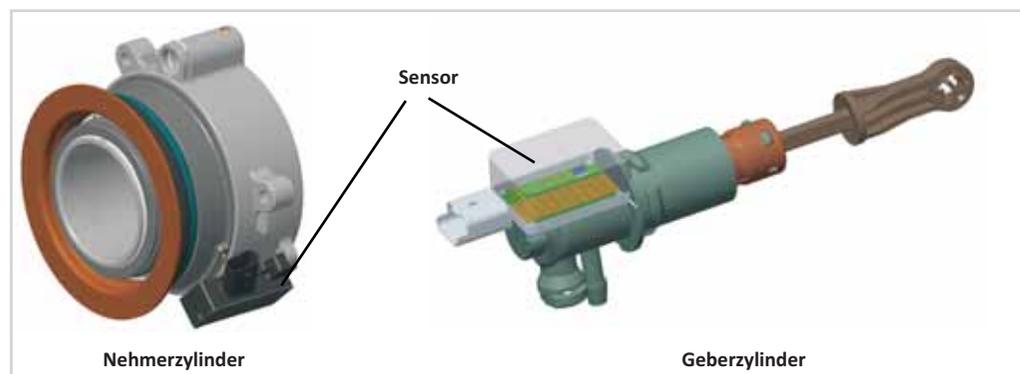


Bild 16 Wegsensoren im Ausrücksystem – nicht nur für Stopp-Start Systeme

Notwendigkeit und Option in Verbindung mit Stopp-Start System

Die grundsätzlichen Anforderungen an ein Kupplungs- und Dämpfersystem für Anwendungen mit Stopp-Start Funktion ändern sich nur geringfügig. Im Falle eines ZMS müssen mehr Stopp- und Startvorgänge ertragen werden können. Eventuell muss der Anlasserzahnkranz etwas verschleißfester ausgeführt werden. Hinsichtlich des Komforts ist sicherlich das Stopp- und Startverhalten kritischer zu betrachten. Da der Fahrer nicht, wie gewohnt, den Motor aktiv aus- und einschaltet, ist aus dieser Sicht mit höheren Anforderungen zu rechnen.

Deutlichere Konsequenzen ergeben sich für Ausrücksystemkomponenten, da Stopp-Start Systeme

Informationen bezüglich der Kupplungsposition benötigen. Die Positionserfassung bei Kupplungssystemen an sich ist nicht neu; es gibt eine Vielzahl von Systemen, die diese Information benötigen:

- Stopp-Start System
- Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat)
- Start-Lock
- Kupplungen bei Hybridanwendungen
- Elektrische Parkbremse
- Berganfahrhilfe (Hill-Holder)
- Eingangssignal für automatisierte Handschalt- und Doppelkupplungsgetriebe

Aufgrund des Trends zu vermehrter Elektrifizierung, beim Handschaltgetriebe stark getrieben

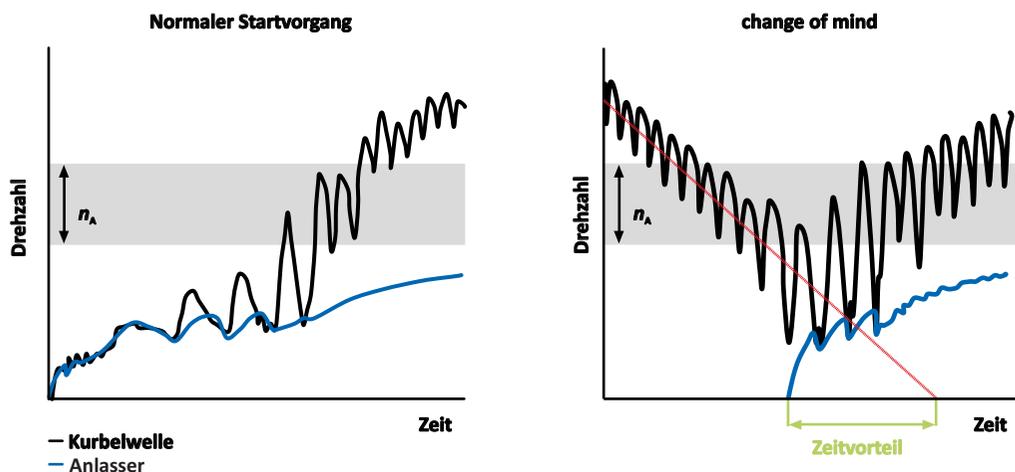


Bild 17 Normalstart und Wiederstart des noch drehenden Motors (change-of-mind)

durch Stopp-Start Anwendungen, nimmt die Anzahl der Projekte bei Ausrückzylindern mit Wegmesstechnik in starkem Maße zu. Bei LuK finden hierzu intensive Entwicklungen statt, um aus Sicht von Bauraum, Leistung und Kosten das beste Messprinzip zu finden [10].

Ein Szenario, welches in Verbindung mit Stopp-Start Systemen diskutiert wird, ist das Systemverhalten bei einem sogenannten „change-of-mind“. Hierbei hat das System aufgrund der Fahrsituation entschieden, den Motor abzustellen. Allerdings möchte der Fahrer nun doch weiterfahren, ehe der Stoppvorgang komplett abgeschlossen ist. Ein Wiederstart ist aber in der Auslaufphase des Motors nicht möglich. Es muss abgewartet werden, bis der Motor zum völligen Stillstand gekommen ist, ehe der Starter eingespart werden kann. In dieser Situation kann es zu einer Verzögerung von einigen Zehntelsekunden kommen, die subjektiv nachteilig bewertet werden.

Um eine mögliche Verzögerung bei einem change-of-mind zu eliminieren, gibt es Entwicklungen, bei denen das Starterritzel im ständigen Eingriff mit dem Anlasserzahnkranz steht. Der Starter bleibt dadurch immer eingespart. Um dies zu ermöglichen, ist ein zusätzlicher Freilauf zwischen Anlasserzahnkranz und Kurbelwelle notwendig, welcher den Anlasser bei niedrigen Drehzahlen ankoppelt und bei Überschreiten einer Drehzahl abkoppelt (n_A in Bild 17). Dadurch kann der Motor auch in der Auslaufphase sofort und ohne Verzögerung gestartet werden. Untersuchungen haben bereits gezeigt, dass eine solche Strategie zu nennenswerten Vorteilen bei der subjektiven Bewertung führt.



Bild 18 Konventionelle Freilaufanordnung für ein Stopp-Start System mit PES

Rechts in Bild 17 ist ein Wiederstart vor dem völligen Stillstand des Motors dargestellt. In dem konkreten Beispiel beträgt der Zeitvorteil 0,2 Sekunden gegenüber Lösungen ohne permanent eingesparten Starter.

LuK Lösung für einen permanent eingesparten Starter (PES)

Die Herausforderung für ein Stopp-Start System mit PES liegt in der Konstruktion des Freilaufes. Bei einer Konstruktion mit konventionellem Freilauf ist der Anlasserzahnkranz über ein Wälzlager auf dem Abtrieb der Kurbelwelle gelagert. Bei niedriger Drehzahl (Anlasserdrehzahl) ist der Anlasserzahnkranz über den blockierten Freilauf mit der Kurbelwelle verbunden, bei höherer Drehzahl

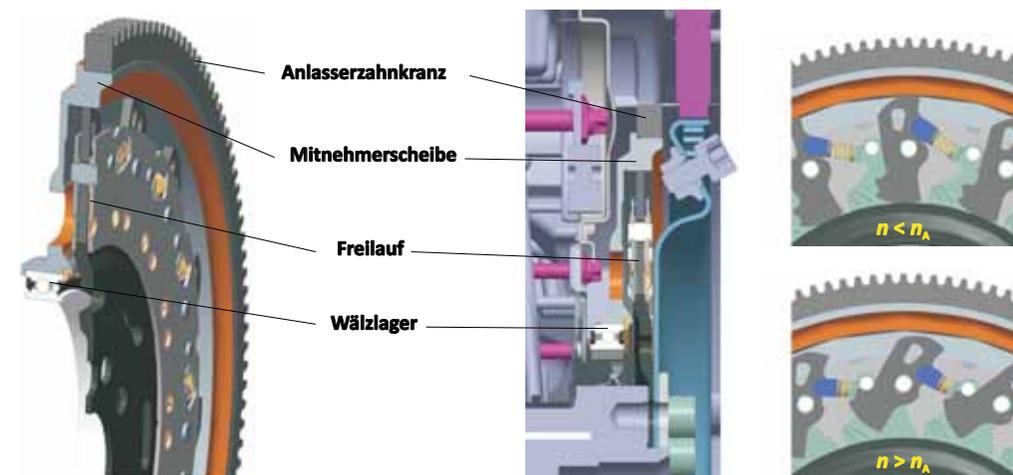


Bild 19 LuK Freilaufkonzept für PES (permanent eingesparter Starter)

überholt die Kurbelwelle den Anlasser, womit er abgekoppelt wird. Bei einer solchen Anordnung wird das Wälzlager während des gesamten Betriebes beansprucht und zwar mit der Motordrehzahl. Dadurch sind die Anforderungen an das Lager extrem hoch, da es auf die maximale Motordrehzahl und die vollen Motorbetriebsstunden ausgelegt werden muss. Ebenfalls läuft der Freilauf immer mit Motordrehzahl um. Dadurch erzeugen beide Komponenten, Lager und Freilauf, während des gesamten Motorbetriebs ein Schleppmoment und damit zusätzliche Verlustleistung.

Für die LuK Lösung kann einfache Wälzlagertechnik eingesetzt werden, da die Belastung um ein Vielfaches geringer ausfällt, als bei einer konventionellen Freilaufanordnung. Hierbei wird der Anlasserzahnkranz nicht mehr auf dem drehenden Abtrieb der Kurbelwelle gelagert, sondern auf dem stehenden Kurbelgehäuse (Bild 19). Der Freilauf ist als Fliehkraftkupplung ausgeführt und mit der Kurbelwelle verschraubt. Bei überschreiten des Anlasserdrehzahlbereiches (n_A in Bild 17) öffnet die Fliehkraftkupplung und koppelt dadurch den Anlasserzahnkranz von der Kurbelwelle ab. Bei dieser Anordnung muss das Wälzlager lediglich auf die Anlasserdrehzahl und auf die Dauer der Stopp- und Startvorgänge ausgelegt werden. Nach dem Motorstart erzeugt diese Anordnung kein zusätzliches Schleppmoment und damit keine Verlustleistung. Der LuK Freilauf für ein PES ist dadurch äußerst robust und ohne Nachteile für den Gesamtwirkungsgrad.

Höhere Anforderungen an das Kupplungssystem

Optimierungen bezüglich Verbrauch und Dreh-schwingungen bei modernen Antriebssträngen mit Verbrennungsmotor betreffen praktisch ausschließlich das Fahren bei geschlossener Kupplung. Die Schnittstelle zwischen Motor und Getriebe ist dabei durch den Drehschwingungsdämpfer maßgeblich geprägt. Die Verhältnisse ändern sich komplett für Betriebszustände mit schlupfender beziehungsweise betätigter Kupplung. Bei einem idealen Reibwertverhalten der Kupplung würden, bei ausreichend hoher Schlupfdrehzahl, theoretisch keine Wechselsmomente mehr direkt vom Motor auf das Getriebe übertragen werden. Ein Effekt, der bei schlupfgeregelten Systemen zur Drehschwingungs-isolation genutzt wird.

Dennoch gibt es bekanntermaßen eine Reihe von Komfort- und NVH-Problemen, für die das Kupplungssystem beziehungsweise das gesamte Fahrzeug ausgelegt werden müssen. In den vergangenen Jahren war dies ebenfalls stark getrieben durch die Evolution bei den Dieselmotoren. Die signifikant gestiegenen Motormomente durch Turboaufladung führten bei Handschaltgetrieben zu höheren Betätigungs-kraften [1], die vergleichsweise geringen verfügbaren Motormomente im unteren Drehzahlbereich in einigen Fällen zu Anfahrschwächen.

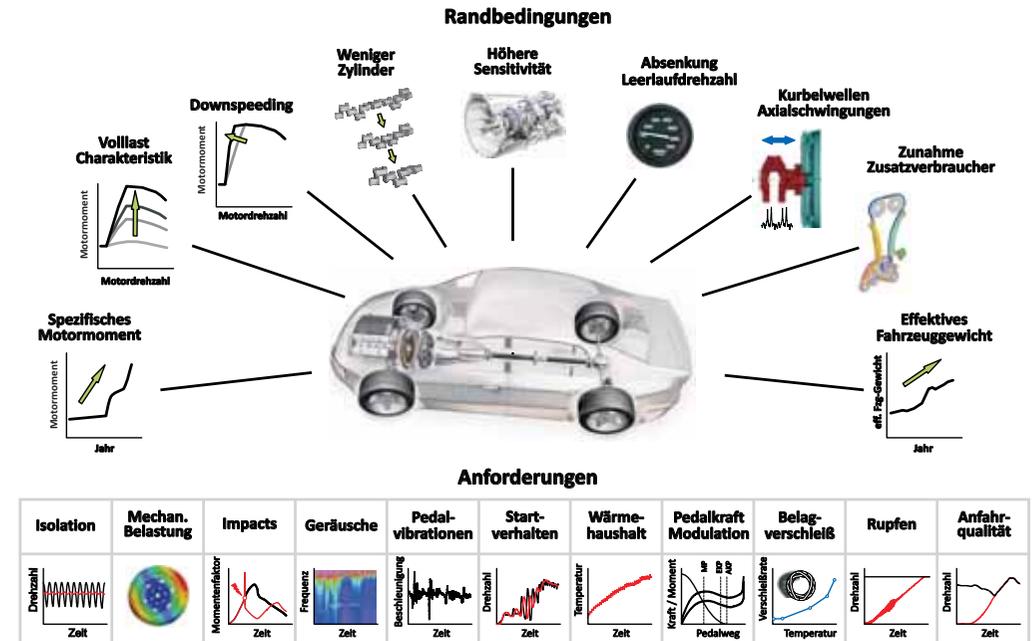


Bild 21 Verschärfte Randbedingungen und Anforderungen für ein Kupplungssystem

Letzteres ist einerseits ein Komfortthema, jedoch wird dadurch auch die Situation bezüglich Anfahr-energie kritischer. Dies kann zu einer reduzierten Lebensdauer, insbesondere aber auch zu hohen Temperaturen der Kupplung beim Anfahren am Berg mit Hänger führen. Hier ist auch vermehrt mit Defiziten bei aufgeladenen kleinvolumigen Benzinmotoren zu rechnen. Motorseitig können effektive Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Spezielle Motorkennfelder mit fallenden Teillastkennlinien sowie eine möglichst hohe Dynamik während der Anfahrphase stabilisieren den Anfahrvorgang. Dies ist gleichermaßen positiv für die Anfahr-energie als auch für den Anfahrkomfort.

hebt. Im Mittel wurden Verbesserungen von 1,5 Noten erreicht.

Insgesamt führen verschärfte Randbedingungen von Motor und Getriebe zu höheren Anforderungen an das Kupplungssystem (Bild 21). Die motorseitige Anregung sowie die Sensitivität des Getriebes beziehungsweise des gesamten Antriebsstrangs nehmen zu. Insbesondere ist ein Trend zu größerer Vielfalt von Vibrations- und Geräuschphänomenen in der Schlupfphase festzustellen. Eine Reihe von Problemen können durch axiale Schwingungen der Kurbelwelle verursacht werden. Einige wichtige Beispiele hierfür sind:

- Pedalvibrationen
- Betätigungsgeräusche
- Rumpfen (Modulationsanregung)
- Antriebsstrangeräusche (Rasseln, Rattern, Whoop)

Diese zwangs- oder impulserregten Phänomene können mit einem deckelfesten Ausrücksystem (DFA) [10] besonders effektiv gelöst werden, da der Anregungsmechanismus kompensiert wird. Der DFA ist seit 2009 in einer Hybridanwendung in Serie, für Handschaltgetriebe bei einigen Automobilherstellern aus unterschiedlichen Problemstellungen in der Konzeptphase.

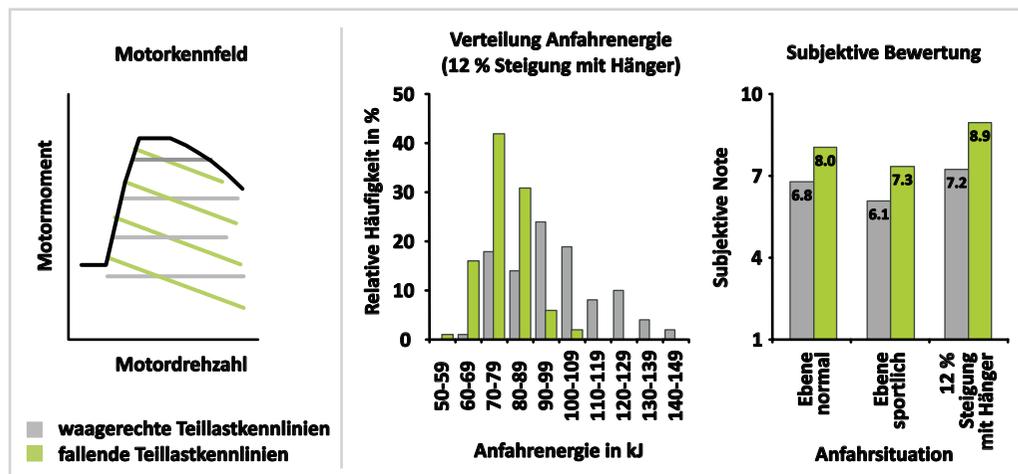


Bild 20 Einfluss Motorkennfeld auf Anfahrstabilität – Fahrversuch mit 10 Testpersonen

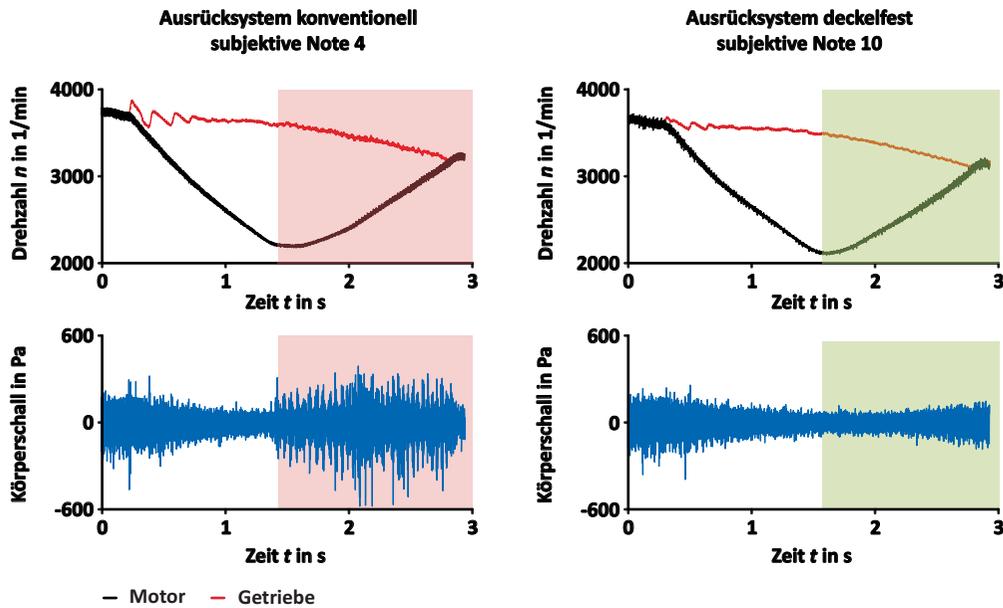


Bild 22 Rasselgeräusch in der Schlupfphase – Wirksamkeit deckelfestes Ausrücksystem (DFA)

Bild 22 zeigt ein Beispiel für ein Geräuschproblem (Rasseln) in der Schlupfphase, welches durch Körperschallspitzen am Getriebe im zeitlichen Abstand der 0,5-ten Motorordnung charakterisiert ist. Die Ausgangssituation mit konventionellem Ausrücksystem ist mit einer subjektiven Note von 4 gewer-

tet. Mit DFA wird die Note 10 erreicht, die Spitzen im Körperschallsignal während der Einkuppelphase sind komplett eliminiert.

Ein weiteres Beispiel für die Wirksamkeit des DFA zeigt Bild 23. Bei der Rupfbewertung kann in die-

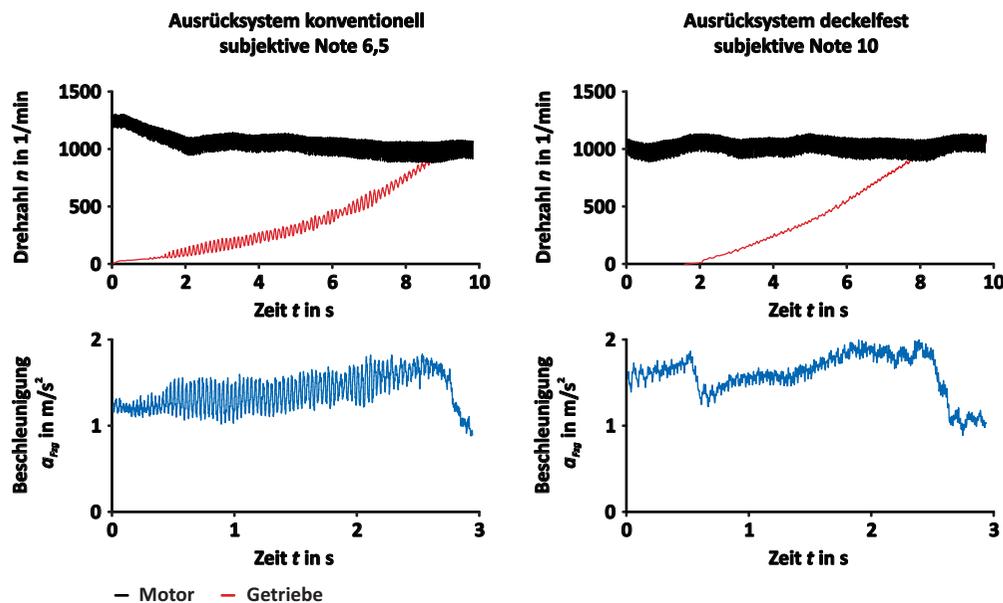


Bild 23 Kurbelwellenerregtes Rupfen – Wirksamkeit deckelfestes Ausrücksystem (DFA)

sem Fahrzeug mit einem DFA ebenfalls die Note 10 erreicht werden. Die Anregung ist nachweislich durch Kurbelwellenschwingungen verursacht.

Wie stark sich eine Anregung auf die subjektive Note auswirkt, hängt maßgeblich von der Schwingungsfähigkeit des Systems ab, welches angeregt wird. Die gleiche Anregung kann dadurch in dem einen Fahrzeug zu einer guten und in einem anderen Fahrzeug zu einer schlechten Bewertung führen. Beispielsweise zeigen bezüglich der Rupfempfindlichkeit verschiedene Fahrzeuge gravierende Unterschiede, wie der Vergleich von etwa 40 Fahrzeugen in Bild 24 zeigt.

Der Fahrzeugfaktor auf der x-Achse repräsentiert das effektive Fahrzeuggewicht beziehungsweise die Fahrzeuggröße. Die Rupfempfindlichkeit ist eine Fahrzeugkonstante. Sie ist der Faktor zwischen Ursache (Anregung) und Wirkung (Fahrzeugvibration) und gilt für eine harmonische Anregung in Rupffrequenz, wobei kleine Werte günstig sind.

Die Limousinen A und B sind in der gleichen Fahrzeugklasse und ähnlich motorisiert. Die Rupfempfindlichkeit von Limousine B ist mehr als doppelt so hoch wie bei Limousine A. Konkret bedeutet dies, dass bei gleicher Rupfanregung mehr als die doppelten Fahrzeugvibrationen zu erwarten sind. Das gleiche gilt für das Beispiel der beiden Kleinwagen. Allgemein sind die kleineren Fahrzeuge empfindlicher als die größeren, da weniger Masse beschleunigt werden muss. Allerdings kompensiert sich dies teilweise, da die Motoren kleiner und die Momentenkapazitäten der Kupplungen geringer sind.

Die Unterschiede der Empfindlichkeiten ergeben sich im Wesentlichen aus den Wechselwirkungen des Antriebsstrangs mit den Eigenmoden des Motorblocks (Rotation, Translation) und der Radaufhängung (Translation).

Fahrzeuge mit hoher Rupfempfindlichkeit sind mit dem Stand der Technik nur schwer zu beherrschen. Spezielle Maßnahmen können notwendig werden, um Beanstandungen zu vermeiden. Neben Bau-

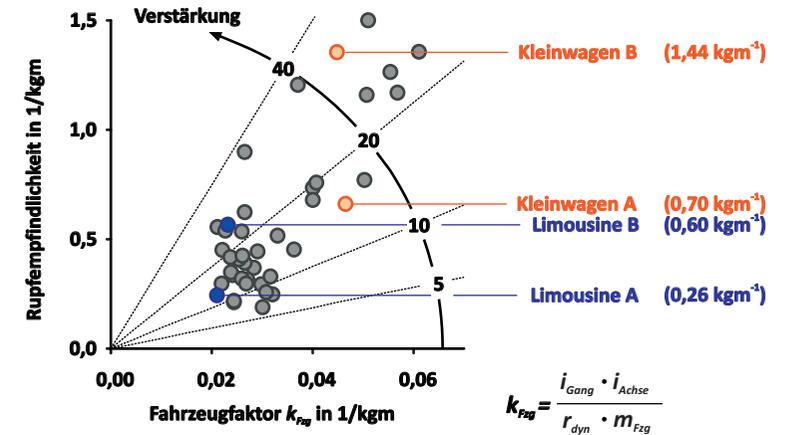


Bild 24 Benchmark Rupfempfindlichkeit von Personenkraftwagen im 1. Gang

$$k_{Fzg} = \frac{i_{Gang} \cdot i_{Achse}}{r_{dyn} \cdot m_{Fzg}}$$

teiloptimierung kann je nach Anregungstyp ein deckelfestes Ausrücksystem (Bild 23) oder ein Schlagausgleichslager (Bild 26) helfen. Eine weitere Lösung bietet ein Rupftilger [11] mit dem Vorteil, unabhängig vom Anregungstyp Rupfen effizient zu reduzieren beziehungsweise zu vermeiden.

Die möglichen Probleme sind vielschichtig und werden oft erst in der Fahrzeugerprobung und damit spät im Entwicklungsprozess identifiziert. Bei LuK werden intensiv Mess- und Simulationsmethoden entwickelt, um die verschiedenen Phänomene auf Gesamtsystem- und Komponentenebene nachzubilden. Ziele sind eine möglichst frühe Erkennung potenzieller Probleme sowie die Entwicklung von robusten Konstruktionen und Abhilfemaßnahmen. Beispielsweise ist das sogenannte Eek-Noise, eine Instabilität von Eigenmoden der Getriebeeingangswelle, virtuell abgebildet worden. Erst dadurch war es möglich, stabilisierende Maßnahmen abzuleiten. Konkret wurden hierfür kipp- und radialweiche Kupplungsscheiben entwickelt, die die Wahrscheinlichkeit eines instabilen Systemverhaltens deutlich reduzieren [11].

Im Zusammenhang mit Pedalvibrationen kann mit Hilfe von fundierten Simulationsmodellen das gesamte System vom Schwungrad bis zum Pedal analysiert und optimiert werden [12]. Diese Möglichkeit wird im Entwicklungsprozess intensiv genutzt, um Hydraulikleitungen und -dämpfer genau abzustimmen [10]. Auch vermeintlich kleine Details werden exakt modelliert und untersucht. Ein Beispiel hierfür ist die Schnittstelle zwischen Tellerfederungen und Ausrücklager. Je nach Gestaltung von Zungenform und Reibwert in der Kontaktzone,

sind auch an dieser Stelle je nach Ausgangslage nennenswerte Verbesserungen möglich (Bild 25). Positiv ist ein möglichst geringer Reibwert, der zuverlässig durch eine zusätzliche Kontaktscheibe am Ausrücklager realisiert werden kann [10].

Um mögliche Probleme frühzeitig zu identifizieren, ist eine intensive Zusammenarbeit von Automobilhersteller und Lieferant aufgrund verschärfter Randbedingungen noch wichtiger geworden. Nur so kann ein Handlungsbedarf möglichst früh erkannt und die aus technischer und kommerzieller Sicht beste Lösung gemeinsam entwickelt werden. Einige bekannte, aber auch neue Beispiele für problem- und komfortorientierte Systemlösungen sind in Bild 26 dargestellt.

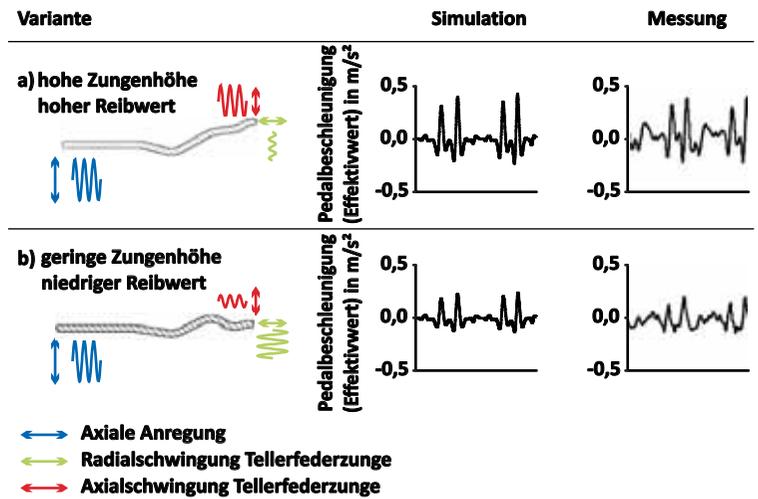


Bild 25 Pedalvibrationen – Detailoptimierung an der Kontaktstelle Tellerfederzungen zu Ausrücklager

Zusammenfassung

Im Wettlauf mit Hybridisierung und letztendlich Elektrifizierung der Antriebsstränge wird der Verbrennungsmotor noch geraume Zeit die Führungsrolle beanspruchen.

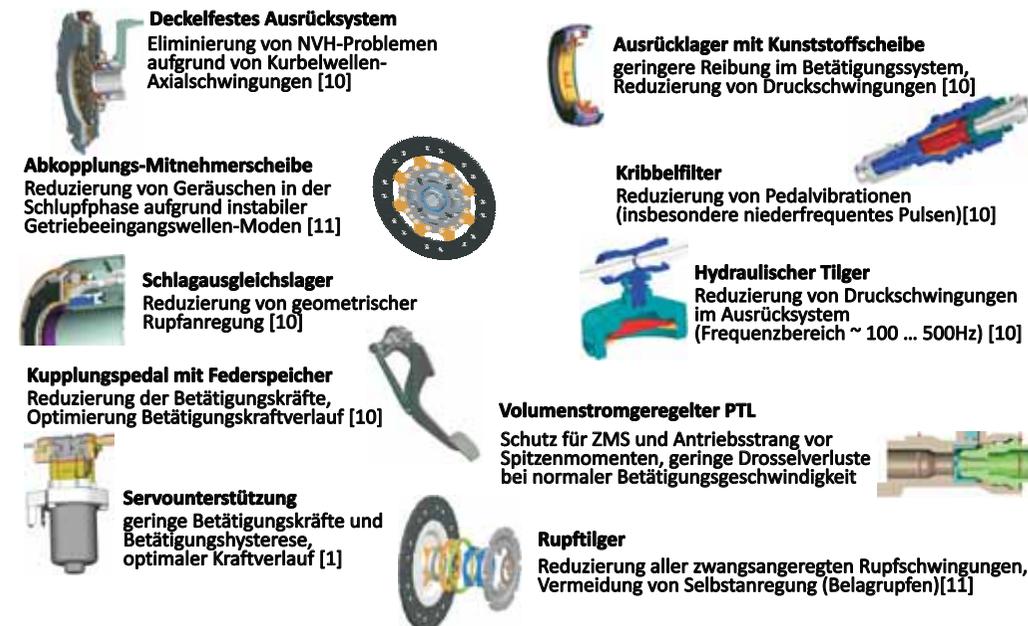


Bild 26 Beispiele für effiziente Produkte zur Optimierung des Systemverhaltens in der Schlupfphase

Motorseitige Optimierungen sowie die Auswahl eines geeigneten Getriebekonzeptes zur Ausschöpfung der Verbrauchsreduktionspotenziale werden hier aus dem bisherigen Zielkonflikt „Fahrspaß oder Effizienz“ das Ziel „Fahrspaß und Effizienz“ machen.

Ein wesentliches Schlüsselement für solche Antriebsstränge werden die Dämpfer- und Kupplungssysteme darstellen. Ihnen wird die Herkulesaufgabe zukommen, bei steigenden Ungleichförmigkeiten, zunehmenden Komfortansprüchen und reibungsoptimierten Antriebssträngen optimale Isolationsgrade zu bieten.

Schaltempfehlungen, Stopp-Start Systeme sowie eben je nach Fahrzeugklasse die Automatisierung von Getrieben werden in absehbarer Zeit eine Selbstverständlichkeit sein und nicht mehr um die Akzeptanz der Fahrzeugkäufer werben müssen. Das Gros dieser technischen Lösungen lässt sich durch intelligente Weiterentwicklung bestehender Komponenten wie ZMS, Kupplung und Ausrücksystem darstellen.

Mehr denn je wird eine enge Zusammenarbeit zwischen Automobilhersteller und Lieferant notwendig sein: zum einen bei der Konzeptauswahl beziehungsweise sogar bei der Antriebsstrangdefinition, zum anderen bei der Serienentwicklung.

Literatur

- [1] Zink, M.; Hausner, M.; Welter, R.; Shead, R.: Kupplung und Ausrücksystem – So macht Kuppeln Spaß! 8. LuK Kolloquium 2006
- [2] Shell Pkw-Szenarien bis 2030 – Fakten, Trends und Handlungsoptionen für nachhaltige Auto-Mobilität. <http://www.shell.de/pkwszenarien>
- [3] Müller, B.: LuK-Drehmomentwandler – Strategiefähige Wandler für neue Automatikgetriebe. VDI-Bericht Nr. 2029, Düsseldorf 2008
- [4] Zink, M.; Hausner, M.: Das Fliehkraftpendel – Anwendung, Leistung und Grenzen drehzahladaptiver Tilger. ATZ, Heft 07/08 2009
- [5] Kroll, J.; Kooy, A.; Seebacher, R.: „Land in Sicht? - Torsionsschwingungsdämpfung für zukünftige Motoren“. 9. LuK Kolloquium 2010
- [6] Reik, W.: Torsionsschwingungsisolation im Antriebsstrang – Ein Wertungsversuch. 4. LuK Kolloquium 1990
- [7] Kooy, A.; Gillmann, A.; Jäckle, J.; Bosse, M.: ZMS – Nichts Neues? 7. LuK Kolloquium 2002
- [8] Stief, H.; Pflug, R.; Schmidt, T.; Fechner, C.: Riemtriebssysteme – CO₂-Reduzierungspotenziale und wie sie erreicht werden. 9. LuK Kolloquium 2010
- [9] Bosch: Presseinformation PI6753 – August 2009
- [10] Welter, R.; Lang, V.; Wolf, B.: Kupplungsbetätigung mit Köpfchen. 9. LuK Kolloquium 2010
- [11] Freitag, J.; Gerhardt, F.; Hausner, M.; Wittmann, C.: Das Kupplungssystem der Zukunft – mehr als Trennen und Verbinden. 9. LuK Kolloquium 2010
- [12] Fidlin, A.; Ineichen, L.; Kremer, E.; Klünder, D.; Tikhomolov, A.: Schwingungen im Kupplungssystem: Von der Kurbelwelle bis zum Pedal. VDI-Bericht Nr. 2077, Düsseldorf 2009