

10

Mit Effizienz und Komfort zum Erfolg

Die trockene Doppelkupplung etabliert sich
auf dem Automatikmarkt

Karl-Ludwig Kimmig
Peter Bührle
Klaus Henneberger
Matthias Ehrlich
Götz Rathke
Jens Martin

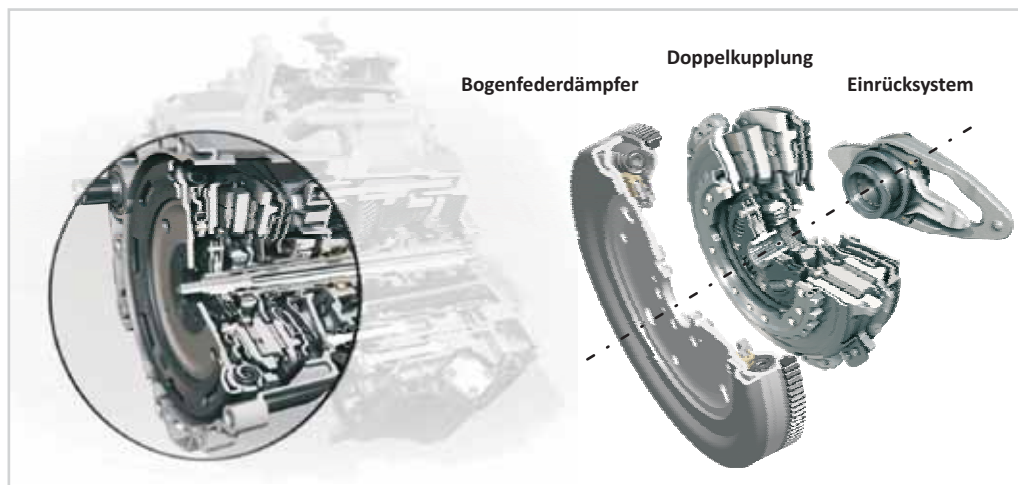


Bild 3 Doppelkupplungssystem des VW 7-Gang DKG DQ200

gert ist, so dass die Betätigungskräfte nicht auf der Kurbelwelle abgestützt werden müssen und auch die Masse der Doppelkupplung nicht starr über ein Schwungrad an die Kurbelwelle angebunden ist. Dies bringt vor allem große Vorteile bezüglich reduzierter Axial- und Biegeschwingungen an der Kurbelwelle. Ein weiterer Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass das Doppelkupplungssystem im Getriebewerk komplett funktionsfertig montiert und als Gesamtsystem geprüft werden kann.

Die Verbindung der getriebeseitigen Doppelkupplung mit dem motorseitigen Schwungrad mit Bogenfederdämpfer wird beim DQ200 DKG sowie bei vielen anderen trockenen DKG über eine vorgespannte Steckverzahnung realisiert. Die Vorspannung verhindert vollständig das Auftreten von Verzahnungsgeräuschen, welche durch die Wechseldrehmomente des Motors angeregt werden. Der schwimmende Dämpferflansch des fettgefüllten Bogenfederdämpfers gleicht problemlos den Achsversatz zwischen Motor und Getriebe aus.

Ein weiteres DKG mit trockener Doppelkupplung und ebenfalls elektrohydraulischer Kupplungs- und Getriebebetätigung stellt das C635 von FPT dar. Bei diesem Getriebe handelt es sich um ein 6-Gang DKG, welches eine Drehmomentkapazität bis 350 Nm hat.

Zur Umsetzung der Doppelkupplung bei diesem Getriebetyp steht in der Kupplungsglocke axial nur sehr wenig Bauraum zur Verfügung. Aus diesem

Grund wird eine Doppelkupplungsanordnung gewählt, bei der die motorseitige Kupplung K1 über eine Zugstange in der Getriebeeingangswelle und einen kleinen hydraulischen Zylinder auf der Getrieberückseite betätigt wird. Die getriebeseitige Kupplung K2 wird, ähnlich zu vielen Handschaltgetrieben, über ein CSC (Centric Slave Cylinder) betätigt (Bild 4).

Durch dieses spezifische Betätigungskonzept kann eine getriebefeste Lagerung der Doppelkupplung über ein Flanschlager realisiert werden, was wiederum zu Bauraumvorteilen führt. Neu bei dieser Doppelkupplung ist auch, dass nicht zwei kraftlos offene Kupplungen eingesetzt werden, sondern die K1 wie bei einer Standardkupplung kraftlos geschlossen ist und somit, auch zur Minimierung der Kennlinienstreuung und der Betätigungskräfte, eine Kupplung mit Verschleißnachstellung (SAC) eingesetzt werden kann [9]. Die K2 ist eine kraftlos offene Kupplung ohne Verschleißnachstellung, was einen höheren Gesamtbetätigungsweg mit sich bringt, jedoch die Komplexität des Systems deutlich reduziert (Bild 2, System B).

Dieses Kupplungskonzept benötigt ein angepasstes Sicherheits- und Überwachungskonzept, damit in keiner Fahrsituation eine ungewollte Getriebeverspannung auftreten kann. Zur Dämpfung der Torsionsschwingungen, sowohl für Benzin- als auch Dieselmotoren, wird auch bei diesem Doppelkupplungssystem ein externer Bogenfederdämpfer mit vorgespannter Steckverzahnung eingesetzt.

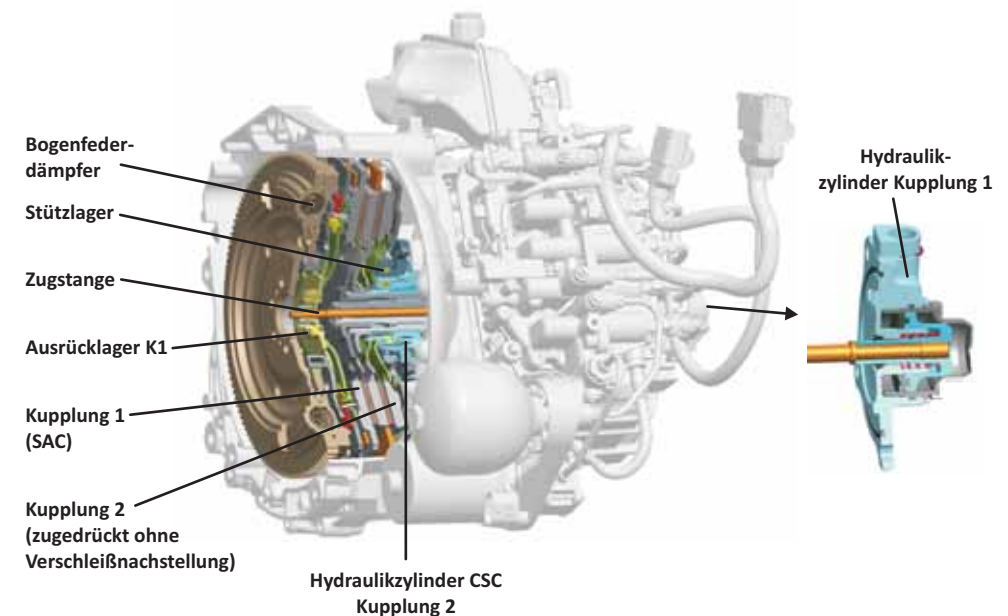


Bild 4 Doppelkupplungssystem des FPT 6-Gang DKG C635

Trockene Doppelkupplungen für DKG mit elektromechanischer Aktorik

Neben den DKG mit elektrohydraulischer Kupplungs- betätigung haben sich in den letzten Monaten auch Systeme mit elektromechanischer Kupplungs- und Getriebeaktuatorik auf dem Markt etabliert.

Als erstes Seriengerät mit dieser Technologie ist das 6DCT250 von Getrag zu nennen. Bei diesem DKG kommt zur Betätigung der Doppelkupplung der neu entwickelte LuK Hebelaktor zum Einsatz. Der Hebelaktor trägt aufgrund geringer Verluste in der Elektromechanik zu einem sehr guten Gesamtwirkungsgrad bei und kann durch seine kompakte Bauweise

fast bauraumneutral in die Kupplungsglocke integriert werden (Bild 5).

Zur Erfüllung des Sicherheitskonzepts wurden im Systemlastenheft zwei kraftlos offene Kupplungen gefordert, was speziell mit dem Hebelaktor und einer angepassten Kupplungskennlinie (stetig ansteigend)

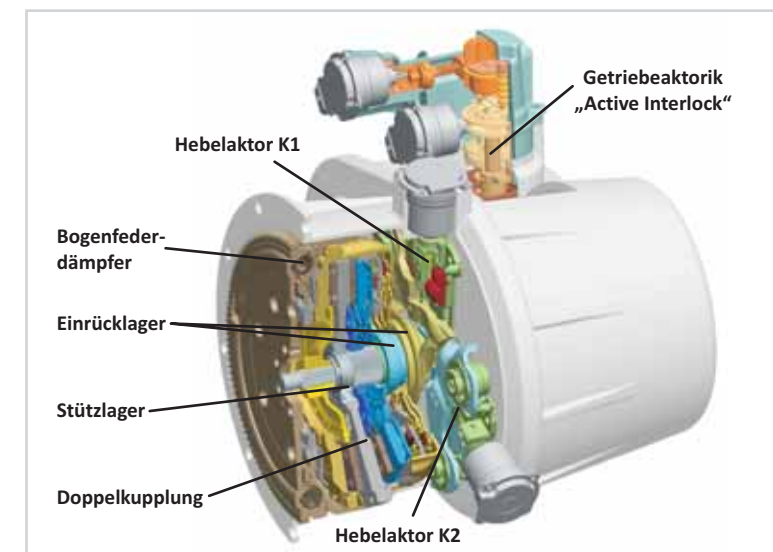


Bild 5 Doppelkupplungssystem mit elektromechanischer Kupplungs- und Getriebeaktuatorik

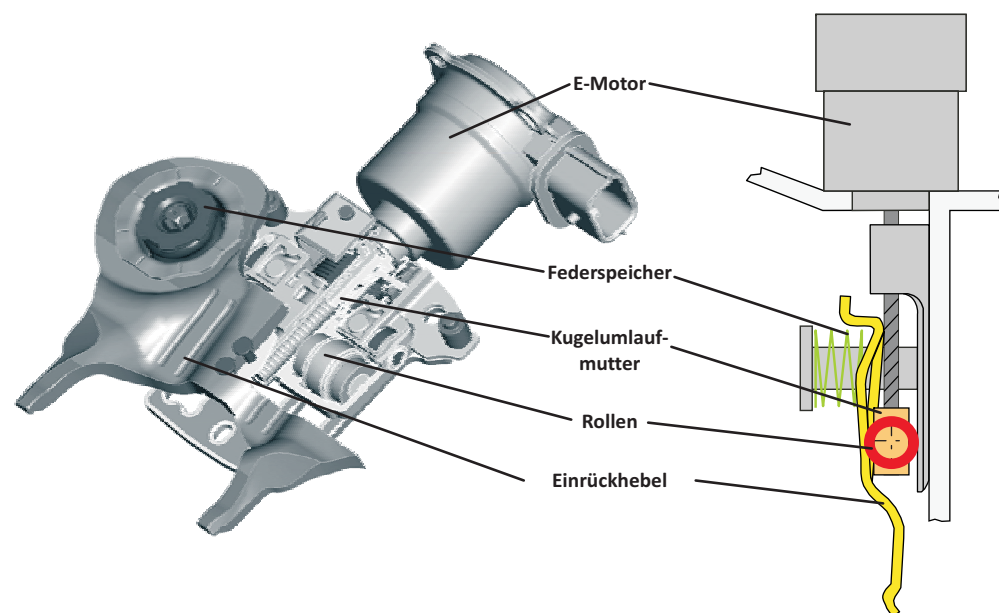


Bild 6 Elektromechanischer Hebelaktor zur Kupplungsbetätigung

realisiert werden kann (Bild 2, System C). Damit die für das Getriebe angestrebte Drehmomentkapazität von 280 Nm mit dem sehr effizienten und bauraumoptimierten Aktorkonzept erreicht werden kann, ist eine Doppelkupplung mit einer sehr präzise arbeitenden, wegsensierenden Verschleißnachstellung erforderlich, die speziell für die Doppelkupplungsanwendungen entwickelt wurde (Bild 8).

Bei dem neu entwickelten Hebelaktor (Bild 6) wird die zum Schließen der Kupplungen notwendige Kraft im Wesentlichen von einem Federspeicher über die Aktormechanik erzeugt [2]. Diese Kraft wirkt am äußeren Ende auf den als Wippe ausgebildeten Einrückhebel. Ein an das Getriebegehäuse angeschraubter Elektromotor erzeugt über einen Kugelgewindtrieb eine Verstellbewegung der zwischen Hebel und Getriebewand angeordneten Tragrollen, die den mittleren Auflagepunkt des Hebels bilden. Über den Elektromotor kann somit der Auflagepunkt und damit das effektive Hebelverhältnis verändert werden. Dies ergibt für den Elektromotor ein niedrigeres, nahezu konstantes Kraftniveau und ermöglicht dadurch eine deutliche Reduzierung der Motorgröße für den Kupplungsaktor.

Da die bisher verfügbaren Elemente zur Umsetzung der Drehbewegung des Motors in die Linearbewegung des Aktors die Anforderungen an Leistungsdichte und Wirkungsgrad bei weitem nicht erfüllen,

wurde in Zusammenarbeit mit INA ein neuer Kugelgewindtrieb entwickelt. Verwendet wird ein 4-reihiger Aufbau, der aus Bauraumgründen mit interner Kugelumlenkung ausgeführt ist. Eine weitere Besonderheit sind die speziell entwickelten Tragrollen, welche unter einer Auflagekraft von bis zu 7000 N noch sehr leichtgängig sein müssen [2], [7].

Das Doppelkupplungssystem für das Getrag 6DCT250 Getriebe ist modular aufgebaut, so dass Motoren von 150 - 280 Nm bedient und je nach Schwingungsanregung mit unterschiedlichen Dämpferkonzepten kombiniert werden können. Bei dem Standardsystem ist die Doppelkupplung ebenfalls auf der Hohlwelle über ein Stützlager axial sowie radial gelagert, und die Schwingungsdämpfung erfolgt über einen außen liegenden Bogenfederdämpfer mit schwimmendem Flansch und vorgespannter, spielfreier Steckverzahnung. Diese Konstruktion ist für Diesel- und Benzinmotoren mit hoher Schwingungsanregung geeignet.

Eine weitere Variante des Systems besteht in einer Lösung aus starrem Schwungrad und zwei Kupplungsscheibendämpfern in Verbindung mit partieller Mikroschlupfregelung, welche für Motoren mit geringer Anregung zum Einsatz kommen kann. Bei diesem Konzept wird die Doppelkupplung axialelastisch an das starre Schwungrad angeschraubt und radial gelagert (Bild 7). Die aus der Kupplungsbetätigung resul-

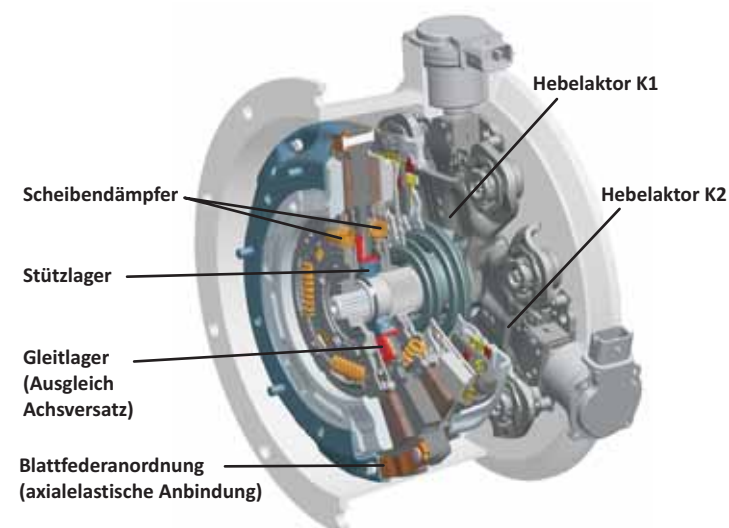


Bild 7 Doppelkupplungssystem mit Kupplungsscheibendämpfer des Getrag 6DCT250

tierenden Axialkräfte werden allerdings über ein radial schwimmendes Stützlager auf der Hohlwelle des Getriebes abgestützt. Die radiale Verschiebbarkeit der Stützlageranbindung zur Doppelkupplung wird über ein speziell entwickeltes, trocken laufendes Axialgleitlager realisiert und ist notwendig, damit ein Achsversatz zwischen Motor und Getriebe keine unzulässig hohen Verspannkkräfte erzeugt.

Die weggesteuerte Verschleißnachstellung wird bei der Doppelkupplung für das Getrag 6DCT250 durch die Hauptkomponenten Kupplungsdeckel mit Nachstell- und Sensieringrampen und je Teilkupplung durch einen Verstellrampenring, einen Sensieram-

frei gibt. Wird nun die Kupplung als Folge eines Schaltvorgangs wieder komplett geöffnet, so nimmt die Hebelfeder durch die Verdrehung des Sensierings eine neue Position ein. Dies ermöglicht, dass auch der federvorgespannte Verstellring sich um ein weiteres Inkrement verdrehen kann und damit der Nachstellvorgang abgeschlossen wird. Da der Nachstellvorgang des Verstellrings bei dieser weggesteuerten Nachstellung in der geöffneten Kupplungsposition erfolgt, können durch die Verdrehung der Verstellringe beider Kupplungen nahezu alle Einbautoleranzen ausgeglichen werden. Dies ist besonders vorteilhaft für eine einfache Montage der Doppelkupplung in das Getriebe.

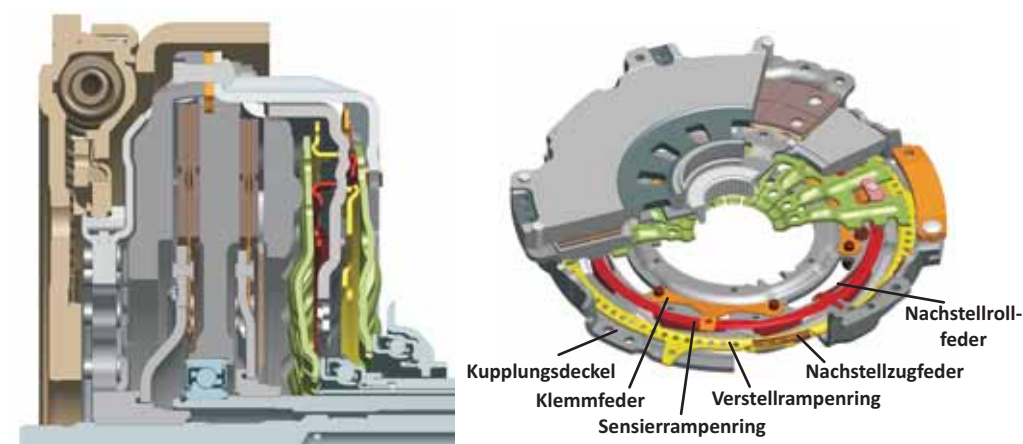


Bild 8 Weggesteuerte Verschleißnachstellung für Doppelkupplungen

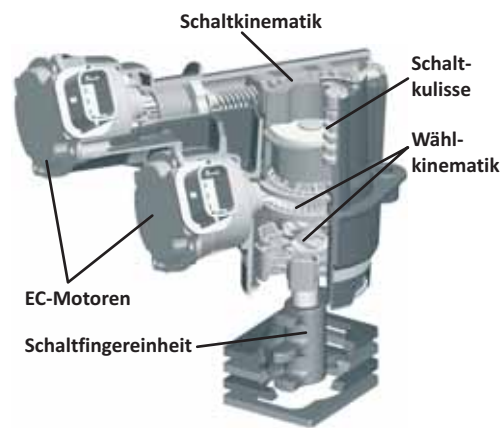


Bild 9 Elektromechanischer Getriebeaktor mit Active Interlock

Bei einem DKG mit einer elektromechanischen Kupplungsaktorik ist es naheliegend, dass auch die Getriebeaktorik elektromechanisch ausgeführt wird.

Ein Beispiel für solch eine Getriebeaktorik ist der Active Interlock Aktor von LuK (Bild 9) [8]. Durch die spezielle Konstruktion der Schaltfinger ist es möglich, die Gänge in beiden Teilgetrieben in beliebiger Kombination vorzuwählen und zu schalten. Die Schaltfingereinheit mit den Sperr- und Auswer-

ferementen bildet die Schnittstelle zur inneren Schaltung des Getriebes. Das Einlegen der Gänge erfolgt mit dem Schaltfinger ganz analog zur Betätigung von Handschaltgetrieben. Das Besondere beim Active Interlock ist, dass durch die Sperr- und Auswerferelemente sichergestellt wird, dass vor dem Einlegen eines Ganges alle Gänge desselben Teilgetriebes ausgelegt sind. Durch diese einfache mechanische Sicherung kann auf zusätzliche Sensoren zur Gangerkennung und die zugehörigen Überwachungs- und Notlaufstrategien vollständig verzichtet werden. In Kombination mit der kostengünstigen Konstruktion der Mechanik ist dadurch ein sehr leistungsfähiger Getriebeaktor entstanden, der zusammen mit dem zuvor beschriebenen Hebelaktor die Kupplungs- und Gangbetätigung für ein DKG komplettiert.

Ansteuerung und Systemeigenschaften trockener Doppelkupplungssysteme

Das große Interesse der Automobilhersteller an dem trockenen Doppelkupplungssystem ist sehr stark geprägt durch die Hauptvorteile des sehr hohen Wirkungsgrads und der sehr guten Fahreigen-

schaften. Es gibt jedoch auch noch weitere, nicht zu vernachlässigende Vorteile. So ist ein trockenes Doppelkupplungssystem speziell mit elektromechanischer Betätigung wartungsfrei und sehr robust gegen Verschmutzung und Umwelteinflüsse. Ferner ist die Montage im Getriebe- und Motorenwerk sehr einfach möglich. In vielen Fällen kann auch auf ausgereifte Systemkomponenten wie Verschleißnachstellsysteme, Betätigungssysteme mit entsprechenden Aus- und Einrücklagern und Dämpfertechnologien zurückgegriffen werden.

Im Rahmen einer Serienentwicklung darf jedoch nicht das komplexe Zusammenspiel aller Antriebsstrangkomponenten vernachlässigt werden. Dies kann jedoch sehr gut durch neu geschaffene 2D und 3D Systemsimulationswerkzeuge unterstützt werden. Besonders zu nennen sind hierbei Berechnungsmodelle, die alle möglichen Kopplungsmechanismen im Gesamtsystem beschreiben und mit welchen alle denkbaren Betriebsbedingungen per Simulation vorausgerechnet werden können. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 10 dargestellt.

Bei den Serienentwicklungsprojekten hat sich gezeigt, dass speziell die Optimierung des Schwingungs- und Geräuschverhaltens eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwicklung eines DKG darstellt. Hierbei steht nicht nur die klassische Torsionsdämpferabstimmung im Vordergrund, sondern es ergeben sich durch das komplexe Zusammenspiel der zwei Kupplungen mit der Getriebestruktur rückgekoppelte Schwingungsmodi, welche jedoch über eine Vielzahl von Systemparametern abgestimmt werden können.

Ein Beispiel hierfür ist die Modulation des Kupplungsdrehmoments durch die Axialbewegung der Getriebeeingangswellen, welche durch die Schrägverzahnung der Getriebezahnräder und die daraus resultierende Betätigung der Kupplung verursacht wird. In diesem Fall liegt eine Rückkopplung zwischen Axialbewegung und Torsionsschwingung vor, was die Ursache für zusätzliche Geräusche sein kann. Mit der Abbildung der Systemstruktur in einem geeigneten Simulationsmodell kann jedoch auch für dieses Schwingungsphänomen gezeigt werden, dass je nach Gestaltung der Systemparameter instabiles oder auch stabiles Verhalten vorliegt. Im Falle eines stabilen Verhaltens kann man von hoher Systemdämpfung sprechen, was bedeutet, dass keine zusätzliche Geräuschbelastung vorliegt. Das Ergebnis einer Parameterstudie bezüglich dieser rückgekoppelten Schwingungsform ist in Bild 11 dargestellt.

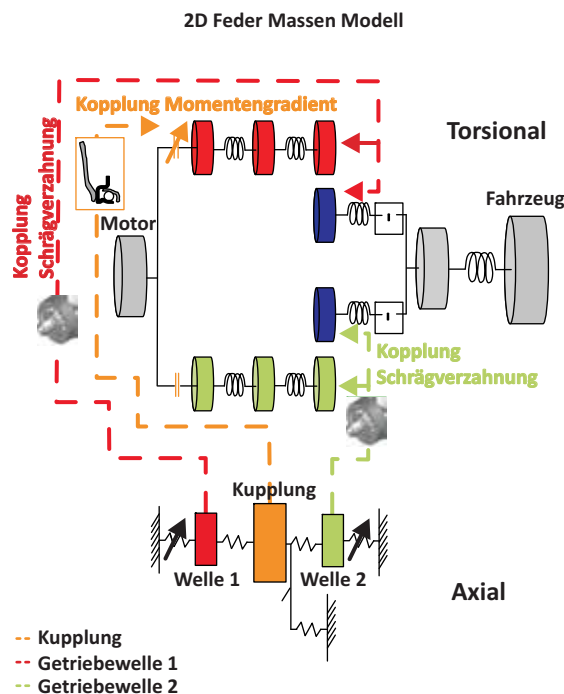


Bild 10 Simulationsmodelle für DKG (Kopplung zwischen Axial- und Torsionsschwingungsmodi)

3D Systemsimulations Modell

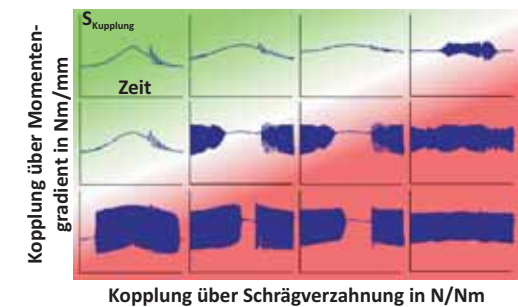
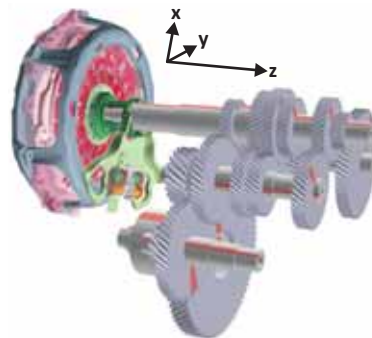


Bild 11 Parameterstudie Systemverhalten von DKG

Neben den Hardwarekomponenten ist für ein exzellent arbeitendes DKG eine geeignete Steuerungssoftware erforderlich, welche die spezifischen Besonderheiten eines trockenen Systems berücksichtigt.

Wesentliche Komponenten dieser Software sind

- die Kupplungssteuerung
- die Getriebesteuerung
- das Koordinationsmodul (regelt das Zusammenspiel zwischen Kupplung und Getriebe)
- die Gangauswahl (Bestimmung der Schaltpunkte)

Ergänzt werden diese Basiskomponenten durch ein Diagnosemodul, welches die Erkennung von Defekten im System zur Aufgabe hat, sowie ein Sicherheitskonzept, dessen Aufgabe das Ausschließen sicherheitskritischer Situationen ist. Die Anforderungen an dieses in der Software implementierte Sicherheitskonzept leiten sich dabei, ausgehend von einer Gefährdungs- und Risikoanalyse, über das funktionale und technische Sicherheitskonzept ab. Ein Beispiel hierfür ist die Verspannungserkennung, welche ein ungewolltes Verspannen des Getriebes absichert.

Eine wesentliche Voraussetzung für eine optimale Steuerungssoftware ist die genaue Kenntnis der Kupplungs- und Aktoreigenschaften, deren Veränderungen in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen und der Lebensdauer sowie deren Grenzen. So werden in den aktuellen Serienprojekten wesentliche Kennlinienparameter wie Tastpunkt, Reibwert und Hysterese permanent online adaptiert. Weitere bekannte Effekte wie Temperatur-, Leistungs- und Drehzahleinflüsse sowie Übersprechen werden entsprechend vorgehalten.

Um jedoch insgesamt das Optimum hinsichtlich Effizienz und Fahrkomfort zu erzielen, ist auch ein gutes Zusammenspiel mit der Motorsteuerungssoftware von essentieller Bedeutung.

Zusammenfassung und Ausblick

Das trockene DKG hat sich durch erfolgreiche Serienanläufe in verschiedenen Fahrzeugen der Kompaktklasse als vollwertiges Automatikgetriebe etabliert und durch den sehr guten Systemwirkungsgrad einen wichtigen Beitrag zur CO₂ Reduzierung geleistet. Bedingt durch Bauraumrestriktionen und durch die Festlegung auf ein spezielles Aktorkonzept für die Kupplungs- und Getriebesteuerung, mussten zum Teil unterschiedliche trockene Doppelkupplungsanordnungen entwickelt werden. Dies jedoch zeigt, dass mit modernen Kupplungstechnologien geeignete Lösungen für fast alle möglichen Anwendungen für einen Drehmomentbereich von 150 - 350 Nm gefunden werden können. Für eine erfolgreiche Entwicklung eines trockenen Doppelkupplungssystems muss von Beginn an ein großes Augenmerk auf die Beschreibung und Simulation des Systemverhaltens gelegt werden, da nur damit das Optimum bezüglich Wirkungsgrad, Komfort und Dauerhaltbarkeit realisiert werden kann.

Die Weiterentwicklung des Systems wird in den nächsten Jahren wahrscheinlich in zwei Richtungen verlaufen. Zum einen wird speziell für kleine Fahrzeuge mit Drehmomenten von 120 - 180 Nm ein kompaktes, trockenes Doppelkupplungssystem benötigt, zum anderen müssen in ähnlichen Bauräumen wie die der aktuellen Systeme noch höhere Drehmomente abgedeckt werden können. Mit dem umfangreichen Systemwissen wird es LuK möglich sein, Lösungen für die steigenden Komfortanforderungen anzubieten und die trockene Doppelkupplung auch in den Fahrzeugen der Mittelklasse verstärkt einzusetzen. Bei der Erweiterung der Antriebstränge um Hybridfunktionen wie Stopp-Start, elektrisches Fahren sowie Rekuperation in Verbindung mit zusätzlichen Elektromotoren und geeignete Batterien stellt das trockene DKG mit elektromechanischer Betätigung eine ideale Ausgangsbasis dar.

Literatur

- [1] Kimmig, K.-L.; Agner, I.: Doppelkupplungen – Nass oder trocken, das ist hier die Frage, 8. LuK Kolloquium, 2006
- [2] Wagner, U.; Berger, R.; Ehrlich, M.; Homm, M.: Elektromotorische Aktorik für Doppelkupplungsgetriebe, 8. LuK Kolloquium, 2006
- [3] Reik, W.: Die Kupplung, das Herz des Doppelkupplungsgetriebes – Ein Blick in die Zukunft; 5th International CTI Symposium, 2006
- [4] Schäfer, M.: Die Steuerung des neuen Doppelkupplungsgetriebes von Volkswagen; 6th International CTI Symposium, 2007
- [5] Jäggle, G.; Berger, R.; Boeuf, J.: Systemauslegung von Doppelkupplung und Betätigung, VDI Tagung, 2007
- [6] Kimmig, K.-L.; Wagner, U.; Berger, R.; Bühle, P.; Zink, M.: Kupplungssysteme für hocheffiziente Doppelkupplungsgetriebe, VDI Tagung, 2008
- [7] Wagner, U.; Bühle, P.; Müller, B.; Kneissler, M.; Kimmig, K.-L.; Trockene Doppelkupplungssysteme Innovative Komponenten für hocheffiziente Fahrzeuggetriebe; ATZ November 2009
- [8] Pollak, B.; Kneißler, M.; Esly, N; Norum, V; Hirt, G.: Elektromechanische Aktorik – So kommen Getriebesysteme in die Gänge, 7. LuK Kolloquium, 2002
- [9] Kimmig, K.-L.: Die selbsteinstellende Kupplung SAC der 2. Generation, 6. LuK Kolloquium, 1998