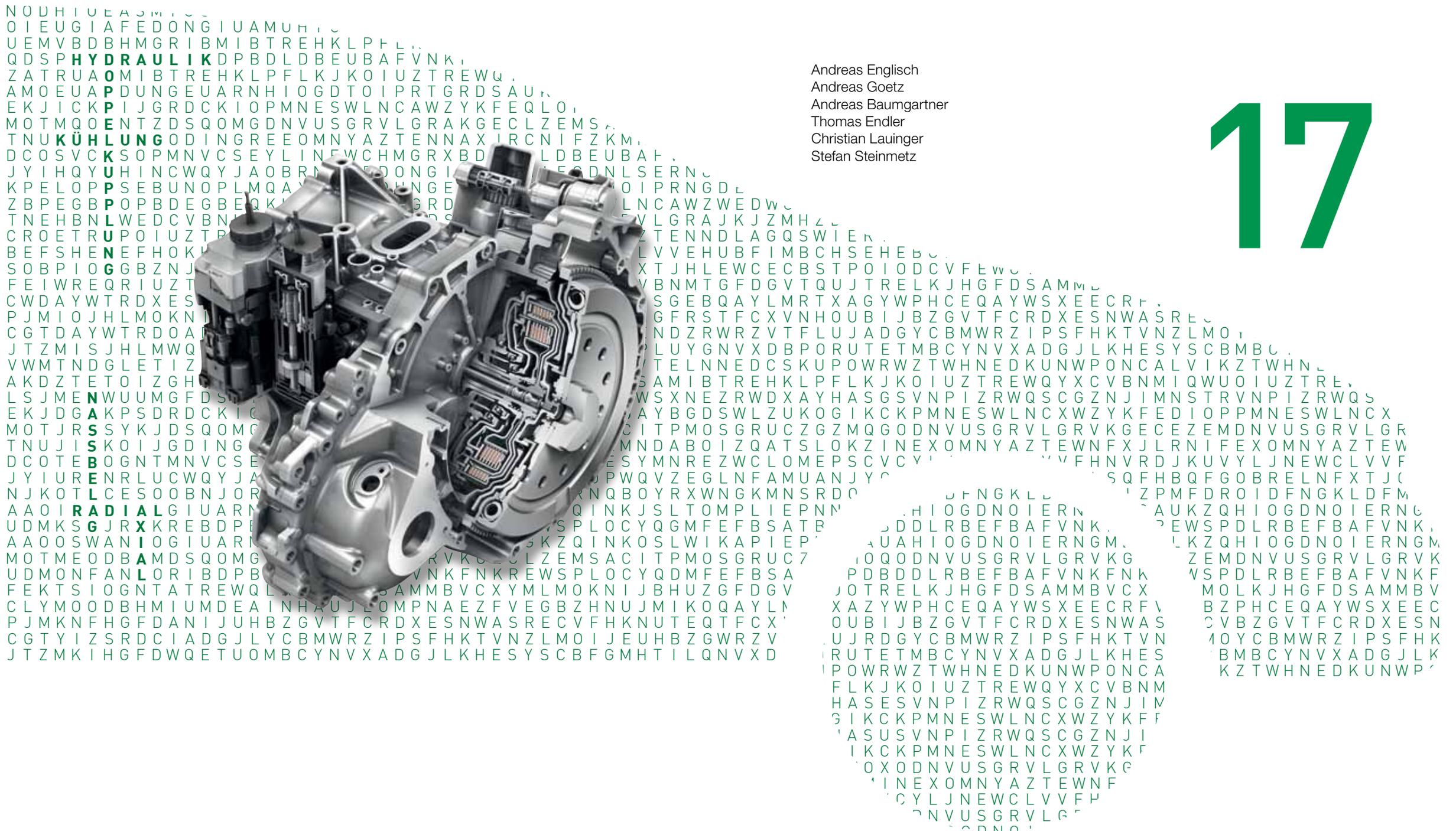


Nasse Doppelkupplung: Denken in Systemen

Andreas Englisch
Andreas Goetz
Andreas Baumgartner
Thomas Endler
Christian Lauinger
Stefan Steinmetz

17



Einleitung

Status

In 10 Jahren wird der Anteil der nassen und trockenen Doppelkupplungsgetriebe (DCT) bei ca. 20 % bezogen auf den gesamten Automatikgetriebemarkt liegen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich für den Kunden die Frage, welches Doppelkupplungssystem für seine Anwendung das richtige ist. Sowohl trockene als auch nasse Doppelkupplungen haben sich in der Serie bewährt. Innerhalb der Systeme gibt es unterschiedliche Bauweisen und verschiedene Formen der Aktuierung. Wesentliche Unterschiede bestehen in der Drehmomentkapazität, dem Bauraumbedarf, Gewicht und Massenträgheit [1].

Zwischenzeitlich wurde bei LuK eine ganze Reihe von nassen Doppelkupplungs-

systemen entwickelt, um unterschiedlichste Applikationen bedienen zu können. Seit 2013 wird die erste nasse Doppelkupplung in Serie produziert.

Neben den eigentlichen Doppelkupplungen umfasst das Portfolio auch ergänzende Komponenten wie Dämpfer, Fliehkraftpendel und Aktoren. Der Fokus liegt auf einem perfekt aufeinander abgestimmten Gesamtsystem, um den Zielgrößen Komfort, Verbrauch und Kosten optimal gerecht werden zu können. Gleichzeitig werden Komponenten und Baugruppen standardisiert, um so Volumina bündeln zu können. Damit kann Schaeffler attraktive Lösungen anbieten.

Im Zuge der Entwicklung wurden die unterschiedlichen Konzepte auf breiter Basis analysiert und gegenübergestellt. Die Komponenten der Kupplung wurden im Detail untersucht und entsprechend weiterentwickelt.

Besonders das tribologische System (bestehend aus Belaglamelle, Stahllamel-

le und Öl) hat dabei eine zentrale Bedeutung in der Auslegung und für das Komfortverhalten der Kupplung. Neben der Untersuchung von unterschiedlichen Belägen und Belagtechnologien, spielen Geometrie, Nutzung sowie Kühlöl- und Pressungsverteilung eine große Rolle. Darüber hinaus werden die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen genutzt, um eigene Beläge für nasse Kupplungen zu entwickeln.

All diese Funktionen beeinflussen ganz entscheidend den Verbrauch, den Komfort und natürlich auch die Kosten des Systems.

Design

Kupplung

Entsprechend der vorgegebenen Bauraumsituation können nasse Doppelkupplungen in radialer und axialer Bauweise ausgeführt werden. Die unterschiedlichen Bauweisen bieten je nach Anwendung verschiedene Vorteile.

Die axiale Bauweise erlaubt eine Minimierung der Trägheitsmomente bezogen auf die Getriebeeingangswelle. Außerdem bietet sich so die Möglichkeit, beide Kupplungen unabhängig voneinander zu kühlen und so die Schleppverluste der offenen Kupplung weiter zu reduzieren. Die radiale Bauweise stellt für Front-Quer- und Heck-Längs-Applikationen nach wie vor die bevorzugte Lösung dar. Der Trend zu möglichst geringen Massenträgheiten könnte auch bei Queranwendungen axiale Lösungen zukünftig interessanter werden lassen.

Beide Systeme können wahlweise mit einem Fliehkraftpendel im Nassraum kombiniert werden – damit kann ein weiterer Beitrag zur Reduzierung des Verbrauchs und der Verbesserung des Komforts geleistet werden. Bild 2 zeigt Kupplungen für 180 Nm mit sehr kompakten Abmessungen und in die Kupplung integriertem Fliehkraftpendel. Teilweise gelingt es mit Hilfe eines Fliehkraftpendels, den gesamten Bauraumbedarf sogar zu reduzieren, da zusätzliche Sekundärmasse am Zweimassenschwungrad (ZMS) eingespart werden kann.

Die Kundensicht

Der Kunde wird bei der Auswahl des Systems vor eine Reihe schwieriger Entscheidungen und Fragen gestellt, welche die Architektur des Kupplungssystems maßgeblich beeinflussen.

- Welche Motoren sollen in der Zukunft bedient werden?
 - Sind 3- und 2-Zylinder-Applikationen zu berücksichtigen?
 - Müssen Zylinderabschaltungen berücksichtigt werden?
 - Welche minimalen Fahrdrehzahlen sollten erreicht werden?
- Welche Maßnahmen zur weiteren Absenkung des Verbrauchs sollen berücksichtigt werden?
 - Ist eine Hybridisierung des Antriebsstrangs vorgesehen?
 - Welche maximalen Drehmomente sind zu berücksichtigen?
 - Welche Aktuierung der Kupplung ist vorzusehen?
- Wie wirken sich diese Maßnahmen auf Verbrauch und Fahrleistungen aus?
- Welches Öl und welcher Ölvolumenstrom wird für die Kühlung und ggf. für die Aktuierung der Doppelkupplung benötigt?

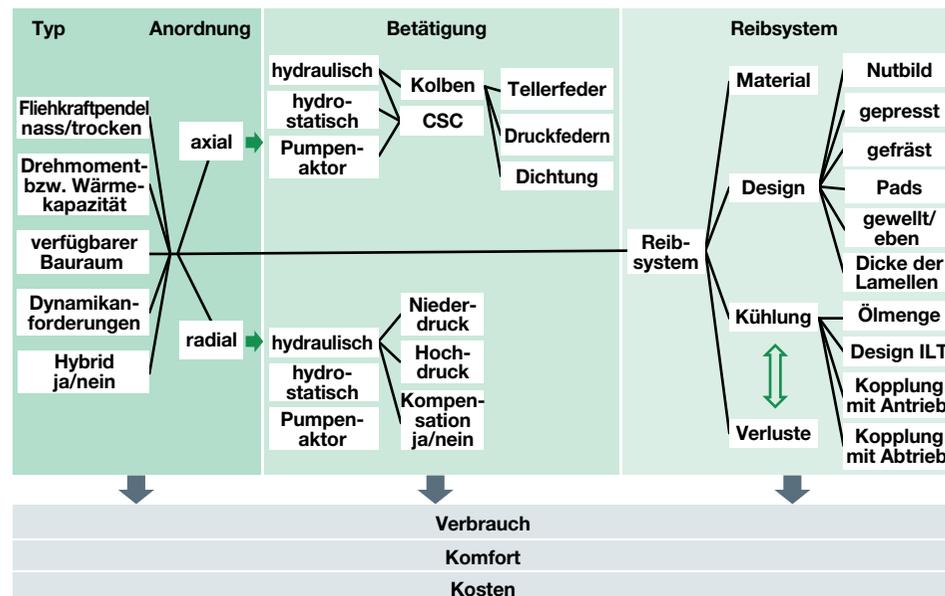


Bild 1 System „Nasse Doppelkupplung“

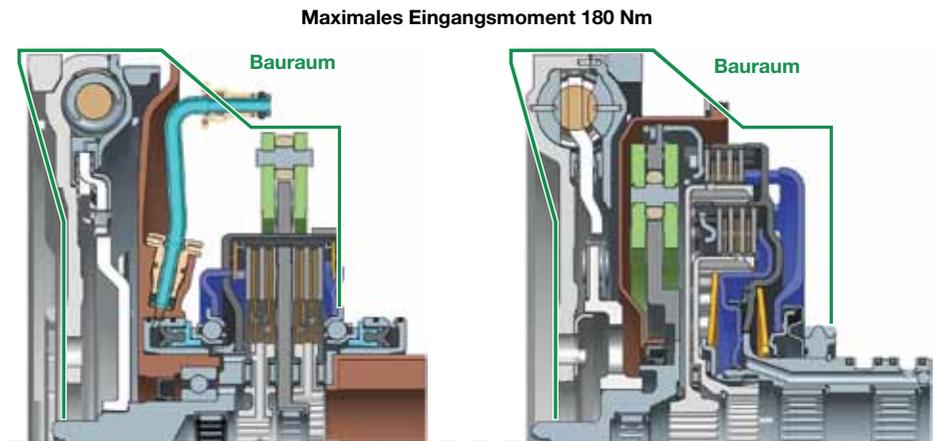


Bild 2 Nasse Doppelkupplung für 180 Nm in axialer und radialer Ausführung mit Fliehkraftpendel [2]

Fliehkraftpendel im Nassraum

Der Einsatz des Fliehkraftpendels in der nassen Doppelkupplung ermöglicht eine deutliche Absenkung der Fahrdrehzahlen

und damit des Verbrauchs. Bild 3 zeigt die Qualität der Entkopplung durch das Fliehkraftpendel auf der Grundlage einer Anregung durch einen 3-Zylinder-Motor. Der Motor kann damit ohne Einbußen im Komfort bei sehr geringen Drehzahlen betrieben werden.

Aufgrund des geringen zusätzlichen Bauraumbedarfs im Nassraum können solche Lösungen in fast jedem Getriebe prob-

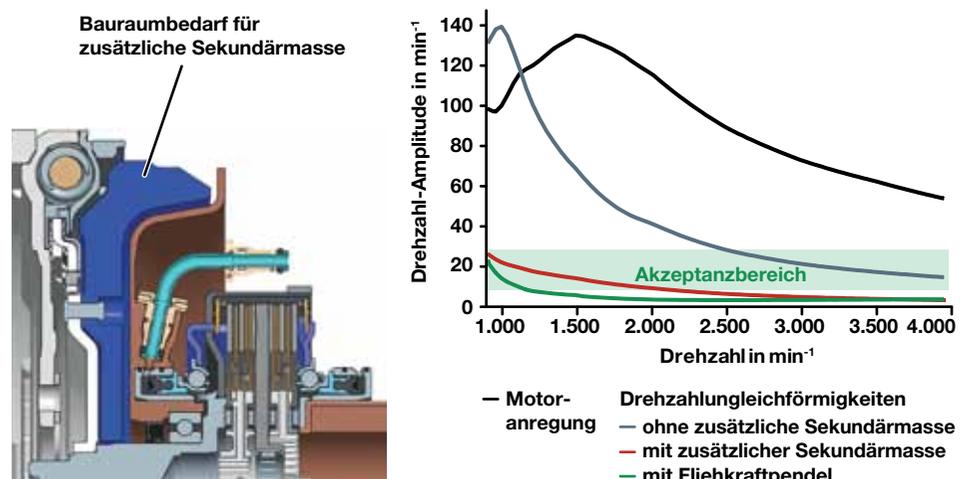
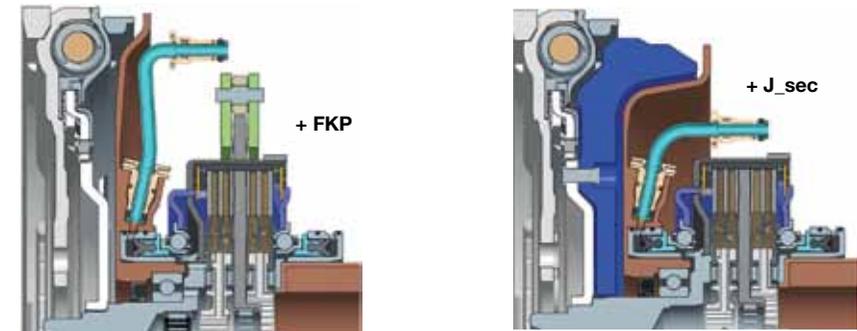


Bild 3 Qualität der Schwingungsentkopplung mit 3-Zylinder-Motor [2]



	+ FKP	+ J_sec
Gesamträgheitsmoment sekundär in kgm ²	0,040	0,105
Gewichtsunterschied in kg	0	+ 7,0
zusätzliche erforderliche Axiallänge in mm	0	10
Wegunterschied nach 4 s in m	0	- 1,9
Beschleunigungszeit von 0 auf 100 km/h in s	0	+ 4,1

Bild 4 Doppelkupplung mit und ohne Fliehkraftpendel: Unterschiede im Massenträgheitsmoment, im Gewicht, in der axialen Baulänge sowie in den Fahrleistungen

lemlos umgesetzt werden. Der Einsatz des Pendels erlaubt neben der Reduzierung der minimalen Fahrdrehzahlen eine Reduzierung der Gesamtmasse von Kupplung und ZMS und damit auch der Massenträgheit. Dies resultiert insbesondere bei kleineren Motoren in einer verbesserten Dynamik bei gleichzeitig geringerem Verbrauch. Der Vergleich der Fahrleistungen eines entsprechend ausgestatteten Fahrzeugs dokumentiert die positiven Effekte ebenfalls (Bild 4).

liche Wirkungsgradvorteile realisiert werden können. Dies spiegelt sich in Bild 5 wieder: Kupplungs- und Gangaktorik tragen nur mit 4,6 % zu den Gesamtgetriebeverlusten im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) bei. Jedoch müssen einzelne Betriebspunkte intensiv untersucht werden, wenn es zum Beispiel um den Einsatz bei tiefen Temperaturen (-20 °C bis -30 °C) geht.

Die hydraulischen Systeme bieten den Vorteil hoher Leistungsdichte, gleichzeitig ist aber eine permanente Leistungsaufnahme erforderlich.

Eine Kombination aus Kupplung, Concentric Slave Cylinder (CSC), hydrostatischem Kupplungsaktor und Gangaktor stellt energetisch die beste Variante dar. Um dies zu verifizieren, werden mit einem detaillierten Modell des Antriebsstrangs Verbrauchssimulationen durchgeführt und damit die Effizienz der einzelnen Komponenten bewertet. Weiterhin können unterschiedliche Konzepte, zum Beispiel für die verwendete

Aktuatorik

Die Betätigung der Kupplung kann hydraulisch, hydrostatisch oder mit sogenannten Pumpenaktoren erfolgen. Hydrostatische Systeme (HCA) bieten den Vorteil, dass Power-on-Demand Systeme und damit deut-

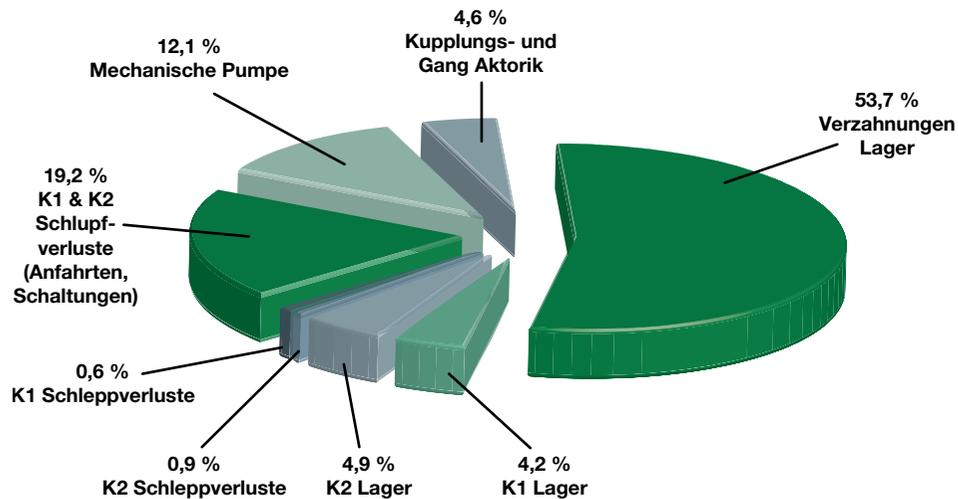


Bild 5 Aufteilung der Getriebeverluste im NEFZ für 180 Nm DCT mit HCA und Gangaktorik

Niederdruckpumpe und deren Betriebsstrategie für die Kupplungs- und Lagerbeölung, bewertet werden.

Das Ergebnis der NEFZ-Simulation (Bild 5) zeigt, dass die DCT-spezifischen Verluste aus Aktorik- und Kupplungsschleppverlusten auf einen Bruchteil der mechanischen Verluste reduziert werden können.

Bild 5 zeigt ergänzend, dass die in der Berechnung zugrundegelegte primärseitig angetriebene Niederdruckpumpe einen Anteil von 12,1 % an den Gesamtverlusten aufweist. Eine deutliche Reduzierung dieses Anteils an den Gesamtverlusten auf etwa 3 % ist möglich, wenn die mit Motordrehzahl angetriebene Pumpe durch eine elektrisch angetriebene ersetzt wird (Bild 8). Grund dafür ist der geringe Zeitanteil von ca. 9 % während der Anfahrten oder Schaltungen, in welchem ein höherer Kühlölvolumenstrom für die schlupfende Kupplung unter Last zur Verfügung gestellt werden muss. Dagegen kann mit deutlich höheren Zeitanteilen von ca. 70 % (Start-Stopp hier berücksichtigt) die Pumpe bei kleiner Drehzahl und damit geringerer Antriebsleistung betrieben werden, um die Mindestölmenge

für die nicht betätigte Kupplung sowie die Lager bereitzustellen.

Für beide Pumpenkonzepte wirkt sich auch ein bereits oben erwähnter Aspekt positiv aus: Aus der optimierten Nutgeometrie der Belaglamellen ergibt sich eine verbesserte Ölverteilung mit deutlich reduzierter Kühllölmenge. Dadurch kann die Pumpe für ein geringeres Fördervolumen ausgelegt werden.

Dynamik

In den vorangegangenen Abschnitten wurde auf die Vorteile der hydrostatischen Betätigung mit HCA, insbesondere die geringen Anteile der Kupplungsaktorik an den Gesamtgetriebeverlusten im NEFZ hingewiesen. In diesem Abschnitt wird das dynamische Verhalten der Strecke, bestehend aus hydrostatischem Kupplungsaktor, dem CSC und der Kupplung, anhand von Messungen erläutert.

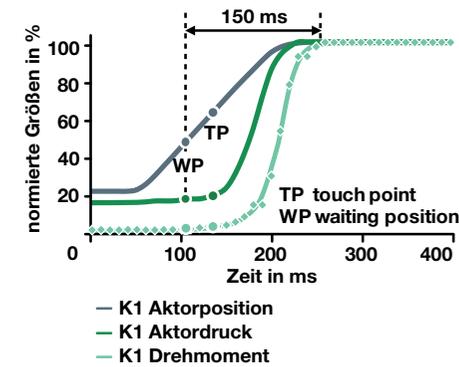


Bild 6 Messung der Dynamik von Kupplung K1: dargestellt sind die normierten Größen Aktorposition, Aktordruck sowie das durch K1 übertragene Drehmoment.

Bild 6 zeigt den gemessenen Verlauf einer Kupplungsbetätigung der K1. Die gezeigten Größen sind auf die jeweiligen Maximalwerte normiert, um eine einheitliche Darstellung zu ermöglichen. Ausgehend von einem Anfangswert von ca. 21 % erfolgt nach 50 ms die Veränderung der Aktorposition. Aufgrund der Kupplungskennlinie muss zunächst das Lüftspiel überwunden werden, bis der „Touch Point“ (TP) erreicht ist. Ab dieser Position erfolgt der Druckaufbau in der Aktorik und mit einer geringen Zeitverzögerung der Aufbau des Drehmoments durch die Kupplung K1. Nach ca. 200 ms hat die Aktorposition den Zielwert (100 %) erreicht, der in diesem Fall dem maximalen Antriebsmoment gemäß Auslegung entspricht. Bis der maximale Druck aufgebaut ist, vergehen ca. 100 ms. Bereits 120 ms nach Beginn des Druckaufbaus wird das volle Drehmoment übertragen. Die Messdaten stammen von einem 550 Nm-DCT. Bei kleineren Kupplungen und damit geringeren Betätigungskräften kann die Dynamik noch weiter erhöht werden.

Um in einer realen Fahrsituation die Zeitdifferenz zwischen Beginn der Änderung der Aktorposition und Erreichen des

gewünschten Drehmoments möglichst klein zu halten, wird die Aktorposition der nicht betätigten Kupplung nicht auf 0 mm gefahren, sondern im Bereich des Lüftspiels in eine Warte position (WP) etwas unterhalb des TP. Auf Seite 253 wird das Reibsystem näher beschrieben. Dort werden Maßnahmen aufgeführt, um die Schleppverluste in den Kupplungen zu minimieren. Mit diesen Maßnahmen ist es möglich, sowohl den Abstand der Warte position vom TP, als auch das Schleppmoment durch die nicht betätigte Kupplung möglichst gering zu halten. Damit werden kurze Betätigungszeiten für das Einstellen eines gewünschten Drehmoments erreicht.

Axiale oder radiale Bauweise

In diesem Abschnitt werden Doppelkupplungen in axialer und radialer Bauweise detaillierter verglichen. Basis ist wiederum die NEFZ-Simulation und es wird der Anteil der Einzelkomponenten an den Getriebe gesamtverlusten diskutiert. Gemäß Bild 2 ist das Konzept in axialer Bauweise mit zwei nasslaufenden Ausrücklagern mit CSC ausgestattet. Für das Konzept in radialer Bauweise werden Dreheinführungen mit Gleitdichtringen betrachtet. Prinzipiell kann aber auch eine radial angeordnete Doppelkupplung über CSC betätigt werden.

Die Schleppmomente von K1 und K2 und die daraus resultierenden Anteile an den Getriebe gesamtverlusten (Bild 8) sind, bedingt durch die geometrischen Verhältnisse, für die axiale Anordnung ca. 1 %-Punkt kleiner als für das radiale Konzept. Die Schleppmomente werden auf Basis von Messungen auf die NEFZ-Betriebspunkte

umgerechnet. Auf Seite 253 werden die Messungen zu Schleppverlusten unterschiedlicher Lamellengeometrien näher beschrieben.

Teller- oder Druckfedern

Der Einsatz von Tellerfedern zum Lüften der Kupplung stellt eine bauraumgünstige Alternative zur Spiralfeder dar. Es stellt sich also die Frage, wie sich diese Elemente bzgl. der Hysterese der Kupplung darstellen. Dabei muss eine Tellerfederlösung nicht automatisch zu höheren Hysteresewerten führen. Das dargestellte Beispiel zeigt, dass bei richtiger Auslegung von Tellerfeder, der Anlageflächen und des Gesamtsystems durchaus vergleichbare Hysteresewerte im Vergleich zu Druckfederlösungen möglich sind.

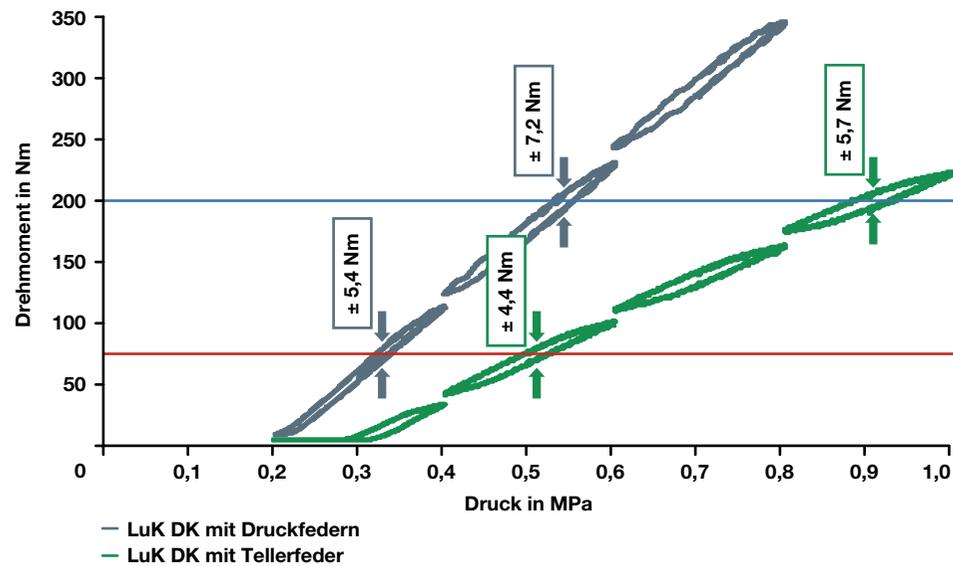


Bild 7 Vergleich der Kupplungshysterese

Dreheinführung oder CSC

Dreheinführungen kommen heute in vielen Doppelkupplungsgetrieben zum Einsatz und stellen eine robuste Lösung in Verbindung mit hydraulischen Systemen dar. Als Alternative können nasslaufende Ausrücklager mit CSC eingesetzt werden, deren Verluste im Vergleich zur Dreheinführung deutlich geringer ausfallen. Anwendungen bis 700 Nm sind derzeit in der Entwicklung.

Weiterhin weist das Lagerkonzept der axialen Anordnung mit einem Rillenkugellager, vier Axialnadellagern sowie zwei Ausrücklagern für CSC gegenüber den Gleitdichtringen einen Vorteil von mehr als drei Prozentpunkten Verlust auf. Auch hier werden Messwerte auf die NEFZ-Betriebspunkte umgerechnet. Darüber hinaus bietet das CSC die Möglichkeit, geometrische Abweichungen in der Kupplung in Analogie zum trockenen System zu minimieren.

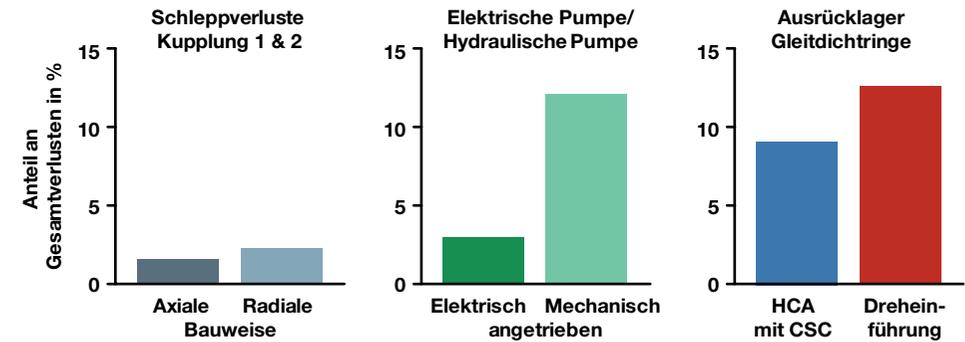


Bild 8 Vergleich axiale und radiale Bauweise: Anteil der K1/K2-Schleppmomente, sowie der Lager (mit CSC) bzw. der Gleitdichtringe für Dreheinführungen an den Gesamtverlusten im NEFZ

Das Reibsystem

Design

Wellung und Nutung spielen eine wesentliche Rolle für die Funktion der nassen Kupplung. Außerdem beeinflusst das Fertigungsverfahren den Reibwertaufbau und die

resultierenden Schleppverluste wesentlich. Darüber hinaus spielen geometrische Merkmale des Belages eine wesentliche Rolle bei der Gleichförmigkeit der Drehmomentübertragung. In Abhängigkeit vom Volumenstrom steigen die Schleppmomente der Kupplung deutlich an.

Ziel der Entwicklung muss also eine Minimierung des Kühlölvolumenstromes, eine optimale Nutgeometrie und die richtige Wellung der Lamelle sein.

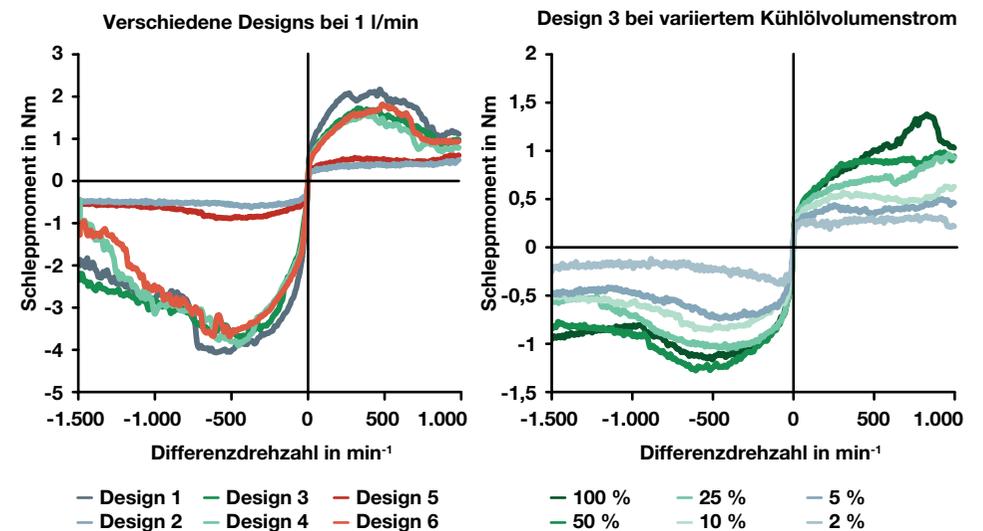


Bild 9 Einfluss der Lamellengeometrie auf die Schleppverluste

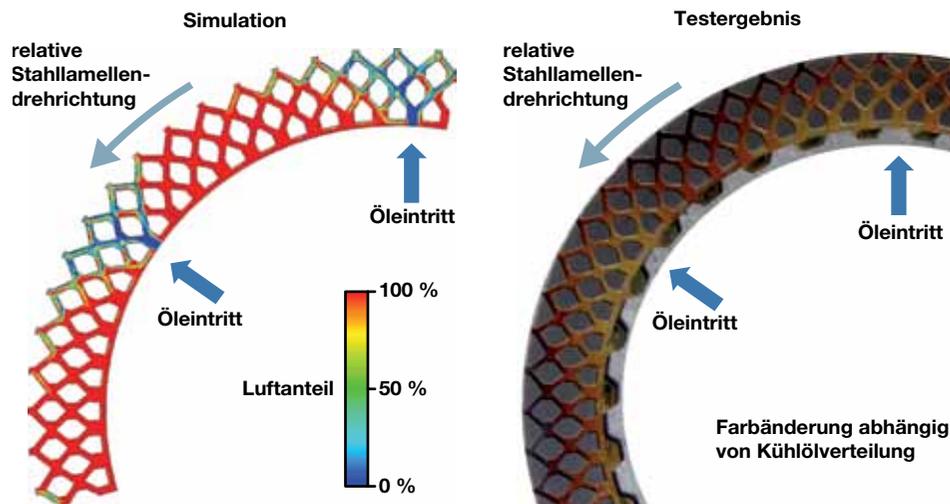


Bild 10 CFD-Analyse und Vergleich mit Testergebnissen

Kühlung

Die Kühlung wird durch die Anbindung der Reiblamellen (primär- oder sekundärseitig), die Gestaltung der Bohrungen im Innenlamellenträger und die Nutgeometrie des Belages stark beeinflusst.

Mittels CFD-Analysen (numerische Strömungsanalysen) können diese Effekte zwischenzeitlich auch durch Simulationen nachgewiesen werden. Die Darstellung in

Bild 10 zeigt den Einfluss des Bohr bildes im Innenlamellenträger und den Einfluss der Nutgeometrie.

Die Verfärbung der Lamellen zeigt deutlich die schlechter gekühlten Bereiche. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und der thermischen Belastung der Lamelle erkennbar.

Darüber hinaus muss die Dicke der Lamellen für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert werden.

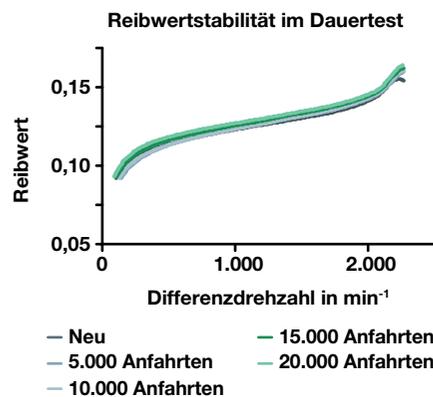


Bild 11 Dauertest mit LuK-Belag: 20.000 Anfahrten am Berg unter Vollast

Reiblamelle nach 20.000 Vollastberganfahrten



LuK-Belag

Innerhalb des tribologischen Systems kommt der Reiblamelle eine besondere Bedeutung zu. Sie beeinflusst wesentlich den Reibwert, den Reibwertgradienten, das Verschleißverhalten und die thermische Belastbarkeit der Kupplung. Deshalb hat LuK die Entwicklung eigener Doppelkupplungsbeläge forciert. Inzwischen konnte die Eignung von LuK-Belägen in Funktions- und Dauerlauf tests nachgewiesen werden (Bild 11). Die Kennlinien zeigen einen sehr ausgeprägten und stabilen positiven Verlauf des Reibwertgradienten. Ein reibwertinduziertes Rupfen der Kupplungen sollte damit zuverlässig ausgeschlossen werden können.

Parallel zur Weiterentwicklung der Eigenschaften nasser Doppelkupplungsbeläge wird deren Industrialisierung vorangetrieben.

lung, Kupplungs- und Gangaktorik kann die Effizienz des Gesamtgetriebes sicher gestellt werden.

LuK-eigene Reibbeläge für nasse Doppelkupplungen haben ihre DCT-Tauglichkeit gezeigt.

In der Kombination mit der Software ist es möglich, maßgeschneiderte Lösungen für jeden Kunden zu finden, die eine Verbesserung der Fahrleistungen, eine deutliche Erhöhung des Fahrspaßes und eine weitere Reduzierung des Verbrauchs erlauben.

In Verbindung mit modernen Hybridsystemen können damit zukunftsfähige Antriebstränge dargestellt werden, die hohen Komfort bei minimalem Verbrauch bieten.

Literatur

- [1] Zink, M.; Wagner, U.; Feltz, C.: Doppelkupplungssysteme – Modular und höchst effizient für den Antriebsstrang von morgen. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [2] Baumgartner, A.; Lauinger, C.; Lorenz, E.; Götz, A.; Fischer, N.; Krause, T.: Reducing CO₂ emissions with wet double clutch transmissions with a simultaneous improvement in comfort and driving dynamics. VDI Getriebe in Fahrzeugen, 2013

Nasse Doppelkupplung

Der Baukasten

Zwischenzeitlich können nasse Doppelkupplungen in radialer und axialer Bauweise für Drehmomente zwischen 100 Nm und 3.500 Nm angeboten werden (Bild 12). Die Doppelkupplungen können wahlweise auch mit Fliehkraftpendeln kombiniert werden.

Durch eine konsequente Optimierung der Komponenten Dämpfer, Kupplung,

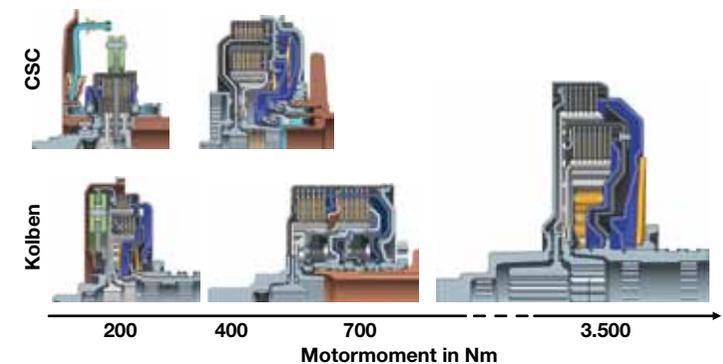


Bild 12 Baukasten