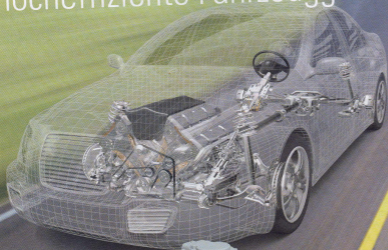


# Trockene Doppelkupplungssysteme

## Innovative Komponenten für hocheffiziente Fahrzeuggetriebe



Moderne Doppelkupplungsgetriebe von Volkswagen zeichnen sich durch hohe Dynamik und geringen Kraftstoffverbrauch aus. Besonders Getriebe mit trockener Doppelkupplung weisen einen exzellenten Wirkungsgrad auf. LuK zeigt hier auf, wie sowohl die Schleppmomente als auch der Leistungsbedarf für die elektromotorische Kupplungs- und Getriebebetätigung minimiert werden können.

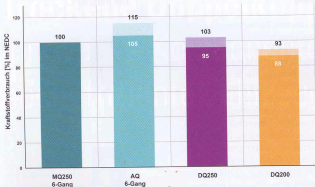
## 1 Einleitung

Trotz des enormen Entwicklungs- und Investitionsaufwandes, der für die Einführung eines neuen Automatikgetriebes notwendig ist, ist es wohl die Komponente im Antriebsstrang, die in den letzten Jahren die meisten konzeptionellen Innovationen durchlaufen hat. Ein wichtiges Ziel dabei war es, den Kraftstoffverbrauch der Automatikfahrzeuge deutlich zu senken. Darüber hinaus sollten durch innovative Getriebekonzepte gerade in den Märkten und in den Fahrzeugklassen, die noch einen geringen Automatikgetriebeanteil aufwiesen, neue Kunden gewonnen werden. Die Getriebetechnik, die diese Entwicklung ganz entscheidend beeinflusst hat, ist das Doppelkupplungsgetriebe (DKG). Die erste Serienanwendung war 2003 das Sechsganggetriebe als „Direktschaltgetriebe“ (DSG), intern DQ250, von Volkswagen auf Basis einer ölgekühlten, also „nassen“ Doppelkupplung. Durch das Potenzial dieses Getriebekonzeptes bei Kraftstoffverbrauch und Spontaneität ist es Volkswagen einerseits gelungen, neue Marktanteile zu gewinnen, andererseits war es mit diesen hervorragenden Eigenschaften auch Triebkraft für die Innovationen, die anschließend im Bereich der klassischen Automatikgetriebe stattgefunden haben.

Und so ist es denn auch nur eine logische Konsequenz, dass Volkswagen in einem zweiten Schritt mit dem Siebengang-DKG DQ200 eine Weiterentwicklung dieses Getriebekonzeptes umgesetzt hat, die auf eine weitere deutliche Verbrauchsreduzierung und die Ausweitung der Applikationen speziell auf Motoren unter 250 Nm abzielt. Die Kernkomponente des Siebengang-DKG, das im Frühjahr 2008 auf den Markt kam, ist die trockene Doppelkupplung von LuK, die über ein Zweimassenschwungrad an den Verbrennungsmotor angekoppelt und über ein Einrücksystem mit Hebeln von einer elektrohydraulischen Aktorik betätigt wird.

Wie in [1] beschrieben, kann durch den Einsatz der trockenen Doppelkupplung eine Wirkungsgradverbesserung von 6 % gegenüber einem DKG mit nassen Kupplungen erzielt werden. Der daraus resultierende Verbrauchsvorteil ist in **Bild 1** dargestellt. Ein Hauptgrund für diesen Wirkungsgradvorteil ist die Art der Kupplungskühlung. Während die





**Bild 1:** Kraftstoffverbrauch des Siebengang-DSG (DQ200) im Vergleich mit einem Handschaltgetriebe (MQ250), einem Wandlerturbinengetriebe (AQ250) und dem Sechsgang-DSG (DQ250) von Volkswagen in % [Quelle: Volkswagen AG [1]]

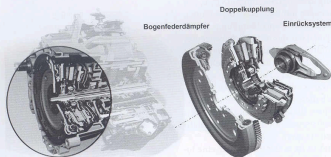
trockenen Kupplungen durch freie Konvektion mit Luft gekühlt werden, benötigt eine nasse Kupplung hierfür einen der jeweiligen Verlustleistung angepassten Ölstrom, der bei hohen Leistungen je nach Auslegung bei zirka 30 l/min liegt. Eine Reduzierung der maximalen Ölmenge würde zu einer entsprechenden Verringerung dieser Verluste führen, ist aber aus Sicht der Robustheit nicht zulässig. Selbst bei Verwendung spezieller Kupplungsbeläge würden durch die hohen Öltemperaturen die Additive des Öls derart geschädigt, dass die Anforderungen an die Reibeigenschaften nicht mehr erreicht werden könnten.

## 2 Anforderungen an ein Doppelkupplungssystem

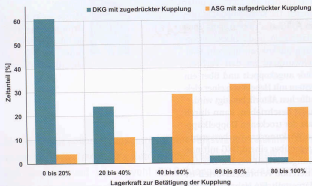
Die Anforderungen an Funktionsqualität und Robustheit einer trockenen Doppelkupplung sind ungleich höher als die an eine Einfachkupplung in einem Handschaltgetriebe. Neue Sicherheitsanforderungen, höhere Komfortansprüche und Betriebszustände mit höherer Leistung, wie zum Beispiel Lastschaltungen, sind die Hauptgründe hierfür und führen zu den folgenden Forderungen:

1. selbstöffnendes Verhalten bei Ausfall der Getriebesteuerung
2. hohe thermische Robustheit bei geringem Gewicht und begrenztem Bauraum
3. hohe Verschleißfestigkeit des Reibsystems und Konstanz der Systemkennlinie
4. Kompensation von Achs- und Winkelversatz zwischen Motor und Getriebe
5. sehr gute Isolation der vom Motor kommenden Drehungleichförmigkeit
6. Leistungsfähige und effiziente Aktorik für Kupplung und Getriebe.

Auf Basis der Erfahrung im Bereich der Einfachkupplungen für manuelle Getriebe, speziell auch durch den Einsatz in automatisierten Handschaltgetrieben (ASG), wurden für diese Anforderungen bei LuK mittlerweile verschiedene Serienkonzepte für Getriebe mit trockenen Doppelkupplungen entwickelt. In **Bild 2** ist die trockene Doppelkupplung mit Bogenfederdämpfer und Einrücksystem für das Siebengang-DSG von Volkswagen dargestellt.



**Bild 2:** Trockenes Doppelkupplungssystem des Siebengang-DSG von Volkswagen [Quelle: Volkswagen AG]



**Bild 3:** Verteilung der Lagerkräfte für Systeme mit Momentennachführung in einem kundennahen Zyklus

## 2.1 Selbstöffnendes Verhalten

Der prinzipielle Aufbau von Doppelkupplungsgetrieben bedingt, dass aus Sicherheitsgründen bei Ausfall der Kupplungsaktorik mindestens eine der beiden Kupplungen selbsttätig öffnen muss, um eine Verspannung des Antriebsstrangs und damit die Gefahr des Blockierens der Räder zu verhindern. Dies kann sehr einfach durch die Verwendung sogenannter zugeführter Kupplungen in Verbindung mit nicht selbsthemmenden Aktoren realisiert werden. Bei zugeführten Kupplungen ist die Anpresskraft und somit das übertragbare Kupplungsmoment gleich Null, solange keine beziehungsweise nur eine geringe Kraft an den Tellerfederzungen anliegt.

Dadurch ergeben sich im Vergleich mit einer konventionellen, aufgedrückten Kupplung neue Randbedingungen für das Betätigungssystem und die Aktorik der Doppelkupplung, die sich auf die Belastung der Einrücklager und die Leistungsaufnahme der Aktorik positiv auswirken. In **Bild 3** sind die jeweiligen Zeitanteile der Lagerkräfte über einen repräsentativen Fahrzyklus dargestellt. Als Beispiel für die aufgedrückte Kupplung wurde ein ASG-System verwendet, wie es von LuK in Serie angeboten wird. Bei beiden Systemen wird das Kupplungsmoment permanent dem Motormoment nachgeführt, um Komfort und Dynamik des Systems zu verbessern. Hinsichtlich der Effizienz kann dieser Unterschied im Kupplungskonzept vernachlässigt werden, da die mittlere Leistungsaufnahme der kompletten Kupplungs- und Getriebeaktorik, wie sie in Abschnitt 2.6 gezeigt wird, bei lediglich zirka 20 bis 25 W liegt.

## 2.2 Thermische Robustheit

Da die stationäre Kühlleistung einer trockenen Doppelkupplung niedriger ist als die einer Kupplung mit Ölkühlung, benötigt sie thermische Massen zur Zwischenspeicherung der Wärme. Der Abtransport des Großteils der bei Hochenergiesituationen wie zum Beispiel einer Berganfahrt eingebrachten Wärmeenergie findet daher erst nach der Anfahrt durch freie Konvektion über die Luft in der Kupplungsglocke statt.

Die Bereitstellung der thermischen Massen erfolgt in Form der Anpressplatten. Hierbei hat sich gezeigt, dass die aus der thermischen Auslegung resultie-

renden rotierenden Massenträgheiten in der Größenordnung liegen, die ohnehin für die Isolation der Drehungleichförmigkeiten des Motors benötigt werden. Bei nassen Kupplungen, die scheinbar den Vorteil kleinerer rotierender Massen haben, muss hierfür Drehmasse im Zweimassenschwungrad installiert werden.

Zur Reduzierung der Verlustleistungen durch Schlupf beim Anfahren wird der erste Gang bei Doppelkupplungsgetrieben mit trockenen Kupplungen kürzer ausgelegt. Ein positiver Nebeneffekt ist dabei das erhöhte Anfahrmoment schon bei niedrigerer Anfahrerdrehzahl ähnlich dem Verhalten eines Drehmo-



## 2.6 Effiziente Aktorik

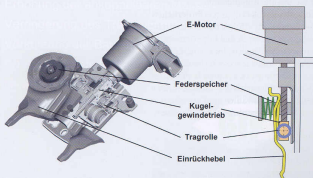
Die Anforderungen an eine Aktorik zur Steuerung einer trockenen Doppelkupplung sind sehr hoch. Dynamik, Genauigkeit, Dauerbelastbarkeit, Effizienz, Bauraum und Gewicht stehen hierbei ganz oben im Lastenheft.

### 2.6.1 Der Hebelaktor

Volkswagen hat für sein Siebengang-DSG eine sehr kompakte und effiziente Steuerhydraulik entwickelt, in der die Betätigungsdrücke elektromotorisch erzeugt und über entsprechende Steuerventile aufgeschaltet und geregelt werden. Eine Alternative hierzu ist eine elektromechanische Aktorik, wie sie von LuK in Form des in **Bild 6** dargestellten Hebelaktors entwickelt wurde. Dieser Aktor besteht aus Elektromotor, Federspeicher, Kugelgewindetrieb, Tragrolle und Einrückhebel.

Die zum Schließen der Kupplung notwendige Kraft wird bei diesem Aktorkonzept im Wesentlichen von einem Federspeicher in der Aktorik erzeugt. Dieser wirkt am äußeren Ende auf die Einrückhebel. Ein an das Getriebegehäuse angeschraubter Elektromotor bewirkt über einen Kugelgewindetrieb eine Verstellbewegung von unter dem Hebel angeordneten Tragrollen, die dessen mittleren Hebelauflagepunkt bilden. Über den Elektromotor kann somit der Auflagepunkt und damit das effektive Hebelverhältnis verändert werden. Durch die besondere Gestaltung der Hebelgeometrie kann eine variable Übersetzung zwischen Elektromotor und Kupplung realisiert werden, damit der Elektromotor auf einem möglichst konstanten und niedrigen Kraftniveau betrieben werden können. Dadurch kann die erforderliche Motorengröße deutlich reduziert werden.

Da die verfügbaren Elemente zur Umsetzung der Drehbewegung des Elektromotors in die Linearbewegung des Aktors die Anforderungen an Leistungsdichte und Wirkungsgrad bei weitem nicht erfüllten, wurde in Zusammenarbeit mit INA ein neuer Kugelgewindetrieb entwickelt. Verwendet wird ein vierreihiger Aufbau, der aus Bauraumgründen mit interner Kugelumlenkung ausgeführt wurde. Eine weitere Besonderheit sind die speziell entwickelten Tragrollen, welche unter einer Auflagekraft von bis zu 7000 N noch sehr leichtgängig sein müssen.



**Bild 6:** Hebelaktor zur Kupplungsbetätigung



**Bild 7:** Getriebeaktor mit „Active Interlock“

Dieses Aktorsystem bietet im Vergleich zur elektrohydraulischen Aktorik einige Vorteile. Neben einer nochmals verbesserten Effizienz kann es fast komplett in die Kupplungsglocke integriert werden, wo es keinen zusätzlichen Bauraum in Anspruch nimmt, sondern in den ansonsten ungenutzten Raum zwischen den Lageraugen eintaucht. Außerdem bietet es durch seine Modularität die Möglichkeit, die Entwicklungsverantwortung für die Ansteuerung der Kupplung und des Getriebes zu trennen. So kann beispielsweise ein Getriebehersteller das Kupplungssystem inklusive Aktorik von LuK beziehen und die Schaltaktuatorik selbst entwickeln.

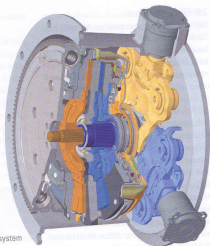
### 2.6.2 Die elektromotorische Getriebeaktorik

Als Beispiel für eine elektromechanische Schaltaktuatorik ist in **Bild 7** der Getriebeaktor mit Active Interlock von LuK gezeigt [3]. 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-

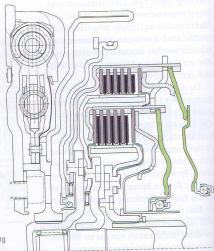
und Auswerferelementen bildet die Schnittstelle zur inneren Schaltung des Getriebes. Das Einlegen der Gänge erfolgt mit dem Schaltfinger analog zur Betätigung von Handschaltgetrieben.

Das Besondere bei diesem Aktor 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 Schaltaktor entstanden, der zusammen mit dem oben beschriebenen Hebelaktor die Aktorik für ein Doppelkupplungsgetriebe komplettiert.



**Bild 8:** Trockenes Doppelkupplungssystem mit Hebelaktoren



**Bild 9:** Nasse Doppelkupplung mit Einrücklagern

### 3 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Siebengang-DSG von Volkswagen wurde gezeigt, dass die trockene Doppelkupplung von LuK alle Anforderungen, die an ein modernes Automatikgetriebe gestellt werden, erfüllen kann. Weitere Anwendungen mit trockener Doppelkupplung werden in Kürze in Serie gehen. In Kombination mit einer effizienten Aktorik wie zum Beispiel dem Hebelaktor stellt das trockene Doppelkupplungsgetriebe den Benchmark bezüglich Verbrauch dar und erfüllt höchste Anforderungen an Dynamik und Lebensdauer, **Bild 8**.

Da ein solches Getriebe durch die elektromotorische Aktorik unabhängig vom Verbrennungsmotor angesteuert werden kann, ist es für Hybrid- und Start-Stopp-Betrieb bestens geeignet. In der Praxis konnte das bereits im „ESG“-Demonstratorfahrzeug von LuK mit achsparallel angeordneter E-Maschine gezeigt werden [4]. Diese Konzepte werden künftig zunehmend Anwendung finden, wie die Entwicklungen verschiedener Getriebehersteller zeigen [5].

Neben den beschriebenen Lösungen für trockene Doppelkupplungen wird es auch weiterhin nass laufende Kupplungen geben, vor allem in Verbindung mit hohen Fahrzeuggewichten bei kleinem radialem Bauraum. Ziel ist es hierbei, die Verluste speziell durch die Kühlung der Kupplung zu minimieren. Dabei können dann auch Konzepte aus trockenen Kupplungssystemen wie zum Beispiel die Ansteuerung der nassen Kupplungen über Einrücklager zum Einsatz kommen [6]. Durch eine solche Lösung können die Bereitstellung der Kräfte für die Ansteuerung der Kupplungen und die Ölkühlung voneinander getrennt und somit energetisch günstiger realisiert werden, **Bild 9**.

Auch in Zukunft wird aufgrund der unterschiedlichen Spezifikationen der Fahrzeughersteller die Vielfalt der Getriebekonzepte nicht zurückgehen. Für den langfristigen Erfolg am Markt zählt letztendlich der Kundennutzen, und hier werden in Zukunft der Wirkungsgrad des Getriebes und damit der Kraftstoffverbrauch in Kombination mit der Hybridisierbarkeit eine entscheidende Rolle spielen. Dabei hat das Doppelkupplungsgetriebe mit trockener Doppelkupplung im Wettbewerb zu diesem mit nasser Kupplung, den Wandlerautomatikgetrieben und den stufenlosen Getrieben (CVT) exzellente Voraussetzungen.