



# Doppelkupplung – Nass oder trocken, das ist hier die Frage

Karl-Ludwig Kimmig  
Ivo Agner



## Einleitung

Doppelkupplungsgetriebe für Pkw beschäftigen derzeit die Entwicklungsabteilungen der Automobil- und Zulieferindustrie. Ziel ist die Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs gegenüber dem Handschaltgetriebe bei gleichzeitigem Komfort des Automatikgetriebes. Damit diese neue Getriebegeneration mit den sehr effektiven Schalt- und Synchronisierereinrichtungen von manuellen Schaltgetrieben funktioniert, sind zwei getrennt schaltbare Kupplungen erforderlich [1]. Mit jeder der beiden Kupplungen wird ein Teilgetriebe mit dem Verbrennungsmotor gekoppelt, wobei grundsätzlich nass oder trocken laufende Kupplungen die Funktion erfüllen können. Zur Steuerung der Anfahr- und zugkraftunterbrechungsfreien Schaltvorgänge werden beide Kupplungen automatisiert betätigt.

Welches Kupplungssystem, nass oder trocken, für eine neue Fahrzeuggeneration das bessere

Konzept darstellt, wird derzeit in der Fachwelt heftig diskutiert (Bild 1). LuK hat sowohl mit trockenen als auch nassen Kupplungen Erfahrung und möchte sich deshalb mit den oft genannten Vorurteilen gegenüber beiden Systemen auseinandersetzen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben.

Die gängigen Meinungen der Fachwelt sind im Folgenden aufgeführt. Die Trockenkupplung hat nur eine begrenzte Wärmekapazität, weshalb das System bei hohen Energieinträgen schnell an Grenzen stößt, die deutlich unter denen vergleichbarer Wandlerautomaten oder nasser Kupplungen liegen. Weiterhin ist der Verschleiß des Trockenreibbelages oft ein Diskussionspunkt, wenn es um Lebensdauerfragen geht.

Die Nasskupplung in Kombination mit einer vollhydraulischen Ansteuerung für Betätigung und Kühlung gilt im Allgemeinen als zu aufwändig und zu teuer. Außerdem stehen die Pumpenverluste oft für einen höheren Verbrauch gegenüber trockenen Lösungen.

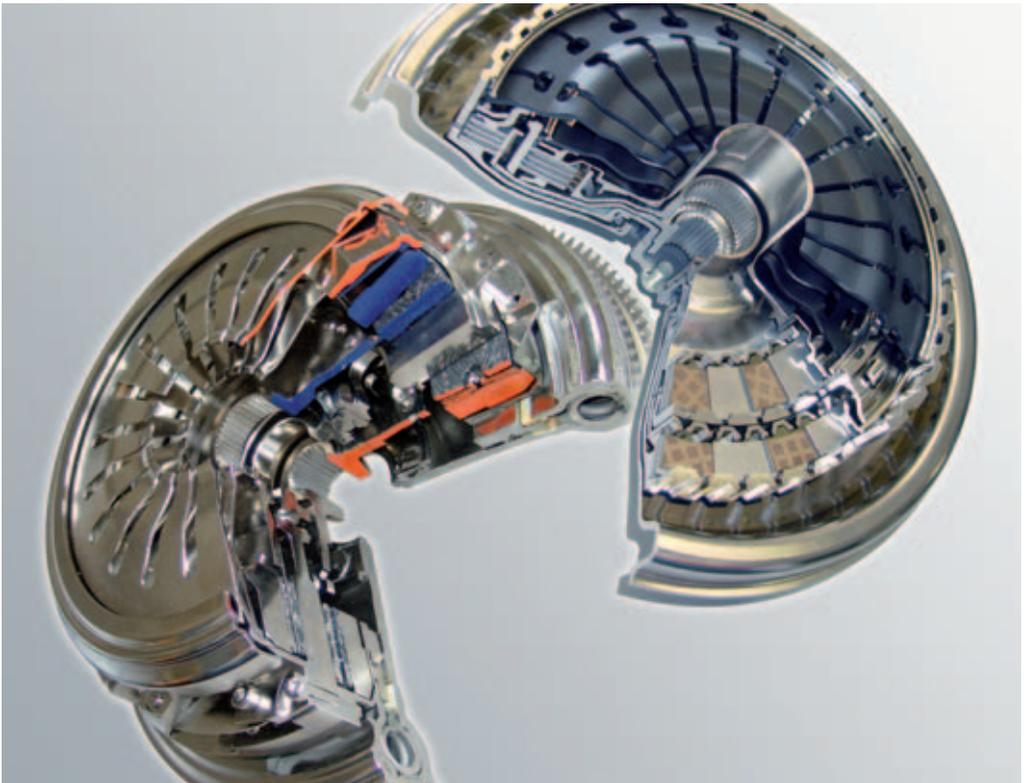


Bild 1 Trockene und nasse Doppelkupplung

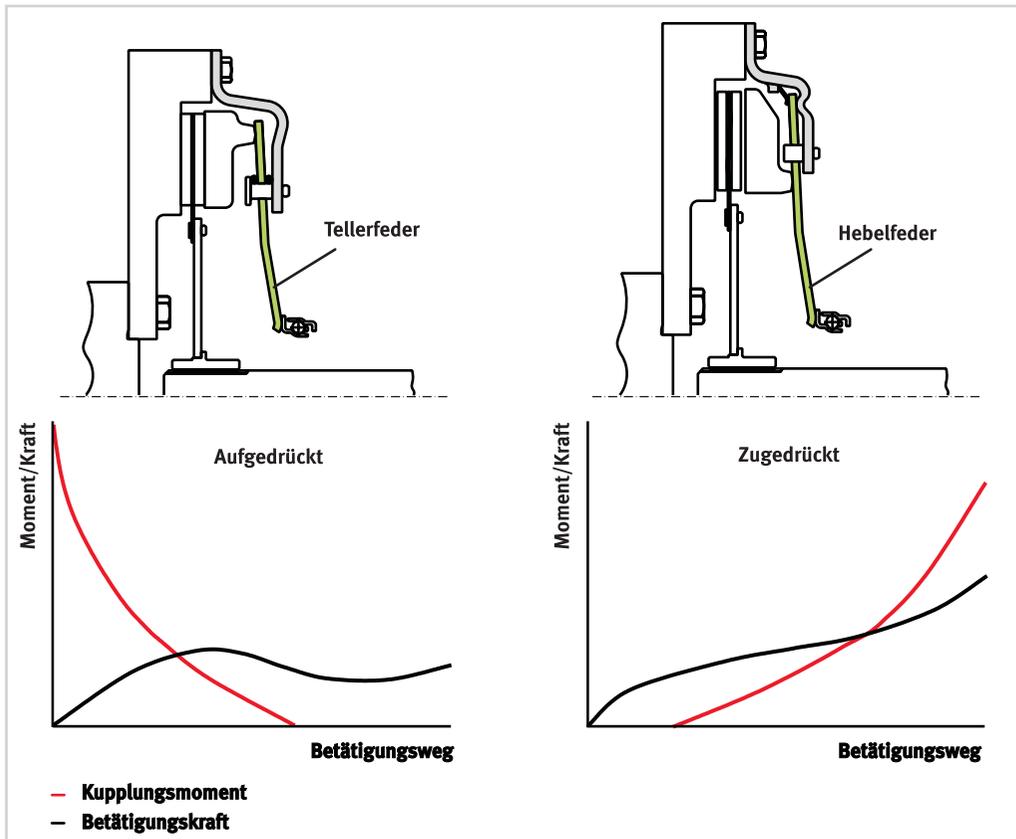


Bild 2 Vergleich aufgedrückte / zugeführte Kupplung

## Die trockene Doppelkupplung

Aufgrund des prinzipiellen Aufbaus von Lastschaltgetrieben müssen aus Sicherheitsgründen bei Ausfall der Kupplungsaktorik die Kupplungen selbsttätig öffnen. Dies kann sehr einfach durch Verwendung so genannter „zugeführter Kupplungen“ realisiert werden. Bei zugeführten Kupplungen ist die Anpresskraft gleich Null, solange keine bzw. nur eine geringe Kraft an den Tellerfederzungen anliegt. Im Gegensatz dazu gibt es die aufgedrückten Kupplungen bei Fahrzeugen mit Handschaltgetrieben, bei denen ohne Kraft an den Tellerfederzungen die volle Anpresskraft an den Kupplungsbelägen anliegt [2, 3]. In diesem Zustand wird das maximale Drehmoment übertragen. Bild 2 links zeigt das Schnittbild einer aufgedrückten Kupplung und Bild 2 rechts das Schnittbild einer zugeführten

Kupplung. Da bei den zugeführten Kupplungen die Tellerfeder hauptsächlich als Hebel zur Übertragung der Einrückkraft auf die Anpressplatte dient, wird diese als Hebelfeder bezeichnet. Als besondere Anforderung müssen die Hebelfederzungen in axialer Richtung sehr steif sein, damit Wegverluste möglichst gering sind. Weiter wird die Hebelfeder so ausgelegt, dass über den gesamten Arbeitsbereich des Einrücklagers immer eine geringe Rückstellkraft anliegt und somit ein sicheres Öffnen der Kupplung gewährleistet werden kann.

## Anordnung der Kupplungen im Getriebe

Kupplungen für Handschaltgetriebe werden üblicherweise direkt über das Schwungrad mit der Kurbelwelle verschraubt. Die Abstützung der zur Betätigung erforderlichen Kraft erfolgt in den meisten Fällen ebenfalls direkt über das

Schwungrad. Da Doppelkupplungen axial deutlich länger bauen und auch die Betätigungskräfte bei bestimmten Fahrzuständen höher sind als bei Handschaltern, ist in vielen Fällen eine direkte Lagerung auf der Kurbelwelle aufgrund der zu hohen Belastung nicht möglich. Eine alternative Anordnung stellt die Lagerung der Doppelkupplung auf einer der beiden Getriebewellen dar, bevorzugt auf der Hohlwelle. Bei dieser Anordnung ergeben sich für die Ankopplung der Doppelkupplung an die Kurbelwelle grundsätzlich zwei Möglichkeiten (Bild 3).

Bei der Variante mit „außenliegendem Dämpfer“ wird an die Kurbelwelle ein Dämpfersystem angeschraubt. Die Drehmomentübertragung vom Sekundär-Dämpferteil zur Doppelkupplung erfolgt über eine in Umfangsrichtung verspannte Steckverzahnung, durch welche auch die axialen Toleranzen zwischen Motor- und Getriebewelle ausgeglichen werden.

Bei der Variante mit „kardanischer Kopplung“ sind zwei Torsionsschwingungsdämpfer in die beiden Kupplungsscheiben integriert und die Momentenübertragung zwischen Motor und Doppelkupplung erfolgt über ein Schwungrad mit Kardanfunktion. Das Kardangelenkwird dabei von elastischen Federelementen gebildet,

welche axiale und radiale Verschiebungen zwischen Kurbelwelle und Getriebewelle dauerhaft ausgleichen können.

## Umgang mit hohen Energieeinträgen

Eines der zentralen Themen bei der Entwicklung trockener Doppelkupplungen ist die Absicherung einer „ausreichenden“ Kupplungslebensdauer. Gängige Lastenhefte sehen dabei vor, dass die Kupplungen die Fahrzeuglebensdauer erreichen müssen. Ferner muss für Extremsituationen ausreichend Überlastfähigkeit vorhanden sein. Die Überlastfähigkeit von Doppelkupplungsgetrieben muss der von Stufenautomaten oder CVT-Getrieben entsprechen.

Die Beurteilung der Überlastfähigkeit von Kupplungen wird heute daran gemessen, wie oft bzw. wie lange ein Kupplungssystem mit Reibarbeit belastet werden kann, ohne das System dauerhaft zu beschädigen. Ein Vergleichstest dazu wäre wiederholtes Anfahren an einer Steigung in einem definierten Zeitintervall. Bild 4 zeigt exemplarisch den Temperaturverlauf der Kupplung über der Zeit bei wiederholten Berganfahrten. Bei Trockenkupp-

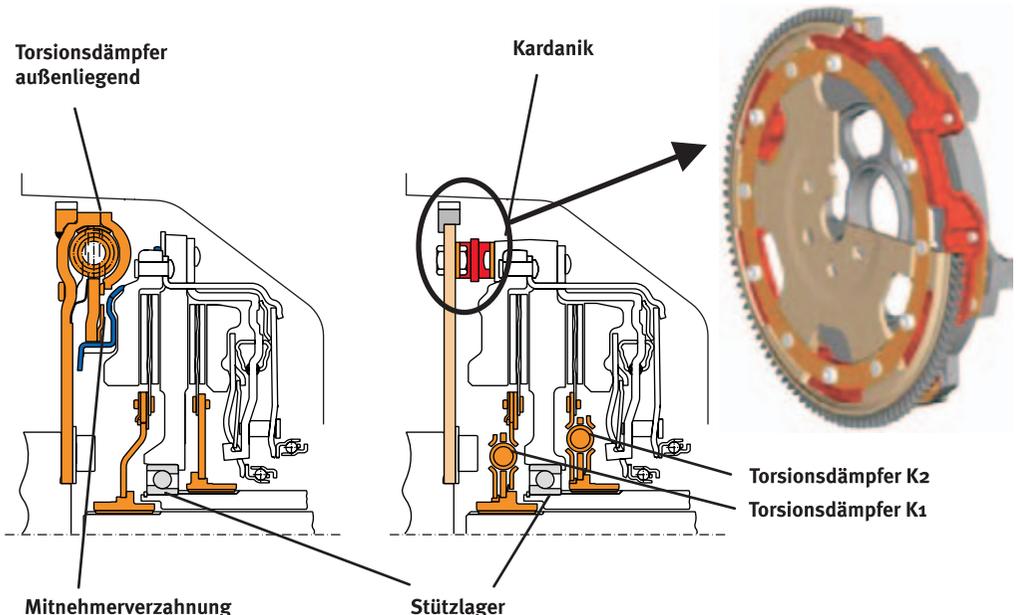


Bild 3 Anordnung von Doppelkupplungen mit Torsionsdämpfersystem im Triebstrang

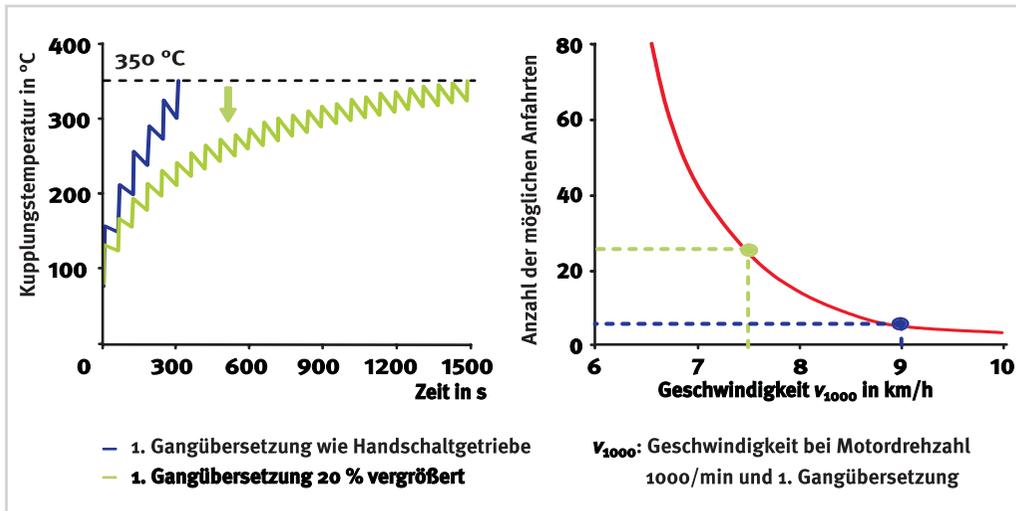


Bild 4 Verlauf der Kupplungstemperatur und mögliche Anzahl bei wiederholten Berganfahrten

lungen mit heutigen Belägen liegt die kritische Temperatur der Anpressplatte bei ca. 350 bis 400 °C. Oberhalb dieser Temperatur beginnt die dauerhafte Schädigung des Reibsystems. Allerdings ist neben der Maximaltemperatur auch die Zeitdauer der Temperaturbeaufschlagung ein wichtiger Faktor für die Schädigung des Reibsystems. Der in Bild 4 blau gezeigte Temperaturverlauf entspricht der Situation, wie sie heute bei Fahrzeugen mit Handschaltgetrieben vorliegt, wenn bei voller Zuladung und Anhänger an einer 12 %-Steigung wiederholt angefahren wird. Die Häufigkeit der möglichen Anfahrten kann erheblich gesteigert werden, wenn durch eine vergrößerte 1.-Gang-Übersetzung die Reibenergie pro Anfahrt reduziert wird, wie in Bild 4 grün dargestellt. Eine Übersetzungsänderung wirkt sich dabei annähernd quadratisch auf die Änderung der Anfahrerenergie aus. Diese Aussage gilt generell für alle Anfahrten im 1. Gang. Durch eine Vergrößerung der Übersetzung des 1. Gangs um 20 %, bezogen auf ein Handschaltgetriebe, lässt sich für die meisten Anwendungsfälle eine ausreichende Überlastfähigkeit der Doppelkupplung erreichen.

Zur Steigerung der thermischen Robustheit von Trockenkupplungen versieht man die Kupplungsglocke mit einer geeigneten Öffnung. Dadurch kann die erwärmte Luft in der Glocke gegen kühlere Umgebungsluft ausgetauscht werden. Die rotierende Kupplung wirkt dabei wie ein

Radialgebläse, wobei für hohen Luftdurchsatz eine Einlassöffnung nahe des Drehzentrums und eine Auslassöffnung tangential am Außendurchmesser erforderlich sind.

Damit jedoch nicht permanent große verunreinigte Luftmengen durch den Kupplungsraum strömen, ist es sinnvoll, die Kupplungsglocke erst ab einer Umlufttemperatur größer 100 °C zu öffnen. Dies ist sehr einfach und effektiv durch eine thermostatgesteuerte Klappe (Wachaktor) an der Kupplungsglocke zu realisieren. Der Effekt für die Kupplung ergibt sich aus der Beziehung:

$$\dot{Q}_{ab} = \alpha \cdot A \cdot (T_{AP} - T_{Luft})$$

$\dot{Q}_{ab}$  = Abgegebene Wärmeleistung

$\alpha$  = Wärmeübergangskoeffizient

$A$  = Oberfläche

$T_{AP}$  = Anpressplattentemperatur

$T_{Luft}$  = Lufttemperatur

Dies bedeutet, dass umso mehr Wärme von den heißen Kupplungskomponenten abgeführt werden kann, je höher die Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft ist. Vereinfacht formuliert ergibt eine um 50 K geringere Glockenlufttemperatur auch eine um ca. 50 K geringere Bauteiltemperatur. Bild 5 zeigt eine mögliche Ausführungsform für eine thermostatgesteuerte Kupplungsglockenbelüftung und die sich dadurch ergebenden Bauteiltemperaturen.

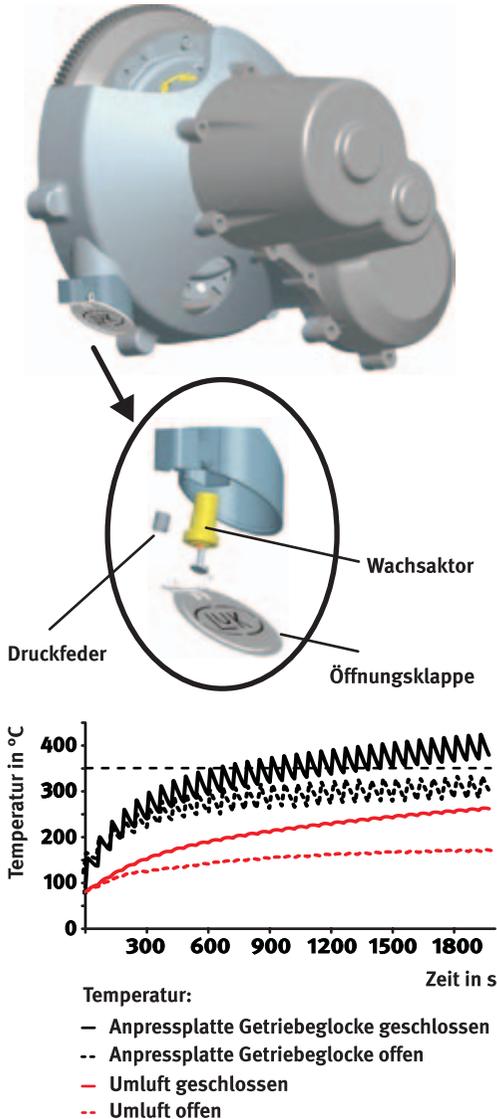


Bild 5 Prinzip offene Kupplungsglocke

## Lebensdauer

Neben einer ausreichenden Überlastfähigkeit steht bei der Entwicklung von neuen Doppelkupplungsgetrieben die Laufstreckenerwartung im Fokus. Im Vergleich zu Handschaltgetrieben werden die Kupplungen für Doppelkupplungsgetriebe, bedingt durch die Überschneidungsschaltungen, Teilschlupfregelung und häufigere Schaltvorgänge, stärker belastet. Mit Teilschlupfregelung ist gemeint, dass die Kupplungen in

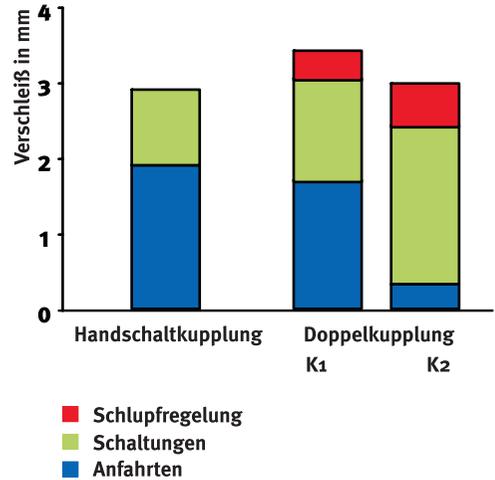


Bild 6 Kupplungsverschleiß bei trockenen Doppelkupplungen

bestimmten Fahrsituationen gezielt im Bereich der Schlupfgrenze eingestellt werden, um das Komfortverhalten zu optimieren. Für einen ausgewählten Anwendungsfall ist in Bild 6 der zu erwartende Belagverschleiß dargestellt.

Die Darstellung zeigt, dass für eine Kupplungslebensdauer von 240.000 km für beide Kupplungen jeweils ein Verschleißweg von ca. 3,5 mm erforderlich ist. Dies hat in erster Linie Konsequenzen für den erforderlichen axialen Bauraum des Systems. Damit trockene Doppelkupplungssysteme mit umsetzbaren Bauraumanforderungen dargestellt werden können, gibt es 3 grundsätzliche Lösungsansätze:

- Zugedrückte Kupplungen mit geringer innerer Übersetzung
- Zugedrückte Kupplungen mit kraftgesteuerter Verschleißnachstellung (LAC = Load Adjusted Clutch)
- Zugedrückte Kupplung mit weggesteuerter Verschleißnachstellung (TAC = Travel Adjusted Clutch)

## Zugedrückte Kupplung mit geringer innerer Übersetzung

Eine sehr einfache und robuste Lösung für ein Doppelkupplungssystem ergibt sich durch die Anordnung von zwei zugedrückten Kupplungen mit einer inneren Hebelübersetzung von ca. 2:1, ohne kupplungsseitige Maßnahmen zum Ausgleich des Belagverschleißes (Bild 7).

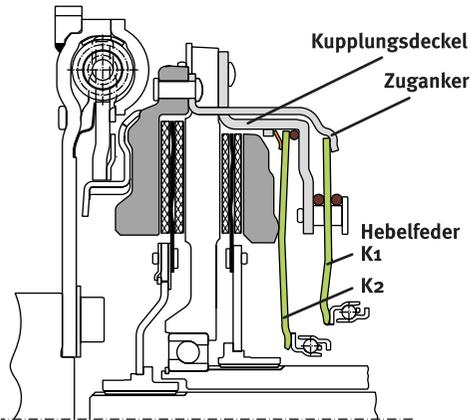


Bild 7 Doppelkupplung mit geringer innerer Übersetzung

Bei dieser Lösung ändert sich die Hebelfeder-Nullposition über dem Verschleißweg multipliziert mit der Kupplungsübersetzung. Diese Wegänderung muss bei der Auslegung des Einrücksystems berücksichtigt werden. Nachteil dieser Lösung ist jedoch, dass die Einrückkräfte durch die kleine Kupplungsübersetzung höher sind und somit nur Motordrehmomente bis ca. 150 Nm bei vertretbaren Betätigungs Kräften abgedeckt werden können.

### Zugedrückte Kupplungen mit kraftgesteuerter Verschleißnachstellung LAC (Load Adjusted Clutch)

Vor ca. 15 Jahren begann LuK, für trockene Fahrzeugkupplungen Nachstellmechanismen zu entwickeln, welche den Belagverschleiß in der

Kupplung mechanisch ausgleichen. Ein Kernsystem, welches aus dieser Entwicklungsarbeit resultierte, ist die selbsteinstellende Kupplung SAC [2-4], die seit ca. 10 Jahren in Großserie gefertigt und in vielen Handschalt- und automatisierten Schaltgetrieben eingebaut wird. Nahe liegend ist, genau diese bewährte Technologie auch bei trockenen Doppelkupplungen zu verwenden. Zur Realisierung der doppelkupplungsspezifischen Anforderungen (zugedrückte Kupplungen und der sehr beengte Bauraum für zwei Kupplungen und zwei Betätigungssysteme) musste das System neu entwickelt werden. Mittlerweile ist es gelungen, ein auf dem Kraftsensorprinzip aufbauendes Doppelkupplungssystem zu entwickeln, welches auch alle erforderlichen Funktions- und Dauerlauf tests bestanden hat (Bild 8).

Zur Realisierung der Verschleißnachstellung bei der LAC wird jeweils die Hebelfeder der beiden Teilkupplungen über eine Sensortellerfeder axial mit einer Abstütz- bzw. Sensorkraft beaufschlagt. Zusätzlich werden beide Hebelfedern über einen Rampenring auf dem Kupplungsdeckel gelagert. Der Kupplungsdeckel bildet auf beiden Seiten die entsprechenden Gegenrampen, was hinsichtlich des Bauraumes sehr Platz sparend ist. Wie bei der selbsteinstellenden Kupplung SAC wird der Verschleiß durch die Änderung der Hebelfederkraft von der Sensortellerfeder detektiert und über den sich drehenden Rampenring ausgeglichen. Die Verschleißnachstellung erfolgt dabei völlig selbsttätig ohne Überweg und in sehr kleinen Inkrementen, so

dass an die automatisierte Kupplungssteuerung keine zusätzlichen Anforderungen gestellt werden. Beide Kupplungen können auch so abgestimmt werden, dass über dem Verschleiß die Hebelfederposition nahezu unverändert bleibt und somit die erforderlichen Axialwege für das Gesamtsystem kupplungsseitig minimiert sind. Allerdings ergibt sich von den

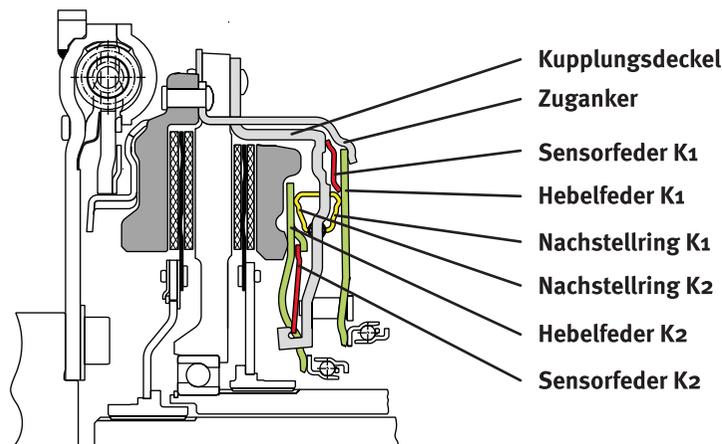


Bild 8 Doppelkupplung mit kraftgesteuerter Verschleißnachstellung (LAC)

Hebelfederzungen bis zu der Aktorik eine sehr lange Toleranzkette, welche einen Toleranzausgleich durch getriebespezifische Einstellscheiben erforderlich macht. Damit dieser aufwändige Vorgang in den Automobilmontagewerken vermieden werden kann, wird intensiv an einer weiterentwickelten Doppelkupplung mit Verschleißnachstellung gearbeitet. Es erscheint derzeit am zielführendsten, einen Verschleißausgleichsmechanismus zu haben, welcher einen konstanten Einrückhub sensiert und nachstellt.

### Zugedrückte Kupplung mit weggesteuerter Verschleißnachstellung TAC (Travel Adjusted Clutch)

Bei der Entwicklung von trockenen Doppelkupplungen ist ein zentrales Thema die Darstellung der erforderlichen Funktionalitäten in dem maximal realisierbaren Bauraum moderner Automobile. Gesucht werden Systeme, bei denen Funktionen geschickt in den Bauteilen integriert und bei denen Systemtoleranzen weitgehend eliminiert werden. Besonders zu benennen ist dabei die axiale Toleranzkette der beiden Kupplungen

mit den entsprechenden Betätigungssystemen. Um diesen Anforderungen in hohem Maße gerecht zu werden, wurde sehr intensiv an der Entwicklung eines neuen Doppelkupplungssystems gearbeitet, TAC (Travel Adjusted Clutch). Die TAC ist ein Doppelkupplungssystem mit zwei hubgesteuerten Verschleißnachstellungen, welche sowohl Belagverschleiß und Wegänderungen an den Betätigungselementen durch Einbautoleranzen oder Verschleiß ausgleichen kann. Bei dieser neuartigen Verschleißnachstellung wird ein geschlitztes, dünnes Federblech, als „Antriebsfeder“ bezeichnet, sowohl zur Detektion von Verschleiß als auch als Antriebsselement für ein Rampensystem benutzt. Bild 9 zeigt diese Antriebsfeder mit außen liegender Verzahnung in den zwei Extrempositionen „Kupplungen offen“ und „Kupplungen geschlossen“. Bei Verschleiß vergrößert sich der axiale Hub der Hebelfeder derart, dass die Zähne am rechten Arm der Antriebsfeder eine Raste weiter springen. Bei dem darauf folgendem Öffnen der Kupplung ergibt sich ein Drehmoment auf die Antriebsfeder, wodurch diese sich in Umfangsrichtung verdreht und auch die Zähne des linken Arms eine Raste weiter springen. Da an der sich drehenden

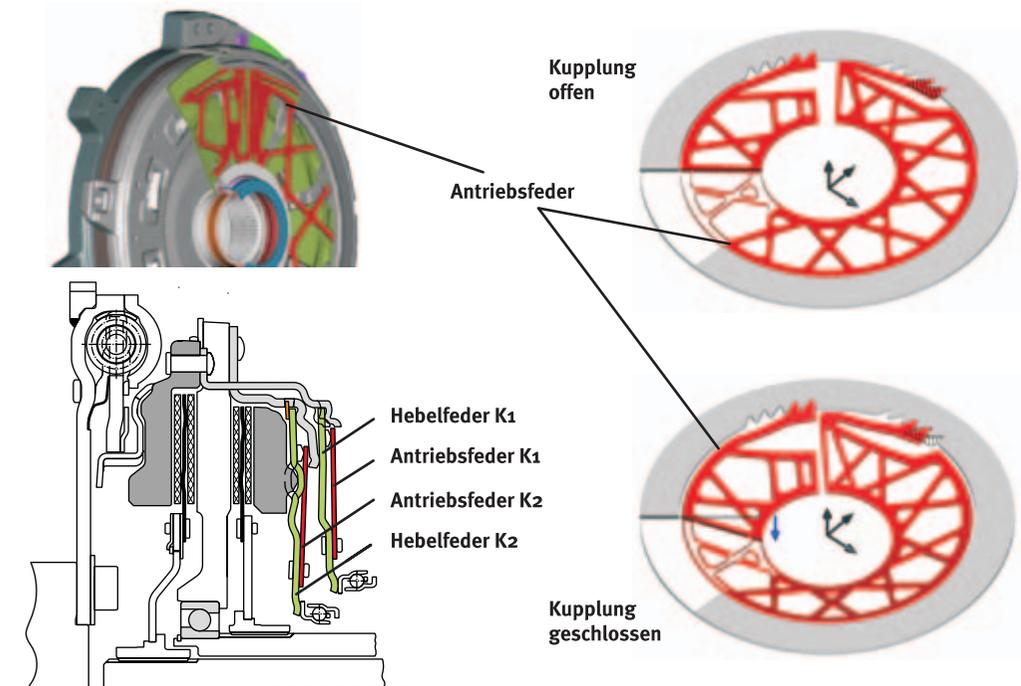


Bild 9 Doppelkupplung mit weggesteuerter Verschleißnachstellung (TAC)

Antriebsfeder die Hebelfeder in Umfangsrichtung fest angebunden ist, verdreht sich diese mit. Ein Verschleißausgleich ergibt sich nun dadurch, dass in die Hebelfederzungen Umfangsrampen eingeformt sind, die sich axial auf Rampen, z.B. in der Anpressplatte, abstützen. Die hubsensierte Verschleißnachstellung erfordert jedoch ein spezielles Einrücksystem, bei welchem die Maximalkraft relativ genau begrenzt werden kann.

## Die Nasskupplung Komplexität und Aufwand

Bisher auf dem Markt befindliche bzw. in naher Zukunft auf dem Markt kommende Nassdoppelkupplungen werden hydraulisch betätigt. Dabei rotieren die Druckräume mit der Drehzahl des Verbrennungsmotors (Bild 10). Diese Bauform mit rotierenden Betätigungskolben wird im Allgemeinen auch bei den Kupplungen klassischer Wandlerautomaten angewendet.

Um das Hydrauliköl von der hydraulischen Steuerung zu den Druckräumen zu leiten, werden Drehdurchführungen notwendig, die mit geschlitzten, leckagebehafteten Dichtungsringen abgedichtet werden. Diese Leckage ist ein

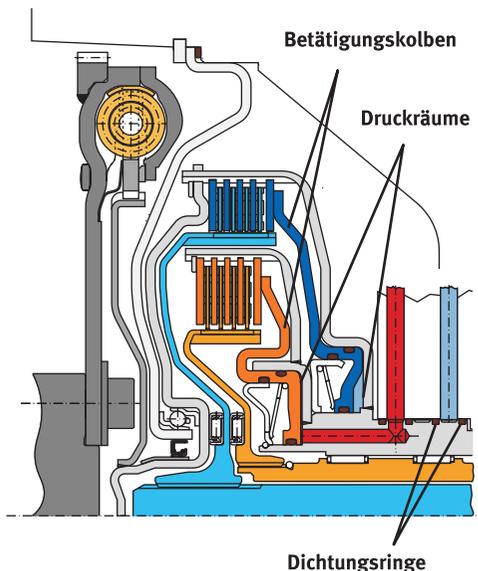


Bild 10 Nassdoppelkupplung mit rotierenden Betätigungskolben

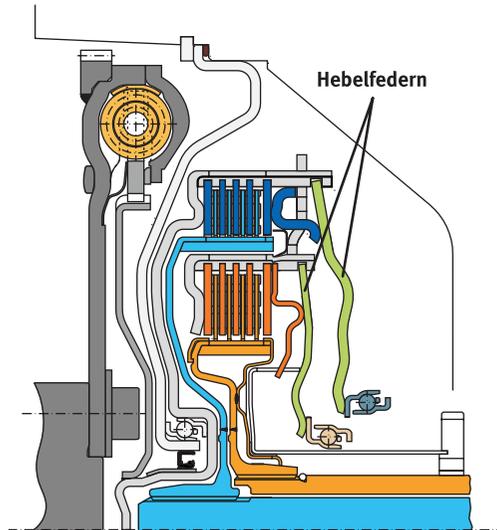


Bild 11 Nasse hebelbetätigte Doppelkupplung

Grund dafür, dass zur Realisierung der Start-Stopp-Funktionalität ein zusätzliches hydraulisches Powerpack notwendig wird, um bei stehendem Verbrennungsmotor die Kupplung am Tastpunkt zu halten. So kann bei Wiederstart des Motors die Kupplung komfortabel und schnell geschlossen werden.

Die Druckräume werden mit jeweils zwei Dichtungen am Innen- und Außendurchmesser abgedichtet. Zur Kompensation des sich unter Rotation aufbauenden Fliehöl-drucks werden parallel zu den Druckräumen ölbefüllte Kammern angeordnet. Für jede dieser Fliehöl-kammern ist mindestens eine weitere Abdichtung notwendig. Die Dichtungen sind zum Großteil für die Hysterese der Kupplungsbetätigung verantwortlich.

LuK favorisiert jedoch ein Betätigungskonzept über Hebelfedern, ähnlich wie es bei trockenen, zgedrückten Kupplungen Stand der Technik ist (Bild 11). Von den nicht rotierenden, statischen Betätigungselementen wird die Kraft über Einrücklager auf die mit Motordrehzahl rotierenden Hebelfedern aufgebracht [5]. Die Einrücklager sind somit die Schnittstelle zwischen den stehenden und rotierenden Teilen. Die Hebelfeder ist jeweils im Außenlamellenträger eingehängt und betätigt einen Druckring, der das Lamellenpaket zusammenpresst. Bei Ausfall eines Aktors öffnet die Kupplung aufgrund der Rückstellkraft der Hebelfedern. Die von außen aufgebrachten Betätigungskräfte werden direkt an einem

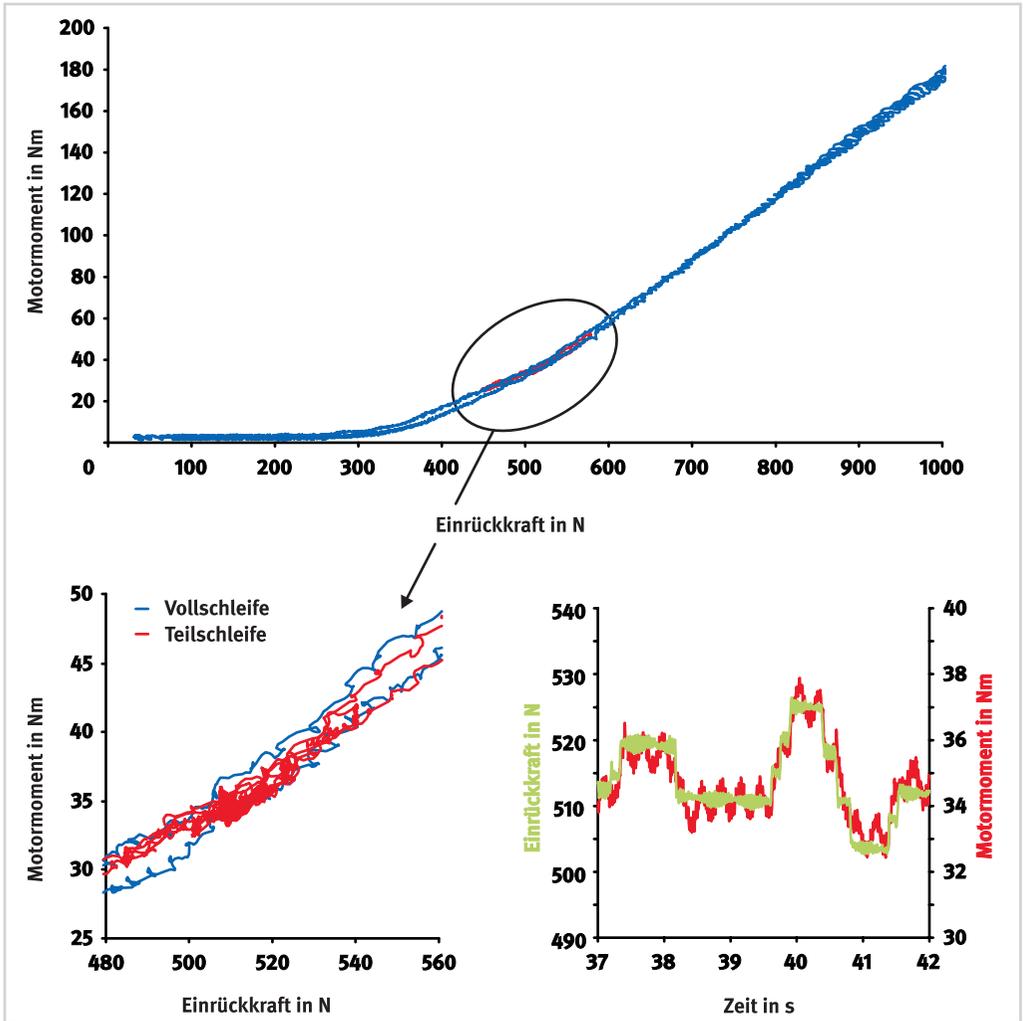


Bild 12 Hystereseverhalten einer nassen, hebelbetätigten Doppelkupplung

Deckellager abgestützt, so dass die Kurbelwelle frei von axialen Kräften ist.

Dieses Konzept hat den Vorteil, dass mehrere Betätigungssysteme zur Anwendung kommen können. Es sind bei Verwendung von hydrostatischen Ausrückern oder Dreh- bzw. Schwenkhebeln in Kombination mit Nehmerzylindern klassische hydraulische Steuerungen und elektro-hydraulische Powerpacks realisierbar. Auch eine elektro-mechanische Aktorik kann einfach adaptiert werden.

Gerade die Betätigungssysteme, die eine vom Verbrennungsmotor unabhängige elektrische Energiequelle haben, profitieren von der Lecka-

gefreiheit dieser hebelbetätigten Kupplungen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine Hybridisierbarkeit des Gesamtgetriebes, ermöglicht es doch einerseits die Betätigung der Kupplungen unabhängig vom Betrieb des Verbrennungsmotors und andererseits entfällt ein permanentes Nachpumpen von Öl, um die Kupplung am Betriebspunkt zu halten.

Der Entfall der Dichtungen ergibt im Vergleich zu klassischen Nasskupplungen sehr gute Hysteresewerte und eine feinfühligere Modulation der Kupplungen (Bild 12). Durch eine spezielle Formgebung der Hebel federungen lässt sich eine Fliehkraftkompensation einfach erzielen.

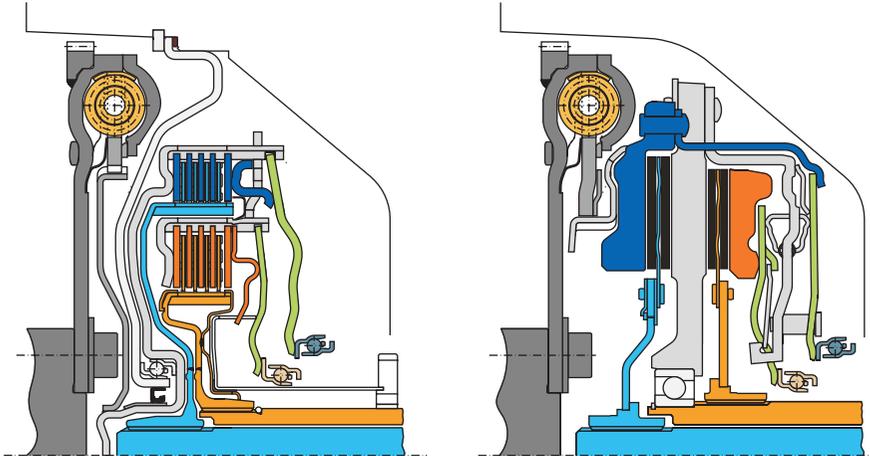


Bild 13 Vergleich der Hebelbetätigung bei Nass- und Trockenkupplung

Beim Vergleich der hebelbetätigten Nasskupplung mit der Trockenkupplung wird man schnell feststellen, dass bezüglich des Aufwandes und der Komplexität die Nasskupplung den Vergleich mit der Trockenkupplung nicht zu scheuen braucht (Bild 13). Hierbei ist es wichtig zu wissen, dass bei nassen Doppelkupplungssystemen keine Verschleißnachstellung notwendig ist. Eine Ölschmierung der Lager und der mechanischen Teile der Aktorik spart Abdichtungsaufwand und es können spezielle Oberflächenbehandlungen entfallen. Die Ölschmierung sorgt weiterhin für geringere Verluste und Hysteresen.

Auffällig ist der große Gewichtsanteil der Gussmassen bei den Trockenkupplungen. Sie speichern den Großteil der Wärme zwischen. Diese Aufgabe übernimmt bei den nassen Kupplungen das Öl.

Wie ist jedoch bei einer elektromotorischen Betätigung die Ölkühlung der Kupplungen sichergestellt? Hierzu wird gezielt eine sauggeregelter Umförmderpumpe eingesetzt [5] (Bild 14).

Diese Umförmderpumpe wird vom Verbrennungsmotor direkt angetrieben. Es kommt hierbei eine aus dem Automatikgetriebesektor und als

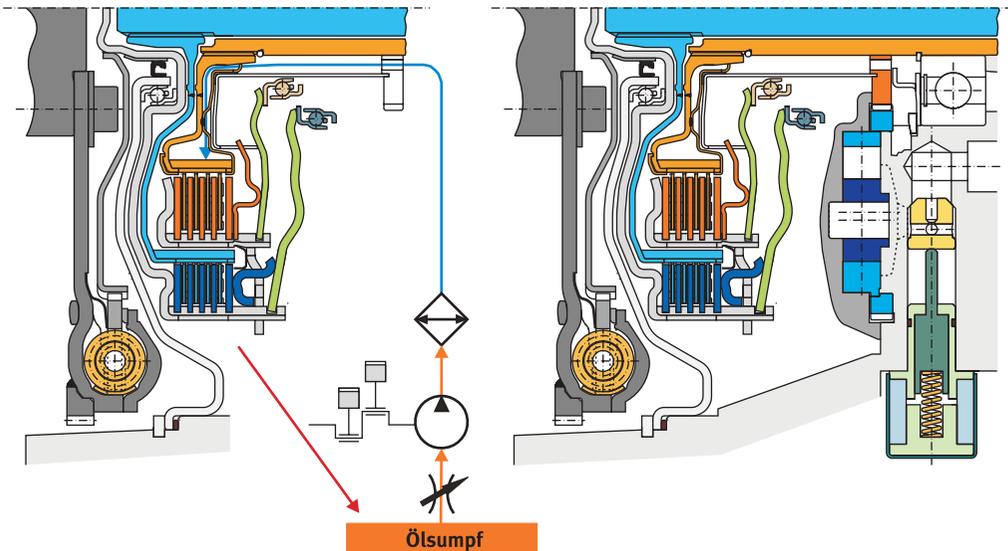


Bild 14 Kühlkonzept einer elektro-mechanisch oder elektro-hydraulisch betätigten nassen Doppelkupplung

Motorschmierölpumpe bekannte preiswerte Gerotorpumpe zum Einsatz. Eine Zahnradstufe treibt direkt das Hohlrad der Pumpe an. Dies ermöglicht eine radiale und bezüglich Getriebe-länge bauraumneutrale Anordnung im Getriebegehäuse und erspart gleichzeitig Abdichtungsaufwand beim inneren Ritzel. Bei Hybridanwendungen kann die Pumpe auch alternativ über einen doppelten Freilauf von der Hohlwelle angetrieben werden, um die Kühlung der Kupplung auch bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor zu sichern. Auf der Saugseite befindet sich ein Saugregelventil, das den geförderten Volumenstrom der Pumpe dem Kühlölbedarf während des Kuppelns und Fahrens einfach anpassen kann. Diese Pumpe fördert das Öl durch einen Ölkühler, bevor es der Kupplung als gekühltes Medium zur Verfügung steht.

In der Stellung „Kühlen“ des Saugregelventils wird der Förderstrom durch das theoretische Förder- volumen der Pumpe bestimmt. In diesem Zustand fließt ausreichend Öl durch den Ölkühler, um bei Dauerschlupfzuständen, wie „Halten am Berg“ oder „Kriechen am Berg“, das thermische Gleichgewicht des Gesamtgetriebes zu wahren.

In der Stellung „Fahren“ kann der Ölvolumen- strom stark reduziert werden. Er verhindert nur das Verbrennen der Beläge der offenen Kupp- lung und gewährleistet die Kühlung der betätig- ten Kupplung bei Mikroschlupfregelung. In diesem Betriebszustand fließen ca. 2...3 l/min durch den Ölkühler. Diese Ölmenge reicht aus, um die im Vergleich zum Handschalter zusätzlich auftretenden geringen Pumpenverluste von ca. 1 kW bei maximaler Geschwindigkeit zu kühlen und ein stabiles Temperaturgleichgewicht des Gesamtgetriebes herzustellen.

Dadurch, dass die Pumpe nur zur Kühlung und Schmierung der Kupplung dient und deshalb nur Druckverluste des Ölkühlers und der Leitungen zu berücksichtigen sind, treten Pumpendrücke von deutlich unter 1 bar im verbrauchsrelevanten Bereich und Maximaldrücke kleiner als 5 bar bei Kupplungskühlung und kalten Öltemperaturen auf.

Diese niedrigen Drücke ermöglichen einen Tech- nologiesprung bei der Werkstoffauswahl der Pumpe, die jetzt nahezu vollständig aus Kunst- stoff gefertigt werden kann. Das Saugregelventil kann einfach in das Pumpengehäuse integriert

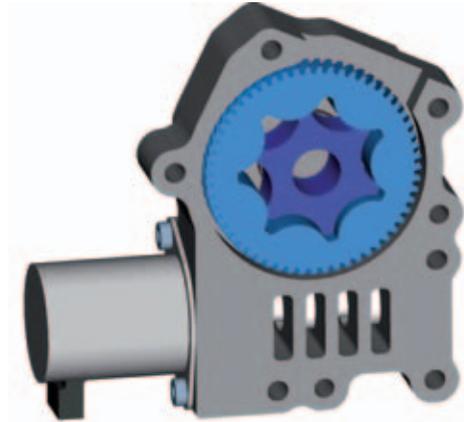


Bild 15 Kunststoffpumpe

werden. Durch den Einsatz von Kunststoff kann die spanende Bearbeitung der Teile entfallen und so ein deutlicher Kostenvorteil erzielt werden (Bild 15).

Die Kombination einer hebelbetätigten Doppel- nasskupplung mit einem einfachen und robusten Kühlkonzept senkt die Komplexität der Nass- kupplung deutlich, ohne Kompromisse bei der Funktionalität eingehen zu müssen.

LuK arbeitet auch an einem Kühlkonzept, bei dem ein ringförmiger Ölkühler zum Einsatz kommt und die kinetische Energie des aus der Kupplung austretenden, rotierenden Öls genutzt werden kann, um eine Kühlölzirkulation zu erzeugen (Bild 16). Eine Strahlpumpe sorgt hier für einen permanenten Austausch des zirkulierenden Öles mit dem Ölsumpf. Dies ermöglicht auch hier die komplette Nutzung des Ölsumpfes als Wärmesenke bei Ereignissen mit hohen Energieeinträgen. Durch diese Maßnahmen lässt sich die Leitungsführung vereinfachen, ein preis- günstigerer Kühler einsetzen und auch noch die schon günstige Kunststoffpumpe einsparen.

## Kraftstoffverbrauch

Eines der wichtigsten Themen bei der Entwick- lung der Doppelkupplungsgetriebe ist die Nut- zung des hohen Getriebewirkungsgrades und ein damit verbundener günstiger Kraftstoffver- brauch des Fahrzeugs.

Analysiert man die Angaben der Automobilher- steller zum Kraftstoffverbrauch, dann zeigt sich, dass der gute Wirkungsgrad des Getriebes auf

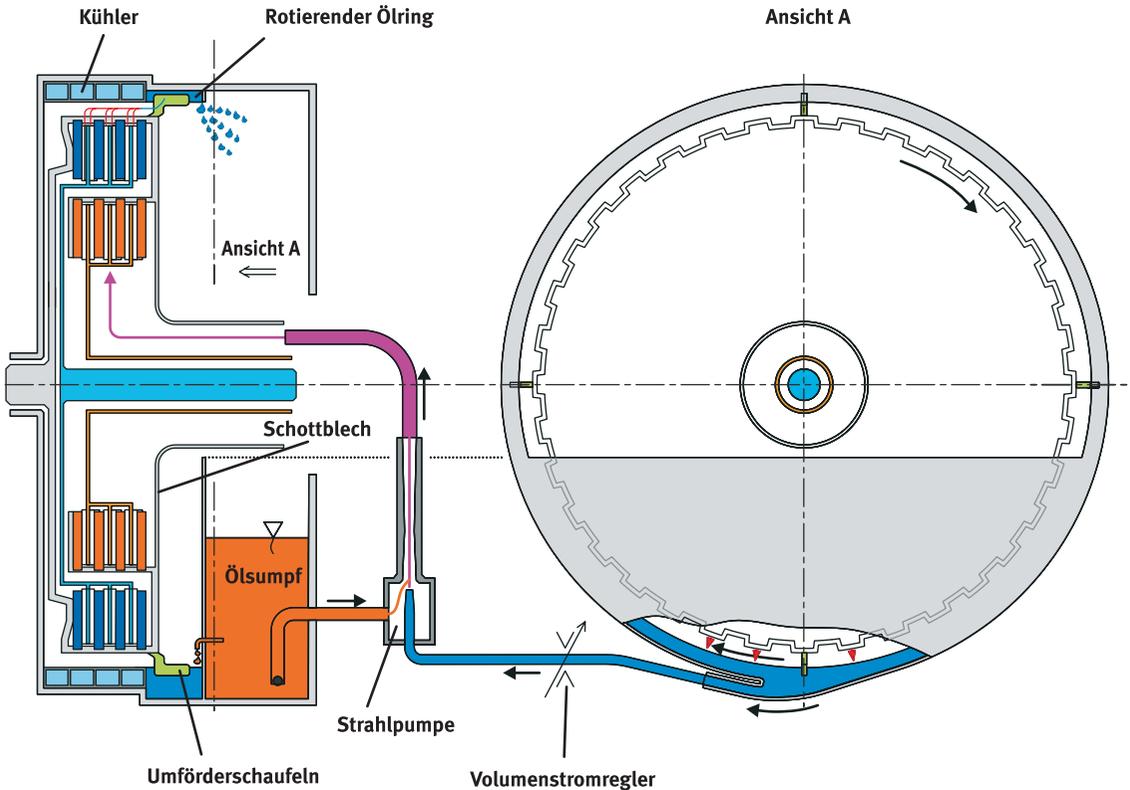


Bild 16 Neues Kühlkonzept

der Räderkastenseite nicht automatisch einen niedrigeren Verbrauch im Zyklus bedingt (Bild 17). Insbesondere bei Dieselfahrzeugen mit kleinen und mittleren Motorisierungen kann das Doppelkupplungsgetriebe (DCT) seine Vorteile noch nicht nutzen. Selbst die im Teillastbereich bezüglich Variatorwirkungsgrad etwas benachteiligten CVT-Getriebe schneiden etwas besser bis vergleichbar ab. Zurzeit überzeugt das Doppelkupplungsgetriebe nur bei hochmotorisierten Benzinmotoren.

Woran liegt das? Besonders die CVT-Getriebeentwickler haben durch den Einsatz von zweiflutigen Pumpen und Strahlpumpen sowie eines auf niedrige Betriebsdrücke und Pumpengröße optimierten Hydraulikkonzeptes auf der Steuerungsseite die leichten Nachteile auf der Variatorseite kompensiert.

Der gute Wirkungsgrad auf der Räderkastenseite der Doppelkupplungsgetriebe, die niedrigeren Massenträgheiten der nassen Kupplungen, die Möglichkeit einer Spritzölschmierung des Räder-

kastens und eine geeignete Vorwahlstrategie zur Eliminierung des Einflusses der Schleppmomente der geöffneten Kupplung sind bereits gute Voraussetzungen, um gegenüber anderen Getriebekonzepten und auch gegenüber Doppelkupplungsgetrieben mit Trockenkupplung weitere systembedingte Vorteile nutzen zu können bzw. Nachteile zu beseitigen.

Den größten Verlustanteil verursacht die hydraulische Pumpe, die einerseits große Kühlmengen zur Kühlung der Kupplungen und andererseits den Betriebsdruck zum Schließen der Kupplungen bereitstellen muss. Dieser Interessenkonflikt führt zu vergleichsweise großen Pumpen bei entsprechend höheren Systemdrücken bei den derzeit auf dem Markt befindlichen Systemen.

Benchmarkuntersuchungen haben ergeben, dass bei Konstantfahrt von 50 km/h die Pumpenverluste mit ca. 7 % auf den Kraftstoffverbrauch eines 250 Nm-Diesel-Minivans durchschlagen. Im gemischten Zyklus des NEDC liegt dieser Wert bei 7... 8 %.

Hier ergibt sich ein enormes Verbesserungspotenzial. Die vorgestellte hebelbetätigte Kupplung in Kombination mit einer elektro-mechanischen bzw. elektro-hydraulischen Betätigung und einer reinen Kühlölpumpe bietet hierfür gute Voraussetzungen.

Die elektrischen Verluste des elektro-hydraulischen Powerpacks bzw. der Elektromotoren der mechanischen Betätigung und des elektrisch angesteuerten Saugregelventils liegen in der gleichen Größenordnung wie die Verluste der Vielzahl der Schalt-, PWM- bzw. Proportional-

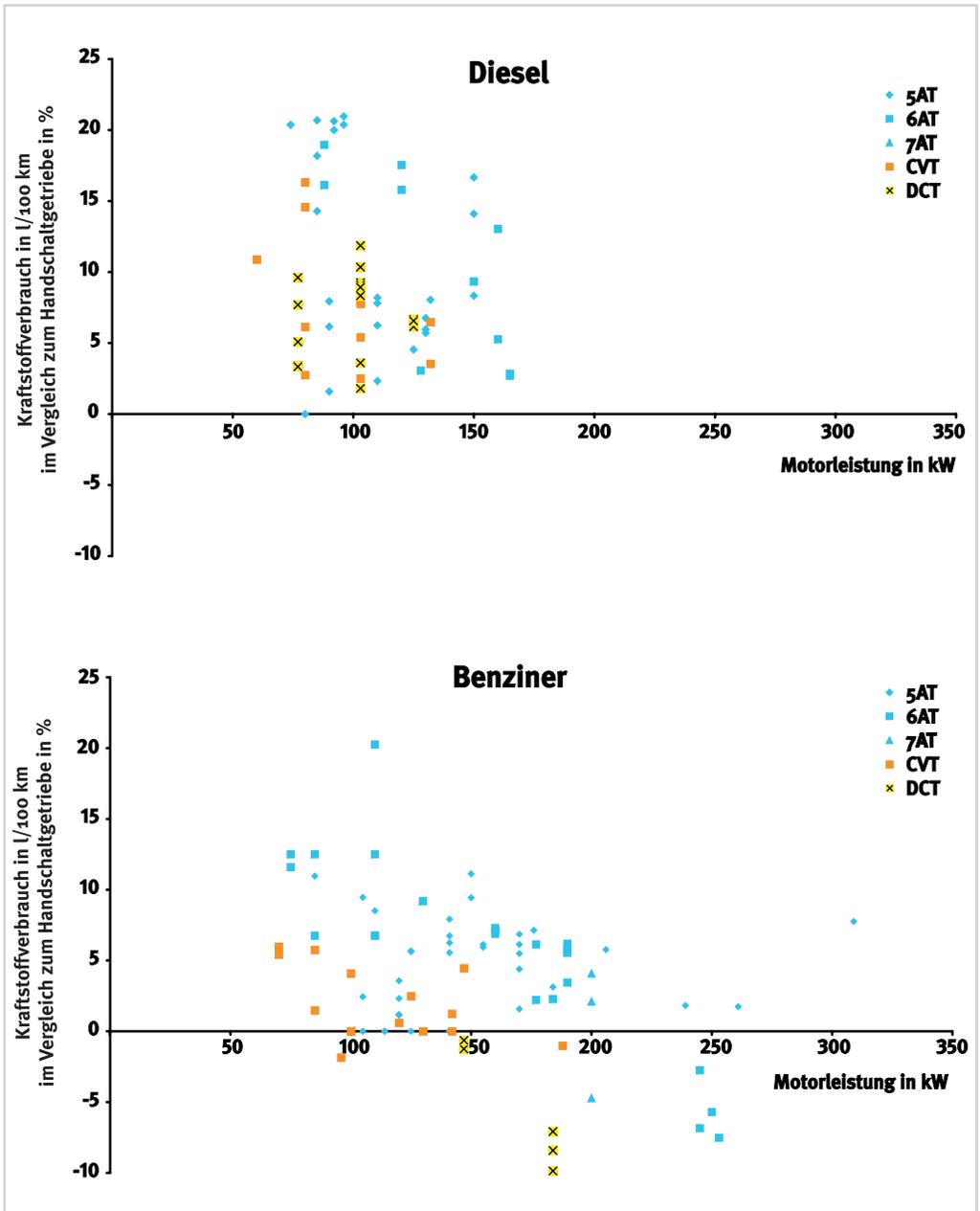
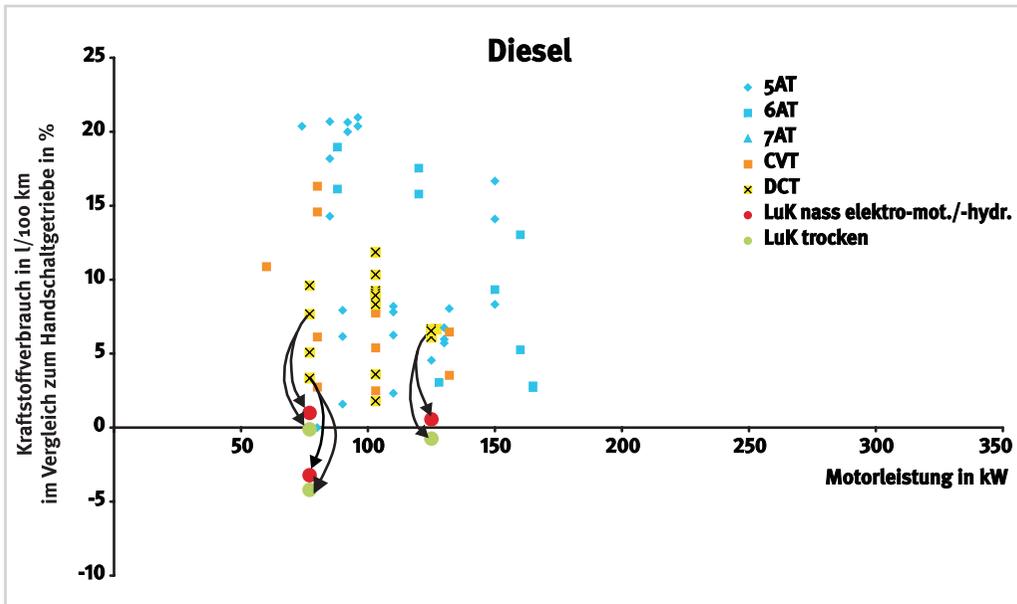


Bild 17 Unterschiede im Kraftstoffverbrauch verschiedener Getriebetypen [NEDC gemischt] im Vergleich zum Handschaltgetriebe bei gleicher Motorisierung im selben Fahrzeug; Quellen [6- 9]



**Bild 18** wie Bild 17, Dieselanwendungen, zusätzliche Angaben für drei ausgewählte Fahrzeuge für trockene und nasse Doppelkupplungsgetriebe mit LuK-Aktorik

magnete der klassischen hydraulischen Steuerung. Insofern ist es zulässig, sich beim Vergleich auf die reinen Pumpenverluste zu konzentrieren.

Diese Pumpenverluste der nahezu drucklos laufenden Umförderpumpe belaufen sich in dem oben genannten 50 km/h-Fall und im gemischten Zyklus des NEDC auf ca. 1 %. Es lassen sich also Kraftstoffverbrauchsvorteile von ca. 6 ... 7 % gegenüber dem Stand der Technik ausweisen (Bild 18). Auch beim Einsatz optimierter klassischer Hydraulikkonzepte mit Strahlpumpe lassen sich noch Verbrauchsvorteile in einer Größenordnung von mehr als 5 % erzielen.

Aus diesen Betrachtungen geht deutlich hervor, dass nicht die Nasskupplung ursächlich für einen höheren Kraftstoffverbrauch verantwortlich gemacht werden kann, sondern dass das Betätigungs- und Kühlkonzept die entscheidende Rolle spielt. Reduziert man hier die Verluste offensiv und nutzt gleichzeitig Vorteile, wie beispielsweise die geringeren Trägheiten und die Spritzölschmierung, nähert man sich schon sehr stark den guten Verbrauchswerten der trockenen Systeme.

Der Einsatz einer elektrischen Aktorik für die Kupplungsbetätigung und das Schalten ist eine gute Voraussetzung für die Hybridisierbarkeit

von Doppelkupplungsgetrieben. Der Aufwand eines zusätzlichen Powerpacks bei klassischen hydraulischen Steuerungen zur Gewährleistung der Vorbefüllung der Kupplungen bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor kann durch die vom Verbrennungsmotor unabhängige, elektrische Aktorik entfallen. Damit ist dieses Betätigungs-konzept in Kombination mit einer hebelbetätigten nassen Anfahrkupplung gut für die Anforderungen der Zukunft gerüstet.

## Zusammenfassung

Nasse und trockene Doppelkupplungen haben unter Berücksichtigung der gegebenen Randbedingungen wie Drehmomentkapazität, axialer Bauraum, Kraftstoffverbrauch, Lebensdauer, abzudeckende Hochenergieereignisse und Kosten ihre spezifischen Vor- und Nachteile, die je nach Gewichtung und Kundenphilosophie zu unterschiedlichen Entscheidungen führen können.

Ob sich das Doppelkupplungsgetriebe durchsetzen wird oder ein Nischenprodukt bleibt, werden die Kräfte des Marktes regeln. Die Doppelkupplungsgetriebe haben zurzeit im Vergleich zu den CVTs und den besten Stufenautomaten noch

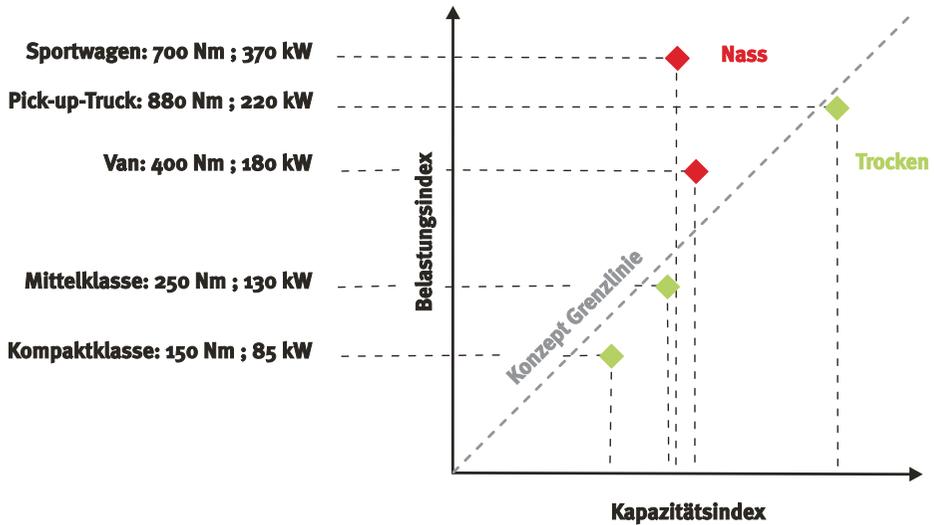


Bild 19 Trockene oder nasse Doppelkupplung?

Potenzial beim Kraftstoffverbrauch und den Kosten [6-10]. Ferner ist der Aspekt der Hybridisierbarkeit bei allen Automatikgetriebekonzepten zu beachten.

Die trockenen Doppelkupplungen haben sich aufgrund einfacher Prinzipien zur Verschleißnachstellung und einer Verbesserung der Robustheit bei Hochenergieereignissen zu einer ernsthaften Alternative auch für mittlere bis hohe Motordrehmomente entwickelt.

Die Entwickler der nassen Doppelkupplungen haben viel von den Erkenntnissen bei der Entwicklung der trockenen Systeme profitiert, so dass es jetzt möglich ist, die Vorteile der elektromotorischen Aktorik in Kombination mit einer Umföhrerpumpe mit den Vorteilen bei Hochenergieereignissen und Bauraum, insbesondere bei größeren Leistungen, zu verknüpfen.

Die Entscheidung für die nasse oder die trockene Doppelkupplung hängt von den kundenspezifischen Anforderungen, den Fahrzeug- und Antriebsstrangkenngrößen wie Motormoment, Anfahrübersetzung und Fahrzeuggewicht sowie vom zur Verfügung stehenden Bauraum und den Kühlbedingungen ab. Die Entscheidungsgrenzen verschieben sich in Abhängigkeit der Fahrzeugkategorie [11] (Bild 19). So lässt sich ein 880 Nm Pick-up-Truck noch mit einer trockenen Doppelkupplung ausrüsten, aber ein Van mit einem 400 Nm Verbrennungsmotor benötigt nasse Kupplungen.

In beiden Fällen erweist sich eine elektro-mechanische oder elektro-hydraulische Aktorik als vorteilhaft, wenn es darum geht, sich gegenüber dem Stand der Technik im Kraftstoffverbrauch abzusetzen und die Voraussetzungen für eine Hybridisierbarkeit zu schaffen. Dass dies nicht mit komplizierten Lösungen und zusätzlichen Kosten verbunden sein muss, zeigen die vorgestellten Lösungen.

Aufgrund der gleichen Schnittstelle zur Einleitung der Betätigungskraft in die hebelbetätigten trockenen und nassen Kupplungen, die durch die Einrücklager gekennzeichnet ist, lässt sich ein modulares Konzept realisieren [5, 11] (Bild 20). Bei gleichbleibendem Räderkasten mit elektro-mechanisch oder elektro-hydraulischer Betätigung der Schaltung lassen sich in der Kupplungsglocke nasse und trockene Doppelkupplungen mit identischer Kupplungsbetätigung anordnen. Alle dazu notwendigen Anpassungen, wie die zusätzliche Anbringung der Umföhrerpumpe und des Saugregelventils bei den nassen Doppelkupplungen, können auf die Kupplungsglocke beschränkt werden, die in den meisten Fällen sowieso an die verschiedenen Motorflanschbilder adaptiert werden muss. Dadurch kann das gleiche Grundgetriebe inklusive Aktorik einfach an die verschiedensten Kundenanforderungen angepasst und eine bedarfsorientierte, zukunftsfähige Lösung angeboten werden.

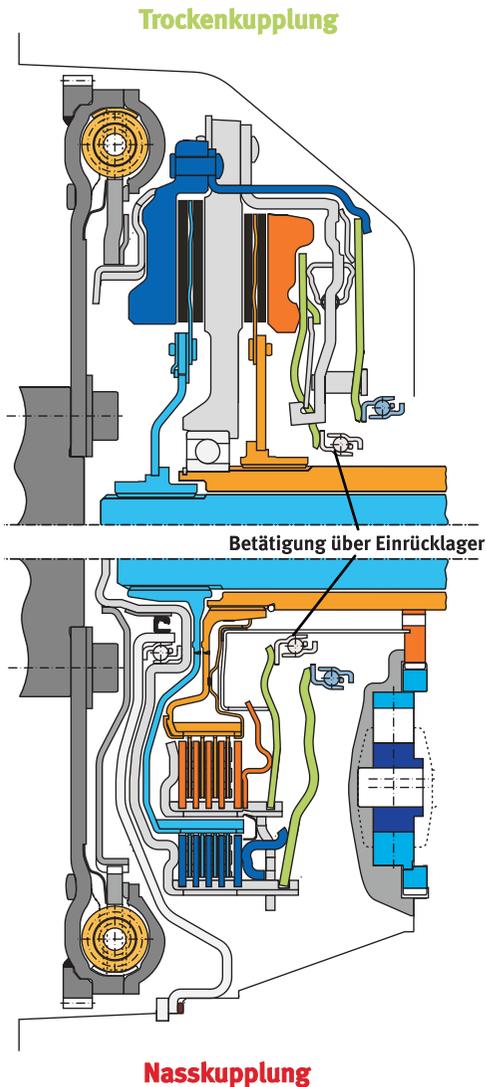


Bild 20 Modulares Kupplungskonzept

## Literatur

- [1] Berger, R.; Meinhard, R.; Bündler, C.: Das Parallel-Schalt-Getriebe PSG – Doppelkupplungsgetriebe mit Trockenkupplungen, 7. LuK Kolloquium 2002
- [2] Kimmig, K.-L.: Die selbsteinstellende Kupplung SAC der 2. Generation, 6. LuK Kolloquium 1998
- [3] Reik, W.; Kimmig, K.-L.: Selbsteinstellende Kupplungen für Kraftfahrzeuge, VDI Bericht 1323 (1997), S. 105-116
- [4] Reik, W.: Die selbsteinstellende Kupplung, 5. LuK Kolloquium 1994
- [5] Reik, W.; Friedmann, O.; Agner, I.; Werner, O.: Die Kupplung – das Herz des Doppelkupplungsgetriebes, VDI-Berichte Nr. 1824, Getriebe in Fahrzeugen 2004
- [6] Katalog 2005 der „Automobil Revue“, Bern (Schweiz), Seiten 121-135, 138-152, 232-243, 335-357, 397-411, 433-437, 526-546
- [7] DSG-Anwendungen in [www.volkswagen.de](http://www.volkswagen.de) und [www.audi.de](http://www.audi.de) vom 16.02.2006
- [8] Multitronic®-Anwendungen aus Preisliste A4, Audi AG, Stand 01.01.2006 und Preisliste A6, Audi AG, Stand 01.01.2006
- [9] Autotronic®-Anwendungen in [www.mercedes-benz.de](http://www.mercedes-benz.de) vom 16.02.2006
- [10] Mäder, K. M.: Continuously Variable Transmission: Benchmark, Status & Potentials, Folie 19, Dokumentation 4. Internationales CTI-Symposium, Innovative Fahrzeug-Getriebe, 2005
- [11] Wagner, U.; Berger, R.; Friedmann, O.; Esly, N.: Elektromotorische Automatisierung für Doppelkupplungsgetriebe, VDI-Berichte Nr. 1824, Getriebe in Fahrzeugen 2004