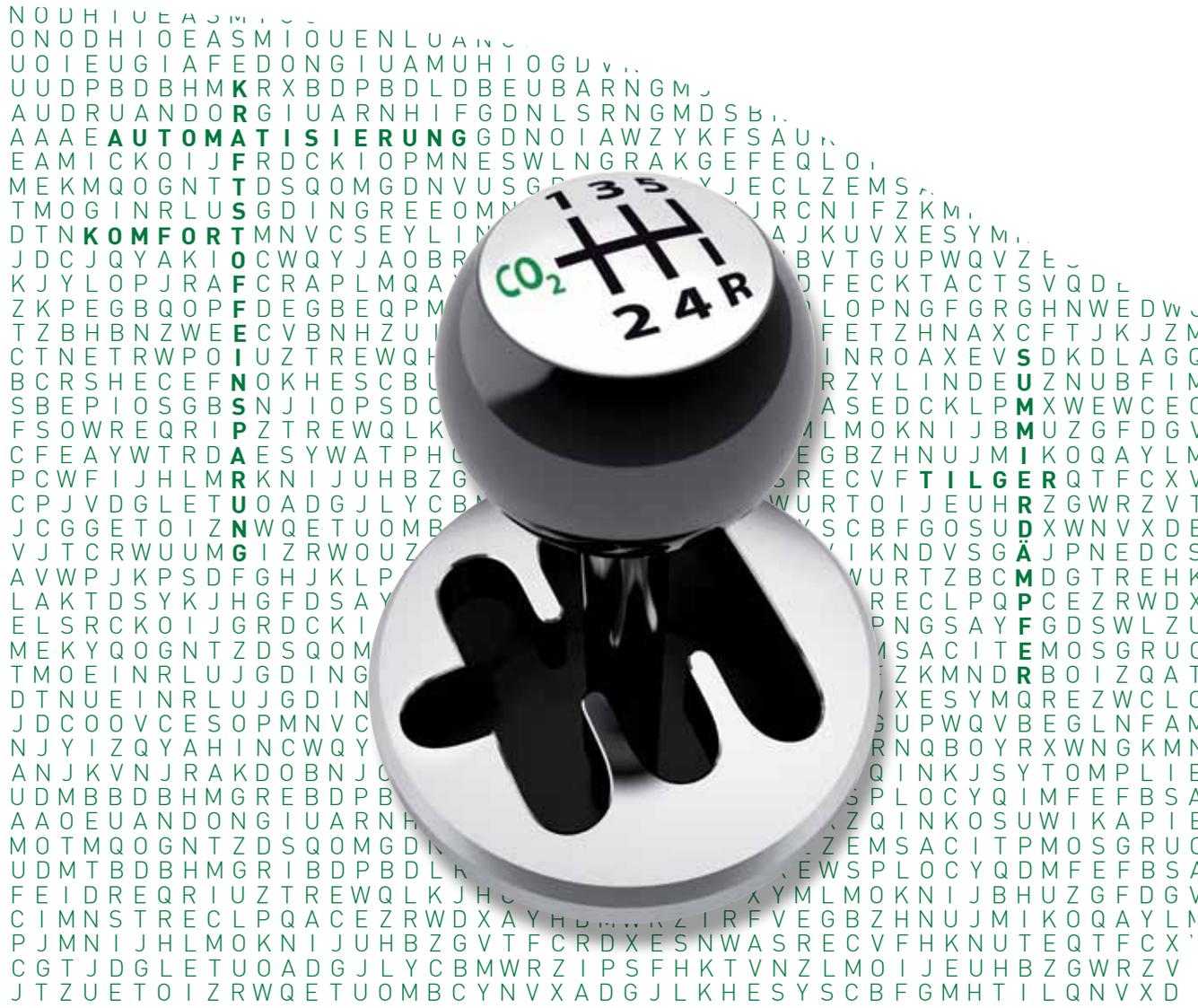


Mission CO₂-Reduktion

Die Zukunft des manuellen Schaltgetriebes

Jürgen Kroll
Markus Hausner
Roland Seebacher

4



Einleitung

Auf absehbare Zeit wird der Verbrennungsmotor die dominierende Antriebsquelle in der individuellen Mobilität bleiben. Dabei ist die größte Herausforderung, den Kraftstoffverbrauch weiter entsprechend den immer strenger werdenden gesetzlichen Vorgaben zu senken – und das bei möglichst gleichbleibendem Fahrkomfort und Fahrspaß! Alle Möglichkeiten auf der Motoren- und Getriebeseite müssen gleichermaßen angegangen werden: Verbrauchsgünstige Fahrstrategien sind hier ein Schlüssel zur Zielerreichung. Um diese realisieren zu können, ist eine weitere Automatisierung des Getriebes und eine Elektrifizierung notwendig. Das klassische Handschaltgetriebe gerät so unter Druck und läuft Gefahr, zumindest in den entwickelten Märkten verdrängt zu werden. Auf der anderen Seite bleiben Handschalter unter Kostengesichtspunkten weiter attraktiv. Sie würden auch zukünftig eine große Rolle spielen, wenn es gelingt, kostengünstige Systeme zu entwickeln, die Fahrstrategien wie das „Segeln“ auch beim Handschalter ermöglichen machen.

Durch eine solche Teilautomatisierung des Handschalters ließen sich ohne Mehrkosten auch Komfort- und Schutzfunktionen integrieren. Der Kraftstoffverbrauch könnte dann noch weiter gesenkt werden, indem z. B. eine längere Achsübersetzung gewählt wird. Ein Missbrauch, sprich ein Überhitzen der Kupplung, wird dabei durch die Teilautomatisierung verhindert.

Das so mögliche „extreme“ Downspeeding hat aber auch Nachteile, insbesondere bei den zukünftig weit verbreiteten Motoren mit geringer Zylinderzahl und/oder Zylinderabschaltung: Um den vom Endkunden erwarteten Komfort sicherzustellen, müssen immer bessere Systeme zur Schwingungs- und Isolierung entwickelt werden. Zwar bietet das

von LuK entwickelte Fliehkraftpendel (FKP) hier auch für die kommenden Jahre großes Potenzial, dennoch werden langfristig noch leistungsfähigere Systeme zur Anwendung kommen müssen.

Ausgangssituation – Handschaltgetriebe unter Druck

Neben den Anstrengungen, auf der Motorenseite den Verbrauch weiter zu senken, muss auch das Getriebe einen möglichst hohen Beitrag zu einem effizienten Antriebsstrang leisten. Das Handschaltgetriebe bietet mit seinem hohen Wirkungsgrad hierfür zunächst eine gute Basis. Allerdings sind weitere konventionelle Optimierungsmaßnahmen wie Verlustreduzierung oder Erhöhung der Ganganzahl und Getriebebespreizung begrenzt. Einen wesentlich höheren Beitrag kann das Getriebe leisten, wenn es dem Verbrennungsmotor einen Betrieb bei hohem Wirkungsgrad ermöglicht. Bei den heutigen Motoren bedeutet dies niedrige Drehzahlen oder eine Abschaltung, wenn er nicht gebraucht wird. Naturgemäß bietet ein Handschaltgetriebe zunächst ungünstige Voraussetzungen, um dieses Potenzial zu erschließen und gerät daher zunehmend unter Druck. Abgesehen von optischen Schaltpunktfehlungen können keine verbrauchsoptimierten Schaltstrategien genutzt werden. Zudem sind auch Hybrid- oder erweiterte Start-Stopp-Funktionen auf eine gewisse Automatisierung angewiesen.

Unter diesem Gesichtspunkt ist die Automatisierung längst nicht mehr nur getrieben von dem Wunsch des Autokäufers nach mehr Komfort. Sie ist in einigen Fahrzeugklassen zwingend erforderlich, um die

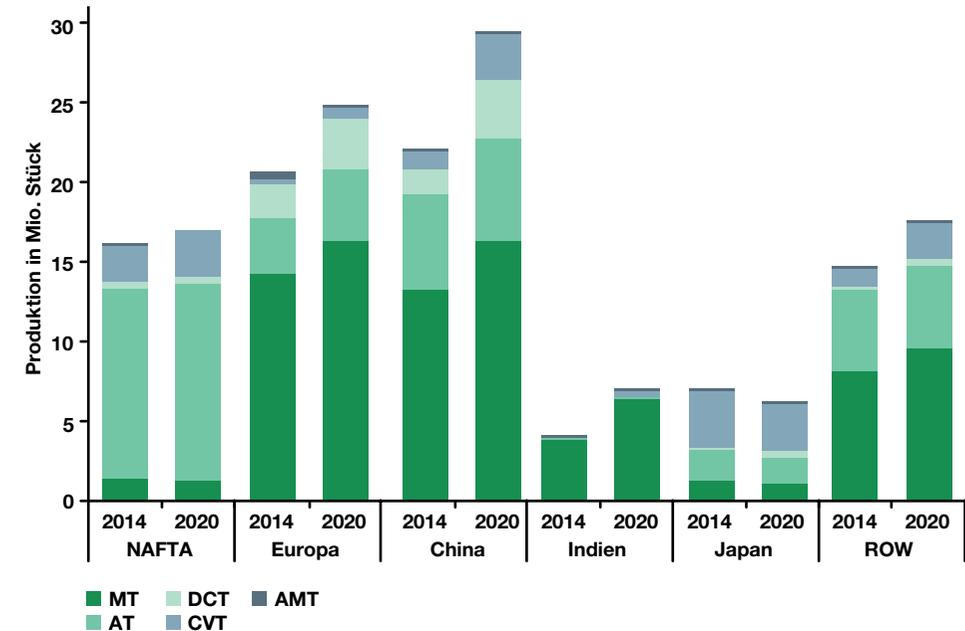


Bild 1 Weltweite Fahrzeugproduktion nach Getriebetechnologien (Quelle: CSM Aug. 2013)

künftigen CO₂-Grenzwerte zu erreichen und um damit empfindliche Strafzahlungen zu vermeiden. 2015 wird in Europa die Grenze von heute 135 g CO₂/km auf 130 g CO₂/km gesenkt und für 2020 sind 95 g CO₂/km bereits beschlossen.

Mit einer weitreichenden Verdrängung des Handschaltgetriebes ist laut aktueller Prognosen dennoch auf absehbare Zeit nicht zu rechnen. Es hat nach wie vor den höchsten Marktanteil, insbesondere bei den unteren Fahrzeugsegmenten, sowohl in den BRIC-Staaten als auch in Europa (Bild 1).

Um diese starke Marktposition auch für die Zukunft zu sichern, ist eine Aufwertung des Handschaltgetriebes erforderlich. Im Vordergrund stehen dabei Möglichkeiten zur Verbrauchsreduzierung, aber auch Funktionen zur Erhöhung des Komforts, wie beispielsweise ein Anfahr- oder Stauassistent, wären eine sinnvolle Ergänzung.

Neue Chancen für das Handschaltgetriebe

Zur Bewertung möglicher Verbrauchsvorteile ist primär der gültige Fahrzyklus heranzuziehen und dahingehend zu analysieren, in welchen Phasen welche Maßnahmen Vorteile bringen können. Beispielsweise führte der Stoppanteil von etwa 20 % im NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus) zur flächendeckenden Einführung der Start-Stopp-Systeme in Europa mit einem Verbrauchsvorteil im Bereich von 5 %. Die Weiterführung dieser Technologie ist, den Motor auch während der Fahrt auszuschalten, wozu er vom Antriebsstrang getrennt werden muss. Dieser sogenannte Segelbetrieb ist theoretisch immer dann sinnvoll, wenn die Fahrzeugverzögerung im Bereich zwischen Fahrwiderstand und Motorbremsmoment liegt. Im aktuell

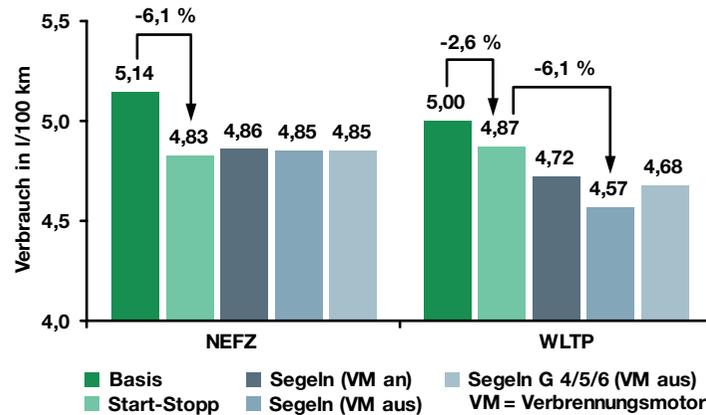


Bild 2 Verbrauchsvorteile Start-Stopp und Segeln für verschiedene Fahrzyklen

gültigen NEFZ gibt es diese Phasen nicht, womit eine Segelfunktion keinen Vorteil bringt. Mit dem geplanten WLTP (Worldwide harmonized Light Test Procedure) würde sich dies ändern. Intern durchgeführte Verbrauchssimulationen mit einem 2,0-l-Dieselmotor (Bild 2) zeigen, dass abhängig von der Segelstrategie Verbrauchsreduzierungen von mehr als 6 % möglich sind. Bereits mit Segeln nur in den oberen Gängen (4/5/6) lässt sich eine Reduzierung von etwa 4 % erreichen. Im Gegensatz dazu schmilzt allerdings aufgrund des geringeren Stopp-Anteils im WLTP das Potenzial heutiger Start-Stopp-Systeme um mehr als 50 %.

Die Segelfunktion ist bisher nur mit Automatikgetrieben möglich und bei einigen Modellen bereits in Serie. Allerdings ist eine

komplette Getriebeautomatisierung nicht zwingend erforderlich. Theoretisch wäre bereits eine automatisierte Kupplung zum Trennen von Motor und Getriebe ausreichend. Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Automatikgetriebe sind Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe im Zyklus an eine geschwindigkeitsabhängige Gangvorgabe gebunden. Um den Motor effizient im niedrigen Drehzahlbereich zu betreiben, müssen die Getriebeübersetzungen reduziert werden. Das Potenzial wäre beachtlich. Eine 10 % geringere Motordrehzahl reduziert den Verbrauch bei konstanten 70 km/h im 5. Gang um 7 % (Beispielsimulation mit 2,0-l-Dieselmotor), für den NEFZ ist eine Kraftstoffeinsparung von ca. 5,6 % und für den WLTP von ca. 2,5 % realisierbar. Allerdings würde darunter das Anfahrverhalten leiden: Sowohl Komfort als auch Kupplungsbelastung würden negativ beeinflusst. Auch hierfür könnte eine automatisierte Kupplung die Lösung bringen. Die höheren Anforderungen könnten durch automatisierte oder unterstützte Anfahrvorgänge kompensiert werden.



Bild 3 Motivationen für die Kupplungsautomatisierung

komplette Getriebeautomatisierung nicht zwingend erforderlich. Theoretisch wäre bereits eine automatisierte Kupplung zum Trennen von Motor und Getriebe ausreichend.

Im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Automatikgetriebe sind Fahrzeuge mit Handschaltgetriebe im Zyklus an eine geschwindigkeitsabhängige Gang-

Darüber hinaus könnte mit einer Kupplungsschutzstrategie zusätzliche Sicherheit geschaffen werden.

Eine Kombination der Maßnahmen Segeln und Drehzahlabenkung führt theoretisch zu einer Einsparung im Bereich von 5 – 10 %, je nach Fahrzyklus. Eine Kupplungsautomatisierung würde noch weitere Möglichkeiten eröffnen (Bild 3). Der höhere Automatisierungsgrad würde einen Einstieg in die Hybridisierung bei einem Handschaltgetriebe erheblich unterstützen. Mit einem zusätzlichen elektrischen Antrieb, zum Beispiel einer elektrischen 48-V-Antriebsachse, wäre in einem Stop-and-Go-Modus auch elektrisches Anfahren und Rollen möglich (Stauschieben). Das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit könnte teilweise auch ohne Verbrennungsmotor rein elektrisch erfolgen (elektrisches Segeln) und beim Bremsen ließe sich die Effektivität einer Energierückgewinnung um die Schleppverluste des Verbrennungsmotors steigern. Interne Berechnungen zeigen, dass sich der mögliche Verbrauchsvorteil aller Maßnahmen zusammen im Zyklus auf mehr als 20 % summieren kann [1].

Neben den Potenzialen zur Verbrauchseinsparung sind auch Komfortsteigerungen ein interessanter Aspekt. In einem automatisierten Stop-and-Go-Modus hätte der linke Fuß Pause und würde den Fahrer und auch die Kupplung im lästigen Staubetrieb erheblich entlasten.



Bild 4 EKM bei der Markteinführung (Großserie) und in einem Konzeptfahrzeug

Automatisierung Handschalter: alte Bekannte

Das von LuK entwickelte Elektronische Kupplungsmanagement (EKM, Bild 4), bei dem der Fahrer noch selber schalten, aber nicht mehr kuppeln muss, ging 1993 im BMW ALPINA in Serie [2, 3]. Allerdings konnte diese konsequente Umsetzung einer Kupplungsautomatisierung die Endkunden damals nicht überzeugen. Fahrzeuge mit EKM fanden nur wenige Abnehmer und sind mittlerweile nicht mehr auf dem Markt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist vermutlich, dass ein Fahrzeug mit nur zwei Pedalen, also ohne Kupplungspedal, bei dem

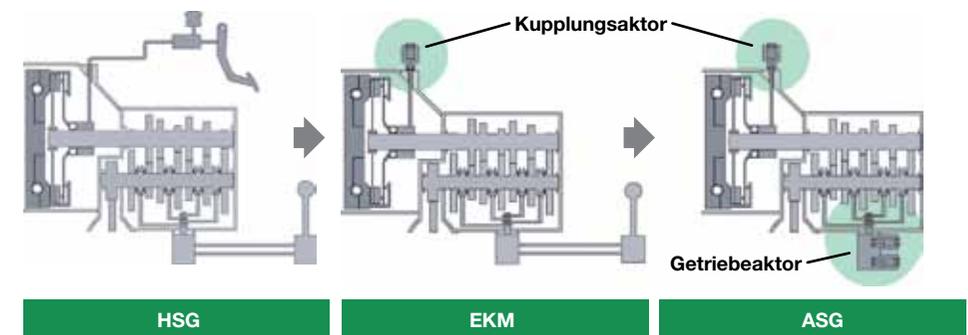


Bild 5 Automatisierung Handschaltgetriebe (HSG)

Endkunden die Erwartung eines Automatikgetriebes weckt, die von einem EKM nicht erfüllt werden kann.

Etwa zeitgleich mit dem EKM ging auch das Automatisierte Schaltgetriebe (ASG, Bild 5) in Großserie. Auch diese Technologie findet bis heute nur wenige Abnehmer und steht aktuell nur bei wenigen Modellen zur Wahl. Das ASG konnte sich wegen der unerwünschten Zugkraftunterbrechung nicht durchsetzen, da dadurch nur eingeschränkt die Komfortanforderungen an ein Automatikgetriebe erreicht werden. Der weltweite Marktanteil stagniert bei Werten unter 1 %, womit das ASG aktuell mit Abstand die geringsten Stückzahlen aller Getriebetechnologien aufweist.

Damit blieben die bisherigen Versuche, ein Handschaltgetriebe zu automatisieren weitgehend erfolglos. Sowohl beim Fahrspaß als auch beim Fahrkomfort konnte keine ausreichend Akzeptanz erreicht werden. Aus heutiger Sicht ergeben sich jedoch neue Chancen. Sowohl EKM als auch ASG bieten eine gute Basis, um die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Strategien zur Verbrauchssenkung zu unterstützen.

Zur Aufwertung von Handschaltgetrieben gibt es aber noch weitere Alternativen

für eine Kupplungsautomatisierung, bei denen im Gegensatz zu einem EKM das Kupplungspedal erhalten bleibt.

Clutch by Wire – Strategiefähige Kupplung

Ein schon bekanntes Konzept ist das Clutch by Wire (CbW). Für den Fahrer handelt es sich hierbei zunächst um ein ganz normales Handschaltgetriebe – wie gewohnt mit drei Pedalen und ohne jegliche wahrnehmbare Automatisierung. Dem Fahrer ist nicht unmittelbar bewusst, dass durch die Betätigung des Kupplungspedals lediglich seine Fahrabsicht über einen Wegsensor detektiert wird. Die tatsächliche Kupplungsbetätigung übernimmt ein Aktor. Wie es die Bezeichnung „by wire“ verrät, entfällt die hydraulische oder mechanische Verbindung zwischen Kupplung und Kupplungspedal.

Diese Technologie wurde in der Vergangenheit bereits mehrfach von LuK als Mög-

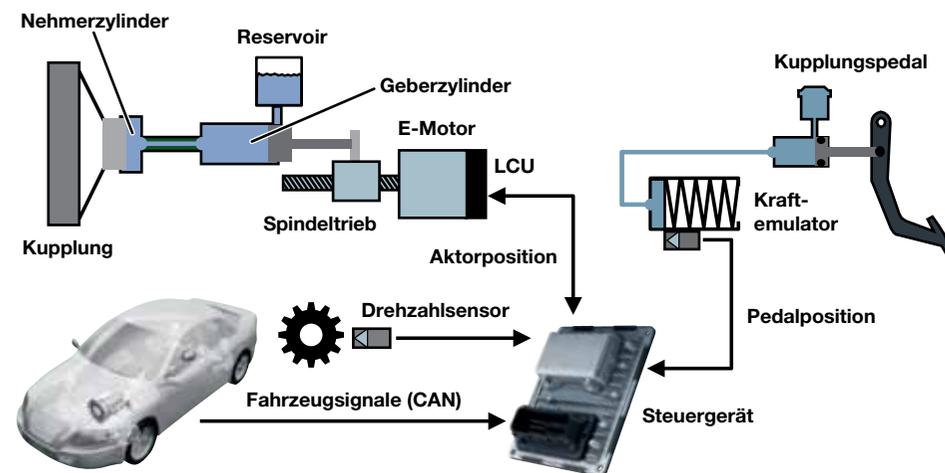


Bild 6 Aufbau und Komponenten Clutch by Wire (CbW)

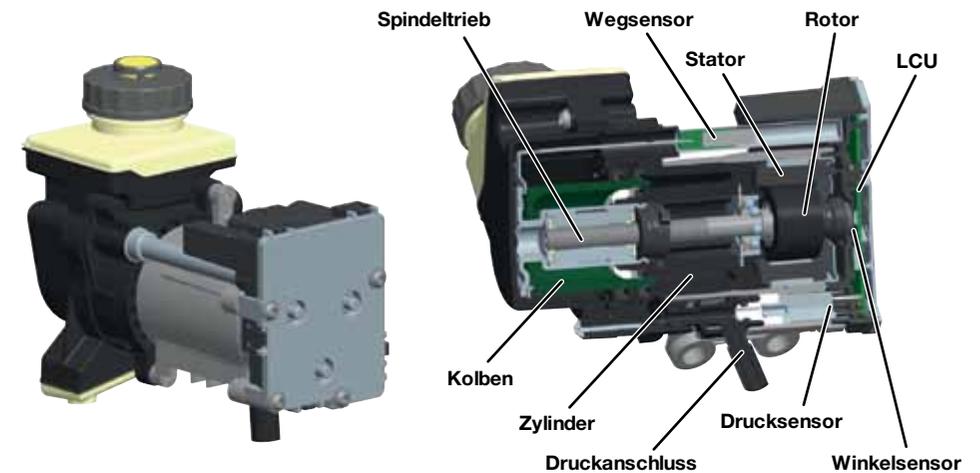


Bild 7 Hydrostatischer Kupplungsaktor – HCA (Hydraulic Clutch Actuator)

lichkeit zur Aufwertung des Handschaltgetriebes vorgestellt. Der Fokus lag dabei bisher auf einer umfassenden Komfortsteigerung von Kupplungsbetätigung und Anfahrverhalten bis hin zur Verbesserung des NVH-Verhaltens. Allerdings führten diese bisher betrachteten Funktionalitäten zu keinem ausreichenden Kosten-Nutzen-Verhältnis. Das Konzept wurde aus der bisherigen Motivation heraus nicht weiter verfolgt und wird bis heute nicht in Serie eingesetzt.

In Bild 6 ist die Architektur eines Clutch by Wire-Systems dargestellt. Die für das Kupplungssteuergerät notwendigen Eingangsdaten setzen sich aus Informationen vom Fahrzeug (CAN), dem Fahrerwunsch (Pedalposition), sowie von zusätzlichen Sensoren (z. B. Drehzahl) zusammen. Hinterlegte Strategien bestimmen daraus das Kupplungsollmoment. Das System hat dabei die Möglichkeit, die Fahrervorgabe zu korrigieren. Beispielsweise ist es sinnvoll, Missbrauchssituationen oder ein Abwürgen beim Anfahren zu verhindern.

Bei dieser Anordnung wirkt die Ausrückkraft der Kupplung nicht mehr auf das Pedal, womit eine Pedalkraftemulation notwendig ist. Hierzu gibt es bei Schaeffler eine

aus Kosten- und Bauraumsicht interessante Neuentwicklung. Ein besonders kompakter Kraftemulator ersetzt bauraumneutral den konventionellen hydraulischen Geberzylinder, Details hierzu werden in [4] gezeigt.

Als Kupplungsaktor kann der von Schaeffler entwickelte HCA (Hydraulic Clutch Actuator, Bild 7) eingesetzt werden, der in [5] ausführlich beschrieben ist. Diese Aktortechnologie wurde speziell für hydraulisch betätigte Kupplungen in automatisierten Getrieben konzipiert und ist mittlerweile bei Doppelkupplungsgetrieben im Serieneinsatz.

Ein Vorteil des HCA liegt in seiner universellen Adaptierbarkeit. Er kann zum einen ohne größere fahrzeugseitige Änderungen dort untergebracht werden, wo der notwendige Bauraum zur Verfügung steht. Zum anderen ist eine Ansteuerung sowohl von CSC (Zentralrausrücker) als auch von semihydraulischem Nehmerzylinder gleichermaßen möglich. Bei Letzterem ist jedoch zu diskutieren, ob dies die sinnvollste Konfiguration darstellt. Der aktorinterne Axialhub treibt ein hydrostatisches System an, welches wiederum am Ausrückhebel der Kupplung einen Axialhub erzeugt. Es erscheint daher naheliegend, den

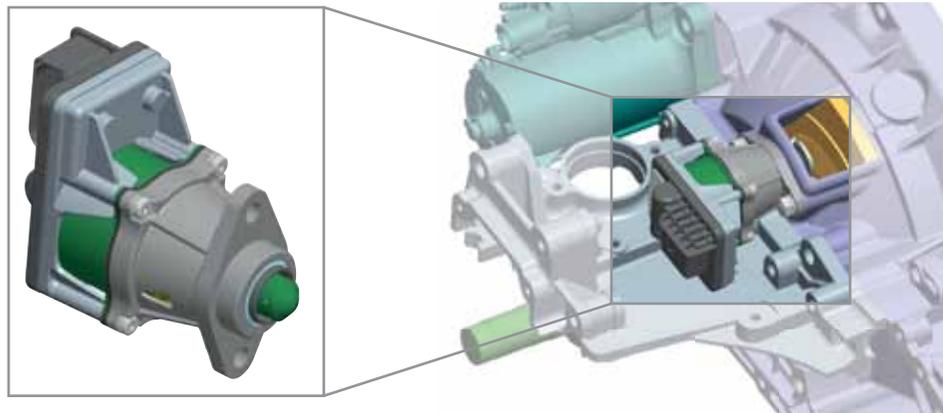


Bild 8 Elektromechanischer Aktor für CbW – Kompakt und leistungsfähig

Ausrückhebel ohne Umweg über eine Hydraulik direkt zu betätigen. Schaeffler entwickelt hierzu eine kompakte und leistungsfähige Lösung (Bild 8). Das Ziel ist es, möglichst ohne getriebeseitige Änderungen den semihydraulischen Zylinder durch einen elektromechanischen Aktor zu ersetzen. Damit wird die Grundanforderung erfüllt, mit geringem Aufwand ein vorhandenes Getriebe um eine Kupplungsautomatisierung aufrüsten zu können.

Um die Flexibilität weiter zu erhöhen, geht Schaeffler noch einen Schritt weiter. Ein modulares Aktorsystem soll es ermöglichen, im-

mer denselben Grundaktor zu verwenden (Bild 9). Dieser beinhaltet die Elektronik inklusive Sensorik, den E-Motor, sowie einen speziellen Spindeltrieb für aufgedrückte Kupplungen (Selbsthemmung in Schließrichtung). Je nach Randbedingungen wird der Grundaktor entweder mit einem mechanischen oder einem hydraulischen Modul komplettiert, an welchem auch die anwendungsspezifische Anbindung zum Getriebe vorgesehen wird. Dadurch reduzieren sich die Entwicklungs- und Systemkosten, was zwingend erforderlich ist, um diese Systeme für die preissensiblen Handschaltgetriebe attraktiv zu machen.

Eine weitere Beschreibung zu diesem Konzept, sowie den aktuellen Entwicklungen bei der Aktortechnologie von Schaeffler gibt es in [6].

Die Anforderungen an den Aktor sind bei den bisher beschriebenen Möglichkeiten zur Automatisierung des Handschaltgetriebes vergleichbar hoch. Insbesondere bei EKM und CbW wird eine hohe Dynamik benötigt, um auch schnelle Gangwechsel zu ermöglichen. Gelingt es, diese Anforderungen deutlich zu reduzieren, sind weitere Kostensenkungen realisierbar. Um dies zu erreichen geht Schaeffler einen neuen Weg, bei dem nicht mehr jeder Kuppelvorgang von einem Aktor ausgeführt wird.

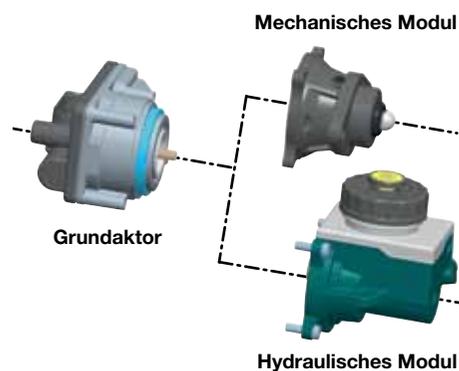


Bild 9 Modulares Aktorkonzept für maximale Flexibilität

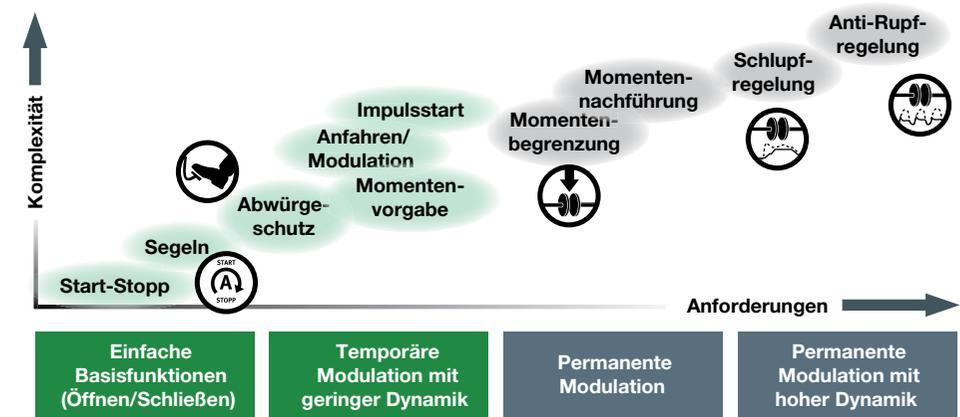


Bild 10 Aktoranforderungen versus Funktionalitäten

MTplus – Teilautomatisierte Alternative

Die Grundidee ist, parallel zu dem vorhandenen Ausrücksystem einen Aktor anzubringen, wodurch die notwendige Aktorleistung deutlich reduziert werden soll. Es muss bewertet werden, welche Funktionen dann noch möglich sind, beziehungsweise ob der verbleibende Mehrwert den Aufwand einer

Automatisierung rechtfertigen kann. Hierzu zeigt Bild 10 eine grobe Einschätzung, indem einige Funktionen anhand der Kriterien Dynamik und Einsatzdauer bewertet werden. Die höchsten Anforderungen ergeben sich für Funktionen zur Reduzierung von Schwingungen. Vergleichsweise gering sind die Anforderungen für Anfahren oder Segeln, wofür weder eine hohe Dynamik noch eine permanente Kupplungsmodulation benötigt wird.

Nach dieser Abschätzung hätte bereits ein kleinerer Aktor durchaus genügend Potenzial, das Handschaltgetriebe aufzuwer-

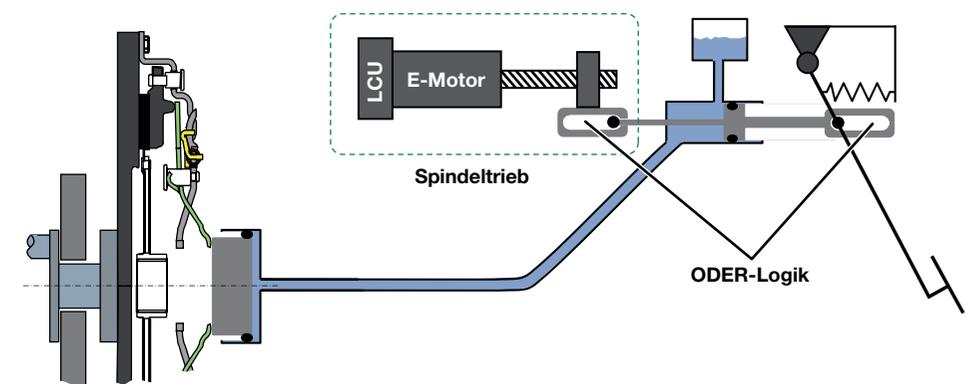


Bild 11 Grundkonzept der Teilautomatisierung MTplus mit ODER-Logik



Bild 12 Beispiel für aktiven Geberzylinder (ODER-Logik)

ten. Insbesondere können die weiter oben erläuterten Funktionen zur Verbrauchssenkung angeboten werden.

Als Herausforderung gilt es, ein geeignetes Aktorkonzept zu finden, welches sowohl eine konventionelle als auch eine automatisierte Betätigung der Kupplung ermöglicht. Dabei muss sichergestellt werden, dass zum einen der Aktor die normale Fußbetätigung nicht störend beeinträchtigt und zum anderen, dass der Fahrer jederzeit vorrangig die Kontrolle behält.

Um hierfür Lösungen zu finden, wurden umfangreiche Konzeptstudien durchge-

führt. Das daraus entwickelte Grundkonzept zeigt Bild 11, welches sich durch zwei wesentliche Eigenschaften charakterisieren lässt. Zum einen führt eine Betätigung durch den Aktor zu keiner Zeit zu einer Bewegung des Kupplungspedals, zum anderen ist die Ausrückposition der Kupplung durch eine ODER-Logik immer eindeutig definiert. Dadurch wird die Priorität des Fahrerwunschs jederzeit gewährleistet.

Bei der Darstellung in Bild 11 handelt es sich prinzipiell um einen aktiven Geberzylinder. Einen konstruktiven Entwurf hierfür zeigt Bild 12. Der E-Motor mit Spindeltrieb ist neben dem Geberzylinder angeordnet. Die Anbindungen von Pedal und Spindeltrieb zur Kolbenstange ermöglichen jeweils nur eine Kraftübertragung in Auskuppelrichtung, womit die ODER-Logik realisiert ist.

Ein aktiver Geberzylinder hat jedoch offensichtliche Nachteile: Zum einen die erhöhte Gefahr einer Geräuschübertragung vom E-Motor in den Innenraum, zum anderen der zusätzliche Bauraumbedarf im ohnehin beengten Bereich des Geberzylinders. Dazu kommt eine schlechte Adaptierbarkeit. Ein solcher Aktor müsste in vielen Fällen anwendungsspezifisch angepasst bzw. neu konstruiert werden – eine eher ungünstige Voraussetzung im Hinblick auf eine

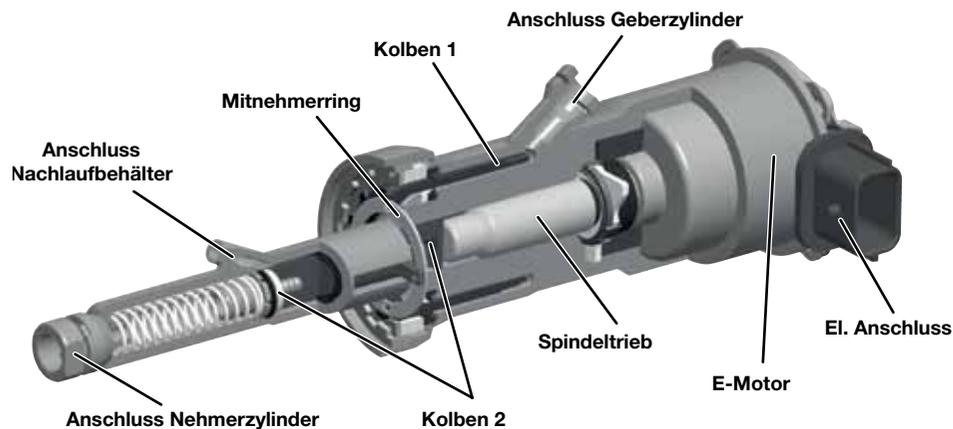


Bild 13 Aktorvariante für MTplus mit zwei Zwischenkolben

Kostenbewertung. Dies trifft weitgehend auch auf eine Anordnung im Bereich des Nehmerzylinders zu, womit auch diese nur bedingt zielführend ist.

Eine Integration in die hydraulische Druckleitung stellt sich bezüglich der Kriterien Bauraum und Adaptierbarkeit wesentlich günstiger dar.

Die Aktoreinheit wird dort positioniert, wo der notwendige Bauraum zur Verfügung steht und mit der Hydraulik verbunden. Eine direkte Übertragung des in Bild 11 dargestellten Prinzips führt zu einem Zwischenzylinder mit zwei Kolben, welche das Hydrauliksystem aufteilen (Bild 13). Bei einer automatisierten Betätigung wird der Kolben 2 direkt vom Aktor angetrieben, der Kolben 1 bleibt stehen.

Bei einer manuellen Fußbetätigung treibt der Kolben 1 über den Mitnehmerring den Kolben 2 an, wodurch sich zwei Nachteile ergeben: Zum einen verursachen die Dichtungen zusätzliche Reibung, zum anderen fordert die notwendige Schnüffelfunktion des Zylinders von Kolben 2 einen zusätzlichen Wegverlust.

Um diese Nachteile zu eliminieren, wird an einer alternativen Variante gearbeitet, bei der das Ausrücksystem nicht permanent in zwei Bereiche geteilt wird (Bild 14). Dadurch besteht bei Fußbetätigung ein direkter Fluidpfad vom Geber- zum Nehmerzylinder (grüner Pfeil), und das ohne nennenswerte Zusatzverluste. Im automatisierten Modus sperrt der aktive Zwischenkolben den Zulauf vom Geberzylinder ab und übernimmt die Kupplungsbetätigung. Eine noch zu lösende Schwierigkeit bei diesem Konzept ist die reibungslose Überstimmmöglichkeit durch den Fahrer. Hierzu werden derzeit noch verschiedene Ventil- und Speicheranordnungen untersucht (nicht in Bild 14 dargestellt).

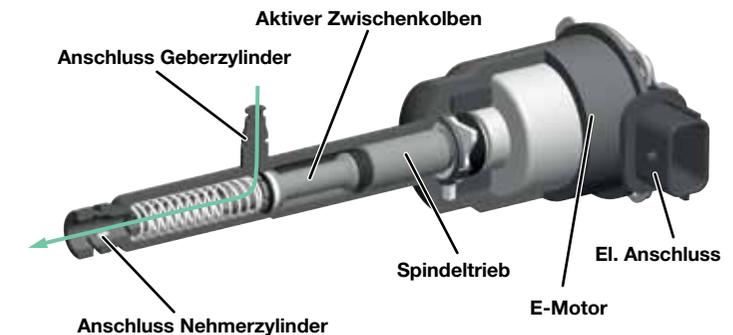


Bild 14 Alternative Zwischenkolbenvariante ohne Zusatzverluste bei Fußbetätigung

Systemvergleich – Grenzenlose Möglichkeiten

In den vorangegangenen Abschnitten wurden einige Möglichkeiten vorgestellt, mit denen die Kupplung eines Handschaltgetriebes automatisiert werden kann. In Bild 15 sind die Varianten zusammenfassend gegenübergestellt. Die konsequenteste Umsetzung ist das EKM, da hier das Kupplungspedal entfällt und der Fahrerwunsch nur durch den Gangwählhebel detektiert wird. Zu ähnlichen Kosten bietet das CbW vergleichbare Möglichkeiten. Der Fahrer muss zwar noch selber kuppeln, jedoch werden wie beim EKM alle Kupplungsbetätigungen von einem Aktor durchgeführt.

Das neue Konzept MTplus verfolgt das Ziel, durch eine teilautomatisierte Kupplung eine kostengünstige Alternative mit reduziertem Funktionsumfang anzubieten. Im Gegensatz zu EKM und CbW ist die Kupplung nur beim Anfahren in den Gängen 1, (2) und R automatisiert. Bei Schaltungen in den höheren Gängen wird die Kupplung nach wie vor manuell betätigt. Die Herausforderungen sind eine ausreichend gute Bedienbarkeit, sowie eine möglichst geringe Rückwirkung zwischen Aktor und Fußbetätigung. Weitere Analyse hierzu

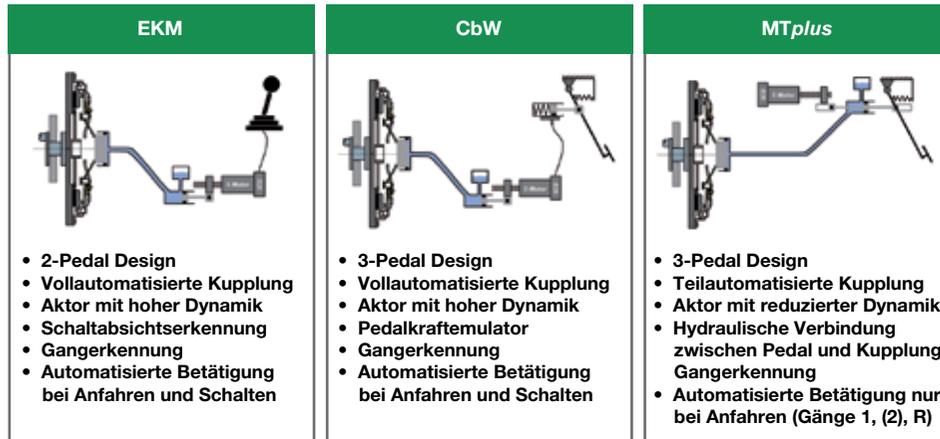


Bild 15 Varianten zur Kupplungsautomatisierung von Handschaltgetrieben

werden im Versuch mit einem Demonstrator erfolgen. Im Vergleich zu einem EKM oder CbW ergeben sich folgende Vorteile:

- Kostensenkung durch reduzierte Aktoranforderungen (Dynamik und Einsatzdauer)
- Mechanische Überstimmungsmöglichkeit (Reduzierung FuSi-Anforderungen)

- Kein Liegenbleiber bei Ausfall des Aktorsystems

Alle drei Systeme bieten umfangreiche Funktionsoptionen an (Bild 16). Insbesondere die Optionen zur Verbrauchssenkung werden grundsätzlich von allen Systemen unterstützt. Neben der Segelfunktion wird das Hand-

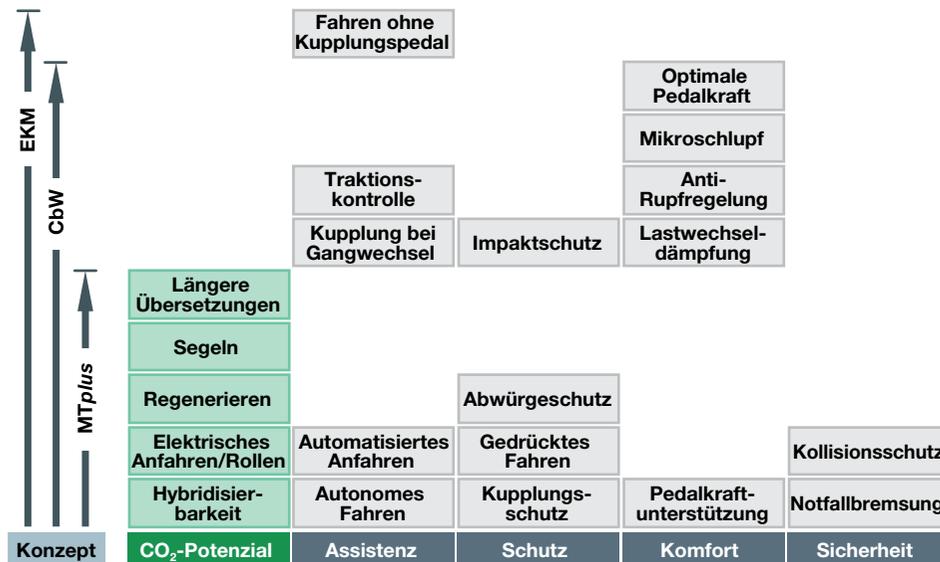


Bild 16 Mögliche und unterstützte Funktionen durch Kupplungsautomatisierung

schaltgetriebe insgesamt deutlich hybridfähiger. Darüber hinaus gibt es eine vielfältige Auswahl zur Steigerung von Komfort und Robustheit bis hin zu Assistenzsystemen.

Effizienzsteigerung im Antriebsstrang und die Folgen

Optimistisch in die Zukunft

Der Trend zu mehr Automatisierung und Elektrifizierung zur Senkung der Flottenverbräuche fordert auch Lösungen für das Handschaltgetriebe. Schaeffler treibt in diesem Zusammenhang Entwicklungen zur Automatisierung der Kupplung voran. Dabei gilt es natürlich, die Auswirkungen auf den gesamten Antriebsstrang zu berücksichtigen. Beispielsweise steht dem möglichen Verbrauchsvorteil durch längere Übersetzungen eine höhere Motoranregung aufgrund der niedrigeren Drehzahlen gegenüber, wodurch sich die Anforderungen an die Torsionsdämpfer weiter erhöhen.

Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits darauf eingegangen, dass eine Verschiebung der Betriebspunkte zu niedrigeren Motordrehzahlen (Downspeeding) einen hohen Beitrag zur Verbrauchssenkung leisten kann. Beispielsweise können durch Absenkung der mittleren Motordrehzahl um 10 % bei einem heutigen 2,0-l-Dieselmotor 5,6 % Kraftstoff im NEFZ eingespart werden. Dieses Potenzial ist jedoch nur nutzbar, wenn sich keine Nachteile bei Fahrdynamik und Fahrkomfort ergeben. Um die Fahrdynamik in etwa konstant zu halten, muss die gleiche Leistung bereits bei 10 % geringerer Motordrehzahl zur Verfügung stehen, weshalb das maximale Motormoment um etwa 10 % angehoben werden muss (Bild 17).

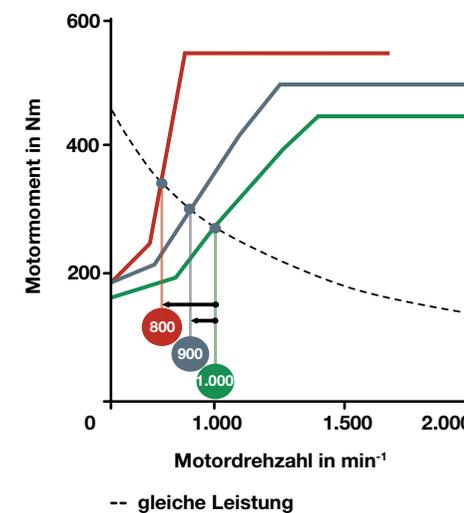
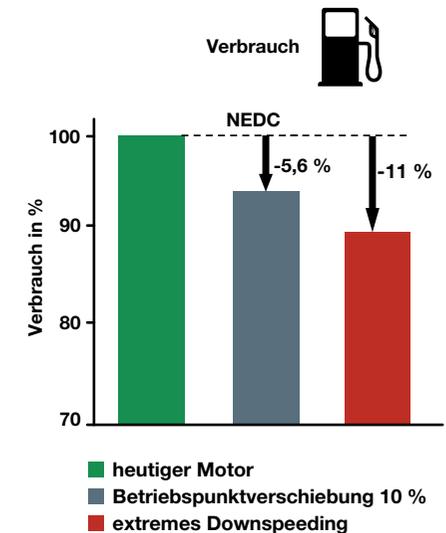


Bild 17 Änderung der Motorcharakteristik und mögliche Verbrauchseinsparung bei Downspeeding



Darüber hinaus ist absehbar, dass der nutzbare Drehzahlbereich noch deutlich weiter nach unten ausgedehnt werden wird. In Zukunft wird bei einigen Motoren das maximale Drehmoment bereits unterhalb von 1.000 min⁻¹ anliegen. Im Vergleich zu heute kann dadurch der Verbrauch im NEFZ theoretisch um 11 % gesenkt werden.

Diese Entwicklungen auf der Motorenseite haben eine deutlich höhere Schwingungsanregung für den Antriebsstrang zur Folge. In erster Näherung steigt die Motorungleichförmigkeit jeweils proportional mit einer Momentenerhöhung oder Drehzahlabsenkung. Als verstärkender Effekt kommt hinzu, dass bei reduzierter Motordrehzahl die Anregungsfrequenz näher an die Eigenfrequenz des Antriebsstrangs rückt.

Bild 18 fasst die Auswirkungen auf die Drehungleichförmigkeit im Antriebsstrang zusammen. Ausgehend von einem heutigen Motor (grüne Linie) verdoppelt sich die Schwingbreite am Getriebeeingang bei gleicher Dämpfertechnologie für eine Absenkung der Motordrehzahl um 10 % (graue Linie). Bereits für diesen Fall wird das Komfortziel nicht

mehr erreicht. Mancher Fahrer würde die niedrigen Drehzahlen meiden und so mögliche Verbrauchsvorteile nicht nutzen.

Ein weiteres Downspeeding verschärft die Situation überproportional (rote Linie). Steht das maximale Drehmoment bereits unterhalb von 1.000 min⁻¹ zur Verfügung, wird das Komfortziel bei dieser Drehzahl um mehr als das sechsfache überschritten. Um mit diesen Motoren ein akzeptables Komfortniveau erreichen zu können, sind leistungsfähige Dämpfersysteme erforderlich. Sie sind eine wichtige Voraussetzung, um die Verbrauchspotenziale durch Downspeeding zu ermöglichen.

Schwingungsisolation – Stand der Technik

Vor etwa 20 Jahren sind die Anforderungen an die Dämpfertechnologie durch die Einführung der direkt einspritzenden Dieselmotoren im Pkw sprunghaft angestiegen (Bild 19).

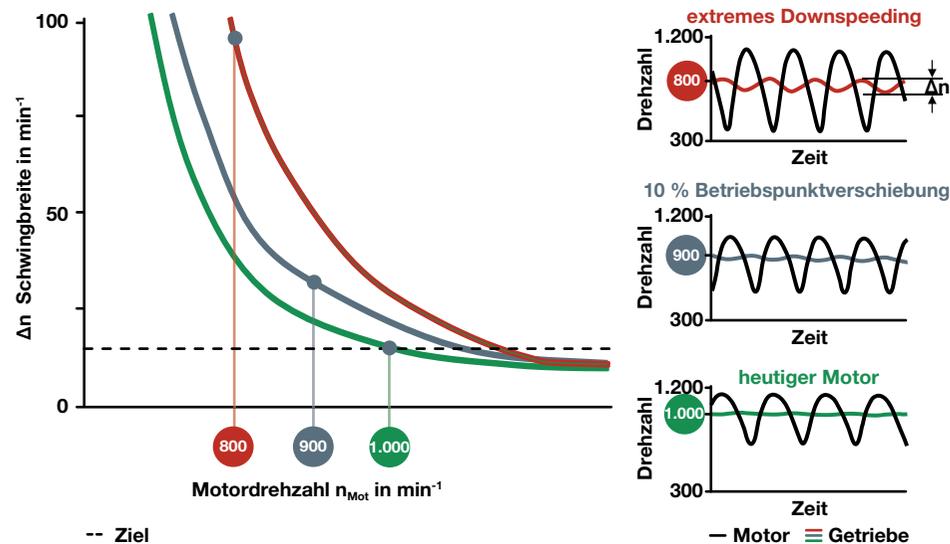


Bild 18 Drehungleichförmigkeit am Motor und Getriebeeingang heutiger und künftiger Motoren

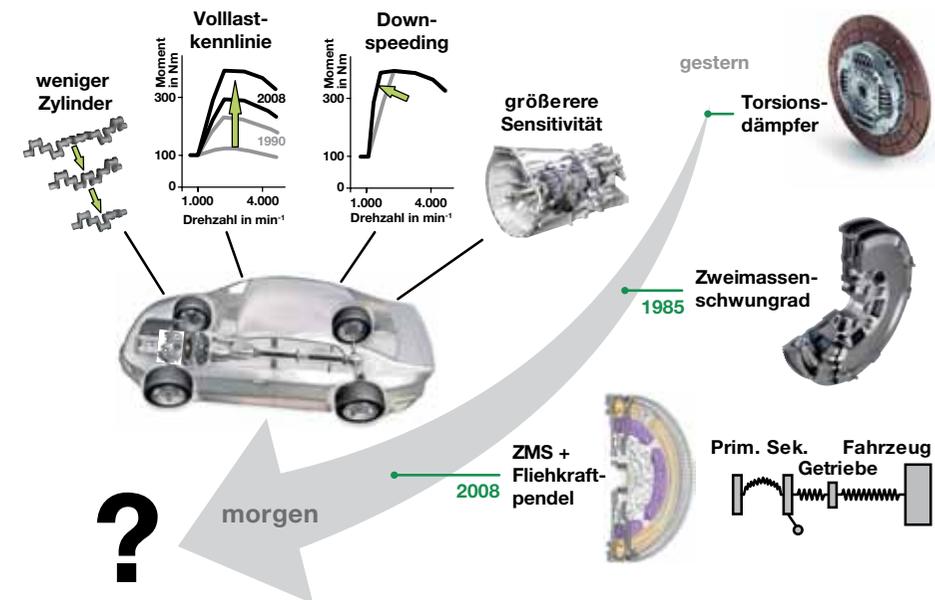


Bild 19 Stetig steigende Anforderungen an die Schwingungsdämpfung

Dieser Technologiewechsel auf der Motorenseite stellte die Entwickler von Systemen zur Schwingungsisolierung vor ganz neue Aufgaben. Die daraus resultierende Drehungleichförmigkeit war mit den vorhandenen torsionsgedämpften Kuppelungsscheiben nicht ausreichend zu dämpfen. Das Prinzip des Tiefpassfilters war zwar bekannt, galt aber bis zur Einführung des Zweimassenschwungrads (ZMS) als industriell nicht realisierbar im Pkw. Auf Basis umfassender Kenntnis der Wirkprinzipien von passiven Dämpfungssystemen arbeitete LuK schon früh systematisch an den Grundlagen und war deshalb in der Lage, für die sich abzeichnenden Herausforderungen rechtzeitig eine konzeptionell überzeugende Lösung zu präsentieren. Langjähriges Know-how in der Metallverarbeitung schließlich führte zu einem robusten Produkt.

Inzwischen hat sich das spezifische Drehmoment gegenüber dem ersten aufgeladenen Diesel-Direkteinspritzer mehr

als verdoppelt. In der Folge liegen auch schon heute bei einigen Motoren Drehungleichförmigkeiten vor, die mit einem ZMS allein nicht zu beherrschen sind. Die Antwort auf die gestiegenen Anforderungen bietet das Fliehkraftpendel (FKP). Beim FKP handelt es sich um einen Tilger, also um nicht im Kraftfluss liegende Zusatzmassen. Sowohl Zweimassenschwungrad als auch Fliehkraftpendel wurden beständig weiterentwickelt und decken die Anforderungen der anstehenden Evolutionsstufen der aktuellen Motorgeneration ab [7].

Die derzeit noch in der Entwicklung stehende nächste Motorengeneration wird jedoch eine deutlich leistungsfähigere Schwingungsisolierung erfordern. Deshalb untersucht Schaeffler nicht nur die Möglichkeiten und Grenzen der aktuell eingesetzten Technologie, sondern zieht alternative Lösungsansätze in Betracht.

Alternative Lösungsansätze – Optionen und ihre Wirkprinzipien

Bevor Umsetzungsmöglichkeiten auf Produktebene angedacht werden, müssen die in Frage kommenden Wirkprinzipien in Bezug auf die künftigen Anforderungen umfangreich bewertet werden. Dabei hat sich die Methode bewährt, die Wirkprinzipien anhand einfacher und linearisierter Modelle herauszuarbeiten. Neben dem technischen Potenzial der unterschiedlichen Ansätze muss auch deren jeweiliges Kosten-Nutzen-Verhältnis in der Gesamtbewertung berücksichtigt werden.

Das Ziel muss immer sein, Ansätze zu finden, die über den gesamten Drehzahlbereich gleich wirksam sind. Verbesserungen im sehr niedrigen Drehzahlbereich sind nicht zielführend, wenn sie zu Lasten bereits erzielter Fortschritte im mittleren und hohen Drehzahlbereich gehen. Darüber hinaus sind nur Lösungen interessant, welche die Restriktionen bezüglich Bauraum und Gewicht erfüllen, sowie hinsichtlich Reibung, Verschleiß und Fertigungstoleranzen genauso robust sind wie die heutigen Systeme.

Die nachfolgend betrachteten Systeme werden darauf untersucht, ob und unter welchen Bedingungen ihre physikalischen Potenziale ausreichen, die Drehschwingungen eines Motors mit extremem Downspeeding-Konzept so zu isolieren, dass schon ab 800 min⁻¹ komfortables Fahren möglich ist.

Feder-Masse-System: Prinzip des Zweimassenschwungrades

Die grundsätzliche Funktion besteht darin, dass zwei über ein Feder-Dämpfungssystem miteinander verbundene Massen gegeneinander schwingen. In Bezug auf den

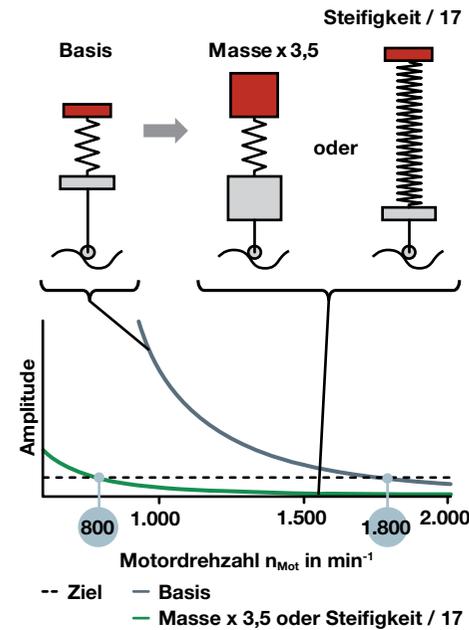


Bild 20 Isolationseigenschaft und Grenzen des Feder-Masse-Systems

heute genutzten Betriebsbereich und den dabei entstehenden Anregungen arbeitet der Dämpfer überkritisch. Er ist dadurch gekennzeichnet, dass die Isolation mit zunehmender Frequenz kontinuierlich besser wird. Mit abnehmender Frequenz rückt die Resonanzfrequenz näher, was zu einem Anstieg der Drehschwingungen führt.

Theoretisch ist es möglich, mit einem Feder-Masse-System die geforderten Ziele selbst bei extremem Downspeeding zu erreichen. Allerdings müsste hierzu im Vergleich zur Basis entweder die Masse um den Faktor 3,5 erhöht oder die Federrate um den Faktor 17 reduziert werden (siehe Bild 20). Beides ist nicht realistisch. Gegen eine Erhöhung der Masse sprechen Bauraumbedarf, Mehrgewicht sowie Einbußen bei der Fahrdynamik. Eine extreme Absenkung der Federrate kommt ebenfalls wegen des Bauraumbedarfs sowie wegen der Einbußen beim Fahrgefühl nicht in Betracht.

Antiresonanz – Prinzip der Interferenz

Im Folgenden werden zwei Konzepte zur Erzeugung von Antiresonanz beschrieben: der Feder-Masse-Tilger und der sogenannte Summierdämpfer. Die beiden Konzepte unterscheiden sich in ihren Wirkprinzipien, führen aber unter gleichen Randbedingungen zu einem vergleichbaren Ergebnis.

Der Feder-Masse-Tilger

Er basiert auf einem zweiten Feder-Masse-System. Wenn dieses mit seiner Resonanzfrequenz angeregt wird, erzeugt es eine Gegenschwingung, welche idealerweise die Anregung vollständig kompensiert. Bei einem klassischen über eine Feder angeordneten Tilger tritt dieser Effekt bei genau einer Frequenz auf, der Resonanzfrequenz des Tilgers. Als Nachteil entsteht eine zusätzliche Resonanzstelle oberhalb der Tilger-Resonanzfrequenz.

Daher ist ein konventioneller Tilger (Bild 21) nicht für den Einsatz zur Reduzierung von Drehschwingungen im Antriebsstrang geeignet. Stattdessen ist ein Tilger erforderlich, dessen Tilgerfrequenz jederzeit der Zündfrequenz des Motors entspricht. Diese Eigenschaft erfüllt das Fliehkraftpendel (Bild 22), bei dem die

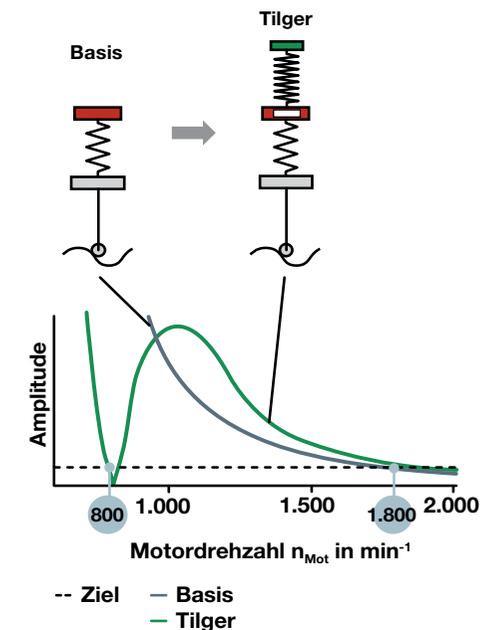


Bild 21 Prinzip und Isolationseigenschaft eines konventionellen Tilgers

Rückstellkraft der Tilgermasse durch die Fliehkraft bestimmt wird. Da sich die Fliehkraft quadratisch mit der Drehzahl ändert, ergibt sich für das Fliehkraftpendel eine drehzahl-

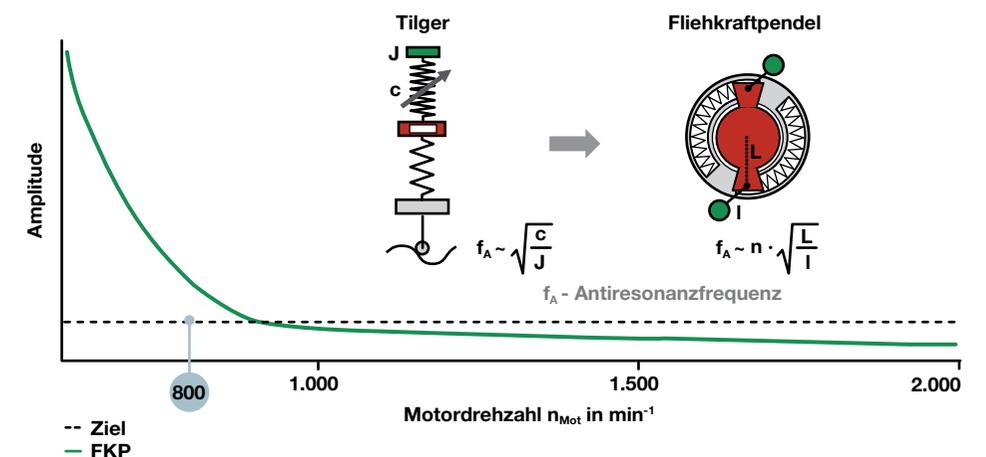


Bild 22 Fliehkraftpendel (FKP) als drehzahlabhängiger Tilger

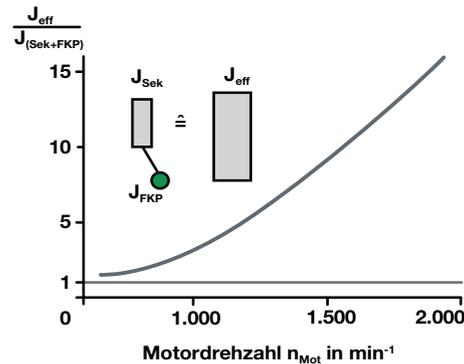


Bild 23 Äquivalent wirksame Massenträgheit eines Fliehkraftpendels

proportionale Tilgungsfrequenz. Dies ist eine ideale Eigenschaft zur Reduzierung von Drehschwingungen im Antriebsstrang, da eine feste Anregungsordnung getilgt werden kann.

Wie effektiv die Masse bei einem Fliehkraftpendel wirkt, wird mit Bild 23 verdeutlicht. Abhängig von der Drehzahl ist dargestellt, um welchen Faktor die Sekundärmasse für eine vergleichbare Performance erhöht werden müsste – beispielsweise um den Faktor 3 bei einer Drehzahl von 1.000 min⁻¹ oder um den Faktor 9 bei 1.500 min⁻¹.

Mit einem FKP ist theoretisch ab einer definierten Frequenz eine Schwingungsisolierung von 100 % erreichbar. In Versuchen wurde in Kombination mit einem ZMS schon eine Abkopplung von bis zu 99 % nachgewiesen. Damit können die Anforderungen der heutigen Motoren und die der nächsten Evolutionsstufen problemlos erfüllt werden. Aktuelle Systeme decken selbst die Anforderungen von Zweizylindermotoren ab. Die Potenziale des FKP werden näher in [7] beschrieben.

Mit abnehmender Drehzahl muss das Fliehkraftpendel mehr Energie aufnehmen. Seine Aufnahmefähigkeit diesbezüglich hängt von der Masse und dem Schwingwinkel ab. Letzterer ist prinzipbedingt begrenzt. Auch der Erhöhung der Pendelmasse sind aufgrund der Einbaulage Grenzen gesetzt.

Ob mit dem FKP eine Schwingungsisolierung zu realisieren ist, die die Anregungen auch der nächsten Motorengeneration sicher beherrscht, ist derzeit noch nicht abschließend zu beurteilen. Die jüngsten Verbesserungen dieses Systems stützen jedoch diese Arbeitshypothese.

Gleichwohl untersucht Schaeffler alternative Ansätze. In der grundlegenden Erkenntnis, Masse intelligent einzusetzen, ist auch der Schlüssel für künftige Lösungen zu sehen.

Der Summierdämpfer

Ein zweiter Weg, Schwingungsanregungen durch Antiresonanz zu tilgen, besteht darin, zwei Schwingungspfade zu addieren. Bild 24 zeigt das Prinzip. Die Anregungen werden auf dem einen Pfad über ein Feder-Masse-System, auf dem anderen Pfad direkt auf einen Hebel übertragen. Der Drehpunkt des Hebels (Summier-Einheit) ist schwingungsdynamisch betrachtet sowohl kraft- als auch bewegungsfrei.

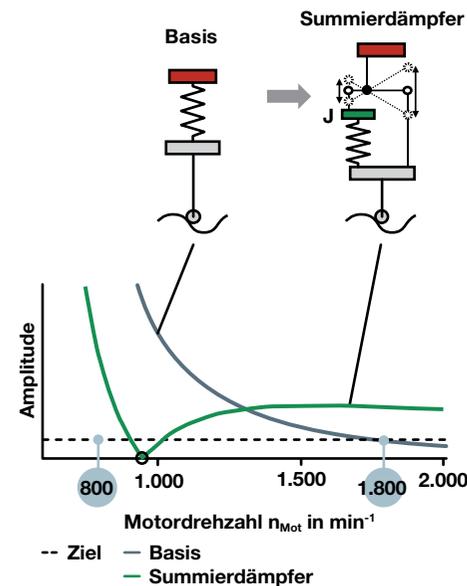
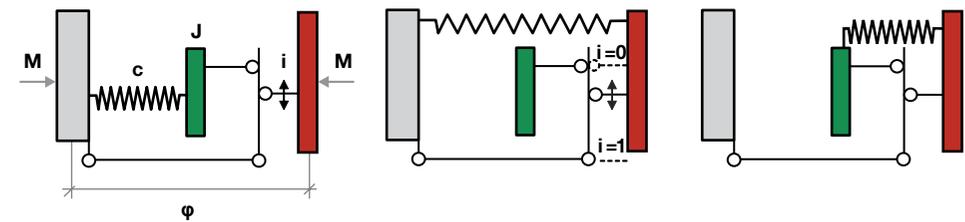


Bild 24 Prinzip und Isolationswirkung eines Summierdämpfers



$$f_A = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_0 (i-1)^2}{J \cdot i}}$$

f_A = Antiresonanz

$$c_0 = \frac{\Delta M}{\Delta \varphi}$$

c₀ = Effektive Steifigkeit

Bild 25 Variationsmöglichkeiten der Federanordnung beim Summierdämpfer

Wie bei einem konventionellen Tilger ist auch mit einem Summierdämpfer eine völlige Schwingungsabkopplung möglich, allerdings auch hier nur bei exakt einer Frequenz. Dem Tilger gegenüber weist der Summierdämpfer insofern einen Vorteil auf, als keine zusätzliche Eigenfrequenz erzeugt wird. Störende Anregungen oberhalb und unterhalb der Antiresonanz bleiben dennoch bestehen.

Die zu isolierende Frequenz ist theoretisch frei wählbar. Zur Abstimmung des Systems stellt der Summierdämpfer gegenüber dem Tilger einen Parameter mehr zur Verfügung – neben der Federrate und der Drehmasse (J) zusätzlich das Hebel-Übersetzungsverhältnis. Ein weiterer Vorteil besteht darin, das System so zu konfigurieren, dass auch auf der Primärseite (Motorseite) eine dämpfende Wirkung erzielt werden kann.

Neben der in Bild 24 gezeigten Prinzipdarstellung eines Summierdämpfers sind weitere Anordnungen möglich. Unter anderem kann die Feder an jeder beliebigen Stelle platziert werden (Bild 25). Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass unabhängig von der Position der Feder die gleichen einfachen Gesetzmäßigkeiten gelten. Beispielsweise lässt sich die Antiresonanz für alle Konzepte durch die gleiche Formel berechnen. Bei gleicher Masse J, Hebel-Übersetzung sowie Federkapazität ergibt sich für alle dargestellten

Konzepte nicht nur die gleiche Frequenz für die Antiresonanz, sondern auch ein identisches Übertragungsverhalten.

Wird das Übertragungsverhalten für Auslegungen mit unterschiedlichen Antiresonanzstellen betrachtet, werden typische Eigenschaften eines Summierdämpfers deutlich. Theoretisch ist es möglich, die Antiresonanz auf eine beliebig niedrige Drehzahl zu schieben. Allerdings reduziert sich dadurch neben der Tilgungsbreite auch das Isolationsvermögen oberhalb der Tilgungsfrequenz (Bild 26). Daraus wird auch ersichtlich, dass ein Summierdämpfer mit sehr niedriger Antiresonanz empfindlich auf Parameterschwankungen reagiert. Eine befriedigende Lösung kann nur erreicht werden, wenn mindestens einer der drei relevanten Parameter über der Drehzahl variabel ist.

Im direkten Vergleich zeigt der Summierdämpfer gegenüber dem konventionellen Tilger ein etwas höheres theoretisches Potenzial zur Schwingungsdämpfung (Bild 27). Allerdings ist mit dem Fliehkraftpendel bereits eine Lösung für einen drehzahlabhängigen Tilger gefunden und erfolgreich im Serieneinsatz. Im Gegensatz dazu ist ein drehzahlabhängiger Summierdämpfer heute noch nirgends realisiert.

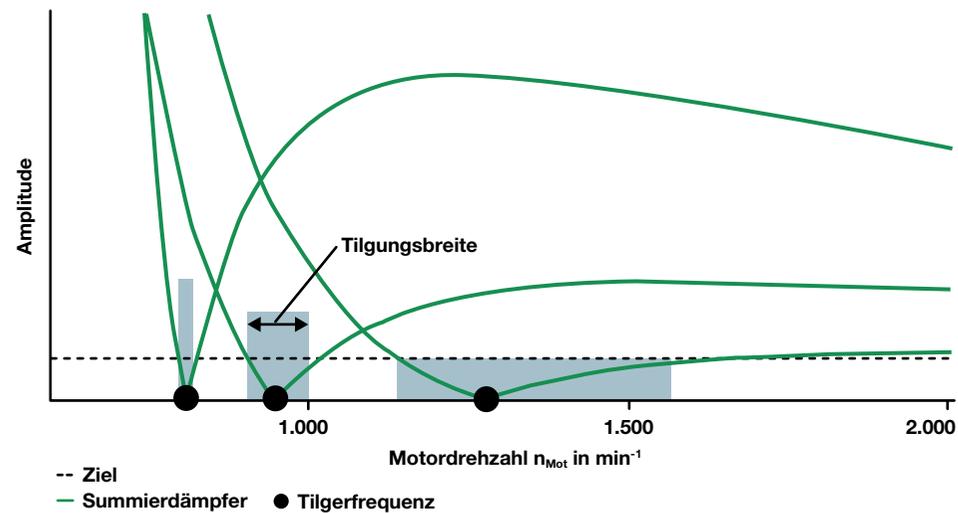


Bild 26 Einfluss der Tilgungsfrequenz auf das Übertragungsverhalten des Summierdämpfers

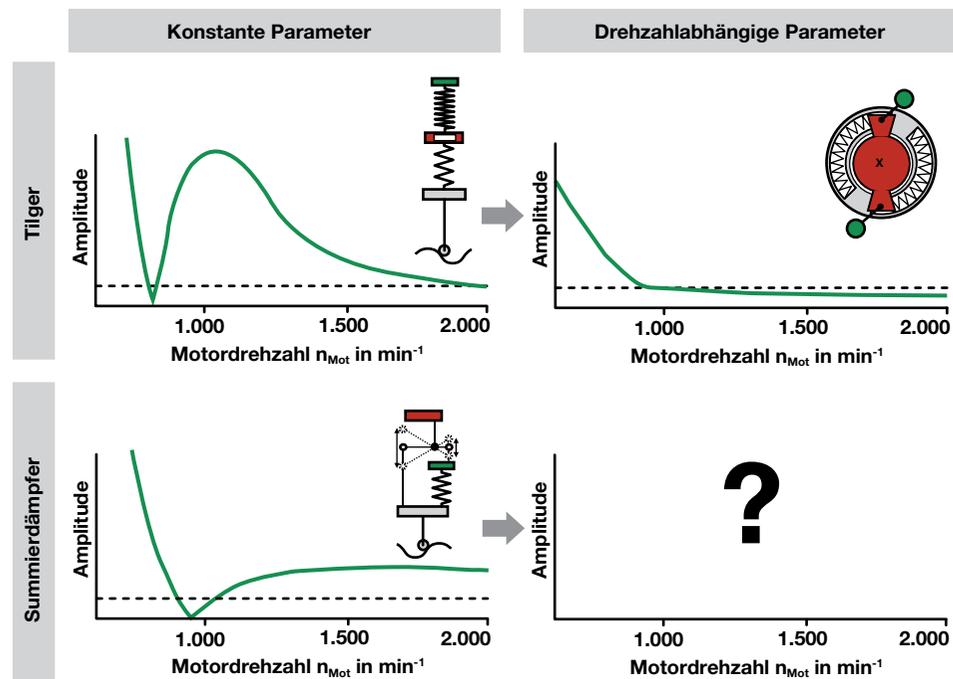


Bild 27 Evolution von Tilger und Summierdämpfer

Zusammenfassung

Beim Wettlauf um die globalen CO₂-Ziele haben zunehmend die Automatikgetriebe die Nase vorn. Mit ihnen können spritsparende Fahrstrategien umgesetzt werden, bei denen Motor und Getriebe voneinander getrennt werden. Auf der anderen Seite stehen die Vorteile des Handschalters: Zuverlässigkeit, Robustheit und ein niedriger Preis, der diesen Getriebetyp insbesondere für kleinere Fahrzeuge weiter sehr interessant macht. Der offensichtlichste Weg, die bewährten Handschalter weiterzuentwickeln, besteht darin, die Kupplung zu automatisieren, um auch hier die erwähnten Fahrstrategien umsetzen zu können. Neben den bereits bestehenden technischen Lösungen (EKM, CbW) arbeitet Schaeffler an Systemen, die technisch entfeinert, den Preisvorteil des Handschalters gegenüber dem Automaten weitestgehend erhalten.

Neben der kompletten Abkopplung des Motors vom restlichen Antriebsstrang kann eine solche automatisierte Kupplung noch viele andere Komfort- und Schutzfunktionen unterstützen. Durch ein automatisiertes Anfahren kann eine Überlastung oder Missbrauch der Kupplung ausgeschlossen werden, was wiederum eine veränderte Auslegung des Antriebsstrangs ermöglicht. So kann beispielsweise zur weiteren Reduzierung des Verbrauchs eine längere Achsübersetzung eingesetzt werden.

Der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors wird dabei zu niedrigeren Drehzahlen verschoben und das spezifische Drehmoment angehoben. Beide Maßnahmen gehen mit einer höheren Drehungleichförmigkeit einher. Die daraus resultierenden hohen Anforderungen an die Schwingungsisolation werden bei den aktuellen Motoren und ihrer nächsten Evolutionsstufe mit der gegenwärtig verfügbaren Technologie sicher beherrscht. Die dann folgende Motorgeneration

fordert allerdings noch leistungsfähigere Systeme. Die Technologie des Zweimassenschwungrads in Verbindung mit einem Fliehkraftpendel kommt dafür in Frage, aber auch der Summierdämpfer – wenn es gelingt, sein hohes Potenzial bei niedrigen Drehzahlen auf mittlere und hohe Drehzahlen auszudehnen. Schaeffler untersucht beide Konzepte weiterhin intensiv. Der Schlüssel für eine erfolgversprechende Weiterentwicklung des Summierdämpfers wird darin liegen, dass ein relevanter Parameter drehzahlabhängig variiert werden kann. Eine industrialisierbare, robuste und bezahlbare Lösung dafür steht allerdings noch aus.

Literatur

- [1] Gutzmer, P.: Individualität und Vielfalt. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [2] Kremmling, B.; Fischer, R.: Automatisierte Kupplung. 5. LuK Kolloquium, 1994
- [3] Fischer, R.; Berger, R.: Automatisierung von Schaltgetrieben. 6. LuK Kolloquium, 1998
- [4] Welter, R.; Herrmann, T.; Honselmann, S.; Keller, J.: Ausrücksysteme für die Zukunft. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [5] Müller, M.; Kneissler, M.; Gramann, M.; Esly, N.; Daikeler, R.; Agner, I.: Komponenten für Doppelkupplungsgetriebe. 9. Schaeffler-Kolloquium, 2010
- [6] Müller, B.; Rathke, G.; Grethel, M.; Man, L.: Getriebeaktuatorik. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [7] Kooy, A.: Auf die Isolation kommt es an: Die Evolution des Fliehkraftpendels nicht nur für ZMS. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [8] Fidlin, A.; Seebacher, R.: Simulationstechnik am Beispiel des ZMS. 8. LuK Kolloquium, 2006
- [9] Kroll, J.; Kooy, A.; Seebacher, R.: Torsionsschwingungsdämpfung für zukünftige Motoren. 9. Schaeffler Kolloquium, 2010
- [10] Reik, W.; Fidlin, A.; Seebacher, R.: Gute Schwingungen – böse Schwingungen. VDI-Fachtagung Schwingungen in Antrieben, 2009