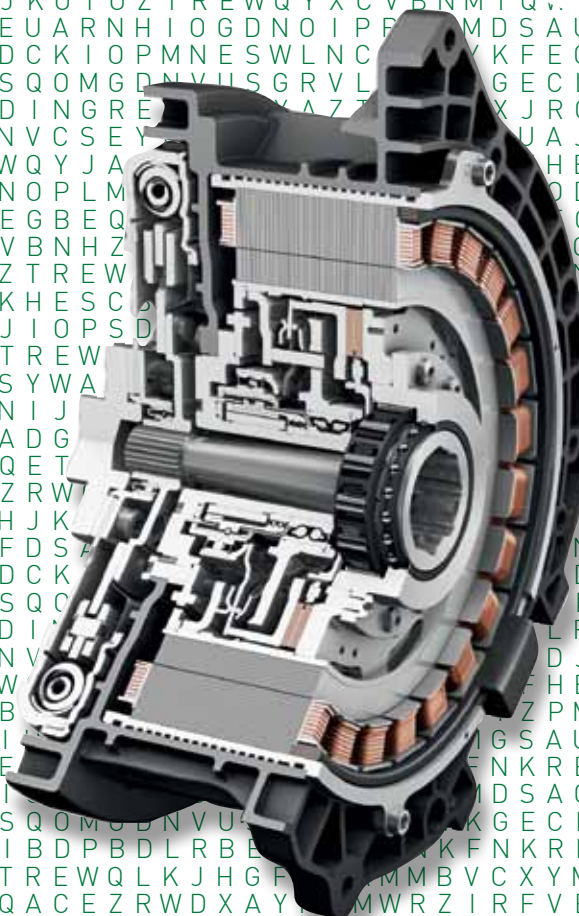




Eine Idee, viele Anwendungen

Weiterentwicklung des Hybridmoduls von Schaeffler

Martin Dilzer
Dierk Reitz
Willi Ruder
Uwe Wagner

29

Einleitung

Hybridfahrzeuge, die etwa ein bis zwei Kilometer elektrisches Fahren ermöglichen – sogenannte Vollhybride –, sind derzeit vorwiegend in gehobenen Fahrzeugsegmenten zu finden. Bereits vor der Elektrifizierung waren diese Fahrzeuge mit Automatikgetrieben ausgestattet. Als Einbauort für die elektrische Antriebseinheit hat sich die Getriebeglocke etabliert, da so die bestehende Fahrzeugarchitektur für die Hybridversionen nicht grundsätzlich angepasst werden muss. Zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe wird ein Modul, bestehend aus einer automatisierten Trennkupplung und einer elektrischen Maschine, integriert.

Bereits seit 2010 liefert Schaeffler wesentliche Komponenten für solche Antriebssysteme, die im allgemeinen als „P2-Hybride“ bezeichnet werden. In der Veröffentlichung zum Schaeffler Kolloquium 2010 [1] hieß es wörtlich: „Für die Entwicklung der nächsten Generation des P2-Hybrid ist die weitere Reduzierung des notwendigen Bauraums für das Gesamtsystem eine der wichtigsten Anforderungen. Grundsätzlich ist es möglich, entweder das Dämpfungssystem oder die Trennkupplung in den Rotor zu integrieren.“

Mit dieser Veröffentlichung zeigt Schaeffler den mittlerweile erreichten Entwicklungsstand. In einem weiteren

Schritt soll die hohe Regelgüte einer in den Antriebsstrang integrierten elektrischen Maschine zusätzlich genutzt werden, um unerwünschte Drehschwingungen des Verbrennungsmotors zu tilgen. Schließlich wird dargestellt, dass die gewählte Bauweise des Hybridmoduls auch für die Applikation in einem 48-V-Bordnetz und die Kombination mit einem Handschaltgetriebe geeignet ist.

Die neue Generation des Hochvolt-Hybridmoduls

Gesamtsystem

Durch den Trend zu Plug-in-Fahrzeugen ist eine deutliche Steigerung des elektrischen Leistungsbedarfs zu beobachten. Hybridfahrzeuge sollen künftig den kompletten NEFZ

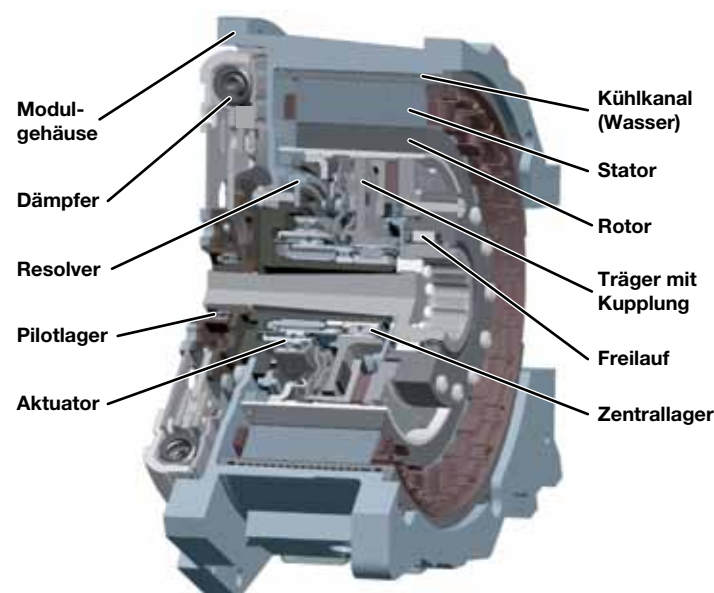


Bild 1 Schnitt durch ein Hybridmodul der zweiten Generation

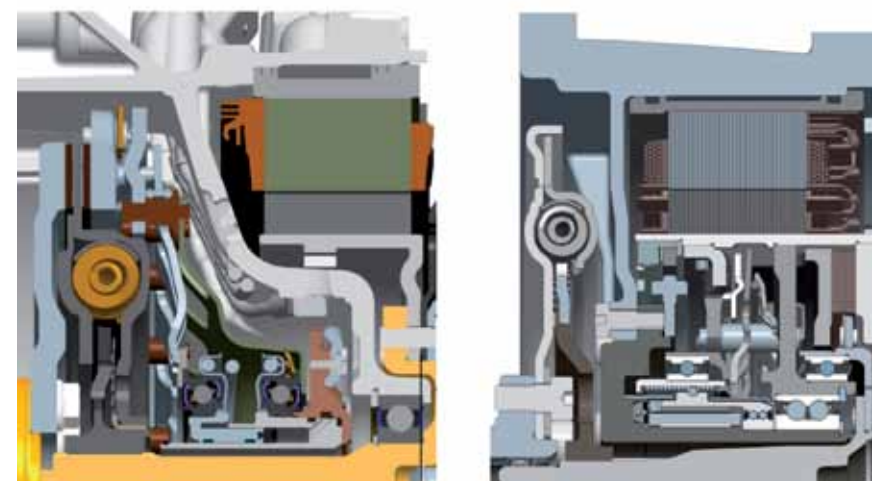


Bild 2 Einbaumaße des Hybridmoduls: links die erste Generation von 2010, rechts der aktuelle Entwicklungsstand

(Neuer Europäischer Fahrzyklus) elektrisch durchfahren können. Wesentliches Entwicklungsziel für die nächste Generation des Schaeffler-Hybridmoduls war daher eine Steigerung der Leistungs- und Momentendichte bei gleichzeitig verringertem Bauraumbedarf. Dabei sollte der Einbauort – zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe – nicht variiert werden. Zudem sollten, analog zur ersten Generation, eventuell abgesehen von einer elektrischen Pumpe für das Getriebeöl, keine Modifikationen an der Hardware von Verbrennungsmotor und Getriebe notwendig sein.

Die zweite Generation des Schaeffler-Hybridmoduls (Bild 1), trägt den Markttrends Rechnung und ermöglicht die Übertragung sehr hoher Drehmomente von bis zu 800 Nm. Die Übertragung dieser hohen Drehmomente wird ermöglicht durch eine Verzweigung des Kraftflusses [2]. Das Moment des Verbrennungsmotors wird sowohl über die geschlossene Trennkupplung als auch parallel über einen Freilauf in Richtung Getriebe geleitet.

Eingeleitet wird das Moment immer über einen Schwingungsdämpfer auf eine Zwischenwelle. Diese Welle ist zweifach gelagert:

im Bereich der Kupplung über ein Kugellager und am vorderen Ende in einem Pilotlager, das in die Kurbelwelle oder den Dämpfer integriert werden kann. Der Abtrieb erfolgt über die Gegenplatte der Trennkupplung, die vollständig in den Rotor integriert werden konnte.

Die für die Funktion notwendige Aktorik und Sensorik sind vollständig in das Modul integriert. Die Betätigung der Kupplung übernimmt ein für dieses Modul optimierter, elektromechanischer Zentralausrücker. Als Antrieb des Aktors kommt ein Permanentmagnetmotor in Außenläuferbauweise zum Einsatz. Im Innendurchmesser des Rotors sind die 22 Magnete geklebt und gleichzeitig trägt er im Außenbereich die Laufbahn für den Kugelgewindetrieb.

Das Modul ist so gestaltet, dass für Triebstränge mit geringeren Drehmomentanforderungen bis 300 Nm die Trennkupplung sowohl das Anschleppen des Verbrennungsmotors als auch die anschließende Übertragung des Zugmoments übernimmt. Zur Erreichung dieses Drehmoments wird die Möglichkeit des Aktors genutzt, die Kupplung nicht nur aufzudrücken, sondern nach dem Schließen zusätzlich an den Tellerfederzun-

gen ziehen zu können (Push-Pull-Prinzip). Für den Einsatz an Verbrennungsmotoren mit Drehmomenten von mehr als 300 Nm kommt zusätzlich ein Freilauf zur Übertragung der Zugmomente zum Einsatz. Dieser wird der Trennkupplung parallel geschaltet und bietet damit zwei Vorteile. Zum einen kann dadurch die hohe Dynamik der Kupplung bei gleichzeitig sehr guter Regelgüte erhalten werden, zum anderen entfällt der zeitraubende Einregelvorgang nach dem Verbrennungsmotorstart, da dieser im Hochlauf durch den Freilauf automatisch eingefangen und an die E-Maschine gekoppelt wird.

Durch den gewählten Aufbau konnte eine deutliche Verringerung der Einbaumaße erreicht werden (Bild 2). Der Außendurchmesser des Moduls verringert sich um 12 auf 303 mm, während die Baulänge je nach Leistungsfähigkeit der E-Maschine von 152 auf 135 mm sinken kann.

Wesentliche Bauteile des Hybridmoduls sollen unabhängig von der Anwendung standardisiert verwendet werden, um die Systemkosten möglichst niedrig zu halten. Dies gilt unter anderem für

- die Aktorik
 - die zentrale Lagerung
 - den Rotorträger
 - die Kupplung
 - den Rotorlagegeber (Resolver).
- Der Modulaufbau bleibt unverändert unabhängig davon, ob es sich um einen klassischen Stufenautomaten, ein Doppelkupplungsgetriebe (nass/ trocken) oder ein stufenloses Getriebe (CVT) handelt. Auch Handschaltgetriebe

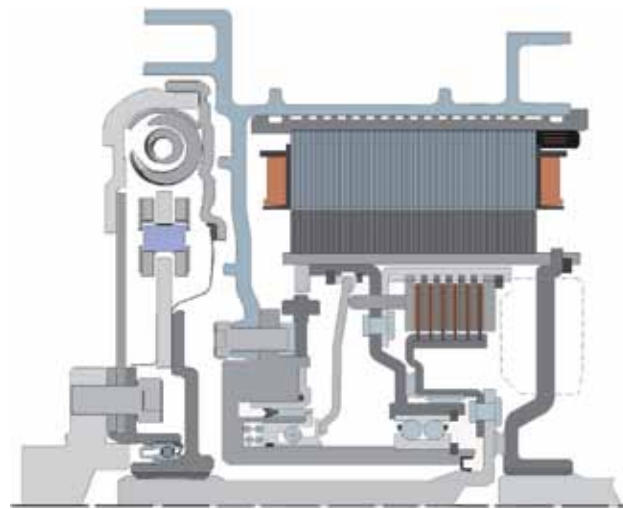


Bild 3 Hybridmodul der zweiten Generation im Nassraum

können mit dem gewählten Aufbau hybridisiert werden. Kunden- beziehungsweise anwendungsspezifische Schnittstellen sind das Gehäuse und die drehenden Teile auf Motor- und Getriebeseite. So wird sowohl der Schwingungsdämpfer an die Charakteristik des verwendeten Verbrennungsmotors als auch die Driveplate zum Getriebeeingang an die jeweilige Applikation angepasst.

Um einen maximalen Systemwirkungsgrad zu erreichen, wurde das Schaeffler-Hybridmodul als trockenes System entwickelt. Die Leistungsaufnahme des Aktors liegt zyklusrelevant unter 10 W. Das Lagerungskonzept wurde soweit optimiert, dass das Schleppmoment während der elektrischen Fahrt < 0,5 Nm beträgt. Das wichtigste Subsystem bei dieser Optimierung ist der Elektromotor, dessen Wirkungsgrad auf Spitzenwerte bis über 95 % optimiert werden konnte. Die noch entstehende Verlustwärme wird über einen speziellen Verguss mit hoher Wärmeleitfähigkeit sowie einen Wasserkühlmantel abgeführt. Anhand der Verluste der einzelnen Komponenten erbringt ein Thermomodell den Nachweis über die jeweils entstehenden Maximaltemperaturen.

Liegt die fahrzeugseitig geforderte Dauerleistung sehr nah an der benötigten Spitzenleistung des elektrischen Antriebs, so kann das Modul auch „nass“ aufgebaut werden. Dabei wird durch einen Ölvolumenstrom um Rotor und Wickelköpfe eine bessere Wärmeabfuhr erreicht. Da eine Trennung von E-Maschine und Trennkupplung in Nass- und Trockenraum konstruktiv aufwändig wäre, wird damit gleichzeitig eine Nasskupplung vorteilhaft. Den Vorteilen einer leistungsfähigeren Kühlung steht durch die zusätzlich benötigte Energie für die Bereitstellung des Kühllöls sowie die steigenden Schleppverluste im Spalt zwischen Rotor und Stator aber auch ein Wirkungsgradnachteil gegenüber. Bild 3 zeigt das Gesamtmodul im Nassraum mit optionalem Bauraumvorhalt (gestrichelt) für einen abtriebsseitigen Dämpfer. Die Betätigung der Kupplung kann wahlweise über den hydrostatischen Aktor [3] oder aus dem Getriebe erfolgen.

Kupplungssystem

Die Auslegung der Kupplung erfolgt maßgeblich auf Basis der Anforderung an den Schleppstart, da das Zugmoment des Verbrennungsmotors über den Freilauf übertragen wird. Dabei ist das zum Beschleunigen der Kurbelwelle notwendige Drehmoment von ca. 110 Nm (abhängig vom Verbrennungsmotor) in < 100 ms mit hoher Genauigkeit einzustellen. Entsprechend der Drehzahlen beim elektrischen Fahren von bis zu 4.000 min⁻¹ ergibt sich ein Kollektiv, aus dem mit entsprechender Differenzdrehzahl die Kurbelwelle hoch geschleppt wird. Die vorzuhaltende Verschleißreserve der Beläge ergibt sich anhand dieses Kollektivs und einer Gesamtanzahl von 800.000 Startvorgängen über Lebensdauer für einen Plug-in-Hybrid.

Die Betätigung der Kupplung wird wie bereits oben beschrieben durch einen elektromechanischen Zentralausrücker (EZA) realisiert. Die benötigte axiale Bewegung wird über einen Kugelgewindetrieb direkt aus der

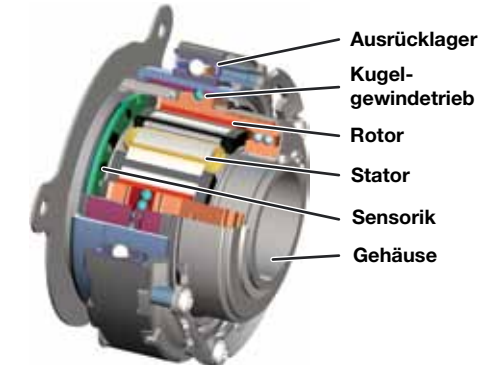


Bild 4 Schnittmodell des elektromechanischen Zentralausrückers (EZA) in Einbaulage

Rotorbewegung erzeugt, indem ein Schlitten entlang einer entsprechend aufgeprägten Bahn über den Rotor läuft (Bild 4). Das eigentliche Ausrücklager, das die Tellerfeder betätigt, ist auf dem Schlitten befestigt. Der Weg vom Tastpunkt bis zum 100 Nm-Punkt der Kupplung kann in weniger als 100 ms zurückgelegt werden, die Ausrückkraft des Aktors beträgt in der gewählten Ausführung maximal 1.800 N. Anders als eine hydraulische Aktorführung kann der elektromechanische Aktor Kräfte in zwei Richtungen übertragen. Dies ermöglicht eine wesentliche Erhöhung des übertragbaren Drehmomentes dadurch, dass die Kupplung als sogenannte „Push-Pull-Kupplung“ ausgeführt wird. Im unbetätigten Zustand ist die Kupplung geschlossen.

Elektromotor

Im Schaeffler-Hybridmodul kommt ein permanent erregter Synchronmotor zum Einsatz, der über eine hohe Reluktanz verfügt und damit die Menge an benötigten Seltenen Erden reduziert. Da die im Inneren des Rotors sitzende Kupplung standardisiert ist, hat die Elektromaschine stets den gleichen Innendurchmesser, in Abhängigkeit von benötigter Leistung sowie dem verfügbaren Bauraum im Außendurchmesser wird dieser im Rahmen eines Baukas-

		41 kW-Motor	80 kW-Motor
Typ		PSM	PSM
Moment	peak (10 s) konstant	180 Nm 100 Nm	280 Nm 160 Nm
Drehzahl	Betrieb Bersten	7.000 min ⁻¹ > 10.200 min ⁻¹	7.000 min ⁻¹ > 10.200 min ⁻¹
Leistung	peak (10 s) konstant	41 kW 25 kW	80 kW 48 kW
Wirkungsgrad	1.500 – 2.500 min ⁻¹	> 95 %	> 95 %
Abmaße		D 270 mm, d 182 mm L 86 mm	D 270 mm, d 182 mm L 115 mm
Auslegungsspannung		264 V	264 V

Bild 5 Technische Daten der EM-H-270

tens angepasst. Ausgeführt stehen Ø 260 mm, Ø 270 mm und Ø 290 mm zur Verfügung. Die detaillierte Leistungsanpassung erfolgt über die Länge der E-Maschine nahezu stufenlos auf die jeweiligen Anforderungen.

Die Tabelle in Bild 5 zeigt die Auslegungen von zwei Elektromotoren dieser Bauart für Plug-in-Hybridfahrzeuge des B/C- und des D-Segments.

Die Auslegung des Elektromotors bis hin zur Fahrzeugerprobung erfolgt im Rahmen der Entwicklung des gesamten Hybridmo-

duls bei Schaeffler. Wie oben beschrieben, ist die elektrische Maschine mit einer hohen Reluktanz ausgelegt. Daraus ergibt sich zunächst der Vorteil, dass die Spitzenleistung bis zu hohen Drehzahlen bereit gestellt werden kann. Weiterhin wird im oberen Drehzahlbereich der Wirkungsgrad deutlich verbessert. Darüber hinaus wird durch die Reduzierung der Wirbelstromverluste in den Magneten die Eigenerwärmung reduziert, wodurch sich die Rotorentwärmung vereinfacht. Die Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl ist in Bild 6 dargestellt.

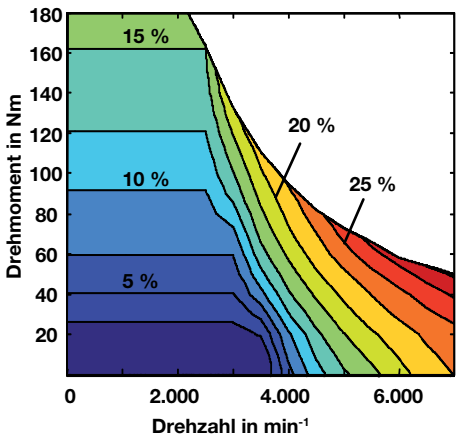


Bild 6 Reluktanzanteil der elektrischen Maschine EM-H-270-86

Leistungselektronik

Noch in der Vorentwicklung befindet sich eine Vor-Ort-Leistungselektronik, die in künftigen Generationen Bestandteil des Hybridmoduls werden soll (Bild 7). Durch den Einsatz neuer elektronischer Komponenten kann eine wesentlich kompaktere Dimensionierung erreicht werden, so dass trotz der Lage unter dem Triebstrang ein Einbau ermöglicht wird. Die mit einer externen Verkabelung von Leistungselektronik und Motor verbundenen Nachteile (Kosten, EMV, ...) können auf diesem Weg vermieden werden.

Ziel der Serienentwicklung ist eine Standardisierung auf der Funktionsebene. Durch



Bild 7 Hybridmodul mit direkt angebauter Leistungselektronik

die Trennung von Steuerungs- und Leistungselementen ergeben sich folgende Vorteile:

- Eine einmal entwickelte Steuereinheit kann immer wieder von neuem verwendet werden (Re-use), weil die Grundfunktionen in der Regel über alle Leistungsklassen hinweg praktisch gleich bleiben.
- Steuer- und Leistungseinheit können dadurch so flexibel zusammengeführt werden, wie es der jeweils vorhandene Bauraum erfordert
- Die Leistungsendstufen sind frei skalierbar und in das System integrierbar; derzeit sind sie auf ein Spektrum zwischen 300 W und 100 kW ausgelegt.

Neben den reduzierten Verkabelungsaufwänden führen die zusammengeführte Kühlung und das einteilige Gehäuse zu weiteren Kosten- und Gewichtspotenzialen auf Systemebene. Durch die kompakte Bauweise ist zudem der Bedarf an Bauraum insgesamt geringer als bei dezentral angeordneten Komponenten.

Aktive Schwingungs-dämpfung

Die aktive Dämpfung von Drehungleichförmigkeiten im Antriebsstrang durch einen Elektromotor wird als Idee schon seit den 90er Jahren verfolgt. Lösungen, die auf eine vollständige Dämpfung auf der Kurbelwelle zielen, scheiterten vor allem an dem damit verbundenen Leistungsbedarf. Grundvoraussetzung für eine wirkungsvolle Nutzung dieser Funktion ist das Vorschalten eines Dämpfers zur E-Maschine. Der benötigte Aufbau des Triebstranges ist mit dem Modul gegeben, so dass man sich bei der Auslegung der Tilgungsfunktion gezielt auf die Hauptordnung des Verbrennungsmotors konzentrieren kann. Ein zusätzlicher Aufwand beschränkt sich also auf die Erfassung (Sensorik) sowie die phasengenaue Regelung im Bereich bis ca. 80 Hz.

Die grundsätzliche Funktion eines solchen Systems zeigt schematisch Bild 8. Der Elektromotor übernimmt dabei auf der Sekundärseite des Dämpfers nur die Glättung der bereits bedämpften Hauptordnung, was mit erheblich niedrigerem Energieaufwand möglich ist. So sinkt das für die Tilgung benötigte Drehmoment etwa auf ein Zehntel des Wertes (je nach Dämpferauslegung), den ein direkt auf der Kurbelwelle sitzender E-Motor benötigen würde.

Die Entwicklung der aktiven Schwingungstilgung erfolgt mit der Zielrichtung, in einem zur Verfügung stehenden Bauraum das Optimum aus mechanischer Dämpfung, aktiver Schwingungstilgung und Dämpfung durch Mikroschlupf des Anfahelements im Hinblick auf Komfort und Wirkungsgrad zu erreichen. In der praktischen Auslegung wird man einen optimalen Kompromiss zwischen diesen Zielen finden, der sich vor allem an dem geforderten NVH-Verhalten des Fahrzeugs und dem einzusetzenden Energieaufwand orientiert.

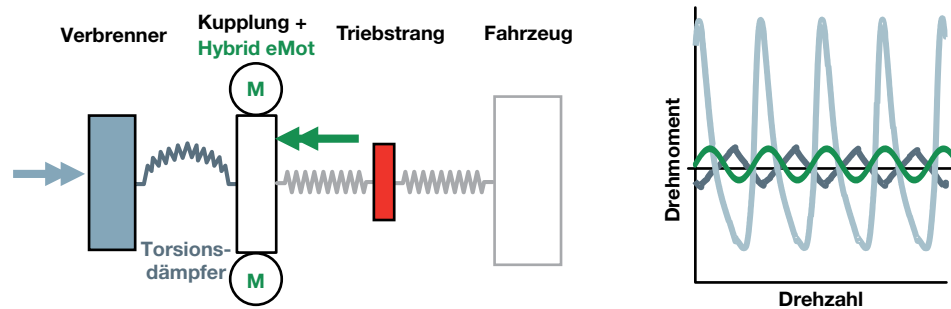


Bild 8 Funktionsschema einer aktiven Schwingungsdämpfung in einem Hybridantriebsstrang

Besonders im Falle von entstehenden Triebstrangresonanzen können diese in dem schmalen Drehzahlbereich gezielt mit dem E-Motor reduziert werden. Dadurch kann in Abhängigkeit der Getriebeeingangsteifigkeit teilweise auf einen zweiten, dem Hybridmodul nachgeschalteten Dämpfer verzichtet werden.

Anhand einer Simulation konnte gezeigt werden, dass ein Zusammenspiel zwischen einer aktiven Dämpfung über die E-Maschine und einem Mikroschlupf der Anfahrkupplung ein energetisches Optimum bei hohem Schwingungskomfort bietet (Bild 9). Während der an der Kupplung bei 1.200 min⁻¹ erzeugte Schlupf zu Verlustleistungen von 700 W führt, arbeitet in diesem Bereich die E-Maschine mit 350 W. Bei Drehzahlen oberhalb 1.500 min⁻¹ ist hingegen die Schlupfregelung energetisch günstiger, während die Leistungsanforderung an die E-Maschine weiter steigt. Dieses Optimum ist allerdings von der konkreten Anwendung abhängig und kann daher variieren. Zu beachten ist, dass sich diese Verlustleistungen auf die Vollast des Verbrennungsmotors beziehen. Zyklusrelevant sind diese Leistungen deutlich kleiner.

Lange Zeit schien eine aktive Schwingungstilgung mit den dafür erforderlichen raschen Wechseln der Entladestromhöhe negativ auf die Batterielebensdauer zu wirken. Da mit der Einführung

von Plug-in-Hybridfahrzeugen jedoch die absolute Batteriegröße deutlich steigt, sinken relativ die Energiedurchsätze für die Tilgung und liegen bei weniger als 2 %. Zudem wurde mittlerweile empirisch nachgewiesen, dass die Zellschädigung durch zyklische Mikroentladungen weit aus geringer ist als ursprünglich befürchtet. Dies gilt insbesondere, wenn keine Ionenumkehr in der Batterie vorliegt, also wenn die Regelung des Stroms innerhalb des Generator- oder des Antriebsmodus erfolgt [4].

Die Entwicklung spezieller Regelalgorithmen für die aktive Schwingungstilgung läuft aktuell auf verbrennungsmotorischen Prüfständen sowie im Fahrzeug.

Das 48-V-Hybridmodul

Motivation

Der Einstieg in die Hybridisierung kann bereits mit kleineren Leistungen erfolgen. Dies ermöglicht zum einen, dass die Spannungslage unter dem sicherheitskritischen Wert von 60 V bleiben kann. Darüber hinaus kann der Aufwand für das Gesamtsystem deutlich reduziert werden.

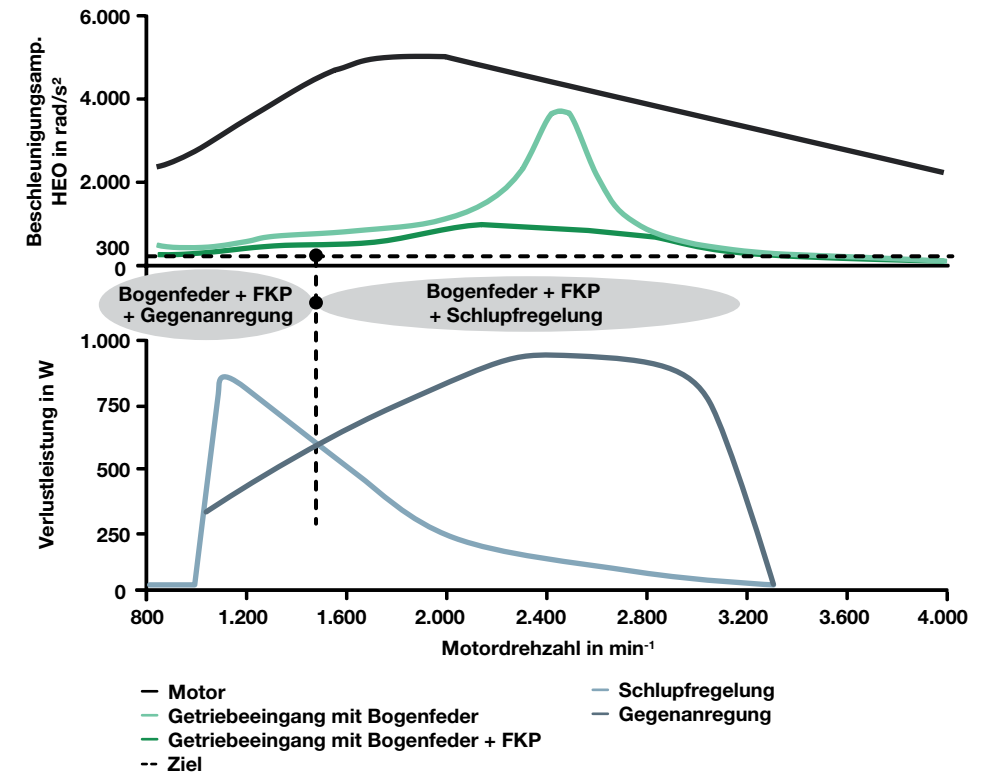


Bild 9 Verlustleistung einer kombinierten aktiven Schwingungsdämpfung aus E-Maschine und Schlupfkontrolle, abhängig von der Motordrehzahl

Insbesondere der Energiespeicher wird mit einem Nutzinhalt von ca. 300 Wh um etwa einen Faktor drei verkleinert. Nutzt man die neue Spannungsebene, um Fahrzeuge mit der milden Hybridisierung des Antriebs auszustatten, sind bereits erhebliche Verbrauchseinsparungen möglich. Simulationen zeigen, dass z. B. mit einer 12-kW-Elektromaschine in Asynchronbauweise der Verbrauch im europäischen Normzyklus um etwa 10 % gesenkt werden kann.

Beim Einsatz eines getriebeintegrierten Hybridmoduls profitiert der Wirkungsgrad eines solchen Systems davon, dass die Drehzahlspitzung des Getriebes auch dazu genutzt werden kann, den Elektro-

motor wirkungsgradoptimal zu betreiben. Im Vergleich zu den Hochvolt-Systemen wird das Wirkungsgradoptimum auf niedrigere Drehzahlen ausgelegt, da der Verbrennungsmotor mit höheren Fahranteilen läuft und damit auch die Drehzahl für die E-Maschine bestimmt.

Eine weitere, deutliche Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs kann erreicht werden, in dem die heute gängige Asynchronmaschine durch eine Synchronmaschine mit höherer Leistungsdichte ersetzt wird. Der Aufbau und die Auswirkung auf den Verbrauch werden im Abschnitt zum 48-V-Elektromotor näher erläutert.

Kombination mit einem Handschaltgetriebe

Grundsätzlich erfolgt der konstruktive Aufbau des Hybridmoduls für eine 48-V-Anwendung mit denselben Konzepten wie bei einer Hochvolt-Anwendung. Eine besondere Herausforderung ergibt sich dadurch, dass in den preissensitiveren Kompakt- und Mittelklasse-Segmenten oftmals heute noch Handschaltgetriebe eingesetzt werden.

Schaeffler hat aus einer Vielzahl von möglichen Topologien über Funktionsmatrizen vier Designs ausgewählt und auf ihre spezifischen Vor- und Nachteile hin untersucht, die sich hinsichtlich der Anbindung des Verbrennungsmotors an das getriebe- feste Hybridmodul unterscheiden:

- Impulskupplung
- Adaption des bestehenden Hybridmoduls auf 48 V ohne weitere Änderungen
- Freilauf in Kombination mit einer Überbrückungskupplung – koaxial
- Freilauf in Kombination mit einer Überbrückungskupplung – achsparallel

Aufgrund der limitierten Leistung dieser Module ist das Anschleppen der Kurbelwelle über die Trennkupplung nicht machbar. Grundsätzlich wurde daher zunächst unterschieden, ob der Verbrennungsmotor weiterhin über den konventionellen Anlasser oder mit Hilfe der rotierenden Massen gestartet wird. Mit dem Einsatz einer Impulskupplung (Bild 10) werden diese Trägheiten genutzt und der Verbrennungsmotor wird ausschließlich durch Schließen der Kupplung auf Drehzahl gebracht. Es handelt sich um eine sehr schnell schaltende Kupplung, die sehr hohe Wechsellastmomente von bis zu 1.500 Nm übertragen können muss. Diese Kupplung wird nicht moduliert, sie ist also entweder vollständig geöffnet oder geschlossen. Eine wichtige Voraussetzung dabei ist, dass die mit der Kurbelwelle verbundene Massenträgheit auf ein Minimum



Bild 10 Konstruktiver Aufbau der Impulskupplung

reduziert wird. Verbaut wird das komplette Hybridmodul einschließlich der elektrischen Maschine kurbelwellenseitig, wo es auf einem zweireihigen Kugellager gelagert wird. Die Betätigung der Kupplungen erfolgt über zwei Ausrücklager, die über eine Tellerfeder (Anfahrkupplung) und eine Hebelfeder (Trennkupplung) angesteuert werden. Der konstruktive Aufwand entspricht etwa dem einer Doppelkupplung in einem Doppelkupplungsgetriebe.

Die weiteren Konzepte enthalten am Verbrennungsmotor ein eigenes Startsystem, um diesen nach einer Segel-/Schubphase wieder an den Triebstrang anzukoppeln. Damit ist als kostengünstige Alternative zur Kupplung ein Freilauf denkbar. Der Verbrennungsmotor wird bei dieser Topologie von dem konventionellen Anlasser gestartet und nach Erreichen der Drehzahl des E-Motors mechanisch angekoppelt.

Ein Nachteil einer solchen Lösung besteht darin, dass ein mit eingelegtem ersten Gang abgestelltes Fahrzeug keine „Getrie-

bebremse“ mehr besäße. Da der Freilauf den Triebstrang in einer Drehrichtung nicht blockiert, würde das Fahrzeug ohne Betätigung der Parkbremse am Berg ins Rollen geraten.

Dieser Nachteil kann vermieden werden, wenn man den Freilauf mit einer Überbrückung ausstattet. Dafür kann zum Beispiel eine Schiebemuffe verwendet werden, die eine formschlüssige Verbindung zwischen Dämpfersekundärseite und Rotorträger herstellt. Die Verzahnung ist im Ausgangszustand geschlossen und kann über einen mit der Anfahrkupplung verbundenen Zuganker geöffnet werden. Als Aktor wird ein hydrostatischer Kupplungsaktor (HCA) verwendet, wie er von Schaeffler seit kurzem für Doppelkupplungsgetriebe gefertigt wird [5]. Weiterhin muss besonders mit einem kleinen Energiespeicher die Möglichkeit bestehen, bei hohem Ladezustand den Verbrennungsmotor zur Übernahme des Schubmomentes wieder ankoppeln zu können. Auch diese Funktion wird mit der Freilaufüberbrückung gegeben. Da die Betätigung der ohnehin vorhandenen Anfahrkupplung auch für die Schiebemuffe verwendet werden kann, ist kein zusätzlicher Aktor erforderlich.

Die Zuschaltung der Freilaufüberbrückung stellt zudem sicher, dass sich bei hohem Ladezustand (SOC) des Energiespeichers im Schubbetrieb das Fahrgefühl für den Fahrer nicht verändert. Der Verbrennungsmotor übernimmt wieder das Schubmoment.

Der zeit- und komfortkritische Warmstart aus einer Start-Stopp-Situation kann mit dieser Überbrückungsmöglichkeit direkt über den 48-V-E-Motor erfolgen.

Die bauraumseitige Umsetzung kann sowohl achsparallel als auch koaxial erfolgen. Der achsparallele Aufbau ermöglicht die Verwendung eines aus der Riemen-Starter-Generator Entwicklung bereits vorhandenen Asynchron-Motors. Das Drehmo-

ment wird mit einer Untersetzung um das Zwei- bis Dreifache über einen Riemen übertragen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung eines solchen Aufbaus ist, dass der Bauraum oberhalb der Kupplungsglocke für die E-Maschine verwendet werden kann (Bild 11). Dies erscheint vor allem bei den Front-Quer-Antriebssträngen als machbar. Mit diesem Aufbau ergibt sich die geringste Triebstrangverlängerung.

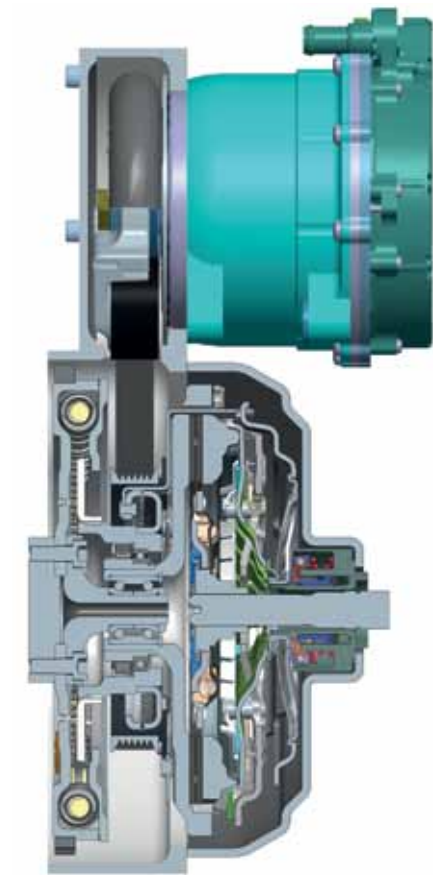


Bild 11 Topologie und konstruktiver Aufbau des Hybridmoduls mit Asynchronmaschine in Parallelanordnung

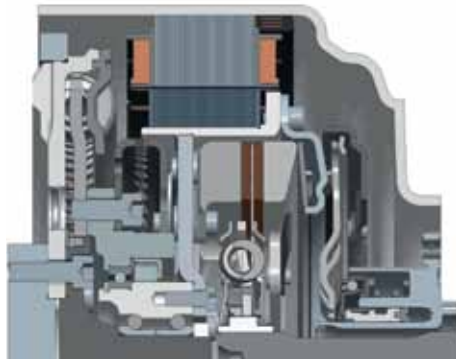


Bild 12 Topologie und konstruktiver Aufbau des Hybridmoduls mit überbrückbarem Freilauf in coaxialer Anordnung

Im Vergleich wird die coaxiale Variante in Bild 12 gezeigt. Der Freilauf, die Freilaufüberbrückung und teilweise die Anfahrkupplung werden radial unter den Rotor geschachtelt. Aufgrund der guten thermischen Ankoppelung des E-Motors ist der Stator luftgekühlt.

48-V-PSM-Elektromotor

Aus Kostengründen kommen heute im Markt bei milder Hybridisierung vorwiegend Asynchronmaschinen zum Einsatz, wie es auch in Bild 11 vorgeschlagen wird. Um den

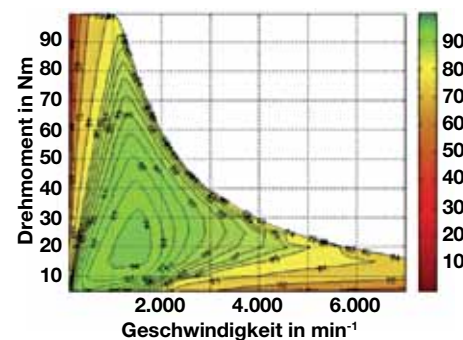


Bild 13 Wirkungsgrad-Kennfeld einer im 48-V-Hybridmodul eingesetzten permanentenregten Synchronmaschine

zur Verfügung stehenden Bauraum optimal auszunutzen, empfiehlt sich jedoch insbesondere mit dem coaxialen Aufbau entsprechend Bild 12 der Einsatz eines permanent-erregten Synchronmotors (PSM), dessen Leistungsdichte je nach Anforderung um bis zu 30 % höher ausfällt. Zudem ist durch den höheren Wirkungsgrad der PSM in Verbindung mit einer Optimierung auf den zyklus-relevanten Drehzahlbereich (Bild 13) nochmals eine deutliche Verbesserung der CO₂-Bilanz gegeben.

Aufgrund dieses gesteigerten Wirkungs-grades der PSM gegenüber der ASM resultiert ein zusätzlicher Verbrauchsvorteil von bis zu 3,5 %. Dies liegt zunächst am besseren Wirkungsgrad. Darüber hinaus aber auch daran, dass rekuperierte Energie, die nicht unmittelbar im Bordnetz genutzt werden kann, die E-Maschine mehrfach „durchfließt“.

Betriebsstrategie mit Handschaltgetriebe

Wesentlich für die erfolgreiche Markteinführung von mild hybridisierten Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe ist die Fahrerakzeptanz. Unabdingbar ist dafür, dass der Antrieb jederzeit die vom Fahrer geforderte Beschleunigung bereitstellt. Die Aufteilung der Leistung auf Verbrennungs- und Elektromotor ist dabei so vorzunehmen, dass sie für den Fahrer möglichst nicht zu spüren ist.

Die automatische Zuschaltung des Verbrennungsmotors erfolgt nicht nur bei hoher Leistungsanforderung, sondern auch, wenn der Fahrer die E-Maschine durch Nicht-Schalten in hohe Drehzahlen zwingt. Der Zuschaltpunkt liegt, auch aus akustischen Gründen, bei etwa 3.500 min⁻¹. Um die gute Fahrbarkeit des Fahrzeugs beizubehalten, wird im Verbrauchszyklus die Konstantfahrt mit dem E-Motor auf 50 km/h trotz reduzierter CO₂-Potenziale begrenzt. Bei Geschwindigkeiten darüber wird der Verbrennungsmotor nur noch im Schub abgekoppelt.

Wie schon für die reinen Start-Stopp-Systeme wegen der Segelfunktion und der verbesserten Eintrittsbedingungen empfohlen, ist bei diesem Hybridmodul die Anfahrkupplung automatisiert. Damit kann durch einen Mikroschlupf in der Anfahrkupplung der Motorstart sehr komfortabel ausgeführt werden.

Ausblick

Derzeit befindet sich die nächste Generation der Hochvoltvariante des Schaeffler-Hybridmoduls in der B-Muster-Erprobung. Die aktuellen Projekte decken alle gängigen automatischen Getriebe ab. Dabei zeigt sich, dass die verschiedenen Konfigurationen tatsächlich mit einer einheitlichen Hardware hinsichtlich der Basiskomponenten ausgeführt werden können.

Mit einem P2-Hybridmodul können bereits auf Basis eines 48-V-Systems mit Asynchronmotor Verbrauchsvorteile von etwa 10 % dargestellt werden. Weiteres Potenzial von bis zu 3,5 % bietet der Einsatz eines Synchronmotors. In Verbindung mit der Möglichkeit, das Fahrzeug bei niedrigen Geschwindigkeiten bis ca. 15 km/h rein elektrisch bewegen zu können, bildet das Modul eine ideale Einstiegselektrifizierung.

Das Handschaltgetriebe wird durch die milde Hybridisierung fit für die nächste Generation. Die Fahrzeugbewertungen werden zeigen, ob der Fahrer die zusätzlichen Funktionen akzeptiert, ohne dabei Komforteinbußen festzustellen. Eine angepasste Akustik und die automatisierte Kupplung werden ihm dabei helfen.

Literatur

- [1] Wagner, U.; Reitz, D.: Die Zukunft kommt automatisch: Effiziente Automatikgetriebe als Basis für hybridisierbare Antriebsstränge. 9. Schaeffler Kolloquium, 2010
- [2] Schutzrecht DE 102012207941A1: Hybridmodul für einen Triebstrang eines Fahrzeuges.
- [3] Müller, B.: Getriebeaktuatorik: weniger Komplexität, mehr Funktionalität. 10. Schaeffler Kolloquium, 2014
- [4] Wang, J.: Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells. Journal of Power Sources, 2011
- [5] Müller, B. et. al.: Kleiner, flexibler, intelligenter: Weiterentwickelte Komponenten für Doppelkupplungsgetriebe. 9. Schaeffler Kolloquium, 2010