



Welt der Hybride – Die Qual der Wahl

Wolfgang Reik
Dierk Reitz
Martin Vornehm



Einleitung

Wegen der Bedrohung durch Treibhausgase und teilweise fast unzumutbarer Luftverschmutzung in Ballungsräumen sind weltweit Bestrebungen im Gange, die Emissionen von Fahrzeugen einzudämmen. Klimaschutzkonferenzen versuchen, durch Festlegung von Grenzwerten für Schadstoffe und CO_2 der drohenden Erderwärmung entgegenzuwirken. Die Selbstverpflichtung der Automobilindustrie zur Reduzierung des CO_2 -Ausstoßes bringt neue Herausforderungen an die Technik des Antriebsstrangs und wird neue Konzepte erfordern und fördern.

Insbesondere der CO_2 -Ausstoß hängt direkt mit dem Verbrauch eines Fahrzeugs zusammen. Deshalb wird sich der Kampf gegen dieses Treibhausgas nur über Verbrauchsreduzierungen gewinnen lassen.

Schonender Umgang mit den Erdölreserven ist aber auch aus einem anderen Grund geboten. Die Erdölreserven werden nicht beliebig lange zur Verfügung stehen. Über deren Reichweite gibt es zwar unterschiedliche Abschätzungen, je nachdem welche schwer zu erschließenden Vorräte noch dazugerechnet werden. Dass sich die

Reserven aber langsam dem Ende zuneigen, darüber gibt es wenig Zweifel. Ein schöner Vergleich wurde in [1] gegeben. Alle jemals vorhandenen Erdölvorräte ergeben ein Volumen, das dem Mount Fuji entspricht (Bild 1).

Ungefähr die Hälfte davon ist bereits verbraucht. Die verbliebene Menge werden sich immer mehr Menschen untereinander aufteilen müssen. Wenn sich Länder wie China oder Indien nur einen Bruchteil unseres Lebensstandards erarbeiten, dürften die Erdölvorräte rapide schwinden. Ein Rückgriff auf weniger leicht zu gewinnende Lagerstellen wie Ölsande und Ölschiefer wird die Gesteungskosten in die Höhe treiben.

Schätzungen über die Reichweite des Erdöls variieren stark, dürften sich aber etwa in dem in Bild 2 vorgegebenen Rahmen bewegen [2]. Unter Berücksichtigung der wachsenden Bevölkerung, insbesondere derer, die als Erdölverbraucher in Frage kommen, wird es zwischen 2020 und 2050 zu starken Verknappungen kommen. Alternative Kraftstoffe wie Biodiesel und aus Erdgas gewonnene flüssige Treibstoffe werden vermutlich die Deckungslücke nicht schließen können.

Neben dem Verbrauch spielen die Emissionen eine immer größere Rolle. Insbesondere CO_2 , das sich nicht wie andere schädliche Abgase durch eine Nachbehandlung mit einem Katalysator beseitigen lässt,

setzt dem weiteren ungehinderten Verbrauch von fossilen Brennstoffen Grenzen.

Die Ozonkonzentration ist in den letzten Jahren stark angestiegen (Bild 3) [3]. Falls das tatsächlich auf CO_2 zurückzuführen sein sollte, wovon inzwischen die Mehrheit der Klimaforscher überzeugt ist, und nicht nur auf natürliche Klimaschwankungen, wird ein starker Druck zur Reduzierung von CO_2 -Emissionen und damit Verbrauchsein-



Bild 1 Alle jemals vorhandenen Erdölreserven entsprechen dem Volumen des Mount Fuji [1]

sparungen nicht vermeidbar sein.

Verbrauchseinsparungen haben also einen dreifachen Effekt:

- Schonung der Umwelt
- Längere Verfügbarkeit von Erdöl
- Kosteneinsparung

Moderne Fahrzeuge müssen deshalb auf geringsten Verbrauch ausgelegt werden, um mit der kostbaren Ressource Öl noch möglichst lange auszukommen. Und damit lassen sich auch die Emissionen, insbesondere CO₂ verringern.

In diesem Zusammenhang wird es auch nicht zielführend sein, verschiedene verbrauchsreduzierende Maßnahmen wie zum Beispiel Hybrid, Diesel statt Benzin, Maßnahmen am Motor wie neue Brennverfahren mit entsprechender Variabilität der Ventilsteuerung usw. gegeneinander auszuspielen. Die entscheidende Frage wird in Zukunft nicht das „entweder oder“ sondern das „sowohl als auch“ sein. Moderne Fahrzeuge werden deshalb eine geschickte Kombination und Ergänzung verschiedenster verbrauchsmindernder Maßnahmen beinhalten. Die Hybridtechnologie lässt sich ideal mit vielen anderen Maßnahmen kombinieren.

Optimale Verbrauchsergebnisse werden sich erzielen lassen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Geringer Luft- und Rollwiderstand des Fahrzeugs
- Geringes Fahrzeuggewicht
- Verbrauchsgünstiger Verbrennungsmotor

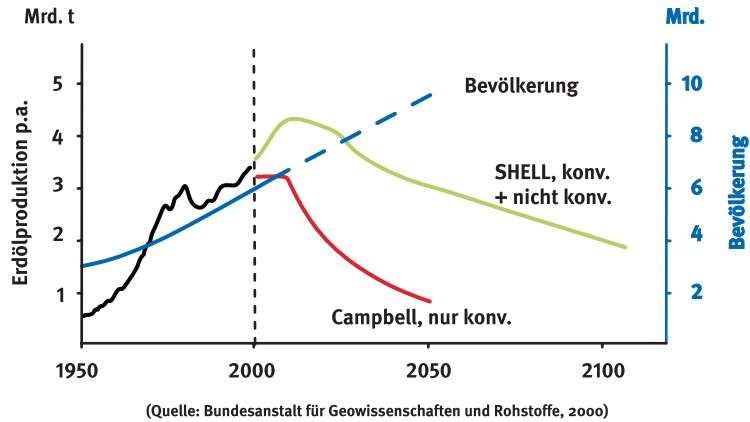
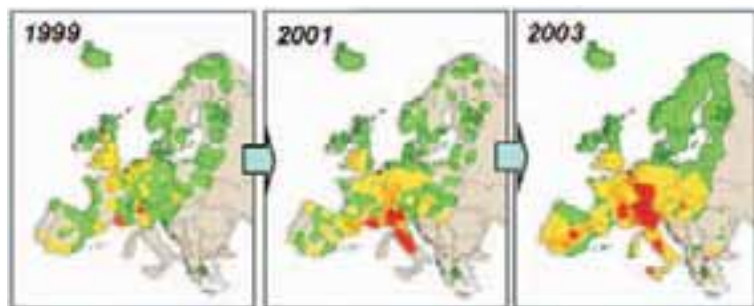


Bild 2 Starkes Wachstum der Erdbevölkerung und Einbrechen der Erdölförderung zwischen den Jahren 2020 (pessimistische Prognose) und 2040 (optimistische Prognose)

- Basisgetriebe mit bestem Wirkungsgrad
- Stopp/Start-Automatik zum Abstellen des Verbrennungsmotors, wann immer er zur Erzeugung von Vortriebsleistung nicht benötigt wird.
- Bremsenergierückgewinnung (Rekuperation)

Die am Markt befindlichen Hybridfahrzeuge zeigen bereits diesen ganzheitlichen Ansatz, bei dem versucht wird, durch geschickte Kombination unterschiedlicher Maßnahmen ein verbrauchsgünstiges Gesamtkonzept zu erstellen.

Der folgende Beitrag befasst sich mit den hybridtypischen Fragestellungen Bremsenergierückgewinnung und Stopp/Start in Verbindung mit einem



Quelle: European Environment Agency



Bild 3 Entwicklung der Ozon-Konzentration in Europa

wirkungsgradoptimierten Basisgetriebe. Es ergibt sich eine ganze Reihe von verschiedenen Konzepten, die im Nachfolgenden beschrieben werden.

Mildhybrid oder Vollhybrid

Hybridantriebe werden entsprechend der installierten elektrischen Leistung grob in Mikro-, Mild- und Vollhybride eingeteilt (Bild 4).

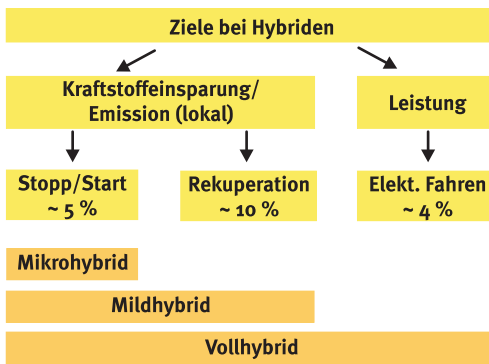


Bild 4 Einteilung der Hybridsysteme und deren Funktionalitäten

Bei Mikrohybriden reicht die elektrisch installierte Leistung gerade aus, um den Motor nach einem Stopp automatisch wieder zu starten. Eine Bremsenergieerückgewinnung ist nur in einem äußerst geringen Maße möglich. Wegen der verhältnismäßig geringen Zusatzkosten für einen Mikrohybrid werden sich solche Systeme trotzdem in der Zukunft in Fahrzeugen wiederfinden.

Soll die Bremsenergieerückgewinnung zusätzlich genutzt werden, müssen elektrische Leistungen in der Größenordnung von 10 ... 15 kW installiert werden. Damit lassen sich übliche Verzögerungsvorgänge abdecken und damit ein Großteil der gesamten Verzögerungsleistung wiedergewinnen. Eine weitere Erhöhung der elektrisch installierten Leistung würde zwar eine Rückgewinnung auch stärkerer Verzögerungsvorgänge ermöglichen. Da diese jedoch verhältnismäßig selten auftreten, scheint eine Erhöhung der installierten elektrischen Leistung alleine aus Sicht der Bremsenergieerückgewinnung wirtschaftlich nicht sinnvoll zu sein.

Elektrisches Fahren ist mit einem Mildhybrid nicht möglich, lediglich eine Unterstützung des Verbrennungsmotors (Boosten) ist vorgesehen.

Aus Sicht der Verbrauchseinsparung lässt sich damit fast alles erreichen: Etwa 5 % durch Stopp/Start und etwa 10 % mit Rekuperation. Ein Mildhybrid wäre also eigentlich ausreichend, wenn nicht elektrisches Fahren oder eine nennenswerte Leistungsunterstützung des Verbrennungsmotors gefordert wird. Eine weitere Verbrauchsreduzierung von 4 % ergibt sich, wenn der Verbrennungsmotor in Betriebszuständen mit schlechtem Wirkungsgrad abgeschaltet wird und die E-Maschine beim Vollhybrid den alleinigen Vortrieb übernimmt.

Allerdings muss dieser zusätzliche Verbrauchsvorteil teuer erkauft werden. Die installierten elektrischen Leistungen liegen mit 30 ... 50 kW beträchtlich höher als die bei einem Mildhybrid. Entsprechend hoch werden die Kosten liegen. Vollhybride werden häufig zur Leistungssteigerung entwickelt.

Ein Vollhybrid kann aber auch für ein Downsizing des Verbrennungsmotors genutzt werden. Der dann entstehende Antrieb besteht aus einem Verbrennungsmotor, der für die volle Leistungsabgabe stets auf die aktive Mithilfe der starken E-Maschine angewiesen ist.

Insgesamt gibt es viele Varianten und zwischen Mild- und Vollhybriden gibt es einen Übergangsbereich, der zum Beispiel elektrisches Rangieren erlaubt, aber nicht Fahren bei höheren Geschwindigkeiten.

Hybridkonzepte

Die Einteilung in Mikro-, Mild- und Vollhybrid gibt Hinweise auf die Funktionalität. Über die tatsächliche Anordnung und Anbindung der E-Maschine im Antriebsstrang sagt diese Einteilung jedoch nichts aus. Bei einigen Hybridkonzepten entscheidet lediglich die Dimensionierung der E-Maschine darüber, ob das Konzept

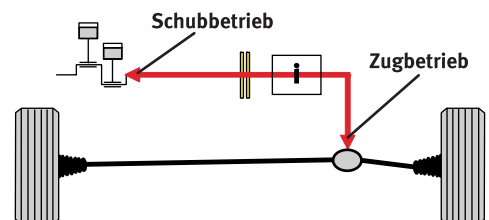


Bild 5 Einfaches Strukturbild eines Antriebsstrangs zur Verdeutlichung der Momentenflüsse im Zug- und Schubbetrieb

eher als Mild- oder Vollhybrid einzuordnen ist. Im Folgenden wird deshalb versucht, die Art der Anbindung der E-Maschine im Antriebsstrang und die Momentenflüsse als Unterscheidungsmerkmale herauszuarbeiten.

Dies wird an vereinfachten Strukturbildern des Antriebsstrangs (Bild 5) erklärt. Das angedeutete Getriebe kann dabei für irgendeinen der bekannten Getriebetypen stehen.

Die Lichtmaschine als Startergenerator (SG)

Die wohl einfachste Lösung ist ein Mikrohybrid für Stopp/Start, der sich mit allen bestehenden Antriebssträngen kombinieren lässt, indem die herkömmliche Lichtmaschine auch für motorischen Betrieb ausgelegt wird (Bild 6). Sie kann dann auch als Anlasser arbeiten und einen geräuscharmen Wiederstart des Verbrennungsmotors bewirken. Ein herkömmlicher Anlasser kann das nicht leisten. Stopp/Start ist damit möglich, jedoch nicht elektrisches Fahren oder Rekuperieren. Typische Leistungen für die elektrische Maschine liegen bei 4 ... 6 kW. Diese Anordnung ist nur als Mikrohybrid geeignet.

Dem Riementrieb ist dabei besonderes Augenmerk zu schenken. Im Startbetrieb ist der Momentenfluss im Riementrieb umgekehrt, verglichen mit dem Generatorfall. Die Riemenführung und Spannsysteme müssen deshalb auf einen Wechsel von Zug- und Leertrum ausgelegt sein.

Besonders bei Dieselmotoren können die erforderlichen Kaltstartmomente mit weit über 100 Nm so groß werden, dass sie mit einem normalen Riementrieb nicht mehr zu beherrschen sind. In solchen Fällen kann der herkömmliche Anlasser für den Start bei kaltem Motor sorgen. Stopp/Start

wird unter anderem im Sinne ganzheitlich reduzierter Emissionen sowieso erst bei warmem Motor eingesetzt. Die dafür erforderlichen Momente von unter 100 Nm können dann vom Startergenerator über den Riementrieb geräuscharm aufgebracht werden. Dies ist eine der Hauptanforderungen für die Akzeptanz von Stopp/Start-Systemen.

Ferner besteht die Möglichkeit, im Riementrieb ein zusätzliches Planetengetriebe für den Kaltstart zu integrieren [4].

Kurbelwellenstarter-generator

Beim Kurbelwellenstartergenerator sitzt die elektrische Maschine direkt auf der Kurbelwelle, dort wo heute normalerweise das Schwungrad angebracht ist. Danach folgt der restliche Antriebsstrang (Bild 7).

Der Startergenerator muss so ausgelegt werden, dass ein Start auch bei kaltem Motor möglich ist, da ein konventioneller Starter kaum mehr unterzubringen ist. Typische Leistungen liegen bei 10 ... 15 kW. Diese Anordnung markierte bei vielen Automobilherstellern den Start in die Hybridtechnik. Einige systembedingte Schwächen verhinderten meist einen Serieneinsatz. Zwar lässt sich ein Stopp/Start-System sehr elegant, geräuscharm und schnell realisieren. Rekuperation und elektrisches Fahren sind jedoch nur sehr eingeschränkt möglich, weil der Verbrennungsmotor nicht von der E-Maschine abgekoppelt werden kann.

Sowohl beim Rekuperieren als auch beim elektrischen Fahren müsste der Verbrennungsmotor gegen seine innere Reibung mitgeschleppt werden. Zum Rekuperieren bliebe fast nichts mehr übrig.

Grundsätzlich ist der Kurbelwellenstartergenerator mit allen Getriebetypen verträglich. Allerdings ist zu beachten, dass für einen schnellen Wieder-

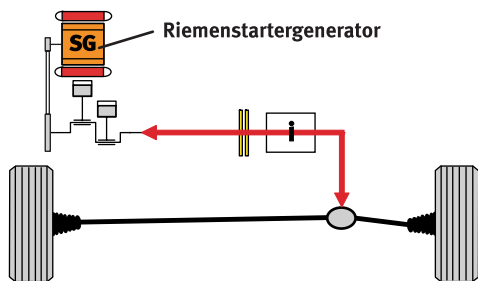


Bild 6 Riemenstartergenerator

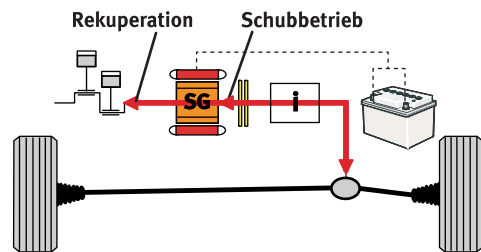


Bild 7 Kurbelwellenstartergenerator mit E-Maschine auf der Kurbelwelle

start und ein sofortiges Losfahren des Fahrzeugs alle benötigten momentenübertragenden Elemente des Getriebes bereits in Wartestellung sein müssen. Das ist bei herkömmlichen Automatikgetrieben, bei denen die Druckölversorgung zur Betätigung aus einer vom Verbrennungsmotor angetriebenen Ölpumpe erfolgt, nicht der Fall. Bei einem Wiederstart müsste erst die Pumpe Öl fördern, die Leitungen gefüllt und Elastizitäten vorgespannt werden, bevor Druck aufgebaut werden kann.

Dabei gehen wesentliche Sekundenbruchteile verloren. Der Fahrer stellt beim Wiederaufahren eine unakzeptable Verzögerung fest. Deshalb wird für solche Automatikgetriebe eine zusätzliche, elektrisch angetriebene Ölpumpe vorgesehen. Dies verschlechtert den Wirkungsgrad des Antriebsstranges und erhöht die Kosten.

In die Kategorie Kurbelwellenstartergenerator fällt auch der Honda Insight. Wie aus Bild 8 und Bild 9 ersichtlich, wird der Kurbelwellenstartergenerator mit einem CVT-Getriebe kombiniert. Diese Kombination ist vielleicht nicht gerade sehr phantasievoll, besticht aber durch Einfachheit und niedrigen Verbrauch von etwa 4 l/100 km.

Ein Vorteil des CVT gegenüber einem Stufengetriebe besteht darin, dass damit sehr häufig in Overdrive-Übersetzungen gefahren werden kann, welche ohne komfortmindernde Schaltungen eingestellt werden können. Durch die niedrige Drehzahl des Motors reduzieren sich die Schleppverluste und Rekuperieren ist mit weniger Einschränkung auch ohne Trennkupplung zwischen Motor und E-Maschine möglich.

Einzig das rein elektrische Fahren fehlt dem Honda-System. Dies würde neben einer weiteren Kupplung noch einmal Zusatzaufwand für die CVT-Anpressung erfordern. Die normalerweise direkt vom Verbrennungsmotor angetriebene hydraulische Pumpe müsste beim rein elektrischen Fahren alternativ angetrieben werden.

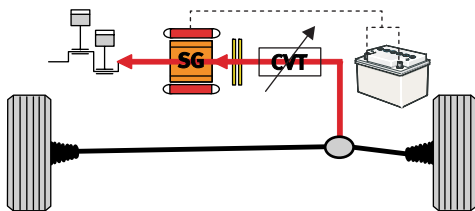


Bild 8 Kombination von Kurbelwellenstartergenerator und CVT beim Honda Insight

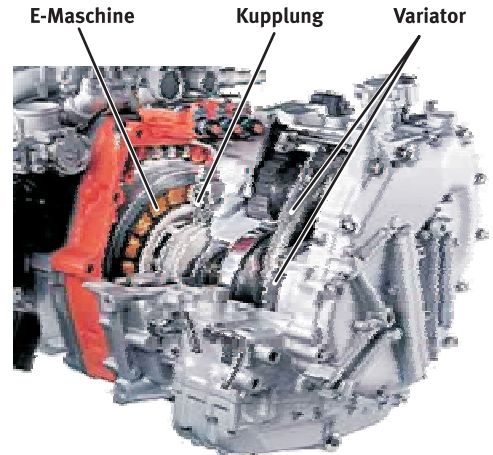


Bild 9 Aufgeschnittenes CVT-Getriebe mit Startergenerator des Honda Insight

Startergenerator zwischen zwei Kupplungen

Wenn rekuperiert und elektrisch gefahren werden soll, ist eine Trennung des Verbrennungsmotors von der E-Maschine und dem restlichen Antriebsstrang unerlässlich. Es entstehen dann Anordnungen, wie sie prinzipiell in Bild 10 gezeigt sind. Jetzt lässt sich der Verbrennungsmotor stoppen und vom restlichen Antriebsstrang abkoppeln. Die zu rekuperierende Verzögerungsenergie kann vollständig als Generatorantriebsleistung genutzt werden. Beim elektrischen Fahren stört der Verbrennungsmotor mit seinen Reibverlusten nicht mehr.

Dieses Konzept lässt sich je nach installierter Leistung als Mild- oder Vollhybrid ausführen.

Bei Leistungen der E-Maschine bis ca. 12 kW ist lediglich Stopp/Start und Rekuperieren möglich. Werden 20 kW oder mehr installiert, lässt sich damit auch elektrisch fahren.

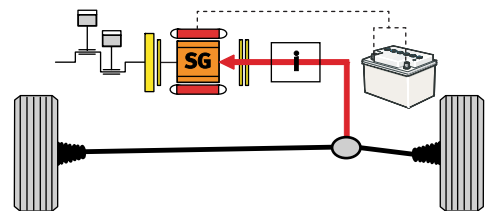


Bild 10 Antriebsstrang mit Startergenerator zwischen zwei Kupplungen

Grundsätzlich lassen sich damit alle Getriebearbeiten bedienen.

Die im vorherigen Abschnitt erwähnten Einschränkungen sind aber auch hier gültig. Wiederstart wird nur akzeptabel schnell erfolgen, wenn bei automatischen Getrieben entweder eine elektrisch angetriebene Druckkölmpumpe vorgesehen wird oder, noch besser, die für Schaltung und Kupplungen erforderliche Aktorik unmittelbar elektromotorisch erfolgt.

Die Trennkupplung zwischen Verbrennungsmotor und Getriebe wird in praktisch allen Projekten als trockene Kupplung ausgeführt. Dies ist gut machbar, weil diese Kupplung nicht als Anfahrkupplung verwendet wird und deshalb nur kleine Reibarbeiten entstehen. Außerdem muss sie ein kleines Schleppmoment besitzen. Dies lässt sich am besten mit einer trockenen Kupplung erreichen.

Eine trockene Kupplung hat stets eine Seite mit hohem Massenträgheitsmoment, nämlich die Seite mit den Gussreibpartnern, und eine Seite mit der Kupplungsscheibe, die ein niedriges Massenträgheitsmoment aufweist.

Konstruktiv ist es nun möglich, entweder das hohe oder das niedrige Massenträgheitsmoment der Kurbelwelle zuzuordnen. Sitzt das hohe Massenträgheitsmoment auf der Kurbelwelle, wirkt das wie ein normales Schwungrad (Bild 10). Der Motor ist also auch bei geöffneter Trennkupplung lauffähig.

Beim Wiederstart ist allerdings die Kupplung mit dem relativ großen Massenträgheitsmoment zu beschleunigen. Dies bedeutet höhere Arbeitsbelastung der Kupplung, längere Startzeit und evtl. eine spürbare Verzögerung des Fahrzeugs, wenn mit der Fahrzeugträgheit der Motor angelassen wird.

Deshalb wird auch die umgedrehte Anordnung in Betracht gezogen (Bild 11).

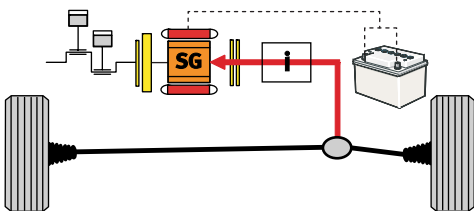


Bild 11 Anordnung wie Bild 10, jedoch leichte Seite der Kupplung mit der Kurbelwelle verbunden



Bild 12 Trockenkupplung zwischen Kurbelwelle und E-Maschine beim Automatikgetriebe mit Wandler, schwere Seite der Kupplung auf der Kurbelwelle

Auf der Kurbelwelle sitzt nur noch die extrem leichte Kupplungsscheibe. Deren Massenträgheitsmoment reicht zusammen mit dem von Kurbelwelle, Pleuel und Kolben nicht mehr aus, den Motor bei geöffneter Trennkupplung in Betrieb zu halten. Dies ist allerdings auch nicht erforderlich.

Der Vorteil dieser Anordnung wirkt sich beim Wiederstart aus. Mit einer kleinen, aus dem Triebstrang abgezweigten Leistung kann der Verbrennungsmotor schlagartig auf Drehzahl hochgerissen werden. Extrem schnelle Startvorgänge sind damit möglich.

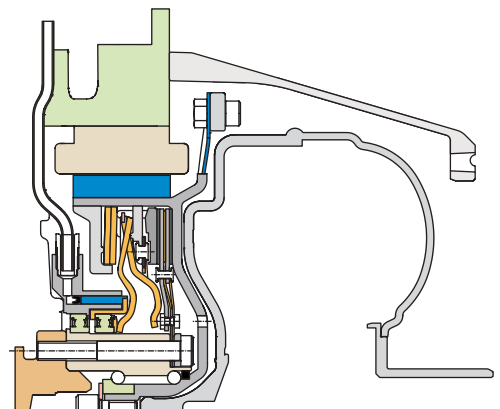


Bild 13 Trennkupplung zwischen Kurbelwelle und E-Maschine mit leichter Seite der Kupplung auf der Kurbelwelle

Allerdings muss die Trennkupplung dafür neben dem statischen Motormoment auch die durch die Ungleichförmigkeit hervorgerufenen Momentenschwankungen ohne Schlupf übertragen können, die besonders bei Dieselmotoren ein Mehrfaches des Motormoments betragen. Eine für die Kupplung nicht ganz leichte Anforderung, die wahrscheinlich nur mit einer trockenen Kupplung bewältigt werden kann.

Deshalb gibt es bei der Anordnung „E-Maschine zwischen 2 Kupplungen“ sowohl Projekte mit schwerer als auch mit leichter Seite auf der Kurbelwelle. Bild 12 und Bild 13 zeigen Beispiele solcher Kupplungen mit den zugehörigen E-Maschinen.

Serieller Hybrid mit Kupplung zwischen zwei E-Maschinen

Beim seriellen Hybrid (Bild 14) lässt sich der Antriebsstrang mechanisch vollständig trennen. Die Leistungsübertragung kann vollständig elektrisch durchgeführt werden.

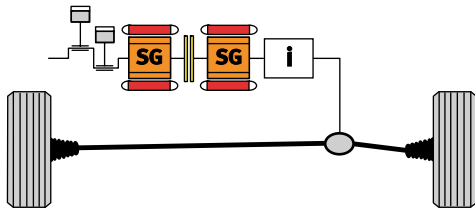


Bild 14 Serieller Hybrid

Die beiden hintereinander angeordneten E-Maschinen, von denen die erste als Generator dient, deren elektrische Leistung in der zweiten wieder in mechanische Energie umgewandelt wird, können bei geöffneter Kupplung auch als elektrischer Wandler oder als elektrisches, stufenloses Getriebe angesehen werden. Solche Anordnungen werden übrigens seit langem bei Diesel-elektrischen Antrieben in Lokomotiven eingesetzt.

Dies ist insbesondere beim CVT interessant, weil dort der zusätzliche Aufwand für einen Rückwärtsgang mit einem Planetenwendesatz und einer eigenen Kupplung sehr hoch ist. Beim seriellen Hybrid lässt sich durch entsprechende Dimensionierung der beiden E-Maschinen auch ein Rückwärtsgang realisieren, indem der Abtrieb rückwärtsdrehend angesteuert wird (Bild 15).

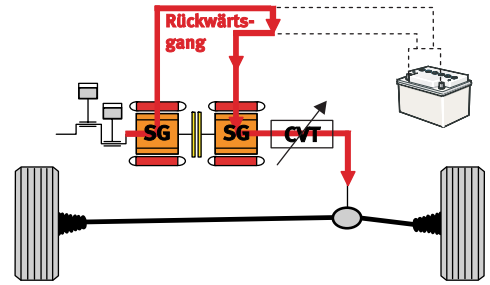


Bild 15 Rückwärtsfahren beim seriellen Hybrid mit CVT

Bei einer weiteren Variante des seriellen Hybriden wird die erste E-Maschine vom Nebenabtrieb angetrieben und ersetzt damit die normale Lichtmaschine (Bild 16).

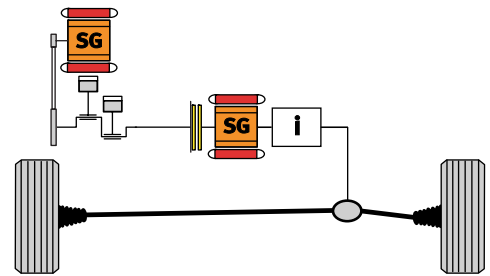


Bild 16 Serieller Hybrid mit einer E-Maschine im Nebenabtrieb

Die Leistung ist aber beschränkt, weil über einen Riementrieb sicher nicht die für einen Vollhybriden erforderliche Leistung übertragen werden kann.

Leistungsverzweigte Hybride

Einen ganz anderen Weg hat Toyota vor mehreren Jahren eingeschlagen. Der Leistungsfluss des Verbrennungsmotors wird über ein Planetengetriebe in 2 Wege aufgeteilt (Bild 17).

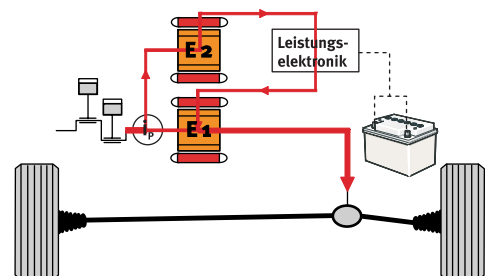


Bild 17 Leistungsverzweigung beim Toyota Prius

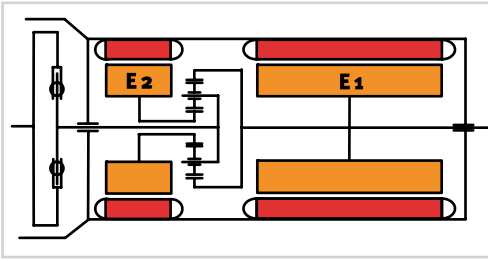


Bild 18 Prinzipieller Aufbau des Toyota Prius-Hybridgetriebes

Der erste Zweig führt direkt zum Abtrieb, während der andere Zweig zu einem Generator führt. Je nachdem, wie stark der Generator diesen Zweig abbremst, stellt sich am Abtrieb eine entsprechende Drehzahl ein. Über das Bremsmoment des Generators kann die Abtriebsdrehzahl dann stufenlos geregelt werden.

Beim Bremsen erzeugt der Generator natürlich eine hohe elektrische Leistung, die nicht (vollständig) in der Batterie gespeichert werden kann. Deshalb wird auf dem Abtrieb ein elektrischer Motor angebracht, der diese elektrische Leistung wieder in den Antriebsstrang zurückführt.

Die Leistungsübertragung erfolgt also sowohl über einen mechanischen Zweig direkt zum Abtrieb als auch über einen elektrischen Pfad.

Dieses Konzept besteht durch den einfachen mechanischen Aufbau, erfordert aber zwei leistungsstarke E-Maschinen mit einer Gesamtleistung von

ca. 50 kW (Bild 18 und Bild 19). Ein weiterer Nachteil liegt in der großen Leistung, die über den elektrischen Zweig fließt, der wegen der vielen Umwandlungen (von mechanischer Leistung in elektrische, Frequenzumrichter, von elektrischer wieder in mechanische Leistung) nicht gerade über den besten Wirkungsgrad verfügt und somit die Verbrauchseinsparungen durch den Hybridantrieb zumindest teilweise wieder aufzehrt.

Es hat deshalb nicht an Bestrebungen gefehlt, diesen Nachteil zumindest teilweise zu kompensieren.

Als zielführend könnte sich erweisen, die Leistungsverzweigung in mehreren Bereichen durch-

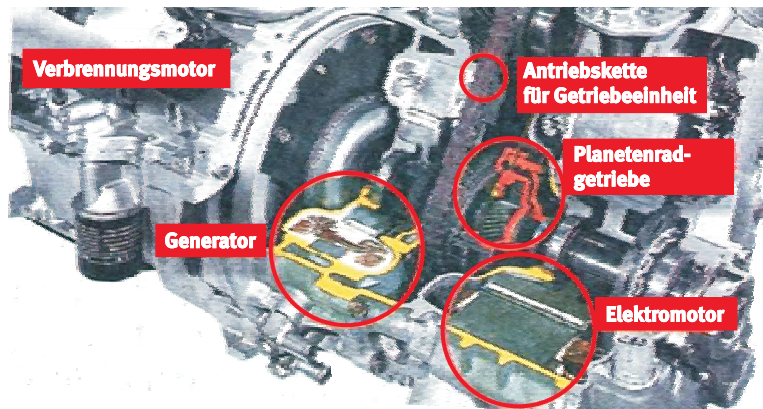


Bild 19 Toyota Prius-Getriebe, aufgeschnitten

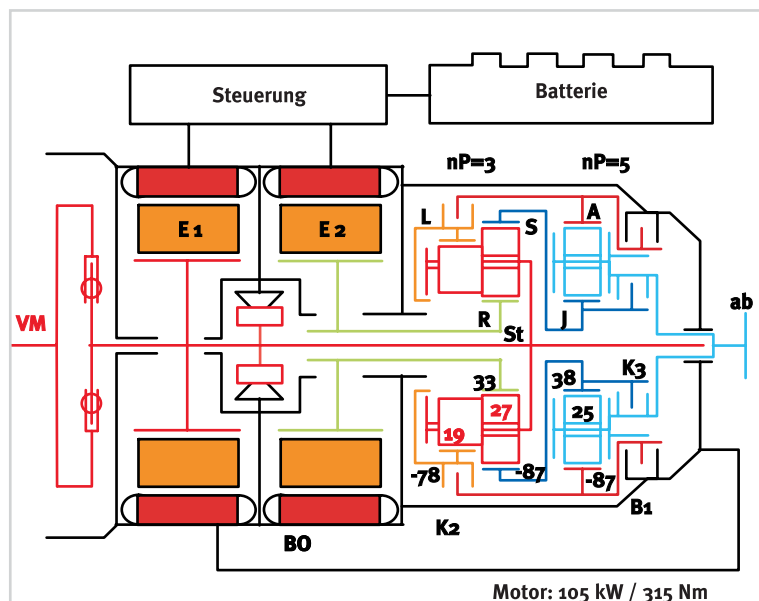


Bild 20 Leistungsverzweigung mit Mehrbereichsgetriebe [5]

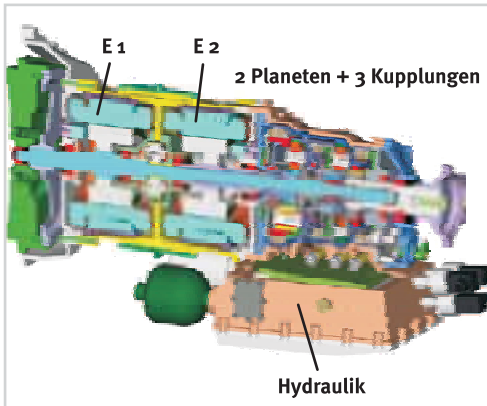


Bild 21 Leistungsverzweigter Hybrid mit Mehrbereichsgetriebe nach Tenberge [5]

zuführen. Vereinfacht lässt sich das am besten so beschreiben: Statt eines Planetensatzes mit einer festen Übersetzung werden verschiedene Planetensätze mit verschiedenen Übersetzungen verwendet. Je nach Fahrbereich (Motordrehzahl, Moment, Fahrzeuggeschwindigkeit) wird dann jeweils der Planetensatz verwendet, der einen möglichst geringen elektrischen Leistungsfluss ergibt (Bild 20).

Die Umschaltung der Planetensätze erfolgt ähnlich wie bei einem Stufenautomaten. Der große Vorteil ist neben den geringeren Verlusten auch die erheblich reduzierte Leistung der E-Maschinen, die nur noch bei in Summe ca. 20 bis 30 kW liegen wird. Dadurch wird auch die Leistungselektronik kleiner und die Kosten werden reduziert.

Ein möglicher Nachteil sind die Bereichswechsel, wenn sie nicht komfortabel genug gestaltet werden können.

Eine ausgeführte Konstruktion für 400 Nm mit dem Namen SEL (Stufenlos Elektrisch Leistungsverzweigt), zeigt Bild 21 [5]. Der Kosten- und Baumantel der beiden E-Maschinen ist aber auch hier noch erheblich, und zusätzlich sind viele Komponenten eines Automatikgetriebes enthalten (Pumpe, Hydraulik, Planetensätze, Kupplungen, Bremsen).

Through the road

Eine weitere interessante Variante wird in Bild 22 gezeigt. Der Front-Quer-Antrieb des Fahrzeuges bleibt unverändert. Zusätzlich wird die Hinterachse mit einem Elektromotor angetrieben.

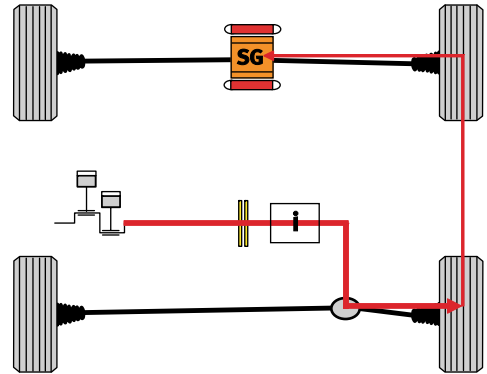


Bild 22 Hybridantrieb „through the road“

Sowohl das elektrische Fahren als auch die Rekuperation erfolgt in Abhängigkeit des Batterieladezustandes über die Hinterachse.

Um eine hohe Dynamik aus Stopp/Start zu erreichen, erfolgt auch das Anfahren mit hoher Last zunächst rein elektrisch über die Hinterachse, während der Verbrennungsmotor parallel gestartet wird.

Neben der Realisierung der hybriden Funktionen wird ein Allradantrieb ermöglicht, bei dem innerhalb der Leistungsgrenzen beider Antriebe die Momente zwischen Vorder- und Hinterachse beliebig verteilt werden können.

Der Leistungsfluss in verschiedenen Fahrsituationen, zum Beispiel im Generatormodus bei verbrennungsmotorischem Fahren, erfolgt über die Straße. Deshalb die Bezeichnung „through the road“.

Hybrid beim Doppelkupplungsgetriebe

Das Doppelkupplungsgetriebe (Bild 23) lässt sich durch Einfügen einer E-Maschine und einer

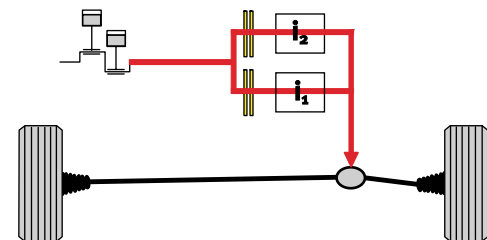


Bild 23 Schema Doppelkupplungsgetriebe

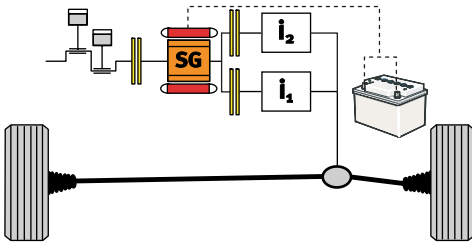


Bild 24 Doppelkupplungsgetriebe als Hybride

Trennkupplung zum Verbrennungsmotor ebenfalls zum Hybriden erweitern (Bild 24). Diese Anordnung würde nach der vorgenommenen Einteilung unter den Fall „zwischen zwei Kupplungen“ fallen.

Dies lässt sich erheblich vereinfachen, wenn die E-Maschine am Teilgetriebe für die geraden Gänge angebracht wird. Es ist dann keine zusätzliche Kupplung mehr notwendig, da die bereits vorhandene Doppelkupplung die Trennung vom Verbrennungsmotor übernehmen kann (Bild 25).

Dadurch entsteht eine ESG genannte Hybridvariante, die mit besonders geringem Aufwand alle Hybridfunktionen erfüllt, allerdings nur in Verbindung mit einem Doppelkupplungsgetriebe sinnvoll ist [4, 6, 7]. Durch diese Anbindung der elektrischen Maschine bleibt die axiale Länge des gesamten Antriebes unverändert zum Basisantrieb, was vor allem für die engen Bauraumbedingungen bei Front-Quer-Einbau einen großen Vorteil gegenüber dem coaxialen Einbau zwischen Motor und Getriebe bedeutet.

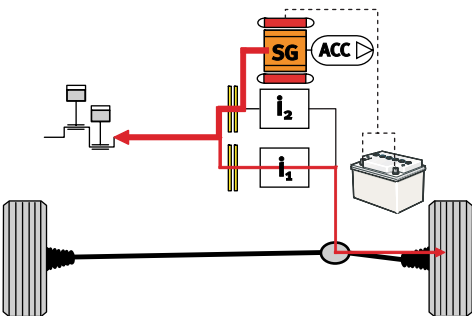


Bild 25 Vereinfachte Anordnung der E-Maschine beim Doppelkupplungsgetriebe

In Bild 25 ist auch der Wiederstart beschrieben, indem die E-Maschine über die Kupplung der geraden Gänge den Verbrennungsmotor anlässt

und gleichzeitig über ein Anlegen der Kupplung des ersten Ganges ein Teil des Moments abgezweigt und zum Abtrieb geleitet wird. Damit spürt der Fahrer eine sofortige Reaktion des Fahrzeugs, noch bevor der Verbrennungsmotor voll gestartet ist. Ermöglicht wird das gute Ansprechverhalten durch eine elektromotorische Aktorik, mit der unabhängig von Drehzahlen des Triebstranges das vollständige Schließen der Kupplungen schon während der Stillstandsphase möglich ist.

Bild 26 zeigt schematisch den Momentenfluss bei der Rekuperation. Da der Klimakompressor direkt mit der E-Maschine verbunden ist, kann die Rekuperation wahlweise in elektrische Energie oder in den Klimakompressor erfolgen. Diese Anordnung ermöglicht auch eine Standklimatisierung, da die E-Maschine bei offener Kupplung und Synchronisierungen im Getriebe den Klimakompressor direkt antreiben kann.

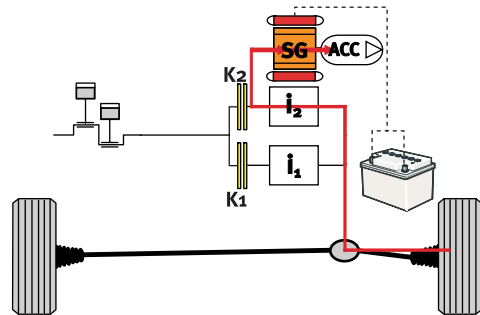


Bild 26 Rekuperation, wahlweise in E-Maschine oder Klimakompressor

Aus Sicht der Triebstrangdynamik stellt das Abschalten und Zuschalten des Verbrennungsmotors während der Fahrt die kritischste Situation dar. Insbesondere der Wiederstart als Reaktion auf eine Betätigung des Gaspedals erfordert ein sehr schnelles Ansprechverhalten.

Das Abstellen des Verbrennungsmotors erfolgt nach einer vorgegebenen Zeit durch eine Überschneidung der Momente von der aktiven Kupplung K2 auf die elektrische Maschine. Nach dem Öffnen der Kupplung verzögert der Verbrennungsmotor auf Drehzahl Null und die E-Maschine übernimmt generatorisch das Schubmoment.

Den genauen Aufbau des Triebstranges zeigt Bild 27, bei dem – wie bei Doppelkupplungsgetrieben üblich – die beiden Teilgetriebe in einem einzigen

Getriebe verschachtelt sind. Die Position der elektrischen Maschine ist achsparallel zum Getriebe mit einem Antrieb über zwei Stirnräder vom Festrad des 4. Ganges und einer Übersetzung von ca. 1,2.

LuK hat einen Prototypen mit einem solchen Getriebe in Verbindung mit einem 1,3-l-Dieselmotor aufgebaut. Die E-Maschine in dem Prototypen (Bild 28) hat eine Leistung von 10 kW und ist für diese Leistungsklasse und für dieses Fahrzeug zur Rekuperation voll ausreichend und stellt damit einen Mildhybriden dar. Durch entsprechend größere Skalierung der E-Maschine ließe sich bei gleichem Aufbau auch ein Vollhybrid realisieren. Direkt unter der elektrischen Maschine wird der Klimakompressor positioniert und über einen Keilrippenriemen angetrieben. Mit dieser Anbindung kann die Innenraumklimatisierung sowohl während der Rekuperation als auch in Stillstandsphasen aufrechterhalten werden.



Bild 28 Prototypgetriebe mit seitlich angeflanschter E-Maschine

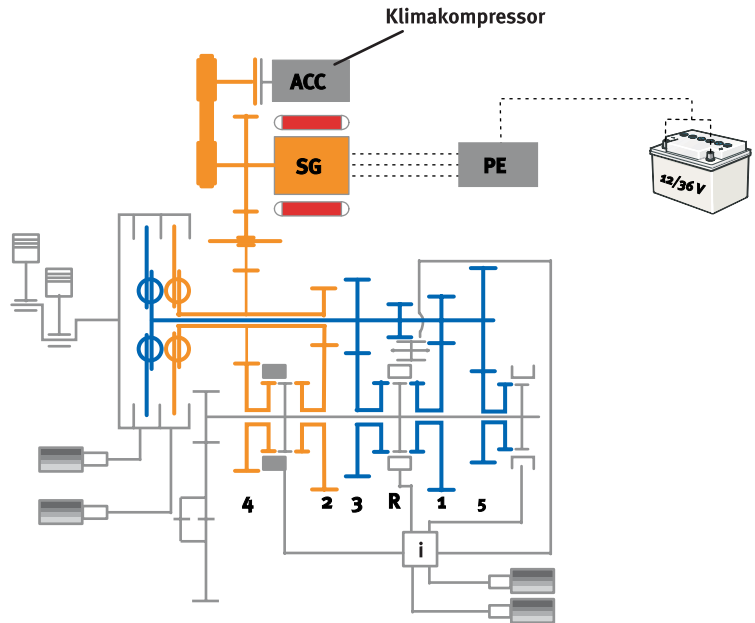


Bild 27 Getriebeschema des Doppelkupplungsgetriebes mit E-Maschine und Klimakompressor

Die Kommunikation zwischen den Steuergeräten von Verbrennungsmotor, Getriebe, Startergenerator und Energiespeicher erfolgt über den vorhandenen CAN-Bus. Die Koordination der Hybridfunktionen sowie das Energiemanagement wurden im Getriebebesteuergerät integriert.

Wie bereits erwähnt, ist die Dynamik, mit der ein Wiederstart des Verbrennungsmotors und der Aufbau des Radmomentes erfolgt, von entscheidender Bedeutung für die Akzeptanz der Funktion Stopp/Start in Verbindung mit einem automatisierten Getriebe. Bild 29 zeigt die Messung eines Ankrichvorganges nach dem Lösen der Bremse. Die elektromotorische Aktorik bereitet während der Stillstandsphase die nächste Anfahrt durch vollständiges Schließen der Kupplung K2 und das Anlegen der Anfahrkupplung K1 auf Kriechmoment vor (vergleiche Bild 26). Nach dem Magnetisieren der elektrischen Maschine (ca. 70 ms) steigt das Startmoment auf einen zum Beschleunigen des Verbrennungsmotors notwendigen Wert von ca. 140 Nm. Parallel führt Kupplung K1 10 Nm über den eingelegten 1. Gang auf den Abtrieb. 140 ms nach dem Lösen des Bremspedals sind die Spiele des Antriebes überbrückt, und das Fahrzeug beginnt zu beschleunigen. Dies führt im Vergleich zu ASG-Antrieben zu einem deutlich ver-

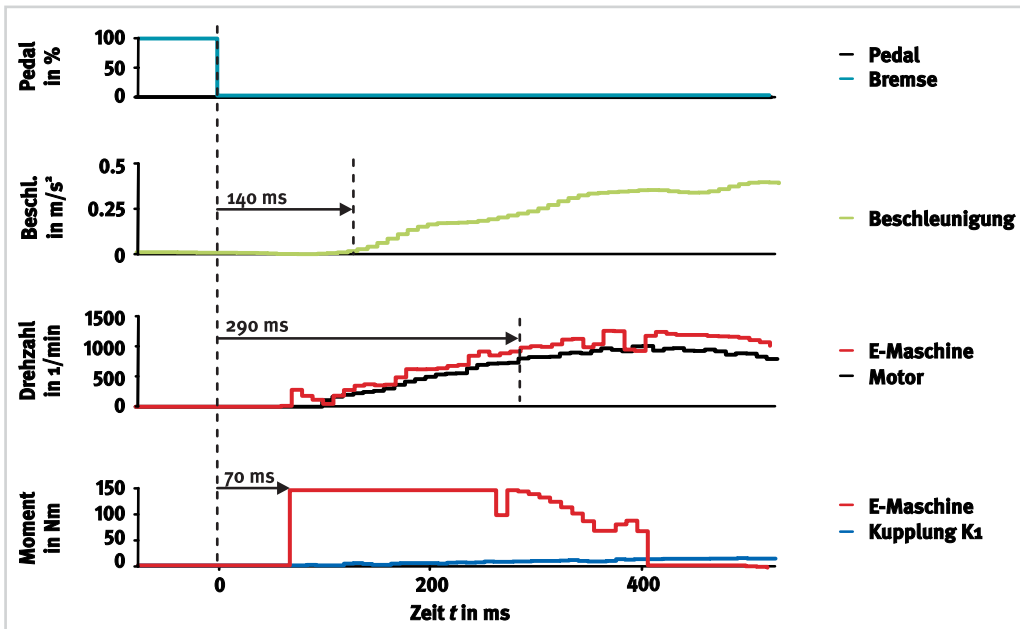


Bild 29 Anfahrt aus Stopp/Start (Messung)

besserten Ansprechverhalten. Ca. 290 ms nach dem Lösen des Bremspedals erreicht der Verbrennungsmotor Leerlaufdrehzahl und zündet.

Genau so zeitkritisch ist der Wiederstart des Verbrennungsmotors aus einer Schubphase. Bild 30 zeigt das Zuschalten des Verbrennungsmotors bei

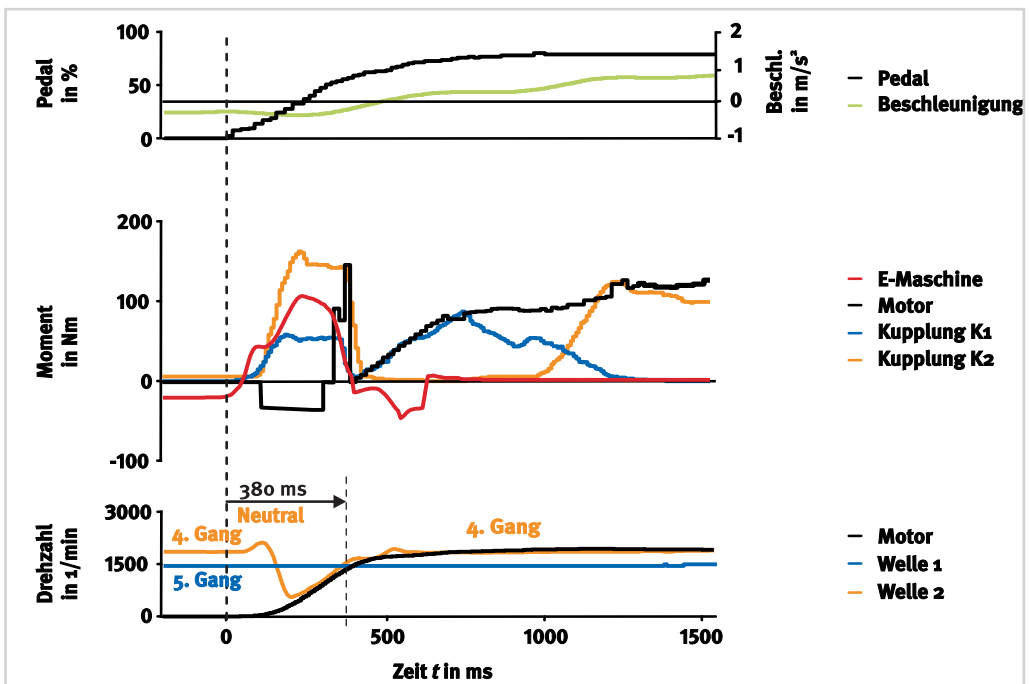


Bild 30 Start des Verbrennungsmotors nach einer Rekuperationsphase (Messung)

einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 55 km/h. Die Initialisierung erfolgt durch Betätigung des Gaspedals. Zunächst wird die elektrische Maschine durch Auslegen des aktiven Ganges vom Abtrieb getrennt und von generatorischem auf motorisches Moment geregelt. Durch ein schnelles Schließen der Kupplung K2 wird die Kurbelwelle beschleunigt. Neben der zugeführten Leistung der E-Maschine wird durch Anlegen der Kupplung K1 zusätzlich Leistung vom Abtrieb auf die Kurbelwelle geführt, um die Zeit bis zum Zünden des Verbrennungsmotors weiter zu reduzieren. Dieses Moment darf jedoch nur kurzzeitig aufrechterhalten werden, da der Fahrer dies sonst als verzögertes Ansprechverhalten wahrnimmt. Als erste Reaktion auf die Gaspedalbetätigung spürt der Fahrer die Reduzierung des Schubmoments auf Null. Ca. 380 ms nach dem Betätigen des Gaspedals erreicht die Kurbelwelle die Drehzahl der Getriebeeingangswelle 1. Ab diesem Zeitpunkt wird Moment an Kupplung K1 aufgebaut und nach 425 ms beginnt das Fahrzeug zu beschleunigen.

Weiterhin kann das Verhalten des Fahrzeuges bei einer Beschleunigung aus dem Stand deutlich verbessert werden. Das zur Verfügung stehende Moment der elektrischen Maschine wird zunächst zum Verbrennungsmotor geführt, um die Anfahr-drehzahl schnell zu erreichen. Im Anschluss wird entsprechend dem steigenden Verbrennungsmotormoment das Moment der E-Maschine reduziert. Die Boostfunktion ist ausschließlich in Bereichen niedriger Verbrennungsmotordrehzahlen aktiv. Das maximale Moment des Verbren-

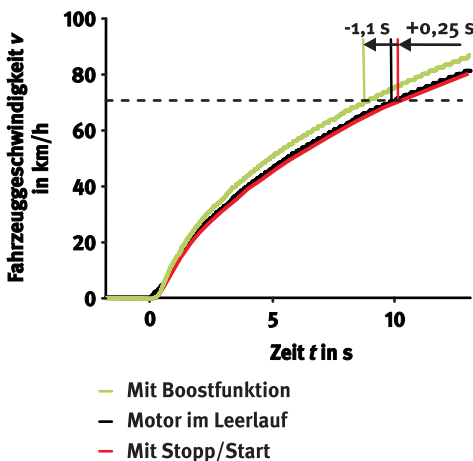
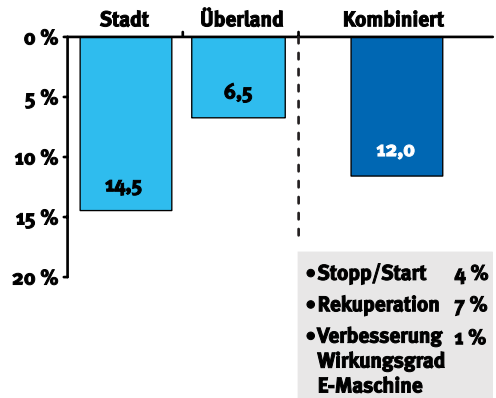


Bild 31 Fahrzeugbeschleunigung PSG vs. ESG 0 – 70 km/h (Messung)



Zyklus: NEDC

$m_{\text{Fahrzeug}} = 1360 \text{ kg}$

$P_{\text{elektrische Verbraucher}} = 300 \text{ W}$

Bild 32 Im Zyklus gemessene Verbrauchsreduzierungen

nungsmotors wird dabei nicht überschritten, um dem Fahrer ein reproduzierbares Beschleunigungsverhalten auch über mehrere Zyklen zu geben. Die Beschleunigung des Fahrzeuges aus einer Stopp/Start-Situation erfolgt über die Boostfunktion auch mit höherer Dynamik. Bild 31 zeigt die gegenüber dem Basisfahrzeug um ca. 1,1 s schnellere Beschleunigung bis 70 km/h.

Im Anschluss an die Funktionserprobung wurden mit dem Prototypen die Verbrauchersparungen gemessen, wie sie in Bild 32 dargestellt sind. Als Basis dient das bereits stark verbrauchsoptimierte Doppelkupplungsgetriebe, bei dem durch die Hybridfunktion, nämlich Stopp/Start und Bremsenergieerückgewinnung, ein weiterer Vorteil von ca. 12 % Kraftstoffeinsparung im gemischten Zyklus herausgefahren werden konnte.

Vergleich der Konzepte

In Bild 33 wird der Versuch unternommen, die verschiedenen Konzepte miteinander zu vergleichen. Und um es gleich vorweg zu nehmen, dies wird nur unvollkommen gelingen können, da es bei jedem der Konzepte wieder eine Vielzahl von Ausführungsmöglichkeiten gibt, die in eine solche Bewertung nicht mit einfließen können. Trotzdem gelingt es, einige wesentliche Aussagen zu machen, die für eine Vorentscheidung bei der Wahl des richtigen Hybridsystems hilfreich sein können.

Zunächst interessiert die Frage, welche Konzepte sich für Mild- oder Vollhybriden eignen. Bild 33 zeigt, dass die meisten grundsätzlich für beide geeignet sind, je nach Dimensionierung der E-Maschine(n). Es wird bei diesen Hybriden dann vielleicht in Zukunft auch einen fließenden Übergang geben zwischen Mild- und Vollhybriden, zum Beispiel wenn Rangieren elektrisch gewünscht wird, aber elektrisches Fahren nicht gefordert ist.

Aus den beiden Spalten Mild- bzw. Vollhybrid lässt sich dann schnell ableiten, welche der Funktionen Stopp/Start, Bremsenergieerückgewinnung (Rekuperation) und elektrisches Fahren möglich ist.

Zum Beispiel lässt sich die Variante „zwischen zwei Kupplungen“ je nach Größe der E-Maschine sowohl zum Mild- als auch zum Vollhybriden ausbauen. Typische elektrische Leistungen sind 10 ... 15 kW für Rekuperieren. Für Stopp/Start ist das dann schon etwas überdimensioniert. Elektrisches Fahren würde ca. 30 kW oder mehr erfordern.

Einige Hybridkonzepte gehen nur in Verbindung mit bestimmten Getriebetypen oder erfordern eine Getriebeart, die ohne Hybrid gar nicht funktionsfähig wäre. Hierunter fallen vor allem die leistungsverzweigten Varianten.

Eine wichtige Rolle werden die Kosten spielen. Besonders ins Gewicht fallen neben der E-Maschine auch die Leistungselektronik und die Speicherung in der Batterie und den Supercaps. Hier verlässliche Angaben zu machen fällt schwer, da die Komponenten heute noch nicht großserientauglich am Weltmarkt zur Verfügung stehen.

Trotzdem lassen sich aber einige Aussagen machen. Die Kosten einer E-Maschine werden näherungsweise etwas unterproportional der installierten Leistung sein. Das wird auch auf die Speichermedien Batterie und Supercaps zutreffen.

Hybridkonzepte, bei denen zwei E-Maschinen eingesetzt werden, werden bei gleicher elektrischer Gesamtleistung aufwändiger sein als wenn nur eine Maschine eingesetzt wird. Dazu kommen noch Aufwendungen im Getriebe, wie

	Typ		Funktion					
	mild/ mikro	voll	Start/ Stopp	Rekuperation	elektr. Fahren			
Riemenstarter-generator	✓		✓			alle		PSA
Kurbelwellenstatergenerator	✓	✓	✓			alle		GM Honda
zwischen 2 Kupplungen	✓	✓	✓	✓	✓	alle	2. Kupplung	AUDI VW
Leistungsverzweigung		✓	✓	✓	✓	spezielles Getriebe erforderlich	2. E-Maschine	Toyota GM / DC / BMW
Seriell		✓	✓	✓	✓	alle	2. E-Maschine	DC
through the road		✓	✓	✓		alle		DC Toyota
ESG	✓	✓	✓	✓	✓	Doppelkupplungsgetriebe		LuK

Bild 33 Zusammenfassung der Hybridkonzepte

zum Beispiel eine zusätzliche Kupplung mit Aktorik, oder eine elektrisch angetriebene Ölpumpe, die bei Automatikgetrieben notwendig wird, um Stopp/Start zu ermöglichen.

Eine ganze Reihe dieser Konzepte wird entweder schon in kleinen Stückzahlen in Serie eingesetzt oder befindet sich noch in der Entwicklung, wie die Referenz in der letzten Spalte in Bild 33 zeigt.

Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren eine Konsolidierungsphase eintritt und eine Konzentration auf die Erfolg versprechenden Konzepte erfolgt. Ganz entscheidend wird auch die Frage sein, ob ein Hybrid elektrisch fahren können muss oder ob die Hybridtechnologie lediglich zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs eingesetzt wird. Dies wird darüber entscheiden, ob Voll- oder Mildhybride letztendlich den Durchbruch schaffen werden.

Literatur

- [1] Kawata, K.: Future Trends for Automotive Transmission Technology, CTI-Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe Würzburg 30.11./01.12.2004
- [2] Goll, S.; Domian, H.-J.: Vom konventionellen Antriebsstrang zum Hybrid. 26. Internationales Wiener Motorensymposium 28./29.04.2005
- [3] Takimoto, M.: Toyotas Ansatz für nachhaltige Mobilität. 26. Internationales Wiener Motorensymposium 28./29.04.2005
- [4] Pels, Th.; Reitz, D.; Man, L.; Vestgard, B.: Kleiner Startergenerator – große Wirkung, 7. LuK Kolloquium Baden-Baden 11./12.04.2002 i
- [5] Tenberge, P.: Stufenloses Fahrzeuggetriebe mit elektrischer Leistungsverzweigung, VDI-Berichte 1346 (1997), 83-114
- [6] Reitz, D.; Dilzer, M.: ESG – vom Parallelschaltgetriebe zum Minimalhybrid, VDI Tagung innovative Fahrzeugantriebe Dresden 11./12.11.2004, VDI-Bericht 1852
- [7] Wagner, U.; Pollak, B.: Elektrisches Schaltgetriebe (ESG). Die konsequente Weiterentwicklung des Doppelkupplungsgetriebes zum milden Hybridsystem, CTI-Symposium Innovative Fahrzeug-Getriebe Würzburg 30.11./01.12.2004

