

Direkthybrid – eine Kombination von Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Getriebe

Directhybrid – a Combination of Combustion Engine and Electric Transmission

Dr.-Ing. Wolfgang **Steiger**, Dr.-Ing. Tobias **Böhm**, Dr.-Ing. Bernd-Guido **Schulze**
Volkswagen AG, Wolfsburg

1 Einleitung

Stufenlose Getriebe (CVT) können die Leistungs- und Momentencharakteristik eines Verbrennungsmotors am besten von allen Getriebearten den längsdynamischen Anforderungen anpassen. Flexible Fahrprogramme erfüllen sowohl bevorzugt ökonomische als auch leistungsorientierte Fahranforderungen. Wegen relativ langsamer Verstellgeschwindigkeiten der inneren Übersetzung bei Serien-CVT kommt es zu einem als „Gummibandeffekt“ empfundenen Schaltverhalten, welches durch ein quasi-stufiges Schaltprogramm gemildert werden kann. Wenn auch der Kettenwirkungsgrad mittlerweile sehr hoch ist, führen erforderliche Nebenkomponenten wie z. B. die Hydraulikpumpe vor allem im Teillastbetrieb zu Wirkungsgradeinbußen.

„Elektrische Wellen“, bestehend aus Generator, elektronischer Leistungsanpassschaltung und Elektromotor, haben den Vorteil der sehr schnellen und ebenfalls stufenlosen Leistungsanpassung. Im Schiffs- und schienengebundenen Verkehr sind sie häufig anzutreffen; für den PKW scheidet sie in der seriellen Anordnung aus vielen sofort einsichtigen Gründen wie Gewicht, Raumbedarf und Gesamtwirkungsgrad aus, obwohl schon allein durch die komplette Wandlung der mechanischen Leistung in elektrische ein ideales Aggregat für ein Hybridfahrzeug geschaffen wäre.

Die Grundanforderungen für ein elektrisches Getriebe im PKW, mindestens gleich oder günstiger im Vergleich zu mechanischen Getrieben zu sein hinsichtlich

- Bauraum
- Gewicht
- Wirkungsgrad
- Kosten
- Leistung

- Zuverlässigkeit,

lassen sich erfüllen, wenn in der Grundkonzeption die erforderlichen Bauelemente wie Wicklung, Gehäuse, Leistungselektronik usw. von E-Motor und Generator gemeinsam genutzt werden und darüber hinaus alle Möglichkeiten des modernen Elektromaschinenbaus konsequent umgesetzt werden.

2 Elektrisches Getriebe

2.1 Konzept

Der Magnetisch-Elektrische GetriebeAutomat (MEGA) von Volkswagen erfüllt alle o. g. Anforderungen. Sein Konzept ist in Abb. 1 zu erkennen.

Ein Generator- und ein Elektromotorrotor sind als permanentmagnetisch erregende Außenläufer ausgeführt. Sie sind in einem gemeinsamen Getriebegehäuse gegenüberliegend untergebracht und wirken auf eine gemeinsame Wicklung auf dem gemeinsamen Stator ein. Der Generatorrotor ist über eine Mitnehmerscheibe fest mit der Kurbelwelle verbunden; der Motorrotor steht direkt und ohne weitere schaltbare Einrichtungen mit dem Differenzial der angetriebenen Achse in Verbindung.

Der Stator mit der Wicklung ist axial verschieblich, so dass die wirksame Leiterlänge im Generator- und Motorteil im gegensätzlichen Verhältnis zueinander variiert werden kann. Auf dieser Variation der aktiven Leiterlänge in den Magnetfeldern von Generator und E-Motor beruht die Steuer- bzw. Regelbarkeit der Drehzahl- und Drehmomentenübersetzung des „MEGA“ [1].

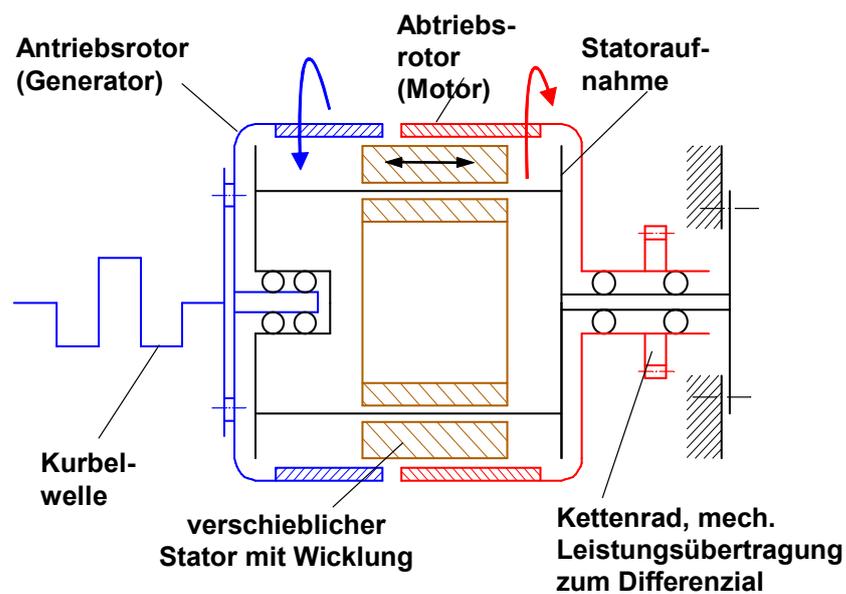


Abb. 1: Mechanisches Grundkonzept des elektrischen Getriebes

Die nichtrotierende Wicklung des Stators ist als mehrsträngige und mehrfach umlaufende Wellenwicklung ausgeführt. Bei der gewählten so genannten Einlochwicklung gibt es pro Pol und Strang nur eine Nut, die alle Leiter dieses Strangs aufnimmt. Diese Art der Wicklung garantiert ein besonders gutes Verhältnis von der Länge der aktiven Leiter im Magnetfeld zu der Länge der notwendigen Verbindungen im Wickelkopf und damit einen prinzipiell geringen ohmschen Widerstand der Wicklung.

In der abgewickelten Darstellung von je 2 Polpaaren des vielpoligen Generators und E-Motors (Abb. 2) und der Wellenwicklung wird deutlich, dass die durch Rotation der abwechselnd nord- und südpolarisierten Magnete über den einzelnen Leiterabschnitten entstehende Nutspannungen sich in derselben Richtung addieren, die durch die beiden Rotoren induzierte Gesamtspannung je nach Drehrichtung und je nach Magnetkombination vorzeichenbehaftet summiert. Die beiden Teilsysteme sind damit im Prinzip 2 geschaltete Gleichstrommaschinen.

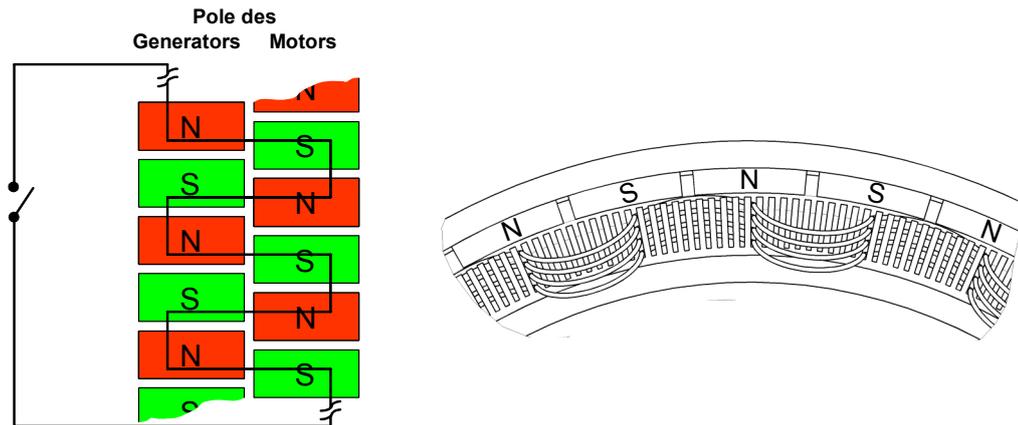


Abb. 2: Abgewinkelte Darstellung von Generator- und Motorrotor und prinzipielle Anordnung von 1 Strang der nichtrotierenden Wellenwicklung; axiale Ansicht von Stator und z. B. dem Generatorrotor

Das Magnetfeld von Generator- und Motorrotor ist im Idealfall ein Trapezfeld mit möglichst steilen Flanken und radial homogen, so dass für die induzierte Spannung U_{ind} gilt:

$$U_{ind,i} = B \cdot l_i \cdot v_i,$$

mit B Flussdichte, l wirksame Leiterlänge im Magnetfeld, v Umfangsgeschwindigkeit des Rotors, Index $i=1$: Generatorseite (Antrieb), $i=2$ Motorseite (Abtrieb).

Dreht der Generatorrotor mit der Umfangsgeschwindigkeit v_1 über der ihm zugeordneten Leiterlänge l_1 , so ergibt sich die induzierte Spannung $U_{ind,1}$. Bei geschalteter Wicklung fließt ein Strom, der die Kraft $F_i = B \cdot l_i \cdot I$ auf die Rotoren hervorruft. Dadurch dreht sich der Motorrotor und induziert auf denselben Leiterstrang bei geeigneter Magnetstellung die Gegenspannung $U_{ind,2}$. Aus der Differenz der induzierten Spannungen im Verhältnis zum ohmschen Widerstand des Leiters ergibt sich der Leiterstrom $I = \frac{\Delta U_{ind,i}}{R}$, der bauartbedingt bei diesem elektrischen Getriebe

im Generator- und Motorteil dieselbe Größe hat. Bei $U_{ind,1} = U_{ind,2}$ fließt kein Strom, was den unbelasteten Grenzfall der beiden Teilsysteme beschreibt. Im unbelasteten Fall ist dann die Drehzahlübersetzung $i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{l_2}{l_1}$. Bei Belastung stellt sich ein

Schlupf an beiden Teilsystemen ein; für die Momentenübersetzung gilt dann

$$j = \frac{M_1}{M_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Die Axialverstellung des Stators ermöglicht innere Übersetzungen von $i \leq \infty$ bis $i \geq 0$. Mit $i = \infty$ ist der Fall des Anfahrens ideal abgedeckt, deshalb braucht dieses elektrische Getriebe kein zusätzliches Anfahrerelement. Die träge Masse des Generatorrotors ersetzt die Schwungscheibe. Aus der Wicklung kann jederzeit elektrische Energie entnommen oder eingespeist werden, daher wird der Generatorrotor als Direktstarter verwendet und mit einer Anpassschaltung in der Art eines Hoch-/ Tiefsetzstellers die Lichtmaschine ersetzt. Da die gesamte mechanische Leistung in elektrische gewandelt wird, ist dieses elektrische Getriebe gleichzeitig ein ideales Aggregat für einen Hybridantrieb (Abb. 3).

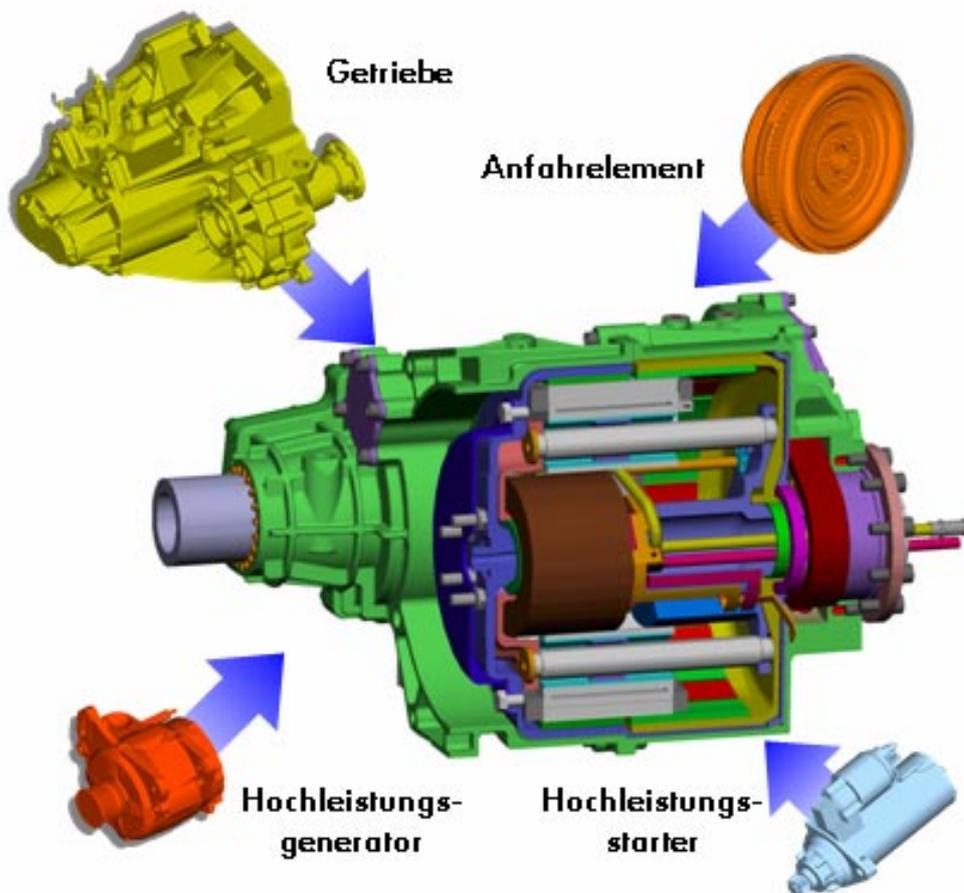


Abb. 3: Funktionen des elektrischen Getriebes „MEGA“

Die axiale Verstellung des Stators erlaubt auch gleichzeitig eine kontinuierliche Veränderung der charakteristischen Eigenschaften der Teilsysteme Generator und Elektromotor durch kontinuierliche Anpassung der elektrischen Maschinenkonstante, was sich günstig auf das benötigte Maschinenvolumen und insbesondere auf den Gesamtwirkungsgrad auswirkt. Die mechanische Leistung des Verbrennungsmotors $N = M \cdot \omega$ mit getrennten elektrischen Maschinen und einer Leistungsanpassschaltung zu wandeln hieße, 2 Maschinen für die Eckleistung $N_{\max} = M_{\max} \cdot \omega_{\max}$ zu

installieren. Im Fall des elektrischen Getriebes wird durch Verstellung des Stators auf einfachste Art aus einer Hochdrehmomentmaschine eine für hohe Drehzahlen ausgelegte und umgekehrt. Dadurch wird es möglich, die Leistung des Verbrennungsmotors allein mit elektrischer Energie und ohne Leistungsverzweigung oder anderer mechanischer Übertragungsglieder an die Antriebsachse zu übertragen, ohne auf die Vorteile der elektrischen Leistungsanpassung zu verzichten.

2.2 Elektromechanische Grundkonstruktion

Wie in Abb. 2 zu sehen, können die beiden Rotoren sich bei kurzgeschlossener Wicklung nur dann in die selbe Richtung drehen, wenn über einem Leiter zwei ungleichnamige Magnetpole stehen; bei gleichnamigen Magnetpolen drehen sich die Rotoren gegeneinander. Je nach erwünschter Drehrichtung des Motorrotors muss eine sensorgesteuerte elektronische Schaltung (Abschnitt 2.3) die „richtige“ Stellung der Magnete ermitteln und die Wicklung kurzschließen. Nur in dieser Zeit fließt in diesem Strang Strom und nur in dieser Zeit kann ein Strang zur Drehmomentenübertragung beitragen. Da die Wahrscheinlichkeit für eine geeignete Magnetpaarung genau 0,5 ist, ist die maximal mögliche zeitliche Einschaltdauer eines Strangs $ED \leq 50\%$. Zur Vermeidung von ungleichmäßigem Lauf resultiert daraus die Forderung nach Aufteilung der Wicklung in möglichst viele parallel arbeitende Stränge. Ein trapezförmiges Magnetfeld mit möglichst steilen Flanken und möglichst konstanter Flussdichte B im Luftspalt sichern den kleinstmöglichen Strom I im Verhältnis zum übertragenen Moment. Aus Gewichtsgründen (Dicke des magnetischen Rückschlusses in den Rotoren) wird eine möglichst hohe Polpaarzahl angestrebt und wegen des Spannungsabfalls in den Halbleitern als Schaltelement eine möglichst hohe Betriebsspannung. Steile Stromflanken und die steilen Flanken beim Wechsel des Magnetfelds bewirken zusätzlich zu der bewusst hoch gewählten Grundfrequenz verlustträchtige Oberwellen. Dem wird durch einen Aufbau des Stators in feiner Blechung und mit hochsiliziertem Elektroblech, gelitzter Wicklung und einem wirbelstromarmen Aufbau der Permanentmagnete begegnet. Zur Vermeidung ohmscher Verluste ist der Nutfüllgrad mit Kupfer mit ca. 80 % an der oberen Grenze des derzeit technisch Machbaren. Die entstehenden Wirbelstrom- und Stromwärmeverluste werden mit einer Wasserkühlung abgeführt. Mäandrierende Kühlkanäle sind in das Innere des Stators integriert [2] und verbinden eine maximale Wärmetauscherfläche mit der Forderung nach möglichst geringem Wärmewiderstand zur Wärmequelle Wicklung durch kurze Wege für die Wärmeleitung im Blechpaket.

Die Auslegung des magnetischen Kreises, der Zahn- und Nutgeometrie und der wirbelstromarmen Wicklung kann wegen der gleichzeitigen Induktion zweier Quellen auf einen Strang und wegen der nicht vermeidbaren transformatorischen Kopplung der einzelnen Stränge nicht mit Standard-Software errechnet werden. Ein eigens erstelltes spezielles dreidimensionales transientes Magnetfeldberechnungsprogramm wurde hier zur Auslegung und zur Verlustanalyse benutzt.

2.3 Leistungselektronik

Die Anforderungen an die elektronische Schaltung zum Öffnen und Schließen der einzelnen Stränge (vgl. Abb. 2) sind von folgenden Überlegungen geprägt:

- Der Strangstrom muss je nach Kombination der „richtigen“ Magnetstellung in beide Richtungen schaltbar sein. Praktisch sofort nach Erreichen der Einschaltbedingung muss er in voller Höhe fließen; die Induktivität des Stators würde dies bei einer Grundfrequenz von bis zu 2 KHz allein durch die Spannungsinduktion nicht erlauben.
- Der Strom im Strang wird durch die Differenz der Induktionsspannungen von Generator und Elektromotor getrieben; im abgeschalteten Zustand wirkt auf die Schalter jedoch die Summe der Induktionsspannungen, die 1000 V und mehr betragen kann.
- Die in der Induktivität gespeicherte Energie muss beim geforderten schnellen Abschalten mit noch für die Nutisolation und für die Halbleiter erträglichen Spannungsspitzen zwischengespeichert werden. Beim Wiedereinschalten eines Strangs wird diese zwischengespeicherte Energie zum schnellen Stromaufbau oberhalb der Eigenfrequenz verwendet. Als Zwischenspeicher eignet sich am besten ein Folienkondensator genügender Kapazität, Stromtragfähigkeit und Spannungsfestigkeit.
- Wegen der durch die Induktivität der Zuleitungen zwischen Strang, Leistungsschalter und Zwischenspeicher bedingten zusätzlichen Spannungsspitzen ist ein ortsnaher Aufbau der Leistungsschaltetelektronik zwingend erforderlich. Das bedeutet, dass die Leistungsschaltung und der Kondensator in das Getriebegehäuse integriert werden müssen, was gleichzeitig mit einem Zwang zu deren Miniaturisierung verbunden ist.
- Der Einbau in das Getriebegehäuse bedeutet auch, die Ausführung der Leistungselektronik den rauen Bedingungen im Motorraum anzupassen. Insbesondere heißt das, dass nur wassergekühlte Schaltmodule infrage kommen.
- Die Anforderungen insgesamt können nicht mit Standardmodulen erfüllt werden; eine spezielle Entwicklung ist nötig.

Der (idealisierte) Spannungs- und Stromverlauf in einem Strang ist in Abb. 4 schematisch dargestellt:

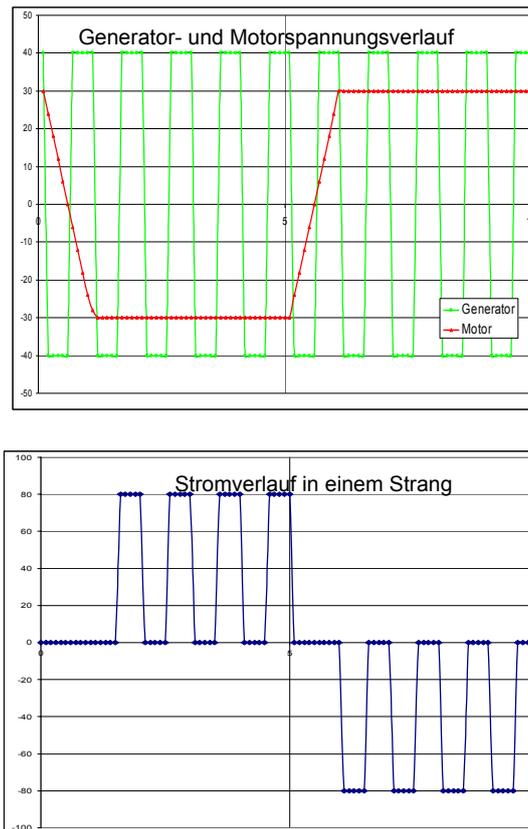


Abb. 4: Prinzipieller Spannungs- und Stromverlauf eines Stranges

In Abb. 4 ist angenommen, dass der Generator mit einer erheblich höheren Drehzahl gegenüber dem Elektromotor dreht. Die „richtigen“ Polpaarungen sind genau in dem Zustand, wenn die Induktionsspannungen ein entgegengesetztes Vorzeichen haben. Mit der Schaltung nach Abb. 5 wird erreicht, dass der Strom wie im unteren Diagramm prinzipiell dargestellt fließt:

Die Schaltung ist mit 4 IGBT's in einer Brückenschaltung ausgeführt. Die IGBT's befinden sich auf einem gemeinsamen wassergekühlten Kupferträger und werden von einer Treiberplatine potentialfrei angesteuert. Für jeden Strang wird eine solche Brückenschaltung benötigt; bei der verwirklichten vielsträngigen Maschine sind die einzelnen Brücken parallel geschaltet in Bezug auf den gemeinsamen Kondensator als Zwischenspeicher für die im Strang enthaltene Energie [3].

Beim Einschalten des Strangs wird zunächst je nach erforderlicher Stromrichtung über einen der beiden Pulstransistoren IGBT1 oder IGBT2 und entsprechendem geschaltetem Transistor in der Diagonale ein kurzer Stromimpuls aus dem hoch aufgeladenen Kondensator in die Wicklung eingespeist, wodurch die stromaufbauverzögernde Wirkung der Induktivität praktisch überwunden wird. Anschließend bleibt der entsprechende Diagonaltransistor IGBT3 oder IGBT4 geschaltet und der Strom stellt sich je nach der Höhe der Differenz der in den Strang induzierten Spannung der beiden Rotoren ein. Verlässt ein Magnetpol den jeweiligen Strang, wird der Diagonaltransistor abgeschaltet. Die in der Induktivität gespeicherte Energie

$E = I^2 \cdot \frac{L}{2}$ wird, getrieben durch die Spannungserhöhung, in den Kondensator geladen, wobei nun gilt $E = U^2 \cdot \frac{C}{2}$. Beim Wiedereinschalten desselben Strangs oder eines anderen Strangs steht diese Energie zur Verfügung.

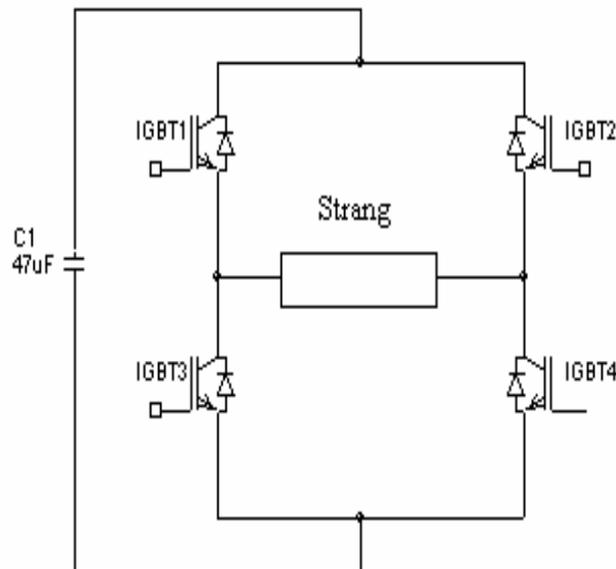


Abb. 5: Prinzipieller Aufbau der Leistungsschaltelektronik für 1 Strang

Bei der Dimensionierung der IGBT's kann berücksichtigt werden, dass nur sehr geringe Schaltverluste wegen der angewandten Blockstromtechnik zu erwarten sind; im Gegensatz zu einer Sinusstromtechnik überwiegen hier die Durchlassverluste. Der Effektivstrom in den beiden hauptsächlich stromführenden IGBT's 3 und 4 ist zudem wegen der maximalen Einschaltdauer $ED \leq 50\%$ und wegen wechselseitigen Schaltens wesentlich geringer gegenüber dem zu bewältigenden Spitzenstrom, was in Verbindung mit einer guten Wärmeabfuhr zu einer kompakten Dimensionierung führt. In Abb. 6 ist ein wassergekühltes Schaltmodul für das Schalten von 2 Strängen abgebildet, das 2 H-Brücken entsprechend Abb. 5 beinhaltet.

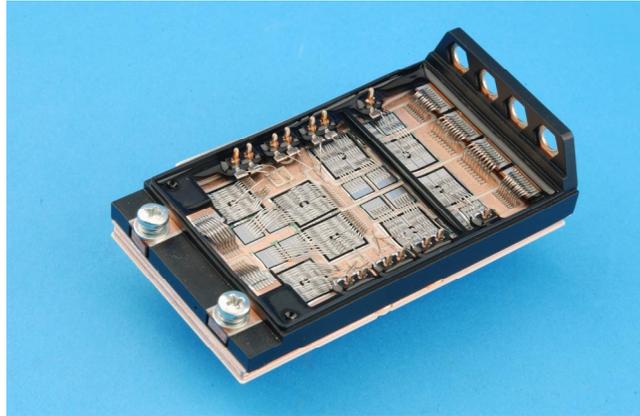


Abb. 6: Leistungsschaltmodul mit 2 IGBT – H-Brücken für Schalten von 2 Strängen

2.4 Betriebsverhalten

Wie oben erwähnt, sind die beiden elektrischen Teilmaschinen wegen der permanenten Anpassung der elektrischem Maschinenkonstante nicht für die installierte Eckleistung, sondern nur an die praktisch vorkommenden Kombinationen der Lastfälle anzupassen.

Der für diese Art eines elektrischen Getriebes maximal benötigte Strom ist dem Prinzipdiagramm in Abb. 7 zu entnehmen.

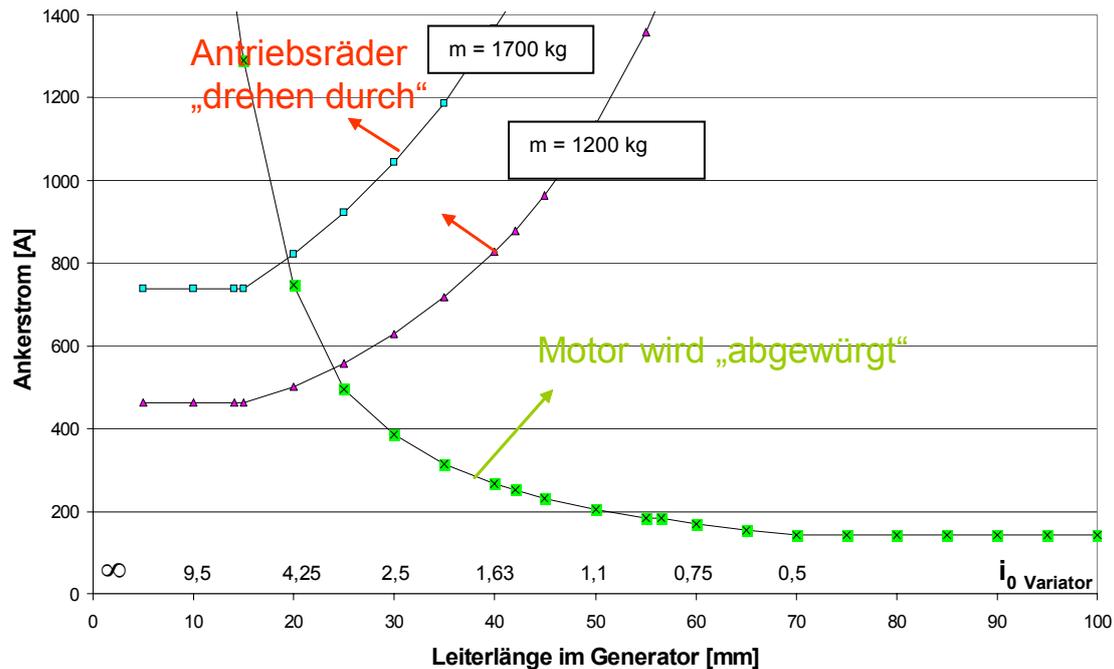


Abb. 7: Prinzipiell benötigter Summen-Ankerstrom beim elektrischen Getriebe „MEGA“ für einen PKW mit 75 KW – Motor und ca. 1200kg und 1700 kg Masse

Es wird für die Auslegung des Getriebes an ein bestimmtes Fahrzeug angenommen, dass der Verbrennungsmotor nur ein maximales Moment abgeben kann; bei einer höheren Momentenanforderung würde er zum Stillstand gezwungen („abgewürgt“) werden. Ebenso kann die Antriebsachse wegen der begrenzten Reibkraft zwischen Reifen und Untergrund auch nur ein maximal mögliches Moment in Abhängigkeit der Achslast übertragen. Im elektrischen Getriebe ist dieses Moment generell

$$M = B \cdot I \cdot l_i \cdot r \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} I \quad \text{gesamter Ankerstrom,} \\ l_i \quad \text{wirksame Leiterlänge im Generator bzw. E-Motor,} \\ r \quad \text{Luftspaltradius,} \\ B \quad \text{Flussdichte im Luftspalt.} \end{array}$$

Bei einer wirksamen Leiterlänge l_1 im Generator von 0 mm wäre theoretisch ein gegen unendlich großer Strom nötig, um das Motormoment in das Getriebe einzuleiten; mit größer werdender wirksamer Leiterlänge wird der zum „Abwürgen“ benötigte Strom immer kleiner. Die Leiterlänge im Generator- und Elektromotorteil verhalten sich jedoch beim Verschieben des Stators gegenläufig: $l_2 = l_{ges.} - l_1$. Der Strombedarf für den Grenzfall „schlupfende Antriebsachse“ ist bei kleinster aktiver Leiterlänge im Generatorteil am kleinsten und wird größer mit größerer aktiver Leiterlänge. Berücksichtigt man beide Effekte, ergibt sich in Abhängigkeit der Achslast eine Grenzkurve für den maximal im Anker benötigten und auch maximal möglichen Strom. Bei einer gewählten Auslegung entsprechend Abb. 7 wird der maximale Strom bei einer Variatorübersetzung $i_{\text{Variator}} \approx 3 \dots 4$ anfallen, was bei vergleichbaren Schaltgetrieben

einem 1. Fahrgang entspricht. Mit kleineren inneren Übersetzungen und besonders bei Übersetzungen $i_{\text{Variator}} < 1$ – das sind die Höchstleistungs- und Hochgeschwindigkeitsfahrbereiche – wird der Summenstrombedarf zur Momentenübertragung praktisch vernachlässigbar klein. Der in einem Strang fließende Strom entspricht dem Summenstrom geteilt durch die Anzahl der Stränge und bei angenommenem Rechteckstrom geteilt durch die relative mittlere Einschaltdauer ED eines Strangs. Praktisch heißt das, dass in einem Strang Ströme bis zu $\hat{I} \leq 200A$ geschaltet werden müssen. Falls thermische Gründe eine Dauerbelastung in diesem Bereich verbieten, kann die Anforderung steuerungstechnisch ohne praktische Einbuße an Fahrleistung gemildert werden.

2.5 Wirkungsgrad

Die Anpassung der elektrischen Maschinenkonstante hat dadurch, dass beide Teilmaschinen immer in der Nähe ihrer optimalen Auslegung betrieben werden, entscheidenden Anteil an der Höhe und der Art der entstehenden Verluste und damit auf den erzielbaren Getriebewirkungsgrad.

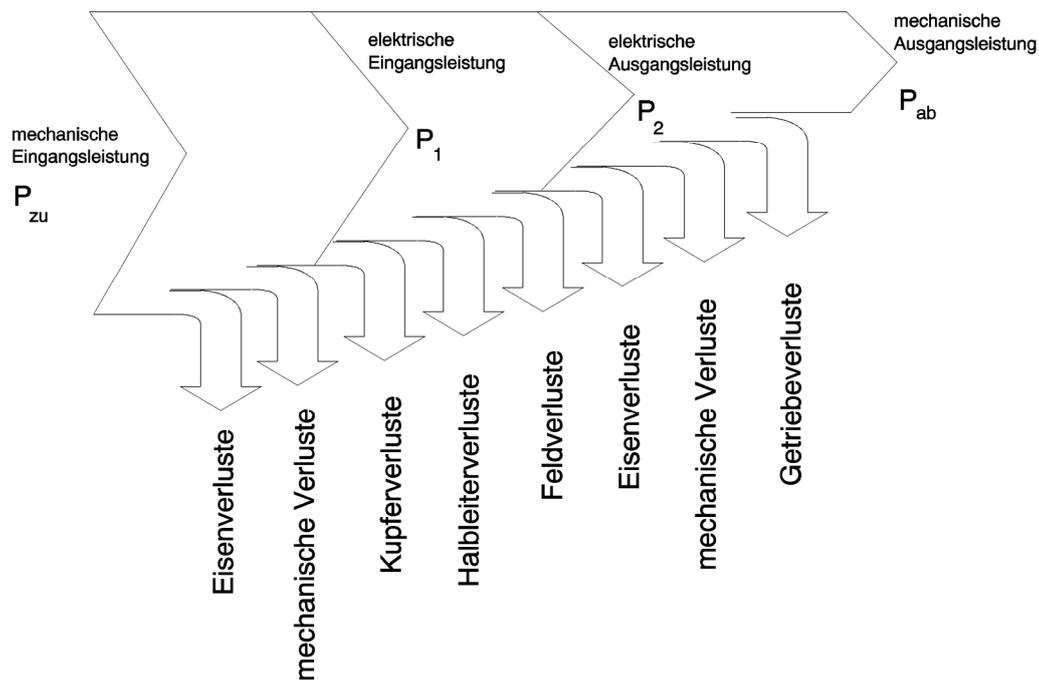


Abb. 8: Verlustquellen im elektrischen Getriebe

Dadurch, dass in dem elektrischen Getriebe mechanische und elektrische Verluste berücksichtigt werden müssen, ist ein anderer Typ von Kennfeld zu erwarten als bei einem mechanischen Getriebe. Dem Verlustpfeil in Abb. 8 folgend entstehen durch die Rotation des Antriebsrotors (Generatorseite) über dem Stator sowohl mechanische Verluste – Lagerreibung und Lüfterverluste – als auch Hystereseverluste durch Ummagnetisierung des Eisenpakets im Stator. Die reine Wandlung von mechani-

scher in elektrische Leistung erfolgt physikalisch verlustfrei, jedoch sind für den Energietransport im Kupferleiter die ohmschen Verluste und für das Schalten des Stromkreises die Halbleiterverluste zu beachten. Durch die fließenden und die geschalteten Ströme gibt es eine Ankerrückwirkung, die ihrerseits zu Feldverlusten im Statorpaket und insbesondere in den Rotoren führen. Die Leistungsanpassung selbst durch die unterschiedliche elektromagnetische Einkopplung der Rotoren ist wieder physikalisch verlustfrei, ebenso wie die Rückwandlung der elektrischen in mechanische Leistung. Jedoch sind auch beim Abtriebsrotor (E-Motorseite) mechanische Verluste durch Lagerreibung und Lüfterverluste zu berücksichtigen. Bei dem bei Volkswagen ausgeführten elektrischen Getriebe ist ein Differential mit einer Übersetzungsstufe nachgeschaltet, was in obigem Verlustpfeil mit „Getriebeverluste“ bezeichnet ist.

Mit experimentell abgesicherten Berechnungen der elektromagnetischen Verluste durch ein dreidimensionales transientes Magnetfeldberechnungsprogramm, eingebettet in ein Simulationsprogramm für das elektrische Getriebe, lässt sich das zu erwartende Wirkungsgradkennfeld ermitteln.

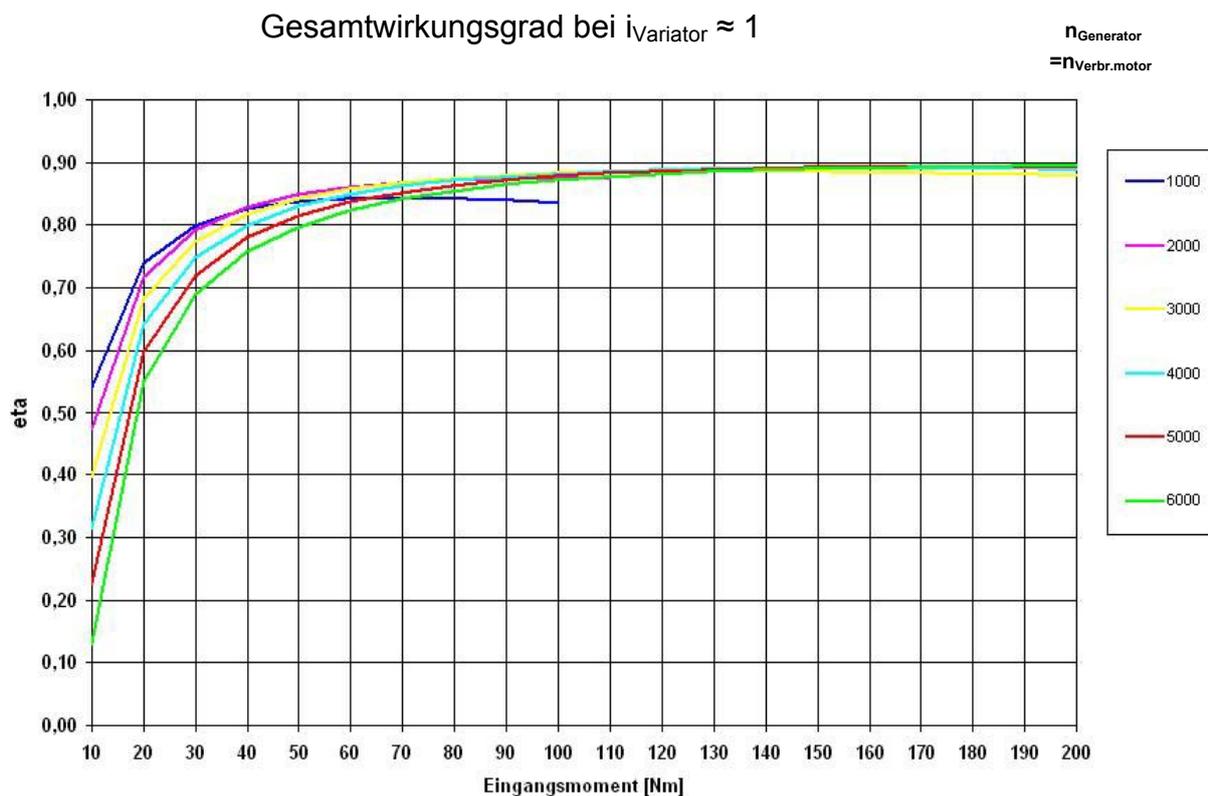


Abb. 9: Wirkungsgrad des elektrischen Getriebes bei Variatorübersetzung $i \approx 1$ in Abhängigkeit von der Generatorzahl

In Abb. 9 ist exemplarisch der errechnete Verlauf des Getriebewirkungsgrads $\eta = \frac{N_1}{N_2}$ (mechanische und elektrische Verluste) über dem Eingangsmoment mit dem Parameter Eingangsdrehzahl dargestellt. Die Berechnung ist durch experimen-

telle Überprüfung der einzelnen Verlustquellen verifiziert. Es fällt auf, dass im Unterschied zum Wirkungsgradverlauf bei mechanischen Getrieben hier der Wirkungsgrad bei wachsendem Eingangsmoment und geringer Eingangsdrehzahl abfällt. Wird die Leistung bei höherer Drehzahl – ab 2000 U/min – erzielt, ist ein Wirkungsgradabfall bis zum maximalen Drehmoment und zur maximalen Leistung nicht mehr feststellbar. Ebenso fällt der im Vergleich zu mechanischen Getrieben bessere Teillastwirkungsgrad auf. Das elektrische Getriebe hat z. B. keine eingangsseitigen Simmerringe, keine Reibung in Synchronringen und auch keine eingangsseitigen Ölplanschverluste, wodurch die Unterschiede schon hinreichend geklärt sind.

Die einzelnen Verlustquellen variieren sehr stark bei verschiedenen Lastpunkten, wie in Abb. 10 zu sehen ist.

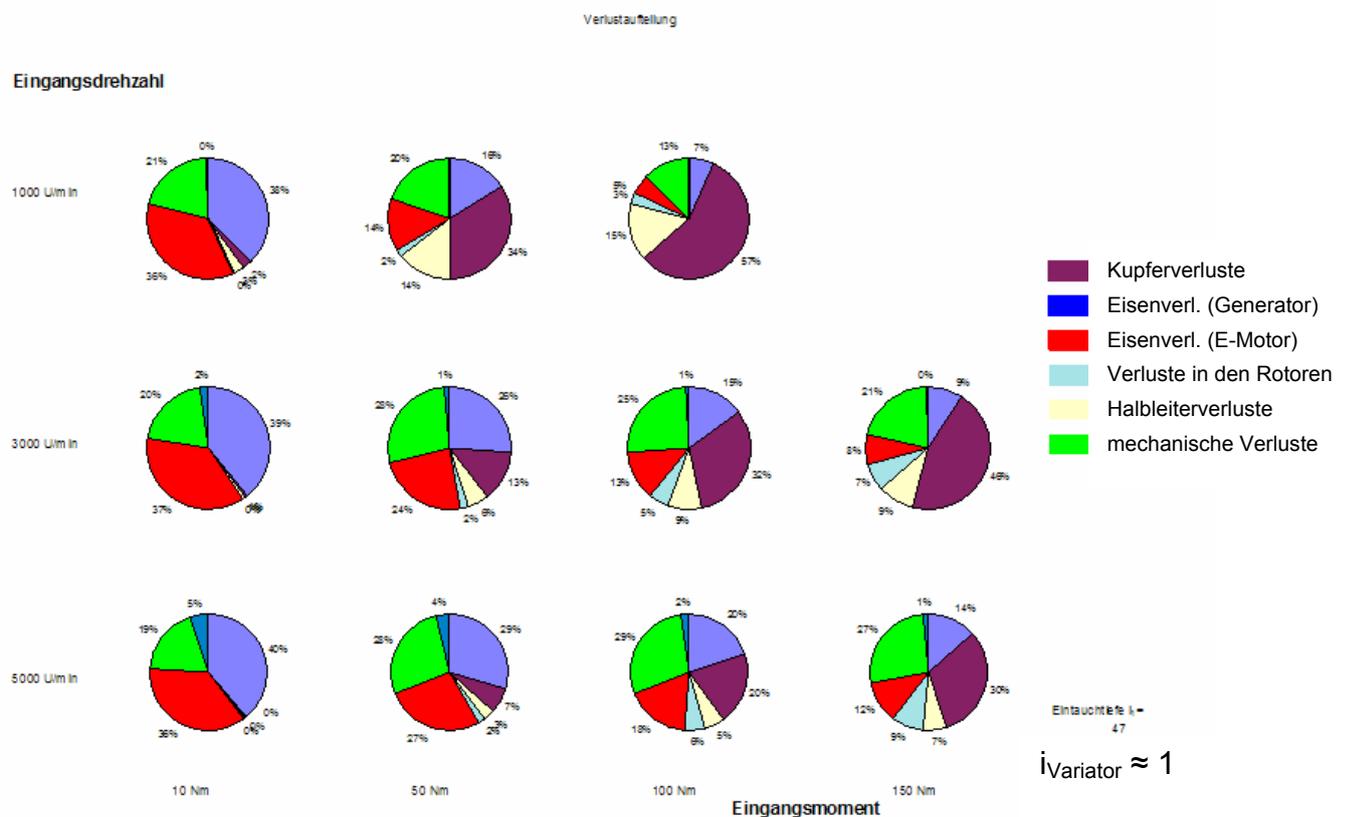


Abb. 10: Relative Verlustaufteilung in Abhängigkeit von Eingangsmoment und Eingangsdrehzahl

Unabhängig von der Höhe des Wirkungsgrads sind hier die relativen Verlustanteile quantifiziert. Nur bei niedrigen Drehzahlen und großem Eingangsmoment dominieren die Wicklungs-Kupferverluste; die rein mechanischen Verluste sind dagegen meist ungefähr $\frac{1}{4}$ der Gesamtverluste. Die eingangs- und ausgangsseitigen Eisenverluste entstehen fast ausschließlich nur durch Rotation der permanenterregenden Rotoren über dem Blechpaket, sind daher nur gering vom Strom beeinflusst und lassen sich bevorzugt durch Veränderung der Blechqualität oder durch Wahl eines anderen Frequenzbereichs des elektrischen Getriebes verringern. Halbleiterverluste sind in

der Bilanz wegen der Wahl einer hohen Betriebsspannung nur unwesentlich an den Gesamtverlusten beteiligt.

Die guten Wirkungsgrade zeigen sich auch in Rollentests. So wurde der Treibstoffverbrauch eines mit dem elektrischen Getriebes ausgerüsteten Fahrzeugs mit einem 75 KW – Otto – Motor im MVEG – kalt - Test mit ca. 10% weniger gegenüber einem gleichen Fahrzeug mit 5-Stufen-Handschaftgetriebe gemessen. Zum Teil ist der Minderverbrauch auf die bessere stufenlose Anpassung des Motors an die Längsdynamik zu erklären, zum anderen aber auch auf die geringeren Verluste des elektrischen Getriebes im Teillastbereich.

2.6 Vergleich mit elektrischer Welle in serieller Anordnung mit separaten E-Maschinen

Elektrische Maschinen – gleich ob Generator oder Elektromotor – haben einen engen Bereich des optimalen Wirkungsgrads; dieser stellt sich im Drehmoment-Drehzahl-Kennfeld wie eine Insel dar. Bei Abweichung von diesem optimalen Bereich sinkt der Wirkungsgrad ab. Bei der Auslegung einer elektrischen Maschine kann man sich wirkungsgradtechnisch entscheiden, ob die Maschine eher für hohe Drehzahlen oder eher für hohe Drehmomente geeignet ist. Für eine elektrische Maschine als Fahrzeugantrieb kann kein Kompromiss gefunden werden, da die Motorleistung entweder für hohes Antriebsmoment (Anfahren aus Drehzahl $n_2 = 0$) oder für hohe Antriebsdrehzahlen verwendet wird. Der Generator als Wandler von mechanischer Energie in elektrische muss zwar nicht den extremen Drehzahlbereich wie der Fahrzeugantriebsmotor abdecken, aber auch hier ist meist das Drehzahlband $1000 \text{ U/min} < n_1 < 6000 \text{ U/min}$ abzudecken; bei einer Auslegung des Antriebsmotors als angenäherte Konstantleistungsquelle sinkt auch hier das Drehmoment mit der Drehzahl. Getrennte elektrische Maschinen als elektrische Welle können daher nur einen kleinen Bereich mit einem akzeptablen Wirkungsgrad überdecken. Verschiedentlich wird versucht, diesen prinzipbedingten Nachteil von E-Maschinen durch eine Leistungsverzweigung im elektrischen Getriebe auszugleichen. Das kann jedoch nur in dem Maß gelingen, wie strombedingte Verluste die Abweichung vom optimalen Wirkungsgrad bewirken; die nicht strombedingten Verluste sind wie oben gezeigt in vielen Betriebsbereichen dominant und müssen daher ständig auch bei einer Leistungsverzweigung überwunden werden.

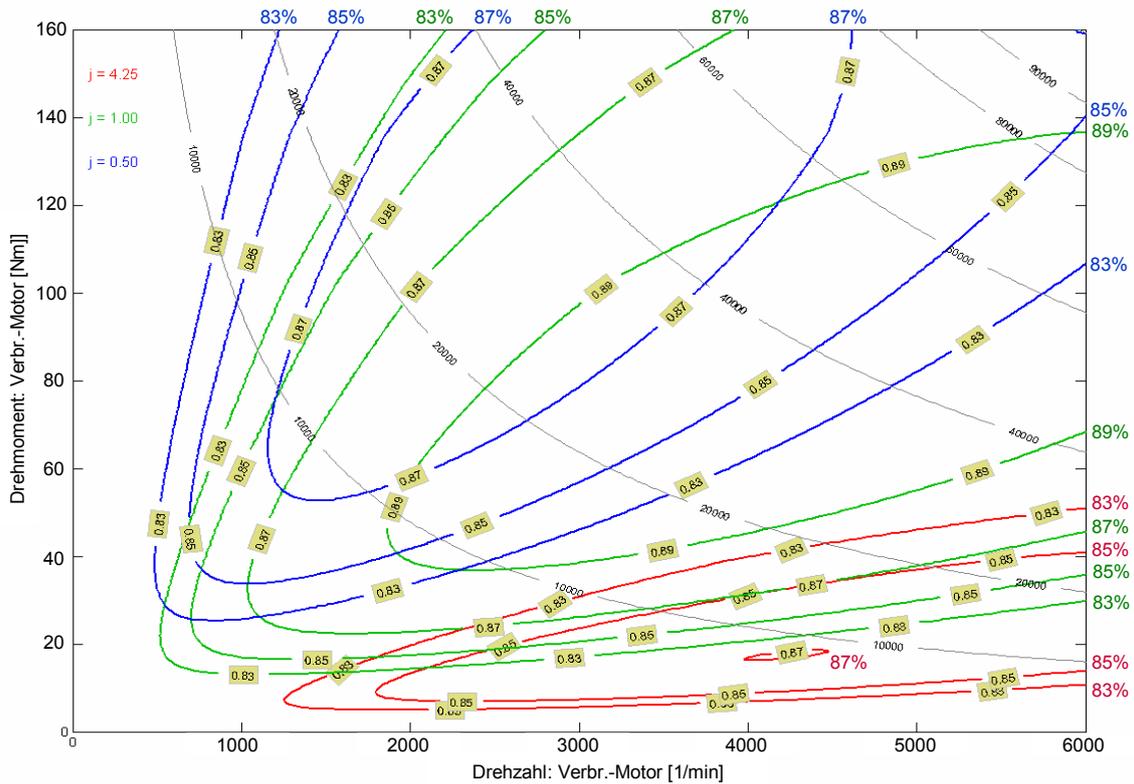


Abb. 11: Gesamtwirkungsgrad „MEGA“ bei ausgewählten Variator-Übersetzungen

Im elektrischen Getriebe „MEGA“ ist jedoch der Bereich des optimalen Wirkungsgrads wegen der Statorverstellung veränderbar, womit, wie oben erwähnt, aus einer für hohe Drehzahlen optimierten Maschine eine für hohe Drehmomente optimierte entsteht und umgekehrt. Mit diesem konzeptionellen Vorteil des MEGA ist ein Wirkungsgradkennfeld entsprechend Abb. 11 erreicht, in dem praktisch der gesamte relevante Bereich der erforderlichen Leistungsanpassung des Verbrennungsmotors mit einem Wirkungsgrad $\eta_{ges} > 80\%$ möglich ist.

3 Hybridantrieb mit dem elektrischen Getriebe

Die Forderung nach Ausschöpfen aller Möglichkeiten zur Energie- und Schadstoffeinsparung beflügelt zurzeit die Entwicklung von Hybridtechnik im Antriebsstrang.

Verschiedene Konzepte – Mild-Hybrid oder Full-Hybrid – werden in Konkurrenz zueinander entwickelt. Der zunächst favorisierte reine Serienhybrid scheitert an den Auswirkungen der Wirkungsgradkette. Serien – oder Entwicklungsreife haben vor allem ein leistungsverzweigter serieller Hybrid und ein 1-Wellen-Parallel-Hybrid. Eine Antwort des Marktes steht noch offen.

Die erheblichen Mehrkosten für einen Hybridantrieb wird der Markt nur bei greifbaren Kundenvorteilen oder bei Einführung gesetzlicher Vorgaben akzeptieren. Verbrauchs- und Emissionsvorteile sind vor allem in stadtverkehrähnlichen Betriebs-

zuständen zu erwarten; bei Ausschöpfen der vollen verbrennungsmotorischen Leistung ist eher ein Mehrverbrauch zu erwarten. Ein vordergründig greifbarer Kundenvorteil ist z. B. eine wirkungsvolle Boost-Funktion.

Ein Hybridsystem sollte also mindestens abdecken:

- Start – Stopp
- Boost-Funktion
- rekuperieren
- Lastpunkt-Beeinflussung des Verbrennungsmotors
- „segeln“ (Automatisches Start-Stopp beim Fahren)
- elektromotorisches (Kurzstrecken-) fahren
- deutliche Verbrauchsabsenkung (nicht nur im Fahrzyklus)

3.1 Konzept

Das elektrische Getriebe „MEGA“ ist aufgrund der Tatsache, dass die gesamte mechanische Leistung in elektrische gewandelt wird und dass beide elektrische Maschinen wegen der Anpassung der elektrischen Maschinenkonstante in der Nähe ihres optimalen Wirkungsgrads betrieben werden, ein ideales Aggregat für einen Hybridantrieb. Die hybridischen Zusatzfunktionen sind hier bei einmal gewählter Auslegung des elektrischen Getriebes nur noch von der Leistung und der Kapazität der Batterie abhängig.

Das Konzept des MEGA-Hybrid ist im Aufbau einem Serienhybrid ähnlich; wegen der gravierenden Unterschiede in der Art der elektrischen Welle und der Ein- und Auskopplung der elektrischen Energie wird die Bezeichnung „Direkthybrid“ gewählt.

In Abb. 12 ist das Grundkonzept „MEGA-Direkthybrid“ dem Konzept Ein-Wellen-Parallel-Hybrid gegenübergestellt.

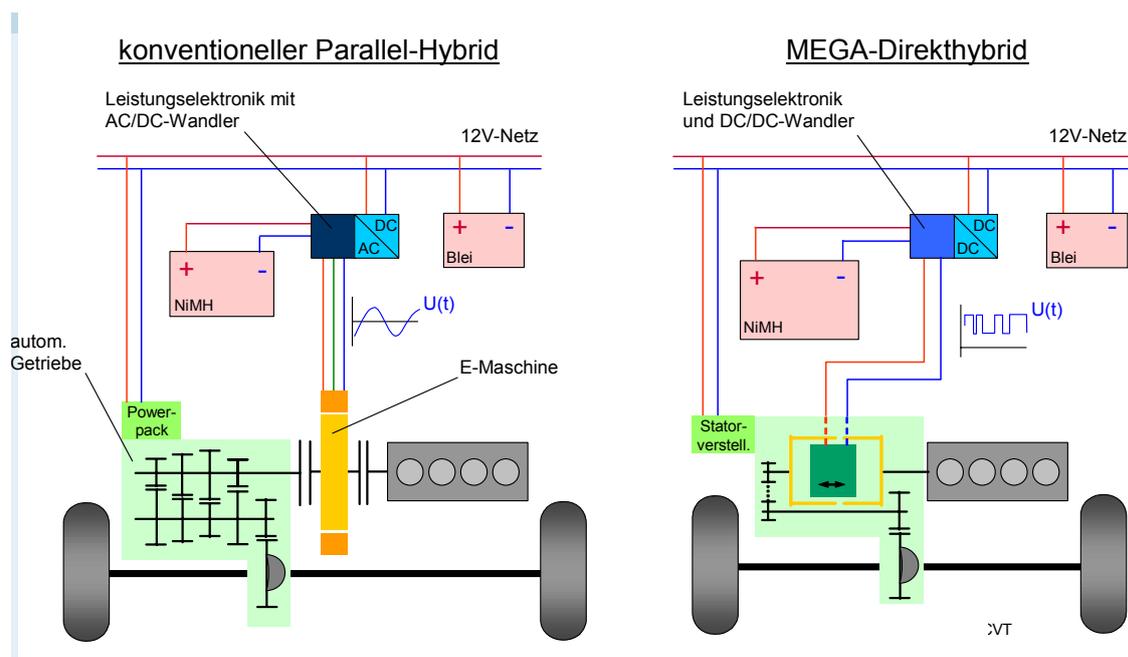


Abb. 12: Konzeptvergleich Einwellen-Parallel-Hybrid und MEGA Direkthybrid

Eine sinnvolle Anordnung für einen Einwellen-Parallelhybrid ist das Zwischenschalten einer leistungsstarken elektrischen Maschine zwischen Kurbelwelle und Eingangswelle eines automatisch geschalteten Stufenwechselgetriebes. Die geregelte Trennkupplung zwischen E-Motor und Getriebe übernimmt das Anfahren und ermöglicht durch schlupfbehaftete Momentenübertragung ein komfortables Wiederstarten des Verbrennungsmotors. Mit der ebenfalls geregelten Trennkupplung zwischen E-Motor und Verbrennungsmotor werden die hybridischen Funktionen dargestellt. Die E-Maschine arbeitet wahlweise als Motor oder Generator. Mit einer Leistungselektronik (Frequenz- und Spannungswandler-Schaltung) werden sowohl die Hybrid-Batterie als auch das Bordnetz mit Energie versorgt. Der zusätzlich benötigte, aber meist nicht zur Verfügung stehende Bauraum schränkt die Größe des E-Motors und damit dessen Leistung ein. Permanenterregte Synchronmotoren finden wegen ihres günstigen spezifischen Volumens und des günstigen Leistungsgewichts bevorzugt Verwendung. Unabhängig von ihrem Einsatz als Hybridaggregat müssen aber zumindest die Ummagnetisierungsverluste immer überwunden werden. Die Maschine arbeitet synchron mit der Kurbelwellendrehzahl; eine aktive Feldschwächung ist daher für den Betrieb im oberen Drehzahlbereich unerlässlich.

Das elektrische Getriebe „MEGA“ ist dagegen schon in seiner Grundkonzeption ohne Änderungen am Aggregat hybridtauglich. Die hybridischen Zusatzfunktionen werden durch Zufügen eines einfachen DC/DC Wandlers und durch Zuschalten einer Hybridbatterie beliebiger Größe dargestellt. Die elektrische Fahrleistung und die Reichweite werden ausschließlich durch die Art und Kapazität der Hybridbatterie bestimmt. Die permanente Anpassung der elektrischen Maschinenkonstante erlaubt auch einen optimalen rein elektrischen Fahrbetrieb ohne aktive Feldschwächung. Aus der Einschränkung, dass im Generator- und Motorteil immer derselbe Strom fließt, erwächst für den Betrieb des MEGA als Hybridaggregat kein Nachteil.

In Abb. 13 sind schematisch der Energiefluss und die bevorzugte Statorstellung beim Hybridbetrieb dargestellt.

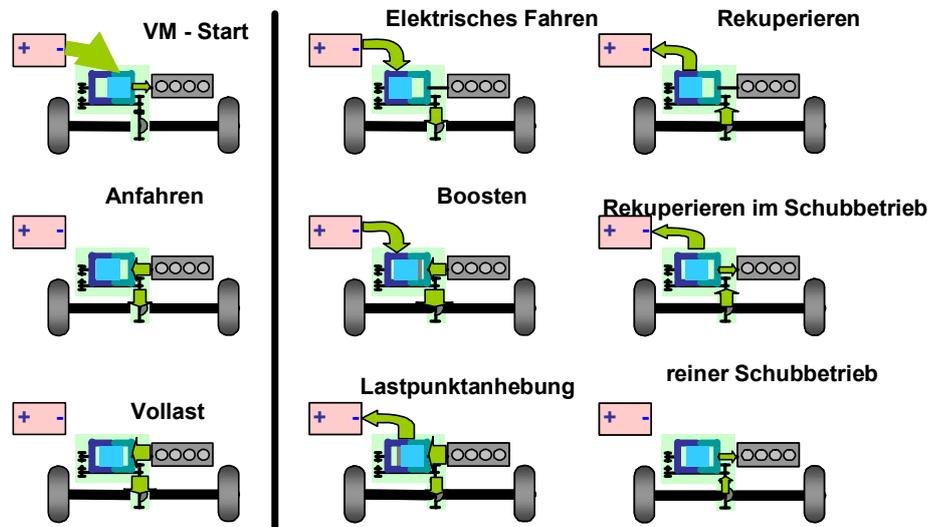


Abb. 13: Energieflüsse und Statorstellung bei MEGA als Direkthybrid

Mit dem elektrischen Getriebe sind alle geforderten Hybridfunktionen mit hohem Komfort und mit nur geringem Zusatzaufwand dargestellt. Lediglich der komfortable Wiederstart des Verbrennungsmotors bei fahrendem Fahrzeug ohne Momenteneinbruch erfordert einen erhöhten Regelaufwand, was aber dank der schnellen Statorverstellung und einer Zustandsregelung realisierbar ist.

Die DC/DC – Wandlerschaltung ist hier einfachst als einphasige H-Brücke aufgebaut (Abb. 14).

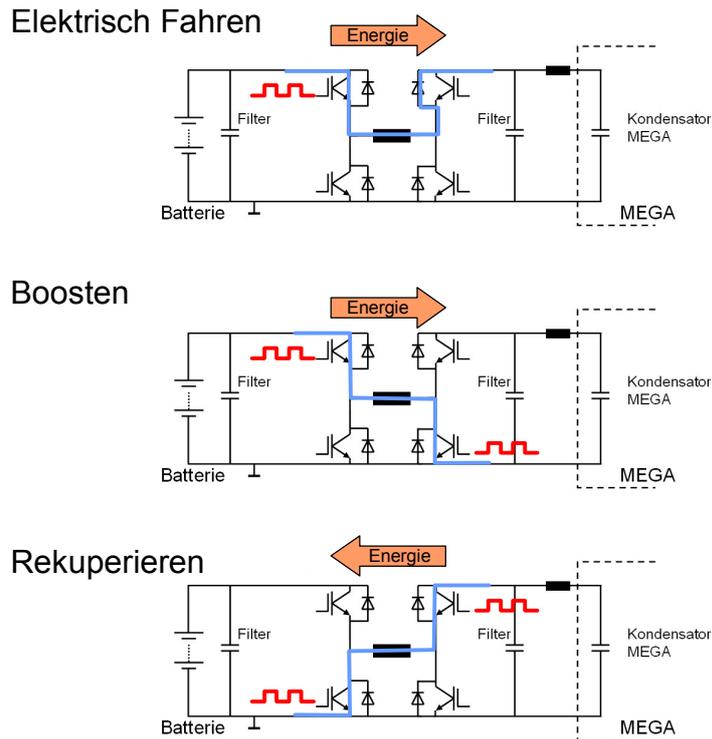


Abb. 14: Schaltung des DC/DC-Wandlers zwischen elektrischem Getriebe und Hybridbatterie

Die Leistungsanpassschaltung wird an den Energie-Zwischenspeicher-Kondensator (s. Abb. 5) angeschlossen und ermöglicht durch Anpulsen der entsprechenden IGBT's der H-Brücke die Richtung des Energieflusses zu wählen. Gleichzeitig wird mit ihr auch die Spannung zwischen dem elektrischem Getriebe und der in der Spannungslage damit beliebig wählbaren Hybridbatterie angepasst.

Exemplarisch für die möglichen Fahrzustände ist in Abb. 15 das Rekuperieren mit einer Leistung von beispielsweise 12 KW im Fahrdiagramm dargestellt. Beim Rekuperieren wird der Abtrieb – Elektromotorteil – als Generator geschaltet.

Rekuperation – Rückspeisen über DC/DC – Wandler zur Traktionsbatt.

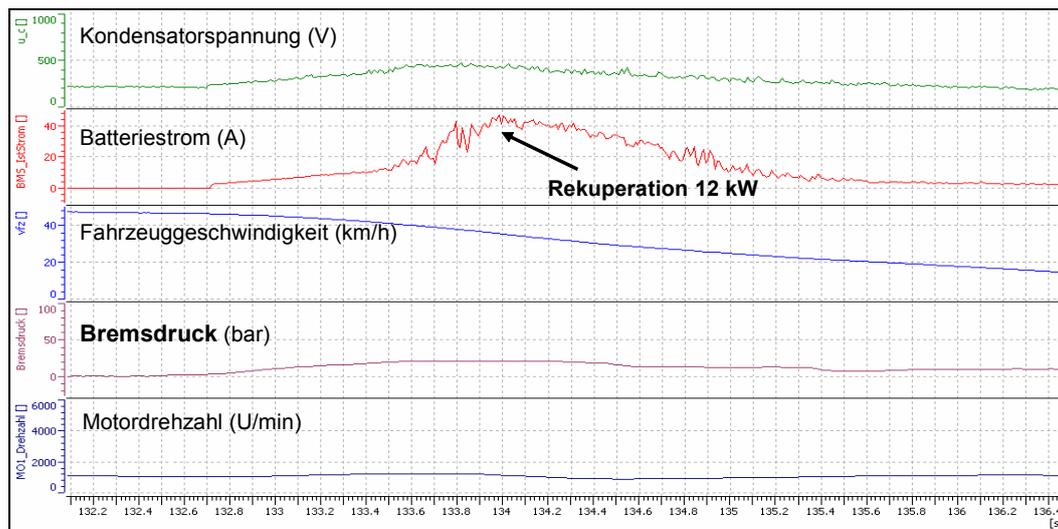


Abb. 15: Fahrtdiagramm mit Direkthybrid: Rekuperation

Während des Aufbaus des Bremsdrucks wird bei praktisch konstanter Drehzahl des Verbrennungsmotors die Elektromotorspannung durch Verstellung der wirksamen Abtriebsleiterlänge l_2 erhöht. Diese Spannung wird an dem Kondensator des elektrischen Getriebes (vgl. Abb. 5) abgegriffen. Die DC/DC-Wandlerschaltung generiert daraus einen Bremsstrom von ca. 40 A, was hier einer Leistung von ca. 12 kW entspricht. Durch Veränderung der wirksamen Leiterlänge im elektrischen Getriebe wird auch im Rekuperationsfall die elektrische Maschinenkonstante angepasst, so dass sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Geschwindigkeiten das Zusammenwirken von Direkthybrid-Aggregat und Hybridbatterie optimiert wird.

4 Zusammenfassung

In der Volkswagen-Konzern-Forschung ist ein elektrisches Getriebe entstanden, das in Verbindung mit einer entsprechenden Fahrbatterie alle Anforderungen an einen modernen Hybrid erfüllt.

Das elektrische Getriebe ist eine besondere Art einer elektrischen Welle, bei der 2 permanentmagnetisch erregte Rotoren mit einem gemeinsamen Stator in elektromagnetischer Wechselwirkung stehen und die in einem gemeinsamen Gehäuse zusammen mit der Leistungsschaltelronik untergebracht sind. Der eine Rotor ist direkt an der Kurbelwelle angeflanscht, der zweite steht direkt mit der Antriebsachse in Verbindung. Unterschiedliche Übersetzungen werden durch mechanische Veränderung der elektrisch wirksamen Leiterlänge des Stators zwischen den Rotoren erreicht. Die Spreizung reicht vom Anfahrbereich ($i \leq \infty$) bis zum Overdrive. Die mechanische Verstellung des Stators verändert die elektrische Maschinenkonstante der beiden Teilsysteme, wodurch ein großer Bereich des optimalen Wirkungsgrads je

nach Übersetzungsanforderung überdeckt wird. Darin unterscheidet sich diese Generator-Motor-Kombination grundsätzlich von separaten elektrischen Maschinen in serieller Anordnung und mit einer elektronischen Leistungsanpassschaltung. In der Verwendung als Drehmomentenwandler werden von dem elektrischen Getriebe die Funktion der Komponenten Anlasser (Direktstarter), Kupplung, Lichtmaschine und Schwungrad abgedeckt. Der Einsatz hoch entwickelter Technologien lässt eine Konstruktion des elektrischen Getriebes mit fahrzeuggerechten Abmessungen und Gewichten zu.

Die mechanische Leistung wird bei diesem Getriebe komplett in elektrische zwischengewandelt, wodurch es sich als ideale Komponente für einen Hybridantrieb eignet. Durch elektrische Verbindung der Statorwicklung über einen DC/DC-Wandler mit der Fahrbatterie lassen sich alle Hybrid-Funktionen wie Boosten, Rekuperieren, Start-Stopp, „Segeln“ und elektrisches Fahren mit hohem Komfort und mit optimaler Verbrauchsreduktion verwirklichen. Der so definierte „Direkthybrid“ hat gegenüber einem seriellen Hybrid den Vorteil des besseren Wirkungsgrads und gegenüber einem Parallelhybrid den des geringeren Aufwands an zusätzlichen Komponenten und eines geringeren Bauraumbedarfs.

5 Literatur

- [1] SCHULZE, B.-G.; DITTNER, A.
Generator-Motor-Kombination
Patentschrift DE 44 08 719, (1994)

- [2] SCHULZE, B.-G.; HANKE, S.
Stator für eine elektrische Maschine
Offenlegungsschrift der Patentanmeldung DE 100 10 028, (2000)

- [3] MARTIN, S.; SCHULZE, B.-G.; RAUCH, O.; BILLMANN, M.
Einrichtung und Verfahren zum Schalten von Strömen in einer Statorwicklung
einer Generator-Elektromotor-Kombination
Offenlegungsschrift der Patentanmeldung DE 102 37 451, (2004)