

ELEKTRISCHE MASCHINE IM HYBRIDANTRIEB

H. Wöhl-Bruhn

1 EINLEITUNG

Analysen sagen eine deutliche Zunahme des Verkehrsaufkommens in den kommenden Jahren voraus, die insbesondere in der Zunahme des Individualverkehrs in Erscheinung treten wird. Die Konsequenz daraus wäre eine weitere Zunahme des CO₂-Ausstoßes nicht nur in den Ballungsräumen unserer Städte. Diesem Umstand versuchen die freiwillige Selbstverpflichtung der Automobilindustrie (ACEA = European Automobile Manufacturers Association) mit 140 g/km für 2008 und die Zielvorstellung der EU für den mittleren Flottenverbrauch nach 2012 mit 90 g/km Rechnung zu tragen. Hybridfahrzeuge (HEV = **H**ybrid **E**lectric **V**ehicle) können einen beachtlichen Beitrag zur CO₂-Reduzierung liefern. Parallelhybridfahrzeuge verbinden eine Verbrennungskraftmaschine (VKM) mit einer elektrischen Maschine, die als Nebenaggregat, bzw. am Getriebeein- oder Getriebeausgang platziert sein kann. Weiterführende Konzepte beinhalten die Integration der E-Maschine in das Getriebe, wobei über einen Leistungssplit nicht nur eine Lastpunktanhebung, sondern zusätzlich eine - in einem weiten Bereich variable - Drehzahlانpassung der VKM möglich ist. Kernkomponente ist hierbei die elektrische Maschine selbst und deren Einbindung sowie Peripherie. In dem folgenden Bericht sollen zwei Hybrid-Antriebstopologien vorgestellt, deren Potenzial exemplarisch aufgezeigt und Anforderungen an die E-Maschine erläutert werden.

2 LEISTUNGSVERZWEIGT VERSUS PARALLELANORDNUNG

2.1 Topologien aktueller Hybridfahrzeuge

Die heute erhältlichen Hybrid-Personenkraftfahrzeuge sind durch ihre Wiederaufladbarkeit während des Betriebes der VKM autarke Hybridfahrzeuge. Je nach Ausführung ist die automatisierte Umschaltung der Antriebsarten möglich. Auf dem deutschen Markt gibt es derzeit nur ein HEV mit leistungsverzweigter und ein Fahrzeug mit paralleler Anordnung. Diese werden im Folgenden erklärt und Daten der Fahrzeuge in **Tabelle 1** zusammengefasst.

Das Antriebskonzept des Toyota Prius verwendet ein Planetengetriebe, das die Leistung der VKM auf einen elektrischen und einen mechanischen Zweig aufteilt. Da das Planetengetriebe nur eine feste Standübersetzung hat, erfolgt die Drehzahlverstellung der VKM über eine E-Maschine, die je nach Betriebszustand Leistungen wandeln muss, welche maximal der Hälfte der VKM-Leistung entsprechen können. Eine zweite Elektromaschine am Getriebeausgang wandelt diese Leistung abermals und ist zudem in der Lage, zusätzlich Leistung für

Beschleunigungsvorgänge (Boosten) und für hohe Anfahrmomente zur Verfügung zu stellen. Beide Maschinen sind als Permanentmagneterregte Synchronmaschine ausgeführt. Bei langsamen Fahrzeuggeschwindigkeiten können hohe Drehmomente auf der Antriebsachse aufgrund der Beschaltung und der Kinematik des Planetengetriebes nicht über den mechanischen Zweig erzeugt werden, sondern müssen systembedingt durch diese E-Maschine auf der Abtriebsseite aufgebracht werden. Aufgrund der Anordnung sind beide E-Maschinen relativ groß und bei nicht-elektrischem Fahren ständig im Eingriff. Dies ist die Hauptursache für einen – im Vergleich zum Schaltgetriebe – schlechten Wirkungsgrad des Getriebes in größeren Bereichen des Zugkraft-Geschwindigkeitskennfeldes, welcher in der Gesamtverlustbilanz durch die freie Betriebspunktwahl der VKM zum Teil kompensiert wird. Neben der Rückgewinnung der Bremsenergie (Rekuperation) und Boost sind auch rein elektrisches Fahren und ein Starten der VKM während des elektrischen Fahrens möglich (Impulsstart) [1].

Der Honda Civic IMA (IMA = **I**ntegrated **M**otor **A**ssist) besitzt zwischen VKM und Getriebe eine schmale Permanentmagneterregte Synchronmaschine, die kraftschlüssig mit der Getriebeeingangswelle eines manuellen 5-Gang-Schaltgetriebes verbunden ist. Diese Parallelanordnung ermöglicht eine Drehmomentaddition von VKM und E-Maschine. Der Betrieb der E-Maschine erfolgt zum Starten (Hochdrehzahlstart) und während der Fahrt bei Bedarf. Mit dieser Konfiguration sind Rekuperation, Boosten, Start-Stopp und eine Lastpunktanhebung/-absenkung zur Vergrößerung der Effizienz der VKM möglich. Nachteilig wirkt sich das Schleppmoment der VKM während der Rekuperation aus, da kein Freilauf des Getriebes mit E-Maschine ohne VKM erfolgen kann. Ein rein elektrisches Fahren ist mit dieser Anordnung nicht möglich. Die genannten Funktionen ermöglichen dennoch deutliche Kraftstoffeinsparungen gegenüber konventionellen Fahrzeugen [2].

Tabelle 1: Daten der E-Maschinen betrachteter Hybridfahrzeuge und deren Hybrid-Features

	Toyota, Prius II [1], [3]	Honda, Civic IMA [4], [5]
E-Maschine (getriebeausgangsseitig bei leistungsverzweigtem Getriebe)		
Typ	PMSM	PMSM
Dauerleistung [kW]	k. A.	10
Spitzenleistung [kW] @ [1/min]	50 @ 1200-1540	12,3 @ k. A.
max. Antriebs-Drehmoment [Nm] @ [1/min]	400 @ 0-1000	103 @ k. A.
Hybrid-Features		
Rekuperation	✓	✓
Boosten	✓	✓
Start / Stopp (im Stand)	✓	✓
Impulsstart	✓	-
Lastpunktanhebung / -absenkung	✓	✓
Variable VKM-Drehzahlanpassung	✓	-
Rein elektrisches Fahren	✓	-

2.2 Vergleich von leistungsverzweigtem Getriebe und klassischem Schaltgetriebe

Der Vergleich der in Kapitel 2.1 vorgestellten Topologien kann mit unterschiedlichen Zielen erfolgen: Während für Automobilhersteller und Zulieferer Fragen der Entwicklungskosten und der Präferenz einbezogen werden, sollen an dieser Stelle prinzipbedingte Vorteile für die CO₂-Minimierung betrachtet werden. Für die Effizienz der Getriebe können Wirkungsgradkennfelder für stationäre Betriebszustände dargestellt werden, die einen qualitativen Vergleich bei Dauerlast (Autobahnfahrt, Anhängerfahrt in der Ebene) erlauben. Lang andauernde Betriebszustände können ohne Einbindung einer leistungsunterstützenden Batterie betrachtet werden. Aus diesem Grunde kann auch der Einsatz der E-Maschine für eine Drehmomentaddition bzw. -subtraktion vernachlässigt werden. **Bild 1** zeigt ein Wirkungsgrad-Muschelkennfeld im Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramm, für das Wirkungsgrade einer 47 kW-VKM in einer Hybridanwendung und eines klassischen progressiv abgestimmten 5-Gang-Schaltgetriebes einbezogen wurden. Gut zu erkennen sind die durch die Schaltstufen entstehenden Zugkraftlücken, die durch das Downsizing der VKM (verringertes Drehzahlbereich) besonders ausgeprägt sind. Bei leistungsverzweigten Getrieben sind dagegen die elektrischen Maschinen auch bei stationären Zuständen im Betrieb, so dass Verluste des elektrischen Zweiges (Kennfelder der E-Maschinen und Wirkungsgrad des Umrichters) berücksichtigt werden müssen. In **Bild 2** wird das Kennfeld für die gleiche VKM dargestellt, jedoch für ein leistungsverzweigtes Getriebe. Durch die freie Wahl der Betriebspunkte der VKM sind zum Teil höhere Gesamtwirkungsgrade des Systems möglich. Die sehr guten Wirkungsgrade der mechanischen Übersetzung einzelner Gangstufen in ihren Bestpunkten werden durch den ständigen Eingriff der zwei E-Maschinen nicht erreicht. Stattdessen lässt sich durch die variable Drehzahlpassung eine geringfügig höhere Endgeschwindigkeit erreichen und die Zugkraftunterbrechungen entfallen. Ist die mechanische Festigkeit der die Leistungsaufteilung bestimmenden E-Maschine für hohe Drehzahlen groß genug und der elektrische Zweig ausreichend dimensioniert, sind zusätzlich im Vergleich zum Schaltgetriebe höhere Zugkräfte bei niedrigen Geschwindigkeiten möglich. Zur Erleichterung der Beurteilung wurden Betriebspunkte des Nordeuropäischen Fahrzyklusses (NEFZ) für ein 1,3 t-Fahrzeug und eine Fahrwiderstandskennlinie eines Mittelklassefahrzeugs mit gleichem Gewicht eingefügt.

Die Erstellung nichtstationärer Kennfelder wird als mehrdimensionales Problem behandelt. Neben der Geschwindigkeit fließen wichtige Variablen wie Dauer der Belastung, Ladezustand der Batterie und Temperaturen der E-Maschine(n) und Batterie ein. Die Zugkraft wird durch eine Zugkraftanforderung des Fahrers (Gaspedalstellung) ersetzt. Eine im Steuergerät hinterlegte Strategie stellt Sollwerte der Aktuatoren ein, aus denen sich der Gesamtwirkungsgrad des Antriebsstranges für die Topologie und für diesen Betriebspunkt ergibt. Die Komplexität dieses Zusammenspiels erlaubt die Definition von Wirkungsgradkennfeldern nichtstationärer Fälle nur für eine Auswahl von Randbedingungen, deren Bestimmung ein wesentlicher Faktor für die Aussagekraft der Simulationen darstellt.

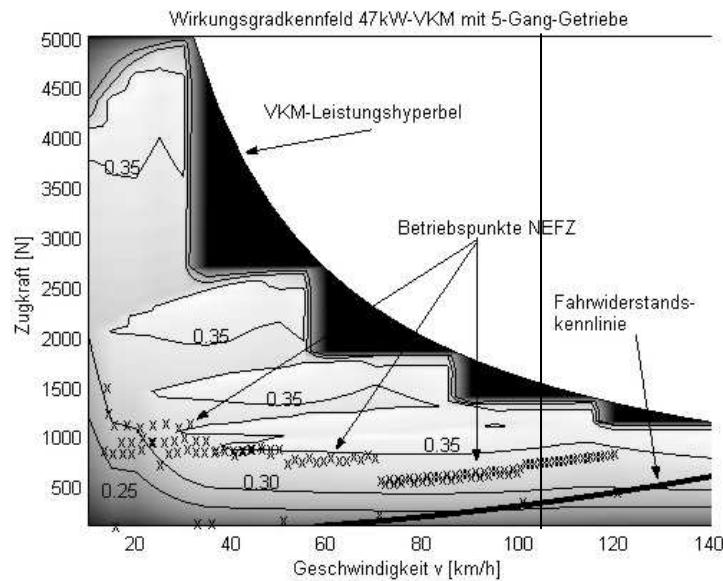


Bild 1: Wirkungsgradkennfeld Parallelantriebsstrang

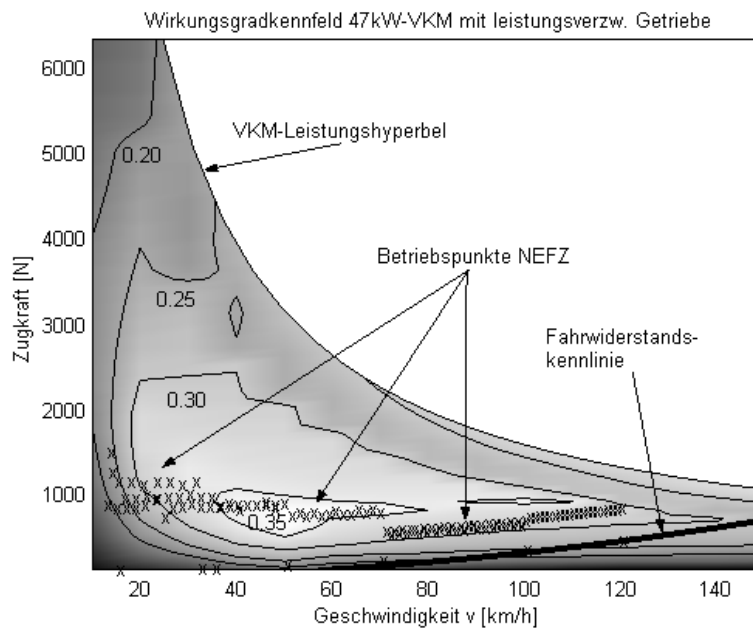


Bild 2: Wirkungsgradkennfeld leistungsverzweigtes Getriebe

3 ANFORDERUNGEN AN DIE ELEKTRISCHE MASCHINE IM ANTRIEBSSTRANG

Elektrische und mechanische Anforderungen ergeben sich zum einen aus dem Einsatzort der Maschine. Je nach Art des umgebenden Mediums müssen ausreichende Resistenzen des Materials bezüglich Wärmeübergang und Temperaturbedingungen vorhanden sein. Die Position der Maschine schränkt außerdem Bauform, -größe und Drehzahlpektrum ein. Zum anderen ergeben sich aus Betriebsphilosophie und Drehmomentanforderungsprofil Anforderungen an die elektrische Maschine bezüglich des Dauermoments und der Überlast über

Fahrzyklen, die von Fahrermodellen in Zugkraftanforderungen übertragen werden. Soll der Start der VKM über die Maschine (auch bei tiefen Umgebungstemperaturen) erfolgen, ergeben sich Momente, die deutlich über den sonstigen Anforderungen liegen können und mechanisch übertragen werden müssen. Bei Parallelanordnungen, bei denen die Maschine als Nebenaggregat ausgeführt ist, ist dies nur bedingt möglich. Insgesamt kann mit diesen Anforderungen ein System ausgelegt werden, für das Maschinenparameter und Wechselrichterleistung ausgewählt und dimensioniert werden, die für gegebene Randbedingungen am geeignetsten erscheinen. **Tabelle 2** fasst exemplarisch die Anforderungen an die Maschine für ausgewählte Topologien zusammen.

Tabelle 2: Anforderungen an die E-Maschine in Abhängigkeit vom Einsatzort im Fahrzeug

E-Maschine	als Nebenaggregat	zwischen VKM und Getriebe	getriebeintegriert
	parallel		leistungsverzweigt
Übertragung Startmomente	–	+	+
Änderungen von Standardbauteilen	+ (bzgl. Getriebe) – (bzgl. VKM)	+	–
Anforderungen E-Maschine	Luftkühlung: resistent gegenüber Betauung und Salzwasser Wasserkühlung: guter Wärmeübergang Öl(-nebel-)kühlung: Watfähigkeit, Ölresistenz		
Hybrid-Features	–	+	+
Bauformen E-Maschine	länglich	scheibenförmig	konzeptbedingt
Überlastfähigkeit	0	+	konzeptbedingt
Betriebshäufigkeit	+	+	–
Drehzahlpektrum	+	+	–

Legende: + = eher vorteilhaft, 0 = unbestimmt, – = eher nachteilig

4 ZUSAMMENFASSUNG

Aus der Vielzahl möglicher Hybridkonzepte wurden Konzepte von auf dem Markt verfügbaren Serienfahrzeugen vorgestellt und ein Vergleich bezüglich der Getriebewirkungsgrade für stationäre Fälle durchgeführt. Bei leistungsverzweigten Getrieben müssen elektrische Komponenten, die sich ständig im Betrieb befinden, in diese Wirkungsgradbetrachtungen mit einbezogen werden, da sie einen erheblichen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad des Gesamtsystems haben. Abschließend wurden die Anforderungen für die elektrische Maschine exemplarisch aufgeführt und die Grenzen allgemein gültiger Aussagen dargestellt.

Innerhalb des Projektes „Faszination Hybrid“ der TU Braunschweig werden über diese grundlegenden Betrachtungen hinaus weiterführende Simulationen unter anderem zur Bestimmung von Anforderungen und Auslegung von Komponenten durchgeführt. Diese

Untersuchungen gehen über die stationären Betrachtungen hinaus und werden an dieser Stelle nicht näher erläutert. Aufgrund der interdisziplinären Inhalte werden die Aufgaben in einem Verbund von Instituten bearbeitet. Nähere Informationen zu diesem Projekt sind verfügbar unter <http://www.faszinationhybrid.de> .

5 LITERATUR

- [1] Toyota Motor Corp.: <http://www.toyota.co.jp/en/tech/environment/hsd/index.html>, THS II, Stand 21.01.2005
- [2] H. Ogawa, M. Matsuki, T. Eguchi: Development of a Power Train for the Hybrid Automobile – The Civic Hybrid, SAE 2003-01-0083
- [3] K. Muta, M. Yamazaki, J. Tokieda: Development of New-Generation Hybrid System THS II – Drastic Improvement of Power Performance and Fuel Economy, SAE 2004-01-0064
- [4] Honda Corp.: Der neue Honda Civic IMA, http://www.honda.de/nparcarticles/de_car_br_civic_ima_2004_v2.pdf, Stand 21.01.2005
- [5] H. Sato: Technical Description of the IMA System, 13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2004