Henning Wöhl-Bruhn (Autor)

Synchronmaschine mit eingebetteten Magneten und neuartiger variabler Erregung für Hybridantriebe

https://cuvillier.de/de/shop/publications/820

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: https://cuvillier.de

2 Der elektrische Antrieb im Antriebsstrang von Straßenfahrzeugen

Der Verbrennungsmotor befindet sich heute in nahezu jedem Straßenfahrzeug und ist schlichtweg *der* Primärenergiewandler zur Bereitstellung der Antriebsleistung des Fahrzeugs. Der Grund dafür liegt in erster Linie in den Vorteilen der flüssigen fossilen Kraftstoffe. Sie hatten in den vergangenen Jahrzehnten eine hohe Verfügbarkeit und ihre hohe Energiedichte ermöglicht zudem einen großen Aktionsradius. Die elektrische Maschine findet in diesen konventionellen Fahrzeugen lediglich in Form eines Starters, einer Lichtmaschine oder als Aktuator kleiner Leistung ihren Einsatz. Dennoch gewinnt der elektrische Antrieb höherer Leistung im Zuge der Verbreitung einiger neuer Antriebsarten an Bedeutung. Ein Grund dafür ist, dass bestimmte Einsparpotenziale erst durch diese erschließbar sind und für den Kunden zusätzliche Vorteile bieten. Je nach Antriebsstruktur und Einsatzort des elektrischen Antriebs unterscheiden sich dessen Anforderungen. Neben den generellen Forderungen nach niedrigem Gewicht und Kosten variieren zum Teil konkurrierende Ziele für die Auswahl und Ausführung der elektrischen Maschine und dessen Stromsteller. Typische Ziele sind:

- Hoher Wirkungsgrad
- Großer Überlastbereich und/oder großer Drehzahlbereich
- Gute Integrationsfähigkeit in bestehende Fahrzeugkonzepte
- Geringe Ausfallwahrscheinlichkeit und lange Lebensdauer
- Vibrations- und geräuscharm
- Kein zusätzlicher Kühlkreislauf
- Wartungsfrei

In diesem Kapitel soll der Einsatz der elektrischen Maschine unter dem Aspekt der Energieeinsparung betrachtet werden: Möglichkeiten und Grenzen von konventionellen Antriebssträngen und das Potenzial durch den Einsatz eines leis-

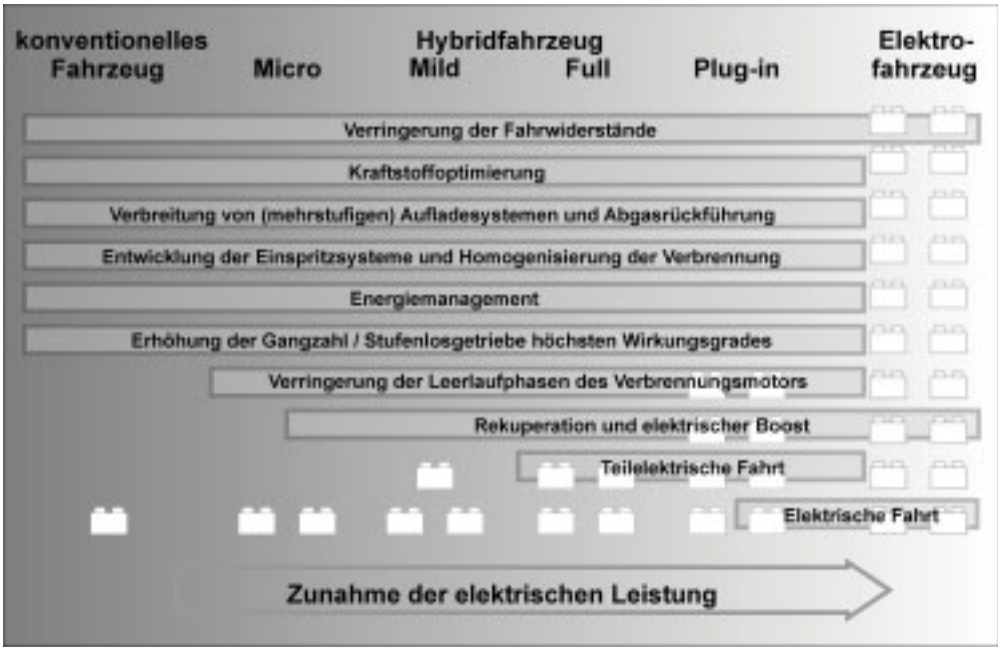

Abbildung 2.1: Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz unterschiedlicher Fahrzeug-Antriebssysteme

tungsfähigen elektrischen Antriebs werden aufgezeigt. Nachfolgend werden Gruppen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen erläutert, ehe abschließend auf die Verbreitung, sowie auf Anforderungen an die elektrische(n) Maschine(n) und deren Leistungselektronik im Antriebsstrang von Straßenfahrzeugen eingegangen wird.

2.1 Verbesserung der Energieeffizienz

Die in der Einleitung gezeigte Notwendigkeit, Energie auch im Transportsektor effizienter einzusetzen, führt zwangsläufig zur Betrachtung von Einsparpotenzialen, die zur Senkung des Verbrauchs und zur Vermeidung von Schadstoffen führen. Da durch die Automobilhersteller bereits im Laufe der letzten Jahrzehnte große Anstrengungen unternommen wurden, eine Verbrauchssenkung bzw. eine verbrauchsneutrale Steigerung der Fahrleistungen zu erzielen, sollen wichtige Maßnahmen in Abbildung 2.1 zusammengefasst werden. Dargestellt wird in diesem Schaubild unter anderem ein möglicher Übergang von den konventionellen Straßenfahrzeugen hin zu Hybrid- und Elektrofahrzeugen, die mit zunehmender elektrischer Leistung ohne Einsatz des Verbrennungsmotors auch einen größeren Speicher für elektrische Energie benötigen. Bisher von europäischen Automobilherstellern bereits in die Serie eingeführte Verbesserungen

konzentrieren sich auf die Optimierung des konventionellen Antriebsstrangs [4].

Einen wichtigen Meilenstein für die Umweltverträglichkeit des Verbrennungsmotors stellt der Katalysator dar, der zur Verringerung von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid beiträgt. Ausgehend von den Kraftstoffen wurden zusätzlich durch deren Optimierung, den Verzicht auf Blei und die Verringerung von Schwefel sowie Aromen, die Abgase schadstoffärmer. Wichtige Fortschritte wurden in der Verbrennungsmotorentechnik durch die Verbesserung von Brennverfahren und der Aufladung erreicht. Die Abgasrückführung und optimierte Einspritzsysteme verringern die Erzeugung von Stickoxiden durch eine niedrigere Verbrennungstemperatur im Brennraum. Die Einführung der Euro4 und Euro5 Normen machen diese Systeme und zusätzliche Filter im Abgasstrang notwendig. Die Einführung und Beimischung von CO_2 -neutralen Kraftstoffen, der so genannten Biokraftstoffe, verhindert die zusätzliche Freisetzung von Kohlenwasserstoffen aus den fossilen Rohstoffreserven in die Umwelt. Weitere Felder für eine Energieeinsparung bei konventionellen Fahrzeugen bestehen in der Optimierung eines aktiven Wärme- und Bordnetz-Energiemanagements.

Bei Betrachtung des Getriebes als nachgelagerte Antriebskomponente sind neben der Reduzierung von Schleppverlusten die Erhöhung der Zahl von Stufen der Schaltgetriebe die wichtigste Weiterentwicklung. Sie ermöglicht die Vergrößerung des Wirkungsgrads des Verbrennungsmotors, da dieser dadurch häufiger in günstigeren Bereichen betrieben wird.

Unabhängig von den Verbesserungen dieser klassischen Antriebskomponenten wirkt sich eine Verringerung der Fahrwiderstände positiv aus. Möglichkeiten und Grenzen zur Senkung von Verlusten und Verbrauch werden in den folgenden drei Abschnitten *Fahrwiderstand*, *Verluste von Antriebsstrangkomponenten* und *Fahrspiel- und Zyklenbetrieb* aufgezeigt.

2.1.1 Fahrwiderstand

Die Fahrwiderstandsgleichung zeigt die wesentlichen Einflüsse des Leistungsbedarfs für den Vortrieb eines Fahrzeugs. Grundsätzlich ist die Leistung P_{Fzg} bei Geradeausfahrt durch die Zugkraft F_{Zug} und die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs v_{Fzg} nach Gleichung 2.1 bestimmt. Die Zugkraft setzt sich aus der Beschleunigungskraft F_{Beschl} und dem Fahrwiderstand F_{Fahrw} zusammen.

$$P_{\mathrm{Fzg}} = F_{\mathrm{Zug}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}} = (F_{\mathrm{Beschl}} + F_{\mathrm{Fahrw}}) \cdot v_{\mathrm{Fzg}} \tag{2.1}$$

Die Beschleunigungskraft kann nach Gleichung 2.2 aus der Beschleunigung des Fahrzeugs a_{Fzg} und der Fahrzeugmasse m_{Fzg} ermittelt werden.

$$F_{\mathrm{Beschl}} = m_{\mathrm{Fzg}} \cdot a_{\mathrm{Fzg}} \tag{2.2}$$

Der Fahrwiderstand berechnet sich entsprechend der Gleichung 2.3 aus den Kräften Rollwiderstand F_{Ro} und Luftwiderstand F_{Lu} des Fahrzeugs sowie der Kraft F_{St}, welche aufgrund einer Fahrbahnsteigung auf das Fahrzeug wirkt.

$$F_{\mathrm{Fahrw}} = F_{\mathrm{Ro}} + F_{\mathrm{Lu}} + F_{\mathrm{St}} \tag{2.3}$$

Der Rollwiderstand nach Gleichung 2.4 wird zum einen durch die Verformung von Rad und Untergrund sowie die Reibung zwischen Rad und Fahrweg hervorgerufen. Er wird maßgeblich durch die Gravitationsbeschleunigung g, die Masse des Fahrzeugs und die Steigung des Fahrwegs α_{St} beeinflusst. Der zusätzliche Fahrwiderstandsbeiwert f_{Ro} kann vereinfacht aus der Kontaktfläche von Reifen und Fahrbahn (Hertzsche Fläche) sowie dem Raddurchmesser abgeschätzt werden oder einer Funktion bestehend aus Rollkoeffizienten als Faktoren unterschiedlicher Potenzen der Fahrzeuggeschwindigkeit folgen. Aus Messungen abgeleitete Werte berücksichtigen zusätzlich die Beschaffenheit des Untergrunds, die Ausführung von Profil, Walkverhalten und Luftdruck des Reifens.[1]

$$F_{\mathrm{Ro}} = f_{\mathrm{Ro}} \cdot m_{\mathrm{Fzg}} \cdot g \cdot cos\alpha_{\mathrm{St}} \tag{2.4}$$

Der Luftwiderstand berechnet sich nach der Fahrzeug- und der Gegenwindgeschwindigkeit v_{Wind}, nach der Dichte des umgebenden Mediums ρ (hier Luft), der Querspantfläche A_{Qu} sowie dem Luftwiderstandsbeiwert c_{w}, der als aerodynamische Güteziffer des Fahrzeugs verstanden werden kann (Gleichung 2.5).

$$F_{\mathrm{Lu}} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\mathrm{Lu}} \cdot c_{\mathrm{w}} \cdot A_{\mathrm{Qu}} \cdot (v_{\mathrm{Fzg}} + v_{\mathrm{Wind}})^2 \tag{2.5}$$

Der Steigungswiderstand wird bei negativen Vorzeichen auch als Hangabtriebskraft bezeichnet und ist durch die Fahrzeugmasse, die Gravitationsbeschleunigung und die Steigung α_{St} nach Gleichung 2.6 festgelegt.

$$F_{\mathrm{St}} = m_{\mathrm{Fzg}} \cdot g \cdot sin\alpha_{\mathrm{St}} \tag{2.6}$$

[1] Unter Einbezug der Fahrzeugquerdynamik bedarf es für die Berechnung des Fahrwiderstands zusätzlich der Berücksichtigung des Kurvenwiderstandsbeiwerts, der in gleicher Weise wie der Rollwiderstandsbeiwert in die Leistungsberechnung des Fahrzeugs eingeht.

Der Fahrwiderstand fasst die Kräfte aus Roll-, Luft- und Steigungswiderstand zusammen, sodass unter der Berücksichtigung aller Kräfte Gleichung 2.1 in Gleichung 2.7 überführt werden kann. Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand können im Gegensatz zu den verbleibenden Kräften auch negative Werte annehmen.

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{Fzg}} &= (F_{\mathrm{Beschl}} + F_{\mathrm{Ro}} + F_{\mathrm{Lu}} + F_{\mathrm{St}}) \cdot v_{\mathrm{Fzg}} \\ &= m_{\mathrm{Fzg}} \cdot (a_{\mathrm{Fzg}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}} + f_{\mathrm{Ro}} \cdot g \cdot cos\alpha_{\mathrm{St}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}} + g \cdot sin\alpha_{\mathrm{St}} \cdot v_{\mathrm{Fzg}}) \\ &\quad + \frac{1}{2} \cdot \rho_{\mathrm{Lu}} \cdot c_{\mathrm{w}} \cdot A_{\mathrm{Qu}} \cdot (v_{\mathrm{Fzg}}^3 + 2 \cdot v_{\mathrm{Fzg}}^2 v_{\mathrm{Wind}} + v_{\mathrm{Fzg}} v_{\mathrm{Wind}}^2) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Die Fahrwiderstandsgleichung ermöglicht also eine makroskopische Betrachtung des Leistungsbedarfs für den Antrieb eines Fahrzeugs. Bei Betrachtung von Gleichung 2.7 für niedrige Geschwindigkeiten wird deutlich, dass die Masse linear in die benötigte Antriebsleistung eingeht und somit ein großes Optimierungspotenzial aufdeckt. Bei einer vorgegebenen Strecke und einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil kann eine weitere Einsparung von Energie bei kleinen Fahrzeuggeschwindigkeiten hauptsächlich durch eine Verringerung des Rollwiderstands erfolgen. Für hohe Fahrgeschwindigkeiten wird der Luftwiderstand aufgrund des kubischen Zusammenhangs dominant und eröffnet weitere Möglichkeiten die Antriebsleistung zu senken. Dies ist durch die Verringerung von Querspantfläche und Luftwiderstandsbeiwert möglich. Die Automobilhersteller konnten in den vergangenen Jahren zwar den Luftwiderstandsbeiwert absenken, allerdings wurde die aerodynamische Optimierung durch die vergrößerten Fahrzeugabmessungen weitgehend ausgeglichen, sodass der Luftwiderstand kaum abgesenkt wurde.

Bei näherer Betrachtung des Antriebsstrangs im Fahrzeug werden weitere Verluste aufgedeckt, die in der Fahrwiderstandsgleichung nicht berücksichtigt werden, allerdings für die Effizienz des Fahrzeugantriebs eine große Rolle spielen. So kann bezüglich einer Berücksichtigung der Trägheit aller rotierender Elemente im Antriebsstrang des Fahrzeugs ein Drehmassenzuschlagsfaktor in Gleichung 2.2 für die Beschleunigungskraft hinzugefügt werden. Größer ist der Einfluss der Energiewandler und des eingesetzten Getriebes: Da diese Komponenten nicht ideal sind, haben sie einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch des Fahrzeugs und werden in folgendem Abschnitt behandelt.

2.1.2 Verluste von Antriebsstrangkomponenten

Die folgenden Unterkapitel gehen auf die Verluste unterschiedlicher Antriebsstrangkomponenten ein.