

Effizienzoptimierung integrierter elektrischer Antriebssysteme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge

Efficiency optimization of integrated electrical drives for hybrid and electric vehicles

Dipl.-Ing. M. Hofmann, Dipl.-Ing. B. Eckardt, Dr.-Ing. M. März, Prof. Dr. rer. nat. L. Frey
Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie - IISB
Zentrum für Kfz-Leistungselektronik und Mechatronik FhG-IISB/ZKLM, Nürnberg - Germany
www.zklm.iisb.fraunhofer.de

Kurzfassung

Im vorliegenden Beitrag werden Untersuchungen zum Effizienzverhalten einer integrierten elektrischen Achsantriebseinheit für Hybridfahrzeuge vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf dem Verständnis und der Optimierung des Zusammenwirkens aller Teilsysteme des elektrischen Antriebsstrangs während realitätsnaher Fahrzyklen. Ansätze zur Verbesserung der Teillasteffizienz mittels einer leistungsgesteuerten Betriebsstrategie für die eingesetzten leistungselektronischen Wandler im Hochvolt-Bordnetz werden mittels Messungen verifiziert und mögliche Einsparpotentiale in einer Hybridfahrzeug-Simulationsumgebung untersucht.

Abstract

The following article presents studies about the efficiency of an integrated electrical drive for hybrid cars. The aim is an optimization of the interaction of all sub-systems in the electrical power train. Approaches to improve the part load efficiency using an output-power-controlled operational strategy for the converters in the vehicles high-voltage electrical system are verified by measurements. Simulations of the hybrid vehicle are carried out to show energy saving potentials during realistic driving cycles.

1 Einführung

Die niedrige Energiedichte heutiger Traktionsbatterien und die daraus resultierende limitierte Reichweite von Elektrofahrzeugen stellen die größte Herausforderung dar, die es für eine breite Kundenakzeptanz elektrisch betriebener Fahrzeuge zu überwinden gilt. Neben den in den nächsten Jahren eher stetig zu erwartenden Technologiefortschritten in der Batterieentwicklung bietet die anforderungsgerechte Optimierung der Komponenten des elektrischen Antriebsstranges Chancen, die kostenintensiv gespeicherte Batterieenergie möglichst effizient in Antriebsleistung und Reichweite umzusetzen.

Aufgrund der permanent anfallenden lastunabhängigen Verluste liegen die Wirkungsgradoptima aller Teilsysteme des elektrischen Antriebsstranges wie E-Maschinen, Umrichtereinheit sowie etwaiger mechanischer Untersetzungsgetriebe im Bereich höherer Leistungsabgabe. Die bei wirtschaftlicher Fahrweise auftretenden Durchschnittsleistungen im realen Einsatz liegen sowohl im Hybrid- als auch im reinen E-Betrieb deutlich unter der verfügbaren Maximalleistung und unterstreichen die Notwendigkeit, die Teillasteffizienz des gesamten mechatronischen Antriebsstranges zu untersuchen und zu optimieren. Der Einsatz simulativer Entwicklungswerkzeuge ermöglicht dabei

schon in der Konzeptphase eine genaue Kenntnis der zu erwartenden transienten Belastungsprofile für realistische Fahrzyklen und somit eine gezielte Systementwicklung.

Am Fraunhofer IISB werden elektrische Antriebssysteme für Hybrid- und Elektrofahrzeuge entwickelt, die sich durch eine mechatronische Integration der Umrichter-Leistungselektronik direkt im Bereich der mechanischen Antriebskomponenten auszeichnen. Durch innovative Aufbau- und Verbindungstechniken in Kombination mit angepassten Kühlstrategien auf der Leistungsmodulebene werden die Lebensdauernanforderungen trotz erhöhter Temperatur- und Vibrationsbelastung erreicht. Die im vorliegenden Beitrag vorgestellte Charakterisierung einer integrierten elektrischen Achsantriebseinheit verdeutlicht das Zusammenspiel der Einzelsysteme im realen Betrieb und zeigt mögliche Ansatzpunkte für Wirkungsgradsteigerungen auf.

Neben der anforderungsgerechten Auslegung von E-Maschinen und mechanischen Getriebesystemen eröffnet insbesondere die eingesetzte Leistungselektronik weitere Möglichkeiten zur Effizienzoptimierung. Ein optional eingesetzter bidirektionaler Hochvolt-DC/DC-Wandler zwischen der Traktionsbatterie und den Antriebsumrichtern kann einerseits eine vom Ladezustand unabhängige kon-

stante Ausgangsspannung für die Umrichter bereitstellen, umgekehrt aber auch als effektiver Laderegler für das DC-Schnellladen dienen. Andererseits kann durch gezieltes Zu- und Abschalten des DC/DC-Wandlers während des Betriebes die Umrichter-Zwischenkreisspannung leistungsabhängig variiert werden.

Ein Ausschalten des Hochsetzstellers bei geringer Leistungsanforderung bewirkt durch die Absenkung der Zwischenkreisspannung auf die Batterieausgangsspannung geringere Halbleiter-Schaltverluste im Umrichtersystem sowie eine Verschiebung des Wirkungsgradkennfeldes der Antriebsmaschine. Die sich daraus ergebenden Möglichkeiten zur Verlustminimierung im Teillastbereich werden im folgenden Artikel messtechnisch untersucht. Mittels Simulationen des Gesamtfahrzeuges werden die Eignung im Fahrzeugeinsatz diskutiert sowie Ansätze einer möglichen leistungsgesteuerten Betriebsstrategie überprüft.

2 Topologie des elektrischen Antriebsstranges

Der im vorliegenden Beitrag vorgestellte elektrische Antriebsstrang wurde entwickelt für den Einsatz in Parallel-Hybrid-Fahrzeugen mit konventionellem verbrennungsmotorischen Antrieb an der Vorderachse und einer kompakten elektrischen Achsantriebsseinheit an der Hinterachse. Neben klassischen Hybridfunktionalitäten wie Boosten, Lastpunktanhebung und Rekuperieren sind damit auch ein temporärer Allradantrieb, Torque-Vectoring und ein rein elektrischer Betrieb im Stadtverkehr möglich.

Bild 1 zeigt die Grundstruktur des elektrischen Antriebsstranges. Neben der in diesem Artikel detailliert beschriebenen Antriebseinheit mit integriertem Doppelumrichter kommt ein elektrisches Traktionsenergiespeichersystem mit höchster Funktionalität zum Einsatz.

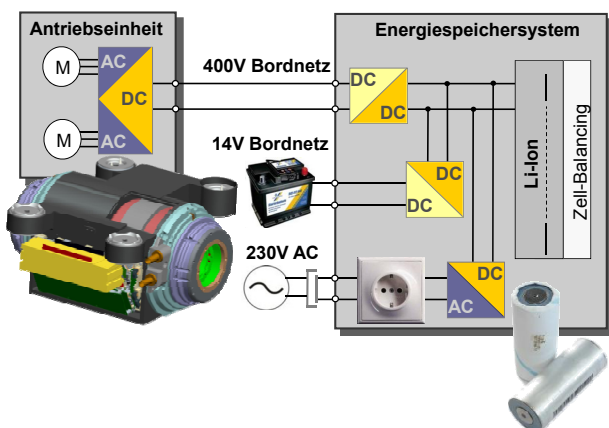


Bild 1 Topologie des Hybrid-Antriebsstranges

Im Energiespeichersystem integrierte DC/DC-Wandler dienen einerseits der Versorgung des vorhandenen 14 V-Bordnetzes und stellen andererseits eine konstante, vom Ladezustand der Batterie unabhängige Ausgangsspannung von bis zu 400 V für den Umrichter-Zwischenkreis zur Verfügung. Ein bidirektionales Ladegerät ermöglicht neben dem Laden der Batterie an der Steckdose (Plug-In-

Betrieb) auch ein Rückspeisen elektrischer Energie in das öffentliche Stromnetz, beispielsweise für Netzstützfunktionen. Zusätzlich wird ein 230 V Wechselstromanschluss im Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Das übergeordnete Batteriemanagementsystem überwacht die Spannungen und Temperaturen der Einzelzellen. Außerdem ermöglicht die Elektronik eine passive Zell-Symmetrierung innerhalb des Zell-Stacks. [1]

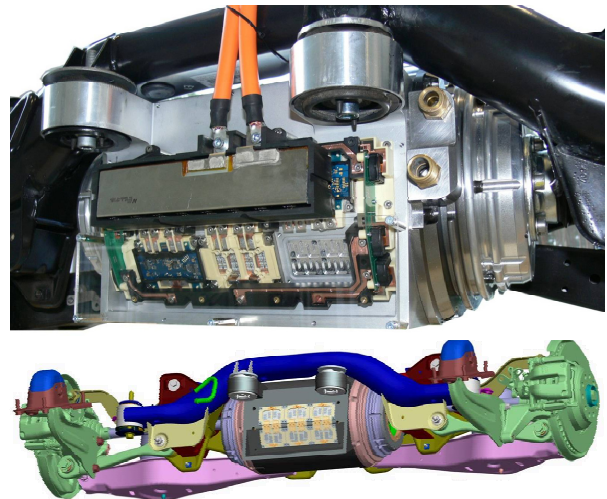


Bild 2 Kompakte Achs-Antriebseinheit mit integriertem Doppelumrichter

Bild 2 zeigt das entwickelte Achsantriebssystem. Dieses ist realisiert durch zwei mechanisch voneinander unabhängige Asynchronmaschinen mit zugehörigem Planetengetriebe die jeweils ein Rad der elektrifizierten Achse antreiben. Die beiden Frequenzumrichter für die Traktionsmaschinen sind wirkortnah in das Antriebssystem integriert. Positioniert wird das System in dem für die allradgetriebene Fahrzeugvariante vorgesehenen Bauraum für das Hinterachs-Differential. Die Drehmomentübertragung von den Getriebeausgängen zu den Rädern erfolgt dabei über konventionelle Gelenkwellen.

Tabelle 1 zeigt Auszüge einer Entscheidungsmatrix zur Auswahl einer geeigneten E-Maschinenvariante für den Einsatz in mechanisch starr gekoppelten Einzelradantrieben. Aufgrund des begrenzten axialen Bauraums scheidet dabei fremderregte Synchronmaschinen durch den zusätzlichen Platzbedarf für die Schleifringe zur Bestromung der Rotorwicklung aus.

Tabelle 1 Auswahlmatrix E-Maschinenvariante für direkt gekoppelte elektrische Einzelradantriebe

	ASM	PSM
Leistungsdichte	-	+
Wirkungsgrad Ankerstellbereich	-	+
Wirkungsgrad Feldschwächbereich	+	-
Schleppverluste	+	-
Verhalten im Fehlerfall (Kurzschlussfall)	+	-

Permanenterregte Synchronmaschinen (PSM) ermöglichen im Vergleich zu Asynchronmaschinen (ASM) einerseits Antriebssysteme mit höherer Leistungsdichte sowie besseren Wirkungsgraden im Ankerstellbereich durch geringere Rotorverluste. Andererseits treten jedoch im Fehlerfall des Motors bei zwei- bzw. dreiphasigen Wicklungskurzschlüssen oder bei einer Fehlfunktion des Antriebsumrichters unkontrollierbare Pendel- bzw. Bremsmomente auf. Aufgrund der Auslegung als Einzelradantrieb würde dies zum Abbremsen eines Rades der elektrifizierten Achse führen und somit unkontrollierbare Fahrzustände hervorrufen. Dieses sicherheitskritische Verhalten war in der Konzeptphase des vorgestellten Projektes das Ausschlusskriterium für die permanenterregte Synchronmaschine [2].

Durch die Möglichkeit, das magnetische Feld innerhalb der Asynchronmaschine komplett zu deaktivieren, kann bei diesem Maschinentyp auf mechanische Kupplungsfunktionen verzichtet werden. Im Schleppbetrieb bei deaktivierten E-Maschinen treten außer mechanischen Reibungsverlusten im Getriebe und in der Motorlagerung keine nennenswerten Verluste auf (siehe auch Bild 3). Die Leistungsklasse des Antriebssystems ist mit insgesamt 40 kW Spitzenleistung so gewählt, dass - je nach Energieinhalt des elektrischen Energiespeichers - ein Hybridbetrieb oder auch ein rein elektrisches Fahren im Plug-In-Modus möglich ist. Bei einer Eckdrehzahl von 2500 1/min ergibt sich ein Nennmoment von 80 Nm je Maschine bei S6-10% ED Betrieb und einer Nenn-Zwischenkreisspannung von 400 V.

Der für dieses System entwickelte Doppelumrichter für beide E-Maschinen zeichnet sich durch eine direkte mechatronische Integration in das elektrische Antriebssystem aus. Neben der Minimierung notwendiger Kabel- und Steckverbindungen durch die wirkortnahe Installation ist die Nutzung des Kühlmantels der E-Maschinen für die Kühlung der Leistungsmodule als einer der Hauptvorteile der Systemintegration zu sehen. Die elektrischen Kenndaten des Umrichtersystems lauten wie folgt:

- 45 kVA Ausgangsscheinleistung je Umrichter,
- 10 kHz Schaltfrequenz,
- 400 V Nenn-Zwischenkreisspannung,
- gemeinsamer 0,5 mF Zwischenkreis-Kondensator für beide Umrichter,
- direktgekühlte Halbbrücken-Leistungsmodule mit je 2 Infineon 600 V-IGBT³ sowie 2 Infineon Em-Con3-Dioden pro Schalter.

Die Implementierung der integrierten Achsantriebseinheit erfolgte an der Hinterachse der IISB-Hybrid-Versuchsplattform auf Basis eines Audi TTs mit konventionellem 2,0L Verbrennungsmotor an der Vorderachse.

3 Analyse realer Belastungsprofile des elektrischen Antriebsstrangs

Die von einem Antriebssystem für Konstantfahrt mit einer bestimmten Geschwindigkeit bereitzustellende Leistung ergibt sich aus der Summe des zu überwindenden Reibungs- und Luftwiderstandes des jeweiligen Fahrzeuges,

welche sich nach den folgenden Formeln berechnen lassen:

$$F_{ges} = F_{Luftreibung} + F_{Rollreibung} \quad (1)$$

$$F_{Luftreibung} = \frac{1}{2} A_{Stirn} c_w \rho_{Luft} v^2 \quad (2)$$

$$F_{Rollreibung} = m g \mu_R \quad (3)$$

mit

- A_{Stirn} = Fahrzeug-Stirnfläche
- c_w = Strömungswiderstandskoeffizient
- ρ_{Luft} = Dichte der Luft
- v = Fahrzeuggeschwindigkeit
- m = Fahrzeuggewicht
- g = Erdbeschleunigung
- μ_R = Rollwiderstandsbeiwert

Bild 3 zeigt die für das Erreichen einer bestimmten Endgeschwindigkeit benötigte Antriebsleistung für ein Fahrzeug aus der Kategorie der Kleintransporter und für ein Sportcoupé. Durch die quadratische Abhängigkeit der Luftreibung von der Geschwindigkeit steigt der Leistungsbedarf bei höheren Geschwindigkeiten überproportional an. Im Bild 3 sind zudem die gemessenen Schleppverluste der Achsantriebseinheit angegeben. Das Bild verdeutlicht, dass bei deaktivierten und passiv mitgeschleppten Elektromotoren (vorwiegend bei Geschwindigkeit > 80-100 km/h) die auftretenden Schleppverluste auf einen vernachlässigbaren Anteil am gesamten Leistungsbedarf reduziert werden konnten.

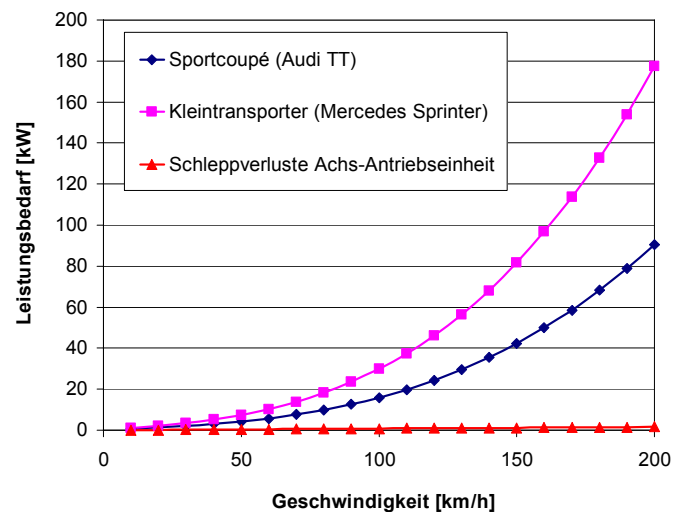


Bild 3 Benötigte Antriebsleistung sowie gemessene Schleppverluste der Achs-Antriebseinheit bei bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeiten

Die Fahrzeugparameter für den im Folgenden als Referenzfahrzeug betrachteten Audi TT lauten wie folgt:

- c_w -Wert = 0,33
- Fahrzeug-Stirnfläche = 2,13 m²
- Fahrzeuggewicht = 1500 kg
- Rollwiderstandsbeiwert = 0,015
- Getriebeuntersetzung E-Maschine:Rad = 6:1

Tabelle 2 zeigt die Leistungs- und Drehmomentanforderungen an jede der beiden E-Maschinen der Achsantriebs-

einheit bei einer Konstantfahrt des Referenzfahrzeuges mit 30 km/h, 50 km/h und 100 km/h.

Tabelle 2 Belastung jeder der beiden Asynchronmaschinen der integrierten Antriebseinheit bei Konstantfahrt

	30 km/h	50 km/h	100 km/h
Leistung [W]	1052	2145	7962
Drehzahl [1/min]	1460	2434	4868
Drehmoment [Nm]	7,6	9,3	17,2

Die Leistungsanforderungen liegen insbesondere bei typischen Geschwindigkeit im Stadtverkehr deutlich im Teillastbereich des Systems verglichen mit der Nennleistung von 20 kW sowie dem Nennmoment von 80 Nm pro E-Maschine. Neben der Betrachtung konstanter Belastungspunkte setzen zielgerichtete Optimierungsprozesse die Analyse transientser Fahrzyklen voraus. Dazu werden im Folgenden Untersuchungen vorgestellt, die mit einer am Fraunhofer-IISB entwickelten Elektro- und Hybridfahrzeug Simulationsumgebung in Matlab/SIMULINK™ durchgeführt wurden.

3.1 Fahrzyklus Analyse

Als Referenzbelastung werden die Artemis-Jam, Artemis-Urban und Artemis-Road Fahrzyklen untersucht, die typische Situationen während Stau-, Stadt- bzw. Überlandfahrten darstellen. Simuliert wurde dabei ein rein elektrischer Fahrbetrieb des Referenzfahrzeuges Audi TT, bei dem die gesamte Antriebsleistung von den E-Maschinen zur Verfügung gestellt wird.

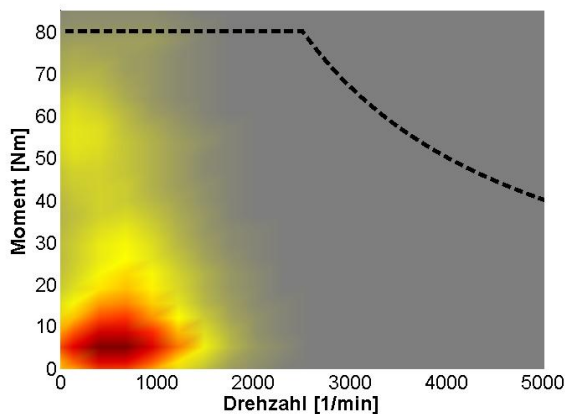


Bild 4 Belastungsprofil Artemis-Jam

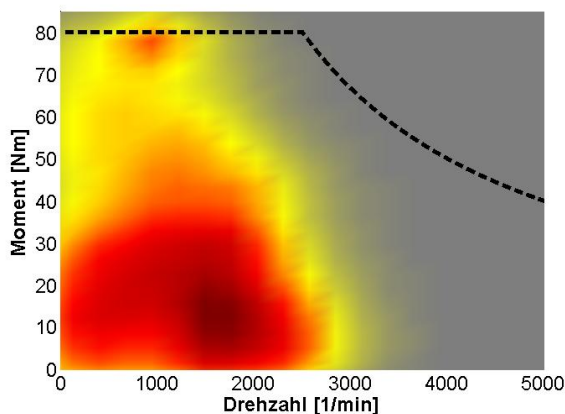


Bild 5 Belastungsprofil Artemis-Urban

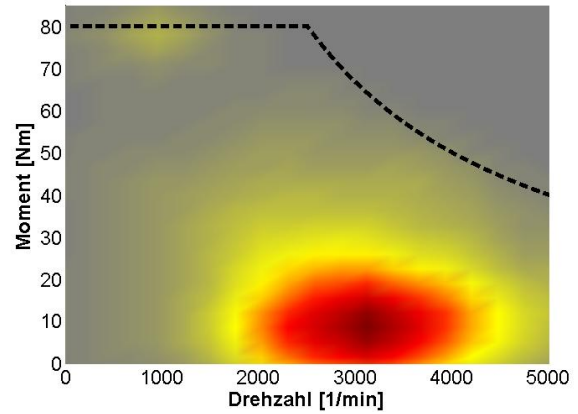


Bild 6 Belastungsprofil Artemis-Road

Die Belastungsprofile sind in Bild 4 bis Bild 6 zu sehen. Die Darstellung erfolgt dabei in Bezug auf das Drehmoment-/Drehzahl Kennfeld einer der beiden E-Maschinen der Antriebseinheit. Die schwarz gestrichelte Linie stellt dabei den Nennbetrieb der E-Maschinen bei 400 V Zwischenkreisspannung dar. Rot markierte Bereiche kennzeichnen Belastungspunkte mit höchster Häufigkeit, graue Bereiche jene mit niedrigster.

Auffällig sind die bei allen Fahrzyklen häufig auftretenden Belastungen im Teillastbereich bis maximal 30 Nm bei verschiedenen Drehzahlen. Die insbesondere bei den Fahrzyklen ‚Urban‘ und ‚Road‘ sichtbaren Drehmomentspitzen im Bereich von 80 Nm stellen Beschleunigungsphasen des Fahrzeuges dar. Diese Dynamikanforderung begründete die Festlegung des Maximalmoments des Antriebssystems.

Die Belastungsprofile unterstreichen die Notwendigkeit, die Teillasteffizienz des gesamten elektrischen Antriebsstranges detaillierter zu untersuchen und zu optimieren. Nach einer Analyse des Effizienzverhaltens des integrierten Antriebssystems in Kapitel 3.2 wird dazu in Kapitel 4 der Ansatz einer variablen Zwischenkreisspannung untersucht. Diese Vorgehensweise bietet den Vorteil, dass bei Vorhandensein eines Hochvolt-DC/DC-Wandlers zwischen elektrischem Energiespeicher und den Antriebsumrichter Wirkungsgrad-Optimierungen ohne zusätzlichen Hardware-Aufwand realisiert werden können.

3.2 Effizienzverhalten des mechatronischen Gesamtsystems ‚Antriebseinheit‘

Der Gesamtwirkungsgrad η_{Ges} der elektrischen Antriebseinheit lässt sich direkt aus der aufgenommenen elektrischen DC-Leistung P_{DC} und der abgegebenen mechanischen Antriebsleistung P_{mech} berechnen. Die dabei anfallenden Gesamtverluste P_{V_Ges} unterteilen sich in Motor- (P_{V_Mot}), Umrichter- (P_{V_Umr}) und Getriebeverluste (P_{V_Getr}), die im Weiteren detaillierter untersucht werden.

$$\begin{aligned}
 \eta_{Ges} &= P_{mech} / P_{DC} \\
 &= (P_{DC} - P_{V_Ges}) / P_{DC} \\
 &= (P_{DC} - P_{V_Mot} - P_{V_Umr} - P_{V_Getr}) / P_{DC}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Bild 7 zeigt das Wirkungsgradkennfeld der in der Achsantriebseinheit eingesetzten Asynchronmaschine bei Be-

trieb mit feldorientierter Regelung. Für diese Maschinenart typisch liegt das Wirkungsgradmaximum mit Werten von ca. 90 % im Feldschwächbereich. Der im Vergleich zu permanent-erregten Synchronmaschinen niedrigere Wirkungsgrad im Ankerstellbereich resultiert aus den erhöhten Kupferverlusten durch den für die Erzeugung des magnetischen Feldes benötigten Stromfluss in den Rotorstäben.

Die durch diese Verluste resultierende Erwärmung des Läufers stellt in Kombination mit der oftmals unzureichenden Wärmeabfuhr durch turbulente Konvektionsvorgänge im Luftspalt sowie über Wärmeleitung durch die mit hohen thermischen Widerständen behafteten Wälzlager den limitierenden Faktor für die maximal entnehmbare Dauerleistung der E-Maschinen dar. Zusammen mit dem transienten thermischen Verhalten der Wickelköpfe sind diese Punkte auch Fokus weiterführender simulativer sowie messtechnischer Untersuchungen, die für den Einsatz von Asynchronmaschinen in Traktionsantrieben von Interesse sind.

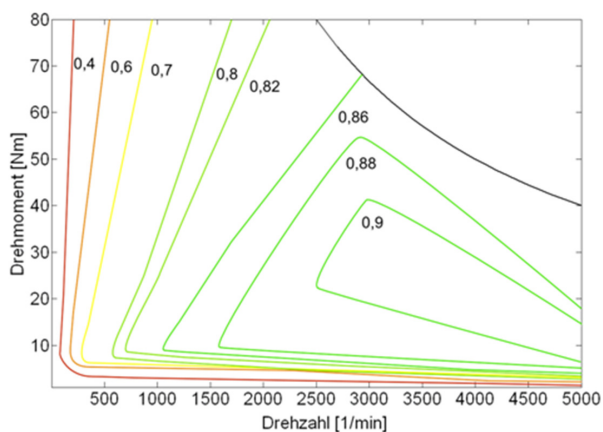


Bild 7 Wirkungsgradkennfeld der Asynchronmaschine der elektrischen Antriebseinheit

Die Verluste in den ölsumpfgeschmierten Planetengetrieben lassen sich in lastabhängige sowie lastunabhängige Verluste in den Verzahnungen (P_Z bzw. P_{Z0}) und den Wälzlagern (P_L bzw. P_{L0}) unterteilen. Neben Zusatzverlusten (P_X) sind auch die Verluste in den Wellendichtungen (P_D) zu berücksichtigen, die oftmals eine lineare Abhängigkeit von der Wellendrehzahl aufweisen [3].

$$P_{V_Ger} = P_Z + P_{Z0} + P_L + P_{L0} + P_D + P_X \quad (5)$$

Die in vielen Belastungspunkten dominanten Verzahnungsverluste resultieren aus der drehmomentabhängigen Reibung der Zahnflanken sowie den vorwiegend drehzahlabhängigen Plansch- und Quetschverlusten aufgrund des zur Schmierung und Kühlung benötigten Öles. Bild 8 zeigt das Wirkungsgradkennfeld des ölsumpfgeschmierten Planetengetriebes der Antriebseinheit dargestellt für die jeweiligen Drehmoment- und Drehzahlwerte der Asynchronmaschinen an der Getriebeeingangsseite.

Auffällig sind die für Planetengetriebe typischen hohen maximalen Wirkungsgrade von über 98 % im Bereich größerer übertragener Momente sowie die starke Abhängigkeit des Wirkungsgrades vom anliegenden Drehmoment. Optimiertes Verhalten im Teillastbereich lässt sich dabei durch eine Minimierung der lastunabhängigen Verluste erreichen. Schleifende Radialwellendichtringe, welche für eine statische Abdichtung des Getriebe-Ölsumpfes gegenüber der Umgebung benötigt werden, stellen dabei den betragsmäßig größten Anteil der lastunabhängigen Verluste dar.

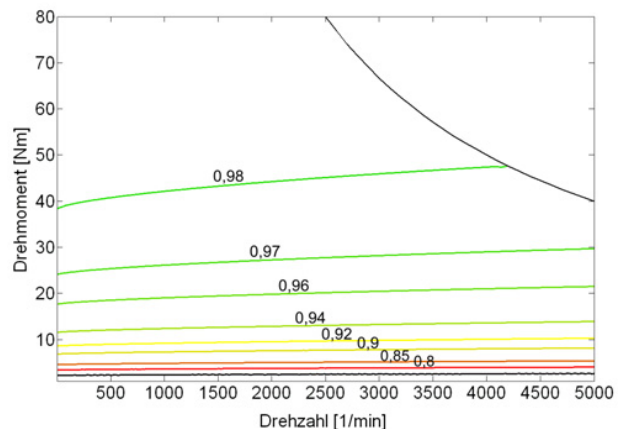


Bild 8 Wirkungsgradkennfeld Planetengetriebe

Diese Wirkungsgradverluste im Getriebe müssen bei einem Vergleich der zentralen Antriebseinheit mit direkt angetriebenen Radnabenmotoren berücksichtigt werden. Demgegenüber steht jedoch der Vorteil der zentralen Positionierung des vorgestellten Antriebssystems im gefederten Teil des Fahrzeuges. Dadurch wird eine verbesserte Fahrdynamik erreicht, da ungefederte Massen direkt am Rad vermieden werden. Gleichzeitig reduzieren sich auch Vibrations- und Schockbelastungen auf die Antriebskomponenten.

Die für die Wirkungsgradberechnung von IGBT-Zwischenkreisumrichtern hauptsächlich relevanten Verluste lassen sich in Schaltverluste (P_{Cond}) und Durchlassverluste (P_{Sw}) in den IGBTs und Dioden der Leistungsmodule unterteilen. Eine genauere Analyse des Effizienzverhaltens sowie Möglichkeiten zur Steigerung des Wirkungsgrades im Teillastbereich werden im Kapitel 4 untersucht und mittels Messungen verifiziert.

$$P_{V_Umr} = P_{Cond} + P_{Sw} \quad (6)$$

Bild 9 zeigt den aus den Teilsystemen Motor, Getriebe und Umrichter kombinierten Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems. Die Dominanz der Motorverluste lässt auch hier das Wirkungsgradoptimum im Bereich der Feldschwächung zu liegen kommen. Gerade im Ankerstellbereich ist eine deutliche Abhängigkeit des Wirkungsgrades von der Motordrehzahl erkennbar.

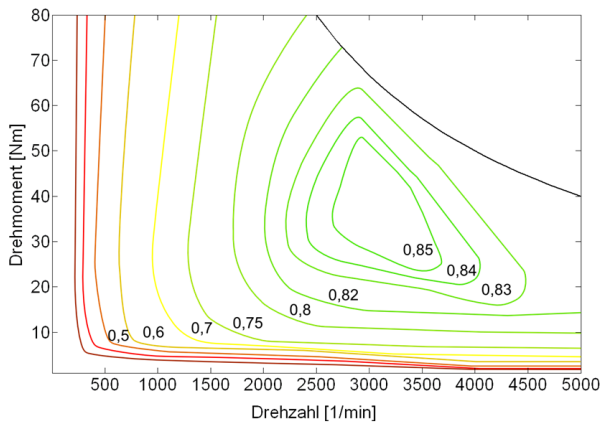


Bild 9 Wirkungsgradkennfeld Gesamtsystem der integrierten elektrischen Antriebseinheit

4 Umrichtereffizienz bei variabler Zwischenkreisspannung

Eine Variation der Zwischenkreisspannung hat direkten Einfluss auf die Effizienz von IGBT- Frequenzumrichtern durch die Möglichkeit, Schaltverluste in den Halbleiterbauteilen zu minimieren. Diese Verluste lassen sich nach [4] für die IGBTs und die zugehörigen Freilaufdioden bei sinusförmigen Motorströmen durch die folgende Formel beschreiben:

$$P_{Sw} = f_{Sw} E_{Sw} \hat{I} U_{DC} / (\pi I_{C-Sw} U_{DC-Sw}) \quad (7)$$

mit

- f_{Sw} = Umrichter-Schaltfrequenz
- E_{Sw} = Gesamte Schaltenergie (Summe aus Ein- und Ausschaltverlustenergie)
- \hat{I} = Scheitelwert des Motorstroms
- U_{DC} = Zwischenkreisspannung
- I_{C-Sw} = Referenzstrom für Schaltenergie
- U_{DC-Sw} = Referenzspannung für Schaltenergie

Aus der Formel ist ersichtlich, dass bei ansonsten gleichen Betriebsparametern eine reduzierte Zwischenkreisspannung (U_{DC}) eine lineare Abnahme der Schaltverluste ermöglicht. Die durch diese Maßnahme ebenfalls erreichte Reduzierung des Stromrippels auf der AC-Seite minimiert motorseitige Wirbelstromverluste sowie Kupferverluste in der Statorwicklung und in den Rotorstäben.

Gleichzeitig bedingt eine Reduzierung der Zwischenkreisspannung unterhalb der Nennspannung eine Verschiebung des Drehzahl-/Drehmomentkennfeldes der Antriebsmaschine (vgl. Bild 10). Die maximale ausgangsseitige AC-Spannung wird schon bei niedrigeren Drehzahlen erreicht, woraus ein früherer Beginn der Feldschwächung resultiert. Ebenfalls ersichtlich ist, dass mit abgesenkter Zwischenkreisspannung Belastungspunkte hoher Leistung (im Bereich rechts der rot gepunkteten Linie) nicht angefahren werden können.

Zur messtechnischen Untersuchung des Einflusses der Zwischenkreisspannung auf die Effizienz des Antriebsum-

richters wurden Wirkungsgradkennfelder am IISB-Testzentrum für Elektrofahrzeuge bei Zwischenkreisspannungen von 300 V und 400 V aufgenommen. Die Berechnung des Umrichterwirkungsgrades erfolgt dabei durch ein hochpräzises Leistungsmessgerät aus der aufgenommenen DC-Leistung und der abgegebenen AC-Leistung.

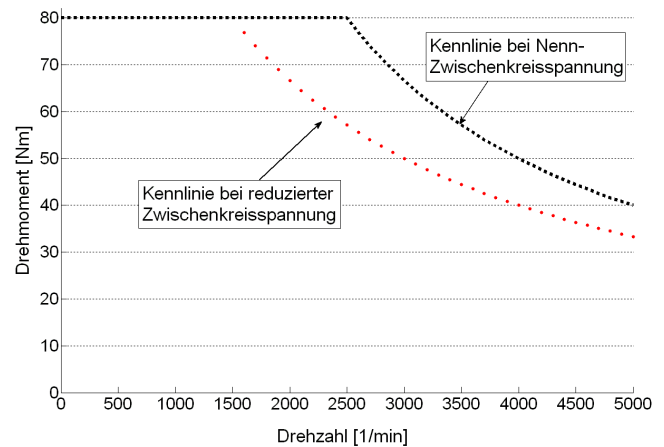


Bild 10 Einfluss der Umrichter-Zwischenkreisspannung auf das Motorkennfeld

Bild 11 und Bild 12 zeigen die Messergebnisse. Die Darstellung der Diagramme erfolgt wiederum in Bezug auf die Motordrehzahl und das Motormoment im jeweiligen Belastungspunkt.

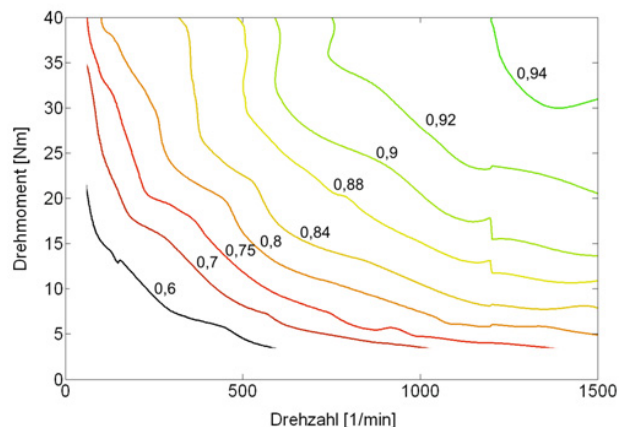


Bild 11 Wirkungsgradkennfeld Umrichtersystem bei 300 V Zwischenkreisspannung

Die Messung unterstreicht die Chancen zur Teillasto-optimierung falls dem Umrichter eine variable Zwischenkreisspannung zur Verfügung gestellt werden kann. Das Wirkungsgradkennfeld lässt sich damit hin zu besseren Werten bei niedrigen Drehzahlen und Drehmomenten verschieben. Bei einer Belastung von beispielsweise 30 Nm ist bei einer Zwischenkreisspannung von 300 V ein Wirkungsgrad von 0,9 schon bei ca. 650 1/min am Motor möglich, bei 400 V Spannung dagegen erst bei ca. 1000 1/min. Der maximale Umrichter-Wirkungsgrad liegt bei höheren Leistungen bei ca. 96 %.

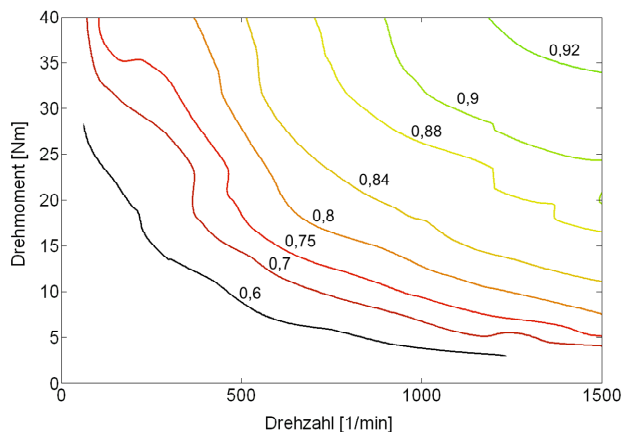


Bild 12 Wirkungsgradkennfeld Umrichtersystem bei 400 V Zwischenkreisspannung

5 Leistungsgesteuerte Betriebsstrategie für DC/DC-Wandler

Für die Möglichkeit der Zwischenkreisspannungsadaption wird ein Hochvolt-DC/DC-Wandler zwischen der Traktionsbatterie und den Antriebsumrichtern benötigt. Im Folgenden wird einerseits der für den untersuchten Antriebsstrang entwickelte bidirektionale Wandler vorgestellt. Andererseits werden die aus einer leistungsgesteuerten Betriebsstrategie des Wandlers resultierenden Möglichkeiten zur Effizienzsteigerung mittels Simulationen für verschiedene Fahrzyklen untersucht.

5.1 Einsatz von DC/DC-Wandlern im HV-Antriebsstrang

Der Einsatz bidirektionaler DC/DC-Wandler im Antriebsstrang moderner Hybridfahrzeuge ermöglicht eine von der Ausgangsspannung des Energiespeichers unabhängige konstante Zwischenkreisspannung im Umrichtersystem. Typische Lithium-Ionen Akkuzellen für den Einsatz in Traktionsbatterien moderner Hybrid- und Elektrofahrzeuge weisen ein Verhältnis der Ladeschlussspannung zur minimalen Entladespannung von $\sim 1,7$ - $1,8$ auf. Bei rein elektrischem Fahren muss im Gegensatz zum Betrieb als Hybrid-Energiespeicher ein weiterer Bereich der verfügbaren Akkukapazität genutzt werden, um in Relation zu den Energiespeicherkosten eine ausreichende Reichweite zu ermöglichen. Daraus resultiert eine starke Variation der Umrichter-Eingangsspannung bei Verzicht auf einen DC/DC-Wandler.

Eingehende Untersuchungen in [5] haben gezeigt, dass mit zunehmendem Verhältnis von minimaler zu maximaler Ausgangsspannung des elektrischen Traktionsenergiespeichers die zunächst auftretenden wirtschaftlichen Nachteile bei Einsatz eines DC/DC-Wandlers im HV-Antriebsstrang reduziert werden. Die nachfolgend durch den leistungsgesteuerten Einsatz des Wandlers beschriebenen Einsparpotentiale bieten weitere Optionen, den Kostennachteil in einen Kostenvorteil umzuwandeln.

Am Fraunhofer IISB werden hochkompakte bidirektionale Wandler für den Einsatz in elektrischen Antriebssträngen entwickelt. Der im vorgestellten Antriebsstrang realisierte luftgekühlte DC/DC-Wandler ist als 6-phasiges System aufgebaut. Diese Phasenzahl stellt das Optimum in Bezug auf die Leistungsdichte für die gewählte elektrische Ausgangsleistung dar. Einer Minimierung des Volumens notwendiger passiver Komponenten steht bei steigender Phasenzahl ein zunehmender Aufwand für Treiberschaltungen sowie Stromsensorik gegenüber [5].

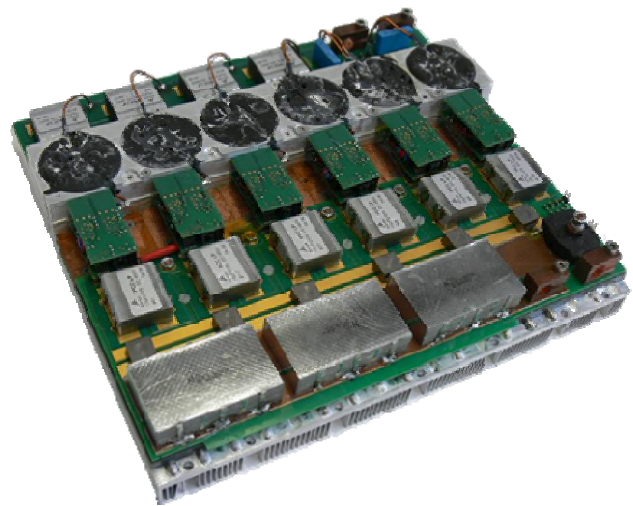


Bild 13 Bidirektionaler 50 kW Hochleistungs-DC/DC-Wandler in luftgekühlter Ausführung

Die Eckdaten des Wandlers sind wie folgt:

- 6-phasiger Aufbau
- Leistungsschalter Typ Infineon IGBT SGW30N60HS
- SiC-Dioden Typ Infineon SIDC24D60SIC3
- Schaltfrequenz: 100 kHz
- Eingangsspannung V_{LV} : 100 V bis V_1
- Ausgangsspannung V_{HV} : $V_1 + 10$ V bis 450 V
- Max. Batteriestrom: 150 A
- Max. Leistung: 50 kW
- Abmessungen: 280 x 250 x 45 mm³
- Leistungsdichte: 15 kW/l

Der hohe Wirkungsgrad sowie der flache konstruktive Aufbau ermöglichen die Platzierung des Wandlers direkt im elektrischen Energiespeicher. Eingebachte Heatpipes in der luftgekühlten Grundplatte des Wandlers führen die Wärme effektiv von den Bereichen hoher Verlustleistungsdichte unterhalb der Chips ab. Diese wirksame Wärmespreizung ermöglicht trotz der hohen Leistungsdichte die ausschließliche Entwärmung durch das vorhandene Kühlsystem der Akkuzellen und reduziert so den Aufwand für zusätzlich notwendige Kühlperipherie auf ein Minimum.

5.2 Ansätze einer leistungsgesteuerte Betriebsstrategie für DC/DC-Wandler

Die implementierte leistungsgesteuerte Betriebsstrategie des DC/DC-Wandlers passt die Zwischenkreisspannung bedarfsgerecht an, um so ein optimales Systemverhalten in Bezug auf Wirkungsgrad und Maximalleistung zu erreichen.

Liegt die tatsächlich benötigte Zwischenkreisspannung unterhalb der Batterieausgangsspannung, wird der DC/DC-Wandler deaktiviert. In diesem Modus fallen nur ohmsche Verluste in den Drosseln sowie in den Dioden des Wandlers an und die Batteriespannung liegt als Zwischenkreisspannung am Umrichter an. Die Wandlerverluste sind dadurch auf Werte von typischerweise $< 0,5\%$ reduzierbar.

Liegt die benötigte Zwischenkreisspannung zwischen der Batteriespannung und der Nenn-Zwischenkreisspannung von 400 V , so wird das Übersetzungsverhältnis des Wandlers reduziert. Dadurch lassen sich zusätzliche Wirkungsgradvorteile erzielen, da bei der gewählten Wandlertopologie der Wirkungsgrad mit zunehmendem Übersetzungsverhältnis von der Niederspannungsseite (U_{LV}) zur Hochspannungsseite (U_{HV}) sinkt. In Bild 14 ist dazu der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers für eine konstante Ausgangsspannung U_{HV} von 400 V und einen konstanten Strom I_{HV} auf der Hochspannungsseite von 38 A für verschiedene Spannungen U_{LV} an der Wandler-Eingangsseite dargestellt.

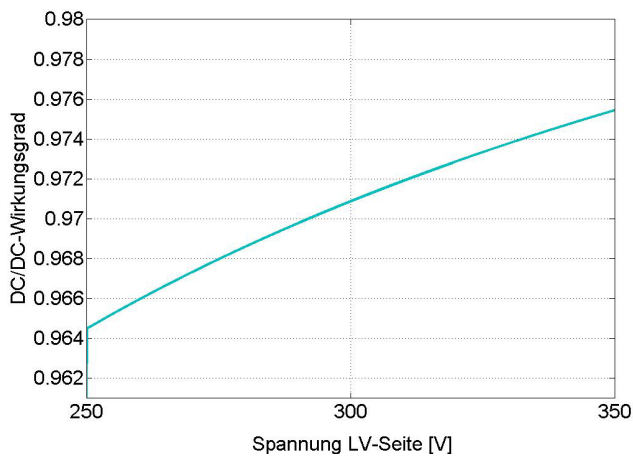


Bild 14 Wirkungsgrad DC/DC- Wandler bei konstant 400 V und 38 A auf der HV-Seite

Eine zusätzlich implementierte Phasenregelung des DC/DC-Wandlers steuert in Abhängigkeit vom Strom I_{LV} auf der Niederspannungsseite die Anzahl der aktiven Phasen des Wandlers zwischen 1 und 6. Dadurch kann der Wirkungsgrad im Teillastbereich gegenüber einem permanenten Betrieb mit allen Phasen gesteigert werden. Bei einer Spannungsanhebung von $U_{LV} = 280\text{ V}$ auf $U_{HV} = 400\text{ V}$ sind somit schon ab Strömen von rund 20 A Wirkungsgrade größer 97% realisierbar.

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Eingangsspannungsniveaus werden zwei unterschiedliche Batteriekonfigurationen verglichen (s. Tabelle 3). Als Referenzzelle wird der Typ 26650 der Firma A123-Systems in Li-

thium-Eisenphosphat-Technologie sowie einer Nennspannung von $3,3\text{ V}$ und einer Nennkapazität von $2,3\text{ Ah}$ gewählt.

Beide Batteriekonfigurationen weisen dieselbe Zellenanzahl und somit denselben Gesamtenergieinhalt auf. Durch die Verschaltung von 96 Zellen in Serie und 15 Zellen parallel (96s15p) ergibt sich bei Konfiguration 1 eine Nennspannung von 317 V , bei Konfiguration 2 mit 80 Zellen in Serie (80s18p) eine Nennspannung von 264 V . Der erhöhte Strombedarf auf der Niederspannungsseite bei Konfiguration 2 bedingt jedoch bei gleichem Einzelphasendesign eine gesteigerte Phasenzahl von acht im DC/DC-Wandler.

Tabelle 3 Gegenüberstellung der untersuchten Akku-konfigurationen

	Konfiguration 1	Konfiguration 2
Verschaltung	96s15p	80s18p
Nennspannung [V]	317	264
Ladeschlussspannung [V]	346	288
Entladeschlussspannung [V]	192	160
Energieinhalt [kWh]	10,9	10,9
Phasenzahl DC/DC	6	8

Bild 15 zeigt den Systemwirkungsgrad des elektrischen Antriebsstranges aus DC/DC-Wandler und Achsantriebs-einheit bei einer konstanten Beschleunigung des Fahrzeuges von der Motordrehzahl 1000 1/min auf 2500 1/min mit 20 Nm Drehmoment je E-Maschine. Umgerechnet auf die Fahrzeuggeschwindigkeit entspricht dies einem Beschleunigungsvorgang von ca. 20 km/h auf 50 km/h .

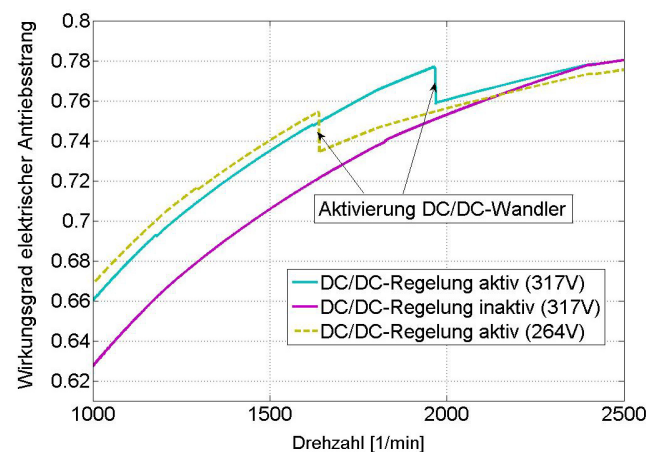


Bild 15 Effizienzverhalten über Motordrehzahl bei konstant 20 Nm

Die Grafik verdeutlicht, dass sich bei einer Batteriespannung von 317 V und aktiver Regelung Wirkungsgradvorteile von bis zu 3% bis zu einer Drehzahl von ca. 1950 1/min gegenüber einer inaktiven Regelung, d.h. einem abgeschalteten DC/DC-Wandler, ergeben. Bei dieser Batteriespannung wird ab einer Drehzahl von 1950 1/min der DC/DC-Wandler aktiviert. Bis zur E-Maschinen Eckdrehzahl von 2500 1/min ergeben sich noch leichte Wirkungsgradvorteile durch die reduzierte Anhebung der

Ausgangsspannung U_{HV} auf die tatsächlich benötigte Zwischenkreisspannung und nicht auf die Nenn-Zwischenkreisspannung von 400 V.

Beim Vergleich der Batteriekonfigurationen mit 317 V und 264 V Nennspannung ergeben sich bis zu einer Drehzahl von 1500 1/min, bei der der DC/DC-Wandler in beiden Konfigurationen deaktiviert ist, Vorteile für die 264 V-Variante aufgrund der stärker reduzierten Schaltverluste im Umrichtersystem. Demgegenüber steht jedoch der Nachteil, dass der DC/DC-Wandler schon bei niedrigeren Drehzahlen aktiviert werden muss, da die benötigte Zwischenkreisspannung früher die Batterieausgangsspannung übersteigt. Bei höheren Drehzahlen weist die 264 V-Variante leicht schlechtere Effizienz durch das höhere notwendige Übersetzungsverhältnis von der Nieder- auf die Hochspannungsseite auf.

5.3 Auswirkung des leistungsgesteuerten Einsatzes des DC/DC-Wandlers auf Fahrzyklus-Effizienz

Mittels des Matlab™-Simulationsmodells werden die Auswirkungen der in Kapitel 5.2 vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten für die Fahrzyklen Artemis-Jam, Artemis-Urban und Artemis-Road im reinen EV-Betrieb untersucht. Die Simulationen werden zunächst jeweils ohne aktive Regler durchgeführt. Der im ersten Schritt aktivierte Phasenregler (PR) schaltet nur die tatsächlich benötigte Phasenzahl des DC/DC-Wandlers in Abhängigkeit vom momentanen Strombedarf ein. Je nach benötigter Zwischenkreisspannung aktiviert oder deaktiviert der Zwischenkreisregler (ZR) den DC/DC-Wandler oder passt die Wandler-Ausgangsspannung bedarfsgerecht an. Die Simulationen wurden jeweils für beide in Tabelle 3 vorgestellten Batteriekonfigurationen durchgeführt.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt. Angegeben sind die jeweiligen durchschnittlichen Wirkungsgrade während des motorischen Betriebs der Komponenten DC/DC-Wandler, Umrichter und Batteriesystem sowie die Summe aus diesen Teilsystemen. Als Batterieladezustand bei Beginn der Fahrtsimulation wurden 70 % angesetzt.

Batteriekonfiguration 1 (96s15p):

Tabelle 4 Artemis-Jam (96s15p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	96,0	76,2	99,8	73,0
on	off	96,8	76,2	99,8	73,6
on	on	99,8	78,0	99,8	77,6

Tabelle 5 Artemis-Urban (96s15p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	97,1	89,2	99,4	86,1
on	off	97,2	89,2	99,4	86,2
on	on	99,1	90,1	99,4	88,8

Tabelle 6 Artemis-Road (96s15p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	97,3	94,7	99,2	91,4
on	off	97,3	94,7	99,2	91,4
on	on	97,5	94,9	99,2	91,8

Batteriekonfiguration 2 (80s18p):

Tabelle 7 Artemis-Jam (80s18p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	94,7	76,2	99,8	72,0
on	off	96,2	76,2	99,8	73,1
on	on	99,7	79,5	99,8	79,1

Tabelle 8 Artemis-Urban (80s18p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	96,2	89,2	99,4	85,3
on	off	96,7	89,2	99,4	85,7
on	on	98,3	90,7	99,4	88,7

Tabelle 9 Artemis-Road (80s18p)

PR	ZR	DC/DC	Umrichter	Batterie	Σ System
off	off	96,6	94,7	99,2	90,7
on	off	96,7	94,7	99,2	90,9
on	on	96,9	94,9	99,2	91,3

Die Phasenregelung (PR) im DC/DC-Wandler bringt durchschnittliche Wirkungsgradvorteile von bis zu 1,1 %. Größere Vorteile sind hier vor allem bei langsameren Fahrzyklen zu finden, da bei diesen aufgrund des geringeren Strombedarfs häufig mehrere Phasen abgeschaltet werden können.

Erwartungsgemäß treten die höchsten Wirkungsgradvorteile mit Zwischenkreisregler (ZR) bei Fahrzyklen mit niedriger Durchschnittsgeschwindigkeit auf. Dabei lassen sich deutliche Vorteile von mehreren Prozent erzielen. Beim Artemis-Road Fahrzyklus liegt die benötigte Umrichter-Zwischenkreisspannung, aufgrund der hohen E-Maschinendrehzahlen, sehr häufig bei der Maximalspannung. Somit reduziert sich die Einsatzdauer der Regelung und die Effizienzsteigerung auf ein Minimum.

Beim Vergleich der beiden Batteriekonfigurationen ergeben sich nur beim Stau-Fahrzyklus zusätzliche Vorteile der 80s18p Variante. Bei den Artemis-Urban und Artemis-Road Fahrzyklen verschlechtert dagegen das höhere Übersetzungsverhältnis des DC/DC-Wandlers den Gesamtwirkungsgrad. Eine in dieser Publikation nicht weiter vertiefte Kostenbetrachtung ergibt zudem Nachteile für die Konfiguration mit 264 V-Nennspannung aufgrund der benötigten höheren Phasenzahl für den DC/DC-Wandler und der notwendigen größeren Kupferquerschnitte aufgrund des höheren Maximalstroms bei voller Leistung.

Durch die hohe Anzahl paralleler Zellen bei beiden Batteriekonfigurationen haben die am Innenwiderstand der Akkuzellen entstehenden Verluste betragsmäßig nur einen kleinen Anteil an den Gesamtverlusten.

6 Zusammenfassung

Integrierte elektrische Achsantriebssysteme bieten die Möglichkeit der weitestgehend bauraumneutralen Hybridisierung von vorhandenen Fahrzeugplattformen. Aus sicherheitstechnischen Betrachtungen ist für den gewählten konstruktiven Aufbau die Asynchronmaschine die geeignetste E-Maschinenvariante für den Einsatz als Traktionsmaschine.

Die Angabe von Wirkungsgraden bei Nennbelastung der Systemkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs hat nur bedingte Aussagekraft für das Effizienzverhalten während realer Belastungen im alltäglichen Fahrbetrieb. Effizienzanalysen müssen den ganzheitlichen Antriebsstrang betrachten und setzen ein Verständnis des Zusammenspiels der leistungselektronischen, der mechanischen und der motorischen Komponenten voraus.

Ohne zusätzlichen Hardware-Aufwand lässt sich durch eine leistungsgesteuerte Betriebsstrategie des DC/DC-Wandlers ein optimales Systemverhalten in Bezug auf Wirkungsgrad und Maximalleistung erreichen. Das dadurch offerierte Einsparpotential bietet die Chance die zunächst anfallenden Kostennachteile durch den DC/DC-Wandler zu reduzieren oder sogar Kostenvorteile zu erzielen.

7 Literatur

[1] Hofmann M., Rauh H., Eckardt B., März M.: *Mechanische Integration von Leistungselektronik in die Antriebseinheit eines Axle-Split-Hybrids*. Tagung "Praxis der elektrischen Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge", München, 2009, ISBN 978-3-8169-2817-1

[2] Schäfer H.: *Die Integration elektrischer Achsantriebe in Hybrid- und Elektrofahrzeuge*. Tagung „VDI Kongress-Getriebe in Fahrzeugen“, Friedrichshafen, 2009

[3] Strasser D.: *Einfluss des Zahnflanken- und Zahnkopfspieles auf die Leerlaufverlustleistung von Zahnradgetrieben*. Dissertation, Bochum, 2005

[4] Eckardt B., März M., Schletz A.: *Anforderungsgerechte Auslegung von Leistungselektronik im Antriebsstrang*. Tagung "Elektrik/Elektronik in Hybrid- und Elektrofahrzeugen", Haus der Technik, München, 17.-18. November 2008, expert verlag, ISBN 978-3-8109-2817-1, S. 213-225

[5] Eckardt B., Hofmann A., Zeltner S., März M.: *Automotive Powertrain DC/DC Converter with 25 kW/dm³ by using SiC Diodes*. Proc. of 4th Int. Conference on Integrated Power Systems (CIPS), Neapel, 2006