



© Dr.-Ing. Nöbert Schmidt |
REFU Drive GmbH Pfullingen

Skalierbare elektrische Antriebseinheit für Multifunktionsfahrzeuge

Die Chancen der Elektromobilität gelten nicht nur für den Pkw-Bereich, sondern besonders auch für im städtischen Bereich eingesetzte Multifunktionsfahrzeuge, da diese einen großen Anteil zur Lärm- und Luftverschmutzung beitragen. Um diesen Markt zu erschließen, entwickelt ein deutsches Konsortium eine skalierbare elektrische Antriebseinheit für Multifunktionsfahrzeuge. Das Entwicklungskonsortium besteht aus den mittelständischen Unternehmen Max Holder, Groschopp, REFU Drive und Nantis, der Universität Stuttgart sowie den Hochschulen Düsseldorf und Aalen und ist in das von der Innovationsberatung EurA AG geführte Netzwerk e-mobility eingebettet.

AUTOREN



Prof. Dr.-Ing. Markus Merkel
ist Leiter des Instituts für virtuelle Produktentwicklung der Hochschule Aalen.



Dipl.-Ing. Friedrich Mäckle
ist Geschäftsführer der Nantis GmbH in Stuttgart.



Dr.-Ing. Norbert Schmidt
ist Gruppenleiter Entwicklung Hardware bei der REFU Drive GmbH in Pfullingen.



Sebastian Reusch
ist Manager Alternative Antriebe bei der Max Holder GmbH in Reutlingen.

ANFORDERUNGEN AN DIE ELEKTRISCHE ANTRIEBSEINHEIT

Im Forschungsverbund wird eine elektrische Antriebseinheit entwickelt, die in Multifunktionsfahrzeuge und ähnliche Fahrzeugtypen integriert werden kann. Neben einer weitgehenden Skalierbarkeit auf verschiedene Leistungs- und Anwendungsbereiche war eine hohe Flexibilität des Antriebs ein wesentlicher Anspruch des Projekts. Das Konzept ist so aufgebaut, dass im Regelfall rein elektrisch gearbeitet wird. Um extreme Beanspruchungen zu ermöglichen oder um die Batterie zu speisen, kann jedoch auch das Range-Extender-Prinzip angewendet und somit ein Dieselaggregat zugeschaltet werden. Dabei ist das ganze Konzept

aber auch für zukünftige Entwicklungen offen und so aufgebaut, dass bei entsprechender Marktentwicklung der Diesel durch eine Brennstoffzelle ersetzt werden kann. Als Basis für den Funktionsdemonstrator eines elektrisch betriebenen Multifunktionsfahrzeugs dienen Karosserie und Fahrwerk des C70TC von Max Holder.

MOTORKONZEPTION

Das für die Elektrifizierung des Antriebsstrangs zur Verfügung stehende Bauvolumen im Demonstratorfahrzeug ist stark begrenzt. Daher ist es notwendig, eine Elektromotortechnologie mit möglichst hoher Drehmomentdichte und einem zusätzlichen Getriebe zu

verwenden. Als Traktionsmotortechnologie wurde eine synchrone Reluktanzmaschine (SynRM) ausgewählt, da diese aufgrund der nicht vorhandenen Rotorverluste einen höheren Wirkungsgrad als eine Asynchronmaschine (ASM) aufweist und im Vergleich zu einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine (PMSM) keine teuren und empfindlichen Seltene-Erden-Magnete verwendet.

Eine SynRM besteht aus zwei magnetisch aktiven Elementen: dem Stator mit der stromdurchflossenen Wicklung und dem sich mit dem Stator magnetfeld synchron drehenden Rotor. Für den Stator wird hier ein vierpoliger IEC-Blechschnitt (IEC132/4) mit einem Außendurchmesser von 200 mm verwendet.

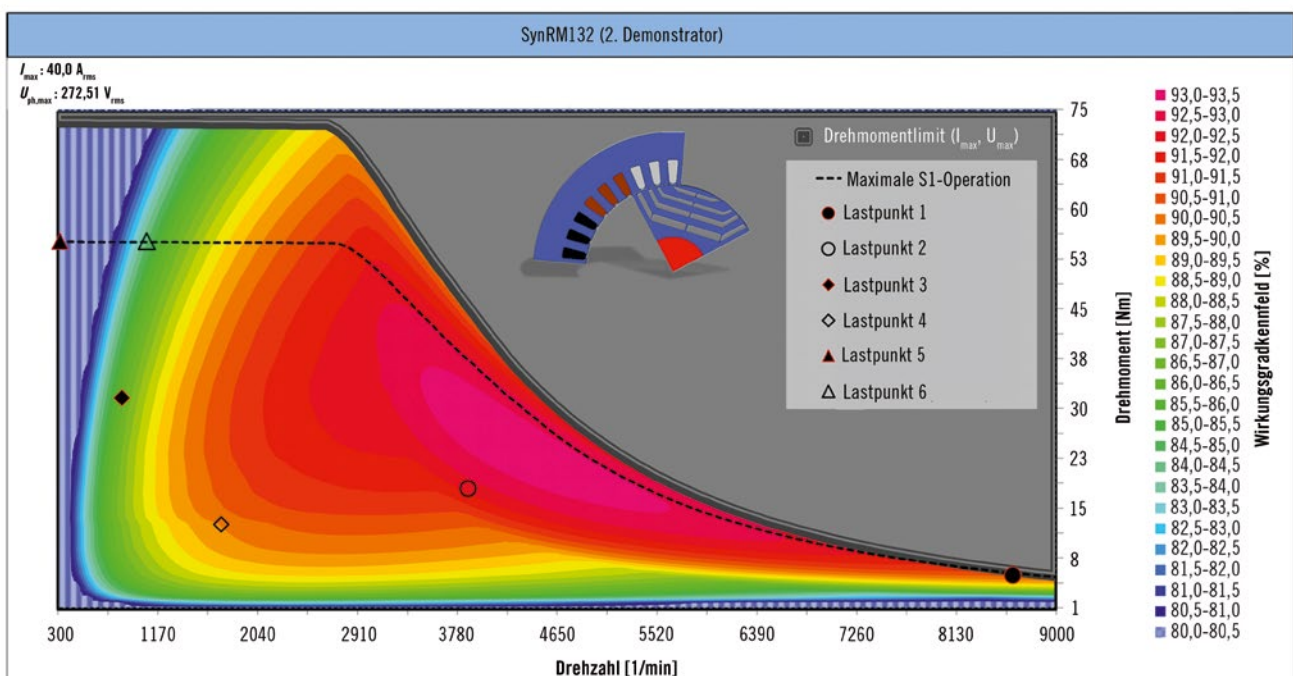


BILD 1 Wirkungsgradkennfeld der synchronen Reluktanzmaschine (© Dipl.-Ing. Andre Au | Hochschule Düsseldorf)

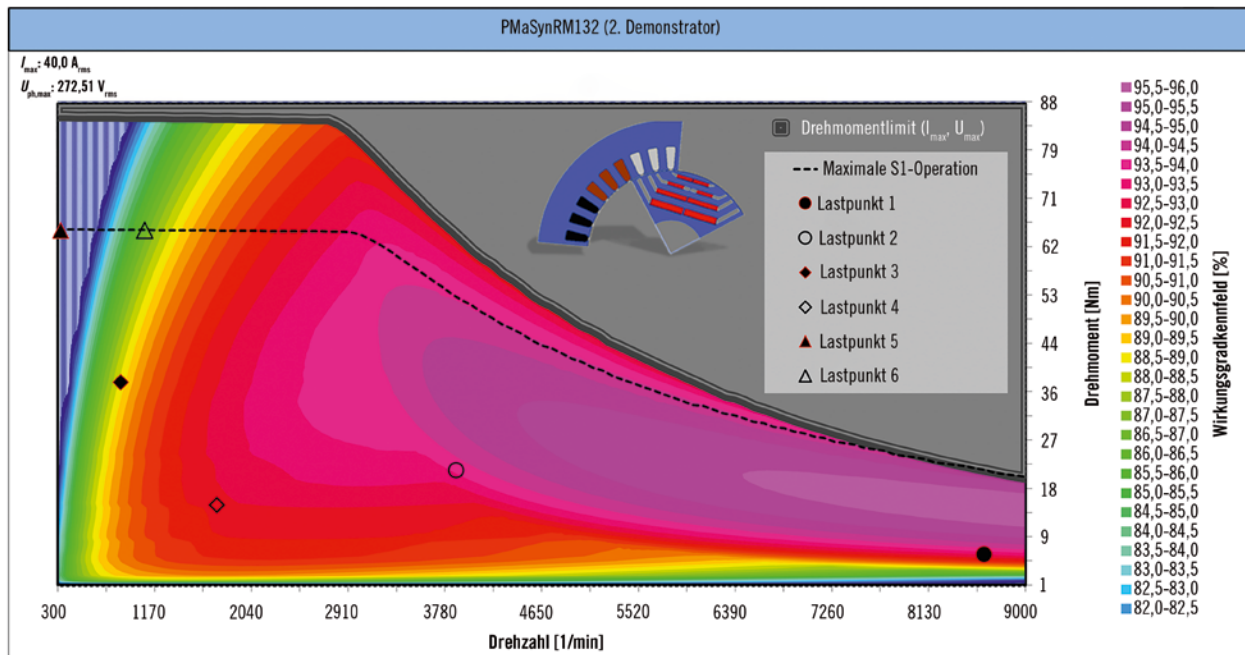


BILD 2 Wirkungsgradkennfeld der permanentmagnetisch unterstützten synchronen Reluktanzmaschine (© Dipl.-Ing. Andre Au | Hochschule Düsseldorf)

Dies hat den Vorteil, dass keine neuen teuren Wickel-, Einzieh- und Isolierwerkzeuge für die Fertigung und das Einbringen der Wicklung in das Statorblechpaket notwendig werden.

Die SynRM benötigt für ihre Funktion eine magnetisch anisotrope Rotorgeometrie. Diese Geometrie wird durch das Einbringen von Ausstanzungen, sogenannten Flussperren, in dem Rotorblechschnitt erzeugt. Es ergeben sich damit pro magnetischem Pol jeweils zwei magnetisch unterschiedlich wirkende Achsen (d-/q-Achse). Die q-Achse mit den enthaltenen Flussbarrieren weist dabei einen magnetisch größeren Widerstand (Reluktanz) auf als die viel Eisen enthaltende d-Achse. Das Wirkprinzip der Reluktanzmaschine basiert nun darauf, dass sich die Achse des Rotors mit dem kleineren magnetischen Widerstand (d-Achse) zum Magnetfeld des Stators ausrichtet, das durch die elektrischen Ströme in der Statorwicklung erzeugt wird. Das sich so ergebende Drehmoment ist umso größer, je größer die magnetische Anisotropie der Rotorgeometrie ist. Ein Maß für die Rotoranisotropie ist das Verhältnis der Induktivitäten der beiden unterschiedlichen magnetischen Achsen (L_d/L_q -Verhältnis). Je größer dieses Verhältnis ist, desto größer ist das erzeugbare Reluktanzmoment der Maschine.

Aufgrund der geforderten hohen Maximaldrehzahl (9000/min) und den damit einhergehenden großen, auf den Rotor wirkenden Zentrifugalkräften ist neben der elektromagnetischen Optimierung auch eine Optimierung der mechanischen Rotorgeometrie notwendig. Zur mechanischen Verstärkung des Rotors werden in die Flussperren Stege eingebracht. Die mechanisch notwendigen Stege stellen im elektromagnetischem Design jedoch störende magnetische Kurzschlüsse dar. Zur Beseitigung dieses Einflusses werden in den Flussbarrieren kleine preiswerte Ferritmagnete eingebracht. Der magnetische Fluss dieser Permanentmagnete erzeugt eine magnetische Sättigung der störenden Stege, sodass diese elektromagnetisch nicht mehr negativ wirksam sind. Man spricht dann von einer permanentmagnetisch unterstützten synchronen Reluktanzmaschine (PMSynRM), die eine verbesserte Performanz aufweist. Die finale Rotorgeometrie wird daher so designt, dass die Maschine sowohl als reine SynRM (ohne Ferritmagnete) als auch als PMSynRM (mit Ferritmagneten) aufgebaut werden kann.

Die PMSynRM zeichnet sich dadurch aus, dass der für das gleiche Drehmoment notwendige Motorstrom im Vergleich zur reinen SynRM um circa 12 % geringer ist und dass bei höheren Drehzahlen im

Feldschwächbereich bei gleicher Motorspannung (maximale Umrichter Ausgangsspannung) noch deutlich höhere Drehmomente erreicht werden können, BILD 1 und BILD 2. Dies ergibt sich aus der bei der PMSynRM – wenn auch nur sehr geringen – zusätzlich vorhandenen Permanentmagnetflussverkettung, die zu einer Verbesserung des Feldschwächbetriebs führt. Die PMSynRM ist damit in der Lage, alle geforderten Arbeitspunkte mit ausreichend hoher Sicherheit anzufahren. Die Motorkonzeption ist eine Gemeinschaftsarbeit zwischen der Hochschule Düsseldorf und Groschopp.

ANTRIEB

Das Multifunktionsfahrzeug ist als Knicklenker konzipiert. Die beiden Achsen sind als un gelenkte Starrachsen ausgeführt und tragen jeweils separate Antriebseinheiten. Beengte Bauraumbedingungen sind definiert durch die Kinematik des Knicklenkers, die Bodfreiheit für die Fahrt im unwegsamen Gelände und durch den Platzbedarf der Nebenaggregate, die dem Nutzerkreis auch bei der elektrischen Antriebsvariante die gewohnten Funktionalitäten bereitstellen sollen. Je Achse ist beidseitig ein Elektromotor mit angeflanschem Getriebe montiert, die in kompakter

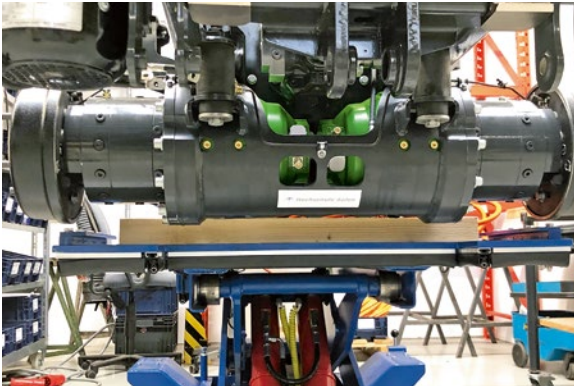


BILD 3 Komplette Einheit einer Antriebsachse
(© Sebastian Reusch | Max Holder GmbH Reutlingen)

Anordnung die übliche Spurbreite ermöglichen. Die windungssteife Achse schützt die Antriebseinheiten durch das nach unten geschlossene Profil vor Schmutz und Salzwasser und integriert die Verkabelung und Verschlauchung für Strom, Steuerung und Kühlwasser. **BILD 3** zeigt die komplette Einheit einer Antriebsachse (schwarz) im eingebauten Zustand mit Antriebseinheit (grün). Die Achse ist als Schweißkonstruktion ausgeführt und lässt sich durch den modularen Aufbau für Kleinserien bis 700 Stück/Jahr wirtschaftlich fertigen. Sie ist variabel im Knicklenker als Vorderachse und Hinterachse einsetzbar.

THERMOMANAGEMENT

Eine große Herausforderung für elektrische Antriebsplattformen ist beispielsweise die Klimatisierung. Im Winter muss ein vorgegebenes Wärmeniveau gehalten werden; im Sommer dagegen sind die Komponenten verstärkt zu kühlen. Dabei muss das entwickelte thermische System verlässlich arbeiten und darf nur einen sehr geringen Bauraum einnehmen. Das konzipierte Thermomanagement des Funktionsdemonstrators charakterisiert einen innovativen Lösungsansatz für eine moderne elektrische Antriebsplattform. Unterschiedliche Temperaturniveaus der einzelnen Antriebsstrangkomponenten müssen zuverlässig mit Kühlleistung abgedeckt werden. **BILD 4** zeigt die unterschiedlichen Temperaturbereiche, die im Fahrzeug herrschen. So arbeitet die Leistungselektronik der Antriebsmotoren auf einem Temperaturniveau von circa 45 °C, die Traktionsbatterie bei circa 35 °C und die Heizung für den Innenraum wie auch der Verbrennungsmotor

für die Nebenaggregate bei circa 90 bis 120 °C Kühlmitteltemperatur.

Das Thermomanagement besteht aus zwei voneinander unabhängigen Kühlkreisläufen. Der leistungstärkere Kreislauf der beiden kühlt die Antriebskomponenten. Diese umfassen die Leistungselektronik der Antriebsmotoren, die Antriebsmotoren selbst, die Leistungselektronik des Generators sowie den Generator. Die Leistungselektronik des Generators wird gleichermaßen zum Laden der Batterie aus dem Stromnetz benötigt. Die verbaute Kühlmittelpumpe wird leistungsbedarfsgerecht geregelt, was eine energieeffiziente Kühlung erlaubt. Zusätzlich werden die Lüftermotoren der Kühler auf dieselbe Weise gesteuert. Der kleinere Kühlkreislauf beinhaltet die Batteriekühlung beziehungsweise deren Heizung bei sehr niedrigen Außentemperaturen. Die Heizung der Batterie erfolgt mittels einer Standheizung, die auch zum Beheizen der Fahrerkabine genutzt wird.

Das Thermomanagement zeigte bereits in ersten Fahrversuchen des Funktionsdemonstrators am Scheitelrollenprüfstand

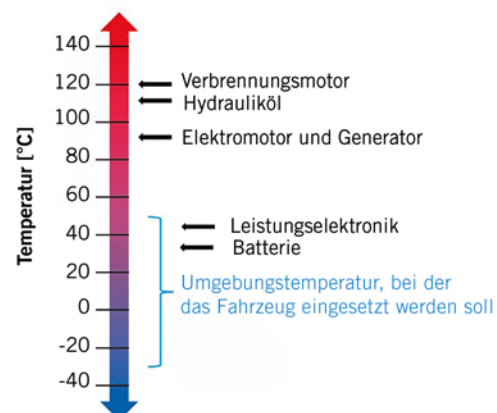
der Hochschule Aalen die geplante Wirkung. Eine Feinabstimmung bei unterschiedlichen Fahrsituationen wirkt sich positiv auf die Energieeffizienz aus. Dazu ist ein eigens entwickelter Fahrzyklus für Multifunktionsfahrzeuge einschließlich Rekuperation entwickelt und am Scheitelrollenprüfstand implementiert worden. Einzelne Lastpunkte, wie auch der komplette Fahrzyklus, bilden den gesamten Einsatzbereich des Fahrzeugs ab.

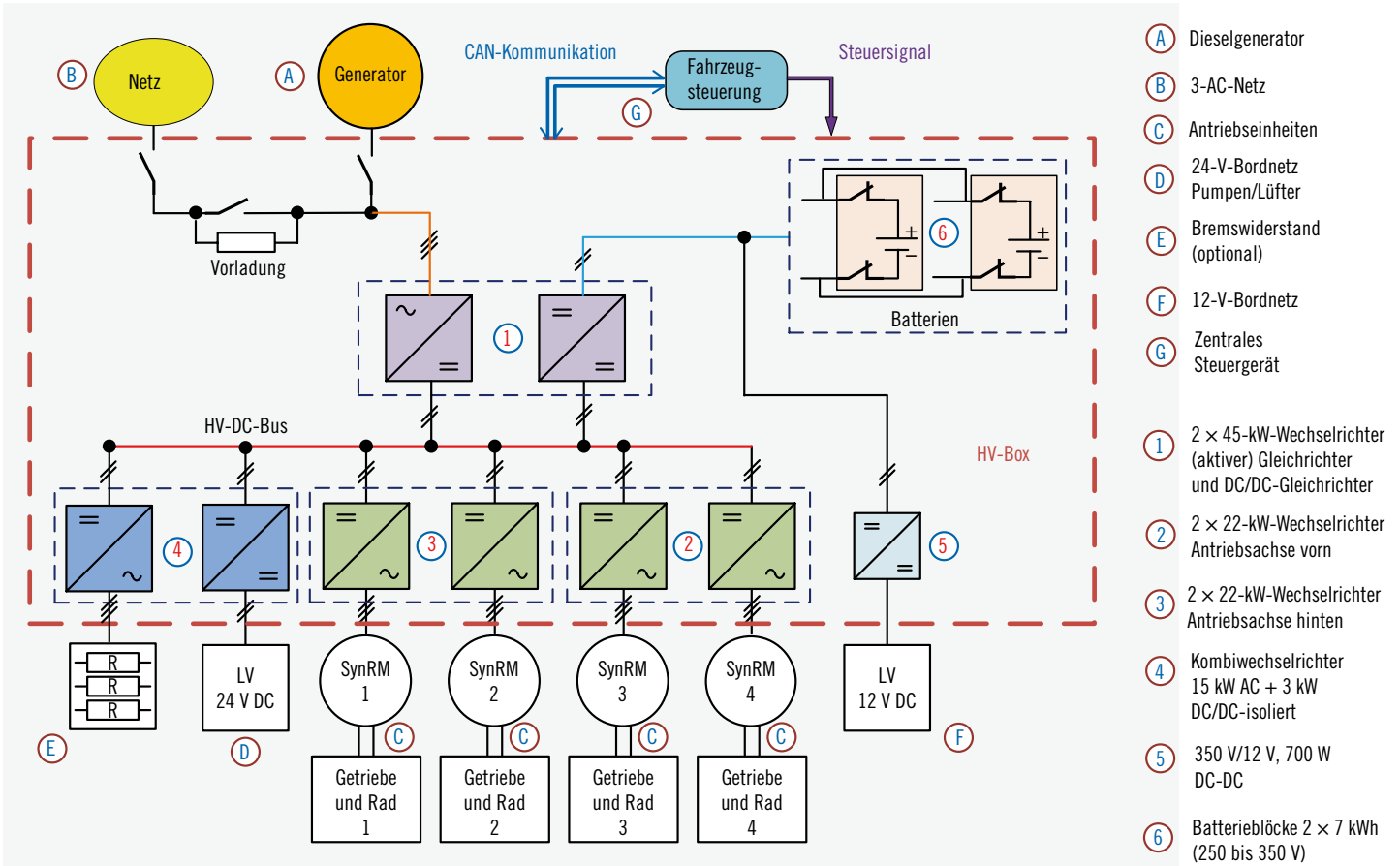
LEISTUNGSELEKTRONIK UND MODELLBASIERTE SOFTWAREENTWICKLUNG

Als zentrales Steuergerät wird das Modell HY-TTC 580 von Hydac/TTControl eingesetzt, das über eine hohe Anzahl von Ein- und Ausgängen verfügt, um die vielfältigen Systemkomponenten ansteuern und auslesen zu können. Die Kommunikation erfolgt generell über den CAN-Bus. Das Steuergerät verfügt über integrierte Überwachungsfunktionen und stellt den Entwicklern eine Programmierschnittstelle (API) in der Programmiersprache C bereit. Um sicherheitskritische und nicht sicherheitskritische Funktionsteile besser händeln und Änderungen effektiver testen zu können, wurde hier als Betriebssystem SafeRTOS verwendet. Dadurch konnte der Ansatz Mixed Criticality gut umgesetzt werden.

Das Fahrzeug wurde konzeptionell in einzelne Funktionen aufgeteilt, die dann modellbasiert in den Werkzeugen Mathworks Matlab, Simulink und Stateflow umgesetzt wurden. Dabei werden weitgehend grafische Programmier Techniken angewandt, die Funktionen und Abläufe verständlich abbilden. Funktionen können mit den verwendeten Werk-

BILD 4 Temperaturbereiche des Fahrzeugs
(© Prof. Dr.-Ing. Markus Merkel | Hochschule Aalen)





- (A) Dieselgenerator
- (B) 3-AC-Netz
- (C) Antriebseinheiten
- (D) 24-V-Bordnetz Pumpen/Lüfter
- (E) Bremswiderstand (optional)
- (F) 12-V-Bordnetz
- (G) Zentrales Steuergerät
- (1) 2 x 45-kW-Wechselrichter (aktiver) Gleichrichter und DC/DC-Gleichrichter
- (2) 2 x 22-kW-Wechselrichter Antriebsachse vorn
- (3) 2 x 22-kW-Wechselrichter Antriebsachse hinten
- (4) Kombiwechselrichter 15 kW AC + 3 kW DC/DC-isoliert
- (5) 350 V/12 V, 700 W DC-DC
- (6) Batterieblöcke 2 x 7 kWh (250 bis 350 V)

BILD 5 Struktur des leistungselektronischen Systems in der HV-Box (© Dr.-Ing. Norbert Schmidt | REFU Drive GmbH Pfullingen)

zeugen bereits simuliert werden, noch bevor ein reales Fahrzeug aufgebaut ist. Weitergehende Testaufbauten mit dem Steuergerät und den an den jeweiligen Funktionen beteiligten Einzelkomponenten stellen sicher, dass die virtuellen Modelle auch auf die reale Welt übertragbar sind. So konnte beispielsweise die Ansteuerung der elektrischen Hydraulikpumpe vorab simuliert und später erfolgreich auf das Fahrzeug übertragen werden. Eine Toolchain übersetzt die Modelle aus der Modellebene in C-Code, der dann in einem zweiten Schritt in einen ausführbaren Maschinencode für das Steuergerät übersetzt wird.

BILD 5 zeigt die Struktur des leistungselektronischen Systems (1 bis 6) mit seiner Anbindung an das Gesamtsystem (A bis F). Die verschiedenen Energiewandlungsfunktionen wurden durch kompakte Doppelwechselrichter von Refu realisiert. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im Bereich der Fahrzeugachse wurde die gesamte Leistungselektronik in ein eigenes Gehäuse verlagert, der sogenannten HV-Box. Diese ent-

hält neben der Leistungselektronik auch die Batteriezellen, einschließlich Batteriemanagementsystem (BMS). Die kompakte Einheit wird an einen externen Kühlkreislauf angeschlossen und dient als mechanische Schnittstelle zum Fahrzeug. Durch die schwenkbare Anordnung ist weiterhin die volle Funktionalität des Fahrzeugs gewährleistet.

Grundbaustein zur Realisierung der einzelnen Energiewandlungsfunktionen im Fahrzeug, **BILD 5** (1 bis 4), ist ein Doppel-Wechselrichter. Dieser besteht aus zwei aktiven B6-Brücken, die von einer Steuerplatine angesteuert werden und sich einen Zwischenkreis teilen. Durch geeignete Anbindung an die Peripherie und den Einsatz der entsprechenden Funktionsblöcke in der Firmware können auf sehr einfache Weise verschiedene Funktionalitäten realisiert werden. Für den Versuchsträger wurden daraus die im Folgenden gezeigten Gerätetypen abgeleitet:

- Generatorwechselrichter und DC/DC-Steller: Bei Verbindung mit dem Generator kann die Hochvolt(HV)-

Busspannung aktiv geregelt werden. Alternativ ist ein Ladebetrieb über das Netz realisiert. Zusätzlich arbeitet der zweite Wechselrichter als bidirektionaler DC/DC-Steller.

- Motorwechselrichter: Jeweils beide Motoren einer Achse werden über die gemeinsame Steuerung unabhängig voneinander geregelt.
- Kombiwechselrichter: Die erste B6-Brücke ist für den Antrieb von Hilfsaggregaten vorgesehen. Üblicherweise ist dies die Lenkpumpe. Mit dem zweiten Wechselrichter wird ein isolierter DC/DC-Steller für das 24-V-Bordnetz realisiert.

ABSCHLIESSENDE TESTS

Nach dem rechnerischen Nachweis der Erreichbarkeit der gesteckten Ziele und vielen erfolgreichen Detailtests auf verschiedenen Prüfständen ist der Funktionsdemonstrator nun komplett aufgebaut und mit der zentralen Steuerung versehen. Das Gesamtsystem absolviert derzeit umfangreiche Systemtests, um seine Eignung für

unterschiedliche Einsatzgebiete und Beanspruchungsarten nachzuweisen. Dieses Konzept ist wegen seiner Flexibilität auch für andere Branchen, zum Beispiel in der Bauindustrie, einsetzbar.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein Entwicklungskonsortium aus mittelständischen Unternehmen und universitären Einrichtungen entwickelte eine elektrische Antriebseinheit für Multifunktionsfahrzeuge, die in Karosserie und Fahrwerk eines Fahrzeugs von Max Holder integriert wurde. Forschungsschwerpunkte dieses Projekts waren die Elektromotorkonzeption sowie die Realisierung des Thermomanagements und der Leistungselektronik. Der elektrische Antrieb besteht aus einer PMaSynRM, die gegenüber der SynRM eine verbesserte Performanz aufweist. Er ist mit dem Getriebe in einer gemeinsamen Achse mit dem Rad verbunden. Kennzeichen des Thermomanagementsystems sind zwei voneinander unabhängige Kühlkreisläufe, um die unterschiedlichen Komponenten des Fahrzeugs auch bei wechselnden Außentemperaturen und Fahrzyklen optimal versorgen zu können. Das zentrale Steuergerät verfügt über integrierte Überwachungsfunktionen, die auch außerhalb des Fahrzeugs simuliert werden können. Das leistungselektronische System realisiert die unterschiedlichen Energiewandlungsfunktionen durch kompakte Doppelwechselrichter. Die gesamte Leistungselektronik wurde gemeinsam mit Batteriezellen und -managementsystem in einem separaten Gehäuse untergebracht. Das Antriebskonzept ist wegen seiner Flexibilität und Skalierbarkeit auch für andere Branchen geeignet.

DANKE

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Maßnahme KMU-NetC als Teil des Programms Vorfahrt für den Mittelstand gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

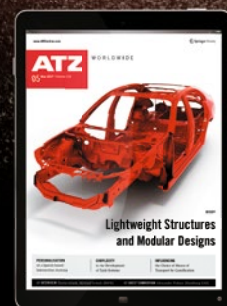


READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
[www.emag.springerprofessional.de/
atz-heavyduty-worldwide](http://www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide)

DISCOVER THE WORLD'S LEADING SPECIALIST MAGAZINE FOR THE AUTOMOTIVE SECTOR!

TAKE A FREE TEST DRIVE
ATZ-MAGAZINE.COM



ATZ WORLDWIDE