

# E-Motortopologien für einen kinematisch-elektrischen 48-V-Antriebsstrang

Im Projekt KinelectricDrive entwickelt die RWTH Aachen zusammen mit GKN Driveline ein kostengünstiges und wirkungsgradoptimiertes Antriebssystem für künftige Hybrid- und Elektrofahrzeuge. Vier Motortopologien werden für ihre Eignung als Hochdrehzahlmotor im KinelectricDrive-System bewertet.



## AUTOREN



**Daniel Butterweck, M. Sc.**  
ist Oberingenieur des Instituts für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University.



**Dipl.-Ing. Marco Hombitzer**  
ist Oberingenieur des Instituts für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University.



**Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer**  
ist Professor und Leiter des Instituts für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University.

## KOOPERATIONSPROJEKT

Obwohl immer mehr Fahrzeuge mit hybrid- und vollelektrischen Antriebsstrangkonzerten im Straßenverkehr unterwegs sind, bleibt eine breite Markteinführung aufgrund der hohen Systemkosten bisher aus. Die Entwicklungsfortschritte bei elektrochemischen Energiespeichern werden voraussichtlich auch in naher Zukunft nicht zu den gewünschten Kosteneinsparungen bei elektrifizierten Antriebssträngen führen. Die auf dem Markt verfügbaren Lithium-Ionen-Batterien sind zudem nicht gleichzeitig für hohe Energiedichten – und damit Reichweiten – und hohe Leistungsdichten gemacht. Folglich werden Boost- und Rekuperationspotenziale nicht ganz ausgeschöpft; die Reichweiten von Elektrofahrzeugen beziehungsweise die möglichen Emissionseinsparungen von Hybridfahrzeugen bleiben limitiert [1].

Eine erfolversprechende Möglichkeit, die geforderten Eigenschaften von hoher Energiedichte durch einen elektrochemischen Speicher und eine hohe Leistungsdichte durch den kinetischen Speicher zu vereinen, ist die Ergänzung des Antriebsstrangs um ein Schwungradspeichersystem. Das Projekt KinelectricDrive (Fördernr. 01MY14006B) in Kooperation mit GKN

Driveline setzt sich die Entwicklung eines 48-V-Antriebssystems zur Elektrifizierung von Fahrzeugen im A/B-Segment zum Ziel.

## KINETISCHE SPEICHERSYSTEME

Der kinetische Energiefluss eines Schwungradspeichers kann durch Variation der Drehzahl geregelt werden, normalerweise mittels eines Elektromotors. Durch Beschleunigung oder Bremsen der Rotationsmasse wird elektrische und kinetische Energie gewandelt. Im Vergleich zu elektrochemischen Energiespeichersystemen zeichnen sich Schwungradspeicher durch geringe Kosten, hohe Leistungsdichten und Lebensdauer aus, da sie nur einer minimalen zyklischen und kalendarischen Alterung unterliegen. Schwungradspeicher gibt es daher in Anwendungen mit einer hohen Zyklenanzahl und Leistungsspitzen wie beispielsweise zur Netzstabilisierung. In den letzten Jahrzehnten fand diese Technologie jedoch zunehmend den Weg in den automobilen Sektor [2, 3]. Eine Vielzahl von Schwungradspeichersystemen konnten erfolgreich entwickelt und eingesetzt werden, vornehmlich als Hybridbusse im öffentlichen Personennahverkehr. Die Systeme weisen entsprechend hohe Leistungen und Energieinhalte auf.

Sie arbeiten häufig nach dem Prinzip der mechanischen Batterie, bei der ein elektrischer Zwischenkreis zwei E-Maschinen koppelt. Eine direkte mechanische Verbindung zwischen den beiden Maschinen existiert nicht. Nachteil dieser Systeme sind die häufigen Wandlungsprozesse und die damit einhergehenden Verluste, die sich negativ auf den Wirkungsgrad der gesamten Kette auswirken. In alternativen Konzepten wird das Schwungrad über ein mechanisches stufenloses Getriebe (CVT) direkt mit der Antriebsachse gekoppelt. Diese Konzepte erfordern jedoch eine zusätzliche mechanische Kupplung, um einen Fahrzeugstillstand bei rotierendem Schwungrad zu ermöglichen.

### ANTRIEBSSTRANGSYSTEM

Der Schwungradmotor ist die zentrale Komponente des entwickelten kinetisch-elektrischen Antriebsstrangsystems, **BILD 1**. Er besteht aus einer integrierten Einheit von Schwungrad und einem 48-V-Hochdrehzahl-Elektromotor, der die Schwungradrehzahl und somit die Arbeitspunkteinstellung des Gesamtsystems regelt. Um eine ausreichende kinetische Energiedichte zu erzielen, werden Drehzahlen bis zu 45.000 min<sup>-1</sup> im Betrieb erreicht. Zur Reduzierung von Reibungsverlusten werden Schwungrad und Hochdrehzahl-Elektromotor in einem technischen Vakuum betrieben. Durch Stromlimitierungen im 48-V-Bordnetz ergibt sich eine maximale elektrische Leistung für das Gesamtsystem von 19 kW. Folglich wird in der Auslegung eine mechanische Kurzzeitleistung (10 s) von 15 kW für den Elektromotor angestrebt.

Bei der Entkopplung der Schwungradrehzahl und der Abtriebsdrehzahl beziehungsweise Fahrzeuggeschwindigkeit hilft ein stufenloses Getriebe mit variabler Übersetzung. Dieses wird als elektrisches Getriebe (eIVT) umgesetzt, das aus einem Planetengetriebe und einem zweiten, permanentmagnet-erregten Elektromotor (Hohlradmotor) besteht. Der Rotor des Elektromotors erfüllt dabei die Funktion des Hohlrads im Planetengetriebe. Der Schwungradmotor ist mit dem Sonnenrad des Planetengetriebes verbunden, der Abtrieb über den Planetenträger angebunden. Über die Regelung der Hohlradrehzahl über den Hohlradmotor kann nun die Abtriebsdrehzahl eingestellt werden, unabhängig von der Schwungradrehzahl – und somit der gespeicherten kinetischen Energie.

Mit dieser Strategie können die Leistungsspitzen im Gleichspannungszwischenkreis des Antriebsstrangs reduziert werden. Die Traktionsbatterie ist folglich weniger belastet und ihre Lebensdauer damit erhöht. Zudem erhöht der kinetisch-elektrische Ansatz die Abtriebsleistung gegenüber reinen 48-V-Antriebssystemen. Die Anwendungsgebiete dieser KinelectricDrive-Einheit reichen von der kosteneffizienten Elektrifizierung von Getrieben und Allradantrieben hin zum Einsatz als Hauptantrieb kleiner Elektrofahrzeuge sowie als Start-Stopp-Generator.

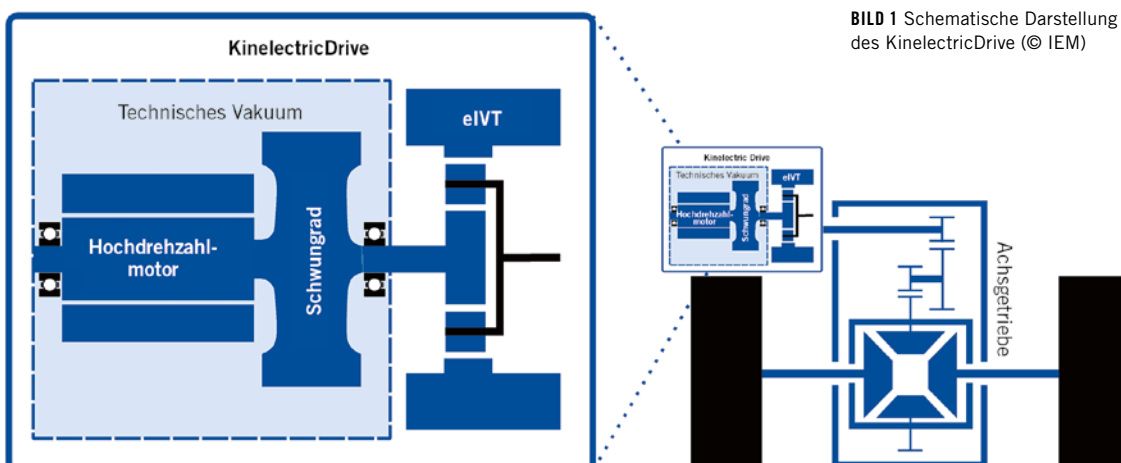
### AUSLEGUNG DES HOCHDREHZAHLSCHWUNGRADMOTORS

Eine hohe kinetische Energiedichte geht mit einer hohen Umfangsgeschwindigkeit

des Schwungrads einher. Zugleich sind die rotierenden Bauteile einer hohen mechanischen Belastung ausgesetzt – eine besondere Herausforderung bei der Auslegung dieser Systeme. Die Integration von Schwungrad und Elektromotor beeinflussen die Abmessungen vom System und die mechanischen Belastungen. Mögliche Konzepte unterscheiden sich vornehmlich in ihrem Grad der Integration, Materialanforderungen und -kosten.

Für eine kostengünstige Elektrifizierung wird im KinelectricDrive-System die Trennung in einen magnetisch aktiven und einen magnetisch passiven Teil vorgenommen. Dies erlaubt ein separates Design und die Optimierung von E-Motor und Schwungradmasse. Für den magnetisch aktiven Teil wird höherfestes Eisen-silizium-Elektroband eingesetzt. Das gewählte Material ist ein guter Kompromiss aus mechanischer Festigkeit und spezifischen Eisenverlusten bei hohen Frequenzen. Hochfestes Kobalt-eisen-Elektroband, wie es in anderen Anwendungen häufig eingesetzt wird, scheidet aus ökonomischen Gründen aus.

Diese vier Motortopologien werden für ihre Eignung als Hochdrehzahlmotor im KinelectricDrive-System untersucht: permanentmagnet-erregte Synchronmaschine (VPM SM), Asynchronmaschine (ASM), Synchronreluktanzmaschine ohne (SynRM) sowie mit Permanentmagnet-Unterstützung (PMSynRM), **TABELLE 1**. Basierend auf einer analytischen Grobauslegung bewerten 2-D-elektromagnetische Finite-Element-Analysen (FEA) die Motorperformance im gesamten Betriebsbereich. Die thermische Bewertung erfolgt



**BILD 1** Schematische Darstellung des KinelectricDrive (© IEM)

# BORDNETZTOPOLOGIE

durch transiente Simulation eines thermischen Modells mit konzentrierten Parametern. Die mechanische Festigkeit des Hochdrehzahlrotors wird anschließend in 3-D-strukturdynamischen FEA untersucht. Gestützt wird die Auslegung durch Systemsimulationen im Gesamtfahrzeug.

## RANDBEDINGUNGEN

Im Vergleich zu typischen Hochdrehzahlantrieben treten bei der Auslegung des Schwungradmotors zusätzliche Randbedingungen und Anforderungen auf. Eine geringe Selbstentladung des Schwungrads ist für einen effizienten Betrieb des Systems wesentlich. Diese wird besonders durch aerodynamische Verluste, Lagerverluste, Verluste durch die rotierenden Vakuumdichtungen und Leerlaufverluste des Elektromotors bestimmt. Zur Verringerung der aerodynamischen Verluste werden das Schwungrad und der Hochdrehzahlelektromotor in einem technischen Vakuum betrieben. Durch die verringerte Wärme Konvektion bei starker Absenkung des Arbeitsdrucks kann sich jedoch die Kühlung der Maschine drastisch verschlechtern. Hier muss ein Kompromiss zwischen der Verringerung der aerodynamischen Verluste und der Motorkühlung gefunden werden. Durch eine Reduktion des Arbeitsdrucks auf 1 mbar verringern sich die aerodynamischen Verluste bei 45.000 min<sup>-1</sup> signifikant gegenüber den Verlusten bei Atmosphärendruck. Gleichzeitig bleibt bei diesem Druck die Wärme Konvektion im Luftspalt der Maschine nahezu unbeeinflusst.

Ein weiterer dominanter Faktor für die Selbstentladung des Schwungrads sind die Leerlaufverluste des Elektromotors. Besonders permanentmagneterregte Motoren zeigen hier Nachteile aufgrund der prinzipbedingt hohen Eisenverluste im Leerlauf bei hohen Drehzahlen. Gegenüber magnetlosen Konzepten wie ASM oder SynRM führt dies zu einer rund dreimal so starken Selbstentladung. Trotz der tendenziell höheren Wirkungsgrade und Leistungsdichten ist daher der Einsatz eines Permanentmagnet-Synchronmotors (PMSM) ungeeignet. Eine Alternative ist SynRM. Ähnlich zur PMSM mit vergrabenen Magneten erzeugt die SynRM ihr Drehmoment durch Ausnutzung von magnetischer Reluktanz, verzichtet dabei jedoch auf Permanentmagnete im Rotor. Die elektromagnetischen Eigenschaften der SynRM sind folglich stark abhängig

-	VPMSM	PMSynRM	SynRM	ASM
Leistungsdichte	+	+	-	0
Leistungsfaktor	+	+	-	0
Kosten	0	0	+	0
Rotorverluste	-	-	+	-
Rotorfestigkeit	0	-	-	+
Schleppverluste	-	-	+	+
Net Score ("+" minus "-")	0	-1	0	1
Rang	2	3	2	1

TABELLE 1 Bewertungsmatrix der untersuchten Motortopologien für den Einsatz als KinelectricDrive-Schwungradmotor (© IEM)

von der Flussführung mittels Barrieren, die sich im Rotor durch dünne Stege und Luftspalte bilden. Die mechanischen Spannungen in den dünnen Stegen sind besonders für Hochdrehzahlmotoren kritisch. Aufgrund der geringen Selbstentladung wird eine ASM mit Kupferkäfig-

läufer verwendet. Die hochreinen und sauerstofffreien Kupferstäbe verhindern ein Ausgasen im Vakuum. Aufgrund der höheren mechanischen Belastung sind die Endringe des Kupferkäfigs aus härtestem Material gefertigt. Die entwickelte ASM weist einen guten

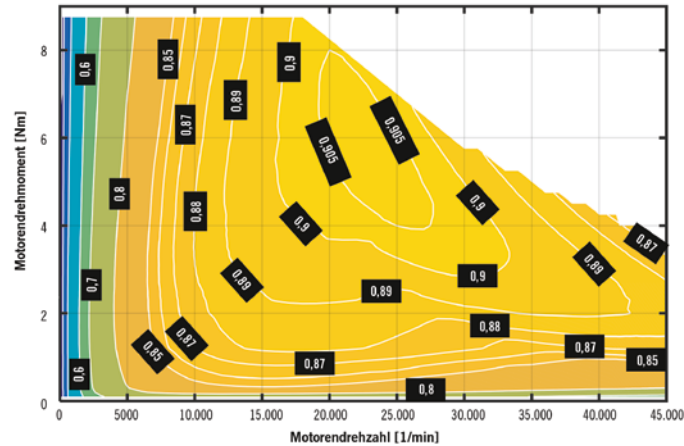


BILD 2 2-D-FEA berechnetes Wirkungsgradkennfeld der Hochdrehzahl-ASM (© IEM)

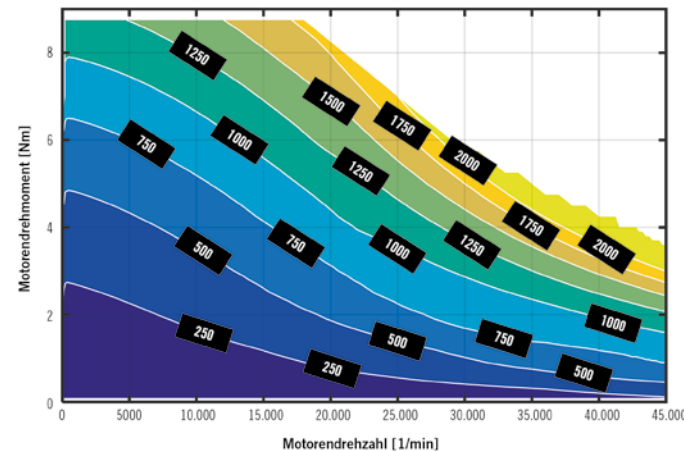
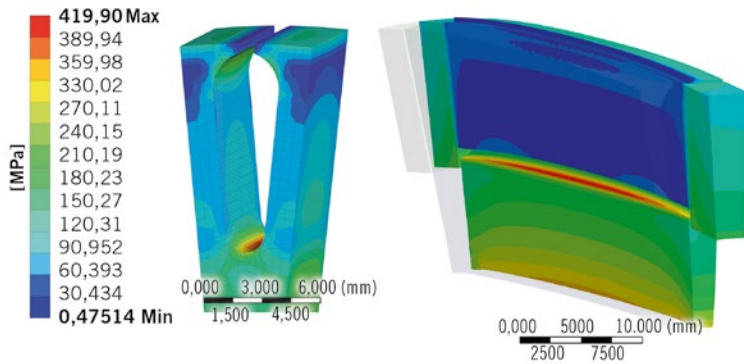


BILD 3 2-D-FEA berechnetes Verlustkennfeld der Hochdrehzahl-ASM in W (© IEM)



**BILD 4** Simulierte Von-Mises-Spannungen des Rotorpakets (links) und im Schnittbild durch den Rotor inklusive Kupferkäfig und Rotorpaket (rechts) (© IEM)

Wirkungsgrad und geringe Leerlaufverluste bis zur maximalen Drehzahl auf, **BILD 2** und **BILD 3**.

### ERGEBNISSE

Um die thermische Stabilität der ASM im Betrieb zu gewähren, werden transiente Simulationen mithilfe eines thermischen Modells mit konzentrierten Parametern durchgeführt. Eine Gesamtfahrzeugsimulation ermittelt die zeitlichen Verläufe der Verluste, in der die Betriebsstrategie des KinelectricDrive-Systems berücksichtigt wird. Die Ergebnisse der Simulationen

bestätigen die thermische Stabilität der ASM im Fahrzyklus und zeigen Potenziale zur Verbesserung der Betriebsstrategie (intelligentes Management von kinetischer und elektrischer Energie) auf. Die mechanische Festigkeit des Rotors wird im Anschluss nachgewiesen über 3-D-FEA-Fliehkraftberechnungen, unter Berücksichtigung der zuvor simulierten Bauteiltemperaturen, **BILD 4**.

Nach Abschluss der Auslegung sind derzeit Funktionsmuster der Einzelkomponenten CVT und Hochdrehzahl-Schwungradmotor sowie des Gesamtsystems im Aufbau. Diese werden im

weiteren Projektverlauf bis Mitte 2018 in Prüfstandversuchen charakterisiert. So können die Funktionsfähigkeit des Systems sowie die angestrebten Projektziele praktisch verifiziert werden.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Danzer, M. A.; Liebau, V.; Maglia, F.: Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles. In: Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Cambridge, 2015, S. 359 - 387
- [2] Buchroither, A.; Bader, M.: History and development trends of flywheel-powered vehicles as part of a systematic concept analysis. EECV, Brüssel, 2011
- [3] Hedlund, M.; Lundin, J.; De Santiago, J.; Abrahamsson, J.; Bernhoff, H.: Flywheel Energy Storage for Automotive Applications In: Energies (2015), Nr. 8, S. 10636 - 10663

## DANKE

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Verbundprojekts KinelectricDrive, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen O1MY14006B gefördert wurde.



DIESER BEITRAG IST IM E-MAGAZIN VERFÜGBAR UNTER:

[www.emag.springerprofessional.de/atz](http://www.emag.springerprofessional.de/atz)

## NovaCarts Hybrid-Tests

**HW-Karten für den Hybrid-Einsatz – von der Baugruppe bis zum schlüsselfertigen Hybrid-HiL**

- » Karten optimiert für NovaCarts-HiL
- » Standalone-Betrieb möglich
- » Betrieb der Karten mit NovaCarts-SW und unter Windows



**MICRONOVA**  
Software und Systeme

- » Batterie-Zellsimulation
- » Hochspannungsquelle
- » Widerstandssimulation
- » Isolationsfehleraufschaltung
- » Shunt-Simulation
- » Pilot-, Crash- und Interlock-Simulation
- » Ruhestrommessung
- » E-Maschinen-Simulation

Tel.: +49 8139 9300-0  
[sales-testing@micronova.de](mailto:sales-testing@micronova.de)  
[www.novacarts.de](http://www.novacarts.de)