

10. TAGUNG

ELEKTRISCHE ANTRIEBSTECHNOLOGIE FÜR HYBRID- UND ELEKTROFAHRZEUGE

27. - 28. SEPTEMBER 2017 IN WÜRZBURG



www.hdt.de/elektrotechnik
www.hdt.de/elektrische-antriebe



LEITUNG Dr.-Ing. Heinz Schäfer, Schäfer e-Mobility | hofer powertrain GmbH

ORT Maritim Hotel, Pleichertorstraße 5, 97070 Würzburg

BEITRÄGE VON AVL Software and Functions // Bosch Engineering GmbH // BMZ GmbH // Continental Automotive GmbH // ElringKlinger AG // Ford Research & Advanced Engineering Center Europe // Hochschule Aschaffenburg, Esslingen, Landshut, Schweinfurt // hofer eds GmbH & hofer pcd GmbH // IAV GmbH // KIT // MAHLE Powertrain GmbH // Mooser EMC Technik GmbH // Robert Bosch GmbH // Ruhr Universität Bochum // RWTH Aachen Universität // Technische Hochschule Köln // Technische Universität Dresden, Darmstadt, Wien // Universität der Bundeswehr München // VACUUMSCHMELZE GmbH&Co.KG // Volkswagen Aktiengesellschaft // Westsächsische Hochschule Zwickau // Zollner Elektronik AG

hdt.de

Entwicklung und Design eines kinetisch-elektrischen Antriebsystems für 48 Volt Kfz Anwendungen

Daniel Butterweck, M. Sc.

Institut für Elektrische Maschinen (IEM) RWTH Aachen, 52062 Aachen†

Dipl.-Ing. Marco Hombitzer, IEM RWTH Aachen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Kay Hameyer, IEM RWTH Aachen

Abstract

In diesem Beitrag wird das Konzept eines kinetisch-elektrischen 48 Volt Antriebsstrangs präsentiert und Herausforderungen bei der Auslegung dieser Antriebstränge sowie entsprechende Lösungsansätze vorgestellt. Aufgrund der multidimensionalen Abhängigkeiten des Antriebsystems wird der Entwurfsgang durch Simulationen auf Basis eines übergreifenden Gesamtsystemmodells unterstützt. Fokus liegt bei diesem Beitrag auf der Auslegung der verwendeten Hochdrehzahl-Asynchronmaschine.

Einleitung

Mobilität bildet einen zentralen Pfeiler im Alltag des 20ten Jahrhunderts. Zugleich jedoch ist es einer der größten Schadstoffemittenten. Im Jahr 2015 betrug der Anteil des Transportsektors 17,24 % der gesamten CO₂ Emission in Deutschland. Hiervon sind rund 70 % auf Personenkraftwagen und Nutzkraftfahrzeuge zurückzuführen [2]. Hinsichtlich der Erreichung sozialer und politischer Ziele – wie die Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen, die Reduzierung umweltschädlicher Schadstoffemissionen sowie die Sicherung der innerstädtischen Lebensqualität – sind Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen in diesem Bereich essenziell. Im Bereich der Antriebstrangentwicklungen sind bereits heute eine Vielzahl komplementärer Systeme verfügbar. Diese reichen von sogenannten Mild-, Voll-, Range-Extended (REEV) und Plug-In-Hybriden (PHEV), bis zu Batterie-Elektrischen Fahrzeugen (BEV) mit einem jeweils entsprechenden Elektrifizierungsgrad des Antriebstrangs. Obwohl eine Zunahme dieser Konzepte im alltäglichen Straßenverkehr verzeichnet werden kann, bleibt eine breite Markteinführung aufgrund hoher Systemkosten bisher aus. Trotz stetiger Entwicklungsfortschritte im Bereich elektrochemischer Energiespeicher werden diese voraussichtlich auch in naher Zukunft einen entscheidenden Anteil an den Kosten

elektrifizierter Antriebstränge bilden. Zudem sind marktverfügbare Lithium-Ionen Batterien nicht gleichzeitig für hohe Energiedichten – und somit Reichweiten – und hohe Leistungsdichten verfügbar. Als Folge dessen werden die Boost- und Rekuperationspotentiale nicht gänzlich ausgeschöpft und die Reichweite von BEV bzw. die möglichen Emissionseinsparungen von HEV's limitiert [1].

Die Ergänzung des Antriebstrangs um ein Schwungradspeichersystem stellt eine aussichtsreiche Möglichkeit dar, die geforderten Eigenschaften von hoher Energiedichte durch einen elektrochemischen Speicher einerseits und eine hohe Leistungsdichte durch den kinetischen Speicher andererseits zu vereinen. Das Projekt „KinelectricDrive“ (Fördernr. 01MY14006B), welches in Kooperation mit GKN Driveline durchgeführt und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird, setzt sich die Entwicklung eines solchen Antriebssystems zur Elektrifizierung von Fahrzeugen im A/B-Segment zum Ziel. Im Gegensatz zu üblichen Antriebsauslegungen treten bei diesem Anwendungsfall zusätzliche Herausforderungen und Randbedingungen auf. In diesem Beitrag werden die wesentlichen Aspekte aufgezeigt und Lösungen diskutiert. Der Fokus liegt auf der Auslegung des Hochdrehzahl-Schwungradmotors, ohne dabei jedoch den Bezug zum Gesamtsystem zu verlieren.

Kinetische Speichersysteme

Das Prinzip der kinetischen Energiespeicherung durch Ausnutzung des Trägheitsmoments einer rotierenden Masse ist wohlbekannt und wird seit Jahrhunderten verwendet [3]. Die kinetische Energie eines rotationssymmetrischen, zylindrischen Körpers mit homogener Massenverteilung ist beschrieben durch

$$E_{kin} = \frac{1}{2}J \omega^2 = \frac{1}{4}mr^2\omega^2 = \frac{1}{4}\rho l\pi r^4\omega^2 = \rho l\pi^3 r^4 n^2$$

mit dem Trägheitsmoment J , der Kreisdrehzahl ω , der Masse m , der Dichte ρ , dem Radius r , der Länge l und der Drehzahl n des Zylinders. Es ist zu erkennen, dass der kinetische Energiefluss durch Variation der Drehzahl mittels eines Elektromotors geregelt werden kann. Durch Beschleunigung der Rotationsmasse wird elektrische Energie in kinetische umgewandelt. Visa versa wird kinetische Energie in elektrische Energie durch Abbremsen der Rotationsmasse gewandelt. Speichersysteme, welche nach diesem Prinzip arbeiten, werden Schwungrad(-speicher) genannt. Im Vergleich zu elektrochemischen Energiespeichersystemen zeichnen sich diese durch folgende Vorteile aus:

1. Hohe Lebensdauern. Im Gegensatz zu Batterien unterliegen Schwungräder nur einer minimalen zyklischen und kalendarischen Alterung,
2. Geringe Kosten,
3. Hohe Leistungsdichten.

Aufgrund dieser Vorteile eignet sich diese Technologie folglich für Anwendungen mit einer hohen Zyklenanzahl und hohen Leistungsspitzen in denen eine Langzeitspeicherung der Energie nicht erforderlich ist. Breite Verwendung finden Schwungradspeicher deshalb z.B. zur Netzstabilisierung. In den letzten Jahrzehnten fand diese Technologie jedoch zunehmend den Weg in den automobilen Sektor. Eine Vielzahl von Schwungradspeichersystemen konnte erfolgreich entwickelt und, vornehmlich im öffentlichen Personennahverkehr in Form von Hybrid-Bussen, umgesetzt werden. Die Systeme weisen entsprechend hohe Leistungen und Energieinhalte auf. Das Projekt *highFly* der *Traktionssysteme Austria GmbH*, welches 2015 in Kooperation mit der *TU Graz* durchgeführt wurde, besitzt eine speicherbare kinetische Energiemenge von 900 Wh und eine Spitzenleistung von 145 kW bei einem Spannungslevel von 700 Volt. Der Rotor des fünf-strängigen Synchronreluktanzmotors ist aus hoch-festem Kobalteisen Elektroband aufgebaut. Die gesamte Einheit inklusive Umrichter hat ein Gewicht von 300 kg [4]. Im Jahr 2014 wurde die aus der Formel 1 bekannte *Williams Hybrid Power* Technologie durch *GKN Hybrid Power* erworben und für den Einsatz im öffentlichen Nahverkehr weiterentwickelt. In diesem als *Gyrodrive* bekanntem System wird ein Schwungrad aus Verbundwerkstoff mit einer speicherbaren Energiemenge von 500 Wh verwendet. Das Schwungrad wird von einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) mit einer Spitzenleistung von 120 kW angetrieben, in der die Permanentmagnete in die Struktur des Schwungrads eingebettet sind. Dieses System wurde im Zeitraum von 2014 bis 2016 erfolgreich in 500 Busse des Londoner Nahverkehrs eingesetzt [4]. Eine Zunahme der Entwicklungsarbeiten solcher Antriebsysteme kann ebenfalls für die Nutzung im privaten Nahverkehr verzeichnet werden. Im Rahmen des Programms *Neue Energien 2020* des österreichischen Klima- und Energiefonds wurde ein Speichersystem mit einem Energieinhalt von 75 Wh und einer Spitzenleistung von 20 kW für die Nutzung in Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit einer Bordnetzspannung von 300 bis 400 Volt entwickelt. Der Rotor dieser Einheit ist ebenfalls aus Kobalteisen gefertigt und mit einer hybriden Lagerung, bestehend aus konventionellen Kugellagern mit Magnetlagerunterstützung, gelagert [6]. Im Jahr 2009 wurde ein Speichersystem mit mechanischem Leistungspfad durch *Flybrid Systems* entwickelt. Der mechanische Pfad wird durch ein stufenloses Getriebe (CVT) der Firma *Torotrak* gebildet. Das *Flybrid System* besitzt eine nutzbare Energiemenge von 111 Wh und eine Spitzenleistung von 60 kW. Die maximale Drehzahl des Schwungrads, welches aus Verbundwerkstoff gefertigt ist, liegt bei 64.000 min^{-1} [7]. Ein vergleichbares System von *Flybrid Automotive* wurde 2011 im Jaguar XF und später in ähnlicher Form im Volvo S60 eingesetzt. Das System besitzt ein Gesamtgewicht von 64 kg bei einer Energiemenge von 120 Wh und 60.000 min^{-1} . Durch Integration dieser Systeme in konventionelle Antriebstränge konnten Kraftstoffersparnisse von rund 20 % erzielt werden [7].

Die Vielzahl der genannten Systeme arbeiten nach dem Prinzip der „mechanischen Batterie“ aus Abbildung 1. Das heißt, dass zwei elektrische Maschinen über einen gemeinsamen Zwischenkreis gekoppelt werden. Eine direkte mechanische Verbindung der beiden Maschinen existiert nicht. Bei der Beschleunigung des Fahrzeugs kann kinetische Energie des Schwungrads (FW) mittels Motor-Generator MG1, welcher hier als Generator fungiert, über den Umrichter (C1) in

elektrische Energie gewandelt und in den Zwischenkreis gespeist werden. Der zweite Motor-Generator MG2 treibt, gespeist durch den Umrichter C2, die Antriebsachse des Fahrzeugs an. Nachteil dieser Systeme sind die häufigen Wandlungsprozesse und die damit einhergehenden Verluste, welche sich negativ auf den Wirkungsgrad der gesamten Wandlungskette auswirken. In alternativen Konzepten wie dem *Flybrid* System, wird das Schwungrad über ein mechanisches stufenloses Getriebe (CVT) direkt mit der Antriebsachse gekoppelt. Diese Konzepte erfordern jedoch eine zusätzliche Kupplung um einen Stillstand am Abtrieb bei rotierendem Schwungrad dennoch ermöglichen zu können.

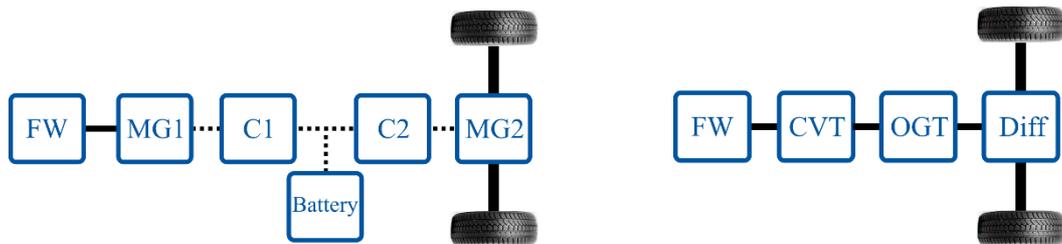


Abbildung 1: Prinzipzeichnung der mechanischen Batterie (links) und dem Schwungradspeichersystem mit mechanischem CVT (rechts). (Durchgezogene Linien zeigen den mechanischen Pfad, gestrichelte Linien zeigen den elektrischen Pfad).

Konzept KinelectricDrive

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau des entwickelten kinetisch-elektrischen Antriebstrangsystems gezeigt. Zentrale Komponente bildet der Schwungradmotor, welcher aus einer integrierten Einheit von Schwungrad und einem 48 Volt Hochdrehzahl-Elektromotor besteht. Der Elektromotor ermöglicht die Regelung der Schwungradfrequenz und somit der Arbeitspunkteinstellung des Gesamtsystems. Um eine ausreichende kinetische Energiedichte zu erzielen, werden Drehzahlen bis 45.000 min^{-1} im Betrieb erreicht. Zur Reduzierung von Reibungsverlusten werden folglich das Schwungrad sowie der Hochdrehzahl-Elektromotor in einem technischen Vakuum betrieben. Bedingt durch Stromlimitierungen im 48 Volt Netz ergibt sich eine maximale elektrische Leistung für das Gesamtsystem von 19 kW. Als Folge dessen wird in der Auslegung eine mechanische Kurzzeitleistung (10 Sekunden) von 15 kW für den Elektromotor angestrebt.

Zur Entkopplung der Schwungradfrequenz und der Abtriebsdrehzahl bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit wird ein stufenloses Getriebe mit variabler Übersetzung (CVT) benötigt. Dies wird als elektrisches Getriebe realisiert (eIVT), welches aus einem Planetengetriebe und einem zweiten, permanentmagneterregten Elektromotor (Hohlradmotor) besteht. Der Rotor dieses Elektromotors erfüllt dabei die Funktion des Hohlrades des Planetengetriebes. Der Schwungradmotor ist mit dem Sonnenrad des Planetengetriebes verbunden. Der Abtrieb wird über den Planetenträger angebunden. Mittels Regelung der Hohlradfrequenz über den Hohlradmotor kann nun die

Abtriebsdrehzahl unabhängig von der Schwungradzahl – und somit der gespeicherten kinetischen Energie – eingestellt werden.

Durch Ausnutzung dieser Strategie können die Leistungsspitzen im DC-Kreis des Antriebstrangs reduziert werden. Die Traktionsbatterie wird folglich weniger belastet und die Lebensdauer dieser lässt sich erhöhen. Zudem kann durch den kinetisch-elektrischen Ansatz die Abtriebsleistung gegenüber reinen 48 Volt Antriebssystemen erhöht werden. Anwendungsgebiete dieser KinelectricDrive-Einheit reichen von der kosteneffizienten Elektrifizierung von Getrieben und Allradantrieben hin zum Einsatz als Hauptantrieb kleiner Elektrofahrzeuge und als Start-Stopp Generator.

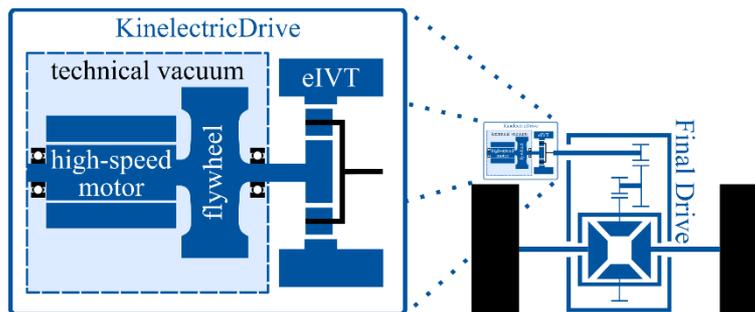


Abbildung 2: Schematische Darstellung des "KinelectricDrive" Systems.

Design des Schwungradsystems

Für die technische Anwendung von Schwungradspeichersystemen ist die kinetische Energiedichte von besonderer Bedeutung. Es zeigt sich, dass eine hohe kinetische Energiedichte mit einer hohen Umfangsgeschwindigkeit des Schwungrads einhergeht. Zugleich folgt hieraus eine hohe mechanische Belastung der rotierenden Bauteile. Dies bedeutet eine besondere Herausforderung bei der Auslegung dieser Systeme.

Das Konzept der Integration von Schwungrad und Elektromotor hat hierbei einen großen Einfluss auf die Abmessungen des Systems und die mechanischen Belastungen. Drei mögliche Konzepte werden im Folgenden betrachtet, wobei aus jedem dieser Konzepte verschiedene Randbedingungen für das Maschinendesign und die eingesetzten Materialien hervorgehen. Eine Klassifizierung der Konzepte hinsichtlich ihrem Grad der Integration und der Materialanforderungen bzw. -kosten ist in Abbildung 3 dargestellt.

In Variante A ist der Rotor des Schwungradmotors in einen magnetisch aktiven Teil und in einen magnetisch passiven Teil unterteilt. Dies erlaubt das separate Design und die Optimierung der Bauteile. Für den magnetisch aktiven Teil können aufgrund der verringerten Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des eingesetzten Elektrobands, kostengünstigere Eisensilizium Elektrobänder eingesetzt werden.

Variante B folgt dem Aussenrotorprinzip. Hierdurch kann ein erhöhter Integrationsgrad erzielt werden. Da die rotierende Masse auf einem großen Durchmesser rotiert,

können hohe Energiedichten erreicht werden. Dieses Konzept der Integration wird in aktuellen Schwungradspeichersystem am häufigsten eingesetzt. Als Beispiel sei hier das System *GKN Gyrodrive* zu nennen. Unweigerlich können bei diesem Konzept jedoch nur einfache zylindrische Schwungradformen realisiert werden.

Variante C erzielt den höchsten Integrationsgrad. Hierbei wird die gesamte Schwungradmasse durch den magnetisch aktiven Teil des Hochdrehzahlmotors gebildet. Der Stator in dieser Integrationsvariante dient als zusätzlicher Berstschutz. Die Anforderungen an das Gehäuse können somit reduziert werden. Jedoch sind die Materialanforderungen an den Rotor in diesem Konzept sehr hoch. Dies erfordert den Einsatz von Eisenkobalt-Elektrobändern mit hoher mechanischen Festigkeit, die jedoch um ein Vielfaches teurer sind als Eisensilizium-Elektrobänder (FeSi).

Hinsichtlich einer kostengünstigen Elektrifizierung wird im KinelectricDrive System die Integration nach Variante A umgesetzt. Als Material des magnetisch aktiven Teils wird die FeSi-Elektrobandsorte 280 30 AP der Firma *Thyssen Krupp Steel Europe* eingesetzt. Diese Sorte bildet einen guten Kompromiss aus mechanischer Festigkeit und spezifischen Eisenverlusten bei hohen Frequenzen.

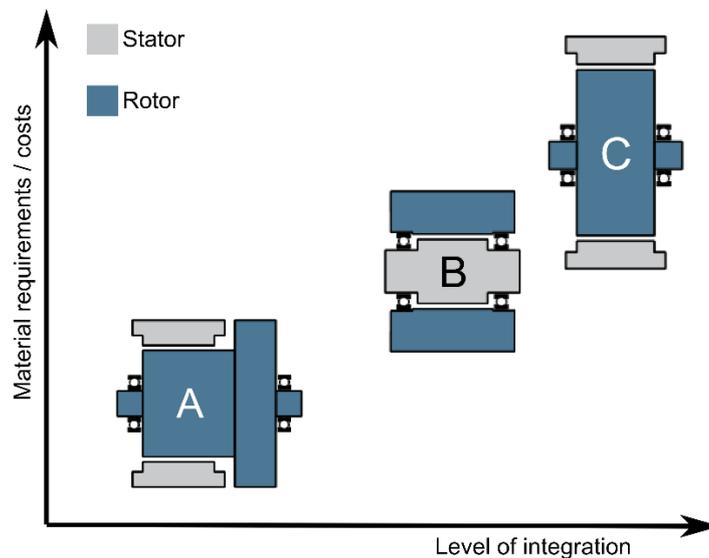


Abbildung 3: Vergleich der Integrationsvarianten von Hochdrehzahl-Elektromotor und Schwungradmasse.

Auslegung des Hochdrehzahl-Schwungradmotors

Für das KinelectricDrive System werden die drei Elektromotorarten Permanentmagneterregter Synchronmotor, Synchronreluktanzmotor und Asynchronmotor untersucht. Vor allem aufgrund der geringen Selbstentladung wird im Projekt eine Asynchronmaschine verwendet. Das Vorgehen und die Ergebnisse dieser Auslegung werden im Folgenden kurz präsentiert. Basierend auf einer analytischen Grobauslegung werden 2D-Elektromagnetische Finite Element Simulationen (FEM) zur Bewertung der

Motorperformance im gesamten Betriebsbereich durchgeführt. Die mechanische Festigkeit des Hochdrehzahlrotors wird anschließend in 3D strukturdynamischen FEM Simulationen untersucht. Eine thermische Bewertung erfolgt durch transiente Simulation eines thermischen Modells mit konzentrierten Parametern.

Für den Schwungradmotor des KinelectricDrive Systems wird eine Asynchronmotor mit Kupferkäfigläufer eingesetzt. Die Statorwicklung ist als verteilte 4-polige Dreiphasenwicklung mit 24 Statornuten ausgeführt. Dies führt zu einer maximalen Grundwellenfrequenz des Statorstroms von 1500 Hz. Neben klassischen Runddrahtwicklungen wird ebenfalls der Einsatz einer Hairpinwicklung untersucht. Aufgrund der prinzipbedingt geringen Anzahl von Hairpinleitern pro Nut zeigen Simulationen starke Skin- und Proximity Effekte bei der Verwendung einer Hairpinwicklung. Folglich wird für den prototypischen Aufbau eine klassische Runddrahtwicklung ausgeführt. Durch Verwendung von parallelen Teilleitern wird der Skin-Effekt reduziert. Als Rotor wird ein Design mit 32 Rotornuten verwendet. Für den prototypischen Aufbau wird dieser als gebauter Rotor realisiert. Die Rotorstäbe werden aus hochreinem und sauerstofffreiem Cu-OFE, welches hohe elektrische und thermische Leitfähigkeiten aufweist, aufgebaut. Ein Ausgasen im Vakuum kann somit vermieden werden. Die Endringe des Kupferkäfigs werden aus wasserstrahlgeschnittenen Kupferscheiben gefertigt, auf die Kupferstäbe aufgeschoben und anschließend verschweißt. Aufgrund der höheren mechanischen Belastung werden diese Kupferscheiben aus höherfestem CuCrSiTi Material gefertigt. Das mittels 2D-FEM berechnete Wirkungsgradkennfeld ist in Abbildung 4 gezeigt.

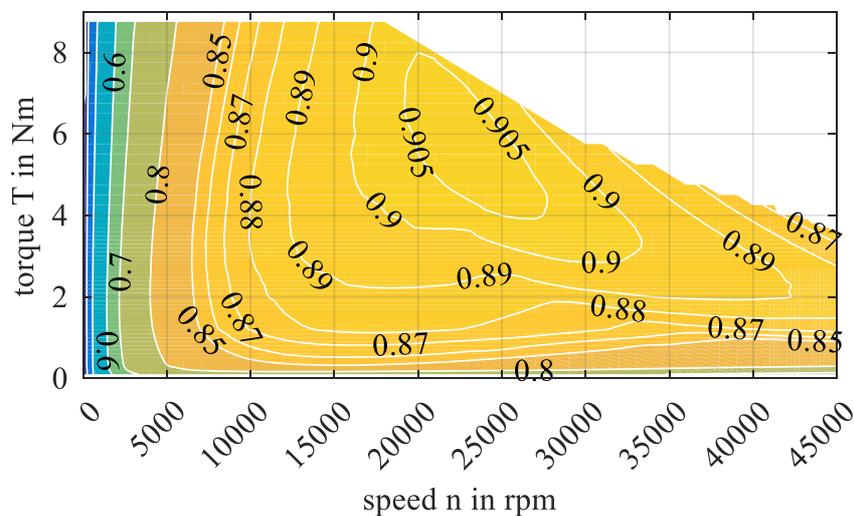


Abbildung 4: Wirkungsgradkennfeld der Hochdrehzahl-Asynchronmaschine.

Um die thermische Stabilität der ASM im Betrieb zu gewährleisten, werden transiente thermische Simulationen mit Hilfe eines thermischen Modells mit konzentrierten Parametern durchgeführt. Die zeitlichen Verläufe der Verluste werden aus einer Gesamtfahrzeugsimulation ermittelt. Hierbei wird die Betriebsstrategie des KinelectricDrive Systems berücksichtigt. Der simulierte Temperaturverlauf im dritten von drei aufeinanderfolgenden WLTP Fahrzyklen ist in Abbildung 5 gezeigt. Die höchste Temperatur tritt im Rotor der Asynchronmaschine auf.

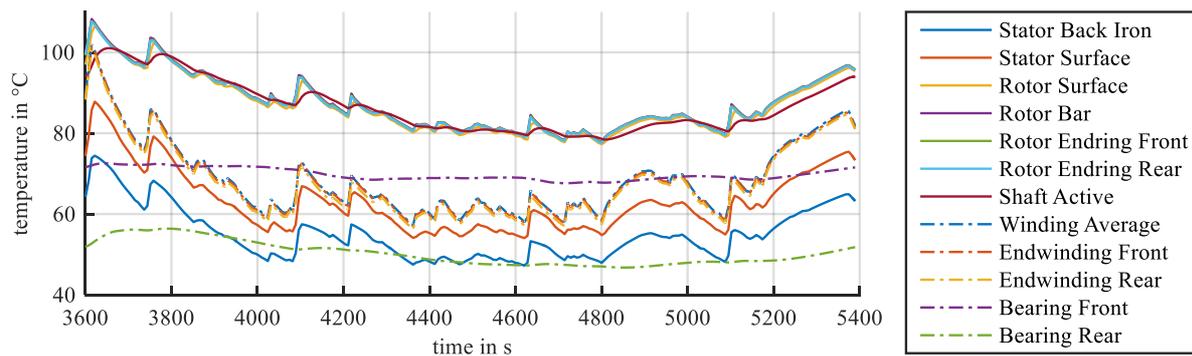


Abbildung 5: Simulierter Temperaturverlauf im WLTP Fahrzyklus.

Die mechanische Festigkeit des Rotors wird mittels 3D FEM-Fliehkraftberechnungen untersucht. Hierbei wird ein linear-plastisches Materialverhalten zugrunde gelegt. Da es sich im vorliegenden Fall um einen gebauten Rotor – und nicht um einen Druckgussrotor – handelt, kann im Betrieb des Motors eine Relativverschiebung zwischen den Rotorstäben und den Rotornuten erwartet werden. Dies wird in der Simulation durch einen reibungsbehafteten Kontakt abgebildet. Die Welle-Nabe-Verbindung ist als H7/s6 Passung ausgeführt und mit einer effektiven Penetration von 26 μm in der Simulation berücksichtigt. Zusätzlich wird zu axialen Sicherung des Rotorpakets eine Wellenmutter, welche eine axiale Kraft von 22,4 kN aufbringt, verwendet und in der Simulation berücksichtigt. Die Ergebnisse der Simulation sind in Form von Von-Mises Spannung in Abbildung 6 gezeigt.

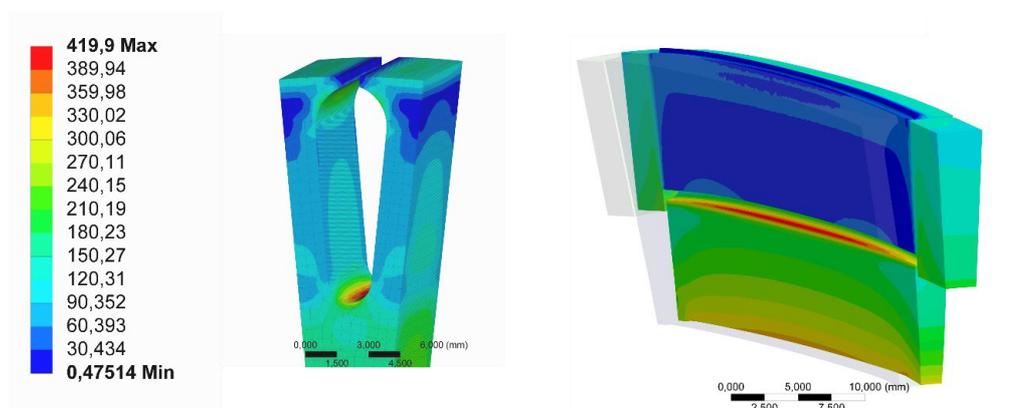


Abbildung 6: Simulierte Von-Mises Spannungen in MPa des Rotorpakets (links) und im Schnittbild durch den Rotor inklusive Kupferkäfig und Rotorpaket (rechts).

Nach Abschluss der Auslegung befinden sich derzeit Funktionsmuster der Einzelkomponenten CVT und Hochdrehzahl-Schwungradmotor sowie des Gesamtsystems im Aufbau. Diese werden im weiteren Projektverlauf mittels Prüfstandsversuchen charakterisiert. So können Funktionsfähigkeit des Systems sowie die angestrebten Projektziele praktisch verifiziert werden.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Verbundprojektes „KinelectricDrive“, das mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 01MY14006B gefördert wurde.



Literatur

- [1] DANZER, M.A.; LIEBAU, V.; MAGLIA, F.
Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles
Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles, Woodhead Publishing
pp. 359 - 387, 2015

- [2] GERMAN ENVIRONMENT AGENCY
National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory
1990 – 2015
UNFCCC Submission
2017

- [3] BUCHROITHNER, A.; BADER, M.
History and development trends of flywheel-powered vehicles as part of a
systematic concept analysis
EEVC Brussels
2011

- [4] MÜLLNER, F.; NEUDORFER, H.; RECHEIS, M.
highFly – Entwicklung eines Flywheels als elektrischer Energiespeicher für den
mobilen Einsatz
Elektrotech. Inftech, vol. 132, no. 1
pp. 87–94, 2015

- [5] <http://www.gkn.com/en/newsroom/news-releases/group/2014/gkn-and-the-go-ahead-group-using-f1-technology-to-improve-fuel-efficiency-of-london-buses/>
(accessed on 12.07.2017)

- [6] WEGLEITER, H.
Flywheel als Energiespeicher in Hybrid und Elektrofahrzeugen für den Individualverkehr
Blue Globe Report – Klima- und Energiefonds,
2013
- [7] HEDLUND, M.; LUNDIN, J.; DE SANTIAGO, J.; ABRAHAMSSON, J.; BERNHOFF, H.
Flywheel Energy Storage for Automotive Applications
Energies 2015, 8,
pp. 10636-10663, 2015