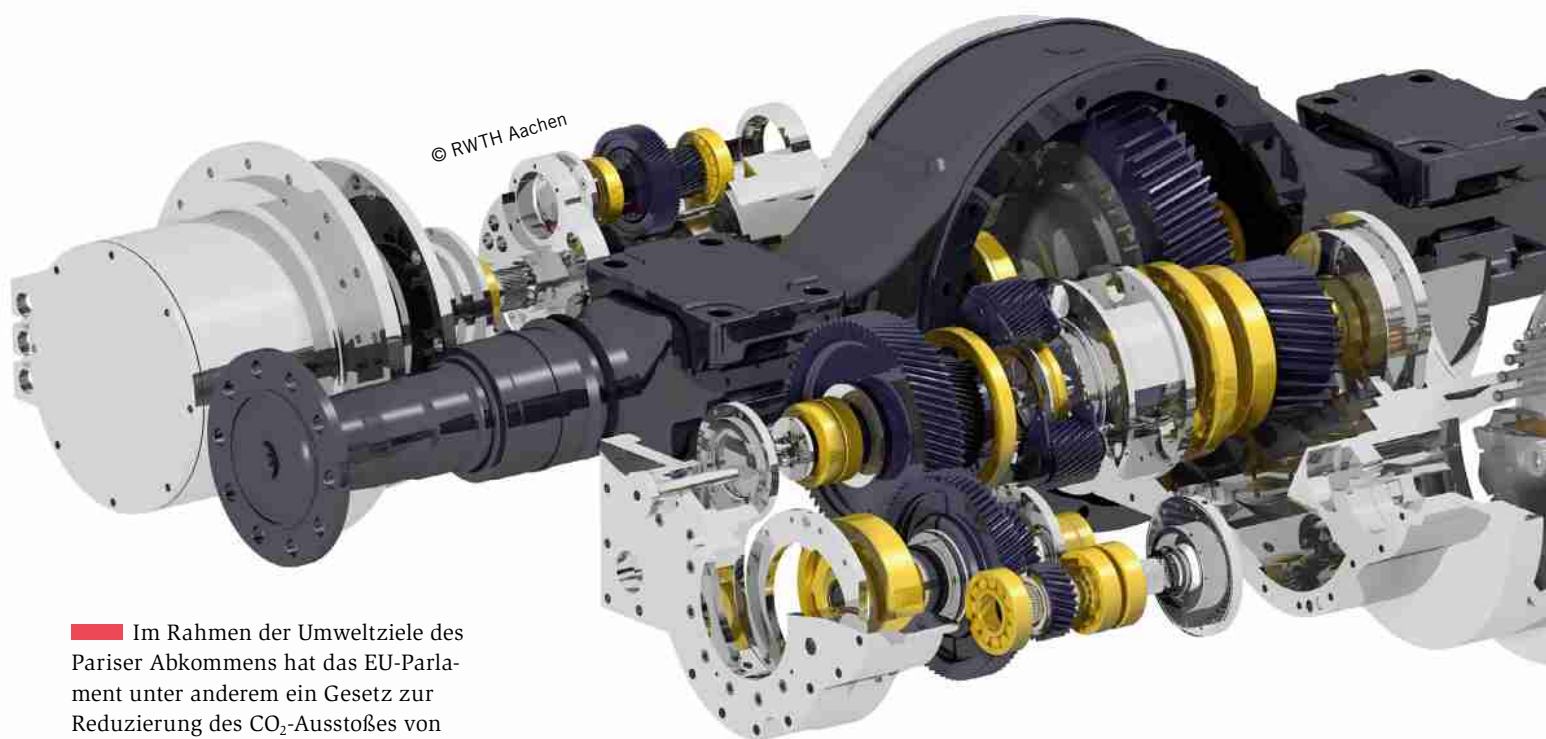


Auslegung einer elektrischen Antriebsachse für einen schweren Lkw

Um die Umwelt zu schützen, muss der CO₂-Ausstoß von Nutzfahrzeugen reduziert werden. Die Elektrifizierung der Fahrzeuge ist eine Möglichkeit, dies zu erreichen. Im Rahmen des Projekts Concept ELV² erarbeiten die Institute IEM, ika und WZL der RWTH Aachen University eine holistische Entwicklungsmethodik, welche speziell auf die Anforderungen von elektrischen Antriebssträngen ausgelegt ist. Die Methodik wird zur Auslegung eines Prototyps einer voll-elektrischen Achse für einen schweren Lkw eingesetzt.



Im Rahmen der Umweltziele des Pariser Abkommens hat das EU-Parlament unter anderem ein Gesetz zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes von schweren Nutzfahrzeugen erlassen [1]. Schwere Nutzfahrzeuge sind für circa 20 % der Emissionen des Straßenverkehrs verantwortlich. Eine effektive und zukunftssträchtige Möglichkeit, Emissionen zumindest lokal zu reduzieren, ist die Elektrifizierung des Antriebs. Das vom Bundesministerium für Wirtschaft

und Energie (BMWi) geförderte Projekt Concept ELV² hat das Ziel, einen schweren Lkw im Verteilerverkehr zu elektrifizieren [2]. Die Institute IEM, ika und WZL der RWTH Aachen University erarbeiten in diesem Projekt eine holistische

Entwicklungsmethodik, welche speziell auf die Anforderungen von elektrischen Antriebssträngen ausgelegt ist. Die Methodik wird im Projekt zur Auslegung eines Prototyps einer vollelektrischen Lkw-Achse eingesetzt, die derzeit konst-

AUTOREN



Sven Köller, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Energiemanagement & Antriebe am Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University.



Roland Uerlich, M. Sc.
ist Gruppenleiter Antriebssysteme im Forschungsbereich Energiemanagement & Antriebe am Institut für Kraftfahrzeuge (ika) der RWTH Aachen University.



Christian Westphal, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Getriebe-technik am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University.

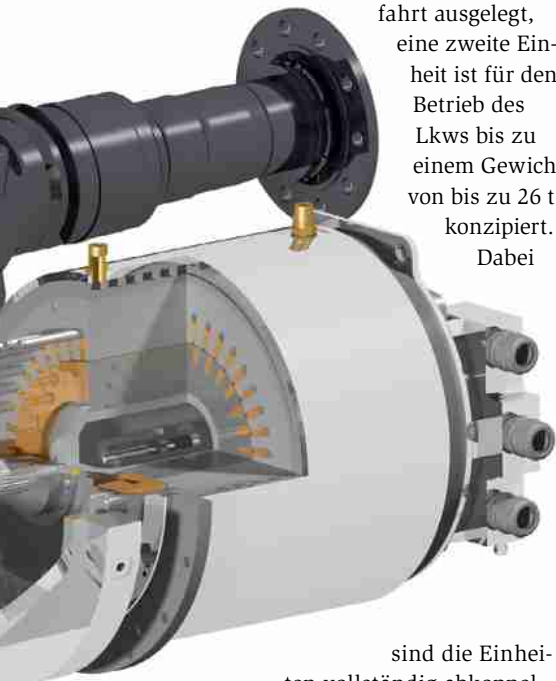


Marius Franck, M. Sc.
ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen (IEM) der RWTH Aachen University.

ruiert und im weiteren Projektverlauf auf einem Prüfstand am ika vermessen wird.

Anwendungsfall dieser Entwicklung ist ein Nutzfahrzeug für den schweren Verteilerverkehr mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t. Da ein signifikanter Anteil der Fahrten im Verteilerverkehr teilbeladen oder leer erfolgt, sieht das entwickelte Konzept einen zweiteiligen Antriebsstrang vor. Eine Elektromotor-Getriebeeinheit ist für die

Nutzung bei Leerfahrt ausgelegt, eine zweite Einheit ist für den Betrieb des Lkws bis zu einem Gewicht von bis zu 26 t konzipiert. Dabei



sind die Einheiten vollständig abkoppelbar, um Verluste im Getriebe zu reduzieren. Die maximale Leistung des Antriebs liefern beide Teilsysteme in Kombination. Dabei werden auch die Fahranforderungen eines Nutzfahrzeugs mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 40 t bei maximaler Zuladung erfüllt. Die benötigten Leistungen des jeweiligen Teilsystems wurden mithilfe einer Fahrzeug-Längsdynamiksimulation

bestimmt. Jeder Teil des Antriebsstrangs wird mit einer auf diese Randbedingungen abgestimmten elektrischen Maschine angetrieben, **BILD 1**. Die durchgeführten Effizienzbetrachtungen des Antriebsstrangs erfolgen gemäß den Vorgaben der EU-Regulation 2017/2400 zur Bestimmung der CO₂-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen [3].

ENTWICKLUNGSMETHODIK FÜR GETRIEBE

Die Methodik, die im Rahmen des Projekts entwickelt wird, basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz zur Optimierung von Getrieben für elektrische Kraftfahrzeuge [4]. Diese Methode wird am ika im Projekt um eine automatisierte Synthese, Grobauslegung der Verzahnung und Bewertung der synthetisierten Getriebe-konzepte erweitert. Darüber hinaus wird eine thermische Modellierung dieser Systeme durchgeführt und anhand des realisierten Getriebes verifiziert. Ziel dieses Ansatzes ist es, die Getriebeentwicklung für elektrifizierte Fahrzeuge effizienter zu gestalten und bereits in einem frühen Stadium viele Varianten zu betrachten und hinsichtlich einer Vielzahl von Kriterien zu bewerten.

Die Randbedingungen dieses Ansatzes sind unter anderem das erforderliche Drehmoment an der Antriebsachse des Fahrzeugs sowie die systembedingten Eigenschaften der elektrischen Maschinen (Drehmomente, Drehzahlen und Leistung). Basierend auf diesen Randbedingungen werden Getriebe-konzepte synthetisiert. Dazu werden Getriebe-komponenten, beispielsweise Planeten- und Stirnradstufen, miteinander kombiniert. Die Eigenschaften, wie zum Beispiel der zulässige Übersetzungsbereich und

der Wirkungsgrad der Komponenten, werden zunächst der Literatur entnommen. Neben diesen Eigenschaften werden weitere Werte aus [5, 6] genutzt, um eine Bewertung der synthetisierten Getriebe bereits in diesem frühen Status zu ermöglichen. Im Anschluss wird für die gewählten Topologien eine Grobauslegung der Verzahnungen durchgeführt. Die einzelnen Stufen eines synthetisierten Getriebes werden in vorgegebenen Grenzen entworfen. Pro Getriebestufe gibt es mehr als 10.000 mögliche Varianten. Diese Varianten der einzelnen Getriebestufen werden anschließend mithilfe eines genetischen Algorithmus zu Getrieben kombiniert. In diesem Kombinationsprozess können für verschiedene Fahrzeugklassen separate Gewichtungen für die gewählten Bewertungsparameter vergeben werden. Der Prozess der Synthese bis zu einem ersten Entwurf der Verzahnungsdaten der Getriebe-konzepte ist in **BILD 2** dargestellt. Die Synthese, Kombination und integrierte Bewertung erfolgen automatisiert.

Aus den generierten Getriebe-konzepten kann eines oder mehrere für die weitere Detaillierung ausgewählt werden. Die Detailauslegung und Optimierung der Verzahnung werden am WZL durchgeführt. Zur Detailauslegung der einzelnen Getriebestufen wird eine Makrogeometrieoptimierung durchgeführt, **BILD 3**. Dabei wird zunächst ein Variationsraum aus den Verzahnungsdaten der Vorauslegung abgeleitet. Die Designparameter werden voll faktoriell variiert, woraus weitere notwendige Geometrie-größen der Verzahnungen abgeleitet werden. Die Berechnung des Einsatzverhaltens jeder Variante erfolgt mit der validierten Zahnkontaktanalyse FE-Stirnradkette [7]. Zur Bewertung der einzelnen Geometrievarianten wird eine Gewichtung

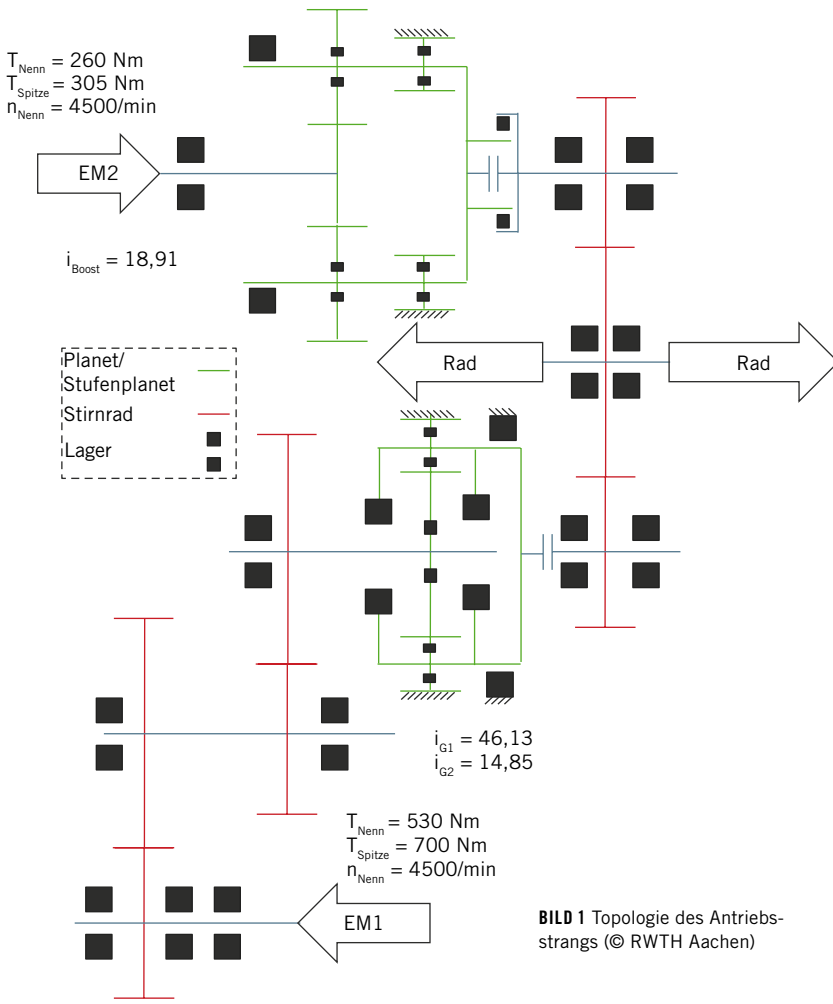


BILD 1 Topologie des Antriebsstrangs (© RWTH Aachen)

mischen Netzwerke. Zur Generierung der erforderlichen Knoteneigenschaften des Netzwerks werden neben den Verzahnungselementen die Wellensegmente, Lager und das Gehäuse als 3-D-Strukturen modelliert und anschließend entsprechend der Knotendichte des Netzwerks in Teilkörper zerschnitten. Aus diesen Teilkörpern lassen sich unter anderem die den Knoten zuordenbare Masse und somit die thermische Wärmekapazität sowie die Kontaktflächen zu benachbarten Knoten ableiten. Neben den Getriebe-komponenten werden in diesem Ansatz aus einem 3-D-Körper des Öl-Luft-Gemischs ebenfalls mehrere Systemknoten innerhalb der Getriebestufe gebildet. Da das Öl-Luft-Gemisch jedoch nicht als homogen angenommen werden kann, erfolgt dessen Bestimmung unter Nutzung einer Ölverteilungssimulation über den Ansatz der partikelbasierten Fluidsimulation Smoothed Hydrogen Hydrodynamics (SPH) [8]. Diese Methode bietet gegenüber dem klassischen Finite-Volumen-basierten Vorgehen der Computational Fluid Dynamics den Vorteil einer reduzierten Modellvorbereitung und Rechenzeit. Hierdurch ist es möglich, eine größere Zahl an Parametervariationen simulativ abzubilden und somit eine hohe Prädiktionsgüte des jeweiligen Ölanteils an den Komponentenknoten zu gewährleisten [9]. Der generelle Ablauf des thermischen Modellierungsansatzes ist in BILD 4 dargestellt. Die Generierung und Berechnung des thermischen Knotenmodells erfolgt, mit Ausnahme der genutzten Simulationsdatenbasis bezüglich der Ölverteilungen, automatisiert.

der berechneten Kenngrößen des Einsatzverhaltens vorgenommen. Die Zielgrößengewichtung wird für jede Stufe entsprechend der auftretenden Belastungen unterschiedlich gewählt.

Parallel zur Detaillierung der Konstruktion werden die ermittelten Verzahnungsdaten am ika bereits für eine erste thermische Systemanalyse genutzt. Basis des Ansatzes bildet die Methode der ther-

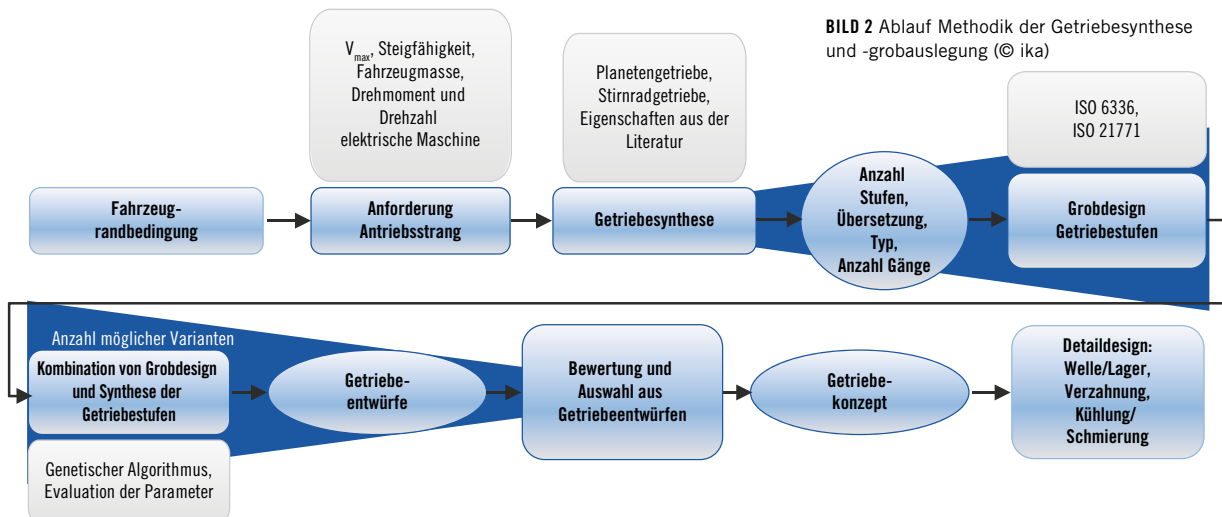


BILD 2 Ablauf Methodik der Getriebesynthese und -grobauslegung (© ika)

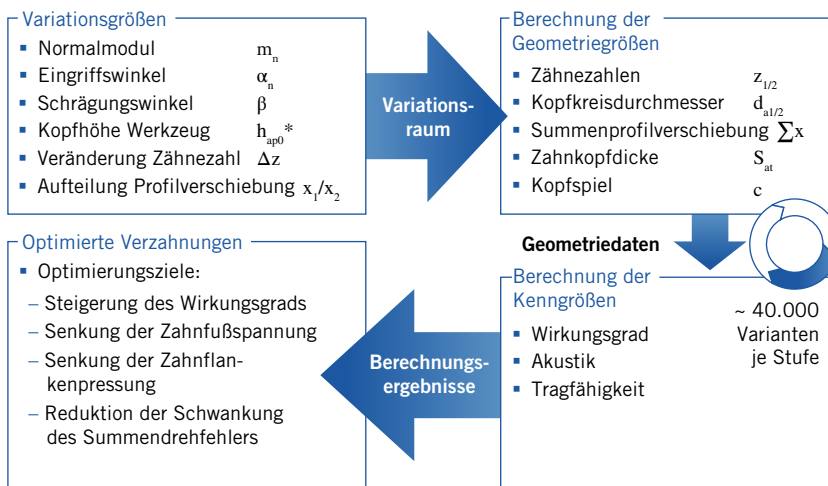


BILD 3 FE-basierte Makrogeometrieoptimierung der Verzahnungen (© WZL)

Dadurch können Variationen, beispielsweise die im System genutzte Ölmenge oder die Verwendung eines Ölkühlers, betrachtet werden.

ENTWICKLUNGSMETHODIK FÜR DIE ELEKTRISCHE TRAKTIONSMASCHINE

Neben dem Getriebe wird eine der zwei elektrischen Traktionsmaschinen entwickelt (EM1), BILD 1. Die Dimensionierung der Asynchronmaschine mit Kühlsystem erfolgt am IEM [10]. Hierfür wird die am IEM vorhandene modulare Auslegungsmethodik für elektrische Maschinen eingesetzt [11], BILD 5. Zur Auslegung sind thematisch fünf Simulationsmodule ausreichend. Weitere Module lassen sich bei Bedarf einfügen [11]. Der Detaillierungsgrad und die Simulationsgenauigkeit der eingesetzten Module wird auf die Fragestellung abgestimmt.

In einem ersten Entwurfsschritt werden die Spezifikationen sowie die Bauraumrandbedingungen analysiert. Mithilfe von analytischen Modellen und empirischen Daten ergibt sich ein Maschinendesign mit hoher thermischer Ausnutzung. Aus dem modularen Triebstrangkzept mit zwei Antriebseinheiten ergeben sich besondere Anforderungen bezüglich der elektronischen Ansteuerung.

Im folgenden Arbeitsschritt steht die bestmögliche Auswahl eines weichmagnetischen Materials und die Auslegung des Isolierstoffsystems im Fokus. Der Fahrzyklus und die Lebensdauernanforderungen spielen eine entscheidende Rolle.

Die Wirkung und Rückwirkung aller Komponenten des gesamten Antriebsstrangs untereinander sind zu berücksichtigen [12]. Zu nennen sind hier die Leistungselektronik, die Regelstrategie sowie die Sensorik. Für die elektromagnetische Feinauslegung wird eine FE-Simulationsumgebung eingesetzt [13]. Das Entwicklungsziel ist der bestmögliche Gesamtwirkungsgrad. Die Eisenverluste im Elektrolech werden mit hochgenauen Werkstoffmodellen berechnet [14]. Da diese Ansätze ebenfalls modular aufgebaut sind [11], ist es bei Bedarf möglich, fertigungs- beziehungsweise produktionsbedingte Veränderungen an den Werkstoffeigenschaften zu simulieren und im Entwurf aufzunehmen [15]. Die Auswahl und Dimensionierung des Kühlkonzepts schließt das Entwurfsschema ab. Es werden geeignete Kühlkonzepte bewertet und die thermischen Betriebsgrenzen analysiert. Damit stehen

die finalen Leistungsdaten der elektrischen Antriebsachse zur Verfügung.

ZWISCHENERGEBNISSE DES PROJEKTS

Die sich so ergebende Topologie des Antriebs ist in BILD 1 dargestellt. Sie besteht aus den zwei bereits genannten Elektromotor-Getriebeeinheiten. Die gezeigte Getriebetopologie existiert in ähnlicher Form im Lösungsraum der gesamten Getriebesynthese. Die Elektromotor-Getriebeeinheit für den Betrieb bis 26 t Zuladung ist an der Planetenstufe schaltbar ausgeführt. Mit dem höher übersetzten Gang kann das vollbeladene Anfahren an einer Steigung realisiert werden. Für die zweite Elektromotor-Getriebeeinheit wurde das Ergebnis der Topologiesynthese im Lauf des Projekts angepasst, da beispielsweise bauraumbedingte Randbedingungen eingehalten werden mussten, die die Synthese nicht direkt berücksichtigt. Zur Steigerung der Leistungsdichte und Reduktion der Verlustleistung wurden zwei gekoppelte Planetengetriebestufen durch eine Stufenplanetengetriebestufe ersetzt. Aufgrund der Bauraum- und Montagebedingungen von Stufenplanetengetrieben ergeben sich weitere Randbedingungen bei der FE-basierten Makrogeometrieoptimierung. Diese wurde entsprechend erweitert, sodass eine automatisierte Berechnung und Bewertung verschiedenster Auslegungsvarianten möglich ist.

Bei den hochbelasteten Getriebestufen konnte die maximale Zahnfußspannung um bis zu $\Delta\sigma_F = 17\%$ und gleichzeitig die Schwankung des Summendrehefehlers um bis zu $\Delta DF = 61\%$ im Vergleich zur initialen Auslegung nach

Altteile sind die Basis unserer Arbeit.

Aufarbeitung – der Umwelt zuliebe

Haben sie ZF (Sachs)-Altaggregate wie Kupplungsdruckplatten, Kupplungsscheiben, ConAct-Ausrücksysteme, Drehmomentwandler? Wir nehmen gerne Ihre Altteile. Rufen Sie uns an.



ZF Friedrichshafen AG | Werk Bielefeld
Tel.: +49 (521) 41 70 3 -75 oder -41
sachs.blf@zf.com





BILD 4 Matrixbasierte Generierung thermischer Netzwerke unter Nutzung von SPH-generierten Ölverteilungen (© ika)

Norm reduziert werden. Weniger hochbelastete Stufen wurden hinsichtlich des Wirkungsgrads optimiert. Insbesondere die Verlustleistung der Eingriffe der Planetengetriebestufe und der Stufenplanetengetriebestufe konnten so um bis zu $\Delta P_V = 40\%$ gesenkt werden. Eine weitere Optimierung der Verzahnung ist in der dynamischen Mehrkörpersimulation möglich [16].

Neben der Verifikation der Systemeffizienz – Vermessung der Einzelsysteme sowie Vermessung des gesamten Antriebsstrangs – wird innerhalb des Projekts die Modellgenauigkeit des thermischen Verhaltens anhand des Prototypgetriebes verifiziert. Dazu wurde eine Stirnradwelle des Getriebes hohl gestaltet, um mittels einer Telemetrie, Komponen-

temperaturen der rotierenden Bauteile, wie Lagerinnenringe, Wellen- und Zahnräderkörper sowie des Zahnfußes, erfassen zu können. Durch die Integration weiterer Temperatursensoren innerhalb des Getriebegehäuses werden weitere Temperaturen erfasst. Die Auswahl und Dimensionierung des Kühlsystems, bei dem die Ergebnisse der Verlustberechnung genutzt werden, schließt das Entwurfsschema ab. Es werden geeignete Motorkühlkonzepte bewertet und die thermischen Betriebsgrenzen analysiert.

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts Concept ELV² wird eine holistische Entwicklungsmethodik erarbeitet, welche speziell auf

die Anforderungen von elektrischen Antriebssträngen ausgelegt ist. Die Methodik wird im Projekt zur Auslegung eines Prototyps einer vollelektrischen Lkw-Achse eingesetzt, die derzeit konstruiert wird.

Durch die innerhalb des Projekts gewonnenen Erkenntnisse, welche mit dem Aufbau des Systemprototyps einhergehen, können die an der RWTH Aachen University entwickelten Methoden weiter optimiert werden und so einen Beitrag zur weiteren Erhöhung der Qualität und Schnelligkeit der Antriebssystementwicklung leisten. So kann gegenüber herkömmlichen Ansätzen eine höhere Zahl an Systemvarianten berücksichtigt werden, wodurch der Entwicklungsprozess um mögliche Iterationen reduziert werden kann.

LITERATURHINWEISE

[1] European Parliament: Regulation (EU) 2019/1242 of the European Parliament and of the Council of 20 June 2019 setting CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and amending Regulations (EC) No 595/2009 and (EU) 2018/956 of the European Parliament and of the Council and Council Directive 96/53/EC. In Kraft seit 20. Juni 2019

[2] Institut für Kraftfahrzeuge: Concept ELV². Online: <https://www.ika.rwth-aachen.de/de/forschung/projekte/energiemanagement-und-antriebe/2801-concept-elv2.html>, aufgerufen: 01. April 2021

[3] Europäische Kommission: Commission Regulation (EU) 2017/2400 of 12 December 2017 implementing Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council as regards the determination of the CO₂ emissions and fuel consumption of heavy-duty vehicles and amending Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council and Commission Regulation (EU) No 582/2011. In Kraft getreten am 12. Dezember 2017

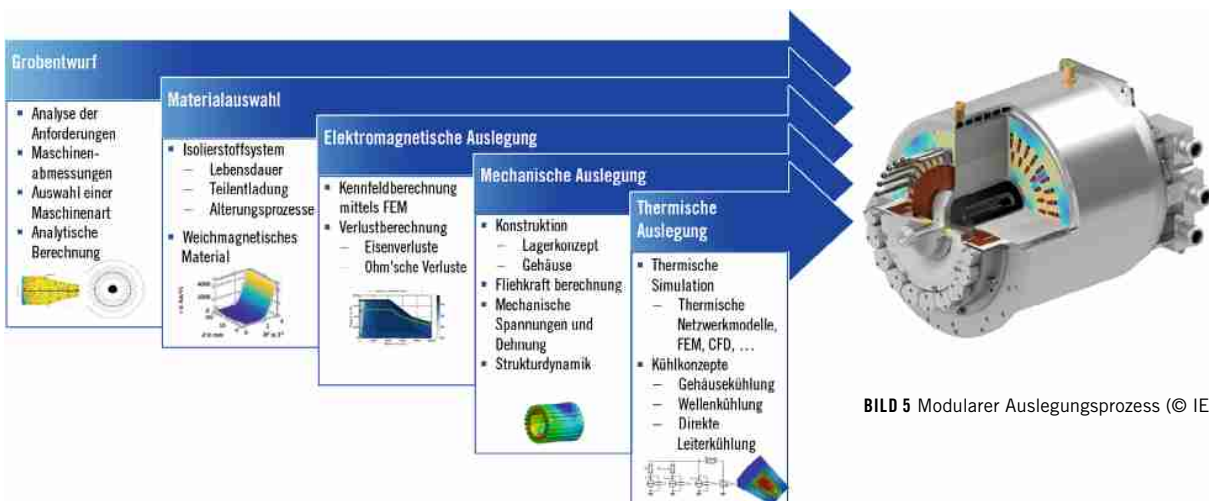


BILD 5 Modularer Auslegungsprozess (© IEM)

[4] Kieninger, D.; et al.: Automatisierte Auslegung und Optimierung von Getrieben für Elektrofahrzeuge. In: MTZ worldwide 80 (2019), Nr. 11, S. 94–98

[5] Naunheimer, H.; et al.: Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019

[6] Klocke, F.; Brecher, C.: Zahnrad- und Getriebe-technik : Auslegung – Herstellung – Untersuchung – Simulation. München: Hanser, 2017

[7] Cao, J.: Anforderungs- und fertigungsgerechte Auslegung von Stirnradverzahnungen durch Zahnkontaktanalyse mit Hilfe der FEM. Aachen, RWTH Aachen University, Dissertation, 2002

[8] Zhe, J.; et al.: Numerical simulations of oil flow inside a gearbox by Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method. In: Tribology International 127, November 2018, S. 47–58

[9] Johannes, G.: Wirkungsgrad und Wärmeaus-halt von Zahnradgetrieben bei instationären Betriebszuständen. München: Dr. Hut Verlag, 2015

[10] Groschup, B.; et al.: Operational Enhancement of Electric Drives by Advanced Cooling Technologies. Konferenz IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Athen, 2019

[11] Nell, M.; et al.: Complete and accurate modular numerical computation scheme for multicoupled electric drive systems. IET Science, Measurement & Technology 14, 2020

[12] Franck, M.; et al.: Transient System Model for the Analysis of Structural Dynamic Interactions of Electric Drivetrains. In: Energies 14 (2021)

[13] IEM der RWTH Aachen University: The institute's own finite element (FE) library iMOOSE and rapid solver prototyping enviroment pyMOOSE. <https://www.iem.rwth-aachen.de/go/id/qtgo/lidx/1>, aufgerufen: 01. April 2021

[14] Leuning, N.; et al.: Advanced Soft- and Hard-Magnetic Material Models for the Numerical Simulation of Electrical Machines. In: IEEE Transactions on Magnetics 54 (2018)

[15] Leuning, N.; et al.: Effect of Material Processing and Imposed Mechanical Stress on the Magnetic, Mechanical and Microstructural Properties of High-Silicon Electrical Steel. In: Steel Research International 87 (April 2016)

[16] Westphal, C.; et al.: Analysis of the Operational Behavior of a High-Speed Planetary Gear Stage for Electric Heavy-Duty Trucks in Multi-Body Simulation. Online: <https://www.powertransmission.com/>

articles/0321/Analysis_of_the_Operational_Behavior_of_a_High-Speed_Planetary_Gear_Stage_for_Electric_Heavy-Duty_Trucks_in_Multi-Body_Simulation/, aufgerufen: 6. Mai 2021

DANKE

Die Autoren danken dem BMWi für die Förderung (Förderkennzeichen 01MY17002B) sowie Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lutz Eckstein (ika), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher (WZL) und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. hab. Kay Hameyer (IEM).



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE

Test now for 30 days free of charge:
www.emag.springerprofessional.de/atz-heavyduty-worldwide

Von Truck bis Traktor

Für maximale Wirtschaftlichkeit und minimale Emissionen

automotive
engineering **iauv**

Mehr dazu und zu unserer
 einzigartigen Kompetenzbreite
 erfahren Sie auf www.iauv.com