

# EMK25 (ehemals / **formerly** FEMAG Anwendertreffen)

Pfarrstadel Reichenhofen, Kirchstraße 4, 88299 Leutkirch – Reichenhofen

## 03.12.2025: E-Maschinen Kolloquium – Tag 1 / **Day 1**

10:00 – 10:40 Anmeldung / [Registration](#)

10:40 – 10:45 **J. Steinbrink:** Begrüßung / [Welcome](#)

10:45 – 11:15 **M. Alexander, Robert Bosch GmbH**

01 Entwicklungstrends bei E-Maschinen für automobile Fahrtriebe / [Trends in the development of electric motors for automotive drive systems](#)

11:15 – 11:45 **P. Stopp, Gamma Technologies**

02 Erweiterungen in GT-FEMAG - von der Geometrieerstellung bis zur Multiphysik-Simulation / [Advancements in GT-FEMAG - from geometry design to multi-physics simulation](#)

11:45 – 12:15 **R. Köster, KSB SE & Co. KGaA / TUDa; A. Binder, TU Darmstadt**

03 Elektromagnetische Auslegung eines supraleitenden synchronen Windgenerators mit mittlerer Drehzahl für 13 MW, 600 min<sup>-1</sup> / [Electromagnetic design of a super-conducting mid-speed synchronous wind generator for 13 MW, 600 rpm](#)

12:15 – 13:10 gemeinsamer Mittagsimbiss mit Ausstellungsteil

13:10 – 13:40 **A. Möckel; M. Lehmann, TU Ilmenau**

04 Anwendung von Verfahren der künstlichen Intelligenz im Bereich elektrischer Antriebe / [Application of Artificial Intelligence methods in the area of electric drives](#)

13:40 – 14:10 **Falk Laube, M.L. DriveSolutions GmbH**

05 Zweiphasiger Betrieb von großen elektrisch erregten Synchronmaschinen / [Two-phase operation of large electrically excited synchronous machines](#)

14:10 – 14:40 **J. Geldner, HS-Heilbronn; M. Baun, ebm-pabst Mulfingen GmbH & Co. KG**

06 Feldrekonstruktion aus Teilmodellen: Ein Kopplungsansatz für permanenterregte Synchronmaschinen / [Field reconstruction from partial models: A coupling approach for permanently excited synchronous machines](#)

14:40 – 15:00 **P. Aeschlimann, Absolute Magnetics AG**

07 Innovative magnetische Encoder / [Innovative magnetic encoders](#)

15:00 – 15:40 Kaffeepause mit Ausstellungsteil

15:40 – 16:00 **Falk Laube, M.L. DriveSolutions GmbH**

08 Neuartiger Radnabenmotor für eBikes auf Ferritbasis / [Innovative ferrite-based wheel hub motor for e-bikes](#)

16:00 – 16:30 **M. Behrendt, LUH-IAL**

09 Design und Betriebsverhalten elektrischer Maschinen mit additiv gefertigten Motorkomponenten / [Design and performance of electric machines with Additive Manufactured motor components](#)

16:30 – 17:00 **F. Jurisch, BBB**

10 Problematik SE-Magnete / [Situation with SE magnets](#)

17:00 – 17:30 **B. Ponick, LUH-IAL**

11 Diversifizierung technischer Studiengänge – Fluch oder Segen? / [Diversification of technical degree programs – a blessing or a curse?](#)

ab 19:30 Dinner-Bufferet im Pfarrstadel (Hans-Multscher-Haus)

## EMK25 (ehemals / [formerly](#) FEMAG Anwendertreffen)

Pfarrstadel Reichenhofen, Kirchstraße 4, 88299 Leutkirch – Reichenhofen

### 04.12.2025: E-Maschinen Kolloquium – Tag 2 / [Day 2](#)

- 09:00 – 09:45 **R. Tanner, SEMAFOR Informatik & Energie AG; S. Strüver, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG; J. Krotsch, HS Aalen**  
12 Entmagnetisierungsbewertung mit FEMAGtools – Hintergrund und Anwendung / [Demagnetisation assessment using FEMAGtools – Background and Application](#)
- 09:45 – 10:15 **M. Bleicher, LUH-IAL**  
13 Einflussfaktoren und Risiken beim Einsatz von Wellenerdungssystemen / [Influencing factors and risks associated with the use of shaft grounding systems](#)
- 10:15 – 10:45 Kaffeepause mit Ausstellungsteil
- 10:45 – 11:15 **F. Brenner, Gamma Technologies**  
14 Mechanische Simulation von elektrischen Maschinen mit GT-FEMAG - vom Early-Design bis zur Systemebene / [Mechanical electric machine simulation with GT-FEMAG - from early design stage to system level](#)
- 11:15 – 11:45 **O. Korolova, proFluxx GmbH**  
15 Numerische Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente von Synchronmaschinen / [Numerical determination of equivalent circuit elements of synchronous machines](#)
- 11:45 – 12:15 **C. Schepe, LUH-IAL; T. Voigt, ZF Group**  
16 Zusatzverluste in umrichter gespeisten Induktionsmaschinen – Berechnung und Messung / [Stray load losses in inverter-fed induction machines – calculation and measurement](#)
- 12:15 – 13:15 gemeinsamer Mittagsimbiss mit Ausstellungsteil
- 13:15 – 13:45 **C. Wohlfahrt; J. Schugg, SycoTec GmbH & Co. KG**  
17 Schlingströme in elektr. Maschinen – Wirkmechanismen, rechnerischer Ansatz, messtechnischer Nachweis und Reduktionsmaßnahmen / [Circulating currents in electrical machines – Mechanisms, calculated approach, experimental verification and reduction methods](#)
- 13:45 – 14:45 **M. Hullmann, Baker Hughes INTEQ GmbH / HS Aalen; J. Krotsch, HS Aalen; E. Karakilic, LUH-IAL**  
18 Oberschwingungsmodell der PMSM für die Vorausberechnung der Pulswechselrichterströme und (Rotor)Wirbelstromverluste / [PMSM Frequency Domain Model for Inverter Current Simulation and Eddy Current Loss Prediction](#)
- 14:45 – 14:50 **J. Steinbrink, LUH-IAL**  
Vorausschau und Abschluss / [Outlook and Conclusion](#)

Anmerkung: Vorgesehen ist eine Live-Übersetzung für englischsprachende Teilnehmer.

[Note: Live translation will be arranged for English-speaking participants.](#)

**M. Alexander, Robert Bosch GmbH****01 Entwicklungstrends bei E-Maschinen für automobile Fahrtriebe / Trends in the development of electric motors for automotive drive systems**

Die Firma Bosch entwickelt seit mehr als 20 Jahren elektrische Antriebe für Hybrid- und Elektrofahrzeuge und tritt heute als Komponenten- und Systemanbieter mit einem breiten Produktportfolio am Markt auf.

Nach einer kurzen Einleitung werden vom Markt kommende, generelle Entwicklungsziele wie zum Beispiel Effizienz, Kosten, Performance und Nachhaltigkeit dargestellt. Anschließend werden aktuelle Entwicklungstrends detaillierter beschrieben und deren primäre Zuordnung zu den vorher definierten Zielen aufgezeigt. Dazu werden innovative Technologien und Ansätze in den Bereichen Wicklungen, Blechpakete, Magnete, Kühlung sowie Topologien und alternative Magnetkreiskonzepte vorgestellt. Zudem wird auf fortschrittliche Simulationsmethoden und Optimierungen im Gesamtsystem eingegangen. Abschließend fasst der Vortrag die wesentlichen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

The company Bosch has been developing electric drives for hybrid and electric vehicles for more than 20 years and today appears on the market as a component and system supplier with a broad product portfolio.

After a brief introduction, general development goals coming from the market, such as efficiency, cost, performance, and sustainability, are presented. Subsequently, current development trends are described in more detail, and their primary assignment to the previously defined goals is shown. Innovative technologies and approaches in the areas of windings, laminated cores, magnets, cooling, as well as topologies and alternative magnetic circuit concepts are introduced. In addition, advanced simulation methods and optimizations in the overall system are addressed. Finally, the presentation summarizes the key findings and provides an outlook on future developments.

## P. Stopp, Gamma Technologies

02 Erweiterungen in GT-FEMAG - von der Geometrieerstellung bis zur Multiphysik-Simulation / [Advancements in GT-FEMAG - from geometry design to multi-physics simulation](#)

Jüngste Entwicklungen in GT-FEMAG erweitern dessen Möglichkeiten als integrierte Design- und Simulationsumgebung für elektrische Maschinen erheblich. Diese Präsentation behandelt die neuesten Fortschritte, die den Workflow von der Geometrieerstellung bis zur Multiphysik-Analyse optimieren. Eine wesentliche Verbesserung liegt in der flexiblen Definition von Geometrievorlagen, die es Benutzern ermöglicht, mithilfe eines parametergesteuerten, modularen Ansatzes schnell Prototypen von Maschinentopologien zu erstellen. Neben der elektromagnetischen Analyse bietet GT-FEMAG jetzt einen erweiterten thermischen Workflow, der effiziente thermische Simulationen für stationäre und transiente Temperaturverteilungen unterstützt und so die Kühlauslegung ermöglicht. Ergänzend dazu bietet der mechanische Workflow detaillierte Spannungs- und Verformungsanalysen, einschließlich Untersuchungen von Presspassungen, die die Bewertung der strukturellen Integrität unter Betriebslasten ermöglichen.

[Recent developments in GT-FEMAG will significantly expand its capabilities as an integrated design and simulation environment for electric machines. This presentation covers the latest advancements that enhance the workflow from geometry creation to full Multiphysics analysis. A key improvement lies in the flexible geometry template definition, which enables users to rapidly prototype machine topologies through a parameter-driven, modular approach. Beyond electromagnetic analysis, GT-FEMAG now features an extended thermal workflow that supports efficient thermal simulations for steady-state and transient temperature distribution enabling cooling design. Complementary to this, the mechanical workflow provides detailed stress and deformation analysis, covering press-fit setup and burst speed investigations allowing structural integrity assessment under operational loads.](#)

**R. Köster, KSB SE & Co. KGaA / TUDa; A. Binder, TU Darmstadt**

03 Elektromagnetische Auslegung eines supraleitenden synchronen Windgenerators mit mittlerer Drehzahl für 13 MW,  $600 \text{ min}^{-1}$  / [Electromagnetic design of a super-conducting mid-speed synchronous wind generator for 13 MW, 600 rpm](#)

Ein getriebebehafteter mittelschneller 24-poliger Permanentmagnet-erregter Rotor eines 6-MW-Wechselrichter-betriebenen Synchron-Windgenerators mit ölgekühlter Stator-Kühlung soll für Prototypentests durch einen elektrisch erregten Rotor mit einer Hochtemperatur-supraleitenden (HTS) Erregerwicklung ersetzt werden. Das Projekt wird vom deutschen Staat finanziert, vertreten und verwaltet von der Forschungszentrum Jülich GmbH. Bislang wurden der bereits konstruierte Stator und zwei Prototypen von HTS-Erregerwicklungen hergestellt, die derzeit bei kryogenen Temperaturen getestet werden. Der fertiggestellte supraleitende Windgenerator soll auf dem Prüfstand der Firma Flender in Ruhstorf/Rott (Deutschland) mit Wechselrichterversorgung der Statorwicklung und alternativ mit Diodengleichrichterversorgung bei variabler Drehzahl gründlich getestet werden. Die elektromagnetische Auslegung für den supraleitenden Rotor bei 30 K und 1000 A Gleichstrom-Erregerstrom verspricht aufgrund der möglichen hohen Rotor-Gleichstromdichte und der direkten Ölkühlung der Statorwicklung eine Steigerung der Ausgangsleistung auf bis zu 13 MW bei einem Leistungsfaktor von 1 bei einer Bemessungsdrehzahl von 600 U/min. Der HTS-Rotor ist in einem rotierenden Kryostaten aus Edelstahl als Vakuumbehälter mit einer umwickelten thermischen Mehrschichtisolierung gekapselt. Der verbleibende thermische Zufluss wird über Kupfer-Sammelschienen abgeleitet, die mit einem Flüssig-Neon-Reservoir verbunden sind (das auch die Stromleitungen von warm nach kalt kühlt), das von einem stationären Kühlkopf bereitgestellt wird. Die beiden Schleifringe mit den Kohlebürsten für die Gleichstrom-Erregerstromversorgung sind luftgekühlt. Die numerische elektromagnetische 2D- und 3D-Finite-Elemente-Auslegung der zweischichtigen Pancake-Erreger-Spulen muss die stark nichtlineare Spannungs-Strom-Charakteristik des HTS-Materials bei einer bestimmten Temperatur und Magnetflussdichte berücksichtigen. Die Luftspaltfeldharmonischen aufgrund der offenen Statorschlitze und die zusätzlichen Luftspaltmagnetfelder der harmonischen Statorströme aufgrund der Wechselrichter- oder Diodenversorgung verursachen Wirbelströme, insbesondere in der elektrisch leitenden Kryostatenwand. Für eine ordnungsgemäße Dämpfung dieser Magnetfelder zur Begrenzung der Wechselstromverluste im HTS-Material muss ein zusätzlicher Kupferdämpfer an der Kryostatenoberfläche verwendet werden. Die zeitaufgelösten Wirbelstromsimulationen im Kryostaten, im Rotoreisen mit seiner nichtlinearen Magnetisierungscharakteristik und im HTS-Spulenmaterial werden diskutiert. Es werden Methoden vorgestellt, um die Rechenzeit aufgrund der langen elektrischen Zeitkonstanten bis zum Erreichen des stationären Betriebs und aufgrund der notwendigen feinmaschigen Vernetzung für die geringe Wirbelstrompenetrationstiefe zu reduzieren. Die numerischen Ergebnisse der Wirbelstromverluste am Wechselrichter und an der Diodenversorgung bei Nennbetrieb sowie bei reduzierter Drehzahl und Teillast werden vorgestellt. Diese Wirbelstromverlustkomponenten werden zusammen mit dem berechneten thermischen Zufluss zur Rotorwicklung aufgrund von Wärmestrahlung und -leitung verwendet, um den Rotorkühlkreislauf und die erforderliche Größe des Kaltkopfes und der Kryokühler anzupassen. Der erwartete Generatorwirkungsgrad und die geplante Gesamtaktivmasse zeigen eine deutlich erhöhte Leistungsdichte bei einer stark reduzierten Menge an Seltenerdmaterial im Vergleich zu den modernsten Permanentmagnetgeneratorlösungen.

A geared mid-speed 24-pole permanent magnet excited rotor of a 6 MW inverter-operated synchronous wind generator with an oil-immersed stator cooling shall be replaced for prototype testing by an electrically excited rotor with a high-temperature superconducting (HTS) exciter winding. The project is funded by the German state, represented and administered by Forschungszentrum Jülich GmbH. So far, the already constructed stator and two prototype HTS exciter coils are manufactured, and the coils are under test at cryogenic temperature. The finally completed superconducting wind generator shall be tested thoroughly at the Flender company test rig, Ruhstorf/Rott, Germany, with stator winding inverter supply and alternatively with diode rectifier supply at variable speed operation. The electromagnetic design for the superconducting rotor at 30 K and 1000 A DC exciter current promises an increase of output power up to 13 MW at unity power factor at rated speed 600 rpm due to the possible high rotor DC current density and the direct oil cooling of the stator winding. The HTS rotor is encapsulated in a rotating stainless-steel cryostat as a vacuum container with a wrapped thermal multi-layer insulation. The residual thermal inflow is extracted via copper bus bars, connected to a liquid neon reservoir (cooling the current leads from warm to cold, too), which is provided by a stationary cold head. The two slip rings with the carbon brushes for DC exciter current supply are air-cooled. The 2D and 3D Finite Element numerical electromagnetic design of the two-layer pancake exciter coils must consider the highly non-linear voltage-current characteristic of the HTS material at a given temperature and magnetic flux density. The air gap field harmonics due to the open stator slots and the additional air-gap magnetic fields of the harmonic stator currents due to the inverter or diode supply cause eddy currents, especially in the electrically conductive cryostat wall. For a proper damping of these magnetic fields to limit AC losses in the HTS material, an additional copper damper must be used at the cryostat surface. The time-step eddy current simulations in the cryostat, in the rotor iron with its non-linear magnetization characteristic, and in the HTS coil material are discussed. The methods to reduce the computation time due to the long electrical time constants, until steady state operation is reached, and due to the necessary refined meshing for the small eddy current penetration depth, are presented. The numerical results of the eddy-current losses at the inverter and diode supply at rated operation and at reduced speed and partial load are reported. These eddy current loss components are used together with the computed thermal inflow to the rotor winding due to heat radiation and conduction to tailor the rotor cooling circuit and the needed size of the cold head and of the cryo-coolers. The expected generator efficiency and the envisaged total active mass show a significantly increased power density at a strongly reduced amount of rare earth material, compared to the state-of-the-art permanent magnet generator solutions.

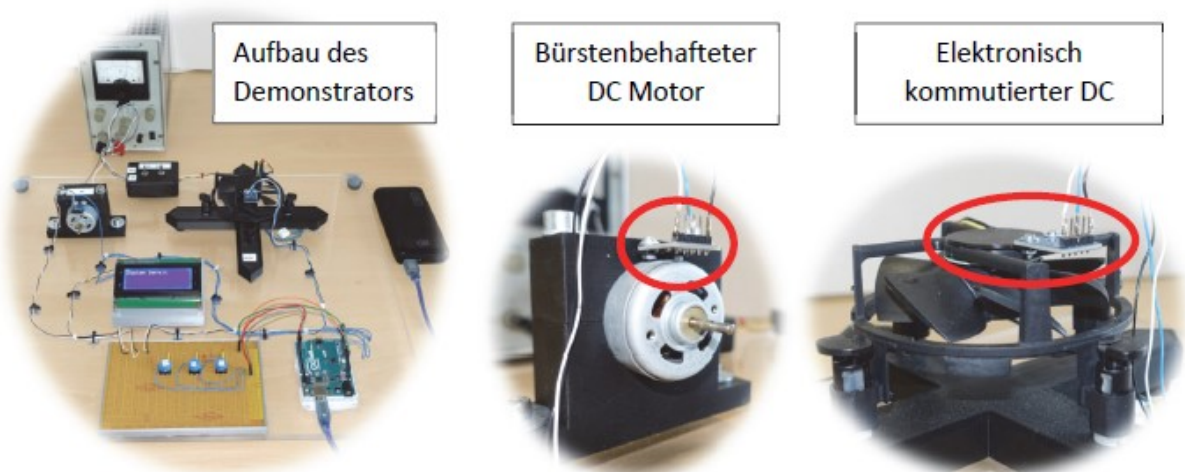
**A. Möckel; M. Lehmann, TU Ilmenau****04 Anwendung von Verfahren der künstlichen Intelligenz im Bereich elektrischer Antriebe /**  
*Application of Artificial Intelligence methods in the area of electric drives*

Der Beitrag befasst sich mit den Möglichkeiten des Einsatzes von Methoden und Verfahren, die sich auf dem rasant an praktischer Bedeutung gewinnenden Gebiet der künstlichen Intelligenz (KI) etablieren. Der Fokus wird dabei insbesondere auf die Fehlererkennung und die Zustandsabschätzung (predictive maintenance) von elektrischen Maschinen gelegt.

Vom Grundsatz handelt es sich dabei um ein sehr gut erforschtes und publiziertes Thema. Bei den bekannten und üblichen Verfahren besteht ein zentraler Punkt darin, dass die Verfahren in der Regel für eine spezielle Anwendung bzw. Einsatzfall angelegt sind. Jede größere Veränderung bzw. jeder andere Motortyp verlangt üblicherweise eine neue Festlegung relevanter Parameter des Verfahrens. Ein weiteres Problem besteht darin, dass in vielen Fällen das Grenzwerte bzw. Hystereseschwellen definiert werden müssen. Werden diese zu strikt festgelegt, werden Warnungen bzw. Fehlerfälle zwar sicher erkannt, aber die Wahrscheinlichkeit von ungerechtfertigten Meldungen steigt. Bei einer zu breiten Toleranz ist die Möglichkeit der sicheren Fehlererkennung reduziert.

Der Einsatz selbstlernender und damit merkmalerkennender Verfahren eröffnet die Möglichkeit die genannten Schwierigkeiten zu umgehen und Lösungen zu erarbeiten, die ein deutlich breiteres Einsatzgebiet von Varianten elektrischer Maschinen ohne einsatzfallabhängige Justierung abdecken.

Anhand von drei verschiedenen praktisch erprobten Beispielen wird gezeigt, welche Möglichkeiten aber auch Irrwege sich dabei ergeben. Ein sehr transparentes Verfahren auf Basis eines Arduino®-Boards zeigt, dass bereits mit sehr geringem Aufwand eine einfache und relativ universelle Fehlerdetektion möglich ist (Abbildung 1).



*Abbildung 1: Einführendes Beispiel eines Demonstrators auf Basis eines sehr einfachen Mikrokontrollerboards und eines in der mittleren und rechten Darstellung gekennzeichneten Schwingungssensors zur Überwachung*

Ein weiteres, deutlich leistungstärkeres Beispiel demonstriert eine Lagerzustandserkennung. Dabei werden zwei unterschiedliche Ansätze gegenübergestellt. Eine Variante besteht aus einem hybriden, hierarchischen KI-Ansatz (Hierarchical Extreme Learning Machine - HELM) bestehend aus einem Autoencoder (AE) und einem Ein-Klassen Klassifikator. Die alternative Variante basiert auf einem Verfahren namens Generative Adversarial Network (GAN).

Abschließend zeigt ein Beispiel anhand einer Fehlererkennung auf Grundlage von abgetasteten Kommutatoroberflächen die Gefahr, dass bei ungünstig gewählter Zielstellung bzw. ei-

nem unvorteilhaften Vorgehen der Aufwand und der Nutzen in eine Schieflage geraten. Eine praktische Anwendung wird dadurch verhindert.

In Summe wird gezeigt, dass die Möglichkeiten und Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz, fernab von den stark im medialen Fokus befindlichen Sprachmodellen, interessante Ansätze auch für den Einsatz im Bereich der elektrischen Maschinen bieten.

[1] Lehmann M., Möckel A.: Intelligent Bearing Condition Monitoring for Electrical Machines Through Vibration Signal Based on Autoencoder and Almost-Parameter-Free Classifiers, 2024 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)

[2] Lehmann M., Möckel A.: Distance-Based Explainable Anomaly Detection for Electrical Machines Through Vibration Signals 2024 14th International Electric Drives Production Conference (EDPC)

[3] Lehmann M., Möckel A.: Comprehension and Limitations of Different Types of Data-Driven Condition Monitoring Systems for Electrical Machines in the Context of Bearing Condition Monitoring, 2025 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)

[4] Lehmann M., Möckel A.: Unsupervised anomaly detection for industrial data using Generative Adversarial Networks, 2025 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)

This article deals with the possibilities of using methods and procedures that are becoming established in the rapidly growing field of artificial intelligence (AI). The focus is particularly on fault detection and condition assessment (predictive maintenance) of electrical machines. In principle, this is a very well-researched and published topic. A key point regarding the known and common procedures is that they are usually designed for a specific application or use case. Any major change or any other motor type usually requires a new definition of the relevant parameters of the procedure. Another problem is that in many cases, limit values or hysteresis thresholds must be defined. If these are set too strictly, warnings or faults will be detected reliably, but the probability of unjustified messages will increase. If the tolerance is too wide, the possibility of reliable fault detection is reduced.

The use of self-learning and thus feature-recognizing methods opens up the possibility of circumventing the aforementioned difficulties and developing solutions that cover a significantly broader range of applications for variants of electric machines without application-dependent adjustment.

Three different, practically tested examples are used to show the possibilities, but also the pitfalls, that arise in this context. A very transparent method based on an Arduino® board shows that simple and relatively universal fault detection is possible with very little effort (Figure 1).

Another, significantly more powerful example demonstrates bearing condition detection. Two different approaches are compared. One variant consists of a hybrid, hierarchical AI approach (Hierarchical Extreme Learning Machine - HELM) consisting of an autoencoder (AE) and a single-class classifier. The alternative variant is based on a method called Generative Adversarial Network (GAN).

Finally, an example based on fault detection using sampled commutator surfaces shows the danger that, if the target is chosen unfavorably or the approach is disadvantageous, the effort and benefit can become unbalanced. This prevents practical application.

Overall, it is shown that the possibilities and methods from the field of artificial intelligence, far removed from the language models that are the focus of media attention, also offer interesting approaches for use in the field of electrical machines.

**Falk Laube, M.L. DriveSolutions GmbH**

05 Zweiphasiger Betrieb von großen elektrisch erregten Synchronmaschinen / [Two-phase operation of large electrically excited synchronous machines](#)

Große netzbetriebene elektrisch erregte Synchrongeneratoren (EESG) im mittleren MVA Bereich (1...20MVA) und Mittelspannung (kV) werden üblicherweise für den 3-phasigen symmetrischen Betrieb ausgelegt.

In seltenen Ausnahmefällen kann es allerdings Anwendungen geben (z.B. Prüfstandsanwendungen), in denen sowohl der 3-phasige als auch der 2-phasige Betrieb möglich sein soll, wobei mit dem 2-phasigen Betrieb hier eigentlich der unsymmetrische einphasige Betrieb über 2 Stränge mit abgeschaltetem 3. Maschinenstrang gemeint ist.

Bei diesem extrem unsymmetrischen Betriebsfall spielt der Dämpferkäfig, der im symmetrischen 3-phasigen Betrieb normalerweise lediglich als Anlaufkäfig dienen und Ausgleichs- und Einschwingvorgänge abdämpfen soll, eine besondere Rolle.

Im Extremfall des hier vorliegenden unsymmetrischen Betriebs sind die Verluste im Dämpferkäfig unverhältnismäßig höher, was bei der Maschinenauslegung und insbesondere bei der Auslegung des Dämpferkäfigs neben den hohen mechanischen Belastungen (Drehmoment-schwankungen) besondere Berücksichtigung finden muss.

Der Vortrag behandelt die Berechnung der Verluste im Dämpferkäfig und dessen Einfluss auf das Betriebsverhalten der Maschine im Sonderfall des 2-phasigen Betriebs unter Verwendung der transienten FEM mit ANSYS Maxwell.

[Large grid-connected electrically excited synchronous generators \(EESG\) in the medium MVA range \(1...20MVA\) and medium voltage \(kV\) are usually designed for 3-phase symmetrical operation.](#)

[In rare exceptional cases, however, there may be applications \(e.g., test bench applications\) in which both 3-phase and 2-phase operation should be possible, whereby 2-phase operation here actually refers to asymmetrical single-phase operation via 2 strands with the 3rd machine strand switched off.](#)

[In this extremely asymmetrical operating case, the damper cage, which in symmetrical 3-phase operation normally serves only as a start-up cage and is intended to dampen compensation and transient processes, plays a special role.](#)

[In the extreme case of unbalanced operation, the losses in the damper cage are disproportionately higher, which must be taken into account in the machine design and, in particular, in the design of the damper cage, in addition to the high mechanical loads \(torque fluctuations\).](#)

[The presentation deals with the calculation of losses in the damper cage and its influence on the operating behavior of the machine in the special case of 2-phase operation using transient FEM with ANSYS Maxwell.](#)

## **J. Geldner, HS-Heilbronn; M. Baun, ebm-pabst Mulfingen GmbH & Co. KG**

06 Feldrekonstruktion aus Teilmodellen: Ein Kopplungsansatz für permanenterregte Synchronmaschinen / [Field reconstruction from partial models: A coupling approach for permanently excited synchronous machines](#)

Es wird ein Ansatz vorgestellt, der das Luftspaltfeld permanenterregter Synchronmaschinen durch Rekonstruktion aus FEM-basierten Teilmodellen beschreibt. Die Methode koppelt die Teilfelder über nachgebildete Permeanzfunktionen, welche die geometrisch bedingte Modulation des Luftspaltfeldes erfassen. Untersucht werden unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung dieser Permeanzfunktionen sowie deren Einfluss auf die rekonstruierte Feldverteilung und das resultierende Drehmoment. Durch systematische Variationen von Geometrie-, Parameter- und Modellkonfigurationen wird die Genauigkeit und Robustheit des Verfahrens bewertet.

[An approach is presented that describes the air gap field of permanently excited synchronous machines by reconstruction from FEM-based submodels. The method couples the subfields via simulated permeance functions, which capture the geometrically induced modulation of the air gap field. Different approaches for determining these permeability functions and their influence on the reconstructed field distribution and the resulting torque are investigated. The accuracy and robustness of the method are evaluated by systematically varying geometry, parameter, and model configurations.](#)

## P. Aeschlimann, Absolute Magnetics AG

07 Innovative magnetische Encoder / Innovative magnetic encoders

**Absolute Magnetics hat eine innovative Technologie zur Drehpositionserfassung entwickelt**, die auf einem mehrperiodisch magnetisierten Magneten und einer einzigen Messspur basiert. Im Gegensatz zum Nonius-/Vernier-Prinzip mit zwei Spuren werden hier mehrere Magnetisierungen gezielt überlagert. Dies erhöht die Robustheit gegenüber Luftspaltänderungen, Exzentrizität und magnetischen Störeinflüssen. Ein spezieller Algorithmus ermöglicht die gleichzeitige Bestimmung einer absoluten (globalen) und einer hochaufgelösten (lokalen) Position. Das System überzeugt durch einfache Integration, hohe Genauigkeit und volle Funktionalität ohne Kalibrierungsaufwand. Zahlreiche Tests unter realen Bedingungen zeigen: Der Encoder liefert auch bei Fehlausrichtung und magnetischen Streufeldern zuverlässige Ergebnisse – eine leistungsstarke Alternative zu herkömmlichen Encodern.

### Absolute Magnetics invented a new technology for rotary position sensing.

The here described magnetic encoder system consists of two parts: A magnet with a unique, multi-periodic magnetization pattern and corresponding electronics for data processing. Signal acquisition is done on only 1 single magnetic track (see figure 1). This differentiates the Absolute Magnetics Technology from the Nonius / Vernier principle, which uses 2 magnetic tracks for data acquisition. Multiple magnetizations with different periods are intentionally superposed, which brings advantages in terms of robustness of the encoder. When it comes to air gap changes and eccentricity, there is no need to "avoid interference of different magnetic tracks" as with the Nonius / vernier principle.

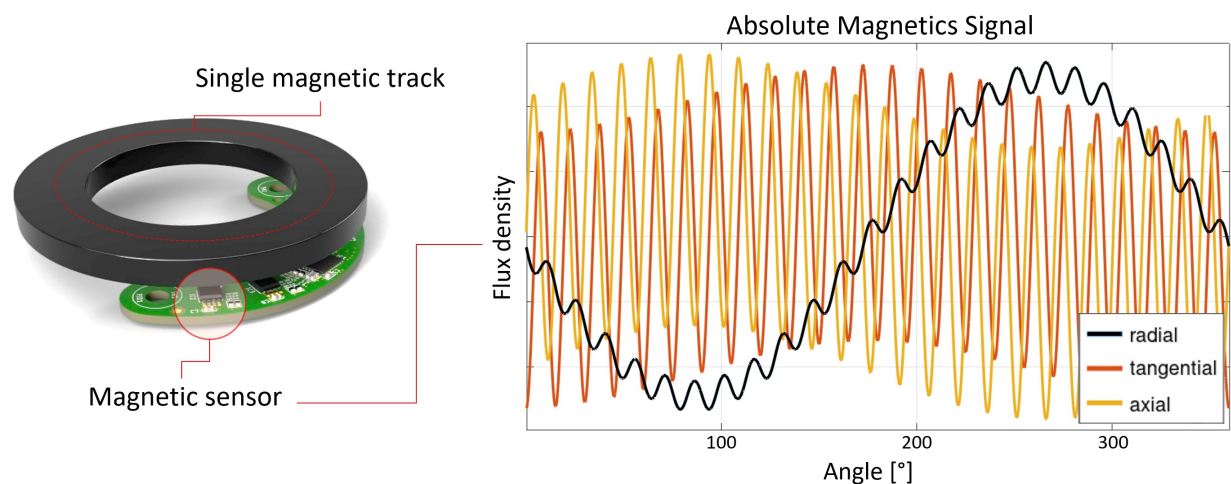


Figure 1: The multi-periodic magnetic signal in 3 axes: Radial (black), tangential (red) and axial (orange), acquired on only 1 single measurement track.

The processing algorithm allows to simultaneously calculate a "global position" on the complete mechanical turn, as well as a "local position" within each magnetic increment. The global position is responsible for making the encoder an absolute position sensor and the local position enables high accuracy. The presentation investigates the performance of Absolute Magnetics' patented encoder technology in real-world scenarios, focusing on its ability to maintain reliable angle sensing despite misalignment and magnetic stray fields. Several tests were conducted to evaluate the system's robustness under these challenging conditions. The benefits of an integrated encoder solution compared to conventional external encoders are discussed. Finally, the paper examines the advantage of using the Absolute Magnetics Encoder without the need for calibration.

**Falk Laube, M.L. DriveSolutions GmbH**

08 Neuartiger Radnabenmotor für eBikes auf Ferritbasis / [Innovative ferrite-based wheel hub motor for e-bikes](#)

Vorgestellt wird hier ein neuartiges, konkurrenzfähiges modulares Antriebskonzept für Radnabenantriebe mit Getriebe für E-Bikes und kleine Elektrofahrzeuge auf Ferritbasis. Den Antrieb gibt es sowohl als Ferrit- als auch als NdFeB-Variante mit mehrstufigem Planetengetriebe wobei die Modularität darin besteht, dass für beide Antriebskonzepte weitgehend gleiche Antriebskomponenten verwendet werden können (Getriebe, Gehäuse, Lagerung, Welle usw.).

Um die deutlich niedrigere Leistungsdichte der Ferritmagnete auszugleichen, musste der prinzipielle Aufbau Motors bezüglich der elektromagnetischen Auslegung und hinsichtlich des Getriebekonzeptes im Vergleich zum Industriebenchmark angepasst werden.

Fokus des Vortrages liegt auf der Vorstellung der besonderen Eigenschaften und Performancedaten im Vergleich zu marktüblichen Radnabenantrieben (Benchmark) insbesondere mit Blick auf die Systemintegration in das Gesamtkonzept bestehend aus Antrieb, Controller, und Batterie.

[This article presents a novel, competitive modular drive concept for ferrite-based wheel hub drives with gearboxes for e-bikes and small electric vehicles. The drive is available in both ferrite and NdFeB versions with multi-stage planetary gearboxes, whereby the modularity lies in the fact that largely the same drive components can be used for both drive concepts \(gearbox, housing, bearings, shaft, etc.\).](#)

[In order to compensate for the significantly lower power density of ferrite magnets, the basic design of the motor had to be adapted in terms of electromagnetic design and gear concept compared to the industry benchmark.](#)

[The presentation focuses on the special features and performance data in comparison to commercially available wheel hub drives \(benchmark\), particularly with regard to system integration into the overall concept consisting of drive, controller, and battery.](#)

**M. Behrendt, LUH-IAL**

09 Design und Betriebsverhalten elektrischer Maschinen mit additiv gefertigten Motorkomponenten / [Design and performance of electric machines with Additive Manufactured motor components](#)

Die additive Fertigung bietet innovative Ansätze für die Entwicklung und Produktion elektrischer Maschinen. Durch den schichtweisen Aufbau können Bauteile komplexe Geometrien erhalten, und durch die Anpassung der Materialzusammensetzung und der Prozessparameter können die elektromagnetischen und mechanischen Eigenschaften verändert werden.

Aktuelle Herausforderungen bestehen jedoch in erhöhten Ummagnetisierungsverlusten aufgrund von Wirbelströmen in additiv gefertigten Komponenten sowie einem Fertigungsprozess, der in Präzision und Geschwindigkeit den konventionellen Methoden noch unterlegen ist.

Ziel der derzeitigen Forschung ist es, die Nachteile wie z.B. erhöhte Ummagnetisierungsverluste auszugleichen und gleichzeitig die Potentiale zu nutzen. Des Weiteren werden spezifische Anwendungen erforscht, die die additive Fertigung gezielt einsetzt, um elektrische Antriebe zu optimieren. Diese Zielsetzungen werden anhand des Entwurfs eines additiv gefertigten Synchron-Reluktanzrotors umgesetzt. Im Fokus sind dabei der Wirkungsgrad, das mittlere Drehmoment, der Leistungsfaktor und die Drehmomentpulsationen in verschiedenen Lastzuständen. Es werden mögliche Entwurfskriterien diskutiert und anhand von Simulationen bewertet. Anschließend wird das Betriebsverhalten eines additiv gefertigten Rotor-Prototypen mit dem Betriebsverhalten eines konventionellen Rotors verglichen.

Abschließend gibt es einen Überblick über weitere Forschungsergebnisse sowie offener Forschungsfragen im Bereich additiver Fertigung von Motorkomponenten.

[Additive manufacturing offers innovative approaches for the development and production of electrical machines. The layer-by-layer construction allows components to have complex geometries, and the electromagnetic and mechanical properties can be modified by adjusting the material composition and process parameters.](#)

[However, current challenges include increased core losses due to eddy currents in additively manufactured components and a manufacturing process that is still inferior to conventional methods in terms of precision and speed.](#)

[The aim of current research is to compensate for disadvantages such as increased core losses while at the same time exploiting the potential. Furthermore, specific applications are being researched that make targeted use of additive manufacturing to optimize electric drives. These objectives are being implemented on the basis of the design of an additively manufactured synchronous reluctance rotor. The focus is on efficiency, average torque, power factor, and torque pulsations under various load conditions. Possible design criteria are discussed and evaluated using simulations. Afterwards, the operating behavior of an additively manufactured rotor prototype is compared with that of a conventional rotor.](#)

[Finally, an overview of further research results and open research topics in the field of additive manufacturing of motor components is provided.](#)

## F. Jurisch, BBB

### 10 Problematik SE-Magnete / [Situation with SE magnets](#)

Zur 19. Kleinmaschinenkonferenz in Ilmenau am 17.03.2011 und zur 20. KMK Ilmenau am 15.03.2012 wurden schon Vorträge ähnlichen Inhalts zur Problematik Seltener Erden (RE) und der daraus gefertigten Permanentmagnete gehalten. Alle darin aufgeführten Vorschläge und geplanten Maßnahmen zur Entschärfung der Situation und Verminderung der Abhängigkeit von China wurden nicht umgesetzt. Es blieb alles beim Alten. Nun hat China eine weitere Stufe der Beschränkung von Lieferungen RE-Magneten gezündet. Es bestehen erhebliche Lieferengpässe und viele Unternehmen sind ratlos, woher sie die dringend benötigten Magnete beziehen können.

In den zurückliegenden 15 Jahren hat sich die Landschaft der Hersteller von SE-Magneten außerhalb Chinas nicht verbessert, sondern weiter verschlechtert. Die Vacuumschmelze GmbH in Hanau, als einziger weltweit außerhalb Chinas verbliebener Produzent von NdFeB-Magneten, ist in den Händen der Privat Equity, die von Haus aus nicht an langfristig wirkenden strategischen Investitionen interessiert ist.

Im Vortrag wird nochmals auf die Lagerstätten, Rohstofferzeugung, Magnetherstellung und Maßnahmen zur Senkung der Anteile an schweren Seltenen Erden (Dy und Tb) hingewiesen. Es werden Vorschläge zum materialsparenden Entwurf elektrischer Maschinen und Recycling unterbreitet.

[At the 19th Small Machinery Conference in Ilmenau on March 17, 2011, and at the 20th SMC Ilmenau on March 15, 2012, similar presentations on the issue of rare earths \(RE\) and the permanent magnets made from them were given. All the proposals and planned measures listed therein to defuse the situation and reduce dependence on China were not implemented. Everything remained the same. Now, China has initiated a further phase of restricting the supply of RE magnets. Significant supply bottlenecks exist, and many companies are at a loss as to where they can source the urgently needed magnets.](#)

[Over the past 15 years, the landscape of rare earth magnet manufacturers outside of China has not improved, but rather worsened. Vacuumschmelze GmbH in Hanau, the only remaining producer of NdFeB magnets outside of China, is owned by private equity firms that are inherently uninterested in long-term strategic investments.](#)

[The presentation will again highlight deposits, raw material production, magnet manufacturing, and measures to reduce the proportion of heavy rare earths \(Dy and Tb\). Suggestions for material-saving design of electrical machines and recycling will be presented.](#)

## B. Ponick, LUH-IAL

### 11 Diversifizierung technischer Studiengänge – Fluch oder Segen? / [Diversification of technical degree programs – a blessing or a curse?](#)

In den letzten 20 Jahren ist eine fortschreitende Diversifizierung der Studiengänge in Deutschland (und auch international) zu beobachten. Alleine in Deutschland können Studierende zwischen 23000 verschiedenen (oder zumindest verschieden bezeichneten) Studienangeboten wählen. Der Beitrag beleuchtet den Sinn und Unsinn dieser Entwicklung mit Blick auf die Ingenieurwissenschaften.

Over the past 20 years, there has been a progressive diversification of degree programs in Germany (and also internationally). In Germany alone, students can choose between 23,000 different (or at least differently named) degree programs. This article examines the sense and nonsense of this development with regard to engineering sciences.

	<b>Leibniz Universität Hannover</b> • Hannover Top 250 worldwide Top 50 national <b>Staatlich</b> <b>29.000</b> Status Anzahl der Studierenden <b>Studiengebühren: Keine</b> ⓘ • Studiengebühren für EU-Bürger (pro Semester)	→ 52 Studiengänge	<a href="#">Mehr Infos</a>
	<b>Universität Paderborn</b> • Paderborn Top 150 worldwide Top 50 national <b>Staatlich</b> <b>19.000</b> Status Anzahl der Studierenden <b>Studiengebühren: Keine</b> ⓘ • Studiengebühren für EU-Bürger (pro Semester)	→ 29 Studiengänge	<a href="#">Mehr Infos</a>
	<b>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</b> • Karlsruhe University of Excellence Top 100 worldwide Top 50 national <b>Staatlich</b> <b>22.000</b> Status Anzahl der Studierenden <b>Studiengebühren: Keine - 36.000 €</b> ⓘ • Studiengebühren für EU-Bürger (pro Semester)	→ 39 Studiengänge	<a href="#">Mehr Infos</a>
	<b>Universität Rostock</b> • Rostock Top 400 worldwide Top 100 national <b>Staatlich</b> <b>13.000</b> Status Anzahl der Studierenden <b>Studiengebühren: Keine</b> ⓘ • Studiengebühren für EU-Bürger (pro Semester)	→ 33 Studiengänge	<a href="#">Mehr Infos</a>
	<b>Hochschule Kaiserslautern</b> • Kaiserslautern • Pirmasens • Zweibrücken + 1 mehr <b>Staatlich</b> <b>6.100</b> Status Anzahl der Studierenden <b>Studiengebühren: Keine - 3.600 €</b> ⓘ • Studiengebühren für EU-Bürger (pro Semester)	→ 49 Studiengänge	<a href="#">Mehr Infos</a>

**R. Tanner, SEMAFOR Informatik & Energie AG; S. Strüver, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG; J. Krotsch, HS Aalen****12 Entmagnetisierungsbewertung mit FEMAGtools – Hintergrund und Anwendung / [Demagnetisation assessment using FEMAGtools – Background and Application](#)**

Eine zuverlässige Beurteilung der Robustheit von PM-erregten Maschinen gegenüber Entmagnetisierung erfordert die möglichst genaue Kenntnis sowohl der elektromagnetischen Belastung, bspw. aufgrund eines Klemmenkurzschlusses, als auch der elektromagnetischen Festigkeit des Maschinendesigns, d. h. die Entmagnetisierung bei einem bestimmten Bestromungszustand. Davon ausgehend kann der Sicherheitsabstand zwischen Belastung und Festigkeit ermittelt und beurteilt werden.

Der Beitrag zeigt anhand von Beispielen, wie der Kurzschlussstrom mit Hilfe der FEMAGtools/FEMAG DC und mit FEMAG TS ermittelt werden kann. Die Vorgehensweise wird verdeutlicht und die zugrundeliegenden Annahmen, Resultate und Grenzen diskutiert. Ferner wird dargestellt, wie sich der kritische Bestromungszustand anhand der Feldstärkeverteilung feststellen lässt.

In Anknüpfung an die GTTC 2024 werden Entmagnetisierungsmodelle zusammengefasst. Deren Nutzung mit der FSL und den FEMAGtools wird beschrieben und die Vorgehensweise aufgezeigt, das Entmagnetisierungsverhalten zu ermitteln.

Anhand von zwei PMSM-Topologien wird die konkrete Anwendung beschrieben, deren Robustheit gegenüber Entmagnetisierung ermitteln und der Einfluss von Design-Parametern beispielhaft dargestellt. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf zukünftige weiterführende Arbeiten und stellt diese zur Diskussion.

[A reliable assessment of the demagnetization resistance of PM-excited machines requires the most accurate possible knowledge of both the electromagnetic stress, such as that caused by a terminal short circuit, and the electromagnetic strength of the machine design, i.e., the demagnetization under a specific current condition. Based on this, the safety margin between stress and strength, and thus the machine's robustness against demagnetization, can be determined and evaluated.](#)

[The presentation illustrates, using examples, how the short-circuit current can be determined with the help of FEMAGtools/FEMAG DC and FEMAG TS. The methodology is explained, and the underlying assumptions, results, and limitations are discussed. Furthermore, it is shown how the critical current condition can be determined based on the field strength distribution. Building on the GTTC 2024, demagnetization models are summarized. Their use with the FSL and the FEMAGtools is described, and the procedure for determining the demagnetization behavior is presented. The practical application is demonstrated using two PMSM topologies. The machine's robustness against demagnetization is assessed, and the influence of design parameters is illustrated with examples. The presentation concludes with an outlook on future work and invites discussion on these topics.](#)

**M. Bleicher, LUH-IAL****13 Einflussfaktoren und Risiken beim Einsatz von Wellenerdungssystemen / Influencing factors and risks associated with the use of shaft grounding systems**

Mit der Verbreitung umrichter gespeister, drehzahlvariabler Antriebssysteme treten zunehmend parasitäre, hochfrequente Randeffekte in Erscheinung, die an Lagern und Getriebe-komponenten zu Stromdurchgängen und somit zu vorzeitigem Komponenten- und System-versagen führen können.

Zur Reduktion sogenannter EDM-Ströme (Electric Discharge Machining) werden im industriellen wie auch im automobilen Umfeld Wellenableitsysteme eingesetzt. Diese sollen die Motorwelle niederimpedant mit dem Statorgehäuse verbinden und das Lager so vor schädlichen Stromdurchgängen schützen. Im Umrichterbetrieb mit steilen Schaltflanken ist nicht nur der reine Widerstand, sondern die Gesamtimpedanz der Verbindung von Interesse.

Hersteller und bisherige Publikationen beschreiben Wellenableitsysteme als hochwirksame, viel-seitig einsetzbare und nahezu verschleißfreie Abhilfemaßnahme. Im Gegensatz zu den bislang wenigen publizierten Ergebnissen und den meist im Initialzustand oder ohne Nachbildung einer (im realen Betrieb vorhandenen) elektrischen Last vermessenen Systemen zeigen Untersuchungen des IAL, dass Parameter wie die Art der elektrischen Belastung, Schmiermittel, Temperatur, Ableittechnologie, Wellenoberfläche und Drehzahl einen signifikanten Einfluss auf die Kontaktimpedanz haben können und Alterungseffekte unterschiedlich stark beschleunigen. Für viele Konfiguration lässt sich bereits nach kurzer Laufzeit ein verschlechtertes und in einigen Fällen ein unbefriedigendes Ableitverhalten feststellen.

Die Präsentation beleuchtet diese Einflussfaktoren, stellt experimentelle Ergebnisse vor und diskutiert die damit verbundenen Risiken beim praktischen Einsatz von Wellenerdungssystemen.

With the widespread adoption of inverter-fed, variable-speed drive systems, parasitic high-frequency side effects are increasingly observed. These can lead to current flow through bearings and gearbox components, resulting in premature component and system failure.

To mitigate so-called EDM currents (Electric Discharge Machining), shaft grounding systems are used in both industrial and automotive applications. These systems are intended to establish a low-impedance connection between the motor shaft and the stator housing, thereby protecting the bearing from harmful current discharges. In inverter operation with steep switching slopes, not only the resistance but the frequency-dependent impedance of the connection becomes relevant.

Manufacturers and existing publications describe shaft grounding systems as highly effective, versatile, and nearly maintenance-free. In contrast to the few available studies - mostly conducted on new systems or without replicating realistic electrical loads - investigations at IAL show that parameters such as type of electrical load, lubricant, temperature, grounding technology, shaft surface and peripheral speed can significantly affect contact impedance and accelerate aging effects to varying degrees. For many configurations, a noticeable degradation - and in some cases unsuccessful mitigation - can already be observed after a short runtime.

This presentation highlights these influencing factors, presents experimental results, and discusses the associated risks in the practical use of shaft grounding systems.

## F. Brenner, Gamma Technologies

14 Mechanische Simulation von elektrischen Maschinen mit GT-FEMAG - vom Early-Design bis zur Systemebene / [Mechanical electric machine simulation with GT-FEMAG - from early design stage to system level](#)

Das mechanische Verhalten elektrischer Maschinen spielt eine zentrale Rolle für Leistung, Lebensdauer sowie das akustisch-dynamische Verhalten (Noise, Vibration, Harshness – NVH) in vielen Anwendungen.

Diese Präsentation behandelt aktuelle Weiterentwicklungen von GT-FEMAG, die eine durchgängige mechanische Analyse elektrischer Maschinen ermöglichen – von der frühen Entwurfsphase bis hin zur systemtechnischen Integration. Aufbauend auf den elektromagnetischen Grundlagen von GT-FEMAG ermöglicht der verbesserte mechanische Workflow eine robuste Modellierung von Rotordynamik, Verformung, Spannungsverteilung und modalem Verhalten, unter Berücksichtigung der elektromagnetischen Belastungen.

In der frühen Entwicklungsphase erlauben parametrisierbare Geometrie- und Materialdefinitionen eine schnelle Bewertung der mechanischen Machbarkeit sowie die gezielte Optimierung von Rotor-Stator-Strukturen. Auf Systemebene unterstützt GT-FEMAG multiphysikalische gekoppelte Simulationen, die elektromagnetische, thermische und mechanische Effekte integrieren und damit eine ganzheitliche Bewertung des Maschinenverhaltens unter realitätsnahen Betriebsbedingungen ermöglichen.

Die nahtlose Integration von GT-FEMAG in systemische E-Antriebsmodelle erlaubt detaillierte Analysen der NVH-Eigenschaften, insbesondere im Zusammenspiel zwischen Elektromotor und Leistungselektronik. Diese neuen Funktionen unterstützen automatisierte Designiterationen, prädiktive Lebensdaueranalysen sowie die virtuelle Validierung vor der Prototypenfertigung.

[The mechanical behavior of electric machines plays a crucial role in ensuring performance, durability, and noise–vibration–harshness \(NVH\) characteristics across diverse applications. This paper presents recent advancements in GT-FEMAG that enable seamless mechanical simulation of electric machines—from the early design stage to system-level integration. Building on GT-FEMAG’s established electromagnetic foundation, the enhanced mechanical workflow introduces robust modeling of rotor dynamics, deformation, stress distribution, and modal behavior directly linked to electromagnetic loading conditions.](#)

[In the early design phase, parametric geometry and material definitions allow for rapid evaluation of mechanical feasibility and optimization of rotor–stator structures. At system level, GT-FEMAG supports coupled simulations that integrate electromagnetic, thermal, and mechanical effects, providing a comprehensive understanding of machine performance under realistic operating conditions. Easy integration of GT-FEMAG into system level e-powertrain models allows for detailed studies of NVH characteristics originating from interactions between electric motors and power electronics. These capabilities facilitate automated design iteration, predictive failure analysis, and virtual validation before prototype manufacturing.](#)

**O. Korolova, proFluxx GmbH****15 Numerische Bestimmung der Ersatzschaltbildelemente von Synchronmaschinen / Numerical determination of equivalent circuit elements of synchronous machines**

Zuerst wird ein Überblick gegeben, in welchen Berechnungsaufgaben die Ersatzschaltbildelemente bei der Entwicklung der permanentmagneterregten (PMSM) und der elektrisch erregten Synchronmaschinen (ESM) verwendet werden. Dafür werden Beispiele der Datenblätter und weiterer stationären und transienten Maschinencharakteristiken gezeigt und auf die zulässigen Annahmen und Vereinfachungen eingegangen. Dann wird ein schnelles numerisches Verfahren zur Berechnung der Wicklungswiderstände unter Beachtung der Temperatur und Stromverdrängung vorgestellt.

Für die Berechnung der Ersatzschaltbildreaktanzen für PMSM und ESM wird zuerst auf die Methode der gefrorenen Permeabilitäten eingegangen. Dabei wird erläutert, wie die vollständige Induktivitätsmatrix erstellt, die Übersetzungsverhältnisse ermittelt und die Haupt- und Streuinduktivitäten durch einfache Transformationen hergeleitet werden können. Anhand der Berechnungsbeispiele wird gezeigt, wie eine starke Sättigung in einem belasteten Zustand die Induktivitäten  $L_d$  und  $L_q$  für PMSM und ESM beeinflusst und wie die Koppelinduktivitäten zwischen d- und q-Achsen  $L_{dq}$  sich bilden. Das Nichtbeachten dieser Effekte bei der Berechnung der Spannungen und Drehmomente im stark belasteten Arbeitspunkt kann zu erheblichen Berechnungsfehlern führen.

Für die großen Synchrongeneratoren ist die Berechnung der charakteristischen Reaktanzen und Zeitkonstanten von großer Bedeutung. Die Berechnung der transienten bzw. subtransienten Reaktanzen  $X_d'$ ,  $X_d''$  und  $X_q''$  sowie der Zeitkonstanten  $T_{d0}'$ ,  $T_d'$ ,  $T_{d0}''$ ,  $T_{q0}''$ ,  $T_d''$ ,  $T_q''$  und  $T_a$  direkt aus den Eigenwerten und Eigenvektoren der Induktivitätsmatrix wird vorgestellt und mit konventionellen analytischen Methoden verglichen. Für die subtransienten Reaktanzen und Zeitkonstanten wird der Einfluss der Streufeldsättigung im Stoßkurzschluss ausgewertet. Für die ESM mit einem Dämpferkäfig wird auf die Bedeutung der Canay-Reaktanz für die richtige Ermittlung der charakteristischen Reaktanzen eingegangen und eine einfache Methode für ihre Berechnung aus der Induktivitätsmatrix gezeigt. Ein weiterer Einflussfaktor für die Berechnung der subtransienten Größen ist die frequenzabhängige Stromverdrängung in den Stäben eines Dämpferkäfigs oder die Eindringtiefe in einem Massivpol, für deren Beschreibung erweiterte Ersatzschaltbilder mit Kettenleitern eingeführt werden. Außerdem wird ein Berechnungsverfahren für die Ermittlung der Impedanzen des Null- und des Gegensystems vorgestellt.

First, a brief overview of the calculation tasks in which the equivalent circuit elements are used in the development of permanent magnet synchronous machines (PMSM) and electrically excited synchronous machines (ESM) is given. Examples of data sheets and other steady-state and transient machine characteristics are presented, and acceptable assumptions and simplifications are discussed. Then, a fast numerical method for calculating winding resistances considering temperature and skin effect is presented.

To calculate the equivalent circuit reactances for PMSM and ESM, the frozen permeability method is first discussed. It is shown how the complete inductance matrix can be created, the effective turns ratio can be determined, and the main and leakage inductances can be derived using simple transformations. Using calculation examples, it is demonstrated how a strong saturation in a load operation influences the inductances  $L_d$  and  $L_q$  for PMSM and ESM and how the coupling inductances between the d- and q-axes  $L_{dq}$  appear. Ignoring these effects

when calculating voltages and torques in the high load operation can lead to significant calculation errors.

For the large synchronous generators, the calculation of characteristic reactances and time constants is of great importance. The calculation of transient and subtransient reactances  $X_d'$ ,  $X_d''$  and  $X_q''$  as well as time constants  $T_{d0}'$ ,  $T_d'$ ,  $T_{d0}''$ ,  $T_{q0}''$ ,  $T_d''$ ,  $T_q''$  and  $T_a$  directly from eigenvalues and eigenvectors of the inductance matrix is presented and compared to conventional analytical methods. For the subtransient reactances and time constants, the influence of the leakage field saturation in a short circuit is evaluated. For ESM with a damper cage, the importance of the Canay reactance for the correct determination of the characteristic reactances is discussed, and a simple method for its calculation from the inductance matrix is demonstrated. Another influencing factor for the calculation of subtransient values is the frequency-dependent skin effect in the bars of a damper cage or the field penetration depth in a solid pole, for which description the extended equivalent circuits with chain conductors are introduced. Furthermore, a calculation method for calculation of the zero-sequence and negative-sequence system impedances is presented.

## C. Schepe, LUH-IAL; T. Voigt, ZF Group

### 16 Zusatzverluste in umrichter gespeisten Induktionsmaschinen – Berechnung und Messung / [Stray load losses in inverter-fed induction machines – calculation and measurement](#)

Sowohl die Berechnung als auch die Messung von Zusatzverlusten in Induktionsmaschinen stellt eine herausfordernde Aufgabe dar. So werden diese messtechnisch lediglich als nicht zuzuordnender Anteil der Gesamtverluste erfasst, welche man auch als Restverluste ansehen kann. Eine Aufteilung entsprechend der physikalischen Ursache ist daher nicht möglich, wodurch auch ein Abgleich mit berechneten Verlustanteilen erschwert wird. Zur Berechnung der Zusatzverluste verwenden konventionelle Berechnungsprogramme eine nach IEC 60034-2-1 empirisch ermittelte „Strafkurve“. Vor allem bei Betriebspunkten mit hohen Statorfrequenzen im Feldschwäcbereich führt diese Abschätzung jedoch zu einer deutlichen Unterbewertung der Zusatzverlusthöhe.

Die größten Anteile der Zusatzverluste lassen sich auf Zusatzisenverluste im Stator und Rotor sowie auf Zusatzstromwärmeverluste in den Rotorstäben zurückführen, welche durch die Oberfelder in der Maschine verursacht werden. Abhängig von der ausgeführten Maschine und deren Betriebsbereich sind zudem Wirbelstromverluste im Gehäuse bzw. Kühler sowie etwaige Veränderungen der geometrischen Luftspaltlänge durch Temperaturdifferenzen innerhalb der Maschine zu berücksichtigen.

In diesem Beitrag werden die genannten Verlustanteile am Beispiel verschiedener Maschinen zunächst mithilfe von in der Software ASYN integrierten Optionen - der bisherigen analytischen „Strafkurve“ und einer transienten FEM-Simulation - ermittelt, aufsummiert und mit den gemessenen Restverlusten abgeglichen. Darüber hinaus wird eine erweiterte Methodik der Software ASYN vorgestellt, mit der sich die Zusatzisenverluste zeiteffizient mithilfe magnetostatischer FEM-Simulationen bestimmen lassen.

Both the calculation and measurement of stray load losses in induction machines pose a challenging task. These power losses are typically measured as an unassignable portion of the total power losses, which can also be considered as remainder losses. Thus, breaking them down according to their physical causes is not possible, making it difficult to correlate with calculated power loss components. For the calculation of stray load losses, conventional software use an empirically determined "penalty curve" according to IEC 60034-2-1. However, this method significantly underestimates the magnitude of these power losses, particularly at operating points with high stator frequencies in the field weakening region.

The largest proportion of stray load losses can be attributed to stray load iron losses in the stator and rotor, as well as stray load ohmic losses in the rotor bars, which are caused by spatial harmonic fields in the machine. Depending on the specific machine and its operating range, eddy current losses in the housing or cooler must also be considered, as well as any changes in the geometrical air-gap length due to temperature differences within the machine.

In this presentation, the aforementioned power loss components are first determined, summed, and compared with the measured remainder losses using options integrated into the software ASYN: the previous analytical "penalty curve" and a time-stepping FEA. Different machines are used as examples. Furthermore, an extended ASYN methodology that allows for the time-efficient determination of stray load iron losses using magnetostatic FEA is presented.

**C. Wohlfahrt; J. Schugg, SycoTec GmbH & Co. KG**

17 Schlingströme in elektr. Maschinen – Wirkmechanismen, rechnerischer Ansatz, messtechnischer Nachweis und Reduktionsmaßnahmen / [Circulating currents in electrical machines](#)

Bei hochtourigen elektrischen Maschinen treten neben den klassischen ohmschen Stromwärmeverlusten in der Wicklung zusätzliche frequenzabhängige AC-Verluste auf. Diese lassen sich in die Mechanismen Skin-Effekt, Proximity-Effekt und Schlingströme unterteilen, wobei sich der Beitrag ausschließlich mit letzterem Phänomen befasst.

Zunächst werden die Ursachen der Schlingströme in parallel geführten Leitern erläutert und ein rechnerischer Ansatz zur Beschreibung ihres Entstehens und Wirkens vorgestellt. Darauf aufbauend werden Verfahren zur messtechnischen Erfassung diskutiert. Neben der Gesamtverlustbilanzierung und thermischen Messungen an einzelnen Spulen liegt ein besonderer Fokus auf der Einzeldrahtmessung, die eine detaillierte Analyse der Stromverteilung erlaubt und das Wirken der Schlingströme am praktischen Beispiel verdeutlicht.

Abschließend werden Ansätze zur Reduktion der Schlingstromverluste vorgestellt. Diese umfassen insbesondere Maßnahmen der Wicklungsgestaltung sowie Anpassungen der Nutgeometrie und liefern damit Erkenntnisse für die effiziente Auslegung hochtouriger elektrischer Maschinen.

[In high-speed electric machines, in addition to the classic ohmic current heat losses in the winding, additional frequency-dependent AC losses occur. These can be divided into the mechanisms of skin effect, proximity effect, and loop currents, with this article dealing exclusively with the latter phenomenon.](#)

[First, the causes of loop currents in parallel conductors are explained and a mathematical approach to describing their origin and effect is presented. Based on this, methods for metrological measurement are discussed. In addition to overall loss balancing and thermal measurements on individual coils, a special focus is placed on single-wire measurement, which allows a detailed analysis of the current distribution and illustrates the effect of loop currents using a practical example.](#)

[Finally, approaches for reducing eddy current losses are presented. These include, in particular, measures relating to winding design and adjustments to the slot geometry, thus providing insights for the efficient design of high-speed electric machines.](#)

**M. Hullmann, Baker Hughes INTEQ GmbH / HS Aalen; J. Krotsch, HS Aalen;  
E. Karakilic, LUH-IAL**

18 Oberschwingungsmodell der PMSM für die Vorausberechnung der Pulswechselrichterströme und (Rotor)Wirbelstromverluste / [PMSM Frequency Domain Model for Inverter Current Simulation and Eddy Current Loss Prediction](#)

Den üblichen Spannungsgleichungen der Permanentmagnetsynchronmaschine (PMSM) liegen Annahmen zugrunde, die in der praktischen Anwendung für die Vorausberechnung des Betriebsverhaltens nicht immer erfüllt werden. Bedingt durch Sättigung sind die Parameter betriebspunktabhängig und es treten zusätzliche Koppelterme auf. Aufgrund von Wirbelströmen in den Permanentmagneten oder massiven Maschinenelementen zeigen die Parameter zudem eine Frequenzabhängigkeit. Diese muss für die Vorausberechnung der Ströme bei Pulswechselrichterbetrieb berücksichtigt werden. Die Spannungsdifferentialgleichungen sind daher im Frequenzbereich zu lösen.

Der Beitrag verdeutlicht diese Thematik und erläutert die grundlegende Theorie der Frequenzabhängigkeit. Er beschreibt die Linearisierung des FE-Modells für die frequenzharmonische FE-Rechnung sowie die Ermittlung der Wicklungsimpedanz und der Parameter der Spannungsgleichung, d. h. des Oberschwingungsersatzschaltbildes (OS-ESB) unter Verwendung von FEMAG DC und AC, wobei 3D-Effekte Berücksichtigung finden. Erzielte Resultate werden mit denen der 3D-Finite-Elemente-Analyse verglichen. Ferner wird die Berechnung der Pulswechselrichterströme basierend auf dem OS-ESB aufgezeigt. Die Wirbelstromverluste lassen sich in vorteilhafter Weise ebenfalls mithilfe der Ersatzschaltbildparameter ermitteln. Anhand von Beispielen erfolgt ein Vergleich mit anderen Methoden der Verlustberechnung.

[Conventional voltage equations of the permanent magnet synchronous machine \(PMSM\) rely on assumptions that are not always satisfied in practical applications when predicting the operational behaviour. Due to magnetic saturation, the machine parameters become operating-point dependent, and additional coupling terms arise. Furthermore, eddy currents in the permanent magnets or solid conductors of the machine cause the parameters to exhibit frequency dependence. This must be considered when predicting the currents under inverter operation. Consequently, the voltage differential equations must be solved in the frequency domain.](#)

[The contribution addresses this topic and explains the fundamental theory of the frequency dependence. It outlines the linearisation of the finite element \(FE\) model for frequency-harmonic analysis and shows how to determine winding impedance and voltage equation parameters – represented by the harmonic equivalent circuit \(HEC\). The presented approach uses FEMAG DC and AC and takes 3D effects into account. The results obtained are compared with those from 3D finite element analysis. Furthermore, the calculation of inverter currents based on the HEC is demonstrated. Eddy current losses can also be advantageously determined using the equivalent circuit parameters. Examples are provided to compare this method with other loss calculation techniques.](#)