

Anthology for the Workshop

Developments and
Research Results
of the Chair of
Electrical Machines
and Drive Systems
2023

December 4, 2023
Hamburg
Germany

Sammelband zum Workshop

Entwicklungen und
Forschungsergebnisse
der Professur für
Elektrische Maschinen
und Antriebssysteme
2023

4. Dezember 2023
Hamburg
Deutschland



HELMUT SCHMIDT
UNIVERSITÄT
Universität der Bundeswehr Hamburg

Anthology for the Workshop

Developments and
Research Results
of the Chair of
Electrical Machines
and Drive Systems
2023

December 4, 2023
Hamburg
Germany

Sammelband zum Workshop

Entwicklungen und
Forschungsergebnisse
der Professur für
Elektrische Maschinen
und Antriebssysteme
2023

4. Dezember 2023
Hamburg
Deutschland

Editor

Univ.- Prof. Dr.-Ing. Christian Kreischer
Professorship for Electrical Machines and Drive Systems
Helmut Schmidt University/University of the Federal Armed Forces Hamburg
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg, Germany
Email: christian.kreischer@hsu-hh.de

DOI: 10.24405/15319 (online, abrufbar über <https://doi.org/10.24405/15319>)

© Copyright Helmut Schmidt University/University of the Federal Armed Forces Hamburg, 2023

All rights, including those of partial reprints, partial or complete reproduction, storage in data processing systems and the Translation reserved.

Print: Helmut Schmidt University/University of the Federal Armed Forces Hamburg, 2023

Welcome and overview

Christian Kreischer, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

This anthology presents the current developments and research results of the Professorship of Electrical Machines and Drive Systems in 2023.

Two doctorates were completed and successfully defended at the professorship.

The topic of Mr. Pedram Quseiri Darbandeh's dissertation is "Fault Diagnosis in a Permanent Magnet Synchronous Motor using Deep Learning". Here he examines the possibilities of data-based error classification in a very structured and comprehensive manner depending on various sensor signals, data preparation methods and various training methods for neural networks.

Mr. Johannes Liebrich did his doctorate on the development of a method for the characterization of high-temperature superconductors. The work provides important insights into damage mechanisms and the fatigue behavior of superconductors. The developed test stand can also be used for the mechanical examination of other material samples under cryogenic conditions. The knowledge gained will be used in follow-up projects to research superconducting coils that are suitable for use in wind turbines.

Two research projects were completed this year. On the one hand, a ZIM project, which aimed to develop a mobile and flexible testing method for demagnetized components. It is possible to use a fixed sensor arrangement to determine the global magnetization of a test object in a magnetically shielded chamber and to determine the magnetic field for different distances.

On the other hand, the joint project KOBRA was completed, in which the professorship researched and validated a significantly more powerful anode drive based on a "flux switching machine".

In addition, a new ZIM project to develop an intelligent shaft vibration torsion sensor was acquired (AI-Torque).

Begrüßung und Überblick

Christian Kreischer, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

In diesem Sammelband werden die aktuellen Entwicklungen und Forschungsergebnisse der Professur für Elektrische Maschinen und Antriebssysteme im Jahr 2023 vorgestellt.

An der Professur wurden zwei Promotionen abgeschlossen und erfolgreich verteidigt. Das Thema der Dissertation von Herrn Pedram Quseiri Darbandeh lautet „Fault Diagnosis in a Permanent Magnet Synchronous Motor using Deep Learning“. Er untersucht hier sehr strukturiert und umfangreich die Möglichkeiten der datenbasierten Fehlerklassifizierung in Abhängigkeit verschiedener Sensorsignale, Datenaufbereitungsmethoden und verschiedener Trainingsmethoden für neuronale Netze.

Herr Johannes Liebrich hat zum Thema „Entwicklung einer Methode zur Charakterisierung von Hochtemperatur-Supraleitern“ promoviert. Die Arbeit liefert wichtige Erkenntnisse zu Schadensmechanismen und dem Ermüdungsverhalten von Supraleitern. Der entwickelte Versuchsstand kann zudem auch zur mechanischen Untersuchung weiterer Materialproben unter kryogenen Bedingungen verwendet werden. Mit den gewonnenen Erkenntnissen werden in Folgeprojekten supraleitende Spulen erforscht, welche für den Einsatz in Windenergieanlagen geeignet sind.

In diesem Jahr konnten zwei Forschungsprojekte abgeschlossen werden. Zum einen ein ZIM-Projekt, welches die Entwicklung einer mobilen und flexibel einsetzbaren Prüfmethode für entmagnetisierte Bauteile zum Ziel hatte. Hierbei ist es möglich mit einer festen Sensoranordnung auf die globale Magnetisierung eines Prüflings in einer magnetisch geschirmten Kammer zu schließen und das Magnetfeld für unterschiedliche Abstände zu ermitteln. Zum anderen wurde das Verbundprojekt KOBRA abgeschlossen, bei dem die Professur einen deutlich leistungsfähigeren Anodenantrieb auf Basis einer „Flux-Switching-Machine“ erforscht und messtechnisch validiert hat.

Zudem wurde ein neues ZIM-Projekt zur Entwicklung eines intelligenten Wellenschwingungs-Torsionssensors eingeworben (AI-Torque).

Workshop 2023

Conference contributions

Monitoring and diagnosis of asynchronous machines with AI-based analysis of stator currents

Moritz Benninger, M.Sc.

Monitoring of low-voltage asynchronous motors generally offers great potential, as these motors have a significant impact on all production processes due to their high quantity. The expansion of monitoring to the whole fleet of machines is also becoming increasingly attractive due to inexpensive sensor systems and advancing connectivity. For applicability to a wide range of motors, the methodology focuses on a high degree of autonomy and transferable functionality.

A framework [1] with several components is used for the detection and diagnosis of different fault cases. (see Fig. 1). The stator currents are measured and evaluated as input variables.

The central component of the approach is a multiple coupled circuit model, which analytically simulates the basic physical processes of an electrical machine [2]. This makes it possible to simulate both healthy behavior and various faults. The multiple coupled circuit model is specifically adapted to the respective electrical machine by identifying the model parameter values using a simple fingerprint measurement and the differential evolution algorithm [3]. The parameterized model is then used to generate a large data set containing the stator currents for the healthy state and the different fault cases.

Neural networks are used to classify the different states. The data is initially preprocessed by transferring the three-phase stator currents to the frequency domain using a Fast Fourier transformation. In addition, the difference to the healthy state is calculated for the complete data set, whereby essential characteristics of the fault cases are already extracted from the data. In the final step, the neural networks are trained with the preprocessed data set.

An extensive series of measurements with real fault cases of an asynchronous motor is used to validate the entire framework. The process of the parameter

Überwachung und Diagnose von Asynchronmaschinen mit einer KI-basierten Analyse der Statorströme

Moritz Benninger, M.Sc.

Die Überwachung von Niederspannungs-Asynchronmotoren birgt generell ein großes Potenzial, da diese Motoren aufgrund der hohen Quantität einen erheblichen Einfluss auf sämtliche Prozesse in der Produktion haben. Der Ausfall eines Förderbandes ist z.B. mit hohen Produktionsausfallkosten verbunden. Auch durch günstige Sensorik und die fortschreitende Vernetzung wird eine Ausweitung des Monitorings auf den gesamten Maschinenpark immer attraktiver. Für die Anwendbarkeit auf ein breites Spektrum an Maschinen liegt der Fokus der Methodik auf einem hohen Autonomiegrad und einer übertragbaren Funktionsweise.

Für eine flexible Erkennung und Diagnose von unterschiedlichen Fehlerfällen wird ein Framework [1]

aus mehreren Bestandteilen verwendet (s. Abb. 1). Als Eingangsgrößen werden die Statorströme gemessen und ausgewertet. Die zentrale Komponente des Ansatzes besteht aus einem linearen Netzwerkmodell, welches in analytischer Form die physikalischen

Prozesse einer elektrischen Maschine nachbildet [2]. Damit ist sowohl die Simulation des gesunden Verhaltens als auch diverser Fehlerfälle möglich. Das Netzwerkmodell wird in der Folge speziell an die jeweilige elektrische Maschine angepasst, indem die Werte der Modellparameter automatisiert mit Hilfe einer simplen Fingerprint-Messung und des Differential Evolution Algorithmus [3] identifiziert werden. Das parametrisierte Modell wird folglich zur Erzeugung eines großen Datensatzes verwendet, welcher die Statorströme für den gesunden Zustand und die verschiedenen Fehlerfälle beinhaltet.

Zur Klassifizierung der einzelnen Zustände werden neuronale Netze verwendet. Hierbei erfolgt zunächst eine Vorverarbeitung der Daten, indem die dreiphasigen Statorströme mittels einer Fast-Fourier-Transformation in den Frequenzbereich übertragen werden. Zusätzlich wird für den gesamten Datensatz jeweils die Differenz zum gesunden Zustand gebildet, wodurch bereits wesentliche Merkmale der einzelnen

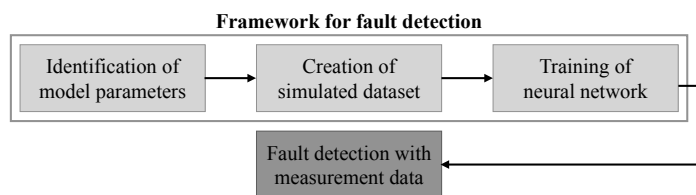


Abb. 1: Abfolge der einzelnen Schritte des Frameworks zur Fehlererkennung

Fig. 1: Sequence of the individual steps of the fault detection framework

Fehlerfälle aus den Daten extrahiert werden. Im letzten Schritt werden die neuronalen Netze mit Hilfe des vorverarbeiteten Datensatzes trainiert.

Zur Validierung des gesamten Frameworks wird eine umfangreiche Messreihe mit realen Fehlerfällen eines beispielhaften Induktionsmotors genutzt. Dabei zeigt sich bei der Parameteridentifikation, dass der Ansatz mit dem Differential Evolution Algorithmus für die Suche nach passenden Parameterwerten gut geeignet ist. Im Weiteren wird nachgewiesen, dass mit dem linearen Netzwerkmodell die Nachbildung der wesentlichen Fehlermerkmale in den Statorströmen möglich ist. Die neuronalen Netze werden nach dem grundlegenden Trainingsprozess mit einem simulierten Datensatz mit Hilfe der Messdaten von realen Fehlerfällen validiert.

Dabei wird deutlich, dass die Übertragbarkeit der Fehlermerkmale aus den Simulationen auf die realen Messdaten tendenziell möglich, aber dennoch fehleranfällig ist. Durch die Einführung verschiedener Techniken zur Regularisierung der neuronalen Netze wird die Robustheit und Übertragbarkeit des Frameworks weiter erhöht. Unter diesen Voraussetzungen wird mit dem Framework für die Klassifizierung der realen Fehlerfälle eine Genauigkeit von 97,5 % erreicht. In der Konfusionsmatrix in Abb. 2 ist zu sehen, dass alle Zustände bis auf die gemischte Exzentrizität (6) zu 100 % erkannt werden. Die Abweichung ergibt sich in diesem Fall aus der großen Ähnlichkeit zum gesunden Zustand (0). Die entwickelte Methode ist somit insgesamt sehr zuverlässig und robust. Ein Monitoringsystem kann aufgrund der alleinigen Auswertung der Ströme einfach und kostengünstig auch für unregelmäßige Antriebe nachgerüstet werden.

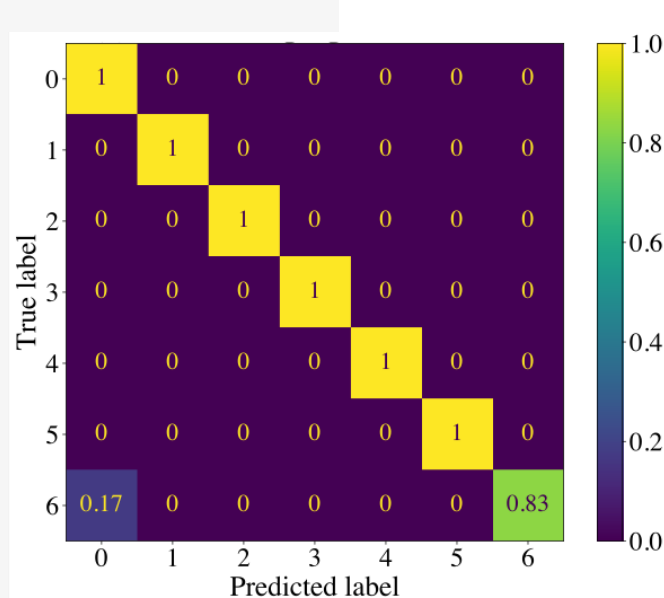


Abb. 2: Konfusionsmatrix mit Genauigkeit für die Erkennung der realen Fehlerfälle. (0: Gesund; 1: Zu geringe Spannung; 2: Unsymm. Spannung; 3: Offene Phase; 4: Gebrochener Käfigstab; 5: Windungsschluss; 6: Gemischte Exzentrizität)

Fig. 2: Confusion matrix with accuracy for detecting the real fault cases (0: Healthy state; 1: Too low voltage; 2: Unsymmetrical voltage; 3: Open phase; 4: Broken cage bar; 5: Winding short circuit; 6: Mixed eccentricity)

identification demonstrates that the approach with the differential evolution algorithm is well suited for the search for suitable parameter values. Furthermore, it is shown that the linear multiple coupled circuit model can be used to simulate the main fault characteristics in the stator currents. After the basic training process with a simulated data set, the neural networks are validated using measurement data from real fault cases. It becomes evident that the transferability of the fault characteristics from the simulations to the real measurement data is possible, but still prone to errors. The robustness and transferability of the framework is further increased by introducing various techniques for the regularization of the neural networks. Under these conditions, the framework achieves an accuracy of 97.5 % for classifying the real faults.

The confusion matrix in Fig. 2 shows that all states except for the mixed eccentricity (6) are recognized with 100 % accuracy. In this case, the deviation results from the high similarity to the healthy state (0). The developed method is therefore very reliable and robust overall. A monitoring system can be retrofitted easily and cost-effectively for uncontrolled motors due to the sole evaluation of the currents.

[1] M. Benninger, M. Liebschner and C. Kreischer, „Fault Detection of Induction Motors with Combined Modeling- and Machine-Learning-Based Framework,” *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023.
 [2] H. A. Toliyat and T. A. Lipo, “Transient analysis of cage induction machines under stator, rotor bar and end ring faults,” *IEEE Trans. En. Conv.*, vol. 10, no. 2, pp. 241–247, June 1995.

[3] R. Storn and K. Price, „Differential Evolution – A simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.

Construction of a Test Bench for Experimental Analysis for Bendable Linear Motors

Florian Dreishing, M.Sc.

One of the research topics at the chair of Electrical Machines and Drive Systems is the methodical development of bendable linear motors. Possible applications are soft exoskeletons, also called exosuits, or uses in soft robotic systems.

The bendable linear motor is designed as a permanent magnet excited linear synchronous motor. The primary consists of ring coils that are connected to a three-phase winding. The winding generates a magnetic field that wanders in axial direction and interacts with the permanent magnets of the secondary resulting in an axial directed force. The bendability of the motor is obtained by casting the coils and the sensors of the primary in a soft rubber. The secondary's magnets are mounted on a flexible rope.

The geometry of the motor is optimized regarding the force-to-weight ratio. For the optimization an analytic force computation method is used [1]. Also, a position measurement system based on linear Hall-Effect sensors is developed [2]. Additionally, a method for the manual production of the linear motor is elaborated.

For the experimental investigation of prototypes of the bendable linear motors an experimental setup was built (Fig. 1). In this, the motors primary can be placed in adjustable mounts on the ground plate according to the desired bending radius. The available bending radii are 800 mm, 400 mm, 200 mm, and the unbent condition. The secondary is mounted to a force sensor that is connected to a linear positioning system which is used to manipulate the mover position during the experiments. The motor is connected to a control unit which contains the inverter and transducers for the evaluation of the sensor signals. For controlling a microcontroller Teensy 4.1 is used. Several experiments can be conducted with the described setup. Exemplarily, in this report the results of two experiments are presented.

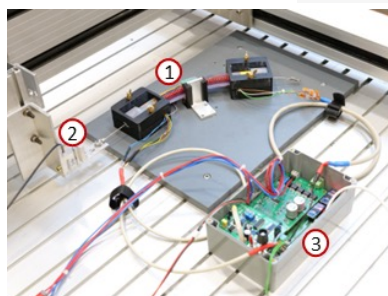


Abb. 1: Prüfstand

Fig. 1: Experimental Setup

Aufbau eines Prüfstands zur experimentellen Analyse biegeflexibler Linearmotoren

Florian Dreishing, M.Sc.

An der Professur für Elektrische Maschinen und Antriebssysteme wird an der methodischen Entwicklung biegeflexibler elektrischer Linearmotoren geforscht. Mögliche Anwendungsfelder derartiger Antriebe sind weiche Exoskelette, sogenannte Exosuits oder Aufgaben in der Soft Robotic.

Der biegeflexible Linearmotor ist als permanentmagneterregter Synchronmotor in tubularer Bauweise aufgebaut. Der Primärteil besteht aus zylindrischen Spulen, die zu einer Drehstromwicklung verschaltet sind. Diese erzeugen ein magnetisches Wanderfeld, welches mit den Permanentmagneten des Sekundärteils interagiert und infolgedessen eine Kraft erzeugt. Die Flexibilität des Motors wird durch die Integration der Spulen und der Sensorik in einen weichen Mantel ermöglicht. Die Magnete des Sekundärteils werden auf einem flexiblen Seil befestigt.

Die Geometrie des Motors wird mithilfe einer analytischen Methode zur Berechnung der elektromagnetischen Kraft hinsichtlich des Kraft-zu-Gewicht-Verhältnisses optimiert [1]. Außerdem wurde ein Messsystem auf Basis von Hall-Effekt Sensoren für die Erfassung der Motorlage entworfen [2]. Zudem wurde eine Fertigungsmethode erarbeitet, die das manuelle Fertigen der Linearmotoren ermöglicht.

Für die experimentelle Analyse des Linearmotors wurde ein Prüfstand aufgebaut (Abb. 1). In diesem kann der Linearmotor entsprechend dem einzustellenden Biegeradius (ungebeugt, 800 mm, 400 mm, 200 mm) auf der

Grundplatte befestigt werden. Der Sekundärteil wird über einen Kraftsensor an ein lineares Positioniersystem zur Manipulation der Motorlage verbunden. Der Motor und dessen Sensorik sind an eine Steuerungseinheit angeschlossen, die den Wechselrichter sowie Messwandler für die Auswertung der Sensoren enthält. Für die Steuerung kommt der Mikrocontroller Teensy 4.1 zum Einsatz. Der Prüfstand ermöglicht die Durchführung verschiedener Messreihen zur Charakterisierung des Linearmotors. Beispielhaft werden hier zwei Experimente vorgestellt.

In Abb. 2 wird die vom Motor aufgebrauchte Zugkraft für vier verschiedene Beugungszustände dargestellt. Die Motorspannungen werden entsprechend der gemessenen Lage des Sekundärteils auf die Entwicklung der maximalen Zugkraft gesteuert. Die Grafik zeigt einen linearen Zusammenhang zwischen der Zugkraft und dem Effektivwert des Spulenstroms. Aufgrund der Zunahme von Reibung nimmt die Zugkraft für kleinere Biegeradien geringfügig ab.

In Abb. 3 wird der Verlauf der Oberflächentemperatur der Spulen für verschiedene Belastungen dargestellt. Bei der Messung wird für 30 s ein 10-Hz-Drehstrom mit variierender Leiterstromdichte in die Motorwicklung eingepreßt. Bei $12,97 \text{ A/mm}^2$ – dies entspricht in etwa dem 2,5-fachen der dauerhaft zulässigen Stromdichte – beträgt der Temperaturanstieg innerhalb von 30 s in etwa 8°C . Dieser moderate Temperaturanstieg verdeutlicht, dass eine kurzzeitige Überlastung des Motors zum Abrufen von hohen Spitzenkräften zulässig ist. Aufgrund der langen Abkühlzeit ist die Frequenz des Abrufens der Spitzenkraft limitiert, da für den Einsatz des Motors in einem Exoskelett die maximale Temperatur an der Kontaktfläche zum menschlichen Körper unter der Schmerzgrenze liegen sollte.

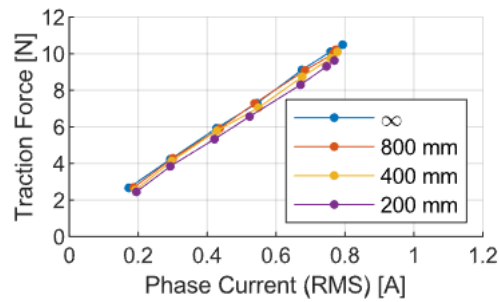


Abb. 2: Messung der Zugkraft

Fig. 2: Traction force measurement

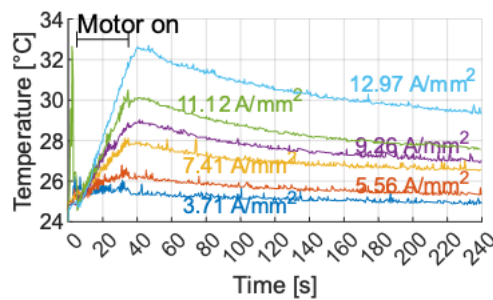


Abb. 3: Messung der Spulentemperatur

Fig. 3: Coil temperature measurement

Fig. 2 shows the measured traction force generated by the linear motor for varying bending conditions and excitations. The motor voltages are adjusted according to the motor position so that the maximum thrust force results. A linear relation between the traction force and the RMS phase current can be seen. With decreasing bending radius, a minor reduction of the thrust force is observed due to increased friction.

In Fig. 3, the results of the measurement of the temperature of the coil surface are shown. In this experiment, the motor is excited by a 10 Hz three-phase current with varying amplitude for 30 s. For the conductor current density $12,97 \text{ A/mm}^2$ – which is 2,5 times of the durably admissible current density – the coil surface temperature rises by 8°C . This moderate value justifies short-timed overexcitation of the motor for demands of forces peaks. Nevertheless, the frequency of retrieving peak forces is limited since the motor cools down slowly. This must be considered especially when the motor is used in an exoskeleton, where it operates close to the human body. At direct contact to the user the surface temperature must be kept below the pain threshold.

[1] F. Dreishing and C. Kreischer, "Optimization of Force-to-Weight Ratio of Ironless Tubular Linear Motors Using an Analytical Field Calculation Approach," in *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 1–4.

[2] F. Dreishing and C. Kreischer, "Hall-Effect Sensor Based Position Sensor for Force Control of a Bendable Tubular Linear Motor," in *2023 14th International Symposium on Linear Drivers for Industry Applications (LDIA)*, 2023, pp. 1–4.

Dimensioning Method for Drive Systems with Linear Direct Actuators for Physical Support Systems

Daniel Greve, M.Sc.

Electric drive systems for physical support systems must fulfill strong requirements on force, dynamics and mass [1]. A method for precise dimensioning of such systems under particular consideration of interaction between human and drive system is developed. For this, an overall system model is required, representing electrical and mechanical domain. This model possesses several dimensioning parameters that are determined by optimization procedures. The fulfillment of reference support torques with respect to human degrees of freedom during an exemplary motion plays a central role within the dimensioning procedure. Reference support torques correspond to biomechanical indicators defined by Villotti et al. [2]. As application example, a hip support is considered.

The dimensioning procedure consists of two steps. Firstly, the alignment of actuators is specified. Based on a definition of available design space, alignment curves are derived. Depending on parameters, actuators are able to vary their position on these curves while maintaining sufficient distance. Alignment curves are depicted in Fig. 1 (a). In this step, it is aimed at finding the best compromise between intended support torque and unintended torques produced by the actuators. In case of the hip support, flexion/extension torques are intended, while unintended torques occur in e.g. lower back degrees of freedom in the frontal plane. This optimization problem is solved in *Matlab* using gradient based procedures implemented in the function *fmincon*.

In the second step, remaining dimensioning parameters are specified. They comprise of appendix lengths l_1 and l_2 , number of series connected battery cells n_s ,

Auslegungsmethode für Antriebssysteme mit Lineardirektantrieben in körpernahen Unterstützungssystemen

Daniel Greve, M.Sc.

Elektrische Antriebssysteme für körpernahe Unterstützungssysteme müssen hohe Anforderungen an Kraft, Dynamik und Masse erfüllen [1]. Zur präzisen Auslegung solcher Systeme wird eine Methode entwickelt, die die Interaktion von Mensch und Antriebssystem berücksichtigt. Hierfür wird ein Modell des mechanischen und elektrischen Gesamtsystems benötigt. Dieses Modell verfügt über Auslegungsparameter, die mithilfe von Optimierungsproblemen bestimmt werden. Zentral in der Auslegungsmethode ist die Erfüllung von Soll Drehmomenten bezüglich zu unterstützender menschlicher Freiheitsgrade während einer Beispielbewegung. Dies entspricht einer nach Villotti et al. definierten biomechanischen Kenngröße [2]. Als Anwendungsbeispiel dient die Hüftgelenksunterstützung.

Die Auslegungsmethode besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt wird die Anordnung der Aktuatoren festgelegt. Ausgehend von einer Bauraumdefinition werden Anordnungskurven abgeleitet, auf denen sich die Aktuatoren unter Einhaltung von Abständen zueinander bewegen können. Die Anordnungskurven sind in Abb. 1 (a) im Gesamtsystem dargestellt. Ziel in diesem Schritt ist es, die Anordnung zu finden, bei der ein optimaler Kompromiss zwischen durch die Aktuatoren hervorgerufenen Drehmomenten bzgl. zu unterstützender Freiheitsgrade und ungewünschter Drehmomente herrscht.

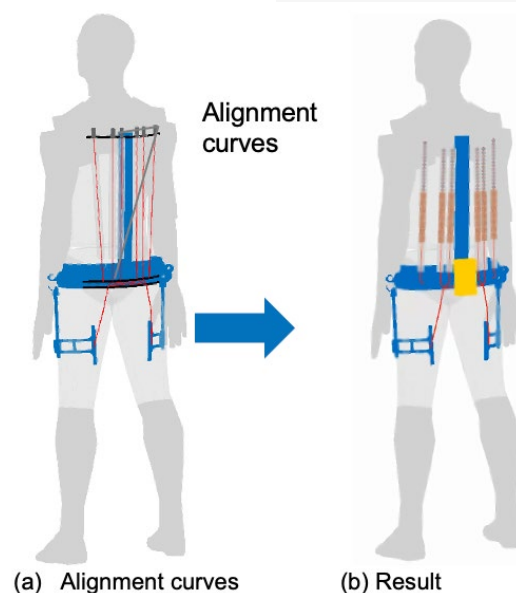


Abb. 1: Visualisierung des Gesamtsystemmodells

Fig. 1: Visualization of overall system model

Im Falle der Hüftunterstützung sind zu unterstützende Freiheitsgrade die Flexions-/Extensionsfreiheitsgrade der Hüftgelenke. Ungewünschte Drehmomente treten beispielweise bezüglich Freiheitsgraden in Frontalebene im Rücken auf. Dieses Optimierungsproblem wird in der Umgebung *Matlab* mithilfe der

gradientenbasierten Minimierungsfunktion *fmincon* gelöst.

Im zweiten Schritt werden übrige Auslegungsparameter des Antriebssystems festgelegt. Diese umfassen die Aufsatzlängen l_1 und l_2 , die Anzahl an in Reihe geschalteten Batteriezellen n_r , die Anzahl an parallelen Strängen an Batteriezellen n_p sowie die Anzahl an Statorsegmenten p_s und Läufersegmenten p_r . Ein Segment besteht in Anlehnung an Dreishing und Kreischer aus zwei Läufermagneten und sechs Statorspulen [3]. Gemeinsam mit einem beispielhaften Aktuator ist dies in Abb. 2 dargestellt. Das Ziel dieser Optimierung ist die Minimierung der Masse des Antriebssystems. Es müssen Nebenbedingungen bezüglich des Unterstützungsmoments, der Antriebsauslastung und -geometrie, der Batterielaufzeit sowie zulässiger Ströme eingehalten werden. Die Einhaltung von vorgegebenen Unterstützungsmomenten bezüglich menschlicher Freiheitsgrade erfordert eine Kompensation von Massen und Trägheiten des Antriebssystems. Hierdurch wird sichergestellt, dass jede Antriebsystemkonfiguration bzgl. der Unterstützungsmomente gleichwertig ist. Dieses Optimierungsproblem wird mit der Funktion *ga* zur Lösung gemischt-ganzzahliger Probleme mit genetischem Algorithmus in der Umgebung *Matlab* gelöst.

Im Falle der Hüftgelenksunterstützung wird als einzuhaltendes Unterstützungsmoment die Summe der beiden Flexions-/Extensionsmomente der Hüftgelenke betrachtet. Das Ergebnis dieser Auslegung ist in Abb. 1 (b) dargestellt.

number of parallel battery strands n_p , number of stator segments p_s and number of mover segments p_r . Based on Dreishing and Kreischer, one segment consists of two mover magnets and six stator coils [3]. A segment as well as an exemplary actuator is depicted in Fig. 2. In this step, it is aimed at minimizing the mass of the drive system. Additionally, constraints regarding support torque, actuator load and geometry, battery runtime and current limitations must be fulfilled. Obeying support torque constraint requires compensation of masses and inertia. This ensures comparability between different drive system configurations. This optimization problem is solved with the function *ga* for solving mixed integer problems with a genetic algorithm in *Matlab*.

Regarding the hip support, support torques constraints are formulated for the sum of hip flexion/extension torques. The result of the dimensioning procedure is presented in Fig. 1 (b).

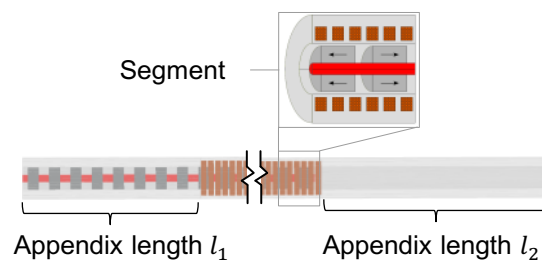


Abb. 2: Aufbau des auszulegenden Aktuators, in Anlehnung an [3]

Fig. 2: Structure of the actuator to be dimensioned, based on [3]

[1] B. Otten, *Tätigkeitsgerechte Unterstützung durch Exoskelette mit aktiven Antrieben.*, Universitätsbibliothek der HSU, 2023.

[2] S. Villotti et al., „Biomechanische Simulation zur Auslegung von Exoskeletten“, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2023.

[3] F. Dreishing und C. Kreischer, „Optimization of Force-to-Weight Ratio of Ironless Tubular Linear Motors Using an Analytical Field Calculation Approach“, *IEEE Trans. Magn.*, 2022.

Radial flux loss in stator bars in core end regions of high-performance machines: Methods, Analyses, and Findings

Matthias Kowalski, M.Eng.

Motivation

The insulation system of the stator bars in the step-iron and slot-exit region of high-performance electrical machines is a mechanically and electrically highly stressed component. Recent publications show increasing numbers of ageing indications regarding the outer-corona-protection (OCP), unrelated to a specific manufacturer [1]. These range from erosions of the outer-corona-protection (c.f. Fig. 1) to the breakdown of the main insulation in this area (c.f. Fig. 2).

Within the scope of this research, the hypothesis of an additional high thermal load due to local eddy currents, which are caused by radial magnetic fields penetrating the conductors, is pursued.

Method

A particular challenge that arises with high-performance electric machines, such as turbogenerators, are the different length scales of interacting components. The magnetically relevant end region of these machines measures several cubic meters, whereas eddy current loss in electrical conductors needs to be resolved in sub-millimeter ranges.

A comparison of methods regarding result accuracy and calculation time for three different load cases (electrical open-circuit, three-pole short-circuit, and

Radialfeldverluste in Ständerstäben im Blechpaketendbereich von Hochleistungsmaschinen: Methoden, Analysen und Erkenntnisse

Matthias Kowalski, M.Eng.

Motivation

Das Isoliersystem der Ständerstäbe im Abtreppungs- und Stabaustrittsbereich leistungsstarker elektrischer Maschinen ist eine mechanisch und elektrisch hochbelastete Komponente. Steigende Anzahlen an Veröffentlichungen beschreiben auftretende Alterungserscheinungen am Außenglimmschutz (AGS), welche herstellerunspezifisch auftreten [1]. Diese reichen von Erosionen des Außenglimmschutzes (vgl. Abb. 1) bis hin zum Durchschlag der Hauptisolierung in diesem Bereich (vgl. Abb. 2).

Im Rahmen der Arbeit wird der Hypothese einer zusätzlich hohen thermischen Auslastung infolge lokaler Wirbelströme, die durch radiale, die Leiter durchdringenden Magnetfelder hervorgerufen werden, nachgegangen.

Methode

Eine besondere Herausforderung die sich bei elektrischen Hochleistungsmaschinen, wie

beispielsweise Turbogeneratoren, stellt, sind die unterschiedlichen Größenskalen interagierender Komponenten. So bemisst der magnetisch relevante Endbereich einer solchen Maschine mehrere Kubikmeter, wohingegen Wirbelstromverluste in elektrischen Leitern im Submillimeterbereich zu erfassen sind.



Abb. 1: AGS-Erosion

Fig. 1: OCP-Erosion [1]



Abb. 2: Durchschlag der Hauptisolierung im Abtreppungsbereich

Fig. 2: Breakdown of main insulation in step-iron region [2]

Ein Methodenvergleich mit Hinblick auf Ergebnisgenauigkeit und Berechnungszeit für drei unterschiedliche Belastungsfälle (den elektrischen Leerlauf, den dreipoligen Dauerkurzschluss sowie den Bemessungsbetrieb) ist in [3] dargelegt. Die gegenübergestellten Methoden reichen von transienten dreidimensionalen Wirbelstromsimulationen des gesamten Endbereichs, bis hin zu simplen zweidimensionalen Näherungen. Hierbei erweist sich die in [4] beschriebene Submodell-Methode als besonders vorteilhaft.

Ergebnisse

Aus den elektromagnetischen Simulationen geht hervor, dass sich der Anteil der zusätzlichen Radialfeldverluste an den Gesamtverlusten der Ständerwicklung im vorliegenden Fall auf lediglich ~5% beläuft. Jedoch treten diese sehr konzentriert auf und überschreiten lokal die Bemessungsstromwärmeverlustdichte um mehr als das Achtefache. Diese erhebliche zusätzliche Verlustleistungsdichte im Bereich der Abtreppung und des Stabaustritts resultiert in lokal deutlich gesteigerten Temperaturniveaus (Abb. 4), besonders im Gegensatz zu Analysen, welche unter Vernachlässigung dieses Phänomens erfolgen (Abb. 3).

Untersuchungen hinsichtlich der geometrischen Ausgestaltungen der Blechpaketabtreppung zeigen, dass sich mit flach verlaufenden Profilen substanzielle Verlustminderungen einstellen. Reichen die Ständerzähne beispielsweise bis hin zur Staboberkante, halbieren sich die Radialfeldverluste im Bemessungsbetrieb.

rated operation) is presented in [3]. The compared methods range from transient three-dimensional eddy current simulations of the entire end region to simple two-dimensional approximations. In this context, the submodel method described in [4] proves to be particularly advantageous.

Results

Electromagnetic simulations reveal that the proportion of additional radial flux losses to the total losses of the stator winding in this case is to only ~5%.

However, because of its local concentration, loss densities in this area surpass Joule heating due to rated current by a factor of eight. This significant additional loss density in the step-iron and slot-exit area yields locally significant higher temperatures (Fig. 4), especially in contrast to analyses which are carried out neglecting this phenomenon (Fig. 3).

Examinations regarding geometric designs of the stator core step iron show that substantial loss reductions occur with flatter profiles. For example, if the stator teeth reach up to the top bar's upside, the radial flux losses halve during rated operating conditions.

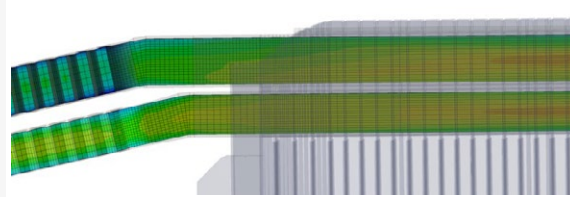


Abb. 3: Temperaturverteilung in Ständerstäben unter Vernachlässigung von Radialfeldverlusten

Fig. 3: Temperature distribution in stator bars neglecting radial flux losses

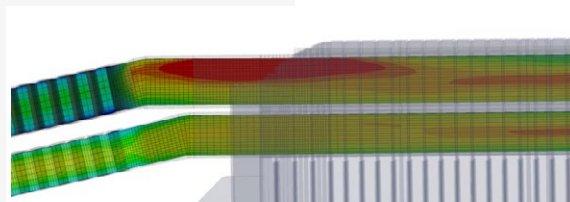


Abb. 4: Temperaturverteilung in Ständerstäben unter Berücksichtigung von Radialfeldverlusten

Fig. 4: Temperature distribution in stator bars considering radial flux losses

[1] A. Litinsky et al., „Advanced Assessment of Outer Corona Protection Material Durability,” in *IEEE EIC*, 2018, pp. 538-541.
 [2] B. Letal et al. „Stator Endwinding Vibration in Two-Pole Machines” *IEEE PCIC*, 2018, pp. 453-462.
 [3] M. Kowalski, L. Schmitz, S. Gertz und C. Kreischer, „Advanced numerical Methods for accelerating Calculation of Eddy Current

Loss in Roebel-Bars in Turbogenerator End-Regions,” in *COMPUT-MAG*, 2022, pp. 1-4.
 [10] M. Kowalski, M. Hanke und C. Kreischer, „Electromagnetic sub-models for 3D edge-elements in transient non-linear simulation,” in *COMPEL*, Vol. 41 Nr. 2, 2022, pp. 659-673.

Development status of winding production

Patrick Ralf, M.Sc.

As part of the DTEC project Intelligent design and optimization of AI-based, physical (body) support systems with modern drive technology (KIKU), a new production method is being researched and demonstrated using a new type of winding machine. The self-supporting coils are produced as endless windings to avoid soldered joints. One strand of continuous windings forms one phase of the three-phase winding of the flexible linear actuator to be produced. The continuous wire connection reduces production costs and eliminates the risk of cold solder joints.

The central element of the machine is the winding process, which brings the fed wire into the desired position to produce the coil series. For this purpose, a classic iterative design process was initially started, based on initial existing designs using hand sketches and various comparison and decision-making methods. For collision analyses and better visualization, a moving CAD model was created to verify the plausibility of the process (see Figure 1).

In order to investigate the behaviour of the wire during the winding process and to ensure that the wire behaves as desired in the CAD model, a prototype was produced.

This prototype was mounted on an existing conventional winding machine and the winding process was then carried out manually (see Figure 2).

To make the coils self-supporting, a baked enamelled copper wire is used, which creates a material bond between the layers of enamel by heating. For this purpose, a current is driven through the respective coil, which heats the wire (see Figure 3).

To enable the wire to be contacted, both the baking varnish layer and the insulation layer of the wire must be removed. This should be done without contact

Entwicklungsstand der Wicklungsfertigung

Patrick Ralf, M.Sc.

Im Rahmen des DTEC Projektes Intelligente Auslegung und Optimierung von KI basierten, physischen (Körper-) Unterstützungssystemen mit moderner Antriebstechnologie (KIKU) wird eine neue Fertigungsmethode erforscht und anhand einer neuartigen Wickelmaschine demonstriert.

Die selbsttragenden Spulenkörper werden dabei als Endloswicklung hergestellt, um Lötstellen zu vermeiden. Jeweils ein Strang aus zusammenhängenden Wicklungen bildet eine Phase der Drehstromwicklung des zu fertigenden biegeflexiblen Linearaktuators. Durch die durchgehende Drahtverbindung sinkt zum einen der Fertigungsaufwand und zum anderen wird das Risiko von kalten Lötstellen eliminiert.

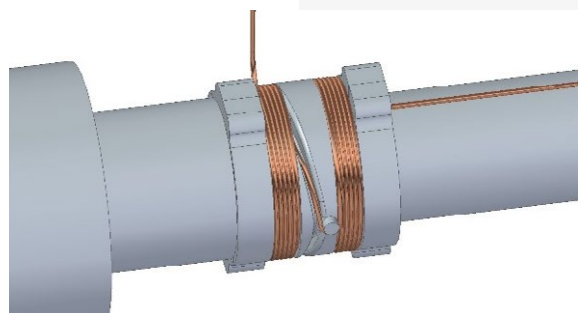


Abb. 1: CAD-Modell mit Draht

Fig. 1: CAD model with wire



Abb. 2: Prototyp mit gewickelten Spulen

Fig. 2: Prototype with coils

Zentrales Element der Maschine bildet der Wickelprozess, welcher den zugeführten Draht in die gewünschte Position bringt um die Spulenreihe zu fertigen. Hierzu wurde zunächst ein klassisch iterativer Konstruktionsprozess gestartet, basierend auf ersten bestehenden Entwürfen mittels Handskizzen und verschiedenen Vergleichs- und Entscheidungsmethoden. Für Kollisionsanalysen und bessere Visualisierung wurde ein bewegliches CAD-Modell erstellt um die Plausibilität des Prozesses zu verifizieren (s. Abbildung 1).

Um das Verhalten des Drahtes während des Wicklungsprozesses zu untersuchen und um sicherzustellen, dass sich der Draht sich so verhält

wie in dem CAD-Modell gewünscht, wurde ein Prototyp hergestellt. Dieser Prototyp wurde auf eine vorhandene konventionelle Wickelmaschine montiert und anschließend wurde der Wicklungsprozess händisch ausgeführt (s. Abbildung 2).

Um die Spulen selbsttragend auszuführen, wird ein Backlackdraht verwendet, welcher durch Erwärmung

eine stoffschlüssige Verbindung der Lackschichten erzeugt. Hierzu wird ein Strom durch die jeweilige Spule getrieben, welcher den Draht erwärmt (s. Abbildung 3).

Um eine Kontaktierung des Drahtes zu ermöglichen, muss sowohl die Backlackschicht als auch die Isolationsschicht des Drahtes entfernt werden. Dies soll berührungslos durch den Einsatz eines Lasers erfolgen. Hierzu wurden Versuche mit einem Gravurlaser durchgeführt (s. Abbildung 4).

Es zeigt sich, dass alle Prozesse grundlegend funktionieren. Diese müssen nun noch spezifiziert werden um die die Konstruktion weiter zu entwickeln. Hierzu werden die nötigen Parameter bestimmt um anschließend die erforderlichen Baugruppen zu bestimmen um diese ggf. zu konstruieren oder zu kaufen.

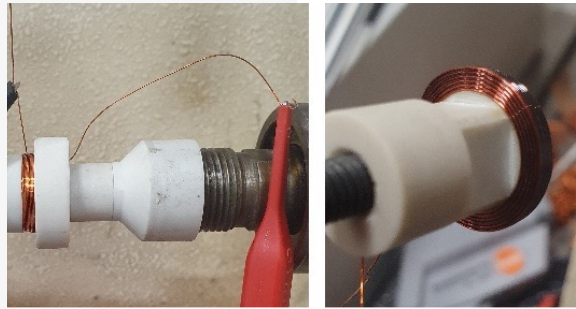


Abb. 3: Thermisches Verkleben

Fig. 3: Thermal bonding



Abb. 2: Prototyp mit gewickelten Spulen

Fig. 2: Prototype with coils

using a laser. For this purpose, tests were carried out with an engraving laser (see Figure 4).

It turns out that all processes work in principle. These must now be specified in order to further develop the design. For this purpose, the necessary parameters are determined in order to subsequently determine the required assemblies and, if necessary, to design or purchase them.

Gefördert durch  dtec.bw
Zentrum für Digitalisierungs- und
Technologieforschung der Bundeswehr



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU

Current developments in the design and calculation of traction drives

Lucas Steinacker, M.Sc.

Electromobility is one of the key components of the energy transition. The main focus in the development of drives for electric vehicles is on their energy efficiency. Another important feature is the durability of the drive system.

Currently, permanent-magnet synchronous machines are mainly used in traction drives, which have a high power density and high efficiency. High rotor temperatures, caused by high utilization and insufficient cooling of the rotor, can lead to irreversible damage to the magnet material. To prevent this, the power must be limited in continuous operation.

Flux-switching machines with permanent-magnet excitation (FSPM) combine the properties of a switched reluctance machine with those of a permanently excited synchronous machine. This results in a mechanical design that is as robust as that of an asynchronous machine. At the same time, the FSPM has a similarly high power density as permanent-magnet synchronous machines, although complex modifications for cooling of the rotor can be eliminated. Fig. 1 shows the schematic structure of an FSPM, consisting of a stator with embedded magnets and concentrated winding as well as an iron rotor.

For the application of an electrified all-wheel drive vehicle, a machine is designed.

Based on a design methodology for flux switching machines with a large gap developed at the professorship, a design method including optimization based on the response surface method for traction drives was developed.

Aktueller Stand zur Auslegung und Berechnung von Traktionsantrieben

Lucas Steinacker, M.Sc.

Die Elektromobilität stellt eine der Schlüsselkomponenten der Energiewende dar. Hauptaugenmerk bei der Entwicklung von Antrieben für Elektrofahrzeuge liegt auf der Energieeffizienz dieser. Ein weiteres wichtiges Merkmal ist zudem die Zuverlässigkeit des Antriebssystems.

Derzeit kommen überwiegend permanentmagneterregte Synchronmaschinen in Traktionsantrieben zum Einsatz, welche eine besonders hohe Leistungsdichte und hohe Wirkungsgrade aufweisen. Hohe Rortemperaturen, bedingt durch hohe Ausnutzung und schlechter Kühlmöglichkeit des Rotors, können zu irreversibler Schädigung des Magnetmaterials führen. Um dies zu verhindern, muss die Leistung im Dauerbetrieb begrenzt werden.

Flux-Switching Maschinen mit permanentmagnetischer Erregung (FSPM) vereinen die Eigenschaften von einer geschalteten Reluktanzmaschine mit denen einer permanent-erregten Synchronmaschine. Daraus resultiert ein mechanischer Aufbau, der ähnlich robust ist wie der einer Asynchronmaschine. Zugleich weist die FSPM eine ähnlich hohe Leistungsdichte wie permanent-erregte Synchronmaschinen auf, wobei jedoch aufwändige Maßnahmen zur Kühlung des Rotors entfallen können. Abb. 1 zeigt den schematischen Aufbau einer FSPM, bestehend aus einem Stator mit eingebetteten Magneten und konzentrierter Wicklung sowie einem eisernen Rotor.

Ausgehend von einer an der Professur entwickelten Auslegungsmethodik für Flux-Switching Maschinen mit großem Spalt, wurde eine Auslegungsmethodik

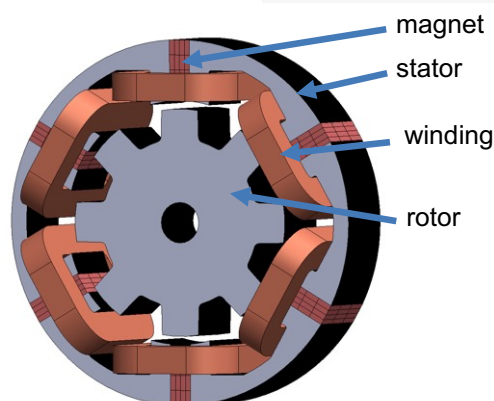


Abb. 1: Schematische Ansicht der FSPM

Fig. 1: Schematic view of FSPM

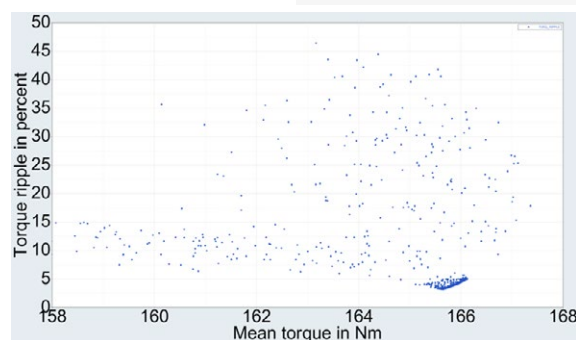


Abb. 2: Optimierung: Drehmoment und Drehmomentwelligkeit der einzelnen Ergebnisse

Fig. 2: Optimization: Torque and torque ripple of the individual results

methode samt Optimierung basierend auf der Response Surface Methode für Traktionsantriebe entwickelt.

Ziel ist es neben einer möglichst hohen Drehmomentdichte eine möglichst geringe Drehmomentwelligkeit sowie eine hohe Effizienz zu realisieren.

Um die hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit der elektrischen Maschine zur erfüllen, wurden zudem verschiedene Fehlerfälle untersucht und die Ergebnisse in die Geometrieoptimierung überführt [1].

Mechanisch und akustische Untersuchungen sollen in Zukunft Bestandteil der Optimierung werden, da diese einen direkten Einfluss auf Zuverlässigkeit und Komfort haben.

Die in Abb. 2 dargestellten Optimierungsergebnisse zeigen, dass durch Anpassungen an der Geometrie sehr ähnliche Drehmomente erzielt werden, die Drehmomentwelligkeit jedoch zwischen 3 und 47 Prozent beträgt. Dabei ergibt sich für das Optimum der in Abb. 3 dargestellte Drehmomentverlauf.

Durch den Einsatz einer FSPM kann die Drehmomentdichte gegenüber der zuvor im Fahrzeug verbauten Asynchronmaschine (ASM) deutlich gesteigert werden. Durch eine Reduzierung der Drehzahl kann das Untersetzungsgetriebe verkleinert werden und die mechanische Komplexität des Systems sinkt. Dies führt zu einer höheren Effizienz des Systems. Tabelle 1 gibt einen vergleichenden Überblick von Leistungs- und Drehmomentdichte von ASM und FSPM.

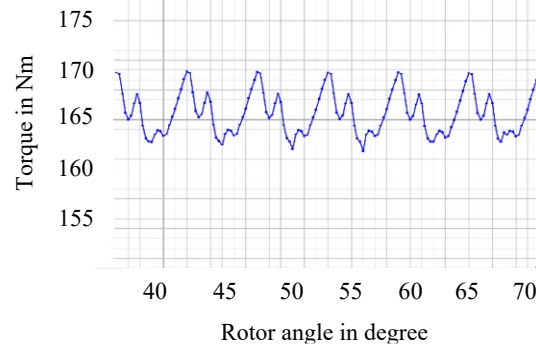


Abb. 3: Drehmoment in Abhängigkeit von der Rotorposition für das beste Optimierungsergebnis

Fig. 3: Torque as a function of the rotor position for the best optimization result

Tabelle 1: Vergleich der Leistungsdaten von ASM und FSPM

Table 1: Performance comparison of ASM and FSPM

	FSPM	ASM
Power density in kW/L	1,23	0,91
Torque density in Nm/L	11,71	1,35

The aim is to achieve the highest possible torque density, the lowest possible torque ripple and high efficiency.

In order to meet the high demands on the reliability of the electric machine, various fault cases were also investigated and the results transferred to the geometry optimization [1].

Mechanical and acoustic investigations will become part of the optimization in the future, as they have a direct influence on reliability and comfort.

The optimization results shown in Fig. 2 show that very similar torque values are achieved by adjusting the geometry, but that the torque ripple is between 3 and 47 percent. For the

optimum, this results in the torque curve shown in Fig. 3.

By using an FSPM, the torque density can be significantly increased compared to the asynchronous machine (ASM) previously installed in the vehicle. By reducing the speed, the reduction gearbox can be made smaller and the mechanical complexity of the system is reduced. This makes the system more efficient. Table 1 provides a comparative overview of the power and torque density of ASM and FSPM.

[1] L. Steinacker and C. Kreischer, „FEM Analysis of Demagnetization Risk of Flux-Switching Machine Under Short Circuit Condition Considering Machine Temperature“, *International Sympo-*

Multiphase Rail Launcher – Different operating Modes and possible Applications

Florian Zellmer, M. Eng.

Linear rail accelerators, or railguns, convert electromagnetic energy into kinetic energy. Contrary to the usual direct current supply, this work explores the possibility of using a three-phase power supply. This makes new rail accelerator concepts and areas of application conceivable. Furthermore, no complicated energy supply, such as a capacitor bank, is necessary; the electricity can be obtained directly from the power grid or a generator without intermediate storage.

To research this topic, a method is developed to describe the new drive concept theoretically and to validate the findings through laboratory experiments. Since this is a fundamental topic, analytical formulas are derived. This makes it possible to obtain initial development instructions for FEM simulations, resulting in an optimized experimental setup shown in Fig. 1 and 2.

This structure, called “Trinity”, is powered directly from the power grid and is designed for an output of 450 kVA. Since the theoretical calculations show that it makes sense to use several modules one be-

Fig. 3: Current profiles of an experiment with two directly connected modules with the special feature of backward current flow (in the picture: Current Flow Direction).

Multiphasen Schienenbeschleuniger – Verschiedene Betriebsmodi und mögliche Anwendungen

Florian Zellmer, M. Eng.

Lineare Schienenbeschleuniger, beziehungsweise Railguns wandeln elektromagnetische in kinetische Energie um. Entgegen der üblichen Gleichstromversorgung wird in dieser Arbeit die Möglichkeit der Verwendung einer Drehstromversorgung erforscht. Dadurch sind neue Schienenbeschleunigerkonzepte und Anwendungsgebiete denkbar. Ferner ist keine komplizierte Energieversorgung, wie beispielsweise eine Kondensatorbank notwendig, sondern der Strom kann ohne Zwischenspeicherung direkt aus dem Stromnetz oder einem Generator bezogen werden.

Zur Erforschung dieser Thematik wird eine Methode entwickelt, um das neue Antriebskonzept theoretisch zu beschreiben und die Erkenntnisse durch Laborexperimente zu validieren. Da es sich um eine grundlegende Thematik handelt, werden analytische Formeln hergeleitet. Damit ist es möglich erste Entwicklungsvorschriften für FEM-Simulationen zu erhalten woraus sich ein optimierter Experimental-aufbau ergibt, welcher in den Abb 1 und 2 dargestellt ist.

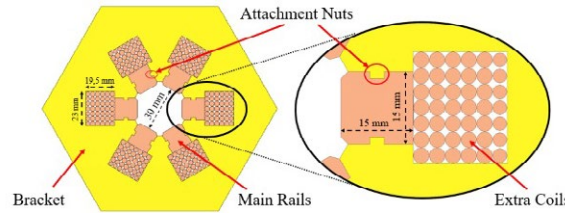


Abb. 1: Querschnitt des experimentellen Drehstrombeschleunigers mit Stromschienen und zusätzlichen Spulen zur Verstärkung des Magnetfeldes.

Fig. 1: Cross section of the experimental three-phase accelerator with copper rails and additional coils to augment the magnetic field.

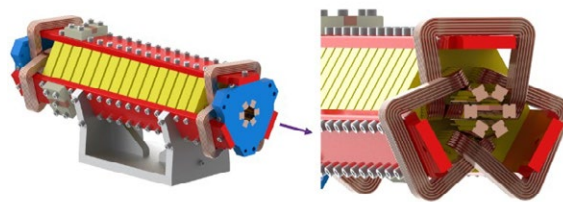


Abb. 2: Erster Experimenteller mehrphasiger Schienenbeschleuniger mit magnetfeldverstärkenden Spulen.

Fig. 2: First experimental multi-phase rail accelerator with magnetic field augmenting coils.

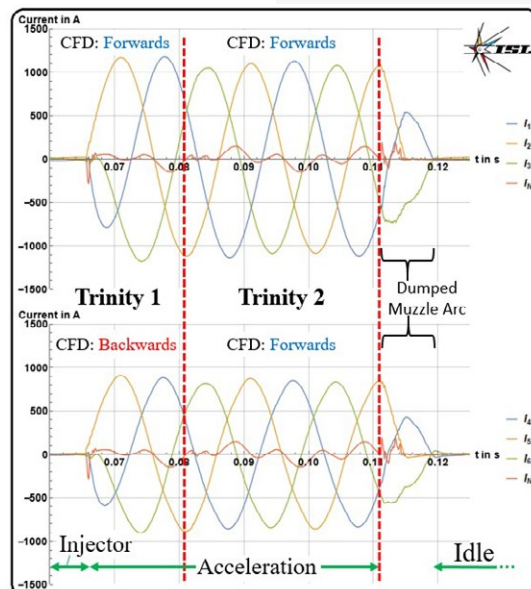


Abb. 3: Stromverläufe eines Experiments mit zwei direkt verbundenen Modulen mit der Besonderheit des Rückwärtigen Stromflusses (im Bild: Current Flow Direction).

Dieser Aufbau mit dem Namen "Trinity" wird direkt aus dem Stromversorgungsnetz betrieben und ist für eine Leistung von 450 kVA ausgelegt. Da die theoretischen Berechnungen zeigen, dass es sinnvoll ist mehrere Module hintereinander anstelle eines großen Beschleunigers zu verwenden, ist das Konzept modular ausgeführt. Dadurch wird das Projektil (Abb 4) auf einer längeren Strecke beschleunigt.

Flanschverbindungen (Abb. 2, blau) ermöglichen eine Hintereinanderschaltung mehrerer Module. RC-Snubber an der Mündung ermöglichen einen Austritt der Projektile aus dem Beschleuniger mit nur einer geringen Plasmabildung.

Grundsätzlich gibt es zwei Betriebsmodi bei diesem modularen Konzept: Mehrere Module mit galvanischer Isolierung untereinander oder einer direkten elektrischen Verbindung. Zur galvanischen Isolierung muss ein Übergabesegment verwendet werden. Dafür ist es möglich die Module unabhängig voneinander zu betreiben. Eine direkte Verbindung ermöglicht eine höhere Vortriebskraft, doch es können nicht beliebig viele Module hintereinander geschaltet werden. Erstmals kann die Möglichkeit einer Zusammenschaltung mehrerer Module gezeigt werden, sodass der Strom von vorne in die Beschleunigerschienen eingespeist wird (Abb 5). Abbildung 3 zeigt die Stromverläufe von zwei direkt miteinander verbundenen Trinity-Modulen.

Dieser Betriebsmodus kann auch auf Augmented Railguns übertragen werden. Auf Grund der vielseitigen Möglichkeiten ist aber auch der Einsatz als Linearmotor für höchste Geschwindigkeiten (z.B. Hyperloop, Rohrpostsystem, Raumfahrt) denkbar. Die Resultate sind vielversprechend und durch die Validierung der Theorie ist es möglich größere Aufbauten zu konzipieren und mit der Methode zu entwickeln.

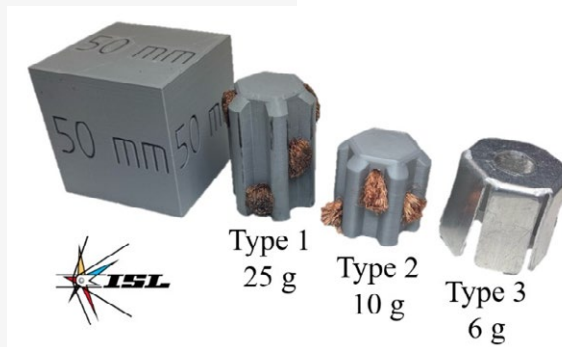


Abb. 4: Gegenüberstellung von unterschiedlichen Projektiltypen im Kaliber 30 mm mit unterschiedlichen Massen.

Fig. 4: Comparison of different projectile types in 30 mm caliber with different masses. [2]

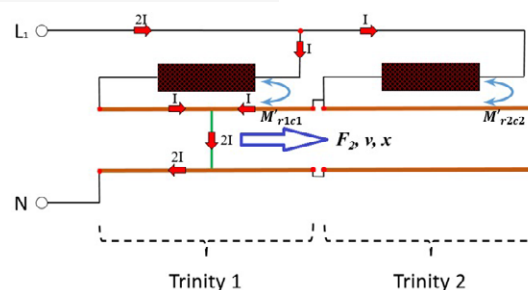


Abb. 5: Prinzipschaltbild der Verwendung von mehreren Modulen hintereinander ohne eine galvanische Trennung.

Fig. 5: Block diagram of the use of several modules one behind the other without galvanic isolation.

hind the other instead of one large accelerator, the concept is designed to be modular. This accelerates the projectile (Fig. 4) over a longer distance. Flange connections (Fig. 2, blue) enable several modules to be connected in series. RC-snubbers at the muzzle allow the projectiles to exit the accelerator with only a small amount of plasma formation.

A transfer segment must be used in case of galvanic isolation. It is possible to operate the modules independently of each other. A direct connection enables greater propulsive force, but not many modules can be connected in series. For the first time, the possibility of interconnecting several modules can be demonstrated for this augmented railgun so that the current is fed into the accelerator rails from the muzzle (Fig. 5). Fig. 3 shows the current profiles

of two directly connected Trinity modules.

This operating mode is possible due to augmented design of the railgun. Due to the diverse possibilities, use as a linear motor for highest speeds (e.g. Hyperloop, letter shot tube system, space launch) is also conceivable. The results are promising and by validating the theory, it is possible to design larger structures and develop them using the method

[1] Zellmer, F. (2023) "Development of methods for the design of segmented rail accelerators that can be operated with multiphase currents", PhD thesis, HSU Hamburg.

[2] Zellmer, F., Löffler, M., Schneider, M., Kreischer, C. (2023) „An Augmented Multiphase Rail Launcher with a Modular Design: Extended Setup and Muzzle Fed Operation“, IEEE Transactions on Plasma Science, to be published.

List of Authors

Moritz Benninger, M.Sc.

Monitoring and diagnosis of asynchronous machines with AI-based analysis of stator currents

Florian Dreishing, M.Sc.

Construction of a Test Bench for Experimental Analysis for Bendable Linear Motors

Daniel Greve, M.Sc

Dimensioning Method for Drive Systems with Linear Direct Actuators for Physical Support Systems

Christian Kreischer, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Welcome and overview

Matthias Kowalski, M.Eng.

Radial flux loss in stator bars in core end regions of high-performance machines: Methods, Analyses, and Findings

Patrick Ralf, M.Sc

Development status of winding production

Lucas Steinacker, M.Sc

Current developments in the design and calculation of traction drives

Florian Zellmer, M. Eng.

Multiphase Rail Launcher – Different operating Modes and possible Applications

Autorenverzeichnis

Moritz Benninger, M.Sc.

Überwachung und Diagnose von Asynchronmaschinen mit einer KI-basierten Analyse der Statorströme

Florian Dreishing, M.Sc.

Aufbau eines Prüfstands zur experimentellen Analyse biegeflexibler Linearmotoren

Daniel Greve, M.Sc

Auslegungsmethode für Antriebssysteme mit Lineardirektantrieben in körpernahen Unterstützungssystemen

Christian Kreischer, Univ.-Prof. Dr.-Ing.

Begrüßung und Überblick

Matthias Kowalski, M.Eng.

Radialfeldverluste in Ständerstäben im Blechpaketendbereich von Hochleistungsmaschinen: Methoden, Analysen und Erkenntnisse

Patrick Ralf, M.Sc

Entwicklungsstand der Wicklungsfertigung

Lucas Steinacker, M.Sc

Aktueller Stand zur Auslegung und Berechnung von Traktionsantrieben

Florian Zellmer, M. Eng.

Multiphasen Schienenbeschleuniger – Verschiedene Betriebsmodi und mögliche Anwendungen

