

# **Anthology for the Workshop**

Developments and  
Research Results  
of the Chair of  
Electrical Machines  
and Drive Systems  
2024

December 5, 2024  
Hamburg  
Germany

# **Sammelband zum Workshop**

Entwicklungen und  
Forschungsergebnisse  
der Professur für  
Elektrische Maschinen  
und Antriebssysteme  
2024

5. Dezember 2024  
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  
2024

December 5, 2024  
Hamburg  
Germany

# **Sammelband zum Workshop**

Entwicklungen und  
Forschungsergebnisse  
der Professur für  
Elektrische Maschinen  
und Antriebssysteme  
2024

5. Dezember 2024  
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: 10.24405/17399 (online, abrufbar über <https://doi.org/10.24405/17399>)

© Copyright Helmut Schmidt University/University of the Federal Armed Forces Hamburg, 2025

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, 2025

## Welcome and overview

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

In this anthology, the current developments and research results of the Chair of Electrical Machines and Drive Systems in 2024 are presented. The chair became a member of the newly founded AI Institute and the research focus "Sustainable Energy" at HSU.

Four doctoral theses were completed and successfully defended at the chair. The topic of Mr. Matthias Kowalski's dissertation is „Über Wirbelstromphänomene in Ständerstäben in Nutaustrittsbereichen leistungsstarker Turbogeneratoren“ [1]. In this work, he develops an efficient submodel method for the precise calculation of eddy current losses and applies it extensively to various geometries and operating points. The additionally developed thermal aging calculator offers great potential to further optimize the design of large electrical machines and to better monitor the aging of the machine during operation.

Mr. Florian Dreishing completed his doctorate on the topic „Auslegung und methodische Entwicklung von biegeflexiblen elektrischen Linearmotoren“ [2]. In addition to the method development for design, Mr. Dreishing also extensively researched the manufacturing and control of this novel drive system. The work has led to significant insights in the field of bending-flexible linear motors. The results contribute to the development of new soft robotics applications and exoskeleton solutions.

Mr. Florian Zellmer completed his doctorate on the topic „Methodenentwicklung zur Auslegung segmentierter Schienenbeschleuniger, welche mehrphasig betrieben werden können“ [3]. The segmented design opens up new application fields in the transport sector and for test setups. These range from the rapid transport of, for example, or-

## 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 2024 vorgestellt.

Die Professur ist seit diesem Jahr Mitglied des neu gegründeten KI Institutes sowie des Forschungsschwerpunktes „Nachhaltige Energie“ der HSU.

An der Professur wurden vier Promotionen abgeschlossen und erfolgreich verteidigt. Das Thema der Dissertation von Herrn Matthias Kowalski lautet „Über Wirbelstromphänomene in Ständerstäben in Nutaustrittsbereichen leistungsstarker Turbogeneratoren“ [1]. Er entwickelt hierin eine effiziente Submodell-Methode zur genauen Berechnung von Wirbelstromverlusten und wendet diese sehr ausführlich für verschiedene Geometrien und Betriebspunkte an. Der zusätzlich entwickelte thermische Alterungsrechner bietet ein großes Potential, die Auslegung von großen elektrischen Maschinen weiter zu optimieren und auch die Alterung der Maschine während des Betriebs besser zu überwachen.

Herr Florian Dreishing hat zum Thema „Auslegung und methodische Entwicklung von biegeflexiblen elektrischen Linearmotoren“ [2] promoviert. Neben der Methodenentwicklung zur Auslegung hat Herr Dreishing auch die Fertigung und Regelung dieses neuartigen Antriebssystems umfänglich erforscht. Durch die Arbeit wurde ein signifikanter Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der biegeflexiblen Linearmotoren erzielt. Die Ergebnisse tragen dazu bei, neue Softrobotikanwendungen und Exoskellösungen zu erschließen.

Herr Florian Zellmer hat zum Thema „Methodenentwicklung zur Auslegung segmentierter Schie-

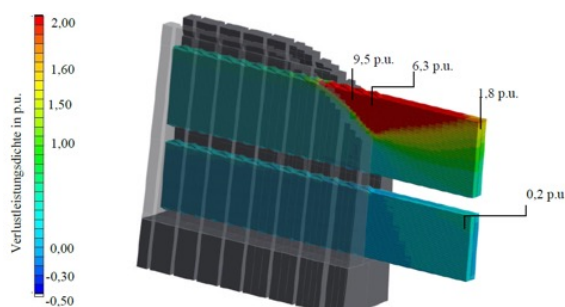


Abb. 1: Normierte Radialfeldverlustdichte der Ständerstäbe [1]

Fig. 1: Normalized radial field loss density of the stator bars [1]

- ① Spulenpaket
- ② Platinen des Absolutpositionssensors
- ③ Platine des Relativpositionssensors
- ④ Anschluss der dreiphasigen Wicklung
- ⑤ Anschluss des Positions- und Temperatursensors
- ⑥ Herausgeführter Sternpunkt

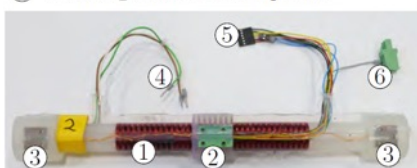


Abb. 2: Primärteil des Linearmotors [2]

Fig. 2: Primary part of the linear motor [2]

nenbeschleuniger, welche mehrphasig betrieben werden können" [3] promoviert. Durch den segmentierten Aufbau werden neue Anwendungsfelder im Transportbereich und für Testaufbauten erschlossen. Diese reichen vom schnellen Transport von beispielsweise Organen und Gewebeproben zwischen zwei medizinischen Zentren bis hin zur Beschleunigung von Mikrosatelliten.

Das Thema der Dissertation von Herrn Moritz Benninger lautet „KI-basiertes Monitoring und Diagnose von elektrischen Maschinen im industriellen Umfeld“ [4]. Durch die Arbeit von Herrn Benninger wurde ein signifikanter Fortschritt auf dem Gebiet der Fehlererkennung in elektrischen Maschinen erzielt. Die Ergebnisse tragen dazu bei, praxistaugliche, kostengünstige und automatisierte Monitoring und Diagnosesysteme für elektrische Maschinen zu entwickeln.

Die Beiträge des Sammelbandes setzen sich aus Fortschrittsberichten und Gastvorträgen zusammen, welche im Rahmen des jährlichen EMA Workshops am 05.12.2024 vorgestellt wurden.

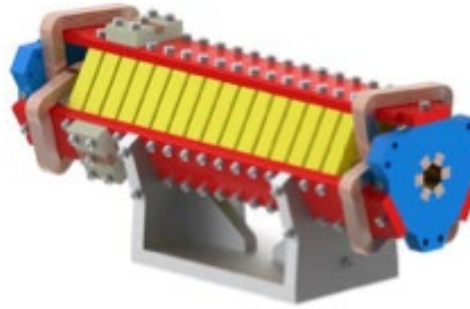


Abb. 3: Darstellung des Gesamtaufbaus des Beschleunigermoduls Trinity 1 [3]

Fig. 3: Representation of the overall structure of the accelerator module Trinity 1 [3]

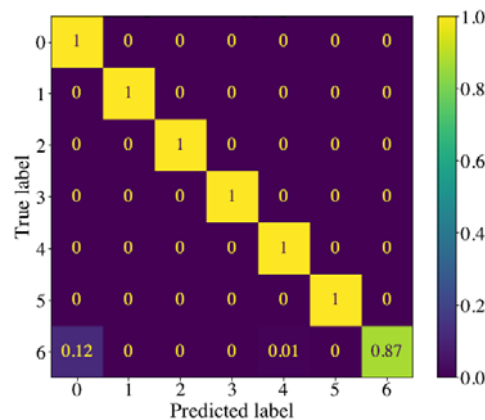


Abb. 4: Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Veränderung der magnetischen Permeabilität [4]

Fig. 4: Relationship between mechanical stress and change of magnetic permeability [4]

gans and tissue samples between two medical centers to the acceleration of microsattellites.

The topic of Mr. Moritz Benninger's dissertation is „KI-basiertes Monitoring und Diagnose von elektrischen Maschinen im industriellen Umfeld“ [4]. Mr. Benninger's work has made significant progress in the field of fault detection in electrical machines. The results contribute to the development of practical, cost-effective, and automated monitoring and diagnostic systems for electrical machines.

The contributions of the anthology consist of progress reports and guest lectures, which were presented at the annual EMA Workshop on December 5, 2024.

[1] Matthias Kowalski: „Über Wirbelstromphänomene in Ständerstäben in Nutaus-trittsbereichen leistungsstarker Turbogeneratoren“, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg 2024

[2] Florian Dreishing: „Auslegung und methodische Entwicklung von biegeflexiblen elektrischen Linearmotoren“, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg 2024

[3] Florian Zellmer: „Methodenentwicklung zur Auslegung segmentierter Schienenbeschleuniger, welche mehrphasig betrieben werden können“, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg 2024

[4] Moritz Benninger: „KI-basiertes Monitoring und Diagnose von elektrischen Maschinen im industriellen Umfeld“, Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg 2024

# **Workshop 2024**

**Conference contributions**



## Advantages of five-phase flux-switching machines for traction drives with permanent magnets in the stator

Lucas Steinacker, M.Sc.

Traction drives impose special requirements on the electrical machines. In addition to a high power density to achieve a compact design, the efficiency must also be high to maximize the range. High reliability and overload capacity are essential for user satisfaction and for applications that are not used for freight transport, comfort also plays a decisive role [1].

Machines with permanent magnets in the stator are currently the subject of numerous research projects, as they enable reliable cooling of the magnets due to the good thermal connection of the magnets. The rotor also has an extremely robust design and can be used at high temperatures. Machines with permanent magnets in the stator also have a high power density.

The Doubly-Salient-Permanent-Magnet-Machine (DSM), Flux-Reversal-Permanent-Magnet-Machine (FRM) and Flux-Switching-Permanent-Magnet-Machine (FSM) are of particular interest in research, with the FSM offering high torque densities, low torque ripple and a high degree of efficiency. The sinusoidal back EMF also reduces losses and enables more stable control [2].

A five-phase machine design can reduce the torque ripple and at the same time increase the torque by utilizing the 3rd harmonic [3]. In addition, machines with a higher number of phases have increased failure safety, whereby a distinction is made between concepts with star-connected coils and machines with independent coils. The second type offers greater reliability, but also requires twice the number of power switches. With five-phase inverters, 30 elementary voltage space vectors can be realized, whereas three-phase inverters only allow six. This leads to significantly more precise modulation, particularly with low output voltages.

However, increasing the number of phases also increases production costs. In addition, the number of phases leads to an increase in the computational effort required for control and coordinate transformations. But the increased control effort also enables direct control of the d- and q-current of the third harmonic and thus better utilization of the machine. Due to the steady increase in the performance of microprocessors in recent years, even complex control algorithms can now be implemented cost-effectively.

## Vorteile fünfphasiger flussschaltender Maschinen mit Permanentmagneten im Stator als Traktionsantrieb

Lucas Steinacker, M.Sc.

Traktionsantriebe stellen besondere Anforderungen an die elektrische Maschine. Neben einer hohen Leistungsdichte, um eine kompakte Bauform zu erzielen, muss auch der Wirkungsgrad hoch sein, um die Reichweite zu maximieren. Eine hohe Zuverlässigkeit und Überlastfähigkeit ist für die Nutzerzufriedenheit unabdingbar und auch der Komfort spielt bei Anwendungen, die nicht dem Güterverkehr dienen, eine entscheidende Rolle [1].

Maschinen mit Permanentmagneten im Stator sind derzeit in zahlreichen Projekten Gegenstand der Forschung, da diese durch die gute thermische Anbindung der Magnete eine besonders zuverlässige Kühlung der Magnete ermöglichen. Zudem weist der Rotor einen äußerst robusten Aufbau auf, und kann bei hohen Temperaturen verwendet werden. Zudem weisen Maschinen mit Permanentmagneten im Stator eine hohe Leistungsdichte auf.

In der Forschung finden insbesondere die Doubly-Salient-Permanent-Magnet-Machine (DSM), Flux-Reversal-Permanent-Magnet-Machine (FRM) und Flux-Switching-Permanent-Magnet-Machine (FSM) Beachtung, wobei die FSM besonders hohe Drehmomentdichten, eine niedrige Drehmomentwelligkeit und einen hohen Wirkungsgrad aufweisen. Die sinusförmige Polradspannung reduziert zudem Verluste und ermöglicht eine stabilere Regelung [2].

Wenn die Maschine fünfphasig ausgeführt wird, kann die Drehmomentwelligkeit reduziert werden und gleichzeitig durch Ausnutzung der 3ten Harmonischen das Drehmoment gesteigert werden [3]. Zudem verfügen Maschinen mit höheren Phasenzahlen über eine erhöhte Ausfallsicherheit, wobei zwischen Konzepten mit in Stern verschalteten Spulen und Maschinen mit voneinander unabhängigen Spulen unterschieden wird. Letztere bieten eine höhere Ausfallsicherheit, benötigen aber auch mindestens die doppelte Anzahl an Leistungsschaltern. Mit fünfphasigen Wechselrichtern lassen sich 30 elementare Spannungsraumzeiger realisieren, wohingegen dreiphasige Wechselrichter nur sechs ermöglichen. Dies führt insbesondere bei kleinen Ausgangsspannungen zu einer deutlich genaueren Modulation.

Mit der Erhöhung der Phasenzahl geht jedoch auch ein gesteigerter Fertigungsaufwand einher. Zudem erhöht sich mit der Phasenanzahl der für die Rege-

lung und Koordinatentransformationen benötigte Rechenaufwand. Der erhöhte Regelungsaufwand ermöglicht aber auch die direkte Regelung des d- und q-Stromes der dritten Harmonischen und damit eine bessere Ausnutzung der Maschine. Aufgrund der in den letzten Jahren stetig gestiegenen Rechenleistung von Mikroprozessoren, lassen sich heutzutage auch komplexe Regelalgorithmen kostengünstig implementieren.

Insgesamt bieten fünfphasige Maschinen vielfältige Vorteile, die durch den nahezu ausnahmslosen Betrieb von elektrischen Maschinen am leistungselektronischen Stellglied noch verstärkt werden. Insbesondere für Anwendungen, die hohe Anforderungen an Zuverlässigkeit, Drehmomentwelligkeit und Regelbarkeit stellen, sind diese eine gute Alternative zu dreiphasigen Konzepten.

All in all, five-phase machines offer a wide range of advantages, which are further enhanced by the operation of electrical machines with power electronic converters. They are a good alternative to three-phase concepts, particularly for applications that place high demands on reliability, torque ripple and controllability.

[1] X. Zhu und W. Huang, "Investigation of Five-Phase Flux-Switching Permanent Magnet Machines for EV and HEV Applications," IEEE Transactions on Industry Applications, 2024  
[2] M. Lehr, "Auslegung und Bewertung elektrischer Maschinen mit Permanent-magneten im Stator für hohe Drehmomentdichten", Dissertation, Darmstadt, 2020

[3] T. Jonsky, "Modellierung und Regelung von fünfphasigen Synchron-maschinen unter Berücksichtigung von Sättigungseffekten und Mehrfach-anisotropien", Dissertation, Hannover, 2019

## Design of an Experimental Setup for Investigating the Inverse Magnetostrictive Effect

Domenik Haas, M.Sc.

As part of the *AI Torque* research project, a contactless monitoring system is being developed to monitor the mechanical load conditions of drive shafts. The system monitors torsional loads caused by the transmitted torque, as well as bending and shear loads that arise, for example, from the introduction and removal of torque via gears or pulleys.

The monitoring system is based on a measurement method that utilizes the inverse magnetostrictive effect (also known as the Villari effect, named after its discoverer). Inverse magnetostriction describes the change in the magnetic properties of a ferromagnetic material due to a mechanical force. Accordingly, the monitoring system detects the change in the magnetic permeability of the drive shaft.

The relationship between mechanical load and change in magnetic permeability exhibits a saturation behavior but is linear in the mean range [1]. In principle, the proportionality constant between mechanical stress and magnetic permeability, as well as the saturation values, are not known for the common steel grades used in mechanical engineering.

To investigate the applicability of already known mathematical models describing the Villari effect for industrial measurement systems and to adapt them if necessary, as well as to investigate the characteristics of the Villari effect for different steel grades and post-treatment processes, a test bench is being developed, which is presented below.

A tensile testing machine, already available at the chair, is used to generate the mechanical forces. This means that the material samples will be rod-shaped.

Since magnetic fields are vortex fields, the field lines always form closed contours. For this reason, it is necessary to use a so-called test adapter as a magnetic return path. This test adapter should interfere as little as possible with the measurement of the magnetic properties of the test specimen. Therefore, the field strength and flux density in the test adapter should be as low as possible to reduce magnetic hysteresis. Additionally, no eddy currents should occur in the test adapter to prevent field displacement and thus unfavorable utilization of the magnetic material.

## Auslegung eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung des Inversen Magnetostruktiven Effekts

Domenik Haas, M.Sc.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *AI Torque* wird ein berührungsloses Monitoringsystem zur Überwachung der mechanischen Belastungszustände von Antriebswellen entwickelt. Überwacht werden Torsionsbelastungen, die durch das übertragene Drehmoment entstehen, als auch Biege- und Querkraftbelastungen, die beispielsweise durch die Ein- und Ausleitung des Drehmoments über Getriebe oder Riemenscheiben entstehen.

Das Monitoringsystem basiert auf einem Messverfahren, welches sich den Inversen Magnetostruktiven Effekt (auch, nach seinem Entdecker, als Villari-Effekt bezeichnet) zunutze macht. Inverse Magnetostruktion beschreibt die Veränderung der magnetischen Eigenschaften eines ferromagnetischen Materials durch eine mechanische Kraft. Das Monitoringsystem erfasst demnach die Veränderung der magnetischen Permeabilität der Antriebswelle.

Der Zusammenhang zwischen mechanischer Belastung und Veränderung der magnetischen Permeabilität weist ein Sättigungsverhalten auf, ist jedoch im mittleren Bereich linear [1]. Prinzipiell sind die Proportionalitätskonstante zwischen mechanischer Spannung und magnetischer Permeabilität, sowie die Sättigungswerte, für die gängigen Stahlsorten im Maschinenbau, nicht bekannt.

Um bereits bekannte mathematische Modelle zur Beschreibung des Villari-Effektes auf ihre Anwendbarkeit für industrielle Messsysteme zu untersuchen und gegebenenfalls anzupassen, sowie zur Untersuchung der Kennwerte des Villari-Effekts für unterschiedliche Stahlsorten und Nachbehandlungsverfahren, wird ein Prüfstand entwickelt, der im Folgenden vorgestellt wird.

Zur Erzeugung der mechanischen Kräfte wird eine Zugprüfmaschine verwendet, die bereits an der Professur vorhanden ist.

Daraus ergibt sich, dass die Materialproben stabförmig sein werden. Da magnetische Felder Wirbelfelder sind, nehmen die Feldlinien stets geschlossene Konturen an. Aus diesem Grund ist es notwendig einen sogenannten Testadapter als magnetischen Rückschluss einzusetzen. Dieser Testadapter sollte die Messung der magnetischen Eigenschaften des Testkörpers möglichst nicht beeinträchtigen. Aus

diesem Grund sollen die Feldstärke und die Flussdichte im Testadapter möglichst gering sein, um die magnetische Hysteresse zu reduzieren. Zudem sollen im Testadapter keine Wirbelströme auftreten, um eine Feldverdrängung und somit eine ungünstige Ausnutzung des magnetischen Materials zu verhindern.

Die Anforderungen an den Testadapter werden durch die Verwendung eines Ferritkörpers erfüllt, dessen Querschnittsfläche, die des Testkörpers um ein Vielfaches übersteigt. Um den Einfluss von magnetischen Feldkomponenten orthogonal zur Testkörperachse zu verringern, wird der Testadapter symmetrisch aufgebaut.

Zur Auswertung der Messergebnisse werden die Spannungen und Ströme an den seitlich gelegenen Sendespulen, sowie die induzierte Spannung an der zentralen Empfangsspule gemessen. Anhand des magnetischen Ersatzschaltbildes des Versuchsaufbaus wird aus den gemessenen Größen die Reluktanz des Testkörpers berechnet, aus der sich wiederum die Permeabilität ergibt.

Die Erkenntnisse aus diesem Versuchsaufbau sind notwendig, um der Sensordatenverarbeitung des Monitoringsystems den elementaren Zusammenhang zwischen Veränderung der magnetischen Permeabilität und mechanischer Spannung hinzuzufügen. Darüber hinaus wird durch die gewonnenen Erkenntnisse die Methodik zur Auslegung des Monitoringsystems, um die Abschätzung der notwendigen Genauigkeit der verwendeten Elektronikkomponenten, zum Erreichen der gewünschten Genauigkeit zur Messung der mechanischen Spannung, erweitert.

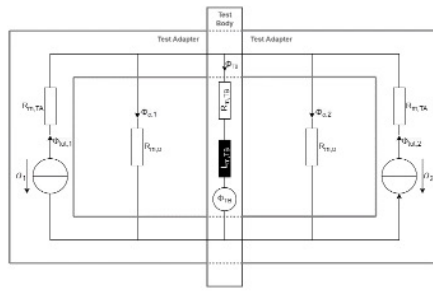


Abb. 1: Magnetisches Ersatzschaltbild des Versuchsaufbaus

Fig. 1: Magnetic equivalent circuit of the test setup

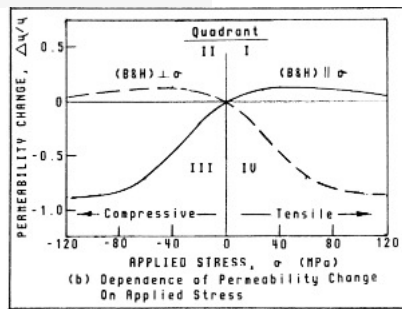


Abb. 2: Zusammenhang zwischen mechanischer Spannung und Veränderung der magnetischen Permeabilität

Fig. 2: Relationship between mechanical stress and change of magnetic permeability

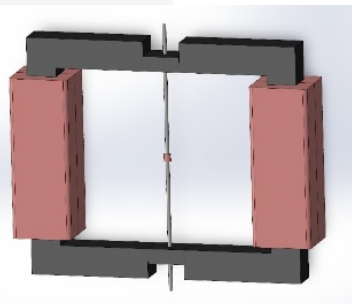


Abb. 3: CAD-Darstellung des Versuchsaufbaus

Fig. 3: CAD graphic of the test setup

The requirements for the test adapter are met by using a ferrite body whose cross-sectional area exceeds that of the test specimen by a multiple. To reduce the influence of magnetic field components orthogonal to the test specimen axis, the test adapter is symmetrically constructed.

To evaluate the measurement results, the voltages and currents at the lateral transmitting coils, as well as the induced voltage at the central receiving coil, are measured. Based on the magnetic equivalent circuit of the experimental setup, the reluctance of the test specimen is calculated from the measured quantities, from which the permeability is derived.

The findings from this experimental setup are necessary to add the fundamental relationship between the change in magnetic permeability and mechanical stress to the sensor data processing of the monitoring system. Furthermore, the insights gained will expand the methodology for designing the monitoring system

to include the estimation of the necessary accuracy of the electronic components used to achieve the desired accuracy in measuring mechanical stress.

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag

[1] J. Fleming. Magnetostrictive Torque Sensors - Derivation of Transducer Model. SAE Transactions 1989.  
 [2] J. Fleming. Magnetostrictive Torque Sensors - Derivation of Transducer Model. SAE Transactions 1989.

## Methodology for Integrated Optimization for Actuation Systems for Exoskeletons

Daniel Greve, M.Sc.

Current design procedures for exoskeletons and their actuation systems are characterized by iterations. Problematically, these iterations are costly and time-intensive since physical prototypes are required. This can be counteracted with an integrated design optimization for the actuation system. The goal is to supply exactly defined support torques while keeping the actuation system's mass minimally. The consideration of support torques is a way for characterization of exoskeletons and presented in [3]. An exemplary design procedure including the introduced methodology is presented in Fig. 1.

## Methodik zur integrierten Optimierung von elektrischen Antriebssystemen für Exoskelette

Daniel Greve, M.Sc.

Aktuelle Auslegungsvorgehen für Exoskelette und ihre Antriebssysteme sind von Iterationen geprägt. Nachteilig hierbei ist, dass jede Iteration kosten- und zeitintensiv ist, da ein physikalischer Prototyp aufgebaut werden muss. Durch eine integrierte Optimierung des Antriebssystems kann dem entgegen gewirkt werden. Ziel ist hierbei, dass das Exoskelett mit seinem Antriebssystem genau die spezifizierten Unterstützungsmomente liefert und gleichzeitig eine minimale Masse hat. Die Betrachtung von Unterstützungsmomenten ist ein Weg zur Charakterisierung von Exoskeletten und wird unter anderem in [3] dargestellt. Ein beispielhaftes Entwicklungsvorgehen einschließlich der eingeführten Methodik ist in Abb. 1 dargestellt.

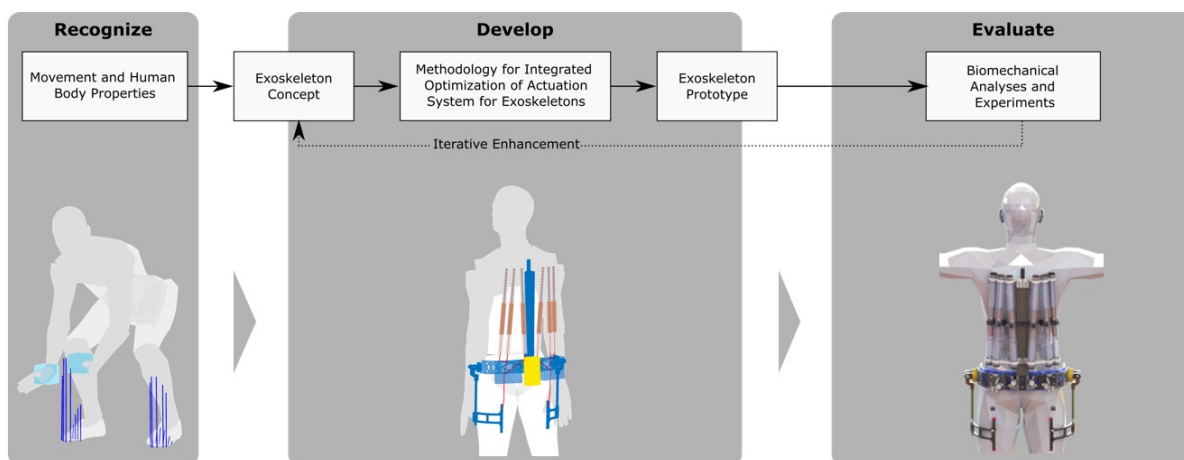


Abb. 1: Auslegungsvorgehen nach [1, 2] unter zusätzlich besonderer Beachtung des Antriebssystems

Fig. 1: Design procedure based on [1, 2] for exoskeletons with additional focus on the actuation system

The following content is based on [4]. A modeling of human, exoskeleton and actuation system forms the basis of the methodology. As shown in Fig. 2, it consists of four phases. In a first phase, support torques are determined. This is based on a motion recording of a movement task, e.g. lifting of a load. Based on requirements regarding support torques and velocities derived from this, optimization of the actuations systems is conducted as minimization of the actuation system's mass. Further, constraints are considered to limit actuator usage to remain within thermal limits, to achieve system runtime requirements, to retain current limits, to ensure support torques and

Nachfolgend dargestellte Inhalte basieren auf [4]. Der Methodik liegt eine Modellierung von Mensch, Exoskelett und Antriebssystem zugrunde. Die Methodik besteht aus vier Phasen. Diese sind in Abb. 2 dargestellt. In der ersten Phase werden die Unterstützungsmomente festgelegt. Dies basiert auf einer Bewegungsaufnahme, wie beispielsweise das Hochheben einer Last. Auf Basis der daraus ableitbaren Anforderung für Unterstützungsmomente und Bewegungsgeschwindigkeiten wird die Optimierung des Antriebssystems als Minimierung der Masse unter Nebenbedingungen durchgeführt. Die Nebenbedingungen berücksichtigen eine Limitierung der Ausnutzung der Antriebe

aufgrund einer thermischen Begrenzung, einer Betrachtung der sich aus den in den Batteriezellen enthaltenen Energie ergebenden Laufzeit und maximalen Ströme, die Erreichung von Unterstützungsmomenten sowie aktuatorspezifischen Einschränkungen. Weiterhin wird hier ein Steuerungsgesetz eingeführt um die Erreichung von Unterstützungsmomenten sicherzustellen. Während dieser Phase wird eine Approximation im Menschmodell eingeführt. Diese betrifft die Berechnung von Bodenreaktionskräften und -momenten, die

durch das Exoskelett hervorgerufen werden. Um sicherzustellen dass die spezifizierten Unterstützungsmomente zuverlässig umgesetzt werden, ist eine Validierungsrechnung mit einem etablierten Modell für Bodenreaktionskräfte und -momente notwendig. Die Methodik schließt mit der Verwendung des für die Optimierung notwendigen Steuerungsgesetzes für die Unterstützungsmomente im Betrieb.

Somit wird eine Durchgängigkeit der Verwendung von Modellen und Steuerungsansätzen gewährleistet. Dies hat den Vorteil, dass Auslegungskriterien für Antriebssysteme zuverlässig umgesetzt werden und messbar sind. Letztlich kann durch diese Methodik das Entwicklungsvorgehen effektiver gestaltet werden.

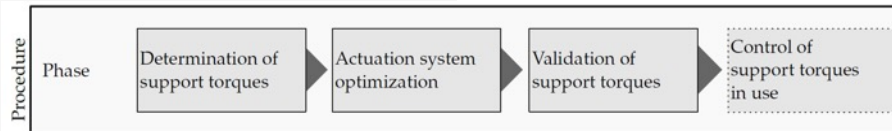


Abb. 2: Phasen der Methodik [4]

Fig. 2: Phases of the methodology [4]

to retain actuator specific limitations. Additionally, a control law is required to ensure support

torques. During this step, an approximation for ground reaction forces and torques in the human model is introduced. This affects ground reaction forces and torques caused by the exoskeleton. To ensure the validity of support torques, a validation phase is necessary with a well-established model for ground reaction forces and torques. The methodology closes with the application of the control law, which is necessary during optimization, in reality.

This ensures the consistency in the use of models and control approaches. The advantage of this is that design criteria for actuation systems are reliably implemented and measurable. Ultimately, the development process can be made more effective.

Based on project KIKU by

 dtec.bw

Zentrum für Digitalisierungs- und  
Technologieforschung der Bundeswehr



Finanziert von der  
Europäischen Union

NextGenerationEU

[1] M. Sposito, C. Di Natali, S. Toxiri, D. G. Caldwell, E. de Momi, and J. Ortiz, „Exoskeleton kinematic design robustness: An assessment method to account for human variability,” *Wearable Technol.*, vol. 1, 2020, doi: 10.1017/wtc.2020.7.

[2] T. Schubert and R. Weidner, „Entwicklungsprozess im Projekt „KIKU“: KI basierte, physische Körperunterstützungssysteme mit modernen Antrieben,” 2024.

[3] Robotics – Performance criteria and related test methods for service robots: Lower-back support robots, 18646-4, International Standard, Switzerland, Aug. 2021.

[4] D. Greve and C. Kreischer, „Methodology for Integrated Design Optimization of Actuation Systems for Exoskeletons,” *Robotics*, vol. 13, no. 11, p. 158, 2024, doi: 10.3390/robotics13110158.

## Superconducting Wind Energy Generator

**Sarah Hakim Semlali, M.Sc., M.Eng.**

Nowadays, the planet is facing climate change challenges which needs urgent sustainable energy solution by developing advanced technologies for renewable energy sources. Among these technologies, there exists wind turbines as one of the most promising renewable resources. It plays a crucial role in reducing greenhouse gas emissions and mitigating global warming issues. In order to develop this technology and making it more sustainable by maximizing its efficiency, the integration of a superconducting winding system is considered as an innovative approach in wind turbine generators. This is considered as the motivation behind SuperWinG project.

On one hand, the reason to develop the SuperWinG project is minimizing the limitations that conventional wind turbine generators face such as energy losses, material constraints and a heavy gearbox. On the other hand, superconducting windings offer a reframing solution by enabling higher current densities. Thus, the overall efficiency of the High-Temperature Superconducting (HTS) generator is well increased. Furthermore, it also makes it possible to build more compact and light systems, which are easier to install and maintain [1].

In terms of manufacturing, the efficiency of conventional wind turbine generators is noticeably limited by the windings and rotating structures which incorporate copper. In contrast, HTS windings utilize superconducting materials in the form tape. They are used to fabricate coils. As current flows through such coils in superconductive state, the magnetic fields generated allows the generator to convert a great amount of power [2].

In addition, Figure 1 illustrates an HTS generator designed for wind turbines as an example of a non-modular system. In the SuperWinG project, the emphasis is on creating separate, interchangeable modules that can be developed, modified, replaced, or upgraded independently without impacting the overall system.

Detailed design and simulation will be done in order to optimize winding configurations and integrate them into the current wind turbine generator models. This phase also covers the design of the necessary cooling systems for maintaining the superconducting state (at very low temperatures around 40 Kelvin) of the materials. Moreover, prototyping and experimen-

## Supraleitender Windenergiegenerator

**Sarah Hakim Semlali, M.Sc., M.Eng.**

Heutzutage ist der Planet mit den Herausforderungen des Klimawandels konfrontiert, die dringend nachhaltige Energielösungen durch die Entwicklung fortschrittlicher Technologien für erneuerbare Energiequellen erfordern. Unter diesen Technologien sind Windenergieanlagen eine der vielversprechendsten erneuerbaren Ressourcen. Sie spielen eine entscheidende Rolle bei der Reduzierung der Treibhausgasemissionen und der Milderung der Probleme der globalen Erwärmung. Um diese Technologie weiterzuentwickeln und sie durch Maximierung ihrer Effizienz nachhaltiger zu machen, wird die Integration supraleitender Wicklungssysteme in Windturbinengeneratoren als innovativer Ansatz angesehen. Dies gilt als Motivation hinter dem Projekt SuperWinG.

Der Grund für die Entwicklung des SuperWinG-Projekts besteht einerseits darin, die Einschränkungen herkömmlicher Windenergieanlagen zu minimieren, wie Energieverluste, Materialbeschränkungen und schwere Getriebe. Andererseits bieten supraleitende Wicklungen eine Neugestaltungslösung, da sie höhere Stromdichten ermöglichen. Dadurch wird die Gesamteffizienz und Produktivität eines Hochtemperatur-Supraleiter(HTS)-Generators deutlich gesteigert. Darüber hinaus ermöglicht diese auch den Bau kompakterer und leichter Systeme, die einfacher zu installieren und zu warten sind [1].

In Bezug auf die Herstellung wird die Effizienz im Vergleich zu herkömmlichen Windenergiegeneratoren deutlich eingeschränkt. Im Gegensatz dazu werden bei HTS-Spulen supraleitende Materialien in Form von Bandleitern verwendet, um Spulen herzustellen. Bei einer Bestromung im supraleitenden Zustand, ermöglichen die erzeugten Magnetfelder dem Generator einen Betrieb bei hoher Leistung [2].

Darüber hinaus zeigt Abbildung 1 einen HTS-Generator für Windenergieanlagen als Beispiel für ein nicht modulares System. Im SuperWinG-Projekt liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung separater, austauschbarer Module, die unabhängig voneinander entwickelt, geändert, ersetzt oder aufgerüstet werden können, ohne das Gesamtsystem zu beeinträchtigen.

Es werden detaillierte Entwürfe und Simulationen durchgeführt, um Wicklungskonfigurationen zu optimieren und sie in die aktuellen Windenergiegene-

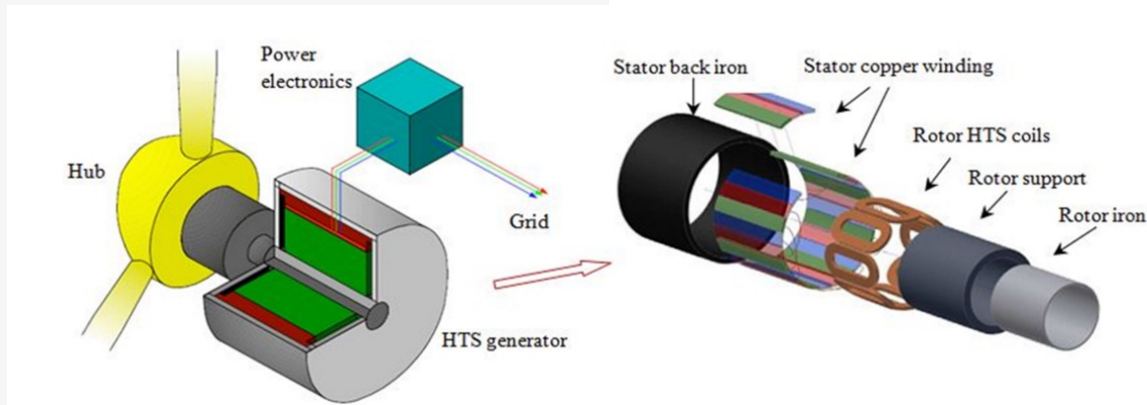


Abb. 1: Illustration eines Multi-Megawatt-HTS-Supraleitenden Windturbinen-Generators [1]

Fig. 1: Illustration of a Multi-Megawatt HTS Superconducting Wind Turbine Generator [1]

ratormodelle zu integrieren. Diese Phase umfasst auch den Entwurf der notwendigen Kühlsysteme zur Aufrechterhaltung des supraleitenden Zustands der Materialien. Darüber hinaus sind Prototypen und experimentelle Tests auch für die Validierung der theoretischen Modelle unerlässlich, um die praktische Umsetzbarkeit der Entwürfe zu bestätigen. Die spezifischen Ziele sind:

- Entwurf und Herstellung von Hochtemperatur-Supraleiterwicklungen (HTS).
- Optimierung des Generator designs hinsichtlich Effizienz und Zuverlässigkeit.
- Integration von Flusspumpen zur Aufrechterhaltung magnetischer Felder.
- Entwicklung von Kühlsystemen zur Aufrechterhaltung optimaler Temperaturen.
- Zusammenbau und Test des supraleitenden Windturbinengenerators.
- Bewertung der Umweltvorteile und der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit.
- Analyse potenzieller Kosteneinsparungen für eine groß angelegte Umsetzung.

Mit Verfolgung dieser Ziele, wird das Projekt SuperWinG zur Verbesserung der Windenergietechnologie beitragen und die internationalen Bemühungen zum Klimaschutz unterstützen.

Bis jetzt wurden in der Planungsphase des Projekts mehrere wichtige Aktivitäten durchgeführt. In einem ersten Schritt fand eine umfangreiche Literaturstudie statt. Hierbei wurde der Stand der operativen und zukünftigen supraleitenden Technologien für Windenergiegeneratoren bestimmt. In einem nächsten Schritt Anschließend werden Auslegungsmethoden entwickelt und ein optimiertes Generator design erstellt.

tal testing will also be essential for validation of the theoretical models, confirming the practical feasibility of the designs. The specific objectives will seek to:

- Design and build high-temperature superconducting (HTS) windings.
- Optimize generator design for efficiency and reliability.
- Integrate flux pumps to maintain magnetic fields.
- Develop cooling systems to maintain optimal temperatures.
- Assemble and test the superconducting wind turbine generator.
- Assess environmental benefits and economic feasibility.
- Analyze potential cost savings for large-scale implementation.

In attaining these objectives, SuperWinG project will contribute to the enhancement of wind energy technology and support international efforts in favor of climate protection.

As of now, several key activities have been carried out in the project's planning stage. First, a review of relevant literature is done to determine the state of the operative and prospective superconducting technologies for wind turbine generators. The next step will be to determine a technical methodology and computational analysis.

[1] W. Cao, "High-Temperature Superconducting Wind Turbine Generators." [Online]. Available: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)

[2] P. Yuning and G. Danzhen, "Superconducting Wind Turbine Generators," *TRANSACTIONS ON ENVIRONMENT AND ELECTRICAL ENGINEERING* ISSN 2450-5730, vol. Vol 1, No 3, 2016.

## Development status of the winding machine

**Patrick Ralf, M.Sc.**

The starting point for the development of the winding machine described here is the coil strands of the three-phase flexible linear actuator. These are self-supporting windings connected in series, which change the winding direction and thus the direction of the current or magnetic field in each successive coil.

The most important properties of this coil string are that the individual coils are self-supporting coils and consist of a continuous wire. These two properties are particularly important for the flexibility of the linear actuator made from them. In order to guarantee the bending properties of the actuator, the coils must be moulded into a flexible base body. As the coils are close together for technical reasons and the air gap between the coils and rotor must be minimized, self-supporting coils are best suited.

Due to the bending properties, the joints between the coils are subject to elastic and possibly plastic deformation. With the current state of production, the coils of the coil strands are joined together by means of soft soldering. However, this always harbours the risk of so-called cold solder joints, where the electrical connection can fail under cyclical loads. To prevent this, the entire coil strand is produced from a continuous wire using an innovative winding process.

As part of the project, a winding machine has been designed that can produce the coil strands fully automatically according to the above criteria. In addition to the technical aspects of this new production method, there is also a considerable cost and time advantage, as the soldering of the individual coils was previously carried out manually.

For the realization of this winding machine, the technical framework conditions were first determined and recorded in cooperation with the parties involved by means of a corresponding specification sheet.

The first step was to design a winding concept. The challenges included the fact that after the winding of a coil, which is produced conventionally, the wire ends at the outer edge, but the start of the following coil is on the inside. As the coils are self-supporting, this wire connection must be guided over or through the production flange in order to start winding the next coil. The coil strands are to be produced in a the-

## Entwicklungsstand der Wickelmaschine

**Patrick Ralf, M.Sc.**

Ausgangspunkt der Entwicklung der hier beschriebenen Wickelmaschine sind die Spulenstränge des dreiphasigen biegeflexiblen Linearaktuators. Dabei handelt es sich um in Reihe geschaltete freitragende Wicklungen, welche in jeder aufeinander folgenden Spule die Wickelrichtung und damit die Strom- bzw. magnetische Feldrichtung ändern.

Die wichtigsten Eigenschaften dieses Spulenstrangs bestehen darin, dass die einzelnen Spulen freitragende Spulen sind und aus einem zusammenhängenden Draht bestehen. Diese beiden Eigenschaften sind insbesondere für die Eigenschaft der Flexibilität des daraus gefertigten Linearaktuators von Bedeutung. Um die Biegeeigenschaften des Aktuators gewährleisten zu können, müssen die Spulen in einen flexiblen Grundkörper eingegossen werden. Da technisch bedingt die Spulen zum einen dicht beieinander liegen und zum anderen der Luftspalt zwischen Spulen und Rotor geringgehalten werden muss, eignen sich freitragende Spulen am besten.

Auf Grund der Biegeeigenschaften sind die Verbindungsstellen zwischen den Spulen elastischen und ggf. plastischen Verformungen ausgesetzt. Mit dem heutigen Stand der Fertigung wurden die Spulen der Spulenstränge mittels Weichlöten miteinander verbunden. Dies birgt jedoch bei zyklischen Beanspruchungen immer die Gefahr von sogenannten kalten Lötstellen, an denen die elektrische Verbindung versagen kann. Um dies zu verhindern, wird der gesamte Spulenstrang aus einem durchgängigen Draht mittels eines innovativen Wickelvorgangs hergestellt.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Wickelmaschine entworfen, welche die Spulenstränge nach den oberen Kriterien vollautomatisch herstellen kann. Neben den technischen Aspekten dieser neuartigen Fertigungsmethode entsteht auch ein erheblicher Kosten- und Zeitvorteil, da die Verlotung der einzelnen Spulen bis jetzt händisch durchgeführt wurde.

Für die Realisierung dieser Wickelmaschine wurde unter Zusammenarbeit der Beteiligten zunächst die technischen Rahmenbedingungen mittels eines entsprechenden Lastenheftes ermittelt und festgehalten.

Im ersten Schritt wurde ein Wicklungskonzept entworfen. Die Herausforderungen bestanden u.a. darin,

dass nach der Wicklung einer Spule, welche konventionell hergestellt wird, der Draht an der Außenkante endet, der Anfang der folgenden Spule sich jedoch an der Innenseite befindet. Da die Spulen freitragend sind, muss diese Drahtverbindung gezielt über bzw. durch den Fertigungsflansch geführt werden um mit der Wicklung der nächsten Spule zu beginnen. Die Spulenstränge sollen in einem theoretischen Endlosverfahren hergestellt werden. Das bedeutet, der Wicklungsprozess ist lediglich an den Bauraum der Maschine oder die Länge des zugeführten Drahts limitiert. Dies erfordert neben einem sich wiederholenden Wickelvorgang auch die Verfestigung des Spulenkörpers während des Prozesses.

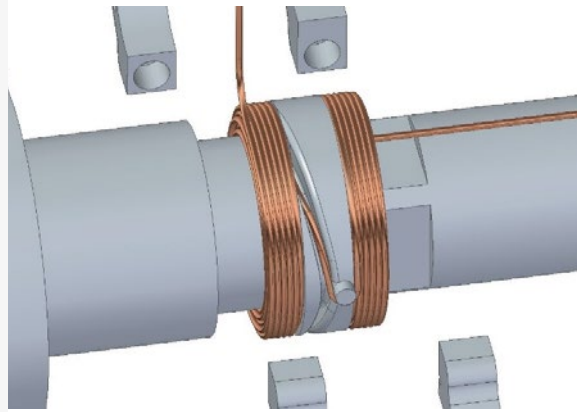


Abb. 1: Wickelkopf mit Draht

Fig. 1: Winding head with wire

Hierzu ist ein Wickelkopf nötig, bei dem es möglich ist, die Spulenflansche zu entfernen und die Wicklung einschließlich des bereits gefertigten Strangs immer weiter zu schieben. Der geometrische Wickelkopf für diese Anwendung ist in Abbildung 1 zu sehen.

Basierend auf diesem Wickelkonzept ergeben sich nun die Freiheitsgrade der Maschine, welche konstruktiv umgesetzt werden müssen. Dabei handelt es sich grundsätzlich um die Drehbewegung der Hauptwelle auf der die Spulen gewickelt werden sowie die axiale Bewegung der beiden Dreheinheiten um die Flansche und Stränge

zu verschieben. Drei weitere räumlich lineare Freiheitsgrade werden verwendet um den Draht mittels einer Drahtdüse präzise und nahe an den Wickelkopf zu bringen. Mittels diesen, durch einer Speicherprogrammierbaren Steuerung kontrollierten, Bewegungen ist es möglich die geforderten Spulenstränge zu wickeln (siehe Abbildung 2).

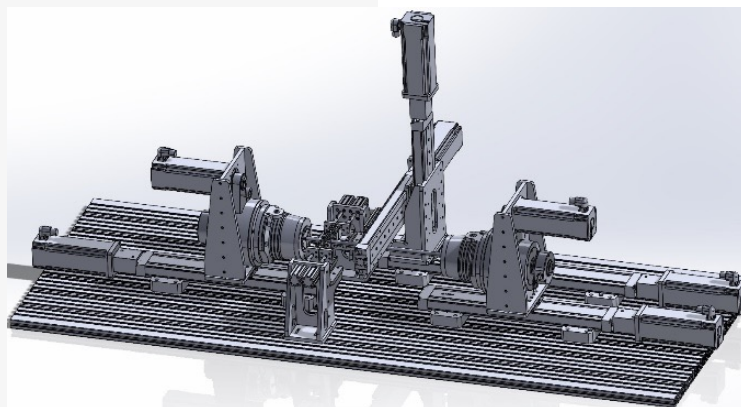


Abb. 2: CAD-Modell der Wickelmaschine

Fig. 2: CAD model of the winding machine

oretical endless process. This means that the winding process is only limited by the installation space of the machine or the length of the wire fed in. In addition to a repetitive winding process, this also requires the solidification of the coil body during the process.

This requires a winding head that allows the coil flanges to be removed and the winding, including the already finished strand, to be pushed further and further. The geometric winding head for this application is shown in Figure 1.

Based on this winding concept, the degrees of freedom of the machine now arise, which must be implemented in the design. These are basically the rotary movement of the main shaft on which the coils are wound and the

axial movement of the two rotary units to move the flanges and strands. Three further spatial linear degrees of freedom are used to bring the wire precisely and close to the winding head by means of a wire nozzle. Using these movements, which are controlled

by a programmable logic controller, it is possible to wind the required coil strands (see Figure 2).

To prevent the coils from falling apart again immediately after winding, a connection must be made between the individual windings. This is realized using a baked enamel wire and appropriate heat application. This procedure was

compared with other options and proved to be the most practicable solution in field tests. The heat is applied by electrical resistance heating. In contrast to all other comparative methods, this process is the most controllable and adjustable and has the decisive advantage that the heat is generated intrinsically, thus ensuring that the material contact is generated evenly throughout the coil.

However, this requires an electrical contact to be established before and after the coil. Here too, various options for removing baking varnish were investigated and tested in field trials. Laser vaporization proved to be the best solution, as the very fine wire (0.3 mm) is damaged the least (i.e. not at all).

The contact is then made from the outside using copper contacts. The coils wound in this way can then be moved onto a mandrel after each process to start the next winding process. This creates a coil strand for one phase of the linear actuator with continuous wire.

This innovative method of coil production not only enables endlessly wound coil strands, the process is also fully automated, so that greatly reduced production times can be realized at significantly lower costs.

Damit die Spulen nach dem Wickeln nicht sofort wieder auseinanderfallen, muss eine Verbindung zwischen den einzelnen Windungen hergestellt werden. Dies wird durch einen Backlackdraht und entsprechender Wärmeeinbringung realisiert. Dieses Vorgehen wurde mit anderen Möglichkeiten verglichen und hat sich im Feldversuch als praktikabelste Lösung ergeben. Die Wärmeeinbringung wird durch elektrisches Widerstandsheizen eingebracht. Dieser Prozess ist im Gegensatz allen anderen Vergleichsmethoden am besten steuer- bzw. regelbar und hat den entscheidenden Vorteil, dass die Wärme intrinsisch erzeugt wird und so sichergestellt wird, dass der Stoffschluss überall innerhalb der Spule gleichmäßig erzeugt wird.

Hierzu muss jedoch ein elektrischer Kontakt vor und nach der Spule hergestellt werden. Auch hier wurden verschiedene Möglichkeiten der Backlackentfernung untersucht und im Feldversuch erprobt. Als beste Lösung hat sich das Laserverdampfen ergeben, da der hier sehr feine Draht (0,3 mm) am wenigsten (nämlich gar nicht) beschädigt wird.

Der Kontakt wird dann anschließend mittels Kupferkontakten von außen hergestellt. Die so gewickelten Spulen können dann nach jedem Prozess auf einen Ablagedorn verfahren werden um einen nächsten Wickelprozess zu starten. So entsteht dann ein Spulenstrang für jeweils eine Phase des Linearaktuators mit durchgehendem Draht.

Diese neuartige Methode der Wicklungsfertigung ermöglicht nicht nur endlos gewickelte Spulenstränge, der Prozess ist zudem noch vollständig automatisiert, sodass stark verkürzte Fertigungszeiten bei deutlich niedrigeren Kosten realisierbar sind.

Based on project KIKU by

dtec.bw

Zentrum für Digitalisierungs- und  
Technologieforschung der Bundeswehr



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Entwicklung einer RL-Trainingsplattform für Roboter-gestützte Fertigungsprozesse im Rahmend des KIKU-Projekts

Malte Rippa, M. Sc. (FUSE-AI GmbH)

Das KIKU-Projekt befasst sich mit der Erstellung von KI-basierten, anziehbaren Körper-Unterstützungssystemen. Ein Teil des Projekts umfasst die Fertigung einzelner Komponenten des Exoskeletts, wie beispielsweise Linearmotoren, die zur Bewegung der Extremitäten verwendet werden. Während des Fertigungsprozesses treten verschiedene repetitive aber zugleich komplexe Aufgaben auf, die von dem der EMA zur Verfügung stehenden Roboterarm (Universal Robots UR10e) übernommen werden sollen. Der Roboter muss regelmäßig verschiedene Werkzeuge lokalisieren, greifen und korrekt verwenden, um einen automatisierten Fertigungsprozess zu ermöglichen. An dieser Stelle bietet sich Reinforcement Learning (RL) an, um dem Roboter eine Art Intelligenz anzutrainieren.

Wir haben eine modulare, flexible und intuitive RL-Trainingsplattform entwickelt, die Anwendern die Möglichkeit bietet, Roboter-Manipulatoren in verschiedenen Umgebungen zu trainieren.

Die Plattform basiert zum Großteil auf Python Frameworks. Für die Definition der Trainingsumgebung wird das Framework Gymnasium verwendet. Gymnasium bietet Kommunikationsschnittstellen mit der Physik-Simulations-Software MuJoCo (Multi-Joint dynamics with Contact). In der Gymnasium-Umgebung definiert der Nutzer den Beobachtungs- und Aktionsraum für das RL-Modell (den sog. Agenten), sowie die Belohnungsfunktion und stellt eine Umgebung in Form von XML-Dateien bereit, die alle relevanten Gegenstände der simulierten Welt enthält.

Packages wie MuJoCo Menagerie oder Implementierungen der Hersteller wie Universal Robots oder Robotiq enthalten realistische Visualisierungen von Roboter, End-Effektor, Kamera etc. und die korrekte Physik zur Bewegung und Kollision. Bei Bedarf lassen sich

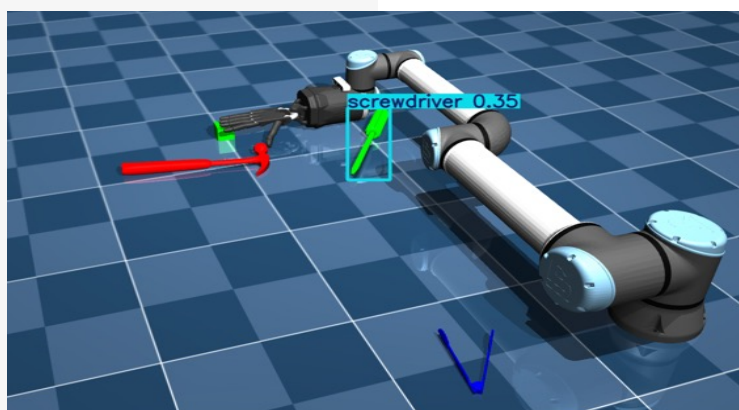


Abb. 1: Screenshot aus MuJoCo, inkl. Lokalisierung des Schraubenziehers

Fig. 1: Screenshot from MuJoCo, incl. the localization of the screwdriver

## Development of an RL training platform for robot-assisted manufacturing processes as part of the KIKU project

Malte Rippa, M. Sc. (FUSE-AI GmbH)

The KIKU project is concerned with the creation of AI-based, wearable body support systems. Part of the project involves the production of individual components of the exoskeleton, such as linear motors, which are used to move the extremities. During the manufacturing process, various repetitive but complex tasks are performed by the robotic arm (Universal Robots UR10e) available to the chair EMA. The robot must regularly locate, grasp and correctly use various tools to enable an automated manufacturing process. This is where reinforcement learning (RL) comes in to train the robot to be intelligent.

We have developed a modular, flexible and intuitive RL training platform that allows users to train robot manipulators in different environments.

The platform is largely based on Python frameworks. The Gymnasium framework is used to define the training environment. Gymnasium offers communication interfaces with the physics simulation software MuJoCo (Multi-Joint dynamics with Contact). In the Gymnasium environment, the user defines the observation and action space for the RL model (the so-called agent), as well as the reward function, and provides an environment in the form of XML files that contains all relevant objects of the simulated world. Packages such as MuJoCo Menagerie or implementations from manufacturers such as Universal Robots or Robotiq contain realistic visualizations of the robot, end effector, camera etc. and the correct physics for movement and collision.

If required, these open-source implementations can be adapted to map the required range of functions.

The agent learns how best to solve the defined task with the given means by trying out and evaluating rewards. The StableBaselines3 package provides a wide range of im-

plementations for state-of-the-art RL models. A RealSense d453i depth camera is used to detect objects in the robot's field of view (see Fig. 1). The images are processed both by the RL algorithm itself and by a YOLOv8 model trained on the Objects365 dataset.

Communication with the RL model and the robot in the real world takes place via a ROS node (Robot Operating System). This contains an instance of the trained RL model and forwards image and movement information from the corresponding ROS topics to the model and, in return, forwards the model output (target angle of the individual joints) to the corresponding ROS topic.

The robot is to be controlled via a chat interface that accepts voice input or text input (in natural language) and extracts a task from this.

Outlook: For further work on this project, the focus should be on adapting the reward function ("reward shaping"). Further algorithms should also be used, as only the Soft-Actor-Critic (SAC) algorithm was used to verify the functionality of the platform. It also makes sense to redesign the image recognition so that, for example, only the coordinates of an identified object are transmitted to the agent instead of the entire image.

diese Open-Source Implementierungen anpassen, um den geforderten Funktionsumfang abzubilden.

Der Agent lernt durch Ausprobieren und Auswerten von Belohnungen, wie die definierte Aufgabe mit den gegebenen Mitteln am besten zu lösen ist. Das Package StableBaselines3 stellt eine breite Auswahl an Implementierungen für State-of-the-Art RL-Modelle zur Verfügung.

Zur Erkennung von Objekten im Sichtfeld des Roboters (siehe Abb. 1) wird eine RealSense d453i Tiefenkamera verwendet. Die Bilder werden sowohl durch den RL-Algorithmus selbst als auch von einem YOLOv8 Modell, das auf dem Objects365 Datensatz trainiert wurde, verarbeitet.

Die Kommunikation mit dem RL-Modell und dem Roboter in der realen Welt erfolgt über einen ROS-Node (**R**obot **O**perating **S**ystem). Dieser enthält eine Instanz des trainierten RL-Modells und leitet Bild- und Bewegungsinformationen von den entsprechenden ROS-Topics weiter an das Modell und gibt im Gegenzug den Modell-Output (Zielwinkel der einzelnen Gelenke) an das entsprechende ROS-Topic weiter.

Die Steuerung des Roboters soll über ein Chat-Interface erfolgen, das über Spracheingabe oder Texteingabe (in natürlicher Sprache) akzeptiert und daraus eine Aufgabe destilliert.

Ausblick: Für die weitere Arbeit an diesem Projekt sollte der Fokus auf die Anpassung der Belohnungsfunktion liegen ("Reward Shaping"). Ebenfalls sollten weitere Algorithmen verwendet werden, da für die Verifikation der Funktionalität der Plattform nur der Soft-Actor-Critic (SAC) Algorithmus verwendet wurde. Außerdem ist es sinnvoll, die Bilderkennung umzugestalten, sodass bspw. nur die Koordinaten eines identifizierten Objekts an den Agenten übertragen werden anstatt des gesamten Bildes.

Based on project KIKU by

 dtec.bw

Zentrum für Digitalisierungs- und  
Technologieforschung der Bundeswehr



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

## Verbesserung der Energieeffizienz von asynchronen Maschinen durch kombinierte Wicklungen

**Makhsud Bobojanov, Dr.-Ing. und Nuralibek Rashidov, M.Sc. (Gastbeitrag)**

Eine der wichtigsten Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeigenschaften von Asynchronmotoren besteht darin, anstatt der Standardwicklung (SW) eine kombinierte Wicklung (KW) am Stator zu verwenden. In diesem Fall weist die Asynchronmaschine verbesserte Wicklungsparameter auf. Die Verwendung einer KW im Asynchronmotor anstatt einer SW kann zu geringeren elektrischen Verlusten in der Statorwicklung führen sowie zusätzliche Verluste in Folge höherer Harmonischer reduzieren (in MMK-Kurve). Die KW besteht aus Stern- und Dreieck-Teilwicklungen, die zu zwei Stromsystemen führen, welche eine Phasenverschiebung von 30° und unterschiedliche Stromamplituden, die sich zwischen den Teilwicklungen um den Faktor  $\sqrt{3}$  unterscheiden, aufweisen [1,2]. Die elektromagnetischen Eigenschaften solcher KW sind den Eigenschaften von Sechspanwicklungen sehr nahe, d.h. die Magnetomotorische Kraftkurve (MMK) weist vergleichsweise geringe Anteile an höheren Harmonischen auf. Mit der vorgestellten Methode lässt sich eine MMK-Kurve konstruieren, die einer Sinusform näher kommt als eine SW [8,9]. Eine der zwingenden Voraussetzungen dafür ist die Erzeugung eines praktisch identischen Flusses in jeder Nut, was durch eine Erhöhung der Windungszahl im „dreieckigen“ Teil um das  $\sqrt{3}$ -fache erreicht wird (Formel-1).

$$\frac{W_{\Delta}}{W_Y} = \sqrt{3} \quad (1) \quad \frac{A_Y}{A_{\Delta}} = \sqrt{3} \quad (2)$$

Auch der Querschnitt der Leiter (in mm<sup>2</sup>) der „Dreieck“- und „Stern“-Phasen der KW unterscheidet sich (Formel 2). Dieser Unterschied ((1) und (2)) in den Wicklungen erschwert die Analyse, da die Widerstände von „Dreieck“ und „Stern“ [3].

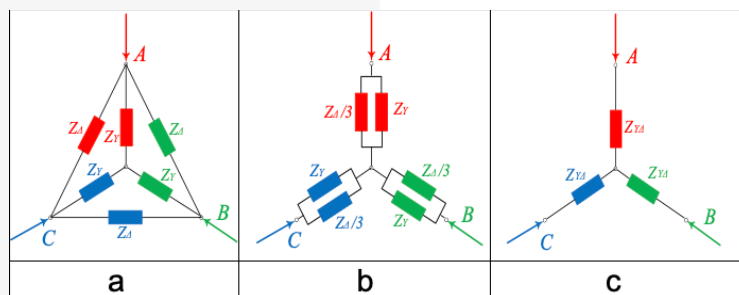


Abb. 1: Übergang von der kombinierten Wicklungsschaltung zur äquivalent: a) KW Schaltung; b) Zwischenschaltung; c) äquivalent Schaltung

Fig. 1: Transition from a combined winding circuit to an equivalent: a) CW circuit; b) intermediate circuit; c) equivalent circuit

## Improving the energy efficiency of induction machines through combined windings

**Makhsud Bobojanov, Dr.-Ing. and Nuralibek Rashidov, M.Sc. (Guest contribution)**

One of the main ways to improve the energy characteristics of induction motors is to use a combined winding (CW) on the stator, which has more improved winding parameters, instead of the standard winding (SW). The use of a (CW) in the induction motor instead of a standard winding (SW) can lead to lower electrical losses in the stator winding, as well as reduce additional losses, which are improved by higher harmonics (in MMK curve). A CW consists of star and delta sub-windings, leading to the current system, with a phase shift of 30° and current amplitudes differing by factor of  $\sqrt{3}$  between the subwindings [1,2]. The electromagnetic properties of such CW are quite close to the properties of six phase windings, that is, the distribution curve of the magnetomotive force (MMF) has relatively few higher harmonic components. Using the presented method, an MMF curve that is closer to a sinusoidal form than a SW can be constructed [8,9]. One of the mandatory conditions for this is the creation of a practically identical flux in each slot, which is achieved by increasing the number of turns in the “triangular” part by  $\sqrt{3}$  (Formula 1).

$$\frac{W_{\Delta}}{W_Y} = \sqrt{3} \quad (1) \quad \frac{A_Y}{A_{\Delta}} = \sqrt{3} \quad (2)$$

The cross-section of the conductors (in mm<sup>2</sup>) of the “triangle” and “star” phases of the CW also differs (Formula 2). This difference in windings ((1) and (2)) complicates the analysis, since the resistances of the “triangle” and the “star” are also different [3].

It is assumed that the resistances of the “star” phases ( $Z_{AY} = Z_{BY} = Z_{CY}$ ) are equal to each other, and that the resistances of the “triangular” phases

are also equal ( $Z_{A\Delta}=Z_{B\Delta}=Z_{C\Delta}$ ), creating an intermediate scheme of parallel branches (Fig.1, b). If expressions (1) and (2) are observed when calculating the CW, then the active resistance and reactance of the "triangle" will be three times greater than the active resistance and reactance of the "star".

At the next stage, the simplification of the circuit continues, the transition from the real resistance of the CW-circuit to the equivalent resistance (Fig.1, c):

$$Z_{Y\Delta} = \frac{Z_Y \cdot \frac{1}{3} \cdot Z_{\Delta}}{Z_Y + \frac{1}{3} \cdot Z_{\Delta}} = \frac{Z_Y}{2} \quad (3)$$

$$r_{Y\Delta} = \frac{r_Y}{2} = \frac{r_{\Delta}}{6} \quad (4)$$

Where  $Z_{Y\Delta}$  and  $r_{Y\Delta}$  are the impedance and active resistance of the CW, which are indicated in the equivalent circuit. According to the obtained equivalent circuit, it will be much more convenient to determine the change in electrical losses during the transition from the SW, to which the "star" is connected, to the CW, to which the "star" and "triangle" are connected in parallel. With the same current values in both windings, the following applies: The smaller the active resistances, the lower the electrical losses. The currents between the parts of the CW, taking into account the above expression (3) and (4), are distributed as follows:

$$I_Y = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} = \frac{I_{Y\Delta}}{2} \quad (5)$$

Where  $I_Y$  and  $I_{\Delta}$  are the effective values of the currents in the "triangular" and "star" parts, and  $I_{Y\Delta}$  is the external current of an electric motor with a CW.

It should be noted that in a 6-zone system, the harmonics have an order defined by the formula  $v = 6n \pm 1$ , where  $\{n\}$  is a positive integer. If it is necessary to create 12-zone electric motors (with CW), 11./, 13./, 23./, 25... harmonics appear (if one assumes an whole hole winding with a useful number divisible by 12 and optimal winding number of turns). By constructing a MMF curve, it is possible to study various electromagnetic properties of multiphase windings of electric machines (Fig.2).

Using the integral MMF curve, can determine the MMF for any point on the circle and find its maximum value, and using known graphical methods, expand them into a harmonic series and determine the amplitudes of the MMF harmonics.

Aus diesem Grund wird zur Vereinfachung der Analyse die KW durch eine Ersatzschaltung ersetzt. Es wird angenommen, dass die Widerstände der „Stern“ – Phasen ( $Z_{AY}=Z_{BY}=Z_{CY}$ ) gleich sind und die Widerstände der „Dreieck“ – Phasen ebenfalls gleich sind ( $Z_{A\Delta}=Z_{B\Delta}=Z_{C\Delta}$ ), wodurch eine Zwischenschaltung paralleler Zweige erzeugt wird (Abb.1, b). Wenn bei der Berechnung der KW die Ausdrücke (1) und (2) beachtet werden, sind der aktive Widerstand und die Reaktanz des „Dreiecks“ dreimal größer als der aktive Widerstand und die Reaktanz des „Sterns“.

Im nächsten Schritt wird die Schaltung noch vereinfacht. Hier erfolgt der Übergang vom realen Widerstand der KW-Schaltung zu einem äquivalenten Widerstand (Abb.1, c):

$$Z_{Y\Delta} = \frac{Z_Y \cdot \frac{1}{3} \cdot Z_{\Delta}}{Z_Y + \frac{1}{3} \cdot Z_{\Delta}} = \frac{Z_Y}{2} \quad (3)$$

$$r_{Y\Delta} = \frac{r_Y}{2} = \frac{r_{\Delta}}{6} \quad (4)$$

Hierbei sind  $Z_{Y\Delta}$  und  $r_{Y\Delta}$  die Impedanz und der aktive Widerstand der KW. Diese sind im Ersatzschaltbild angegeben. Gemäß dem erhaltenen Ersatzschaltbild ist es einfacher, die Änderung der elektrischen Verluste während des Übergangs von der SW, welche im „Stern“ verbunden ist, zu der KW zu bestimmen, bei welcher „Stern“ und „Dreieck“ parallel geschaltet sind. Bei den gleichen Stromwerten gilt in beiden Wicklungen die folgende Regel: Je kleiner die aktiven Widerstände sind, desto geringer sind die elektrischen Verluste. Die Ströme zwischen den Teilen der KW werden unter Berücksichtigung der obigen Ausdrücke (3) und (4) wie folgt verteilt:

$$I_Y = \sqrt{3} \cdot I_{\Delta} = \frac{I_{Y\Delta}}{2} \quad (5)$$

Wobei  $I_Y$  und  $I_{\Delta}$  die Effektivwerte der Ströme in den Teilen „Dreieck“ und „Stern“ sind und  $I_{Y\Delta}$  die externen Ströme eines Elektromotors mit KW darstellt.

Es sollte beachtet werden, dass in einem 6-Zonen-System die Ordnung der Harmonischen durch die Formel  $v = 6g \pm 1$  bestimmt wird, wobei  $\{g\}$  eine positive ganze Zahl ist. Wenn es notwendig ist, 12-Zonen-Motoren (mit KW) zu erstellen, werden Harmonische der Ordnung 11./13./23./, 25... erzeugt (eine Ganzlochwicklung mit einer durch 12 teilbaren Nutzahl und optimaler Windungszahlanpassung voraussetzt).

Durch die Erstellung einer MMK-Kurve ist es möglich, unterschiedliche elektro-magnetische Eigenschaften

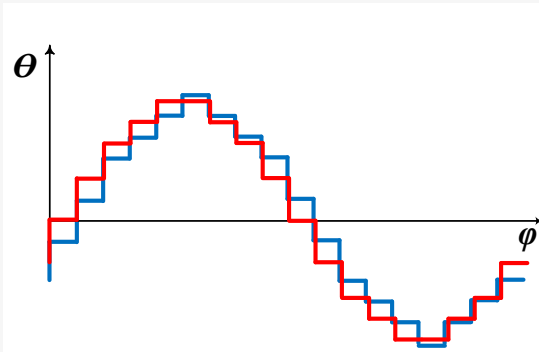


Abb. 2: Durchflutungsverteilung (MMK-Kurve): N=36, p=2;  
- SW, - KW

Fig.2.: MMF distribution curves (MMF curve): N=36, p=2;  
- SW, - CW

von Mehrphasenwicklungen elektrischer Maschinen zu untersuchen (Abb. 2).

Mit Hilfe der integralen MMK-Kurve kann die MMK für jeden Punkt auf dem Kreis bestimmt und ihr Maximalwert ermittelt werden. Mit Hilfe bekannter grafischer Methoden kann sie zu einer harmonischen Reihe erweitert und die Amplituden der MMK-Oberschwingungen bestimmt werden.

Die berechneten Ergebnisse zeigen eine Verbesserung der Amplituden höherer harmonischer Komponenten der MMK einer Maschine mit KW im Vergleich (Abb. 3) zur SW. Aus der obigen Analyse kann geschlossen werden, dass der Ersatz einer SW durch eine KW in Asynchronmaschinen zu einer Steigerung der Energieeffizienz von Motoren ohne Konstruktionsänderungen ermöglicht und hierdurch erhebliche Investitionen vermieden werden.

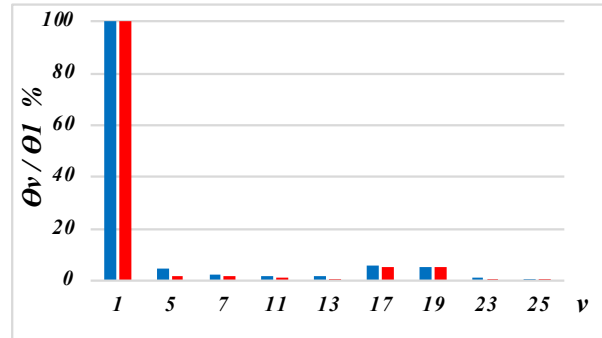


Abb. 3.: Das Spektrum der höheren Harmonischen; - SW, - KW

Fig.3.: The spectrum of higher harmonics; - SW, - CW

The calculated results show an improvement in the amplitudes of higher harmonic components in the MMF of the combined windings compared to the standard winding (Figure 3). From the above analysis, it can be concluded that the use of combined windings instead of standard stator windings in induction machines makes it possible to increase the energy efficiency of motors without making changes to the design, and therefore without significant capital investments.

[1] O. Misir, S. M. Raziee, N. Hammouche, C. Klaus, R. Kluge, B. Ponick: "Calculation method of three-phase induction machines equipped with combined star-delta windings", 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp.1-2.  
[2] T. Knapp, W. Hofmann: "Combined star-delta windings in small induction machines for reducing no-load and additional losses", International Electric Machines and Drives Conference 2023, pp. 1-2.

[3] M. Bobojanov, F. Tuychiyev, N. Rashidov: "Dynamic model of an asynchronous motor with a three-phase combined winding", EPNC-2024, pp.1-2.

## A Study of Electric Machine Topology for Maximizing the Specific Power of a 120 kW Electric Aircraft Powertrain Motor

Hao Zhou, M.Sc (Guest contributor)

This paper is a brief introduction of a PhD thesis [1]. A Cessna 172 aircraft is used as the platform for the electrification study, in which an all-electric system and a hydrogen-powered fuel cell system are investigated. A method is established to assess the flight range of the retrofitted aircraft. Then, a comparative study between the direct drive and geared drive is conducted, and it is shown that the former has a higher specific power and higher efficiency for the propeller drive of 120 kW power and 2300 rpm speed.

The focus is the topology optimization of the direct drive motor for achieving highest specific power. This thesis provides an in-depth understanding of the impact of these different topological structures on the machine performance. The initial design is a radial flux permanent magnet (RFPM) machine with an inner rotor, surface-mounted permanent magnets (PMs), a winding of single-layer 12-tooth-14-pole (12T14P) layout, and flux barriers in alternate stator teeth. The study of RFPM machine topology includes the following four points: i) higher number of poles, ii) outer rotor, iii) Halbach-array PMs, and iv) double-layer 12-tooth-10-pole (12T10P) layout.

The research scope of axial flux permanent magnet (AFPM) machines is divided into two categories: i) single-sided and ii) yokeless and segmented armature (YASA) structures. In single-sided machines, a comparison is conducted between double-layer 12T10P and single-layer 12T14P layouts, the latter is in combination with flux barriers. It is concluded that the 12T14P version of machine cannot meet the specifications, providing 92% of the required torque. Furthermore, two multi-level excitation systems are studied as shown in Fig. 1, i.e., double segment structure and double layer winding of unequal length. It is shown that more efficient iron utilization is possible by using a combination of high and low

## Topologiestudie einer elektrischen Maschine zur Maximierung der spezifischen Leistung eines 120 kW elektrischen Flugzeugantriebsmotors

Hao Zhou, M.Sc (Gastbeitrag)

Dieser Beitrag ist eine kurze Einführung in die Doktorarbeit [1]. Ein Cessna 172 Flugzeug dient als Plattform für die Elektrifizierungsstudie, bei der ein rein elektrisches System und ein wasserstoff-betriebenes Brennstoffzellensystem untersucht werden. Eine Methode zur Bewertung der Reichweite des umgerüsteten Flugzeugs wird in der Arbeit entwickelt. Eine Vergleichsstudie zwischen Direktantrieb und Getriebeantrieb zeigt, dass der Direktantrieb eine höhere spezifische Leistung und einen höheren Wirkungsgrad für den Propellerantrieb mit 120 kW Leistung und 2300 U/min aufweist.

Der Schwerpunkt liegt auf der Optimierung der Topologie des Direktantriebsmotors, um die höchste spezifische Leistung zu erreichen. Zudem werden auch die Auswirkungen dieser unterschiedlichen topologischen Strukturen auf die Maschinenleistung eingehend untersucht. Der ursprüngliche Entwurf ist eine Radialfluss-Permanentmagnet-Maschine (RFPM) mit einem Innenrotor, oberflächen-montierten Permanentmagneten (PMs), einer Wicklung mit einlagigem 12-Zahn-14-Pol-Layout (12T14P) und Flussbarrieren in alternierenden Statorzähnen. Die Untersuchung der RFPM-Maschinen-Topologie umfasst die folgenden vier Punkte: i) höhere Polzahl, ii) Außenrotor, iii) Halbach-Array-PMs, und iv) doppelagiges 12-Zahn-10-Pol-Layout (12T10P).

Die Forschung zu Axialfluss-Permanentmagnet-Maschinen (AFPM) wird in zwei Kategorien unterteilt: einseitige- und YASA-Bauarten (Yokeless And Segmented Armature). Für einseitige Maschinen werden zwei-lagige 12T10P- und einlagige 12T14P-Anordnungen verglichen, letztere mit Flussbarrieren. Die 12T14P-Version der Maschine erfüllt die Spezifikationen nicht, da Sie 92% des erforderlichen Drehmoments liefert. Des Weiteren werden, wie in Abb. 1 dargestellt, zwei

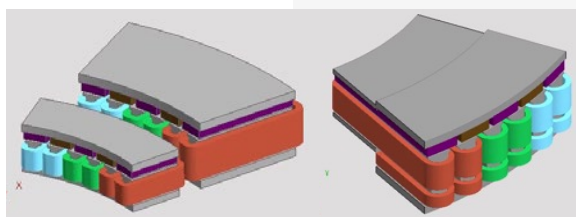


Abb. 1: Links: Doppelsegmentstruktur; Rechts: Zweilagige Wicklung.

Fig. 1: Left: Double segment structure; Right: Double layer winding.

Erregersysteme untersucht, nämlich eine Doppel-segmentstruktur und eine zweilagige Wicklung. Es zeigt sich, dass eine effiziente Eisenausnutzung mit einer Kombination aus hohen und niedrigen Erregungsstufen möglich ist. Der Entwurf der YASA-Maschine verwendet eine segmentorientierte Entwurfsmethode, die den Entwurf der AFPM-Maschine in die Manipulation einzelner Segmente umwandelt und wesentlich weniger Rechenaufwand erfordert als herkömmliche Optimierungsmethoden. Die optimierte YASA-Maschinen mit kontinuierlich erhöhter spezifischer Leistung werden auf deterministische Weise erzeugt. Danach führt die Integration von Halbach-Array-PMs in die YASA-Maschine zu einer weiteren Steigerung der spezifischen Leistung.

Die endgültigen RFPM und AFPM Maschinen haben eine spezifische Leistung von 8,9 kW/kg bzw. 10,3 kW/kg, was eine erhebliche Steigerung gegenüber den 6,3 kW/kg der ursprünglichen Auslegung darstellt. Abb. 2 zeigt die Geometriemodelle der beiden Maschinen. Dank der kürzeren Endwindungen hat die AFPM-Maschine eine kürzere axiale Länge von 25% und einen höheren Wirkungsgrad von 0,4% als die RFPM-Maschine. In Bezug auf die thermischen Anforderungen besteht ein wesentlicher Unterschied darin, dass die RFPM-Maschine Kühlkanäle an beiden Endwindungen und der Innenfläche des Stators benötigt, während die AFPM-Maschine Kühlkanäle an den äußeren Endwindungen hat.

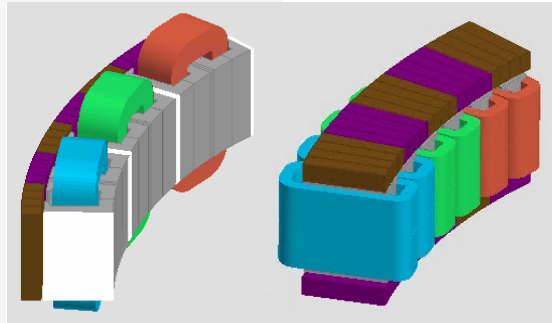


Abb. 2: Links: Endgültige RFPM-Maschine; Rechts: Endgültige AFPM-Maschine.

Fig. 2: Left: Final RFPM machine; Right: Final AFPM machine.

excitation levels. The design of the YASA machine adopts a segment-oriented design method, which converts the design of AFPM machine into the manipulation of individual segments and requires much less computation effort than conventional optimization methods. The optimized YASA machines with continuously increased specific power are generated in a deterministic way. Next, integrating Halbach-array PMs

into the YASA machine leads to a further increase in the specific power.

The final RFPM and AFPM machines have a specific power of 8.9 kW/kg and 10.3 kW/kg, respectively, which achieve a significant increase compared with the 6.3 kW/kg specific power of the initial design. Fig. 2 shows the geometry models of the two machines. Thanks to the shorter end windings, the AFPM machine has a shorter axial length of 25% and a higher efficiency of 0.4% than the RFPM machine. In terms of thermal requirements, a significant difference is that the RFPM machine requires cooling channels at both end windings and the inner surface of the stator, while the AFPM machine has cooling channels at the outer end windings.



