

**Schlussbericht des Teilvorhabens der TU Dortmund
zum Projekt**

**„ARESS – Der asynchrone, rotierende Energiesystem-Sta-
bilisator – eine echte „voll-integrierte Netzwerkkompo-
nente“ zur Netzstützung“
(Akronym: ARESS)**

**Teilvorhaben
„Lebensdaueruntersuchungen des Isoliersystems des DFIG Rotors“**

Bewilligungszeitraum: 01.01.2022 - 31.05.2024

**Beteiligte Projekt-
partner:**

Technische Universität
Dortmund

Förderkennzeichen:

03EI6061C

Autor:

Frank Jenau

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Planung und Umsetzung des Arbeitspakets.....	3
1.1	Aufgabenstellung.....	3
1.2	Planungen und Ablauf	4
1.3	Stand der Wissenschaft und Technik.....	6
1.3	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2	Eingehende Darstellung für Arbeitspaket 11	8
2.1	Erzielte Ergebnisse.....	14
2.2	Wesentliche Anschaffungen	14
2.3	Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse und bekanntgewordene Fortschritte anderer Stellen	14
2.4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	15
	Tabellenverzeichnis	18
	Abbildungsverzeichnis	19
	Literaturverzeichnis.....	20

1 Planung und Umsetzung des Arbeitspakets

Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Verbundprojekts vom 30.09.2023 seitens des Projektpartners Siemens Energy Global GmbH & Co. KG hat sich die TU Dortmund ebenfalls für einen vorzeitigen Projektausstieg zum 31.05.2024 entschlossen.

1.1 Aufgabenstellung

Durch die experimentelle Alterung des Isoliersystems der ausgeführten Läuferwicklung bei multifaktorieller Belastung ist es möglich, die thermischen, mechanischen und elektrischen Einflüsse auf den Zustand der Isolierung mit geeigneten Diagnoseverfahren zu ermitteln, bis es letztendlich zum Versagen der Isolierung durch einen elektrischen Durchschlag kommt. Als wissenschaftliches Arbeitsziel ist daher die Entwicklung eines Lebensdauermodells für simulative Zwecke zu nennen, welches die physikalischen Zusammenhänge im Verbundisoliersystem der Läuferwicklung beschreibt und in Abhängigkeit der Belastungsfaktoren sowie unter Berücksichtigung der Ausfallzeiten die elektrische Lebensdauer abschätzt. Zusätzlich zur mechanischen Schwingbelastung soll das Lebensdauermodell in der Lage sein, die Auswirkungen der Rotationsbelastungen im Läufer sowie die zusätzliche elektrische und thermische Belastung auf das Isoliersystem im Rotor abzubilden, um auf Grundlage der experimentell ermittelten Ausfallzeiten eine geeignete Lebensdauerabschätzung bei entsprechender multifaktorieller Belastung zu liefern. Durch die Ermittlung der Lebensdauer soll die Betriebssicherheit der Läuferwicklung im asynchronen Phasenschieber erhöht werden.

Die abgeschlossenen Untersuchungen und Ergebnisse innerhalb des Teilvorhabens an der TU Dortmund werden alle im **Arbeitspaket 11 (AP 11)** mit dem Titel „Lebensdaueruntersuchungen des Isoliersystems des DFIG Rotors“ präsentiert.

1.2 Planungen und Ablauf

Das Ziel des Teilvorhabens an der TU Dortmund ist es, im Arbeitspaket 11 ein Lebensdauermodell für das Isoliersystem des Rotors unter zyklischer multifaktorieller Belastung zu ermitteln. Als technologische Herausforderungen sind hier die Erarbeitung der Systemlimits sowie die Modellierung der physikalischen Zusammenhänge des Isoliersystems an Läuferwicklungsstäben zu nennen. Aus diesem Grund wird das Arbeitspaket 11 in folgende Arbeitsschritte unterteilt:

AS 11.1: Ausarbeitung experimenteller Versuchsreihen für Prüfkörper der Läuferwicklung

Im Fokus des ersten Arbeitsschrittes steht die Ausarbeitung und Überprüfung der Realisierbarkeit möglicher Versuchsreihen mit entsprechender Auslegung der Parameter im Hinblick auf mechanische, thermische und elektrische Belastungsmechanismen des Isoliersystems der Läuferwicklung. Die Auslegung basiert hierbei auf bereits durchgeführte experimentelle und simulative Vorarbeiten im Gebiet der Alterung von Generatorstäben sowie auf den theoretischen Grundlagen zu Alterungsmechanismen, mechanischer Rissbildung und Delamination.

AS 11.2: Errichtung, Anbindung und Inbetriebnahme der Schwingprüfanlage

In diesem Arbeitsschritt soll die benötigte Prüftechnik beschafft werden, um die Versuchsreihen mit den ermittelten Parametern aus AS 11.1 durchführen zu können. Hierzu gehört eine Vorrichtung, welche es ermöglicht, das Isoliersystem der spannungsführenden Prüfkörper mittels mechanischer Schwingungen und Auslenkungen unter definierter Temperatur zu belasten. Hinzu kommen während dieses Arbeitsschrittes weitere bauliche Anpassungen an der Anlage – Sicherheitssysteme, Brandschutzmaßnahmen, Elektrifizierung, mechanische Stabilität sowie die Einbringung in die bereits vorhandene Prüfinfrastruktur.

AS 11.3: Thermomechanische Alterung und Diagnose des Isoliersystems für Läuferwicklungen

Die Nutmodelle werden, entsprechend der Parameter aus AS 11.1, mit der Prüftechnik aus AS 11.2 subzyklisch multifaktoriell belastet. Des Weiteren kann der aktuelle Zustand der Prüfkörper durch elektrische und mechanische Untersuchungen diagnostiziert werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der subzyklischen Versuchsrei-

hen werden Systemlimits und Grenzen der Belastbarkeit des Isoliersystems ausgearbeitet, basierend auf den ermittelten Lebensdauern der Prüfkörper (bis zum elektrischen Durchschlag). Zudem findet ein beständiger Wissensaustausch mit dem Projektpartner SE statt, um die gewonnenen Erkenntnisse im Design der Rotorentwicklung in AP 9.2 / 9.3 zu verwerfen und das finale Design des Rotors in AP 10.1 (siehe Schlussbericht des Projektpartners SE) zu entwickeln.

AS 11.4: Entwicklung eines physikalischen Lebensdauermodells für multifaktorielle Belastung

In diesem Arbeitsschritt wird ein Lebensdauermodell für die multifaktorielle Belastung des Isoliersystems entwickelt, welches das Systemverhalten der Läuferwicklungen beschreibt. Durch Interpolation von Messergebnissen soll es in der Lage sein, eine Abschätzung der Lebensdauer zu ermöglichen. Es soll zudem überprüft werden, inwiefern die ermittelten Ergebnisse der skalierten Prüfmodelle auf die Modellbildung übertragen werden können.

AS 11.5: Untersuchung des Isoliersystems unter Rotationsbelastungen

In diesem Arbeitsschritt wird die Lebensdauer der Prüfkörper unter Betriebsbedingungen, also Rotationen mit Nenndrehzahl, untersucht. Die erforderlichen Parameter für die Untersuchungen in AS 11.5 werden im AS 11.1 ermittelt. Die Durchführung der Arbeiten sind am DFIG („Doubly Fed Induction Generator“) der Pilotanlage beim Projektpartner SE geplant.

AS 11.6: Ausarbeitung von Ansätzen zur Verbesserung der Lebensdauer des Isoliersystems

Innerhalb dieses Arbeitsschrittes werden mögliche Ansätze entwickelt, um die Lebensdauer des Isoliersystems zu verbessern. Hierbei werden Materialparameter untersucht und optimiert, welche zur erhöhten Flexibilisierung oder Verfestigung des Isoliersystems führen. Die veränderten Materialparameter werden anschließend in das Lebensdauermodell überführt, um dessen Einfluss zu überprüfen.

1.3 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Lehrstuhl für Hochspannungstechnik (HST) an der TU Dortmund forscht seit über 20 Jahren im Bereich der Bewertung neuartiger Isolationssysteme mittels innovativer Prüf- und Messtechnik und besitzt fundierte Kenntnisse über das Verhalten von Isolationsstoffen unter multifaktorieller Belastung. Ein Forschungskernthema ist auf Grund der Relevanz in der Isoliertechnik der Entwurf von Alterungs- und Diagnoseverfahren für Verbundisoliersysteme, wie beispielsweise die Hochspannungsisolierung für Generatorständerwicklungen.

Im Rahmen des Förderprojekts ARESS befasst sich der HST mit der experimentellen Alterung und Diagnose des Isoliersystems von skalierten Prüfkörpern der Läuferwicklung sowie der Modellierung von Lebensdauerabschätzungen unter multifaktoriellen Belastungen, wie sie auch im Betrieb auftreten, und möglichen Verbesserungsansätzen, um die Belastbarkeit des Isoliersystems zu erhöhen. Der Lehrstuhl für Hochspannungstechnik kann hierbei auf diversen Vorarbeiten aufbauen, welche im Bereich der Alterung, Diagnose und Monitoring von Generatorstäben und der Modellierung des Systemverhaltens von Verbundisolationssystemen an der TU Dortmund durchgeführt wurden. In experimentellen Vorarbeiten wurde insbesondere der Einfluss der schwingenden mechanischen Belastung ermittelt sowie die Detektion der Fehlstellen im Isoliersystem untersucht. Die Erkenntnisse wurden als wissenschaftliche Publikationen auf internationalen Konferenzen und in wissenschaftlichen Fachzeitschriften platziert.

- A. Cimino, F. Jenau and C. Staubach, „Causes of cyclic mechanical aging and its detection in stator winding insulation systems” in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 35, no.3, pp. 32-40, May-June 2019.
- A. Cimino, F. Jenau, A. Mashkin, D. Behnisch, R. Merte, H. Steins and F. Pohlmann, „Unidirectional accelerated lifetime investigations of mechanically dominated aged electrical insulation system used in generator winding bars”, 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, Canada, 2019.
- J. Hanusrichter, A. Ciminio and F. Jenau, „New Approach for Diagnostics of Electrical Insulation Systems using Experimental Modal Analysis”, 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019.
- A. Cimino, C. Staubach and F. Jenau, “Analysis of Accelerated Multi-Factor Aging Tests on the Winding Insulation Systems of Generator Stator Bars Used in Large Rotating Machines”, 2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA 2018.

- A. Cimino, F. Jenau, C. Staubach, A. Mashkin and F. Pohlmann, „Analysis of fault detection in the electrical insulation system of rotating machines“, 2018 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), Pilsen, Czech Republic, 2018.

Die modellbasierte, statistische Auswertung der Lebensdaueruntersuchungen von gealterten Generatorstäben sowie die simulative Darstellung des Isoliersystems wurde in weiteren Vorarbeiten untersucht.

- A. Cimino, J. Horst and F. Jenau, “Statistic Based Method for Post-Processing Analysis in Lifetime Investigations of Multi-Factor Aged Winding Insulation”, 21th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH), Budapest, Hungary, 2019.
- A. Cimino, J. Horst and F. Jenau, “Statistical Assessment of Lifetime Data of Multi-Factor Aged Generator Bars”, 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Bucharest, Romania, 2019.
- C. Fölting, F. Jenau, “Modellbasierte Betrachtung des mechanisch initiierten elektrischen Bäumchenwachstums auf Basis zeitraffender Lebensdaueruntersuchungen an originalen Generatorwicklungsstäben bei simultaner elektrischer, thermischer und mechanischer Belastung“, ETG-Fachtagung „Diagnostik elektrischer Betriebsmittel“, Berlin, Deutschland, 2014
- C. Fölting, F. Jenau, T. Weissgerber, „Modellbildung und Simulation von innovativen, hochbelasteten Isoliersystemen großer Turbogeneratoren bei Mischbeanspruchung“, Statusseminar EnergieForschungNRW, Düsseldorf, Deutschland, 2014

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen der Arbeitsschritte 11.3 war eine Zusammenarbeit sowie beständiger Wissensaustausch mit dem Verbundprojektspartner Siemens Energy vorgesehen, da die Prüfkörper der Läuferwicklung von Siemens Energy bereitgestellt und an der TU Dortmund getestet werden sollten. Für den Arbeitsschritt 11.5 gilt dies ebenfalls, da experimentelle Untersuchungen an der Pilotanlage von Siemens Energy vorgesehen waren. Auf Grund des vorzeitigen Projektabbruchs konnten jedoch beide Arbeitsschritte nicht bearbeitet werden, wodurch es im Rahmen des Projekts zu keiner Zusammenarbeit mit anderen Stellen kam.

2 Eingehende Darstellung für Arbeitspaket 11

Im nachfolgenden Kapitel werden die erzielten Ergebnisse, die Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse und bekanntgewordene Fortschritte anderer Stellen sowie die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten dargestellt.

2.1 Erzielte Ergebnisse

AS 11.1: Ausarbeitung experimenteller Versuchsreihen für Prüfkörper der Läuferwicklung

Experimentelle Untersuchungen der elektrischen Isolationssysteme von Generatorwicklungsstäben werden bereits seit mehr als 30 Jahren im Bereich der Forschung durchgeführt. Hierbei werden Stäbe multifaktoriell unter elektrischer, thermischer und mechanischer Belastung beschleunigt gealtert, wobei sich herausstellte, dass insbesondere die mechanische Alterung zur Bildung kleinster Hohlräume sowie Delamination der einzelnen Isolierschichten führt, die letztlich in leitfähige Kanäle durch das Isoliersystem resultieren [1] [2]. Die mechanische Alterung tritt zum einen durch die hohe Zentrifugalkraft im Rotor auf, insbesondere aber durch die magnetische Kraft des Netzstromes, welche mit der doppelten Netzfrequenz schwingt und das Isolationssystem zum Vibrieren anregt, sowie durch Transiente bei Ein- und Ausschaltvorgängen [3].

In weiteren Arbeiten wird zusätzlich der thermomechanische Einfluss auf die Isolation untersucht [4] [5] [6] und es wurden Modellansätze für den Alterungsprozess formuliert [7] [8]. Obwohl ein signifikanter Einfluss der mechanischen Alterung im gesamten Alterungsprozess festgestellt werden konnte, ist derzeit im Gegensatz elektrischen und thermischen Modellierung kein allgemein anerkanntes Modell für den mechanischen Alterungsprozess verfügbar.

In [9] wird ein Zusammenhang formuliert, welcher die mechanische Lebensdauer von Isolationsmaterialien abbildet gemäß

$$t_m = t_0 \cdot \sigma^{-m} \text{ für } \sigma > \sigma_s.$$

Die mechanische Lebensdauer t_m wird berechnet durch die Auflast σ sowie der Lebensdauer ohne mechanische Alterung t_0 und dem Parameter m , welche vom Isolationsmaterial, Umgebungsbedingungen und Art der Last abhängig sind. Die Gleichung gilt jedoch nicht für Lasten unter dem Schwellwert σ_s , da dort keine mechanische Abtragung stattfindet. Darauf aufbauend wird in [10] zusätzlich die thermomechanische Alterung des Systems berücksichtigt, welche durch die verschiedenen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Kupfer, Hauptisolierung und Statorblechpaket auftritt.

Eine Vorrichtung zur experimentellen Untersuchung der thermomechanischen Alterung in Isoliersystemen wird in [11] präsentiert, wobei Generatorstabmodelle verwendet werden, welche in einer Prüfanlage sowohl elektrisch, mechanisch als auch thermisch belastet werden können. Erste Ergebnisse werden in [12] und [13] präsentiert, wobei der Einfluss der Biegeamplitude und der mechanischen Dehnung in Zusammenhang mit der Lebensdauer des Isoliersystems gebracht werden.

Auf den beschriebenen theoretischen Erkenntnissen und den experimentellen Untersuchungen aufbauend werden experimentelle Versuchsreihen für die Prüfkörper der Läuferwicklung entworfen, welche die Lebensdauer der Isoliersysteme in Abhängigkeit der mechanischen Belastung bei gleichbleibender thermischer und elektrischer Belastung als Modell beschreiben können soll. Aus diesem Grund werden die entsprechenden Ergebnisse aus den experimentellen Voruntersuchungen als Orientierungspunkt genommen, um weiterführende Lebensdauerversuche in Abhängigkeit der mechanischen Parameter zu verwirklichen. Um die Lebensdauer weiterführend von der mechanischen Auslenkung beschreiben sowie eine gewisse statistische Bandbreite abdecken zu können, werden die Versuchsreihen in Abhängigkeit der mechanischen Biegebelastung mit den Parametern aus Tabelle 2.1-1 gemäß den Ergebnissen aus [12] und [13] ausgelegt.

Tabelle 2.1-1: Auslegung der experimentellen Versuchsreihe für AS 11.3

Prüfkörper	Parameter für Versuchsreihe
#1	40 N/mm ²
#2	50 N/mm ²
#3	62 N/mm ²
#4	74 N/mm ²
#5	85 N/mm ²

Mit dieser Versuchsreihe soll überprüft werden, ob die neuartigen Prüfkörper der Läuferwicklung ein ähnliches Lebensdauerverhalten in Abhängigkeit der mechanischen Belastung wie die ursprünglichen Generatorstabmodelle aus den Voruntersuchungen aufweisen. Aus diesem Grund

ist eine eventuelle Anpassung der Versuchsreihe notwendig, damit eine notwendige beschleunigte Alterung der Stäbe garantiert werden kann und diese innerhalb der Projektlaufzeit ihr Lebensdauerende erreichen.

Da die Generatorstabmodelle der Läuferwicklung schmalseitig belastet werden, sind diese zusätzlich in einem Blechpaket eingespannt. Auf Grund der deutlich erhöhten Masse zu den ursprünglichen Generatorstabmodellen ist daher eine leistungsfähige Schwingprüfanlage notwendig, welche die mechanische Biegebelastung für die Versuchsreihen zur Verfügung stellen kann.

AS 11.2: Errichtung, Anbindung und Inbetriebnahme der Schwingprüfanlage

Nachdem in AS 11.1 die Parameter für die Versuchsreihe spezifiziert wurden, erfolgt in diesem Arbeitsschritt die Auslegung, Errichtung und Inbetriebnahme einer Schwingprüfanlage, welche die notwendigen Anforderungen für die erfolgreiche Umsetzung der Versuchsreihe gewährleistet. Für die generelle Auslegung und Funktionsweise der Schwingprüfanlage wird sich dabei an den Aufbau aus [11] orientiert.

Um eine multifaktorielle Belastung des Prüfkörpers entsprechend der realen Belastung im Generatorbetrieb gewährleisten zu können, ist es notwendig, den Generatorstab elektrisch, thermisch sowie mechanisch belasten zu können. Gemäß den gängigen Temperaturklassen des Isoliersystems ist es notwendig, dass der Prüfkörper mit einer definierten Temperatur von bis zu 250°C belastet werden kann. Aus diesem Grund wird der gesamte Prüfkörper innerhalb der Schwingprüfanlage in einem Ofen untergebracht. Für die elektrische Belastung wird ein einphasiger Wechselstromtransformator mit einer Maximalspannung von 30 kV verwendet, um somit eine bis zu zweifach erhöhte Nennspannung des Generatorbetriebs zu erzeugen. Für die Nachbildung der mechanischen Vibrationen im Generator ist ein leistungsfähiger elektrodynamischer Schwingerreger, auch Shaker genannt, notwendig, welcher die Generatorstäbe mit definiertem Vibrationsweg und –frequenz mit einer Sinusnennkraft von 20 kN mechanisch auslenken kann.

Um die einzelnen Komponenten zu einem vollständigen Prüfstand miteinander zu kombinieren, wird in Abbildung 2.1-1 die Konzeptionierung der gesamten Anlage schematisch dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Realisierung des Prüfstandes in einem High Cube Container mit Seitentüren stattfindet, damit die Prüfkörper mittels eines Hubwagens bzw. eines Gabelstaplers in das Stahlgestell innerhalb des Ofens transportiert werden können.

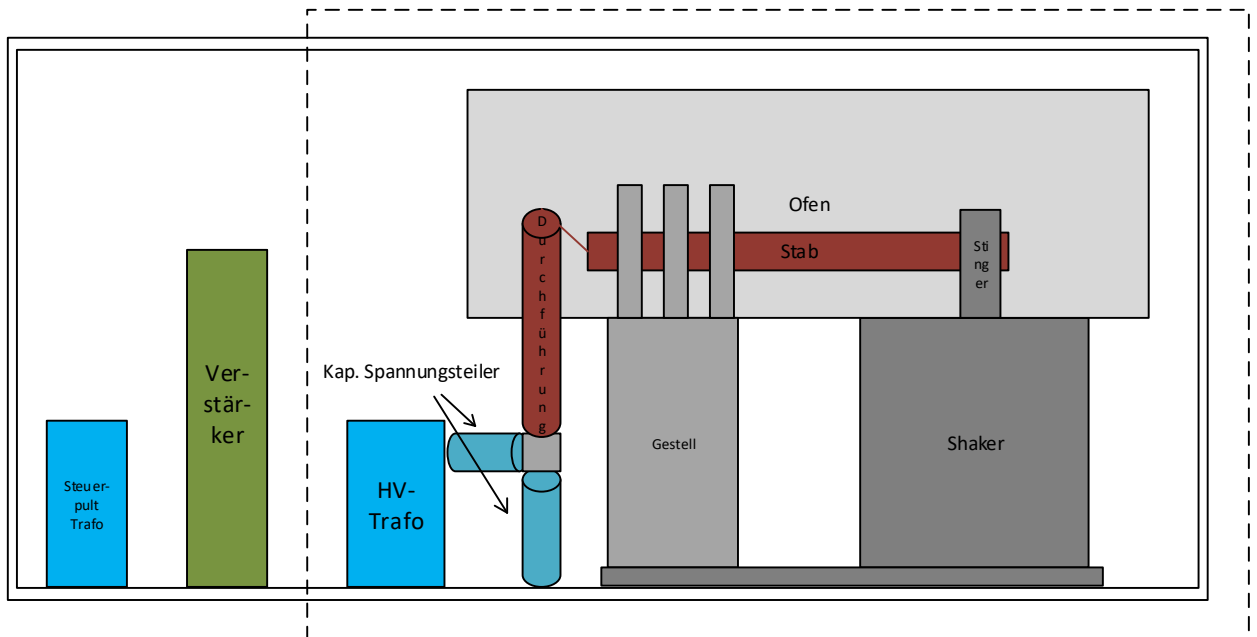


Abbildung 2.1-1: Schematische Darstellung der vollständigen Schwingprüfanlage

Der Ofen befindet sich über dem Stahlgestell sowie dem Shaker und beinhaltet den Generatorstab, welcher als Prüfkörper fungiert. Der Stab ist hierbei fest in einem Gestell aus sechs Stahlsäulen fixiert, was der Befestigung des Generatorstabs in einer Nut entsprechen soll. Für die mechanische Auslenkung wird der Stab über dem Shaker in einem Stinger befestigt, welcher die mechanische Vibration des Shakers auf den Stab überträgt. Die maximale Biegebelastung tritt somit bei der Einspannstelle der Säulen auf, welche am nächsten zum Stinger liegt. An dieser Stelle wird auch der elektrische Durchschlag, also das Versagen des Isoliersystems, erwartet. Um den Stab elektrisch belasten zu können, ist es notwendig, dass die Hochspannung in den Ofen geführt wird. Dies geschieht mit Hilfe einer speziell isolierten Hochspannungsdurchführung, welche in den Ofen hineinragt und dort elektrisch mit dem Prüfling verbunden wird. Zusätzlich wird noch ein kapazitiver Spannungsteiler zwischen Transformator und Prüfling geschaltet, damit die angelegte Hochspannung am Stab jederzeit überprüft werden kann. Des Weiteren befinden sich noch der Verstärker des elektrodynamischen Schwingerreggers sowie eine Klimaanlage im Container, damit ein Betrieb der Anlagen bei geeigneter Temperatur ermöglicht wird. Der Schaltschrank des Transformators sowie das Steuerpult werden in einem separaten Container untergebracht. Der in Abbildung 2.1-1 markierte Bereich innerhalb der gestrichelten Linie kennzeichnet die Komponenten, welche möglicherweise unter Hochspannung stehen und somit in einem abgeschlossenen Bereich untergebracht werden müssen, welcher elektrisch abgeschirmt ist.

Für die Durchführung eines Prüfzyklus wird der Generatorstab in das Stahlgestell transportiert und anschließend mittels Verbindungsplatten aus Stahl dreifach jeweils zwischen zwei Säulen

eingespannt. Anschließend wird der Stab am anderen Ende in den Stinger eingeführt und mittels drei Schrauben fixiert, wie in Abbildung 2.1-2 zu sehen.

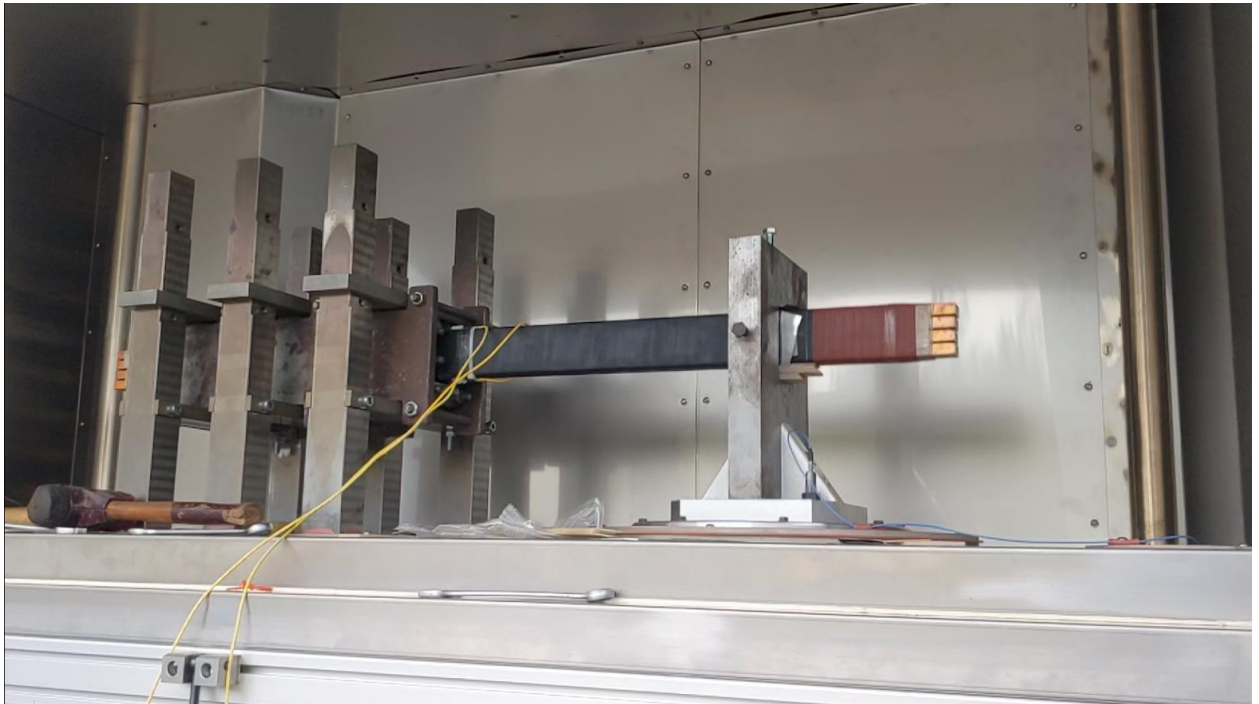


Abbildung 2.1-2: Eingespannter Prüfkörper der Läuferwicklung

Mittels eines Drahtes kann der Prüfkörper per Durchführung mit dem Hochspannungstransformator verbunden werden, sodass der Stab während des Prüfzyklus nun thermisch durch den Ofen belastet wird, mechanisch durch die Vibration des Shakers und elektrisch durch die Anbindung an die Hochspannung. Sobald es zum Versagen des Isoliersystems und damit zum Lebensdauerende des Stabes kommt, wird der Impulsstrom in Folge des elektrischen Durchschlages über das Stahlgestell abgeleitet, da dieses direkt mit der Erde verbunden ist. Der Durchschlag wird durch das Herunterfahren der Spannung in einem umfangreichem Datenmess- und Regelsystem registriert, wodurch sich die Lebensdauer des Stabes vom Anlegen der Spannung bis zum Einbrechen der Spannung bestimmen lässt.

Durch die aufgetretenen Lieferengpässe während der COVID-19-Pandemie kam es innerhalb dieses Arbeitsschrittes zu zeitlichen Verzögerungen gegenüber dem geplanten Projektzeitrahmen, weshalb die Maschine erst vollständig bis zum 31.05.2024 geliefert und erfolgreich in Betrieb genommen werden konnte. Der Abschluss der Inbetriebnahme markiert zudem auch das Ausstiegsdatum der TU Dortmund aus dem Verbundprojekt.

AS 11.3: Thermomechanische Alterung und Diagnose des Isoliersystems für Läuferwicklungen

Auf Grund des vorzeitigen Abbruchs im Verbundprojekt konnte der Arbeitsschritt 11.3 nicht bearbeitet werden.

AS 11.4: Entwicklung eines physikalischen Lebensdauermodells für multifaktorielle Belastung

Für die Entwicklung eines physikalischen Lebensdauermodells in Abhängigkeit der mechanischen Belastung ist es notwendig, einen Zusammenhang zwischen der Lebensdauer der Prüfkörper sowie einer mechanischen Kenngröße herzustellen. Aus Voruntersuchungen wie beispielsweise [12] und [13] wird deutlich, dass die mechanische Biegebelastung am Biegepunkt mit Hilfe von geeigneter Messtechnik erfassen lässt und somit in direktem Zusammenhang mit der Lebensdauer des Isoliersystems gebracht werden kann. Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen von Generatorstabmodellen mit Hohlprofil sind in Abbildung 2.1-3 dargestellt.

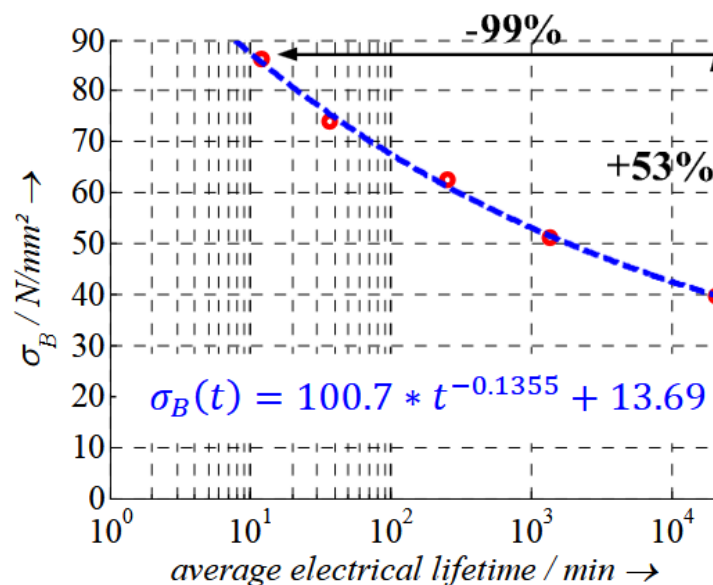


Abbildung 2.1-2: Durchschnittliche elektrische Lebensdauer in Abhängigkeit der Biegespannung [12]

Für die Bestimmung der Biegebelastung kann am Biegepunkt ein Dehnungsmessstreifen befestigt werden, welcher die mechanische Dehnung bei definierter Vibration ermittelt. Über diesen Wert lässt sich anschließend die Biegebelastung bestimmen, da ein linearer Zusammenhang zwischen Dehnung und Biegebelastung im Bereich von 10 bis 75 N/mm² mit 155 μ Strain pro Millimeter ermittelt wurde [12].

Durch die Experimente aus Arbeitsschritt 11.3 sollte das Lebensdauermodell für die Prüfkörper der Läuferwicklung verifiziert werden, da das Verbundprojekt jedoch vorzeitig abgebrochen wurde konnten keine experimentellen Untersuchungen innerhalb des Projektrahmens absolviert werden, womit auch der Arbeitsschritt 11.4 nicht vollständig abgeschlossen werden konnte.

AS 11.5: Untersuchung des Isoliersystems unter Rotationsbelastungen

Auf Grund des vorzeitigen Abbruchs im Verbundprojekt konnte der Arbeitsschritt 11.5 nicht bearbeitet werden.

AS 11.6: Ausarbeitung von Ansätzen zur Verbesserung der Lebensdauer des Isoliersystems

Auf Grund des vorzeitigen Abbruchs im Verbundprojekt konnte der Arbeitsschritt 11.6 nicht bearbeitet werden.

2.2 Wesentliche Anschaffungen

Die zur Durchführung der in Arbeitspaket 11 ausgewiesenen Untersuchungen getätigten Anschaffungen oberhalb von 410 € finden sich in Tabelle 2.2-1.

Tabelle 2.2-1: Wesentliche Anschaffungen im Themengebiet oberhalb von 410 Euro der TUDO

Kostenposition	Gegenstand	Begründung
TUDO-AP11-A-1	Schwingprüfanlage	Prüftechnik zur multifaktoriellen Belastung von Generatorstabmodellen <u>Nutzung für Arbeitsschritt 11.3</u>

2.3 Verwertbarkeit der erzielten Ergebnisse und bekanntgewordene Fortschritte anderer Stellen

Für die an der TU Dortmund im Arbeitspaket 11 erworbene Schwingprüfanlage besteht Bedarf zur weiteren Nutzung über das Projekt hinaus, um weitere Schritte für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses an der Universität (Promotionsmöglichkeiten) im Bereich der Untersuchung von Isoliersystemen zu ermöglichen, da der simultane Einfluss mechanischer, thermischer und elektrischer Belastung von Generatorstäben in dieser Kombination ein Alleinstellungsmerkmal für Forschungszwecke in nationalen Umfeld darstellt. Mit Hilfe der Schwingprüfanlage

ist es möglich, weitere innovative Verfahren und Modelle für jegliche Isoliersysteme unter multi-faktorieller Belastung über das Projekt hinaus und in angrenzenden Applikationen zu entwickeln, um die Zusammenhänge der einzelnen Belastungsfaktoren zu ermitteln und Verbesserungspotentiale der Isoliersysteme im Hinblick auf die Lebensdauer aufzuzeigen. Zudem können mit Hilfe der Schwingprüfanlage weitere wissenschaftliche Erkenntnisse gewonnen und als freizugängliches Gut auf wissenschaftlichen Konferenzen und Tagungen publiziert werden, wie ursprünglich mit den Arbeitsschritten 11.3 und 11.4 vorgesehen. Diese Forschungen werden aktuell maßgeblich im hoheitlichen Bereich gesehen. Zusätzlich ist geplant, die Anlage im Bereich der Lehre für die Qualitätsverbesserung der Lehrveranstaltungen zu verwenden, beispielsweise im Rahmen der Veranstaltung „Innovative Isoliersysteme“ am Lehrstuhl für Hochspannungstechnik der TU Dortmund.

2.4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten wird mit Bezug auf die im Projektantrag formulierten Arbeitspakete in tabellarischer Form in Tabelle 2.4-1 formuliert.

Tabelle 2.4-1: AP 11 – Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

AS 11.1	Ausarbeitung experimenteller Versuchsreihen für Prüfkörper der Läuferwicklung
TUDO	Beschreibung: Für die Auslegung der experimentellen Versuchsreihe werden zunächst aktuelle Forschungsergebnisse analysiert, die Generatorstabmodelle mit einer ähnlichen Prüftechnik untersuchten. Darauf basierend wird ein mechanischer Parameter definiert, welcher im Zusammenhang mit der Lebensdauer des Isoliersystems steht und in der Versuchsreihe variiert werden soll, um vergleichbare Ergebnisse für die neuartigen Prüfkörper der Läuferwicklung zu generieren.
TUDO	Fazit: Die experimentelle Versuchsreihe für die Prüfkörper der Läuferwicklung konnte erfolgreich mit Hilfe von Ergebnissen aus Voruntersuchungen ausgearbeitet werden. Das Arbeitspaket wurde somit erfolgreich abgeschlossen.
AS 11.2	Errichtung, Anbindung und Inbetriebnahme der Schwingprüfanlage
TUDO	Beschreibung:

	Zur Durchführung der experimentellen Versuchsreihe aus AS 11.1 wird in diesem Arbeitsschritt die notwendige Schwingprüfanlage konzeptioniert, beschafft und letztendlich in Betrieb genommen. Die Realisierung der Anlage erfolgt in einem Seecontainer, welcher alle notwendigen Bauteile für eine multifaktorielle Belastung von Generatorstabmodellen beinhaltet.
TUDO	Fazit: Die Schwingprüfanlage wurde vollständig konzeptioniert und anschließend beschafft. Daraufhin wurde die Anlage mit einem Prüfkörper der Läuferwicklung in Betrieb genommen, womit das Arbeitspaket ebenfalls erfolgreich abgeschlossen wurde.
AS 11.3	Thermomechanische Alterung und Diagnose des Isoliersystems für Läuferwicklungen
TUDO	-
TUDO	Fazit: -
AS 11.4	Entwicklung eines physikalischen Lebensdauermodells für multifaktorielle Belastung
TUDO	Beschreibung: Um ein physikalisches Lebensdauermodell zu entwickeln, werden zunächst die Zusammenhänge zwischen mechanischer Belastung und Lebensdauer der Isoliersysteme aus Literaturquellen untersucht und analysiert. Darauf aufbauend sollten die Ergebnisse aus AS 11.3 mit den Ergebnissen der Literatur verglichen werden.
TUDO	Fazit: Ein Lebensdauermodell für die mechanische Belastung wurde in der Literatur erfolgreich identifiziert. Das geplante Lebensdauermodell für die experimentellen Untersuchungen konnte nicht erstellt werden auf Grund der vorzeitigen Beendigung des Verbundprojekts und dem damit verbundenen Arbeitsschritt 11.3, welcher nicht bearbeitet werden konnte.
AS 11.5	Untersuchung des Isoliersystems unter Rotationsbelastungen
TUDO	-
TUDO	Fazit: -

AS 11.6	Ausarbeitung von Ansätzen zur Verbesserung der Lebensdauer des Isolier-systems
TUDO	-
TUDO	Fazit: -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1-1: Auslegung der experimentellen Versuchsreihe für AS 11.3.....	9
Tabelle 2.2-1: Wesentliche Anschaffungen im Themengebiet oberhalb von 410 Euro der TUDO	14
Tabelle 2.4-1: AP 11 – Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.	16

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1-1: Schematische Darstellung der vollständigen Schwingprüfanlage	11
Abbildung 2.1-2: Eingespannter Prüfkörper der Läuferwicklung	12
Abbildung 2.1-3: Durchschnittliche elektrische Lebensdauer in Abhängigkeit der Biegespannung [12]	13

Literaturverzeichnis

- [1] T. S. Ramu, "Degradation of HV generator insulation under mechanical, electrical and thermal stresses," IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, Ontario, Canada, 1990, pp. 21-24.
- [2] K. Kimura and Y. Kaneda, "The role of microscopic defects in multistress aging of micaceous insulation," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., vol. 2, no. 3, pp. 426–432, June. 1995.
- [3] G. C. Stone, et al, Electrical Insulation for Rotating machines, IEEE Press, Wiley, Second Edition, 2014.
- [4] T. Weiers, Eine Methode zur aussagekräftigen Bewertung von Maschinenisolationen (engl. "Method for the significant evaluation of machine insulation," PhD dissertation, ETH Zürich, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-005520973>, Switzerland, 2007.
- [5] T. Brügger, Einfluss starker Lastwechseldynamik auf das Alterungsverhalten der Isolierung großer Hydrogeneratoren (engl. "Influence of high dynamic load cycling on the ageing behaviour of the insulation in large hydrogen generators"), PhD dissertation, ETH Zürich, <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006680028>, Switzerland, 2011.
- [6] R. Vogelsang, Time to breakdown of high voltage winding insulations with respect to microscopic properties and manufacturing qualities, PhD dissertation, ETH Zürich, Switzerland, 2004.
- [7] G. C. Stone, "The statistics of aging models and practical reality," IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 28, no. 5, pp. 716–728, Oct. 1993.
- [8] G. C. Montanari and L. Simoni, "Aging phenomenology and modeling," IEEE Trans. Electr. Insul., vol. 28, no. 5, pp. 755–776, Oct. 1993.
- [9] V. I. J. Kokko, "Ageing due to thermal cycling by power regulation cycles in lifetime estimation of hydroelectric generator stator windings," 2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille, 2012, pp. 1559-1564.

- [10] A. Cimino, F. Jenau and C. Staubach, "Causes of cyclic mechanical aging and its detection in stator winding insulation systems," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 35, no. 3, pp. 32-40, May-June 2019
- [11] C. Fölting and F. Jenau, "Design and Construction of a Test Setup for Multi-Factor Aging of Real Generator Stator Bars", ETG – Diagnostik elektrischer Betriebsmittel, Germany, Berlin (2012)
- [12] A. Cimino, C. Staubach and F. Jenau, "Ageing behaviour of the insulation system used in rotating machines," *2017 INSUCON - 13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON)*, Birmingham, UK, 2017
- [13] A. Cimino, C. Staubach and F. Jenau, "Analysis of Accelerated Multi-Factor Aging Tests on the Winding Insulation System of Generator Stator Bars Used in Large Rotating Machines," *2018 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, San Antonio, TX, USA, 2018