

Amir Berbic

**Teilentladungsmessung als
Prüfverfahren in
End of Line-Prüfungen
elektrischer Traktionsmotoren**

kassel
university



press

Amir Berbic

Teilentladungsmessung als Prüfverfahren in
End of Line-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Elektrotechnik / Informatik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Marcus Ziegler

Tag der mündlichen Prüfung

11. November 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Zugl.: Kassel, Univ., Diss. 2014
ISBN 978-3-86219-930-3 (print)
ISBN 978-3-86219-931-0 (e-book)
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0002-39312>

© 2015, kassel university press GmbH, Kassel
www.upress.uni-kassel.de/

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Bediensteter am Fachgebiet für Anlagen und Hochspannungstechnik des Fachbereiches Elektrotechnik/Informatik an der Universität Kassel.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Fachgebietes, Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, für viele wertvolle Ratschläge und Diskussionen sowie für sein stets förderndes Interesse, womit er wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Ziegler danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferates.

Weiterhin danke ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Günther Köhler, Herrn Dipl.-Ing. Angelo Austermühl, Herrn M.Sc. Henrik Brockhaus und Herrn Oliver Schröder für die wertvollen Diskussionen, deren stets fruchtbaren Hinweise und Anregungen sowie für die Unterstützung bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen. Allen ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern des Fachgebietes Anlagen und Hochspannungstechnik, ganz besonders Frau Ursula Henrich, Frau Dipl.-Ing. Xiaoyan Tang und Dr.-Ing. Oliver Belz danke ich für die angenehme Zusammenarbeit und Ihre Hilfsbereitschaft. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen studentischen Hilfskräften und Diplomanden für deren Unterstützung bedanken.

Kassel, im Februar 2015

Amir Berbic

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit.....	3
1.2 Fragestellung und Struktur der Arbeit	4
2. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK.....	6
2.1 Komponenten eines Antriebsstranges von Elektrofahrzeugen	6
2.1.1 Elektromotoren für Elektrofahrzeuge	7
2.1.2 Aufbau von Statorwicklungen und Isoliersystemen von Niederspannungsmaschinen	9
2.1.3 Stromrichter.....	11
2.2 Definition transientser Spannungen und deren Entstehung	13
2.2.1 Spannungsüberhöhungen bei umrichtergespeisten Antrieben.....	15
2.2.2 Spannungsaufteilung in der Statorwicklung.....	20
2.3 Teilentladungen (TE)	22
2.3.1 Ursachen für Teilentladungen.....	22
2.3.2 Teilentladungsmessung	23
2.4 Lebensdauer des Isolationssystems von Niederspannungs-Drehstrommotoren.....	29
2.4.1 Thermische Alterung von Isoliersystemen	30
2.4.2 Elektrische Alterung von Isoliersystemen.....	31
2.5 End of Line-Prüfungen	36
3. VERSUCHSMETHODIK.....	40
3.1 Aufbau von Prüfkörpern	40
3.1.1 Aufbau von Draht-Twisten	40
3.1.2 Aufbau der Motoretten.....	43
3.1.3 Qualifizierung der Prüfkörper	48

3.2	Erzeugung von Spannungsimpulsen.....	54
3.3	Teilentladungsmessung bei sinusförmiger Prüfspannung.....	57
3.4	Teilentladungsmessung bei impulsförmiger Prüfspannung.....	58
4.	UNTERSUCHUNG DES TEILENTLADUNGSVERHALTENS DER WINDUNGSISOLIERUNG	65
4.1	Messung der TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei sinusförmiger Prüfspannung.....	65
4.1.1	<i>TE- Einsetz- und Aussetzspannung bei sinusförmiger Prüfspannung</i>	<i>66</i>
4.1.2	<i>Einfluss von Lackschichtdicke und Kupferdurchmesser</i>	<i>70</i>
4.1.3	<i>Einfluss von Temperatur, Feuchte und Druck</i>	<i>71</i>
4.1.4	<i>Einfluss der Frequenz</i>	<i>75</i>
4.2	Theoretische Betrachtungen zum Teilentladungsverhalten der Windungsisolierung.....	78
4.2.1	<i>Berechnung der elektrischen Feldstärke im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung</i>	<i>78</i>
4.2.2	<i>Berechnung der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit von der Lackdicke</i>	<i>84</i>
4.2.3	<i>Berechnung der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit des Leiterdurchmessers.....</i>	<i>87</i>
4.2.4	<i>Simulation der elektrischen Feldstärke im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung</i>	<i>90</i>
4.2.5	<i>Simulation der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit von der Lackzunahme</i>	<i>93</i>
4.3	Messung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung an Draht-Twisten bei impulsförmiger Prüfspannung	95
4.3.1	<i>TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung</i>	<i>95</i>
4.3.2	<i>Einfluss von Drahteigenschaften.....</i>	<i>98</i>
4.3.3	<i>Einfluss von Temperatur, Druck und Feuchte</i>	<i>100</i>
4.3.4	<i>Einfluss von Anstiegszeit, Dauer und Frequenz der Spannungsimpulse.....</i>	<i>102</i>
4.3.5	<i>Einfluss von Aufladungsprozessen.....</i>	<i>107</i>
4.4	Alterung der Windungsisolierung aufgrund von Teilentladungen.....	112
4.5	Vergleich und Analyse der Ergebnisse zum Teilentladungsverhalten der Windungsisolierung bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung	123

5. UNTERSUCHUNG DES TEILENTLADUNGSVERHALTENS VON ELEKTRISCHEN TRAKTIONSMOTOREN AN MOTORETTEN.....	126
5.1 Teilentladungsverhalten bei sinusförmiger Prüfspannung.....	127
5.2 Teilentladungsverhalten bei impulsförmiger Prüfspannung	133
5.3 Vergleich und Analyse des TE-Verhaltens bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung	141
6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	146
LITERATURVERZEICHNIS.....	151

Formelzeichen

A	Fläche, Lageparameter des thermischen Lebensdauerexponentes, Gaskonstante
a	Abstand
B	thermischer Lebensdauerexponent, Gaskonstante
b	Brechungsfaktor
C	Kapazität, Wicklungskapazität
C_e	Erdkapazität
C_h	Hohlraumkapazität
C_s	Serienkapazität
C'	Kapazitätsbelag
C_0	Hauptkapazität
d	Abstand
D	Verschiebungsdichte
E	elektrische Feldstärke
f	Frequenz
I_i	Strom
l_{krit}	kritische Leitungslänge
p	Geometriefaktor
Q	Ladung
Q_s	scheinbare Ladung
R	Widerstand, Radius
r	Reflexionsfaktor
t	Zeit
t_a	Ausfallzeit
t_r	Anstiegszeit

U,u	Spannung
U _{TEE}	TE-Einsatzspannung
U _{TEA}	TE-Aussetzspannung
U _d	Durchschlagsspannung
Δu	Spannungseinbruch
v	Phasengeschwindigkeit
Z_L	Leitungswiderstand
δ	Verlustwinkel
γ	Rückwirkungskoeffizient
ϵ	Dielektrizitätszahl
ϵ_r	rel. Permittivität
φ	Phasenwinkel

Abkürzungen

AC	Wechselspannung
AKV	Ankopplungsvierpol
DC	Gleichspannung
EoL	End of Line
ESB	Ersatzschaltbild
HFCT	High frequency current transformer
PET	Polyethylenterephthalat
pps	pulse per second
TE	Teilentladungen
WBK	Wärmebeständigkeitsklasse

1. Einleitung

Die Reduzierung der CO₂-Emissionen und der damit verbundenen Umweltprobleme erfordert Anstrengungen in allen Bereichen seitens der heutigen Industrie- und Schwellenländer. So ist in Deutschland bereits die Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energieträger voll im Gange. Auch der Personen- und Güterverkehr soll dazu beitragen, die CO₂-Emissionen zu reduzieren. Daher liegt die Zukunft der Mobilität in Deutschland, in Europa und der ganzen Welt in umweltfreundlichen Antriebskonzepten. Hierzu zählen verschiedene Varianten, die von unterschiedlichen Herstellern vorangetrieben werden. Elektroautos sind keine Neuerfindung, jedoch sind sie ein wichtiger Pfeiler in der Zukunft der Mobilität und tragen immer mehr zum Wandel der heutigen Verkehrskultur bei. Hierbei wird ein Elektromotor zur Fortbewegung eingesetzt, der durch eine Batterie mit Energie versorgt wird. Idealerweise werden dabei die Batterien mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen geladen. Zum Ansteuern der Elektromotoren werden Umrichter eingesetzt, die eine Regelung der Motoren erlauben.

Mit dem Fortschritt der Mobilität hin zur Elektrifizierung des Antriebsstranges eröffnet sich kurz- und mittelfristig ein Markt für elektrische Maschinen, die über Umrichter gespeist werden, und deren Anforderungskriterien an das Isolationssystem elektrischer Maschinen besonders hoch sind. Die Vorzüge der heutigen Leistungselektronik sind nicht mehr wegzudenken. So hat sich im Bereich der Niederspannungsmaschinen die Regelung durch Umrichter durchgesetzt. Diese gestattet die Realisierung einer wartungsarmen Niederspannungsmaschine mit fast beliebig einstellbarem Drehzahl-Drehmoment-Verhalten. Die Vorteile der Umrichter-Motor-Anbindung sorgen dafür, dass die Produktionszahlen elektrischer Maschinen, die über Umrichter gespeist werden, permanent ansteigen. Dabei spielen Umwelteinflüsse, wie z. B. große Temperaturunterschiede, hohe Luftfeuchtigkeit und auch mechanische Belastungen durch Vibrationen beim Einsatz in Elektrofahrzeugen, eine große Rolle. Zusätzlich zu den äußeren Einflüssen wird das Isoliersystem bei Speisung durch einen Umrichter einer anderen Spannungsbeanspruchung ausgesetzt als im Netzbetrieb. Wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist, unterscheidet sich eine sinusförmige Netzspannung im Vergleich zu einer vom Umrichter zur Verfügung gestellten Spannung. [Ber12]

Der Umrichter stellt als Ausgangsspannung Rechteckimpulse mit einer konstanten Amplitude und unterschiedlicher Pulsweite bereit, diese erzeugen in den Motorwicklungen ein nahezu sinusförmiges Drehstromsystem variabler Frequenz. Zur Minimierung von Verlusten sowie der Geräusentwicklung des Antriebes werden die Spannungsimpulse mit Taktfrequenzen von bis zu 25kHz getaktet. [Kau95] [Ber12]

Das Isolationssystem wird damit Spannungsimpulsen mit sehr kurzen Anstiegszeiten und hohen Impulsfolgefrequenzen ausgesetzt. Vor allem wird hierbei die Windungsisolierung stark beansprucht. Diese kann aufgrund der ungleichmäßigen Spannungsverteilung über der Wicklung und bedingt durch die steilen Spannungsimpulse höheren Spannungen ausgesetzt werden. Weiter begünstigt wird dieses Verhalten durch den Fertigungsprozess von Niederspannungswicklungen. Diese werden vorwiegend in der sogenannten „wilden“ Wicklung gefertigt. Hierbei besteht der Nachteil darin, dass sich im ungünstigsten Fall Anfangs- und Endwindung einer Wicklung berühren. Dabei fällt die komplette Spannung über der nur wenigen μm -dicken Lackschicht ab. Des Weiteren können die steilen Spannungsflanken auf der Zuleitung zwischen Umrichter und Motor zu Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen führen. [Kau95]; [Ber96]; [Hil98]; [Toz10]; [Ber12]

Als Folge dieser erhöhten elektrischen Belastung der Windungsisolierung können Teilentladungen (TE) auftreten. TE sind lokale elektrische Entladungen, die die Isolierung zwar nur zum Teil überbrücken können, jedoch können diese auf Dauer zur Reduzierung der Lebensdauer bzw. zum Ausfall einer Maschine führen.

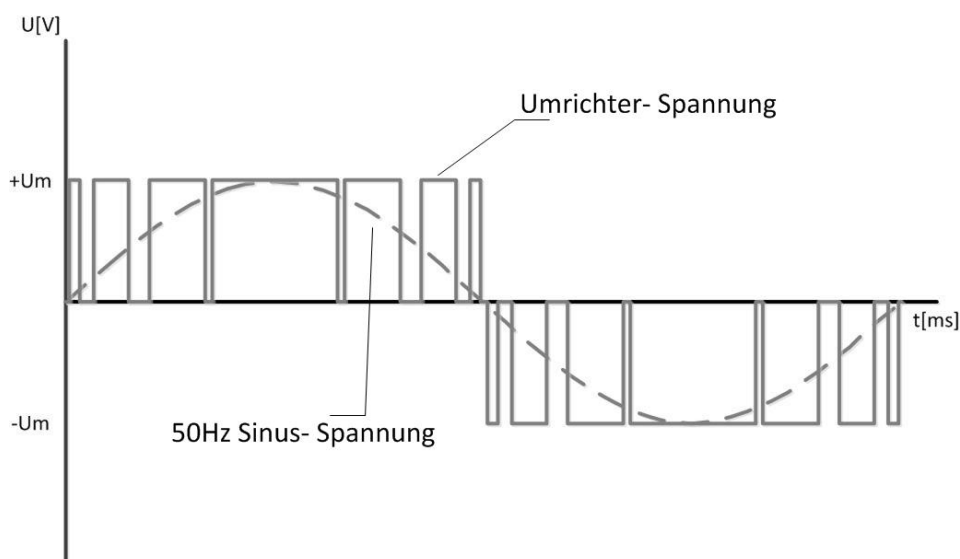


Abbildung 1.1 Vergleich der 50Hz Sinus-Spannung mit der Ausgangsspannung eines Umrichters

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob im Bereich der „End of Line-Prüfung“ (EoL-Prüfung) elektrischer Traktionsmotoren relevante Qualitätsprüfungen erfolgen können, die es ermöglichen, Aussagen über die Qualität des Isoliersystems elektrischer Traktionsmotoren zu treffen und gleichzeitig auch den Herstellungsprozess der elektrischen Traktionsmotoren zu überprüfen.

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Die TE-Messung, die bisher vor allem aus dem Bereich der Hochspannungstechnik bekannt ist, sowie die Möglichkeiten, die eine TE-Messung bei der Diagnose von elektrischen Isoliersystemen bietet, erscheint in Bezug auf EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren sehr interessant. Neben den Aufgaben der Zustandsbeurteilung elektrischer Isoliersysteme kommt die TE-Messung auch im Bereich des Monitoring von elektrischen Betriebsmitteln zum Einsatz. Hierbei erlaubt die TE-Messung z. B., die Wartungsintervalle elektrischer Betriebsmittel besser einzuplanen bzw. die Lebensdauer von elektrischen Betriebsmitteln zu prognostizieren. Auch im Bereich der Typ- und Stückprüfungen der in der Hochspannungstechnik eingesetzten elektrischen Betriebsmittel findet die Anwendung der TE-Messung statt.

Ein Einsatz der TE-Messung im Bereich der EoL-Prüfung elektrischer Traktionsmotoren setzt eine weitreichende Kenntnis des TE-Verhaltens des Motorisoliersystem elektrischer Traktionsmotoren voraus, vor allem in Hinblick auf die impulsförmige Spannungsbeanspruchung des Motorisoliersystems und deren spezieller Auswirkung auf die Lebensdauer der eingesetzten Isoliermaterialien. Weiterhin sind für den Einsatz der TE-Messung im Bereich der EoL-Prüfung elektrischer Traktionsmotoren Prüfparameter vonnöten, die es erlauben, Qualitätsstandards zu etablieren bzw. Aussagen über den Zustand des Isoliersystems zu treffen, woraus die Kriterien über das „Bestehen“ oder „Nichtbestehen“ einer EoL-Prüfung abgeleitet werden können und somit die allgemein bekannten Kriterien einer EoL-Prüfung „in Ordnung“ (IO) und „nicht in Ordnung“ (NIO) zulassen.

Gegenwärtig gibt es jedoch nur wenige Veröffentlichungen, die gezielt den Wissensstand der TE-Messung in EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren darstellen. Beispielsweise ist das Wissen über die Art der einzusetzenden Prüfspannung zur Prüfung der einzelnen Bereiche des Motorisoliersystems nicht vorhanden. Weiterhin fehlt ein detailliertes Wissen über mögliche Parameter und deren einzuhaltenden Grenzwerte, die bei einer EoL-Prüfung als Qualitätsparameter zu erfüllen sind. Auch gibt es widersprüchliche Ergebnisse in Bezug auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung elektrischer Niederspannungsmotoren, welche einen wichtigen Teil des Isoliersystems darstellt und vor allem bei umrichter gespeisten Motoren elektrisch stark beansprucht wird.

Somit liegt das Ziel dieser Arbeit, neben einer Vertiefung der Kenntnisse über das TE-Verhalten der Windungsisolierung umrichter gespeister Niederspannungsmotoren, in einer Beurteilung der TE-Messung als mögliche qualitätssichernde Prüfung für EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren. Insbesondere sollen die Unterschiede im TE-Verhalten der einzelnen Teile des Motorisoliersys-

tems, und zwar bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung, aufgezeigt werden und deren Aussagekraft für EoL-Prüfungen von elektrischen Traktionsmotoren erörtert werden. Darüber hinaus sollen bei Eignung der TE-Messung in EoL-Prüfungen Qualitätsparameter und deren Grenzwerte ausgearbeitet werden, die es in EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren erlauben, Entscheidungskriterien über das „Bestehen“ bzw. „Nichtbestehen“ der Prüfung festzulegen.

1.2 Fragestellung und Struktur der Arbeit

Für das Erreichen der oben genannten Ziele dieser Arbeit ist es unabdingbar, die folgenden Fragestellungen zu beantworten:

- Wie unterscheidet sich das TE-Verhalten der Windungsisolierung bei impulsförmiger Spannung im Vergleich zur sinusförmigen Spannung, bzw. wie wirkt sich das auf die Lebensdauer der Windungsisolierung aus?
- Welche Auswirkungen hat die impulsförmige Spannung auf das TE-Verhalten des gesamten Isolationssystems elektrischer Traktionsmotoren?
- Wie lassen sich die Erkenntnisse der TE-Messungen im Bereich der Qualitätssicherung einbinden?

Die Beantwortung der genannten Fragen erfordert statistisch gesicherte Ergebnisse des TE-Verhaltens, was unter ökonomisch zweckmäßigem Aufwand die Durchführung der Untersuchungen an Modellisolierungen des Motorisoliersystems bedeutet. Daher werden nach der Darlegung des Wissensstandes auf dem Gebiet der impulsförmigen Spannungsbeanspruchung elektrischer Isolationssysteme der Aufbau sowie die Qualifizierung der in dieser Arbeit verwendeten Modellisolierungen dargestellt. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der für die Untersuchungen verwendeten Messsysteme, wobei insbesondere die Darstellung des TE-Messsystems bei impulsförmiger Spannung im Vordergrund steht, da die TE-Messung bei impulsförmiger Spannung größere Herausforderungen mit sich bringt. Ferner sind die Möglichkeiten beim Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Messverfahren Gegenstand der Untersuchungen.

Anschließend werden die Untersuchungen zum TE-Verhalten der Windungsisolierung, sowohl bei sinusförmiger als auch bei impulsförmiger Spannung, dargestellt und die Unterschiede ausgearbeitet. Darüber hinaus erfolgen auch weitere Untersuchungen die das TE-Verhalten beeinflussen können, hierbei sind vor allem die Umwelteinflüsse sowie die Eigenschaften des Kupferlackdrahtes zu nennen.

Abschließend werden die Untersuchungen in Bezug auf das TE-Verhalten des Motorisoliersystems an geeigneten Modellisolierungen durchgeführt. Hierbei wird insbesondere das TE-Verhalten der Haupt-, Phasen- und Windungsisolierung betrachtet, um zum einen die Unterschiede im TE-Verhalten des gesamten Isolationssystems von elektrischen Niederspannungsmaschinen ableiten zu können und zum anderen Erkenntnisse für den Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren erzielen zu können.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Im ersten Teil dieses Kapitels werden die Grundlagen zum Antriebsstrang eines Elektrofahrzeuges behandelt. Hierzu gehören vor allem der Frequenzumrichter sowie die Niederspannungs-Drehstrommaschine. Dabei wird der Fokus auf den Aufbau des Isolationssystems von Niederspannungs-Drehstrommaschinen gelegt, ebenso wie auf die Funktionsweise und die Topologie des Frequenzumrichters. Darüber hinaus werden die Grundlagen zur Spannungsbeanspruchung von Motorisoliersystemen durch transiente Spannungen betrachtet, hierbei geht es um die Definition von transienten Spannungsimpulsen, deren Ausbreitung über Kabel und über die Wicklungen einer elektrischen Maschine. Neben der Darstellung der Spannungsbeanspruchung von Motorisoliersystemen werden die Grundlagen zu Teilentladungen behandelt, insbesondere werden hierbei die Fragestellungen behandelt:

- Was sind Teilentladungen?
- Wie entstehen Teilentladungen?
- Wie können Teilentladungen gemessen werden?

Abschließend wird in diesem Kapitel auf die Lebensdauer von Niederspannungs-Drehstrommaschinen, speziell auf die Lebensdauer bei Umrichter-Betrieb sowie auf die Möglichkeiten und den Stand der Technik bei der Prüfung von Niederspannungs-Drehstrommaschinen im Bereich der EoL-Prüfungen, eingegangen.

2.1 Komponenten eines Antriebsstranges von Elektrofahrzeugen

Die Hauptkomponenten eines Antriebsstranges von Elektrofahrzeugen bestehen im Wesentlichen aus der Batterie, dem Stromrichter und der Niederspannungs-Drehstrommaschine; eventuell wird auch ein einstufiges Getriebe verwendet. Aus Sicht der Teilentladungsmessung an elektrischen Traktionsmotoren und der EoL-Prüfung von elektrischen Traktionsmotoren spielt die Batterie keine große Rolle. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel auf die Batterie nicht eingegangen. Vielmehr liegt der Fokus auf den Komponenten:

- Niederspannungs-Drehstrommaschine und
- Stromrichter

Insbesondere sind der Aufbau des Isolationssystems der Niederspannungs-Drehstrommaschine sowie die Funktionsweise und die Topologie des Stromrichters von großer Bedeutung in Bezug auf das Einsetzen der Teilentladungsmessung im Bereich der EoL-Prüfung von elektrischen Traktionsmotoren.

2.1.1 Elektromotoren für Elektrofahrzeuge

Motoren, die für den Einsatz in Fahrzeugen verwendet werden, müssen einen weiten Drehzahl-Drehmomentbereich abdecken. Hierfür eignen sich Elektromotoren, da diese auch im niedrigen Drehzahlbereich hohes Drehmomentvermögen aufweisen. Aber auch im hohen Drehzahlbereich können Elektromotoren ein ausreichendes Drehmoment zur Verfügung stellen und das bei annähernd konstanter Leistung über den gesamten Drehzahlbereich. Des Weiteren weisen Elektromotoren vorteilhafte Eigenschaften für den Betrieb in Fahrzeugen auf, wie z. B. einen hohen Wirkungsgrad sowie einen niedrigen Geräuschpegel. Nach Braess sind die Kriterien für die Auswahl von Elektromotoren für den Einsatz in Fahrzeugen die kompakte Bauweise, ein geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Leistungsdichte, ein hoher Wirkungsgrad, gute Steuerbarkeit, Überlastfähigkeit, eine niedrige Geräusentwicklung, niedrige Kosten sowie ein geringer Wartungsbedarf. Nicht alle in der Tabelle 2.1 aufgeführte Elektromotoren bringen diese Eigenschaften in gleicher Weise auf.

Tabelle 2.1: Unterschiedliche Ausführungen von Elektromotoren für den Einsatz in Fahrzeugen [Bra01]

Gleichstrommotoren (GSM)	Drehstrommotoren		Spezialmotoren
	Asynchronmotor (ASM)	Synchronmotor (SM)	
Gleichstromreihenschlussmotoren		permanent erregter SM	bürstenlose GSM
Gleichstromnebenschlussmotoren		elektrisch erregter SM	Transversalflussmotoren
			geschaltete Reluktanzmotoren

Daher eignet sich aus heutiger Sicht die Gleichstrommaschine nicht für den Einsatz in Elektrofahrzeugen, obwohl sie einen hohen Entwicklungsstandard hat und früher auch durchaus als Elektroantrieb verwendet wurde. In der Tabelle 2.2 ist ein Vergleich der verschiedenen Elektromotoren auf-

geführt. Der Asynchronmotor zeigt ein ausgeglichenes Gesamtbild und hat einen entsprechend fortgeschrittenen Entwicklungsstand. Dieser eignet sich also gut für einen Elektroantrieb. Auch der Synchronmotor weist gute Eigenschaften für den Einsatz in Elektrofahrzeugen auf, insbesondere wenn es auf eine kompakte Bauweise und einen hohen Wirkungsgrad ankommt. Auch andere Motoren, wie etwa der geschaltete Reluktanzmotor oder der Transversalflussmotor, kommen für den Einsatz in Fahrzeugen in Frage, jedoch ist der Entwicklungsbedarf bei diesen Motoren in Bezug auf den Einsatz in Fahrzeugen noch sehr hoch. **[Bra01]**

Da sich also der Einsatz von Asynchron- und Synchronmotoren in Elektrofahrzeugen herauskristallisiert, werden in dieser Arbeit die Isolationssysteme dieser Motoren betrachtet. Insbesondere ist das Isolationssystem im Stator/Ständer von Bedeutung, da dieses mit der vom Stromrichter zur Verfügung gestellten Spannung belastet wird. Da die Isolationssysteme im Stator beider Maschinen identisch aufgebaut sind, wird im Folgenden nur vom Isolationssystem elektrischer Maschinen gesprochen. Im nächsten Abschnitt wird das Isolationssystem detaillierter beschrieben und aufgezeigt, aus welchen Bestandteilen es zusammengesetzt ist.

Tabelle 2.2: Vergleich der Elektromotoren für Fahrzeuge (GSM: Gleichstrommotor; ASM: Asynchronmotor; FSM: fremderregter Synchronmotor; DSM: dauermagneterregter Synchronmotor; SRM: geschalteter Reluktanzmotor; TFM: Transversalflussmotor)**[Bra01]**

	GM	ASM	FSM	DSM	SRM	TFM
Wirkungsgrad	--	+	+	++	+	++
Maximale Drehzahl	--	++	+	+	++	--
Volumen	--	+	+	++	+	-
Gewicht	--	+	+	++	+	+
Kühlung	--	+	+	++	++	+
Fertigungsaufwand	-	++	-	-	++	--
Kosten	-	++	-	--	++	--

2.1.2 Aufbau von Statorwicklungen und Isoliersystemen von Niederspannungsmaschinen

Statorwicklungen von Niederspannungsmaschinen (<1000V) in der Leistungsklasse von einigen hundert kW werden vorwiegend mit sogenannten „wilden“ Wicklungen gefertigt. Hierbei bestehen die im Stator eingelegten Wicklungen aus rundem Kupferlackdraht, wobei beim Einlegen der Spulen in die Nuten des Stators nicht darauf geachtet wird, an welcher Stelle sich Anfang und Ende einer Spule befinden. Im ungünstigsten Fall können Anfang und Ende einer Spule direkt nebeneinander liegen. [Sto04]

Das Isoliersystem im Stator besteht im Wesentlichen aus Haupt-(Nut), Phasen-(Strang) und Windungsisolierung (Leiterisolierung); siehe Abbildung 2.1. Zusätzlich wird in der Regel der ganze Stator mit einem Harz vergossen, welches eine untergeordnete Isolierfunktion übernimmt. Allgemein bekannt ist, dass die Hauptaufgabe des Isoliersystems je nach Ausführung der Wicklung im Wesentlichen aus der Potentialtrennung zwischen den Phasen und dem auf Erdpotential liegenden Stator, den Phasen untereinander sowie zwischen den Windungen besteht. Des Weiteren übernimmt das Isoliersystem auch andere Aufgaben wie z. B. den Wärmetransport nach außen sowie die mechanische Festigkeit des Stators, hierbei spielt das Imprägnier-Harz eine wesentliche Rolle.

Für die Hauptisolierung werden vorwiegend Flächenisolierstoffe verwendet. Mit diesen Flächenisolierstoffen werden die Nuten des Stators ausgekleidet; vergleiche Abbildung 2.1 und somit die im Stator befindlichen Wicklungen gegen das Statorblechpaket isoliert. Vorwiegend werden Flächenisolierstoffe aus dreilagig verklebten Schichten verwendet. Hierbei werden dann für verschiedene Wärmebeständigkeitsklassen (WBK) unterschiedliche Materialien eingesetzt. Bei WBK E werden z. B. Zellulosepressspan oder bei WBK B auch mit PET-Folie kaschierter Pressspan verwendet. Für höhere Temperaturen, etwa bei WBK H, werden Papiere und Pressspäne aus aromatischem Polyamid verwendet. Für die Verstärkung der Isolation zwischen zwei Phasen werden ebenfalls Flächenisolierstoffe verwendet, in Abbildung 2.1 auch als Strangisolierung bezeichnet. Als Windungsisolierung oder auch Leiterisolierung bezeichnet werden Drahtlacke verwendet, welche in einer oder mehreren Schichten auf den Leiter aufgetragen werden. [Kah89]

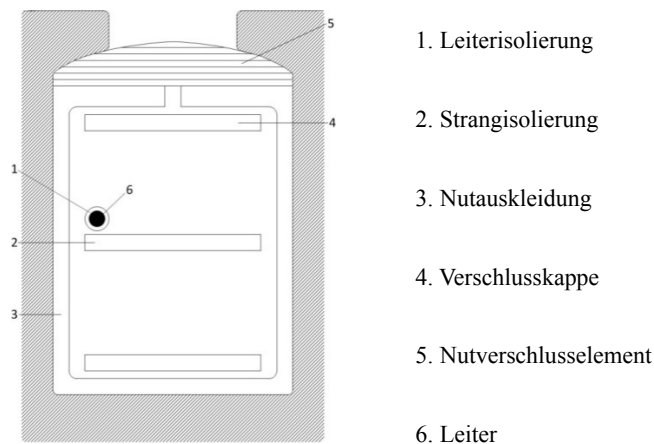


Abbildung 2.1: Prinzip-Darstellung der Wicklungsisolierung einer Niederspannungsmaschine nach Kahle [Kah89]

Die sogenannte Lackzunahme, also die Zunahme des Drahtenndurchmessers durch die Lack-schicht, wird nach der DIN EN Norm 60317-0-2 in drei verschiedenen Graden (Grad 1, 2 und 3) angegeben. Dabei beschreibt die Gradangabe die Mindestzunahme des Durchmessers durch die Isolierung sowie den größten Außendurchmesser des Lackdrahtes. Aus der Differenz des Außenradius und des Innenradius lässt sich dann die tatsächliche Lackdicke ermitteln. Die Lackzunahme variiert mit dem Nenndurchmesser des Leiters. Beispielsweise beträgt die Lackzunahme für einen Draht mit dem Nenndurchmesser von 0,1mm vom Grad 1 mindesten $8\mu\text{m}$ bei einem größtmöglichen Außendurchmesser von 0,117mm. Aus der Differenz der Radien ergibt sich ein Bereich für die Lackdicke zwischen $4\mu\text{m}$ und $8,5\mu\text{m}$, während bei einem Draht mit einem Nenndurchmesser von 1mm die Lackdicke in einem Bereich zwischen $17\mu\text{m}$ und $31\mu\text{m}$ liegt. Wie bereits oben erwähnt, werden die Wicklungen, bzw. der Stator, zusätzlich mit einem Harz imprägniert. Hierbei stehen verschiedene Harztypen zur Verfügung.

In der Regel werden zur Imprägnierung ungesättigte lösungsmittelfreie Polyester, Epoxid und Polyesterimidharze verwendet [Kah89]. Des Weiteren verwendet man im Bereich von Traktionsmaschinen von Straßenbahnen- und Lokomotiven auch Silikonharze. Für das Imprägnieren von Statoren stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die gebräuchlichsten sind das VPI¹- und das Strom-UV-Verfahren.

Bei dem VPI-Verfahren wird der zu imprägnierende Stator in einem Behälter untergebracht. Mit Hilfe einer Vakuum-Pumpe wird dann die Luft bis zu einem Vakuum-Druck von 25mbar evakuiert

¹ Engl. für vacuum pressure impregnation

und anschließend das Harz hinzugegeben. Nach der Vakuum-Phase erfolgt die Abtropfphase sowie eine Aushärtephase im Ofen, in der das verwendete Harz aushärten kann. Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist, dass in der Zeit, in der der Stator auf die Aushärtetemperatur gebracht wird (abhängig von der Statorgröße) bis zu 50% des Harzes wieder auslaufen können, da eine Gelierung des Harzes erst ab einer Temperatur von 80 bis 100°C stattfindet. Das Strom-UV-Verfahren zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass der Stator einen höheren Anteil an Harz aufnehmen kann. Bei diesem Verfahren wird der Stator durch Stromwärme auf Temperatur gebracht und dann in das Harz eingetaucht. Nach einer kurzen Abtropfphase erfolgt sofort das Aushärten des Harzes. Da der Stator sehr schnell die Temperatur wieder erreicht, bei dem das Harz anfängt zu gelieren, ist das Auslaufen des Harzes aus dem Stator deutlich geringer ausgeprägt als beim VPI-Verfahren. Des Weiteren wird der Stator mit UV-Licht bestrahlt, was ein Gelieren des Harzes auf der Oberfläche des Stators ermöglicht. [Sch06]

2.1.3 Stromrichter

„Stromrichter“ ist ein Oberbegriff für ruhende elektrische Anlagen, die für Umwandlung elektrischer Energie bei gleichzeitiger Steuerung des Energieflusses mit Hilfe von elektrischen Bauelementen wie Transistoren, IGBTs, MOSFETs, Dioden und Thyristoren genutzt werden. Prinzipiell gibt es verschiedene Umwandlungsformen der elektrischen Energie. So können Gleichgrößen in Wechselgrößen – und umgekehrt – umgewandelt werden, in diesem Fall spricht man von Wechsel- und Gleichrichtern. Es können Wechselgrößen in Wechselgrößen anderer Frequenz sowie Gleichgrößen in Gleichgrößen anderer Amplitude umgewandelt werden, hierbei spricht man von AC-AC bzw. von DC-DC Wandlern. Es gibt noch die sogenannten (Frequenz-) Umrichter, diese vereinen sowohl einen Gleichrichter als auch einen Wechselrichter in einem System und nehmen eine Wandlung von AC über DC wieder zu AC vor. Der Einsatz von Umrichtern steigt in den letzten Jahren stetig an. Grund hierfür ist größtenteils die Ablösung von Gleichstromantrieben durch umrichter gespeiste Drehstromantriebe in allen Bereichen der elektrischen Antriebstechnik. Auch die Wechselrichter erhalten neue Aufgabenfelder im Bereich der Gleichstrombahnen mit Wechselstrommotoren, der batteriegespeisten elektrischen Fahrzeuge sowie in Photovoltaik-Anlagen. [Jen95]

Aufgrund der Vielzahl der Antriebskonzepte von elektrischen Fahrzeugen sowie der dafür verwendeten unterschiedlichen Stromrichter-Topologie kann in dieser Arbeit nicht auf alle Stromrichtertypen eingegangen werden. Dieses ist auch nicht nötig, da sich diese Arbeit mit der impulsförmigen Spannungsbelastung von Motorisoliersystemen und dem dazugehörigen relevanten Prüfungen, speziell die Teilentladungsprüfung, im Bereich der EoL-Prüfung beschäftigt. Für diese Arbeit ist

vorwiegend die Tatsache interessant, dass aufgrund der Ansteuerung über Stromrichter der zum Antrieb verwendeten elektrischen Maschinen, die Isolationssysteme dieser Maschinen impulsförmigen Spannungen ausgesetzt sind. Aus diesem Grund soll an dieser Stelle beispielhaft die Funktion der lastseitigen Umrichterseite mit einem Spannungszwischenkreis, welcher in der Funktion einen Wechselrichter darstellt, sowie dessen Ausgangsgrößen (Spannung, Strom) näher betrachtet werden. Hierfür sollen der in Abbildung 2.2 dargestellte Brückenkreis eines zweistufigen Stromrichters mit einem Spannungszwischenkreis (links) sowie die Ersatzschaltung mit idealisierten Schaltelementen (rechts) dienen.

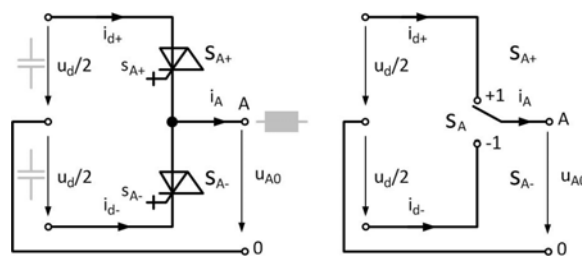


Abbildung 2.2: Brückenkreis eines zweistufigen Stromrichters (links)/Ersatzschaltung (rechts) [Jen95]

Die zwei rückwärtsleitenden Halbleiterschalter im gezeigten Brückenkreis können insgesamt vier unterschiedliche Schaltzustände einnehmen. Davon sind zwei Zustände nicht relevant, da diese entweder den Zwischenkreis kurzschließen ($S_{A+} = 1$ und $S_{A-} = 1$) oder nicht das gewünschte Spannungsverhalten am Ausgang liefern ($S_{A+} = 0$ und $S_{A-} = 0$). Somit bleiben zwei Schaltzustände ($S_{A+} = 1$ und $S_{A-} = 0$) und ($S_{A+} = 0$ und $S_{A-} = 1$), die für die Einstellung der Ausgangsgrößen verantwortlich sind. Für die Spannung u_{A0} und die Ströme i_{d+} , i_{d-} ergeben sich folgende Zusammenhänge:

$$u_{A0} = (s_{A+} - s_{A-}) \frac{u_d}{2} \quad (2.1)$$

$$i_{d+} = s_{A+} i_A \quad (2.2)$$

$$i_{d-} = s_{A-} i_A \quad (2.3)$$

Die Spannung u_{A0} ist abhängig von der Schalterstellung und der Zwischenkreisspannung. Diese kann sprunghaft die Spannungshöhe von $+\frac{u_d}{2}$ bzw. $-\frac{u_d}{2}$ annehmen. Der Strom verhält sich umgekehrt zur Spannung und wird abhängig von der Schalterstellung auf die Leiter des Zwischenkreises geschaltet. Durch eine entsprechende Steuerung kann nun die Ausgangsspannung einer vorgegebenen Spannung, etwa einer sinusförmigen Spannung, folgen. Dieses ist jedoch mit der Ausgangs-

spannung u_{A0} , die durch das Schalten der Halbleiterschalter zustande kommt, nur begrenzt möglich, wie in Abbildung 2.3 zu sehen ist.

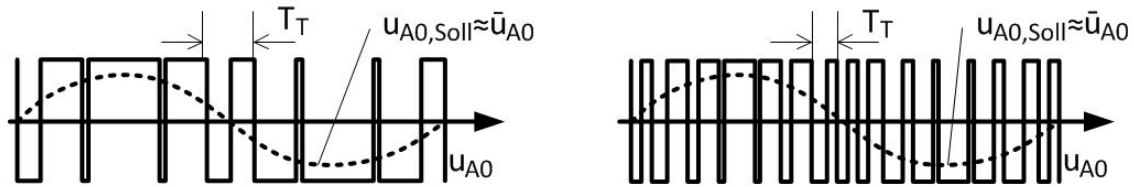


Abbildung 2.3: Spannung am Ausgang des Stromrichters [Jen95]

Die vorgegebene Spannung kann nur im kurzzeitigen Mittelwert \bar{u}_{A0} erreicht werden. Der Mittelwert \bar{u}_{A0} der Spannung entspricht dem Integral über den vollständigen Taktzyklus T_T , wobei der Taktzyklus von der Schaltfrequenz abhängig ist und mit steigender Schaltfrequenz kleiner wird. [Jen95]

$$\bar{u}_{A0}(t) = \frac{1}{T_T} \int_{t-\frac{T_T}{2}}^{t+\frac{T_T}{2}} u_{A0}(\tau) d\tau \quad (2.4)$$

Die Ansteuerung von Motoren über Stromrichter ermöglicht es, nahezu beliebige Drehmoment-Drehzahl-Kennlinien einzustellen, und ist somit nicht mehr aus der modernen Antriebstechnik wegzudenken. Diese bringt jedoch unter anderem auch die impulsförmige Spannungsbeanspruchung des Isolationssystems der angesteuerten Motoren mit sich. Wie man der IEC Norm 60034-18-41, die Qualifizierung und Qualitätsprüfung für teilentladungsfreie elektrische Isoliersysteme (Typ I) in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden, beschreiben kann, entnehmen kann, weisen moderne Umrichter Spannungsanstiegszeiten im Bereich von 50 ns bis 2 μ s auf. [IEC11a]

2.2 Definition transientser Spannungen und deren Entstehung

Allgemein bekannt ist, dass die Entstehung transientser Spannungen im 50 Hz-Wechselspannungsnetz größtenteils auf Ausgleichsvorgänge, hervorgerufen durch Schalthandlungen sowie Blitzeinschläge in Leitungen, zurückzuführen ist.

Die IEC-Norm 60060 beschreibt die Kategorien und Formen von Spannungs- und Überspannungsbeanspruchungen in elektrischen Netzen; vergleiche Tabelle 2.3. Dabei werden die Spannungsbeanspruchungen in zwei Hauptkategorien, welche wiederum in Unterkategorien unterteilt werden, gegliedert. In erster Linie ist die Rede von niederfrequenten sowie transienten Spannungsbeanspruchungen. Die transiente Spannungsbeanspruchung ist in langsame, schnelle und sehr schnelle Kategorien eingeteilt. Unter langsame transiente Spannungsbeanspruchungen fallen transiente Spannungen, die durch Schalthandlungen im Netz verursacht werden können. Unter schnelle transiente Spannungsbeanspruchungen fallen transiente Spannungen, die z. B. durch Blitzeinschläge in Netzen hervorgerufen werden können. Bei sehr schnellen transienten Spannungsbeanspruchungen handelt es sich um Spannungsimpulse mit Spannungsanstiegszeiten im Bereich zwischen 3ns und 100ns. [IEC10]

Tabelle 2.3: Transiente Kategorien und Formen der Spannungs- und Überspannungsbeanspruchung nach IEC 60060 [IEC10]

Kategorie	Transient		
	langsamer Anstieg	schneller Anstieg	sehr schneller Anstieg
Spannungsform			
Berechnung der Spannungsformen	$5000\mu\text{s} \geq T_p > 20\mu\text{s}$ $T_2 \leq 20\text{ ms}$	$20\mu\text{s} \geq T_1 > 0,1\mu\text{s}$ $T_2 \leq 300\ \mu\text{s}$	$100\text{ns} \geq T_f > 3\text{ns}$ $0,3\text{ MHz} < f_1 < 100\text{ MHz}$ $30\text{ kHz} < f_2 < 300\text{ kHz}$ $T_t \leq 3\text{ms}$

Vergleicht man die Spannungsanstiegszeiten von modernen Umrichtern mit den in der IEC Norm 60060 definierten Werten für transiente Spannungsbeanspruchungen, so wird deutlich, dass die Spannungsimpulse von Frequenzumrichtern unter schnellen bzw. sehr schnellen transienten Spannungsbeanspruchungen fallen. In Anbetracht dessen werden im Folgenden die Problemstellungen von schnellen bis sehr schnellen Spannungsbeanspruchungen bei umrichtergespeisten Niederspannungs-Drehstrommotoren behandelt. Dabei geht es um die Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen, hervorgerufen durch transiente Spannungsimpulse, sowie die ungleichmäßige Spannungsaufteilung von transienten Spannungsimpulsen über die Wicklungen elektrischer Maschinen und deren Folgen für das Isolationssystem elektrischer Niederspannungs-Drehstrommaschinen.

2.2.1 Spannungsüberhöhungen bei umrichtergespeisten Antrieben

An den Motorklemmen umrichtergespeister Antriebe kann es aufgrund von Wanderwellenvorgängen zu Spannungsüberhöhungen kommen. Die Spannungsform und Amplitude an den Motorklemmen ist für die Belastung des Isolationssystems des Motors von entscheidender Bedeutung. Da diese Spannung zum einen die Phasen- und Hauptisolierung belastet und zum anderen den Startwert für die Spannungsverteilung innerhalb der Wicklungen darstellt, und somit die Belastung der Windungsisolierung; siehe Kapitel 2.2.2. Um die Belastung des Isolationssystems besser zu verstehen, ist es wichtig, die Wanderwellenvorgänge näher zu betrachten. Wanderwellenvorgänge sind vor allem aus der Hochspannungstechnik und der Hochfrequenztechnik bekannt. Als Beispiel eines Wanderwellenvorganges kann eine Wellenausbreitung über eine Freileitung, hervorgerufen durch einen Blitzeinschlag, dienen.

Dieser Wanderwellenvorgang kann nach Rüdberg bei Betrachtung eines differentiell kleinen Elementes dz einer Freileitung mithilfe der Leitungsgleichungen und unter der Annahme einer verlustfreien homogenen Freileitung gelöst werden. **[Rüd68]**

$$\frac{d^2u}{dz^2} = L' C' \cdot \frac{d^2u}{dt^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2i}{dz^2} = L' C' \cdot \frac{d^2i}{dt^2} \quad (2.6)$$

Dabei breiten sich die Wanderwellen mit der Phasengeschwindigkeit v aus, als Funktion der Leitungsbeläge L' und C' .

$$v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2.7)$$

Für Spannung und Strom gilt dann nach der Lösung der oben angegebenen Differentialgleichung:

$$u(z, t) = U\{f(z - vt) + g(z + vt)\} \quad (2.8)$$

$$i(z, t) = U \cdot vC'\{f(z - vt) - g(z + vt)\} \quad (2.9)$$

Nach Küchler gibt es also eine Spannungswelle, die sich aus zwei Anteilen zusammensetzt: einer Spannungswelle in $+z$ -Richtung sowie einer in $-z$ -Richtung; vergleiche Abbildung 2.4. Entsprechendes gilt auch für die Stromwelle. Dabei ist wichtig, dass sowohl die Spannung als auch der Strom aus dem elektrischen und magnetischen Feld derselben Wanderwelle stammen. **[Küc04]**

Nach den Gleichungen (2.8) und (2.9) stehen die Strom- und Spannungsamplitude dabei in einem festen Verhältnis zueinander, dem Leitungswiderstand Z_L :

$$Z_L = \frac{u}{i} = \frac{1}{vC'} \quad (2.10)$$

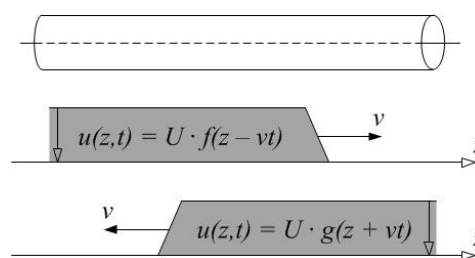


Abbildung 2.4: Ausbreitung der Wanderwelle in $+z$ - und $-z$ -Richtung **[Küc04]**

Setzt man für die Phasengeschwindigkeit v die oben angegebene Formel (2.7) ein, so bekommt man für den Leitungswiderstand Z_L die Gleichung:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2.11)$$

In der Tabelle 2.4 sind einige Werte für den Wellenwiderstand Z_L von Kabeln und Freileitungen zusammengefasst.

Tabelle 2.4: Wellenwiderstand gängiger Leitungsarten

Leitungsart	Wellenwiderstand [Ω]
Freileitung	250...400
Kabel (4-adrig, geschirmt)	40...60
Kabel (4-adrig, ungeschirmt)	70...90

Die Leitungsbeläge – und somit auch der Wellenwiderstand – sind abhängig von der Geometrie sowie der Art der Leitung. Die Phasengeschwindigkeit v beträgt in Vakuum $3 \cdot 10^8$ m/s, also die Lichtgeschwindigkeit. In Gasen wird die Lichtgeschwindigkeit annäherungsweise auch erreicht. Die Phasengeschwindigkeit nimmt in Medien mit einem höheren ϵ_r , um den Faktor $\epsilon_r^{-0.5}$ ab.

[Küc04]

Am Ende von Leitungen, an Übergängen von Leitungen oder an angeschlossenen Elementen kann es zu Reflexionen bzw. zu Brechungen der Wanderwellen kommen, und zwar immer dann, wenn der Abschlusswiderstand nicht dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht. Am Übergangspunkt gelten die Maschen- und Knotenregel, so dass die Überlagerung der reflektierten und einlaufenden Strom- und Spannungswellen gerade die Spannung und den Strom am Übergabepunkt ergeben.

[Küc04] Als Maß für die Reflexion gilt der sogenannte Reflexionsfaktor r , dieser ist wie folgt definiert:

$$r_i = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.12)$$

$$r_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.13)$$

Der Zusammenhang zwischen Reflexions- und Brechungsfaktor ist folgender:

$$r_{u,i} = b_{u,i} - 1 \quad (2.14)$$

In der Abbildung 2.5 sind mögliche Fälle dargestellt, die zu einer Reflexion bzw. Brechung der Wanderwellen führen können. Im Vergleich hierzu ist ein Fall aufgeführt, bei dem der Abschlusswiderstand mit dem Wellenwiderstand übereinstimmt. Hierbei kommt es zu keiner Reflexion oder Brechung der Wanderwellen, so dass ein gleichmäßiger Übergang der Wanderwelle erfolgen kann.

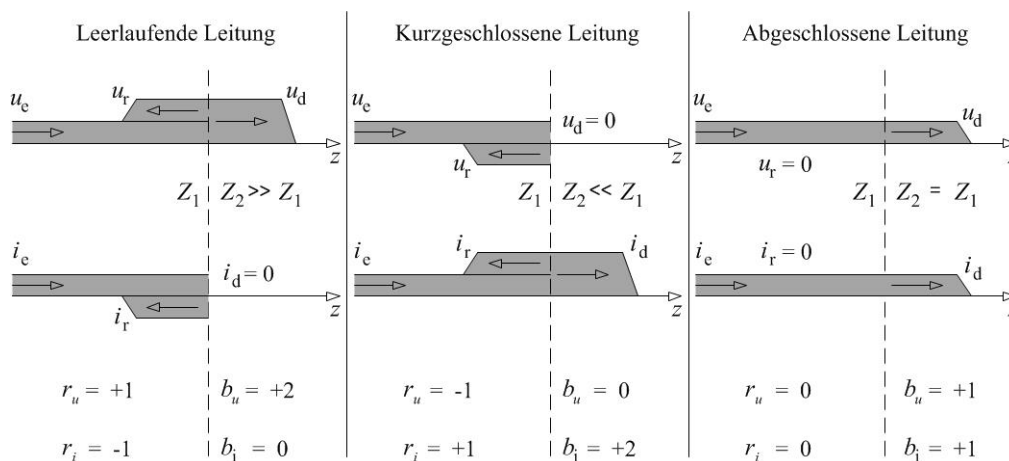


Abbildung 2.5: Reflexion und Brechung von Wanderwellen [Küc04]

Im Falle einer Umrichter-Motor-Konstellation, die über eine Zuleitung miteinander verbunden sind, entstehen ebenfalls Übergangspunkte, an denen die vom Umrichter generierten Spannungsimpulse reflektiert bzw. gebrochen werden können.

Nimmt man an, dass sich der Umrichter aufgrund des Kondensators im Gleichstromzwischenkreis wie eine „ideale Spannungsquelle“ mit einem Innenwiderstand $R=0$ verhält, und dass das motorseitige Ende einen Abschlusswiderstand im Bereich von $k\Omega$ hat (und damit im betrachteten Frequenzbereich deutlich größer ist als der Wellenwiderstand der Zuleitung), so kann man die Umrichter-Motor-Übergangspunkte vereinfacht darstellen. Sie kann dann als kurzgeschlossene Leitung auf der Umrichter-Seite mit einem Spannungs-Reflexionsfaktor von $r_u = -1$ sowie als eine leerlaufende Leitung auf der Motor-Seite mit einem Spannungs-Reflexionsfaktor von $r_u = +1$ gelten. [Mül03] So kann im schlimmsten Fall die Spannung an den Motorklemmen den doppelten Wert annehmen.

Wenn man von Wanderwellenausbreitung auf Leitungen spricht, so spielt auch das Verhältnis zwischen der Anstiegszeit der Spannungsimpulse und der Laufzeit der Spannungsimpulse über die Leitung eine wesentliche Rolle. Nach Berth kann mit einer Spannungsverdopplung an den Motor-

klemmen gerechnet werden, wenn die Laufzeit der Spannungsimpulse über die Leitung größer als die halbe Anstiegszeit der Spannungsimpulse ist. [Ber96]

Daraus lässt sich für die sogenannte „kritische Leitungslänge“ ableiten:

$$l_{krit} = v \cdot \frac{t_r}{2} \tag{2.15}$$

Rocks folgert daraus, dass für Leitung mit einer Leitungslänge, die größer ist als die kritische Leitungslänge, die maximale Reflexion gilt. Ist dagegen die Leitungslänge kleiner als die kritische Leitungslänge, so kann es zu keiner Verdopplung nach Rocks kommen, da die Wanderwelle noch nicht ihren maximalen Wert erreicht, bevor sie reflektiert wird. [Roc09]

In [Cav10] durchgeführte Untersuchungen zeigen die Abhängigkeit der Spannungsüberhöhung an den Motorklemmen von der Länge der Zuleitung und der Anstiegszeit der Spannungsimpulse, siehe Abbildung 2.6 [Cav10]. Hierbei kann beobachtet werden, dass es auch für Zuleitungen von wenigen Metern zu signifikanten Spannungsüberhöhungen kommen kann, falls die Anstiegszeiten der Spannungsimpulse klein genug sind.

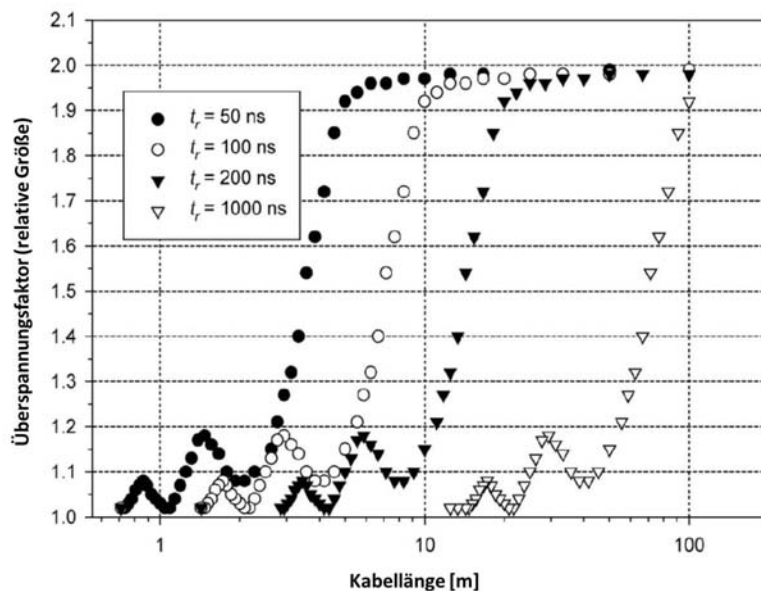


Abbildung 2.6: Überspannungsfaktor in Abhängigkeit der Kabellänge (t_r =Anstiegszeit) [Cav10]

Kaufhold deutet darauf hin, dass die Spannung an den Klemmen des Motors auch größere Werte als die Verdoppelung der Spannungswerte annehmen kann; und zwar dann, wenn der Umrichter Spannungsimpulse generiert, bevor die vorherige Wanderwelle abgeklungen ist. Hierbei kann es zu Überlagerungsvorgängen kommen, die weitaus höhere Spannungen an den Motorklemmen hervorrufen. [Kau95]

2.2.2 Spannungsaufteilung in der Statorwicklung

Impulsförmige Spannungen breiten sich in Statorwicklungen nichtlinear aus. Das bedeutet, dass der Großteil der Spannung an den ersten Spulen einer Wicklung abfällt. Wie schon im Kapitel 2.1.2 erklärt, werden Wicklungen von Niederspannungsmotoren vorwiegend in der sogenannten „wilden“ Wicklung ausgeführt. Dies hat Kostenvorteile bei der Herstellung der Wicklungen, ist jedoch ein wesentlicher Nachteil für Motoren, die mit Umrichter gespeist werden. Gerade umrichter gespeiste Motoren werden impulsförmiger Spannung ausgesetzt, dessen nichtlineare Spannungsaufteilung in der Stator- Wicklung die Windungsisolierung stark beansprucht. Dies ist vor allem der Fall an Stellen, wo sich Anfang und Ende einer Wicklung unmittelbar nebeneinander befinden, was mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit in wild gewickelten Motoren auftreten kann. Hier kann es vorkommen, dass ein Großteil der Spannung über der Windungsisolierung abfällt, welche für solche Spannungsabfälle nicht dimensioniert ist.

Die nichtlineare Spannungsverteilung in Statorwicklungen bei impulsförmiger Spannung kann nach Rüdberg wie folgt erklärt werden. Die Statorwicklung kann man, wie in Abbildung 2.7 zu sehen ist, stark vereinfacht aus einem Kettenleiter von Induktivitäten und Kapazitäten darstellen. Dabei stellen die Kapazitäten zum einen die kapazitiven Kopplungen zwischen den Windungen und zum anderen die kapazitiven Kopplungen zur Erde dar. Die Impedanz der Kapazitäten ist für große Frequenzen deutlich kleiner als die der Induktivitäten und umgekehrt. Daher wirken sich für unterschiedliche Frequenzanteile unterschiedliche Elemente aus. [Rüd68]

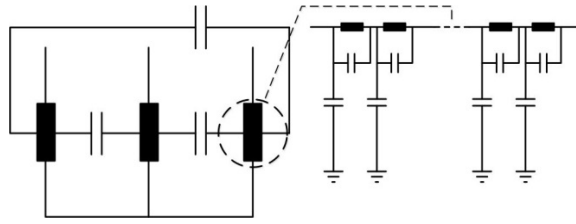


Abbildung 2.7: Stark vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Motorwicklung

Gibt man nun einen Spannungs-Sprung auf die Statorwicklung, so wirken sich im ersten Augenblick die kapazitiven Anteile der Wicklung aus und es kommt zu der sogenannten „kapazitiven Anfangsverteilung“ der Spannung. Hierbei wird die Spannungsverteilung in der Statorwicklung maßgeblich von dem kapazitiven Verhältnis der Erdkapazität C_e zur Wicklungskapazität C bestimmt sowie von der Anzahl der Windungen. In Abbildung 2.8 ist die Spannungsverteilung über die Länge einer Spule in Abhängigkeit von dem Kapazitätsverhältnis dargestellt. Deutlich zu sehen ist, dass umso größer dieses Verhältnis ist, desto nichtlinearer ist die Spannungsverteilung in der Spule. Ähnliches Verhalten zeigt sich auch bei einer Motorwicklung.

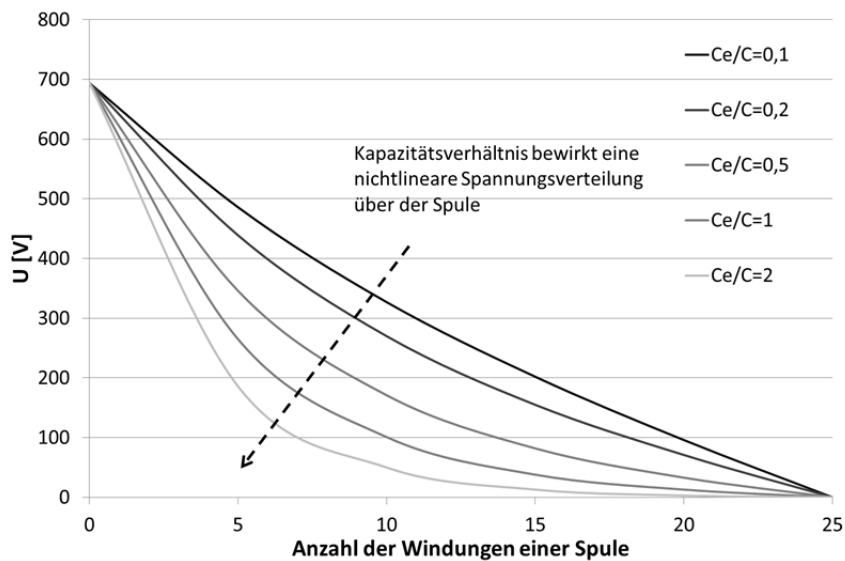


Abbildung 2.8: Spannungsverteilung über einer Spule in Abhängigkeit des Kapazitätsverhältnisses C_e/C

Die Spannungsaufteilung in der Wicklung ist aber auch abhängig von der Zeit. Für $t \rightarrow \infty$ ist die Spannungsaufteilung linear.

2.3 Teilentladungen (TE)

Teilentladungen (TE) treten in gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen auf und bewirken einen Teildurchschlag der Isolierung. Dieser Teildurchschlag führt nicht unmittelbar zum Versagen der ganzen Isolieranordnung, wirkt sich jedoch vor allem bei festen Isolierstoffen negativ auf die Lebensdauer des Isolierstoffes aus. So kann die Lebensdauer von festen Isolierstoffen durch Erosion des Isolierstoffes, hervorgerufen durch TE, stark herabgesetzt werden. Im Folgenden sollen die Ursachen für TE erläutert werden sowie mögliche TE-Quellen genannt werden. Insbesondere liegt hierbei der Fokus auf TE, die in festen und gasförmigen Isolieranordnungen stattfinden. Auf flüssige Isolierstoffe soll nicht näher eingegangen werden, da deren Einsatz in Niederspannungsmaschinen nicht üblich ist. Abschließend soll die TE-Messung vorgestellt werden, die es ermöglicht, TE zu detektieren und zu messen.

2.3.1 Ursachen für Teilentladungen

Nach der Norm IEC 60270 sind TE örtlich beschränkte Entladungen, welche in einem minimalen Bereich einer Isolieranordnung auftreten. Als Ursache für TE werden örtliche Feldstärkeüberhöhungen in Isolierstoffen bzw. auf der Oberfläche von Isolierstoffen genannt. **[IEC04]**

Küchler führt noch einen Aspekt als Ursache für TE ein. Dieses sind lokale Minderungen der elektrischen Festigkeit, das sind z. B. Gaseinschlüsse in festen Isolierstoffen. **[Küc04]**

In der Abbildung 2.9 sollen die Ursachen für TE anhand eines Beispiels illustriert werden. Unter Abbildung 2.9 a. ist eine intakte festförmige Isolierung dargestellt, bei der sich das elektrische Feld zwischen der Hochspannungselektrode (HV) und der Erdelektrode homogen ausbreitet. Im Falle eines Gaseinschlusses (z. B. Luft) kommt es lokal im Gebiet des Lufteinschlusses zur Minderung der elektrischen Festigkeit und somit zur Feldstärkeüberhöhung; siehe Abbildung 2.9 b. (rot dargestellt). Überschreitet die elektrische Feldstärke die Durchschlagfeldstärke des eingeschlossenen Mediums, in diesem Fall der Luft, kommt es lokal zur TE. Man spricht in diesem Fall auch von „inneren“ TE. Unter c. ist eine gasförmige Isolierung zwischen zwei Elektroden dargestellt. In der Mitte ist wieder eine homogene Feldverteilung wie im Fall a. zu beobachten. Nach außen hin jedoch kommt es an den Elektrodenstellen mit niedrigen Radien zu Feldstärkeüberhöhungen (rot dargestellt); in diesem Fall spricht man auch von sogenannten „Korona-Entladungen“. Des Weiteren sind noch „Gleitentladungen“ zu erwähnen, diese treten an Grenzflächen von fest- und gasförmigen Isolieranordnungen auf.

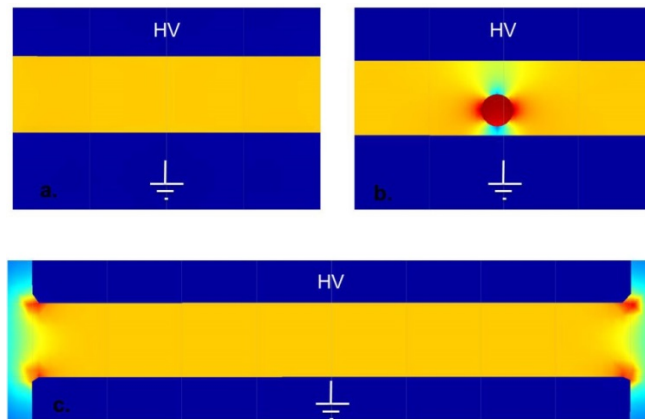


Abbildung 2.9: a. Eine intakte Isolierung ohne TE b. Gaseinschluss in einem festen Dielektrikum c. Korona-Entladungen in Luft

Das Entladungsverhalten von TE ist abhängig von der Art der Betriebsspannung. Hierbei gibt es deutliche Unterschiede zwischen Gleich-, Wechsel- und Impulsspannung. Während das Verhalten von TE unter Gleich- und Wechselspannung weitestgehend erforscht ist, gewinnt die TE-Forschung bei impulsförmiger bzw. auch mischförmiger Spannung immer mehr an Bedeutung. Grund hierfür ist der steigende Anteil an Betriebsmitteln, die auf Halbleiterbasis arbeiten. Hierbei werden Isolierstoffe Spannungen ausgesetzt, welche sich deutlich von bisher üblichen Betriebsspannungen, wie Wechsel- und Gleichspannung, unterscheiden. Dieses bringt auch neue Herausforderungen für die TE-Messung mit sich. Die TE-Messung unter Gleich- und Wechselspannung hat sich in der Hochspannungstechnik neben den klassischen Hochspannungsprüfungen bereits seit Jahren etabliert. Diese ist jedoch nicht ohne Weiteres auf die TE-Messung unter impulsförmiger Spannung übertragbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden separat auf die elektrische TE-Messung unter Wechsel- und Impulsspannung eingegangen. Auf andere Möglichkeiten der TE-Messung, wie chemische, optische, akustische und andere TE-Messverfahren, wird nicht näher eingegangen, da diese nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

2.3.2 Teilentladungsmessung

TE-Messung unter Wechselspannung

Die elektrische TE-Messung hat sich im Bereich der Hochspannungstechnik neben den klassischen Hochspannungsprüfungen etabliert. Vor allem wird die TE-Messung verwendet, um Aussagen über

den Isolationszustand elektrischer Betriebsmittel zu gewinnen, und das bei möglichst geringem Hochspannungsprüfrisiko. In Abbildung 2.10 ist der TE-Messkreis gezeigt, der für TE-Messungen unter Wechsel- und Gleichspannung geeignet ist. Dabei wird der Prüfling C_a parallel zur Spannungsversorgung geschaltet. Ebenfalls wird ein sogenannter „Koppelkondensator C_k “ parallel zum Prüfling geschaltet; dieser soll im Falle einer TE im Prüfling den transienten Ausgleichstrom zur Verfügung stellen. Zu beachten ist, dass die Kapazität des Koppelkondensators entsprechend größer sein muss als die Kapazität des Prüflings. Der transiente Ausgleichstrom, welcher im Falle einer TE in dem Kreis aus Koppelkondensator und Prüfling fließt, kann über einen Ankopplungsvierpol (AKV) erfasst werden und dem TE-Messgerät als Spannungsimpuls zur Verfügung gestellt werden.

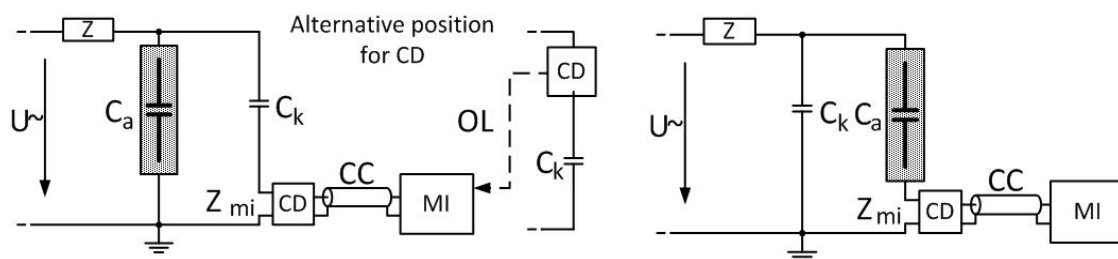


Abbildung 2.10: TE-Messkreis nach IEC 60270 [IEC04]

AKV sind Netzwerke, die meist ein Band- oder Hochpassverhalten darstellen; als Beispiel kann eine Parallelschaltung aus einer Induktivität und einem Widerstand genannt werden. Zur Entkopplung der Netzseite wird oft ein Tiefpassfilter eingesetzt (z. B. Reihenschaltung aus R und L), dieser ermöglicht es netzseitige Störungen zu unterdrücken. [Küc04]

Weiterhin ist es wichtig, dass der gesamte Messaufbau teilentladungsfrei ist, d. h., dass sichergestellt ist, dass von den eingesetzten Betriebsmitteln, Verbindungskabeln und metallischen Teilen keine Beeinflussung der TE-Messung hervorgeht.

Die wichtigsten Kenngrößen einer TE-Messung sind:

1. Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung (U_{TEE}/U_{TEA})
2. Phasenlage der TE zur angelegten Wechselspannung
3. Impulshäufigkeit (N_{TE})
4. Intensität der TE (scheinbare Ladung- Q_s)

In der Tabelle 2.5 werden die einzelnen Kenngrößen entsprechend dargestellt und deren besondere Merkmale bzw. Bedeutung für die TE- Messung herausgestellt.

Tabelle 2.5: Kenngrößen einer TE-Messung [Küc04]

<p>Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung</p>	<p>Die U_{TEE}/U_{TEA} gibt an, bei welcher Spannung es zum Einsatz von TE kommt bzw. bei welcher Spannung die TE wieder erlöschen. Diese beiden Parameter werden insbesondere zum Vergleich unterschiedlicher Isolieranordnungen herangezogen.</p>
<p>Phasenlage der TE zur angelegten Spannung</p>	<p>Die Phasenlage der TE zur angelegten Spannung ist insofern von Bedeutung, da diese es ermöglicht, die TE-Bilder zu interpretieren. Verschiedene TE-Quellen liefern verschieden TE-Bilder, siehe Abbildung 2.11. hier ist ein Beispielbild für TE an einer Spitze-Platte-Anordnung in Luft bzw. für TE in einem festen Isolierstoff dargestellt. Die Phasenlage zur angelegten Spannung (in diesem Fall ist das eine sinusförmige Spannung) ist in beiden Fällen unterschiedlich und bietet so die Möglichkeit, TE-Quellen zu unterscheiden.</p>
<p>Impulshäufigkeit</p>	<p>Die Impulshäufigkeit gibt an, wieviele TE pro Sekunde stattfinden, und ist vor allem in Verbindung mit der Phasenlage der TE zur angelegten Spannung ein wichtiger Parameter zur Interpretation von TE-Bildern</p>
<p>Intensität der TE</p>	<p>Die Intensität der TE ist ein besonderer Fall und kann nur als Richtwert angenommen werden. Der Grund hierfür ist, dass nicht der tatsächliche Ladungsumsatz in der Fehlstelle gemessen werden kann, sondern nur der Anteil der „scheinbaren Ladung Q_s“. Deshalb soll im Folgenden näher auf dem Begriff der scheinbaren Ladung eingegangen werden.</p>

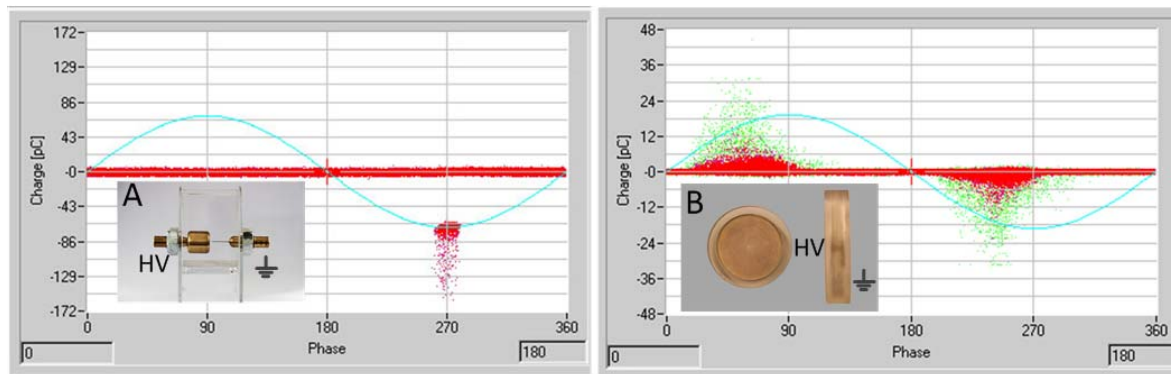


Abbildung 2.11: Unterschiedliche TE-Bilder für unterschiedliche TE-Quellen (**A:** Spitze-Platte-Anordnung in Luft; **B:** Platte-Platte-Anordnung im festen Isolierstoff)

Scheinbare Ladung Q_s

Wie bereits erwähnt, kann mit Hilfe der TE-Messung nicht der tatsächliche Ladungsumsatz in der Fehlstelle gemessen werden. Es wird lediglich die vom Koppelkondensator „nachfließende Ladung“ gemessen. Dies soll anhand des in Abbildung 2.12 dargestellten Ersatzschaltbildes verdeutlicht werden. In diesem Fall ist ein Teil einer Isolierung dargestellt, die einen Gaseinschluss aufweist, sowie das vereinfachte elektrotechnische Ersatzschaltbild. Der tatsächliche Ladungsumsatz in der Fehlstelle kann mit der Formel (2.16) beschrieben werden.

$$\Delta Q = C_h \cdot \Delta u_h = C_h \cdot U_d \tag{2.16}$$

Die Hohlraumkapazität C_h ist eine spezifische Größe und ist in den meisten Fällen unbekannt. Daher ist es nicht möglich, den genauen Ladungsumsatz zu bestimmen. Das Δu_h wirkt sich jedoch als Spannungseinbruch Δu aus und kann wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta u = \Delta u_h \cdot \frac{C_s}{C_s + C_0} = U_d \cdot \frac{C_s}{C_p} \tag{2.17}$$

Dieser Spannungseinbruch ist mit einem Ausgleichstrom verbunden, welcher vom Koppelkondensator zur Verfügung gestellt wird. Der Ausgleichstrom wird vom AKV erfasst und im TE-Messgerät integriert. Was letztlich als „scheinbar“ in der Fehlstelle umgesetzte Ladung in pC angezeigt wird. [Küc04]

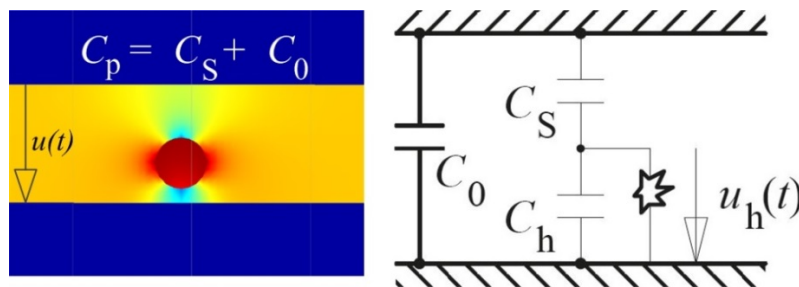


Abbildung 2.12: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines Dielektrikums mit innerer Fehlstelle

TE-Messung unter impulsförmiger Spannung

Wie bereits angeführt, werden Isoliersysteme aufgrund des steigenden Anteils der Halbleitertechnik immer häufiger Spannungsformen ausgesetzt, die sich deutlich von bisher üblichen Spannungsformen unterscheiden. Daher ist es notwendig, Isolationsprüfungen unter den tatsächlich herrschenden Spannungsformen durchzuführen. Auch die TE-Messung sollte also unter impulsförmiger Spannung möglich sein. Jedoch ist die bereits oben erklärte Vorgehensweise bei der konventionellen TE-Messung nicht ohne Weiteres anwendbar. Grund hierfür ist, dass die TE-Impulse nicht von den Spannungsimpulsen unterschieden werden können.

Die Norm IEC 61934 beschreibt das Vorgehen der TE-Messung bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit. Dabei muss vor allem beachtet werden, dass der vom Anrege-Impuls verursachte induzierte Strom soweit wie möglich unterdrückt wird. Hierfür können verschiedene Techniken angewendet werden, die im Folgenden erläutert werden. [IEC11b]

Auskopplung der TE-Signale mit Hochfrequenzstromwandlern (HFCT)²

Zur Erfassung von TE-Signalen unter impulsförmiger Spannung können Hochfrequenzstromwandler (HFCT) verwendet werden. Diese können sowohl in den Hochspannungspfad als auch in die Erdleitung angebracht werden; siehe Abbildung 2.13. Im Hochspannungspfad ist darauf zu achten, dass diese für die verwendete Spannung ausgelegt sind. Der im Falle von TE fließende Ausgleichstrom induziert nach dem Rogowski-Prinzip ein Strom in der Spule, dessen Spannungsabfall über einen Widerstand (meistens 50Ω) gemessen werden kann und üblicherweise mit einem Oszilloskop dargestellt wird. Um Störungen zu unterdrücken, werden Filter eingesetzt. [IEC11b]

² HFCT-engl. für high frequency current transformer

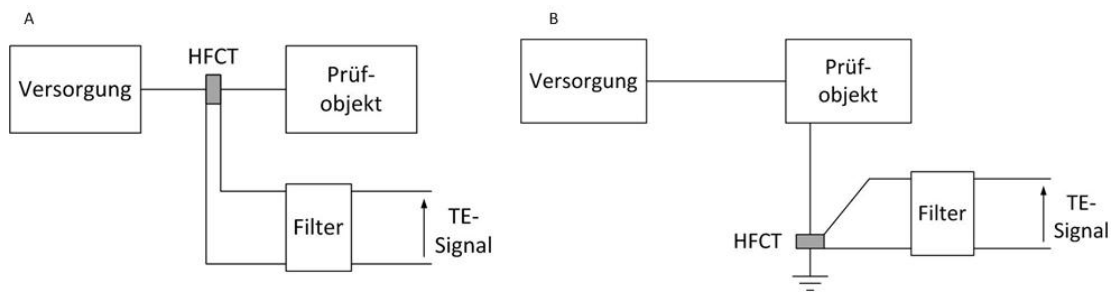


Abbildung 2.13: Auskopplung der TE-Signale mittels HFCT [IEC11b]

Auskopplung der TE-Signale mit Koppelkondensatoren

Auch Koppelkondensatoren, siehe Abbildung 2.14, können in Verbindung mit Filtern, die die Störsignale der Spannungsversorgung unterdrücken, zur Auskopplung der TE-Signale verwendet werden. Dabei ist sicherzustellen, dass der Koppelkondensator teilentladungsfrei ist und eine entsprechende Spannungsfestigkeit aufweist. [IEC11b]

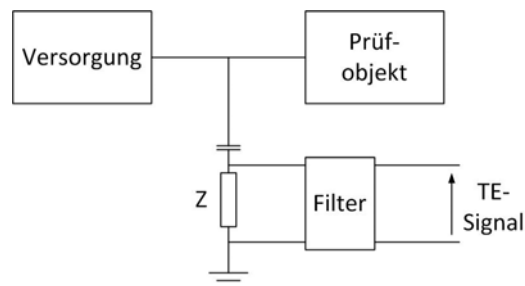


Abbildung 2.14: Auskopplung der TE-Signale mittels Koppelkondensator [IEC11b]

Auskopplung der TE-Signale mit elektromagnetischen Richtkopplern

Eine weitere Art der Detektion von TE-Impulsen stellen elektromagnetische Richtkoppler dar. Zum einen können diese zur Trennung der Impulse aus der Spannungsversorgung und von in Prüfling erzeugten TE eingesetzt werden (Abbildung 2.15A), zum anderen können die elektromagnetischen Richtkoppler direkt die vom Prüfkörper verursachten TE detektieren (Abbildung 2.15B). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese dann eine angemessene Frequenzcharakteristik aufweisen. [IEC11b]

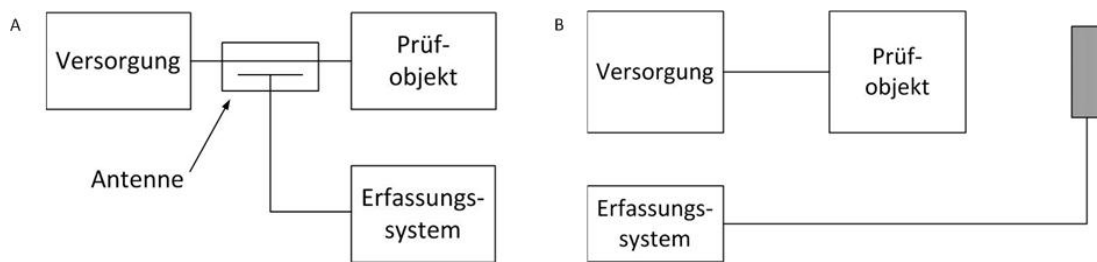


Abbildung 2.15: Auskopplung der TE-Signale mittels Antennen [IEC11b]

2.4 Lebensdauer des Isolationssystems von Niederspannungs-Drehstrommotoren

Niederspannungs-Drehstrommotoren werden einer Vielzahl von Belastungen ausgesetzt, die die Lebensdauer des Isolationssystems erheblich beeinträchtigen können. Dabei können die Belastungen einzeln oder im Verbund auftreten. Weiterhin können sich einige Belastungen dominierend auswirken, d. h., dass einige Belastungen stärker gegenüber anderen in Erscheinung treten können.

Die Autoren in [Fru02] sprechen von sogenannten TEAM³ Belastungen, die zu lokalen oder globalen Veränderung der Isolationseigenschaften führen können. Diese Veränderungen der Isolationseigenschaften können dann als Alterung des Motorisolationssystems bezeichnet werden. [Fru02]

Da man bisher davon ausgegangen ist, dass die thermische Alterung des Isolationssystems einer Niederspannungs-Drehstrommaschine dominierend sei, wird diese im Folgenden näher betrachtet. Allerdings muss hier darauf hingewiesen werden, dass dies der Fall bei Speisung der Niederspannungs-Drehstrommaschine durch das Netz ist. Darauf aufbauend wird dann auf die elektrische Alterung der Niederspannungs-Drehstrommaschine und die neuesten Errungenschaften der Forschung auf diesem Gebiet eingegangen werden. Hierbei soll vor allem erarbeitet werden, wann die elektrische Alterung nicht mehr vernachlässigbar ist, bzw. wann diese speziell betrachtet werden muss. Dies soll einen möglichen Einsatz der TE-Messung im Bereich der „EoL-Prüfung“ von elektrischen Traktionsmotoren verdeutlichen.

³ TEAM-engl. für thermal, electric, ambient und mechanical

2.4.1 Thermische Alterung von Isoliersystemen

Isoliersysteme von netzgespeisten NS-Drehstrommotoren werden nach den heutigen Kenntnissen im stationären Betrieb vor allem einer thermischen Alterung ausgesetzt, welche hauptsächlich durch Verluste in der Maschine hervorgerufen wird. Die Verluste setzen sich nach Stone hauptsächlich aus Ohm'schen Verlusten, Wirbelstromverlusten und Streulastverlusten zusammen. Aufgrund der Verluste entstehen hohen Temperaturen in der Maschine, vor allem im Bereich des Wickelkopfes. Bei Überschreiten gewisser Grenztemperaturen können chemische Prozesse in Gang gesetzt werden, die zur Schädigung der eingesetzten Isolationsmaterialien führen. [Sto04]

Nach Dakin sind es vor allem dann die Oxydation sowie das Aufbrechen bzw. Zerstören von Polymermolekülen, die zur Minderung der elektrischen Festigkeit oder – allgemein gesagt – zur Änderung der elektrischen Eigenschaften der Isolationsmaterialien führen. [Dak48]

Büssing leitete die Relation der Ausfallzeit t_a der Isolierstoffe zur Temperatur T (unter der Voraussetzung von konstanter Temperatur) aus der Arrhenius-Gleichung der chemischen Reaktionskinetik her und stellte die folgende Formel für die Ausfallzeit t_a auf:

$$t_a = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.18)$$

Mit A als einem Lageparameter, welcher vom geometrischen Aufbau sowie von dem Eigenschaftsgrenzwert des Isolierstoffs abhängig ist, und B dem thermischen Lebensdauerexponenten, welcher die chemischen Eigenschaften des Isolierstoffes beschreibt. [Büs42]

Die Gleichung (2.18) beschreibt das Ausfallverhalten von Isolationsmaterialien bei thermischer Belastung, unter Berücksichtigung einer konstanten Temperatur. Umso höher dabei die Temperatur ist, desto geringer ist die Lebensdauer des Isolationssystems. Weiterhin bildet diese Gleichung die Basis für die Durchführung von thermischen Lebensdauertests sowie für die Einstufung der Isoliersysteme in die Wärmebeständigkeitsklassen A, B, F und H. Die Gleichung wird aber oft durch die Annahme, dass die Lebensdauer der Wicklungsisolierung um 50% für einen Temperaturanstieg von 10°C abnimmt, vereinfacht. [Sto04]

Wie oben bereits erwähnt, ist die thermische Alterung des Isolationssystems vor allem im stationären Betrieb der Maschine dominierend. Im dynamischen Fall, etwa einem Zu- oder Abschalten der

Maschine, können auch weitere Einflüsse, wie Spannungsüberhöhungen, durch Ausgleichvorgänge zur Alterung beitragen.

2.4.2 Elektrische Alterung von Isoliersystemen

Die elektrische Alterung des Motorisoliersystems spielt bei netzgespeisten Maschinen weitestgehend eine untergeordnete Rolle. Nach den bisherigen Erkenntnissen aus Forschung [Kau95]; [Ber96]; [Gue89]; [Hil98]; [Mül03]; [Sto04]; [Hay05] und Praxis, kann die elektrische Alterung des Isoliersystems von Niederspannungsmaschinen bei Speisung mit Umrichtern nicht mehr vernachlässigt werden. Hierbei wird insbesondere die Windungsisolierung elektrisch stark beansprucht, was zu Windungsschlüssen und somit zum Ausfall der Maschine führen kann. Gründe für die höhere elektrische Beanspruchung der Windungsisolierung bei Umrichterspeisung sind in den im Kapitel 2.2 bereits aufgeführten Besonderheiten bei Speisung der Maschinen mit Umrichtern zu suchen.

1. Es kommt zu einer zu Spannungsüberhöhungen an den Motorklemmen aufgrund von Wanderwellenvorgängen auf der Zuleitung zwischen Umrichter und Maschine.
2. Zum anderen kommt es zu einer nichtlinearen Spannungsverteilung in der Wicklung, welche in Verbindung mit dem „wildem Aufbau“ der Wicklung und den unter Punkt 1 genannten Spannungsüberhöhungen zu höherer elektrischer Belastung der Windungsisolierung führt.

Die elektrische Alterung kann nach Kahle in folgende Bestandteile unterteilt werden [Kah89]:

- Feldalterung
- elektrothermische Alterung
- TE-Alterung

Bei der Feldalterung werden die im Isolierstoff zur Verfügung stehenden freien Ladungsträger im elektrischen Feld beschleunigt, so dass diese bei entsprechender Bewegungsenergie durch Stoßprozesse chemische Bindungen aufbrechen können. Ähnlich wie bei der thermischen Alterung führt das zu Veränderung der elektrischen Eigenschaften des Isolierstoffes und somit zur Alterung [Kie81]. Das Versagen der Isolierung aufgrund der Feldalterung wird auch als elektrischer Durchschlag bezeichnet und erfolgt in der Regel nach wenigen Sekunden.

Im Betrieb befindliche Isolierstoffe erfahren auch eine elektrothermische Alterung. Dem Isolierstoff wird nämlich durch das angelegte elektrische Feld Energie zugeführt, welche in Form von Wärme wieder vom Isolierstoff abgegeben werden muss. Ist jedoch die zugeführte Wärmeleistung P_{zu} dauerhaft höher als die abgeführte Wärmeleistung P_{ab} , kommt es zum thermischen Versagen der Isolieranordnung. Das Versagen der Isolierung kann sich dabei von wenigen Minuten bis hin zu Stunden erstrecken. [Kah89]

Rechenberg stellt bei seinen Untersuchungen zur Lebensdauererminderung bei Niederspannungswicklungen und Umrichterspeisung fest, dass transiente Verschiebungsströme zur zusätzlichen Erwärmung der Isolierung führen, da diese vorwiegend über die Isolierung und nicht mehr über die Leitung fließen. Diese stellen sich aufgrund der steilen Spannungsimpulse und der kapazitiven Kopplung der Wicklungen nach der Formel (2.19)

$$i = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.19)$$

ein. Die zusätzliche Erwärmung der Isolierung durch dielektrische Verluste kann nach [Rec00] zur Verringerung der Lebensdauer führen.

Die Alterung des Isolierstoffes durch TE erfolgt durch lokale elektrische Entladungen im Isolierstoff. Die lokalen elektrischen Entladungen tragen insbesondere bei festen Isolierstoffen zur Alterung bei. Hierbei wird die Isolierung durch TE erodiert, es bilden sich verästelte Kanäle (electrical treeing) und es kommt zur irreversiblen Zerstörung des Isolierstoffes. Weiterhin bilden sich Spaltprodukte wie Ozon aus, die die Isolierung auch chemisch angreifen.

Untersuchungen von [Hi198] zeigen, dass die elektrische Belastung der Windungsisolierung bei Speisung mit Umrichtern bis zu siebenmal höher sein kann im Vergleich zur Speisung mit sinusförmiger 50Hz-Spannung. Aus dieser höheren elektrischen Belastung der Windungsisolierung können vor allem an den Stellen, wo sich Anfang und Ende einer Spule unmittelbar nebeneinander befinden, TE resultieren. Welche, abhängig von ihrer Intensität, Häufigkeit und Dauer, zur Alterung der Windungsisolierung führen.

Kaufhold zeigt in seinen Untersuchungen, dass die höhere elektrische Belastung der Windungsisolierung bei Umrichterspeisung zur einer evidenten Alterung der Windungsisolierung führt, wenn die elektrische Belastung so hoch ist, dass TE zwischen zwei benachbarten Windungen zünden können. Bei seinen Untersuchungen an Modellisolierungen (imprägnierte und parallel geführte

Drähte) unterteilt er die elektrische Alterung, hervorgerufen durch TE, in drei verschiedene Bereiche auf und stellt den Vergleich zur TE-Wahrscheinlichkeit her; siehe Abbildung 2.16.

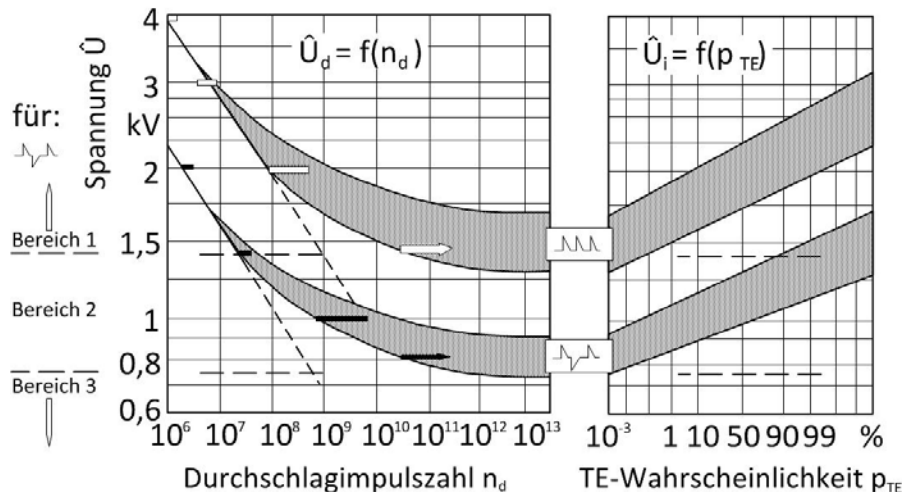


Abbildung 2.16: Durchschlagimpulszahl sowie die Verhaltensfunktion der TE-Wahrscheinlichkeit bei Beanspruchung mit alternierender bzw. unipolarer Impulsspannung nach Kaufhold [Kau95]

Im Bereich 1 mit einer TE-Wahrscheinlichkeit von 100% weisen die Durchschlagimpulszahlen, also die Anzahl der Spannungsimpulse, bis zum kompletten Versagen der Isolierung relativ kleine Streuung auf. Kaufhold begründet das damit, dass jeder der Spannungsimpulse zur TE führt und somit die Streuung der Durchschlagimpulszahl nur von der Wachstumsgeschwindigkeit der entscheidenden Fehlstelle, wie z. B. Isolierstoffdicke, abhängig ist.

Im Bereich 2 ist die Wachstumsgeschwindigkeit der Fehlstellen für die Streuung der Durchschlagimpulszahl nicht mehr ausschlaggebend, sondern der Einsetzprozess der TE ist die dominierende Größe für die Streuung der Werte. Nach Kaufhold kann die Streuung der Durchschlagimpulszahl aufgrund des Einsetzprozesses von TE nach der flächenhaften Verhaltensfunktion der TE-Wahrscheinlichkeit erläutert werden.

Im Bereich 3 erfuhren Modellprüfkörper, bei denen die TE-Wahrscheinlichkeit bei diesen Spannungen gegen Null geht, keine beachtenswerte Alterung. Prüfkörper, bei denen diese Spannungsebene (z. B. Prüfkörper mit geringeren Isolationsstoffdicken) zu TE führt, fielen jedoch rasch aus.

Kaufhold weist somit nach, dass bei impulsförmiger Spannungsbelastung der Windungsisolierung das Versagen der Isolierung auf TE zurückzuführen ist. [Kau95]

Des Weiteren stellt Kaufhold Lebensdauerkennlinien der Windungsisolierung bei sinusförmiger Wechselspannung und Umrichter-Spannung auf, siehe Abbildung 2.17. Hierbei weisen die Prüflinge, die mit der Umrichter-Spannung belastet wurden, ab einer bestimmten Grenzspannung deutlich geringere Durchschlagzeit auf als die Prüflinge, welche mit einer sinusförmigen Wechselspannung belastet wurden. Für diesen Fall stellt Kaufhold das Verhältnis der Durchschlagszeiten bei Wechsel- und Umrichter-Spannung auf. Dieses ist bei hoher Spannung (z. B. $\hat{U} = 2\text{kV}$) etwa gleich dem umgekehrten Verhältnis der Frequenzen. Für die Anzahl der Impulse bis zum Durchschlag ist die Folgefrequenz der Spannungsimpulse nach Kaufhold nicht entscheidend. [Kau95]

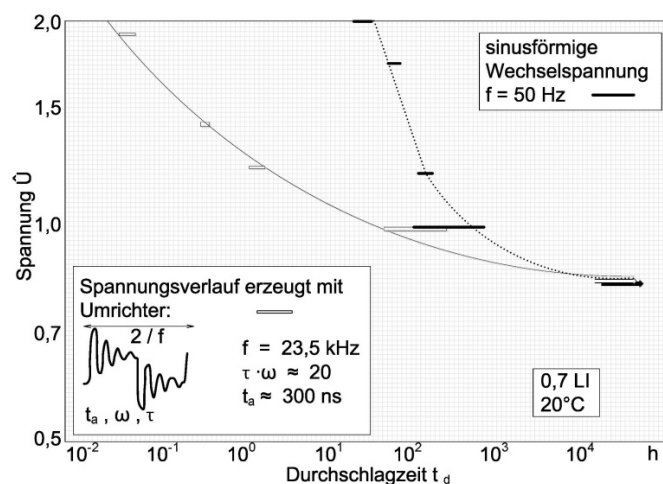


Abbildung 2.17: Vergleich der Lebensdauer unter impuls- und sinusförmiger Spannung nach Kaufhold [Kau95]

Hierbei stellt sich die Frage, ob bei komplexeren Anordnungen, z. B. Motoretten, es zu zusätzlicher thermischer Belastung der Isolierung durch die höheren Frequenzen kommt.

Untersuchungen von Guerra zeigten, dass die Ausfallzeit seiner Prüflinge (toroidförmige Modellspulen) eine Abhängigkeit von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse aufwies [Gue89]. Da seine Untersuchungen bei Impulsspannungen von 10kV stattfanden, bei denen man nach Kaufhold ausgehen kann, dass das Versagen der Prüfkörper durch TE herbeigeführt wird, stellt sich die Frage, ob unterschiedliche Anstiegszeiten von Spannungsimpulsen zur früheren TE-Einsatzspannungen führen, oder gar, ob sie zu Veränderungen in der Intensität oder Häufigkeit der TE-Impulse führen. Aus Sicht der TE-Messung als eine mögliche qualitätssichernde Prüfung ist dies ein wichtiger Aspekt. Da eine nicht passend ausgewählte Anstiegszeit der Spannungsimpulse zu unnötigen Fehleinschätzungen bei der Prüfung führen könnte.

Auch Kaufhold stellte eine Abhängigkeit der Ausfallzeit seiner Prüflinge von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse fest und bestätigte somit die Ergebnisse von Guerra. Kaufhold untersuchte auch die Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von den Anstiegszeiten der Spannungsimpulse und stellte eine Abhängigkeit fest. Die TE-Einsatzspannung nahm bei der Untersuchung an der Windungsisolierung mit geringeren Anstiegszeiten ab. **[Kau95]**

Andere Untersuchungen zur Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse ergaben jedoch abweichende Ergebnisse. So zeigen die Ergebnisse in **[Fen02]** dass die TE-Einsatzspannung mit steigender Anstiegszeit fällt. In **[Mor05]** durchgeführte Untersuchungen zeigen wiederum keinen Einfluss der Anstiegszeit auf die TE-Einsatzspannung. Man muss jedoch erwähnen, dass nicht alle Untersuchungen an Draht-Twisten durchgeführt wurden, sondern einige davon auch an kompletten Maschinen. Nichtsdestotrotz zeigen diese Widersprüche in den genannten Untersuchungen, dass bevor ein Einsatz von TE-Messungen als qualitätssichernde Maßnahme erfolgt, es grundlegende Untersuchungen bezüglich des TE-Verhaltens unter repetierenden impulsförmigen Spannungen von Motorisoliersystemen erfordert. Insbesondere müssen hierbei die Besonderheiten elektrischer Traktionsmotoren mitberücksichtigt werden.

Auch bei den Untersuchungen des TE-Verhaltens der Windungsisolierung in Abhängigkeit der Spannungsform (Sinus vs. Impuls) gibt es widersprüchliche Ergebnisse in der Literatur. So berichten Hayakawa und Okubo, dass die TE-Einsatzspannung 1,6–1,8 bzw. 2,3–2,7 mal höher ist im Vergleich zu einer sinusförmigen Prüfspannung, je nach untersuchtem Drahtdurchmesser; siehe Abbildung 2.18. **[Hay05]**

Dies widerspricht Müller, der in seinen Untersuchungen festgestellt hat, dass die TE-Einsatzspannung von der Spitze-Spitze-Spannung bestimmt wird und nicht von der Form der Spannung. **[Mül03]**

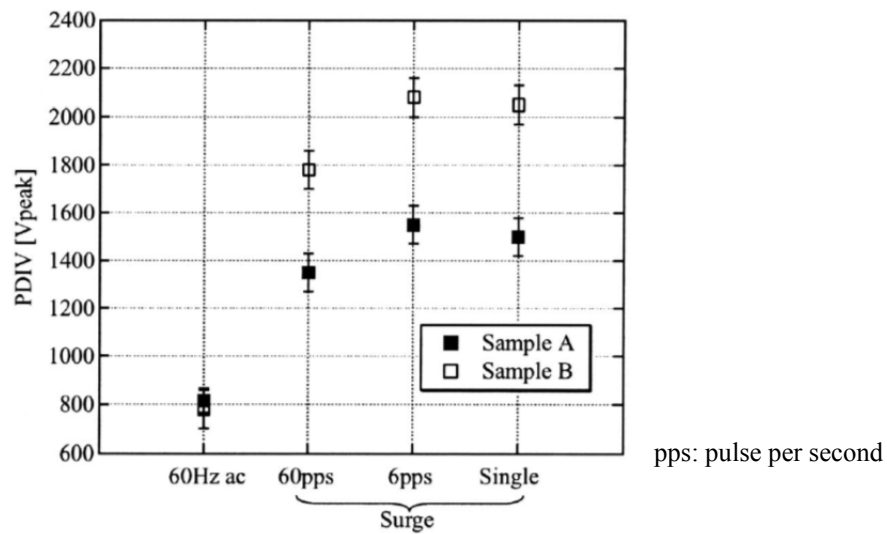


Abbildung 2.18: TE-Einsatzspannung bei Wechsel- und Impulsspannung (Impulsanstiegszeit 20ns) [Hay05]

Der Wissensstand über die Unterschiede des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung unter sinus- und impulsförmiger Spannung ist von großer Bedeutung für die TE-Messung an elektrischen Traktionsmotoren. Die TE-Messung bei sinusförmiger Prüfspannung hat sich längst als elektrotechnische Prüfung, vor allem in der Hochspannungstechnik, etabliert. Sollte es sich herausstellen, dass die TE-Einsatzspannung unabhängig von der Prüfspannung ist, dann müssten qualitätssichernde TE-Messungen nicht unbedingt unter impulsförmiger Prüfspannung durchgeführt werden. Dies hätte große Vorteile, sowohl bei der Durchführung der TE-Messung als auch bei der Interpretation der Ergebnisse, da auf die Erfahrungen der TE-Messung aus anderen Bereichen der Elektrotechnik zurückgegriffen werden könnte.

2.5 End of Line-Prüfungen

EoL-Prüfungen sind im Automotive-Bereich in allen Zweigen vertreten und dienen der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der hergestellten Komponenten oder Teil- und Gesamtsysteme nach dem Zusammenbau. In Prinzip finden EoL-Prüfungen von der Prototypenfertigung bis hin zur Serienfertigung Anwendung und sorgen somit für die Einhaltung der Qualitätsstandards von der Entwicklung der Produkte bis hin zur Serienanfertigung. Je nachdem, in welchem Stadium der Fertigung sich der Prüfling befindet, werden unterschiedliche Prüfungen durchgeführt. Hierunter fallen z. B. elektrische, mechanische aber auch akustische Prüfungen, die letztlich die Funktionsweise der Prüflinge nachweisen sollen. Da bisher im Automotive-Bereich keine Elektromotoren zum Antrieb

der Fahrzeuge eingesetzt wurden, jedenfalls nicht in vergleichbarer Stückzahl, wie das bei den Verbrennungsmotoren der Fall ist, müssen die EoL-Prüfungen dementsprechend angepasst bzw. neu entwickelt werden. Vor allem in Bezug auf die Überprüfung des Isolationssystems elektrischer Maschinen sind entsprechende Anstrengungen zu vollziehen. Daher ist es wichtig, geeignete Prüfungen, welche bereits erfolgreich im Bereich elektrischer Maschinen eingesetzt werden, zu adaptieren. Allgemeine Funktionsprüfungen von Isoliertsystemen elektrischer Maschinen sind in der IEC 60034-1 beschrieben. Dabei ist hierbei nicht die Rede von EoL-Prüfungen, sondern die Prüfungen werden in sogenannten Typ- und Stückprüfungen gegliedert.

Durch Typprüfungen werden Eigenschaften des Betriebsmittels nachgewiesen, die vornehmlich von den eingesetzten Materialien und derer Bauform abhängig sind. Somit wird sichergestellt, dass ein Betriebsmittel den im Betrieb auftretenden Beanspruchungen bei Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors standhält. Stückprüfungen hingegen werden zum Aussondern von fehlerbehafteten Betriebsmitteln während oder am Ende eines Fertigungsprozesses eingesetzt. **[Pat02]**

Die in Tabelle 2.6 gezeigten Isolationsprüfungen sind ein Teil der gängigsten Isolationsprüfungen elektrischer Maschinen und eignen sich prinzipiell sowohl als Typprüfungen als auch Stückprüfungen. Je nachdem, um welche Art sowie Baugröße der elektrischen Maschine es sich handelt, kommen unterschiedliche Prüfungen zum Einsatz. Ziel von Stückprüfungen ist es, wie oben bereits erwähnt, die Funktionsfähigkeit zu überprüfen sowie die fehlerbehafteten Maschinen auszusondern. Dabei kommt es darauf an, die Prüfzeit der Stückprüfung möglichst kurz zu halten und dennoch die nötigsten Informationen aus der Prüfung herauszuziehen. Im Bereich der Niederspannungsmaschinen sind die Prüfungen des Isolationswiderstandes sowie die Hochspannungsprüfungen die gängigsten Stückprüfungen, die zum Einsatz kommen.

Die Messung des Isolationswiderstandes erfolgt durch Messung des Durchgangsstromes bei bekannter, angelegter Gleichspannung. Diese liegt bei Niederspannungsmotoren zwischen 500V – 1000V. Idealerweise sollte der Isolationswiderstand möglichst groß sein und somit den Stromfluss zwischen Wicklung und Blechpaket verhindern. Der Isolationswiderstand ist jedoch stark von der Feuchtigkeit der geprüften Maschine abhängig. **[Han87]**

Tabelle 2.6 Isolationsprüfungen elektrischer Maschinen [Sto04]

Art der Prüfung	Beschreibung
<i>Isolationswiderstand R_{iso}</i>	Anlegen einer DC- Spannung für 1min; Messung des Leck- Stromes
<i>Hochspannungsprüfung AC</i>	Anlegen einer Hochspannung für 1min; $U_{test} = 2 \cdot U_n + 1000V$
<i>Hochspannungsprüfung DC</i>	Anlegen einer Hochspannung für 1min; $1,7 \cdot U_{test}(AC)$
<i>Stoßspannungsprüfung</i>	Anlegen einer Stoßspannung
<i>Kapazitätsmessung</i>	Kapazitätsmessung zwischen Wicklung und Stator-Blechpaket
<i>Verlustfaktormessung</i>	Messung der Isolationsverluste
<i>Polarisations-Index</i>	$PI = \frac{R_{iso10min}}{R_{iso1min}}$
<i>TE-Messung (Sinus)</i>	Messung der TE-Intensität und Häufigkeit bei Nennspannung

Ebenfalls ist eine starke Abhängigkeit des Isolationswiderstandes von der Temperatur gegeben, so dass dies bei der Durchführung der Prüfung beachtet werden muss. Wenn die Prüfung nicht immer bei gleicher Temperatur erfolgen kann, wird in vielen Fällen die Messung des Polarisationsindex vorgezogen. Hierbei kann der Temperatureinfluss auf die Prüfung minimiert werden. Die Hochspannungsprüfungen zählen zu den meist eingesetzten Prüfungen im Bereich der Isolationsprüfungen und erlauben die Detektion von Fehlern in der Hauptisolierung, die in geraumer Zeit zum Versagen der Isolation führen könnten. Hierbei gibt es nur zwei mögliche Ergebnisse, entweder die Maschine besteht die Prüfung oder es kommt zu einem Durchschlag und die Prüfung ist dementsprechend nicht bestanden. [Sto04]

In [Kli96]; [Sub06]; [Sub02]; [Tal07] werden weitere unterschiedliche Arten von Fehlerdetektionsverfahren bzw. Diagnose- und Monitoringverfahren sowie die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Eingrenzung der Fehler auf bestimmte Teile des Isoliersystems elektrischer Maschinen vorgestellt. Inwieweit sich die einzelnen Verfahren in einer EoL-Prüfung integrieren lassen, müsste entsprechend untersucht werden.

Die Qualifizierung sowie die Qualitätsprüfungen von Isoliersystemen elektrischer Maschinen, die von Umrichtern gespeist werden, werden in den Abschnitten 18–41 und 18–42 der IEC Norm 60034, die sich noch in der Entwurf-Phase befindet, dargestellt. Hierbei wird insbesondere auf die Qualifizierung und Typprüfung des Isoliersystems elektrischer Maschinen eingegangen, die einer von 50Hz-Netzspannung abweichenden Spannung ausgesetzt werden. In erster Linie geht es hierbei um den Nachweis, dass die eingesetzten Isolationsmaterialien der Spannungsbeanspruchung bei Umrichter-Betrieb standhalten können. Bei den Qualifizierungs-Prüfungen für Isolationsmaterialien wird unterschieden zwischen Isolationsmaterialien, die im Betrieb TE nicht ausgesetzt werden dürfen, und Isolationsmaterialien, die TE ausgesetzt werden dürfen. Hierbei werden Grenzwerte für die maximal auftretenden Spannungen definiert, bei denen die Prüflinge Teilentladungsfreiheit aufweisen müssen. Die Festlegung der maximal zulässigen Spannung erfolgt unter Berücksichtigung von Einflussparametern, wie z. B. Anstiegszeit der Impulse. **[IEC11a]; [IEC08]**

Inwieweit diese Vorgehensweise für EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren übernommen werden kann, muss noch untersucht werden. Bei dieser Vorgehensweise müssen die im Betrieb auftretenden Beanspruchungen bekannt sein, um die Parameter für die Prüfung festlegen zu können. Dies würde bedeuten, dass Traktionsmotorenhersteller, um die entsprechenden Kriterien für die Stückprüfung festlegen zu können, bereits über viele Merkmale des Betriebs verfügen müssen. Um nur ein paar der wichtigen zu nennen, müssten z. B. die Angaben, über welchen Umrichter-Typ die Antriebsmaschine gespeist wird, wie hoch die Anstiegszeiten der Spannungsimpulse sind und wie lang das Anschlusskabel ist, da dies ja, wie bereits in Kapitel 2 gezeigt, über die Beanspruchung des Isolationssystems mitentscheidet, bekannt sein. Dies führt dazu, dass der Einsatz der Traktionsmotoren immer auf bestimmte Betriebsmerkmale beschränkt sein müsste. Ein Baukastensystem, welches oft im Automotive-Bereich eingesetzt wird, wo Antriebsmotoren oder auch andere Komponenten in verschiedenen Konstellationen eingesetzt werden, wäre schwer zu realisieren. Hierbei müssten die Traktionsmotoren für die unterschiedlichen Konstellationen geprüft werden, was die Anzahl und somit auch die Kosten der Prüfungen erhöhen würde.

3. Versuchsmethodik

In diesem Kapitel soll die Vorgehensweise der in der Aufgabenstellung formulierten Untersuchungen gezeigt werden. Zunächst wird der Aufbau der für die Durchführung der angegebenen Untersuchungen verwendeten Prüfkörper dargestellt. Hierbei handelt es sich um zwei verschiedene Arten von Prüfkörpern. Zum einen werden sogenannten Draht-Twiste aufgebaut; diese ermöglichen es, Untersuchungen bezüglich des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung durchzuführen, und zum anderen werden Prüfkörper in Form von Motoretten aufgebaut; diese erlauben es, das Teilentladungsverhalten des Isolationssystems eines elektrischen Traktionsmotors im Verbund zu untersuchen. Anschließend werden der Aufbau eines Impulsgenerators und eines Hochspannungsverstärkers erläutert, welche zur Erzeugung von Spannungsimpulsen variabler Anstiegszeiten und Frequenz dienen. Als Abschluss dieses Kapitels soll das Messsystem für die Erfassung von Teilentladungen bei sinusförmiger Prüfspannung dargestellt und erläutert werden. Die Erfassung von TE bei impulsförmiger Prüfspannung ist mit diesem System nicht möglich, daher erfolgt gesondert die Vorstellung des TE-Messsystems zur Erfassung von TE bei impulsförmiger Prüfspannung.

3.1 Aufbau von Prüfkörpern

Modellprüfkörper gestatten es, einen Ausschnitt eines elektrischen Betriebsmittels einfach und kostengünstig abzubilden. Wichtig ist, dass die Modellprüfkörper den gewünschten Abschnitt eines Systems realitätsgetreu darstellen. Insbesondere sind geometrische Randbedingungen, Fertigungsverfahren sowie verwendete Materialien zu berücksichtigen. Nur so ist es möglich, mit den Modellprüfkörpern verwertbare Daten zu erlangen [Ber12] [VDE08]. In dieser Arbeit werden zwei Arten von Prüfkörpern verwendet. Zum einen werden sogenannte Draht-Twiste und zum anderen Motoretten verwendet. Im Nachfolgenden werden der Aufbau der genannten Prüfkörper sowie deren Qualifizierung beschrieben.

3.1.1 Aufbau von Draht-Twisten

Für die Untersuchung des Teilentladungsverhaltens an der Windungsisolierung unter impulsförmiger Prüfspannung stellen die Draht-Twiste eine kostengünstige und dennoch ausreichende Möglichkeit dar. Der Aufbau von Draht-Twisten erfolgt nach dem in der DIN EN Norm 60851-5 beschriebenen Verfahren. Hierbei wird ein ca. 400 mm langes Drahtstück über eine Länge von (125

± 5) mm mit sich selbst verdrillt. Hierfür wird die in Abbildung 3.1 dargestellte Verdrill-Vorrichtung verwendet.

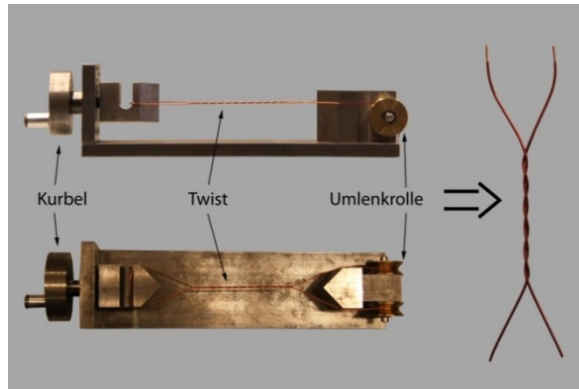


Abbildung 3.1: Verdrill-Vorrichtung zum Aufbau von Draht-Twisten

Die Anzahl der Verdrillungen hängt dabei vom Nenndurchmesser des Leiters ab. Zudem ist dabei zu beachten, dass beim Verdrillen des Drahtstückes eine, wie in Tabelle 3.1 angegeben, definierte Last verwendet wird. An den Enden des Drahtstückes ist die Isolierung zu entfernen. [DIN09]

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Typen von Draht-Twisten aufgebaut, dabei wurden verschiedene Kupferlackdrähte bezüglich des Leiterdurchmessers und der Isolationsdicke (zwei übereinanderliegende Lackschichten aus Polyester(imid) und Polyamidimid) verwendet. In der Tabelle 3.2 werden die verschiedenen verwendeten Leiterdurchmesser sowie Isolationsgrade der aufgebauten Twiste dargestellt.

Tabelle 3.1: Last am Drahtstück und Anzahl der Verdrillungen [DIN09]

Nenndurchmesser des Leiters [mm]		Last [N]	Anzahl der Verdrillungen
über	bis einschließlich		
0,100	0,250	0,85	33
0,250	0,355	1,70	23
0,355	0,500	3,40	16
0,500	0,710	7,00	12
0,710	1,060	13,50	8
1,060	1,400	27,00	6
1,400	2,000	54,00	4
2,000	2,500	108,00	3

Tabelle 3.2: Verwendete Draht-Twist Prüflinge

Bezeichnung des Prüflings	Leiterdurchmesser [mm]	Grad der Isolation	Anzahl der Verdrillungen	Imprägnierung
T067G1-12	0,67	G1	12	nein
T067G2-12	0,67	G2	12	nein
T105G1-8	1,05	G1	8	nein
T105G2-8	1,05	G2	8	nein
T112G2-6	1,12	G2	6	nein
T067G2-6	0,67	G1	6	nein
T112G2-12	1,12	G2	12	nein
T112G2-12(I)	1,12	G2	12	ja
T067G1-12(I)	0,67	G1	12	ja
T067G2-12(I)	0,67	G2	12	ja

Die Bezeichnung der Prüflinge soll anhand des unten angegebenen Beispiels erläutert werden:

T: Twist

067: Leiterdurchmesser in mm

T067G1-12(I)

G1: Grad der Isolierung

-12: Anzahl der Verdrillungen

(I): Imprägniert

Der Anfangsbuchstabe steht für die Art des Prüflings, in diesem Falle steht ein T für ein Draht-Twist. Dem Buchstaben folgt eine dreistellige Nummer, welche den Nenndurchmesser des verwen-

deten Kupferleiters darstellt. Der Folgebuchstabe G und die dazugehörige Zahl (1, 2 oder 3) gibt den Grad der Isolierung bzw. die Mindestlackdicke der Isolierung an. Abschließend folgen nach dem Bindestrich eine Zahl, welche die Anzahl der Verdrillungen des Draht-Twists angibt, sowie bei imprägnierten Draht-Twisten der Großbuchstabe I in Klammern. Die Art des Prüflings ist somit eindeutig definiert; zusätzlich werden dann die Prüflinge mit einer laufenden Nummer gekennzeichnet, so dass jeder Prüfling immer nachverfolgt werden kann. Insgesamt wurden zehn verschiedene Arten der Prüflinge aufgebaut. Diese Anzahl kam dadurch zustande, dass verschiedene Einflüsse wie z. B. die Geometrie der Lackdrähte, Anzahl der Verdrillungen, Imprägnierung usw. auf das Teilentladungsverhalten der Windungsisolierung untersucht wurde.

3.1.2 Aufbau der Motoretten

Im hier vorgestellten Fall soll das Isolationssystem im Stator eines elektrischen Traktionsmotors abgebildet werden. Die dafür aufgebauten Prüfkörper sind an die Norm VDE 0530-18-21 angelehnt. Dabei werden mit Hilfe von zwei unterschiedlich großen Blechen zwei Nuten nachgebildet, welche wiederum auf eine Grundplatte montiert sind; vergleiche Abbildung 3.2.

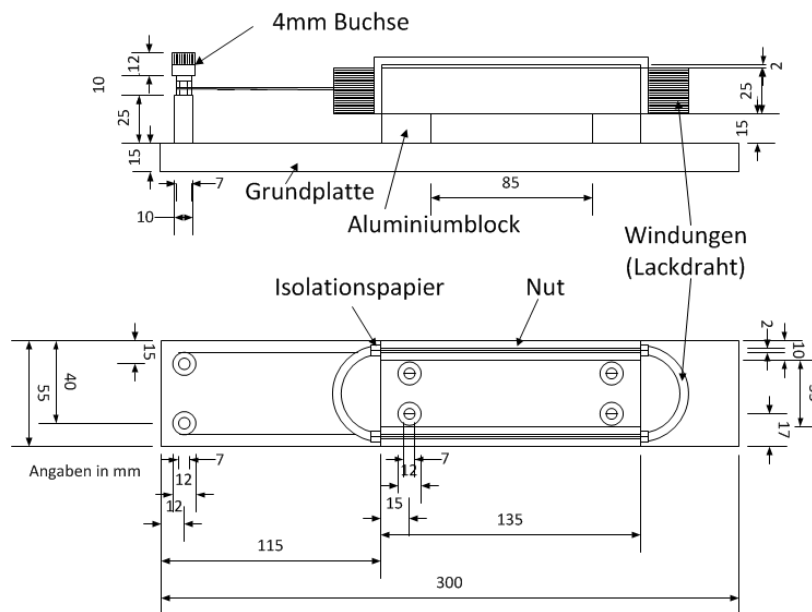


Abbildung 3.2: Beispiel einer Motorette nach VDE 0530-18-21 [VDE08]

Als Verbindungsstück zwischen Grundplatte und Nutenblech dienen zwei Aluminiumblöcke. Diese drei Komponenten werden miteinander elektrisch leitend verschraubt. Die Abmessungen und die Länge der Nuten orientieren sich am typischen Aufbau von Traktionsmotoren. Die Kontaktierung der Prüfkörper erfolgt über Standard-4mm-Buchsen. In die Nuten werden die Hauptisolierung,

bestehend aus einem Flächenisolierstoff sowie eine oder mehrere Wicklungen, eingelegt. Als Flächenisolierstoff wurde ein Mehrschichtflächenisolierstoff verwendet, bestehend aus einer Dreischichtisolation, bei der Polyesterfolie beidseitig mit Aramidpapier beklebt wird. Die Gesamtdicke des Flächenisolierstoffes beträgt 0,22mm, wobei die Aramidschicht jeweils 50µm ausmacht. Der Flächenisolierstoff ist für Dauergebrauchstemperaturen von 180°C ausgelegt und besitzt demnach die Isolierstoffklasse H. [Ber12] [VDE08] Für die Untersuchungen wurden verschiedene Typen von Motoretten gefertigt, deren besonderen Merkmale werden in der Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Tabelle 3.3: Verwendete Motoretten-Prüflinge

Bezeichnung des Prüf- lings	Leiter- durchmesser [mm]	Grad der Iso.	Anzahl der Spulen	Anzahl der Wind.	Phasen- Iso.	Imprägn.	w.W.
M067G1-1- 150-(I)	0,67	G1	1	150	/	nein/(ja)	/
M067G2-1- 150-(I)	0,67	G2	1	150	/	nein/(ja)	/
M067G1-1- 150-w-(I)	0,67	G1	1	150	/	nein/(ja)	Ja
M067G2-1- 150-w-(I)	0,67	G2	1	150	/	nein/(ja)	Ja
M067G1-2- 75o-(I)	0,67	G1	2	75	ohne	nein/(ja)	/
M067G1-2- 75m-(I)	0,67	G1	2	75	mit	nein/(ja)	/
M067G2-2- 75o-(I)	0,67	G2	2	75	ohne	nein/(ja)	/
M067G2-2- 75m-(I)	0,67	G2	2	75	mit	nein/(ja)	/

Die Bezeichnung der Prüflinge soll anhand des unten angegebenen Beispiels erläutert werden:

M:	Motorette	-150	Anzahl der Windungen
M067G1-1-150-w-(I)	067:	Leiterdurchmesser in mm	-w Wilde Wicklung
	G1:	Grad der Isolierung	-(I) Imprägnierung
	-1:	Anzahl der Spulen	

Wie bereits bei der Bezeichnung von Draht-Twisten soll auch hier der erste Buchstabe für die Art des Prüflings stehen, in diesem Fall M für Motorette, die gefolgte dreistellige Zahl für den Nenn-durchmesser des verwendeten Kupferleiters für den Aufbau der Spulen sowie der Buchstabe G und die dazugehörige Zahl (1, 2 oder 3) für die Lackzunahme. Gefolgt wird diese Bezeichnung nach einem Bindestrich wieder von einer Zahl (1 oder 2), diese gibt die Anzahl der eingelegten Spulen an. Abschließend folgt eine Zahl, die die Anzahl der Windungen der eingelegten Spulen repräsentieren soll, ein Kleinbuchstabe w, falls es sich um eine sogenannte „wilde“ Wicklung der Spulen handelt, was bedeuten soll, dass hierbei darauf geachtet wurde, dass der Anfang und das Ende der Spulen sich unmittelbar nebeneinander befinden, sowie der Buchstabe I in Klammern, falls die Motoretten imprägniert wurden. Zur Verdeutlichung: Bei der „wilden“ Wicklung handelt es sich um Prüfkörper, bei denen im Herstellungsprozess darauf geachtet wurde, dass es zu einer Berührung zwischen Anfang und Ende einer Spule kommt, um so das mögliche „worst case“-Szenario untersuchen zu können.

Imprägnierung der Motoretten

Zur Imprägnierung der Motoretten wurde ein verarbeitungsfertiges Einkomponenten-Tränkharz auf Basis ungesättigter Polyesterimidharze verwendet. Dieses eignet sich vor allem für den Einsatz in Elektromotoren, es entspricht der Wärmeklasse H und ist mit dem Strom-UV-Verfahren aushärtbar. **[TRH09]**

Die Imprägnierung der Motoretten erfolgt in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten nach dem Strom-UV-Verfahren. Zunächst einmal werden die Motoretten mit Hilfe von Strom auf eine Temperatur von 140°C–160°C vorgewärmt. Danach erfolgt die Eintauchphase der Motoretten, dabei werden die Motoretten für fünf Minuten in das Harz eingetaucht, bis keine aufsteigenden Luftblasen zu sehen sind; vergleiche Abbildung 3.3.



Abbildung 3.3: Imprägnierprozess

Die Stromzufuhr wird auch während der Eintauchphase aufrechterhalten, da aufgrund der geringen Masse der Prüfkörper diese recht schnell wieder auskühlen und die Harzaufnahme dadurch nicht gewährleistet wird. Danach werden die Motoretten aus dem Harz herausgenommen und zum Abtropfen über einen Auffangbehälter gehalten. Das Abtropfen ist mit zwei Minuten der schnellste Schritt, da das Harz sehr schnell anfängt zu gelieren und dadurch die Abtropfphase mit zwei Minuten recht kurz gehalten werden kann. Danach erfolgt dann das Aushärten des Harzes, welches wieder durch das Aufwärmen der Motoretten mit Strom geschieht, zusätzlich werden die Motoretten mit UV-Licht bestrahlt, um das Harz auf der Oberfläche schneller auszuhärten. [Ber12] Abschließend erfolgt eine Lagerung der Motoretten in einem Wärmeofen für 1 h bei 120°C. Um sicherzustellen, dass die Prüflinge während des Imprägnierprozesses auf die gewünschte Temperatur gebracht wurden, wurde der Imprägnierprozess mit einer Wärmebildkamera beobachtet. Die Aufnahmen einer Beispiel-Motorette sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Aufnahmen der Wärmebildkamera an der Beispielmotorette zeigen, dass die gewünschte Aushärtetemperatur im Wickelkopf der Wicklung erreicht wird. Da jedoch die Temperaturbestimmung innerhalb des Prüflings mit Hilfe einer Wärmebildkamera nicht möglich ist, wurden weitere Temperaturmessungen mit Temperatursensoren durchgeführt. Hierfür wurden bei mehreren Prüflingen Temperatursensoren an drei verschiedenen Stellen verbaut, die eine Temperaturmessung während des ganzen Imprägnierprozesses erlauben. Zwei der Temperatursensoren wurden jeweils in eine Nut-Seite untergebracht und einer der Temperatursensoren wurde im Wickelkopf untergebracht.

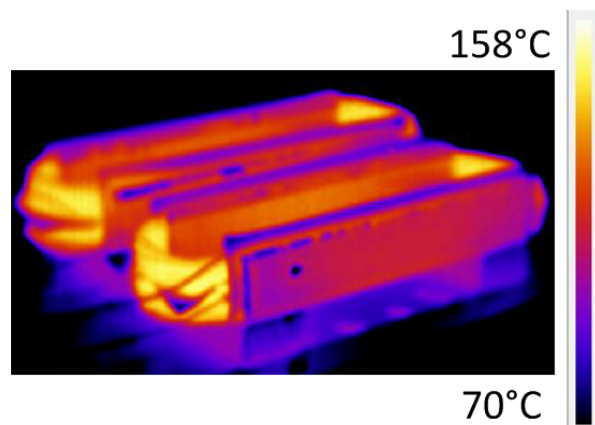


Abbildung 3.4: Aufnahmen der Motoretten während des Imprägnierprozesses mit einer Wärmebildkamera

Die Abbildung 3.5 zeigt den Temperaturverlauf einer Beispielmotorette während der Imprägnierphase.

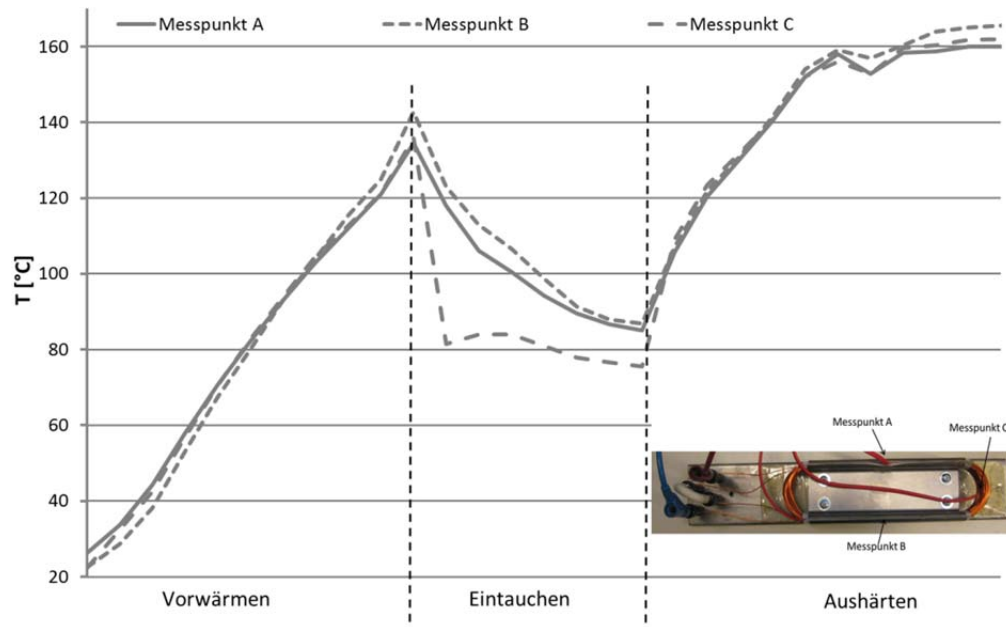


Abbildung 3.5: Temperaturverlauf an drei verschiedenen Messpunkten im Prüfkörper während der einzelnen Imprägnierphasen

Die Temperatur steigt während der Vorwärmphase gleichmäßig in allen drei Messpunkten an und erreicht nach wenigen Minuten die gewünschte Vorwärmtemperatur. Der Vorwärmphase folgt dann die Eintauchphase des Prüfkörpers, so dass die Temperatur trotz der aufrechterhaltenen Stromzufuhr anfängt zu sinken. Im Bereich des Wickelkopfes sinkt die Temperatur schneller ab als im Bereich der Nuten. Was auch logisch erscheint, da im Bereich des Wickelkopfes der Kupferlackdraht die Wärme direkt an das Harz abgeben kann, was im Bereich der Nuten durch das Isolationspapier und die Nutenbleche nicht der Fall ist. Während der abschließenden Aushärte-Phase gleichen sich die Temperaturen in allen drei Messpunkten rasch an und erreichen innerhalb kürzester Zeit die gewünschte Aushärtetemperatur, so dass zum einen davon ausgegangen werden kann, dass das Harz in allen Bereich des Prüflings gleich gut aushärten kann und zum anderen keine Schädigung des Isolationssystems durch überhöhte Temperaturen aufgrund eines Wärmestaus erfolgt, die eventuell die weiterführenden Untersuchungen beeinflussen könnte.

3.1.3 Qualifizierung der Prüfkörper

An den aufgebauten Prüfkörpern werden Teilentladungsmessungen durchgeführt, um das Teilentladungsverhalten bei impulsförmiger Prüfspannung zu untersuchen. Dabei ist wichtig, dass alle Prüfkörper gewisse Standards erfüllen. Insbesondere ist es wichtig, dass die aufgebauten Prüfkörper aus elektrotechnischer Sicht vergleichbare Eigenschaften aufweisen. Um Schäden an den Prüfkörpern auszuschließen sowie Aussagen über die Vergleichbarkeit der Eigenschaften machen zu können, wurden einige elektrische Messungen durchgeführt, welche nun vorgestellt werden.

Isolationswiderstand R_{iso}

Das Messen des Isolationswiderstandes gibt Aufschluss über das Vorhandensein von Trennstrecken in elektrischen Betriebsmitteln. Der Isolationswiderstand setzt sich aus einem Widerstandsnetzwerk zusammen, welches die unterschiedlichen Materialien sowie Oberflächen repräsentieren soll. Normalerweise setzt sich der Isolationswiderstand aus der Parallelschaltung des Durchgangs- sowie des Oberflächenwiderstandes zusammen. Dabei ist der Isolationswiderstand abhängig von der Leitfähigkeit des Materials sowie von der Oberflächenbeschaffenheit. **[Küc04]** Um sicherzustellen, dass die Motorettenprüfkörper keine Erd- bzw. Windungsschlüsse aufweisen, wurde der Isolationswiderstand der Prüflinge gemessen. Die Messung des Isolationswiderstandes erfolgte mit einem T Ω -Meter bei einer Gleichspannung von 2kV über eine Zeit von 60s. Dabei wurde die Spannung zwischen Wicklung und der auf Erdpotential liegenden Grundplatte sowie zwischen den Wicklungen angelegt.

Tabelle 3.4: Isolationswiderstand der Motoretten

Anschluss T Ω -Meter zwischen	W1-Erde	W2-Erde	W1-W2
Isolationswiderstand [G Ω]	>500	>500	>100

Wie der Tabelle 3.4 entnommen werden kann, liegt der Isolationswiderstand nach der Imprägnierung der Prüfkörper zwischen der Spule 1(2) und der auf Erdpotential liegenden Grundplatte über 500 G Ω und auch zwischen den Spulen selbst über 100 G Ω , was deutlich höher ist als der von der VDE Norm 0100 Teil 610 geforderte Wert für den Isolationswiderstand von ≥ 1 M Ω . Man kann also davon ausgehen, dass die Prüfkörper keine Erd- bzw. Windungsschlüsse aufweisen. Einzelne Prüfkörper wiesen einen Isolationswiderstand < 500 G Ω auf, diese Prüfkörper wurden nicht für die eigentlichen Untersuchungen verwendet. Hier bestand die Vermutung, dass die Isolation durch den

Herstellungsprozess stark beansprucht wurde und sich somit die abweichenden Ergebnisse ergeben haben. Es wurden jedoch auch an diesen Prüfkörpern dieselben Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss auf die eigentlichen Untersuchungen zu ergründen bzw. um festzustellen, ob auch solche Faktoren mit Hilfe der TE-Messung aufgezeigt werden können.

Verlustfaktor $\tan \delta$ und die Kapazität C

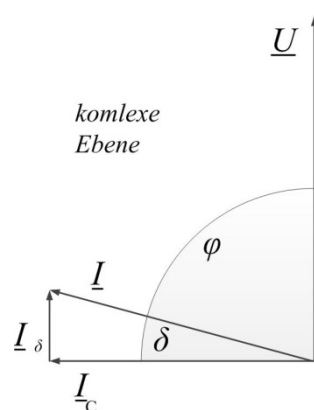


Abbildung 3.6: Verlustwinkel δ

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ gibt an, um welchen Verlustwinkel δ der Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung bei einem Dielektrikum an Wechselspannung von 90° abweicht; vergleiche Abbildung 3.6. Grund hierfür sind die Polarisations- sowie Leitfähigkeitsverluste.

Für den Verlustwinkel δ gilt:

$$\tan \delta = \frac{I_\delta}{I_c} \quad (3.1)$$

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ ist abhängig von der Temperatur, Feuchte sowie von der Frequenz. Die Feuchtigkeit führt zur Verlustfaktorerrhöhung aufgrund des sehr gut polarisierbaren Wassermoleküls sowie der Leitfähigkeitserhöhung. [Küc04]

Daher ist es entscheidend, dass die Prüfkörper vor einer Verlustfaktormessung unter einheitlichen Bedingungen konditioniert werden. Dieses wurde gewährleistet, indem die Prüfkörper vor der Durchführung der Messung in einer Klimakammer für 48 h bei 30°C und einer relativen Luftfeuchte von $\leq 20\%$ gelagert wurden. Die Verlustfaktormessung sowie die Kapazitätsmessung erfolgten mit dem Precision LCR Meter bei einer Spannung von 1V in Abhängigkeit der Frequenz. Die Messungen selbst wurden aufgrund des Herstellungsprozesses an unterschiedlichen Tagen durchgeführt, daher variierten die Umgebungsbedingungen bei der Durchführung der Messungen. Beispielsweise variierte die Temperatur zwischen 22°C – 25°C sowie die rel. Luftfeuchte von 35%–55%. Die Abbildung 3.7 zeigt die Ergebnisse für die Verlustfaktor- und die Kapazitätsmessung. Beispielhaft sind hier die Ergebnisse der Motorettenprüfkörper vom Typ M067-G2-1-150, M067-G2-1-150-w, M067-G2-1-150-(I) und M067-G2-1-150-w-(I), als Mittelwert aus jeweils 10 Prüf-

körpern mit der dazugehörigen Standardabweichung dargestellt. Generell kann beobachtet werden, dass die Imprägnierung, wie auch erwartet wurde, zum Anstieg der Kapazität und des Verlustfaktors führt. Weiterhin ist ein Anstieg der Messwertstreuung, sowohl für die Kapazität als auch für den Verlustfaktor, zu beobachten. Hierfür können unterschiedliche Faktoren verantwortlich gewesen sein. Zum einen tragen die Schwankungen in der Harzaufnahme der Prüflinge dazu bei. Dieses konnte durch Massebestimmung der Prüfkörper vor und nach der Imprägnierung festgestellt werden, wobei eine Schwankung von $< 10\%$ festgestellt werden konnte. Zum anderen kann die Anzahl der Luftporen zur Streuung der Messwerte beitragen. Es wurde der Versuch unternommen, den Anteil der Luftporen, die sich in der Gesamtkapazität der Prüflinge widerspiegeln sollten, zu untersuchen. Hierfür wurde die Kapazität in Abhängigkeit der Spannung bei 50 Hz mit Hilfe der Schering-Messbrücke gemessen.

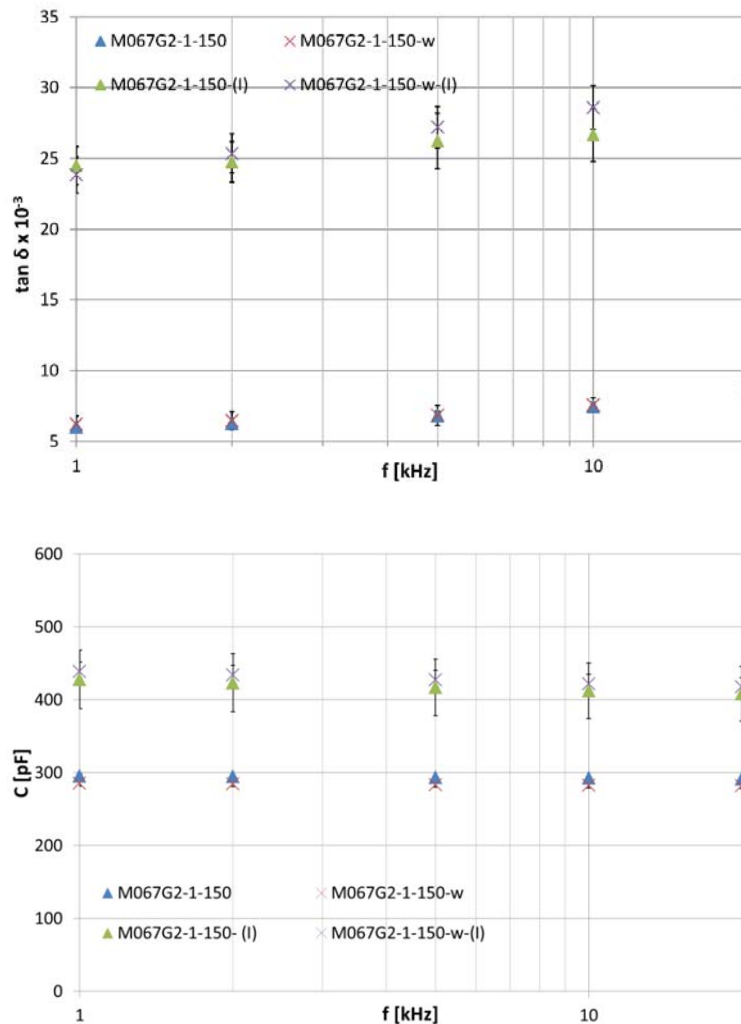


Abbildung 3.7: Ergebnisse der Verlustfaktormessung (oben) und Kapazitätsmessung (unten) an Motoreiten vom Typ M067G2-1-150-w-(I), Typ M067G2-1-150-(I) in Abhängigkeit der Frequenz

Dabei wurde die Annahme nach Farahani getroffen, dass im Falle von TE, die in den Lufteinschlüssen bei entsprechend hoher Spannung zünden, die „Luftkapazitäten“ eben durch diese Entladungen kurzgeschlossen werden. Somit würde in diesem Fall die Kapazität der Prüflinge nur durch die verwendeten festen Isolierstoffe gebildet werden. [Far07]

Abbildung 3.8 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung am Beispiel der Motorettenprüflinge vom Typ M067G2-1-150-w-(I) bei einer Spannung von 500V, 1000V und 4000V. Insgesamt wurden pro Spannungswert fünf Prüflinge vermessen, wobei die Spannung von 4000V in jedem Fall zu TE führt; vergleiche die Ergebnisse aus Kapitel 5.1. Es kann eine leichte Tendenz beobachtet werden, dass es im Falle von TE zu einem Anstieg der Kapazität kommt. Jedoch konnten keine statistisch gesicherten Ergebnisse gewonnen werden, so dass Aussagen über den Anteil der „Luftkapazität“ an der Gesamtkapazität der Prüflinge nicht eindeutig gemacht werden können. Des Weiteren kann beobachtet werden, dass vergleichbare Streuungen der Messergebnisse auch für eine Spannung von 4000V erzielt wurden, was unter der Voraussetzung, dass alle Lufteinschlüsse durch die Entladungen kurzgeschlossen wären, dafür sprechen würde, dass die Streuung der unten gezeigten Messwerte für die Kapazität nicht maßgeblich durch die Lufteinschlüsse geprägt wird.

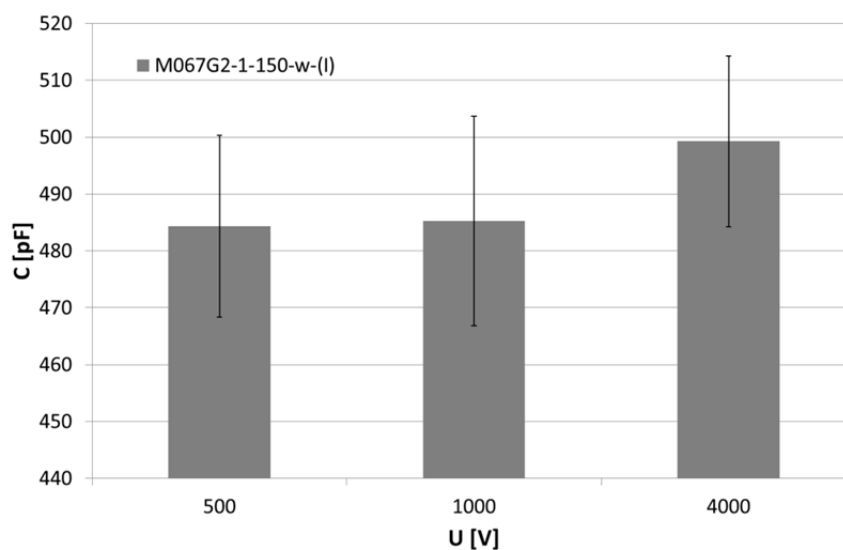


Abbildung 3.8: Ergebnisse der Kapazitätsmessung an Motoretten vom Typ M067G2-1-150-w-(I) in Abhängigkeit der Spannung

Wie zuvor bereits angedeutet, wurden die Messungen an unterschiedlichen Tagen durchgeführt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass zum Teil auch die Umwelteinflüsse einen Beitrag dazu

geleistet haben. Allerdings konnte an den nicht imprägnierten Prüflingen eine derartige Streuung der Messwerte nicht festgestellt werden.

Bei den Draht-Twisten konnte ein vergleichbares Verhalten festgestellt werden. Auch hier ist es zur Erhöhung der Kapazität bzw. des Verlustfaktors durch die Imprägnierung der Draht-Twiste gekommen; vergleiche Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10.

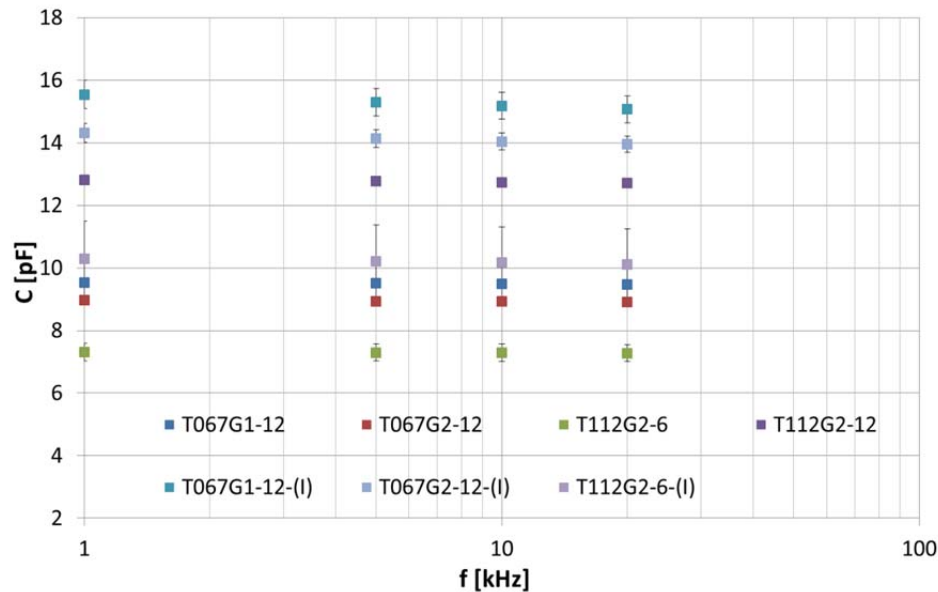


Abbildung 3.9: Ergebnisse der Kapazitätsmessung an Draht-Twisten in Abhängigkeit der Frequenz

Ebenfalls ist eine Zunahme der Messwertstreuung zu verzeichnen. Dabei wird die Größenordnung der Kapazität sowie des Verlustfaktors bei nicht imprägnierten Draht-Twisten maßgeblich von der Lackdicke, Anzahl der Verdrillungen bzw. Länge der Draht-Twist-Anordnung bestimmt. Bei Zunahme der Lackdicke ist eine Erhöhung der Werte zu verzeichnen bzw. bei Abnahme der Länge eine Verringerung der Werte. Dies kann mit Hilfe der Gleichung (3.2) für Zylinderkondensatoren nachvollzogen werden, da der Radius sowie die Länge des Zylinderkondensators direkten Einfluss auf die Kapazität nehmen.

- i. R_2 : Außenradius
 - ii. R_1 : Innenradius
 - iii. l : Länge
- $$C = 2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.2)$$

Die Gesamtkapazität einer Draht-Twist-Anordnung kann also als Reihenschaltung aus drei Kapazitäten betrachtet werden. Dabei setzen sich die Kapazitäten aus zwei Kapazitäten mit einem festem Dielektrikum, nämlich dem Lack, und einer Kapazität mit einem gasförmigen Dielektrikum, also Luft, zusammen. Bei Imprägnierung der Draht-Twiste wird die Luft vom Harz verdrängt, so dass es entsprechend zur Erhöhung der Kapazität kommt. Je nachdem, wie viel Harz der Luftspalt aufnimmt bzw. wie viele Lufteinschlüsse vorhanden sind, wirkt sich das auf die Kapazitätshöhe aus. Dies begründet die Erhöhung der Messwertstreuung nach der Imprägnierung der Draht-Twiste.

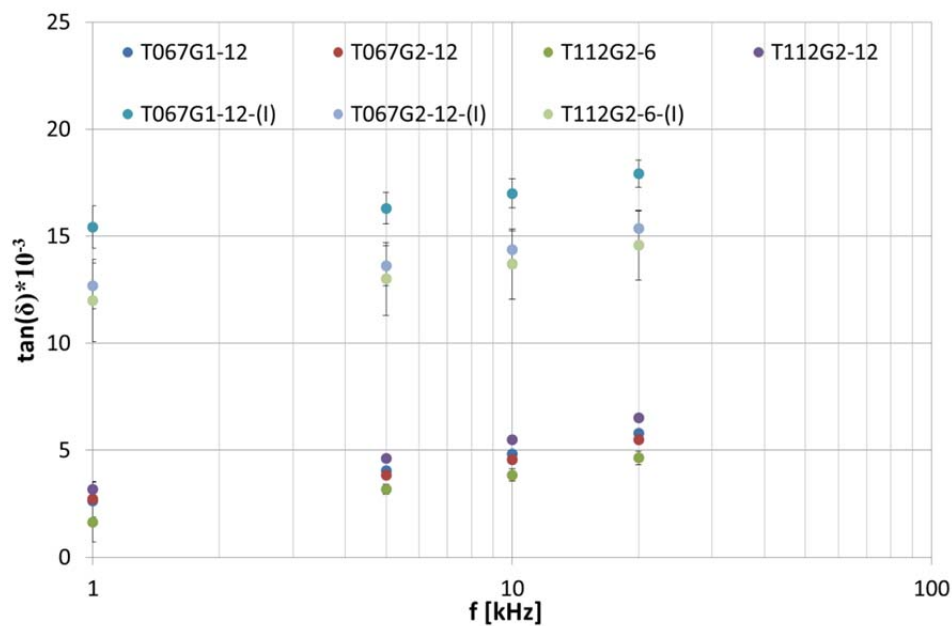


Abbildung 3.10: Ergebnisse der Verlustfaktormessung an Draht-Twisten in Abhängigkeit der Frequenz

In Anbetracht dessen ist davon auszugehen, dass der Imprägnierprozess den größten Einfluss auf die dargestellten Eigenschaften und deren Streuung darstellt. Für die eigentlichen Untersuchungen zum TE-Verhalten bedeutet das, dass die Streuung der Prüflingeigenschaften, insbesondere der imprägnierten Prüfkörper, Einfluss auf die Messungen nehmen kann. Da jedoch die Untersuchungen des TE-Verhaltens sich in erster Linie auf die Unterschiede zwischen sinus- und impulsförmiger Spannung erstrecken, ist davon auszugehen, dass beide Messungen in gleichen Maßen beeinflusst werden. Außerdem ist eine gewisse Streuung der Prüflingeigenschaften auch bei Niederspannungs-Drehstrommaschinen gegeben, da kein Imprägnierprozess ermöglichen kann, dass vom Prüfling immer die exakte Menge an Harz aufgenommen wird, und dass Lufteinschlüsse ausgeschlossen werden können.

3.2 Erzeugung von Spannungsimpulsen

Für die Untersuchung des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung an Draht-Twisten, aber auch für die Untersuchung des Teilentladungsverhaltens des Motorisoliersystems im Verbund unter impulsförmiger Prüfspannung, ist es vonnöten, Spannungsimpulse zu erzeugen, die in ihrer Anstiegszeit, Dauer und Wiederholrate variabel sind. In der Norm IEC 61934 Elektrische Isolierstoffe und Systeme – Elektrische Messungen von Teilentladungen bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit – werden für Impulsgeneratoren die in der Tabelle 3.5 zusammengefassten Eigenschaften vorgeschlagen [IEC11b]:

Tabelle 3.5: Parameterwerte für impulsförmige Spannungen ohne Belastung [IEC11b]

Parameter	Bereich
Anstiegszeit	0,04 bis 1 μ s
Wiederholrate	1 bis 1000 Hz
Impulsdauer	0,08 bis 25 μ s
Form	rechteck- oder dreiecksförmig
Polarität	unipolar oder bipolar

Der vom Impulsgenerator erzeugte Störpegel sollte die Teilentladungsmessung nicht beeinflussen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass der Impulsgenerator die nötigen Eigenschaften bezüglich der Impulsform, Dauer und Anstiegszeit auch unter Last erzeugen kann, da die Impulsform auch von der Impedanz des Prüflings abhängig ist. [DIN11]

Im Rahmen dieser Arbeit standen drei verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, die es ermöglichen, Spannungsimpulse variabler Anstiegszeit, Dauer und Wiederholrate zu erzeugen. Diese sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

Impulsgenerator

Wie oben schon beschrieben, ist zur Untersuchung des Teilentladungsverhaltens von Motorisoliersystemen ein Impulsgenerator erforderlich. Der im Folgenden vorgestellte Impulsgenerator wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [Gei12] am Fachgebiet Anlagen- und Hochspannungstechnik an

der Universität Kassel entworfen und aufgebaut. Der grundlegende Ablauf der Impulsspannungserzeugung ist in Abbildung 3.11 dargestellt. Zur Erzeugung der Spannungsimpulse dient eine Gleichspannungsquelle, die sich stufenlos zwischen 0 und 13kV regeln lässt. Der Impulsgenerator schaltet das von der Gleichspannungsquelle zur Verfügung gestellte Spannungssignal nach dem vom Frequenzgenerator vorgegebenen Muster. Dabei können nur unipolare Spannungsimpulse erzeugt werden.

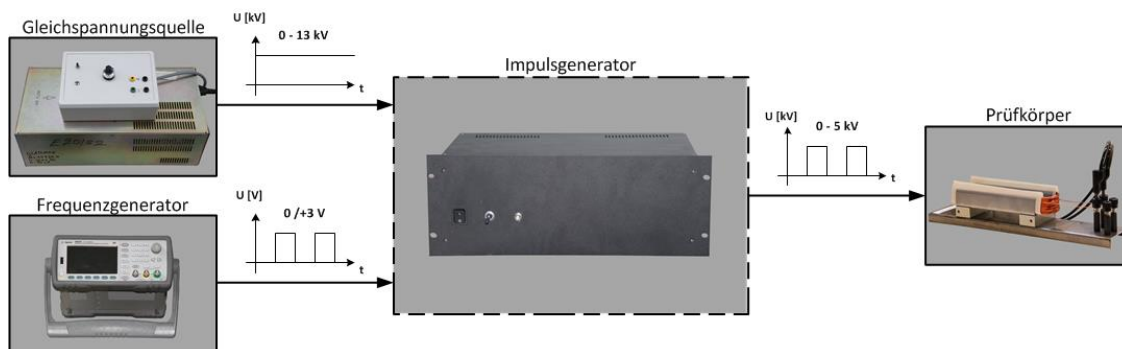


Abbildung 3.11: Erzeugung der Spannungsimpulse

Als Schaltelemente wurden IGBTs vom Typ IRG4PH40UD verwendet. Wie in Abbildung 3.12 zu sehen, werden insgesamt sechs in Reihe geschaltete IGBTs verwendet, um Spannungsimpulse mit Amplituden von bis zu 5 kV schalten zu können. Die IGBTs sind mit einer RC-Beschaltung versehen, um eine asymmetrische Spannungsverteilung über die IGBTs zu vermeiden. Die Ansteuerung der Halbleiterschalter erfolgt durch die Gate-Treiber-Schaltung. Die Variation der Anstiegszeiten wird durch Zu- und Abschalten von Gate-Widerstände realisiert.

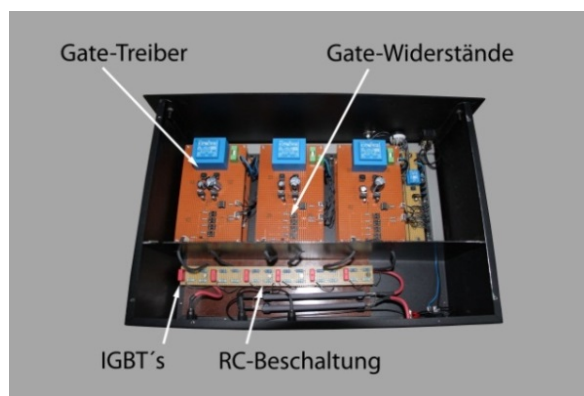


Abbildung 3.12: Impulsgenerator

In der Tabelle 3.6 sind die möglichen Anstiegszeiten des Impulsgenerators unter und ohne Last zusammengefasst. Ohne Last können Anstiegszeiten von 38ns–780ns erreicht werden. Durch Belastung mit einem Draht-Twist wird der Bereich der möglichen Anstiegszeiten aufgrund der geringen Kapazität der Draht-Twiste nur unwesentlich verändert. Mit Motoretten als Last kann dann noch ein Bereich von 105ns–1µs abgedeckt werden. Die mögliche Wiederholrate (Frequenz) der erzeugten Impulse beträgt ohne Last maximal 4kHz und mit Last 2kHz. Wobei die Frequenz der Spannungsimpulse abhängig vom eingestelltem Duty-Cycle, also der eigentlichen Dauer der Impulse, ist. Die Tabelle 3.7 zeigt die erreichbaren Frequenzen der Spannungsimpulse in Abhängigkeit des Duty-Cycle der Spannungsimpulse.

Tabelle 3.6: Anstiegszeiten Impulsgenerator

Anstiegszeit	Bereich [ns]
ohne Last	38 – 780
Twist als Last	50 – 780
Motorette als Last	105 – 1000

Tabelle 3.7: Maximale Frequenz in Abhängigkeit der Impulsdauer

Duty-Cycle [%]	50	40	30	20	10	5	1	0,1
f_{\max} ohne Last [kHz]	2,3	2,8	3,3	3,8	4,7	4,5	4,7	4,7
f_{\max} mit Last [kHz]	1,2	1,4	1,7	1,9	2,2	2,3	2,4	2,4

Hochspannungsverstärker

Eine weitere Möglichkeit, Spannungsimpulse zu erzeugen, stellt ein Hochspannungsverstärker dar. Dieser ist in der Lage, vorgegebene Spannungsimpulse im Bereich von -10kV bis +10kV zu verstärken. Dabei kann der Hochspannungsverstärker Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten von 0,7kV/µs erzielen und Frequenzen von bis zu 20kHz übertragen.

Der Hochspannungsverstärker wurde zusammen mit einem Funktionsgenerator verwendet, welcher die zu verstärkenden Spannungssignale liefert. Mit der Anordnung aus Funktionsgenerator und Hochspannungsverstärker ließen sich sowohl verschiedene Spannungsformen (Sinus, Rechteck, Sägezahn) als auch verschiedene Spannungsimpulse (uni- und bipolare Impulse) erzeugen. Dabei wurden Spannungsimpulse mit Amplituden bis zu 10kV bei Frequenzen von bis zu 20kHz erreicht. Die Anstiegszeiten der Spannungsimpulse konnten vom zweistelligen µs- Bereich (10µs) bis in den ms-Bereich eingestellt werden.

3.3 Teilentladungsmessung bei sinusförmiger Prüfspannung

Die Teilentladungsmessungen unter sinusförmiger Prüfspannung erfolgt nach dem in der IEC Norm 60270 beschriebenen Messverfahren. Der gesamte Messaufbau ist in der Abbildung 3.13 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus der Spannungsversorgung, TE-Messsystem [DAT1] sowie einer Prüfkammer. Die Prüfspannung kann mit Hilfe des eingesetzten Hochspannungswandlers im Bereich von 0V bis 5kV eingestellt werden. Die Regelung der Prüfspannung erfolgt über einen Stelltransformator (0V bis 230V), welcher über eine Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) gesteuert wird. Dabei ist es möglich, die Prüfspannung manuell oder automatisch auf einen bestimmten Spannungswert einzustellen. Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit der Prüfspannung vorzugeben.

Zwei Kondensatoren von jeweils 2nF stehen als Koppelkondensatoren zur Verfügung und können bis zu einer Spannung von 10kV eingesetzt werden. Die Teilentladungsimpulse sowie die Prüfspannung werden über einen Ankopplungsvierpol, wie bereits im Kapitel 2.3.2 erklärt, aufgenommen und dem TE-Messgerät zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wird die Spannung über dem Prüfling mit einem Hochspannungstastkopf gemessen und am Oszilloskop dargestellt. Der gesamte Prüfaufbau ist bis zu einer Spannung von 5kV teilentladungsfrei, was für die durchgeführten Untersuchungen vollkommen ausreichend ist. Der Grundstörpegel des gesamten Aufbaus bei den hier untersuchten Prüflingen lag bei einer Intensität von $Q_s \leq 1\text{pC}$. Somit konnte eine Kalibrierung des TE-Messkreises bei 5pC erfolgen.

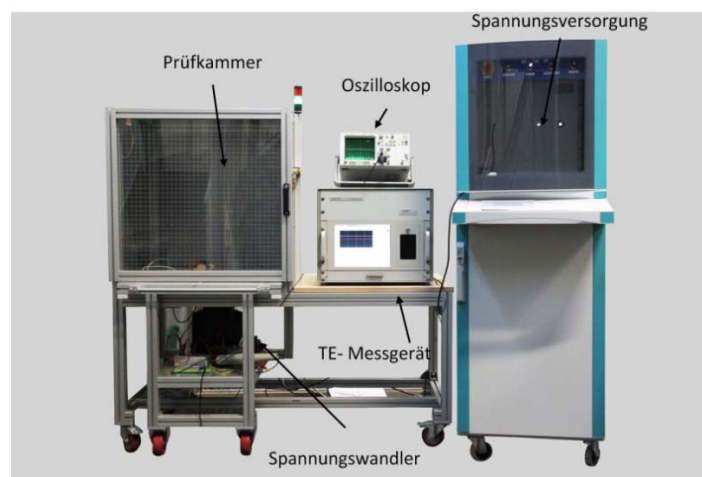


Abbildung 3.13: TE-Messkreis nach der IEC Norm 60270

Die Durchführung der TE-Messung erfolgt, indem die Prüfspannung mit einer definierten Anstiegsgeschwindigkeit von 50V/s (100V/s), abhängig vom Prüfling, bis zu einem ersten Einsetzen von TE gesteigert wird. Das erste Einsetzen von TE ist dann gegeben, wenn das Messsystem TE erfasst, die mindestens fünfmal höher sind als der Grundstörpegel. Dies entspricht einem TE-Pegel von 5pC. Hiermit kann ausgeschlossen werden, dass Rückwirkungen vom Stelltransformator, welche während der Spannungssteigerungsphase auftreten können und sich im Bereich von 1pC–2pC bewegen, nicht als ein möglicher TE-Einsatz gewertet werden. Beim Feststellen des ersten TE-Einsatzes wird die sogenannte Teilentladungseinsetzspannung U_{TEE} aufgenommen sowie die Entwicklung der TE über einen Zeitbereich von 10s. Die Aufnahme der TE-Entwicklung über die Zeit ist vor allem für die Einordnung der TE zur TE-Quelle von großer Bedeutung. Damit können selbst nach der eigentlichen TE-Messung durch Interpretation der TE-Bilder (auch TE-Pattern genannt), Rückschlüsse über den möglichen TE-Ort oder Art der TE gemacht werden. Anschließend wird die Prüfspannung wieder heruntergefahren, bis der TE-Pegel wieder auf den Grundstörpegel abgefallen ist. Hierbei wird die sogenannte Teilentladungsaussetzspannung U_{TEA} aufgenommen.

Das hier gezeigte TE-Messsystem wurde für die TE-Messung unter sinusförmiger Prüfspannung verwendet. Die Ergebnisse dieser TE-Messungen dienen als Referenz-Messungen zu den eigentlichen Untersuchungen des TE-Verhaltens von Motorisoliersystemen von elektrischen Traktionsmotoren unter impulsförmiger Prüfspannung. Die Durchführung der TE-Messungen unter impulsförmiger Prüfspannung ist mit diesem TE-Messsystem nicht möglich. Daher bedarf es anderer TE-Messmethoden, welche nun gesondert beschrieben werden.

3.4 Teilentladungsmessung bei impulsförmiger Prüfspannung

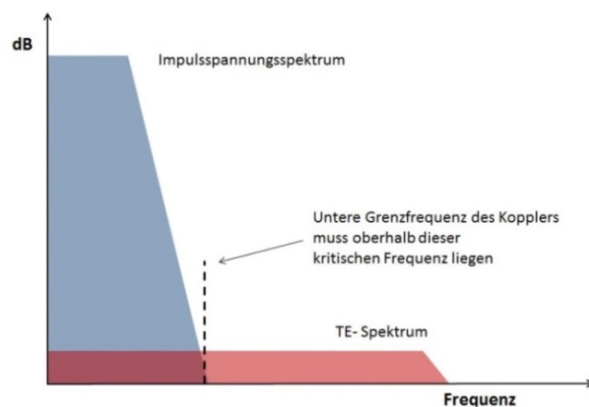
Im Kapitel 2 ist bereits auf die Besonderheiten der TE-Messung unter impulsförmiger Prüfspannung eingegangen worden, daher beschränkt sich dieses Kapitel lediglich auf die Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Messsysteme zur Erfassung von TE unter impulsförmiger Prüfspannung.

Erfassung von TE mit Hochfrequenzstromwandlern (HFCT)

Wie bereits in den Grundlagen dargestellt, stellt die Messung von TE bei impulsförmiger Prüfspannung höhere Anforderungen im Vergleich zur TE-Messung bei sinusförmiger Prüfspannung. Somit ist das Anwenden der in der IEC Norm 60270 beschriebenen Messschaltung für die Messung von TE bei impulsförmiger Prüfspannung nicht möglich. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Störung der eigentlichen TE-Messung durch die Spannungsimpulse selbst. Am besten veranschaulichen lässt sich das Problem beim Anschauen des Amplitudenspektrums der Spannungs- und TE-Impulse; siehe Abbildung 3.14. Wie allgemein bekannt ist, lässt sich sagen, dass Impulse mit sehr kurzer Dauer und Anstiegszeit ein sehr breites Amplitudenspektrum haben. So gilt z. B. typischerweise für den Dirac-Impuls, der einen unendlich steilen Impuls darstellt, dass dieser ein Amplitudenspektrum mit allen Frequenzen

konstanter Amplitude besitzt. Aufgrund der sehr kurzen Dauer von TE-Impulsen sowie den sehr kurzen Anstiegszeiten (einstelliger ns-Bereich) der TE-Impulse, kann davon ausgegangen werden, dass das Amplitudenspektrum der TE-Impulse im Vergleich mit den Spannungsimpulsen weitaus mehr Frequenzanteile beinhaltet. So wird es, wie in Abbildung schematisch dargestellt, einen Bereich geben wo sich die Amplitudenspektren der TE-

Abbildung 3.14: Amplitudenspektrum der Spannungs- und TE-Impulse [IEC11b]



und Spannungsimpulse überschneiden. In diesem Bereich ist es nicht möglich, die TE-Impulse von den Spannungsimpulsen zu unterscheiden, da die TE-Impulse aufgrund der deutlich niedrigeren Spannungsamplituden (mV-Bereich) im Vergleich zu den Spannungs-Impulsen (V-kV-Bereich) als Rauschen untergehen würden. Im höheren Frequenzbereich jedoch, wo die Spannungs-Impulse keine Frequenzanteile oder nur mit niedriger Amplitude ausgeprägte Frequenzanteile beinhalten, ist die Detektion der TE-Impulse möglich. Daher ist für die Erfassung von TE ein Koppler von Nöten, der möglichst eine untere Grenzfrequenz oberhalb dieser kritischen Grenzfrequenz aufweist. Ist dies nicht der Fall, so ist dafür zu sorgen, dass Mithilfe der Filtertechnik der Störbereich unterdrückt wird [IEC11b]. Die Erfassung der TE-Impulse mittels HFCT kann im Prinzip als ein System beschrieben werden, bei dem zum einen der Strom eines stromdurchflossenen Leiters den Eingang darstellt und zum anderen der Ausgang des Systems dabei der induzierte Spannungsabfall über dem Widerstand ist. Der Widerstandswert beträgt dabei typischerweise 50Ω. [Rod11]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedenen HFCT und Filter in der TE-Messschaltung erprobt, angefangen von eigens gefertigten HFCT mit Kernen aus unterschiedlichen Materialien bis hin zu käuflich erworbenen HFCT oder auch „current probes“ genannt. Die Auswahl der richtigen Anordnung erfolgte immer unter den gleichen Gesichtspunkten: Es war gefordert, dass der Grundstörpegel $<10\text{mV}$ ist, und dass die Störungen der unterschiedlich verwendeten Spannungsquellen keinen Einfluss auf die TE-Messung haben. Als geeignete Lösung hat sich dann ein käuflich erworbener HFCT mit einem Frequenzbereich von $1\text{MHz}–1000\text{MHz}$ herauskristallisiert [OPM09]. Weitere wichtige elektrische sowie physikalische Parameter des hier in dieser Arbeit verwendeten HFCT werden in folgender Tabelle 3.8 aufgeführt:

Tabelle 3.8: Elektrische und physikalische Parameter des verwendeten HFCT

elektrische Parameter		physikalische Parameter	
Frequenzbereich	1MHz – 1000MHz	Außendurchmesser	71mm
Strombereich	bis 20A (Impulse bis 50A)	Dicke	19mm
Maximale Spannung	keine Begrenzung	Öffnungsdurchmesser	32mm
Kalibrierte Impedanz	$50+/-j0\Omega$		
Sensitivität	$0,07\mu\text{A}$ bei $1\mu\text{V}$ Empfänger		

Zur Unterdrückung der Störungen wurden verschiedene Hochpassfilter mit Grenzfrequenzen von 1MHz, 10MHz, 50MHz und 400MHz eingesetzt. Dabei konnte der Grundstörpegel bei eingeschalteter Spannungsversorgung bis unter 5mV mit dem Hochpassfilter, dessen Grenzfrequenz 400MHz betrug, gefiltert werden; vergleiche Abbildung 3.15. Dies hatte jedoch den Nachteil, dass auch die TE-Impulse unterdrückt wurden, was mit den TE-Messungen an Draht-Twisten festgestellt werden konnte. Hierbei lag die TE-Einsatzspannung der Draht-Twiste ca. $100\text{V}–150\text{V}$ über der TE-Einsatzspannung, welche mit dem Hochpassfilter erzielt wurde, dessen Grenzfrequenz nur 50MHz betrug. Offensichtlich konnten mit der Grenzfrequenz von 400MHz erst Entladungen erfasst werden, deren Intensität der Entladungen einen bestimmten Pegel überschritten haben. Bei den Filtern mit Grenzfrequenzen unterhalb von 50MHz war hingegen der Grundstörpegel doppelt so hoch (40mV peak-peak), so dass ebenfalls die TE-Impulse eine höhere Intensität erreichen mussten, bevor diese detektiert werden konnten. Somit hat sich der Hochpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 50MHz als ein guter Kompromiss zwischen der Unterdrückung von Störungen und einer aus-

reichenden Sensitivität der Messung gezeigt. Des Weiteren sind somit die in der Norm IEC 61934 angegebenen Grenzwerte für den Grundstörpegel ($U_{\text{rmax}} < 10\text{mV}$) sowie die Detektion von TE mit der Intensität ($U_{\text{imin}} > 100\text{mV}$) erfüllt [IEC11b].

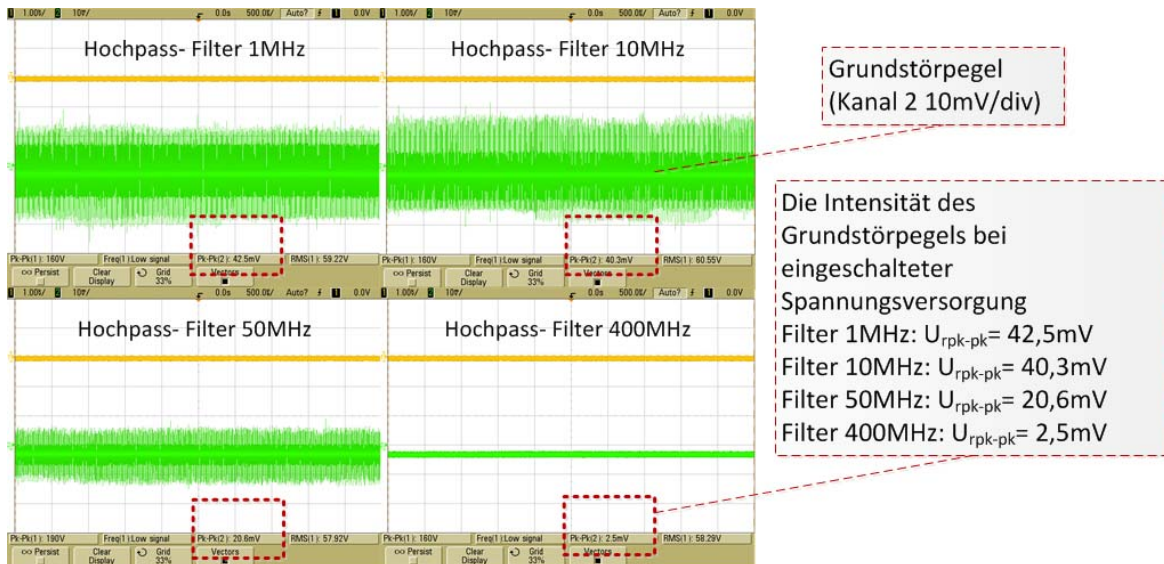


Abbildung 3.15: Unterdrückung des Grundstörpegels mittels Filter

Die mit dem HFCT detektierten TE können dann am Oszilloskop (Bandbreite 1 GHz; Abtastrate 20Gs/s) dargestellt werden. In Abbildung 3.16 sind zwei TE-Bilder dargestellt, die mit dem hier gezeigten HFCT aufgenommen wurden. Die Messung wurde bei einer 50-Hz Sinus-Spannung und typischen Anordnungen, nämlich einer Spitze-Platte-Anordnung sowie einer Draht-Twist-Anordnung aufgenommen. Im Vergleich hierzu wurden die gleichen Messungen auch mit dem herkömmlichen TE-Messverfahren, siehe Kapitel 3.3, durchgeführt. Es können vergleichbare TE-Bilder beobachtet werden, so dass zunächst einmal davon ausgegangen werden kann, dass die Ergebnisse der beiden TE-Messverfahren miteinander verglichen werden können. Zumindest sehen die TE-Bilder in Bezug zur Phasenlage der Spannung identisch aus, woraus abgeleitet werden kann, dass es sich bei den hier gemessenen TE um dieselbe Art der Entladungen handelt. Eine Vergleichbarkeit der Intensität sowie der Häufigkeit der detektierten Entladungen zwischen den zwei unterschiedlichen Messverfahren lässt sich jedoch nicht ohne Weiteres anstellen.

Theoretisch lassen sich, wie in [Rod11] beschrieben, Vergleiche zwischen den gemessenen TE-Spannungsimpulsen und der Ladung Q der TE-Spannungsimpulse ziehen. Der Ausgang eines Systems, in diesem Fall $u(t)$, kann bei bekanntem Eingang, in dem Fall $i(t)$ sowie bekannter Übertragungsfunktion $h(t)$ des Systems, nach der Formel (3.3) bestimmt werden kann.

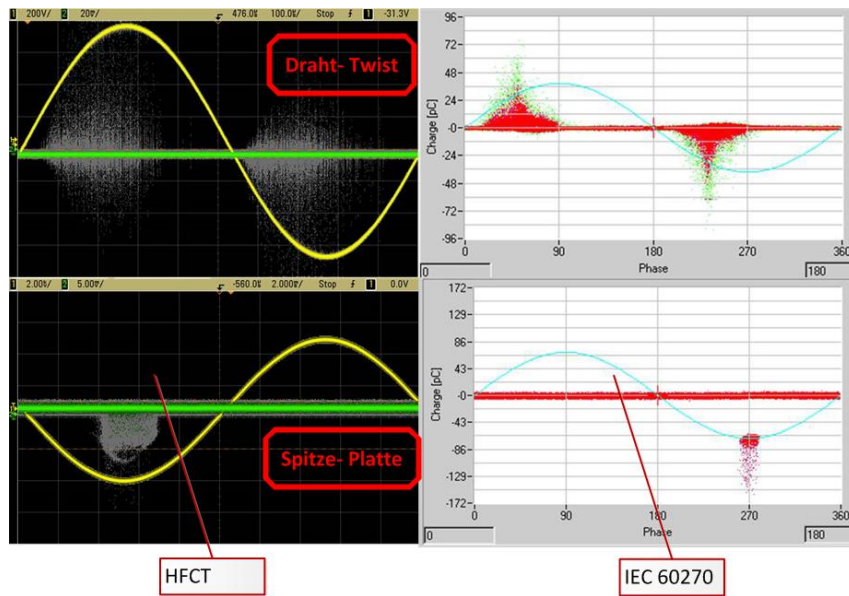


Abbildung 3.16: TE-Aufnahmen mit dem hier verwendeten HFCT sowie einem TE-Messsystem nach IEC 60270

$$u(t) = i * h = \int_{-\infty}^{+\infty} i(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (3.3)$$

Bei Berücksichtigung einer Messzeit t_d sowie der Annahme, dass der Strom $i(t) = 0$ ist, für $t_d < 0$ sowie nach der Messzeit t_d , dann gilt:

$$u(t) = \int_0^{t_d} i(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau \quad (3.4)$$

Wenn weiterhin gilt, dass die Funktionen $i(t)$ und $h(t)$ integrierbare Größen sind, gilt:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} i(t) dt \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) dt \quad (3.5)$$

Dabei gilt bekanntermaßen für die Ladung Q:

$$Q = \int_0^{t_d} i(t) dt \quad (3.6)$$

Somit lässt sich näherungsweise die Ladung der gemessenen TE-Spannungsimpulse nach der Formel 3.6 bestimmen.

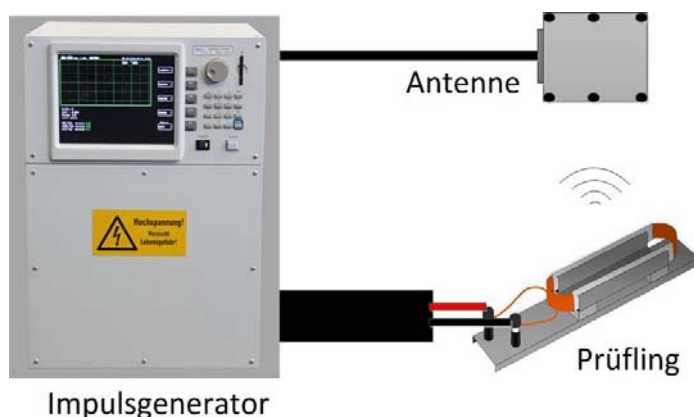
$$Q \approx \frac{\int_0^{t_d} u(t) dt}{\int_0^{t_d} h(t) dt} \quad (3.7)$$

Demzufolge zeigt dies nach [Rod11], dass es mathematisch möglich ist, die Ladung einer TE, vorausgesetzt der TE-Spannungsimpuls wird gemessen und die Übertragungsfunktion des HFCT ist bekannt, zu berechnen. [Rod11] In den oben gezeigten Gleichungen geht man vom idealen Fall aus. Es wird nicht berücksichtigt, dass es während der TE-Messung zu Reflexionen, Brechungen oder Überlagerungen der TE-Impulse kommen kann, was die Ergebnisse der TE-Messung deutlich beeinflussen kann. Somit wird in dieser Arbeit kein Vergleich der gemessenen Intensität der TE bei den unterschiedlichen Spannungsformen angestrebt. Als Vergleichsgröße, wie sich das TE-Verhalten des untersuchten Isoliersystems bei unterschiedlichen Spannungsformen verhält, soll daher ausschließlich die TE-Einsatz- und Aussetzspannung dienen.

Erfassung von TE mit elektromagnetischen Richtkopplern

Wie bereits in den Grundlagen, Kapitel 2.3.2, gezeigt, ist die Erfassung von TE auch mit elektromagnetischen Richtkopplern möglich. Im Rahmen dieser Arbeit stand ein entsprechendes Messsystem

Abbildung 3.17: TE-Messsystem zur Erfassung von TE mittels elektromagnetischen Richtkopplern



zur Verfügung, welches es ermöglicht hat, TE mit Hilfe einer Antenne zu detektieren; Abbildung 3.17. Hierbei wird die Tatsache ausgenutzt, dass eine Wicklung bei Beanspruchung mit einer Impulsspannung ein Streufeld erzeugt. Diesem Streufeld werden im Falle von Entladungen zusätzliche Frequenzanteile überlagert, welche mit der Antenne aufgefangen werden

können und nach einer anschließenden Filterung des Signals als TE gewertet werden können. Gleichzeitig vereint dieses System auch einen Impulsgenerator, so dass dieses Gerät zur TE-Messung an der Windungsisolierung bei den Motorettenprüfkörpern verwendet wurde. Das Gerät ermöglicht es automatisch, die TE-Einsatz- und Aussetzspannung zu bestimmen; dabei wird die Intensität der TE in dBm (Dezibel Milliwatt) angegeben. Es können Spannungsimpulse mit Anstiegszeiten von 350ns–600ns bei den hier untersuchten Prüfkörpern erzeugt werden und das bis zu einer Spannung von 5kV. Ein Nachteil dieses Systems ist, dass die Frequenz der Spannungsimpulse nur wenige Hertz beträgt. Zur Bestimmung der TE-Einsatzspannung können zwei verschiedene Modi gewählt werden. Zum einen kann der Bediener die Spannungssteigerungsschritte sowie die Anzahl der abzugebenden Spannungsimpulse pro Spannungsschritt vorgeben. Hierbei wird die Messung beendet, sobald die TE-Einsatzspannung erreicht ist. Das Kriterium, wann ein Einsatz der TE gewertet werden soll, muss ebenfalls vom Bediener vorgegeben werden. Beispielsweise können pro Spannungsschritt zehn Spannungsimpulse abgegeben werden. Dabei ist ein Einsetzen der TE zu werten, wenn mindestens drei der zehn Spannungsimpulse zu TE führen. Die Grenze für TE ist gegeben, wenn die Intensität und Häufigkeit der TE einen Maximalwert, der durch die Integerzahl PD_{pek} repräsentiert wird, überschritten wird. Dieser Maximalwert wird vom Bediener vorgegeben und ist basierend auf Erfahrungswerten auf den Wert 15 eingestellt. Zum anderen kann der Bediener ein Spannungsbereich vorgeben, in dem die Spannung nach den ebenfalls vorgegebenen Spannungsschritten gesteigert wird und dabei die TE-Einsatz- bzw. beim Herunterfahren die Aussetzspannung aufgenommen wird. Hierbei sollte die Größenordnung für das Einsetzen- bzw. Aussetzen der TE bekannt sein, damit der Prüfling nicht unnötig überbeansprucht wird, da beim Erfassen der TE-Einsatzspannung die Messung beim Erreichen der TE-Einsatzspannung nicht abgebrochen wird, sondern der vorgegebene Spannungsendwert angefahren wird. Nachdem der Spannungsendwert erreicht ist, erfolgt die Bestimmung der TE-Aussetzspannung und die Spannung wird wieder heruntergefahren. Auch hierbei wird der TE-Einsatz erst gewertet, wenn beispielsweise drei von zehn Spannungsimpulsen zu TE geführt haben. Der TE-Aussatz ist dann gegeben, wenn die Intensität der Entladungen wieder unterhalb der vorgegebenen Grenze gefallen ist. **[DAT];[Man]** Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten TE-Messungen, bei denen dieses Messsystem verwendet wurde, gilt, solange nicht explizit auf Abweichungen hingewiesen wird, dass pro Spannungsstufe jeweils zehn Spannungsimpulse abgegeben wurden. Die Spannung wurde dabei in 1%-Schritten von 500V bis zu einem vom Prüflingstyp abhängigen Endwert gesteigert. Der TE-Einsatz wurde so definiert, dass drei der zehn abgegebenen Spannungsimpulse zu Entladungen mit einer Intensität $PD_{pek} > 15$ führen müssen, damit ein TE-Einsatz gewertet wird.

4. Untersuchung des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung

Wie in Kapitel 2 gezeigt, wird die elektrische Alterung umrichter gespeister Maschinen auf TE zurückgeführt. Dabei wird insbesondere die Windungsisolierung elektrisch beansprucht, so dass TE zwischen benachbarten Windungen zünden können und auf Dauer zu einem Windungsschluss und damit zum Ausfall der Maschine führen können. Das Verständnis des TE-Verhaltens an der Windungsisolierung ist für einen Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren in Bezug auf das Detektieren und Beurteilen von TE an der Windungsisolierung, aber auch für die Auslegung des Isolationssystems als Ganzes, von immenser Bedeutung. Weiterhin ist das TE-Verhalten der Windungsisolierung wichtig, um die Prüfkriterien für die TE-Messung in EoL-Prüfungen festlegen zu können. Außerdem ist das TE-Verhalten der Windungsisolierung bei späterer Interpretation der TE-Ergebnisse, z. B. bei der Lokalisierung der TE-Quellen, immens wichtig. Daher soll in diesem Kapitel das TE-Verhalten der Windungsisolierung untersucht werden. Hierbei soll auch das Einsetzen der TE in Abhängigkeit der Umwelteinflüsse wie Temperatur, Druck und Feuchte und weiterer für das TE-Verhalten relevanter Faktoren näher betrachtet werden. Die Untersuchungen sollen dabei bei verschiedenen Prüfspannungsformen durchgeführt werden, als Basis bzw. als Referenz sollen die Untersuchungen bei einer sinusförmigen Prüfspannung dienen. Hierbei ist es interessant, ob und in welcher Weise sich das TE-Verhalten der Windungsisolierung unter verschiedenen Spannungsformen unterscheidet. Wie bereits in den Grundlagen berichtet, wurden bisher durchaus unterschiedliche Ergebnisse in der Vergangenheit erzielt. Mit Hinblick auf die zu wählende Prüfspannung bei EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen von großer Wichtigkeit. Des Weiteren sollen die in den Grundlagen dieser Arbeit dargestellten Widersprüche bezüglich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung hinterfragt werden und deren Einflüsse auf einen möglichen Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen überprüft werden.

4.1 Messung der TE-Einsatz- und Aussetzspannung bei sinusförmiger Prüfspannung

Im folgenden Abschnitt sollen die Untersuchungen bezüglich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung vorgestellt werden. Untersucht wurde das TE-Verhalten der Windungsisolierung in Abhängigkeit verschiedener Faktoren, z. B. der Einfluss von verschiedenen

Umwelteinflüssen wie Temperatur, Druck und Feuchte, aber auch der Einfluss der Lackdrahteigenschaften wie Isolationsdicke und Leiterdurchmesser. Ebenfalls wurde der Einfluss der Imprägnierung untersucht, da die Windungsisolierung in Traktionsmotoren üblicherweise mit einer Harzschicht imprägniert ist. Des Weiteren wurde auch der Einfluss der Frequenz der Prüfspannung auf das TE-Verhalten untersucht. Ziel war es, die Abhängigkeit der Einsetz- und Aussetzspannung der TE in Abhängigkeit der genannten Faktoren zu hinterfragen sowie eine Basis in Bezug auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung zu schaffen, mit der die unter impulsförmiger Prüfspannung gewonnenen Ergebnisse verglichen werden können.

4.1.1 TE- Einsetz- und Aussetzspannung bei sinusförmiger Prüfspannung

Zur Bestimmung des TE-Einsatzes der Windungsisolierung unter sinusförmiger Prüfspannung wurde der unter Kapitel 3.3 beschriebene TE Messkreis verwendet. Dabei wurde die Spannung mit einer Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von 50V/s bis zum ersten Einsetzen von TE gesteigert. Diese Spannung wurde dann als TE-Einsetzspannung definiert. Aufgrund des geringen TE-Grundstörspegels von $\leq 1\text{pC}$ wurde ein TE-Einsatz beim Überschreiten des TE-Pegels von 5pC

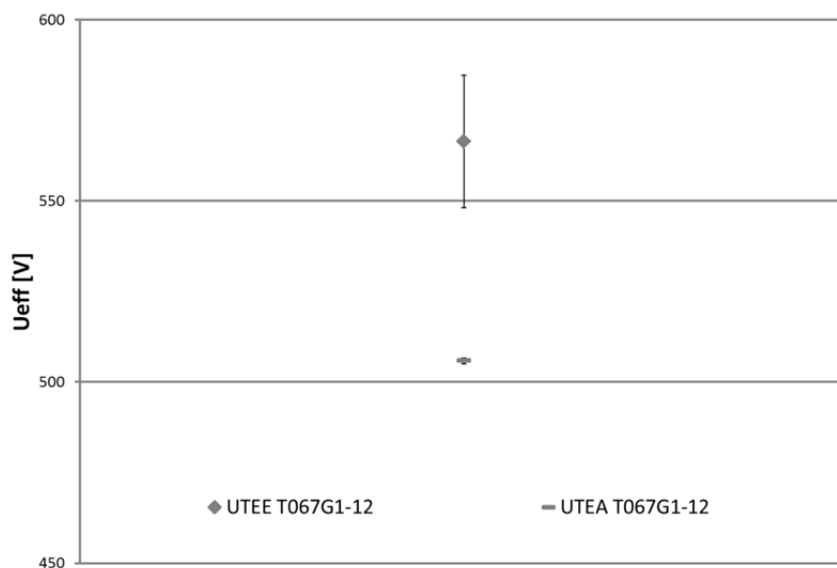


Abbildung 4.1: TE-Einsetz- und Aussetzspannung des T067G1-12 Prüfings bei sinusförmiger Prüfspannung

definiert. Nach dem Feststellen der TE-Einsetzspannung wurde die Prüfspannung wieder mit derselben Spannungsanstiegsgeschwindigkeit heruntergefahren und die Spannung, bei der der TE-Pegel wieder auf den Grundstörspegel herabgefallen war, als TE-Aussetzspannung aufgenommen. Die Abbildung 4.1 zeigt den

Mittelwert der aufgenommenen TE-Einsetz- und Aussetzspannungen mit der dazugehörigen Standardabweichung von zehn Draht-Twisten (T067G1-12). Das Einsetzen der TE erfolgt ab einem Spannungsmittelwert von 566V. Das zugehörige TE-Bild, welches die auftretenden TE in Bezug zur Phasenlage der angelegten Prüfspannung zeigt, ist in der Abbildung 4.2 weiter unten dargestellt. Die unterschiedlichen Farben stellen dabei die unterschiedliche Häufigkeit der auftretenden

TE-Impulse dar. Das TE-Bild ermöglicht es Aussagen über die Art der Entladungen zu treffen (z. B. Korona-Entladungen an einer Spitz oder Entladungen im Isolierstoff, siehe Kapitel 2.3). Unterschiedliche Arten von Entladungen zeigen nämlich unterschiedliche „TE-Muster“. In diesem Fall treten die positiven TE im Bereich von 45° sowie die negativen TE im Bereich von 225° der angelegten Prüfspannung.

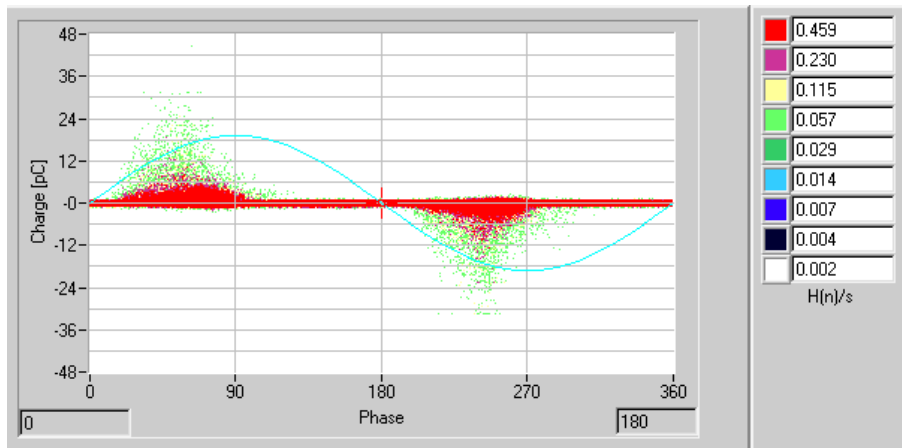


Abbildung 4.2: TE-Bild einer Draht-Twiste Anordnung (T067G1-12) bei Einsetzspannung

Nach [Küc04] ist so ein TE-Bild charakteristisch für Hohlräum-entladungen oder Oberflächenentladungen ohne Elektrodenkontakt (Entladungen zwischen isolierten Leitern). Da bei einer Draht-Twist-Anordnung verschiedene TE-Quellen in Frage kommen, die in der Abbildung 4.3 gezeigt sind, wurden zusätzliche Untersuchungen durchgeführt, um festzustellen, um welche Art von TE es bei den hier gemessenen TE handelt.

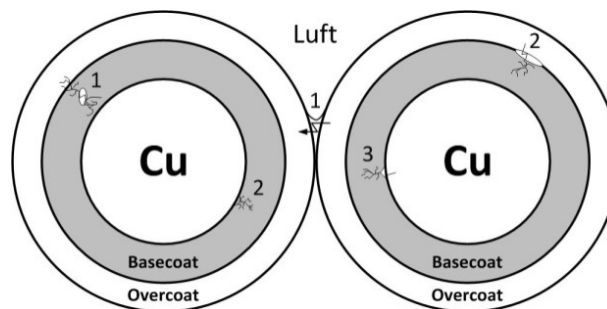


Abbildung 4.3: Mögliche TE-Quellen einer Draht-Twiste-Anordnung

TE an einer Draht-Twiste-Anordnung können zum einen in Lackfehlstellen auftreten und zum anderen auf der Oberfläche bzw. in der Luft zwischen den lackisolierten Kupferdrähten. Zudem ist es denkbar, dass es auch an den spitzen Enden der Draht-Twiste zu Korona-Entladungen aufgrund von

Feldstärkeüberhöhungen kommen kann. Um Korona-Entladungen an den spitzen Enden der Draht-Twiste auszuschließen, wurden zusätzliche TE-Messungen mit dem Lackdraht durchgeführt. Hierbei wurde ein Drahtstück auf Hochspannung gelegt und als Gegenelektrode eine Platte in Abstand von 1mm verwendet. Als Ergebnis dieser Untersuchung ist im Vergleich zu den oben dargestellten Ergebnissen einer Draht-Twist-Anordnung eine höhere TE-Einsatzspannung festgestellt worden. Diese lag bei $U_{\text{eff}} = 1,9\text{kV}$. Dieser Wert wirkt plausibel, wenn man bedenkt, dass die Durchschlagfeldstärke der Luft im homogenen elektrischen Feld bei 2,7kV für einen Elektrodenabstand von einem mm liegt. Berücksichtigt man in diesem Fall den Inhomogenitätsgrad, so ist eine TE-Einsatzspannung unterhalb von 2,7kV zu erwarten. Auch das TE-Bild unterscheidet sich im Vergleich mit der Draht-Twist-Anordnung erheblich und zeigt ein TE-Bild mit Entladungen im Bereich des negativen Spannungsmaximums, was für Korona-Entladungen an spitzen Radien in Gas beim Anlegen einer Hochspannung typisch ist. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Korona-Entladungen an den spitzen Enden der Draht-Twiste die eigentliche TE-Messung nicht beeinflussen oder gar verfälschen können, da diese erst bei höheren Spannungen auftreten.

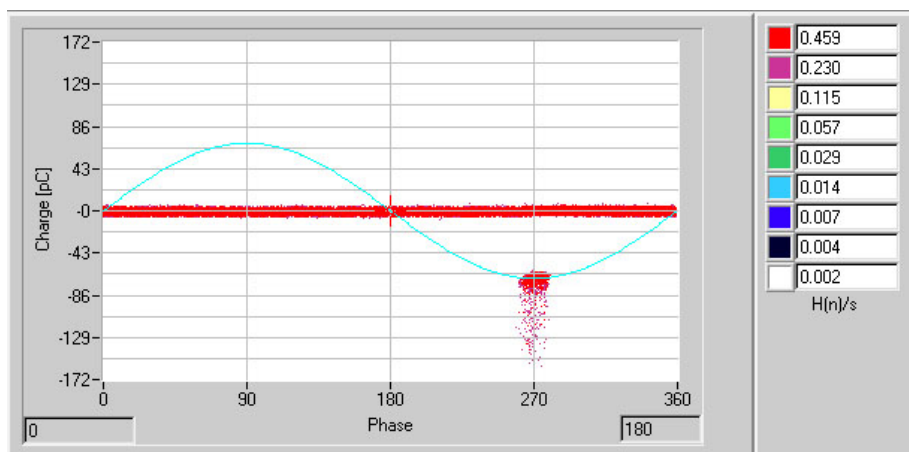


Abbildung 4.4: Korona-Entladungen an der Spitze eines Kupferlackdrahtes

Um festzustellen, ob es sich bei den gemessenen TE an der Draht-Twiste-Anordnung um Entladungen in den Luftwickeln zwischen den beiden lackisolierten Kupferdrähten handelt, wurden die TE-Messungen in einem anderen Isoliermedium durchgeführt. Sollte es sich um Entladungen im Luftwickel handeln bzw. um Entladungen zwischen den lackisolierten Leitern, so müssten diese in einem anderen Isoliermedium, je nachdem ob das verwendete Isoliermedium bessere oder schlechtere Isoliereigenschaften als Luft besitzt, entsprechend höhere oder niedrigere Werte für die TE-Einsatzspannung ergeben. Da für diese Untersuchung ein Isolier-Öl verwendet wurde, welches

bessere Isoliereigenschaften im Vergleich zur Luft aufweist, wurden für die TE-Einsatzspannung höhere TE- Einsatzspannungswerte erwartet.

Die Ergebnisse der TE-Messung an Draht-Twisten in einer Isolier-Öl-Umgebung bestätigen die oben gemachten Annahmen. Und zwar konnte im Vergleich zu den Ergebnissen, welche in der Luftumgebung durchgeführt wurden, ein deutlicher Anstieg der TE-Einsatzspannung verzeichnet werden. Dies spricht dafür, dass es sich bei der ersten TE-Messung in der Luftumgebung um Entladungen im Luftzwickel zwischen den Drähten handelt. Im Falle von Lackfehlstellen, vorausgesetzt diese wären hermetisch abgeschlossen und mit einem Gas (z. B. Luft) gefüllt, hätte es keine Erhöhung der TE-Einsatzspannung geben dürfen, da diese Stelle auch weiterhin aus isolationstechnischer Sicht die Schwachstelle wäre, in der es zu TE kommen würde.

Man kann also mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass TE an Draht-Twisten, unter der Voraussetzung, dass keine Imprägnierung vorliegt, durch Entladungen im Luftzwickel der Draht-Twiste repräsentiert werden. Übertragen auf den Stator einer Maschine bedeutet das, dass es im Falle von TE an der Windungsisolierung zwischen zwei Windungen zu TE im Luftzwickel kommt, welche vermutlich die Lackisolierung von außen schädigen können, unabhängig davon, ob im Lack Fehlstellen vorhanden sind oder nicht. Dieses soll jedoch zum späteren Zeitpunkt näher betrachtet werden. Zu beachten ist, dass der Stator einer Maschine meist imprägniert wird, so dass die Windungsisolierung zusätzlich mit einem Harz überzogen ist. Daher sollen im nächsten Schritt TE-Messungen an imprägnierten Draht-Twisten durchgeführt werden, um den Einfluss der Imprägnierung auf das TE-Verhalten der Draht-Twiste zu untersuchen. Das Imprägnieren der Draht-Twiste ist im Kapitel 3 näher beschrieben worden.

In der Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse der TE-Messung an imprägnierten im Vergleich zu nicht imprägnierten Draht-Twisten dargestellt. Ähnlich wie bei der TE-Messung in Isolier-Öl zeigen die imprägnierten Draht-Twiste eine höhere TE-Einsatzspannung als die nicht imprägnierten Draht-Twiste. Dieses kann wiederum auf die Tatsache zurückgeführt werden, dass die Luftzwickel zwischen den Drähten durch das Imprägnier-Harz verdrängt werden und somit die elektrische Isolierfestigkeit der Zwickel erhöht wird, was in einer höheren TE-Einsatzspannung resultiert. Die erhöhte Streuung der Werte ist auf die Qualität der Imprägnierung zurückzuführen. Die Qualität der Imprägnierung ist zum einen davon abhängig, wie gut die Luftzwickel ausgefüllt werden, und zum anderen, wie viele Lufteinschlüsse in der Imprägnierung vorhanden sind. Für die Untersuchung des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bedeutet das, dass nicht imprägnierte Draht-Twiste den ungünstigeren Fall darstellen und somit ein „worst case“-Szenario darstellen. Daher erfolgen die

weiteren Untersuchungen vorwiegend an nicht imprägnierten Draht-Twisten, auf Abweichungen davon wird dann gesondert hingewiesen werden.

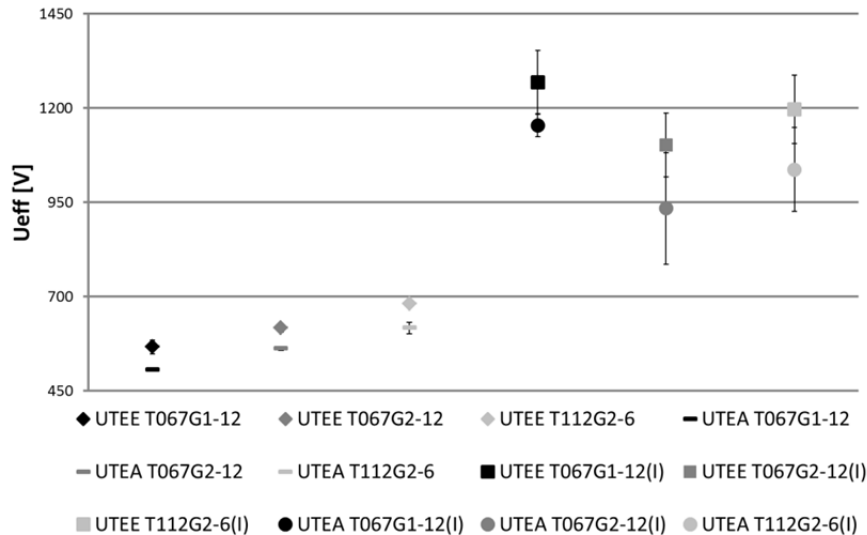


Abbildung 4.5: Vergleich der Ergebnisse der TE-Einsatz- und Aussetzspannung für imprägnierte- und nicht imprägnierte Draht-Twiste

4.1.2 Einfluss von Lackschichtdicke und Kupferdurchmesser

Die bereits gewonnenen Ergebnisse bezüglich des TE-Verhaltens zeigen, dass vorwiegend Entladungen im Luftwickel der Draht-Twiste das TE-Bild prägen. So ist ein Einfluss der Lackschichtdicke auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung zu erwarten, da die Lackschichtdicke maßgeblich die Feldverteilung der elektrischen Feldstärke, sowohl in der Lackschicht als auch im Luftwickel selber, beeinflusst. Um den Einfluss der Lackschichtdicke auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung zu untersuchen, wurden TE-Messungen an Kupferlackdrähten mit unterschiedlichen Lackschichtdicken durchgeführt. Pro Kupferlackdraht wurden jeweils zehn Draht-Twiste vermessen.

Abbildung 4.6 stellt die Ergebnisse der gemessenen TE-Einsatz- und Aussetzspannung als Mittelwert der zehn untersuchten Draht-Twiste des jeweiligen Drahtes dar. Eine Abhängigkeit der TE-Einsatz- und Aussetzspannung vom Grad des Kupferlackdrahtes, was einer unterschiedlichen Lackzunahme entspricht (siehe Kapitel 2.1.2), ist zu erkennen. Umso dünner die Lackschicht, desto niedriger die TE-Einsatzspannung. So ist beispielsweise die TE-Einsatzspannung vom Draht-Twist des Typs T067G1-12 im Vergleich zu dem Draht-Twist vom Typ T067G2-12, welcher den gleichen

Kupfernenndurchmesser und eine um ca. $10\mu\text{m}$ dickere Lackschicht aufweist, etwa um 10% niedriger. Wie bei den Untersuchungen zuvor sind die Werte mit einer gewissen Streuung behaftet. Dies liegt zum einen daran, dass der TE-Prozess eine statistische Streuung aufweist, da für das Auftreten von TE ein sogenanntes Startelektron benötigt wird. Zum anderen ist die Lackzunahme der Kupferlackdrähte nicht immer exakt gleich stark. Bedingt durch den Herstellungsprozess der Kupferlackdrähte kann nur ein gewisser Bereich der Lackzunahme gewährleistet werden. Der Draht-Twist vom Typ T112G2-12 stellt hierbei eine Besonderheit dar, da dieser außer einer nahezu doppelten Lackzunahme im direkten Vergleich mit dem Draht-Twist vom Typ T067G1-12 auch einen größeren Kupfernenndurchmesser aufweist. Auch hier kann eine Erhöhung der TE-Einsatzspannung beobachtet werden, jedoch stellt sich hierbei die Frage, inwieweit der Kupferdurchmesser das TE-Verhalten beeinflusst. Dieser Fragestellung wird im Kapitel 4.2.3 nochmals näher nachgegangen werden, da aus diesen Untersuchungen die Beantwortung dieser Fragen nicht hervorgeht.

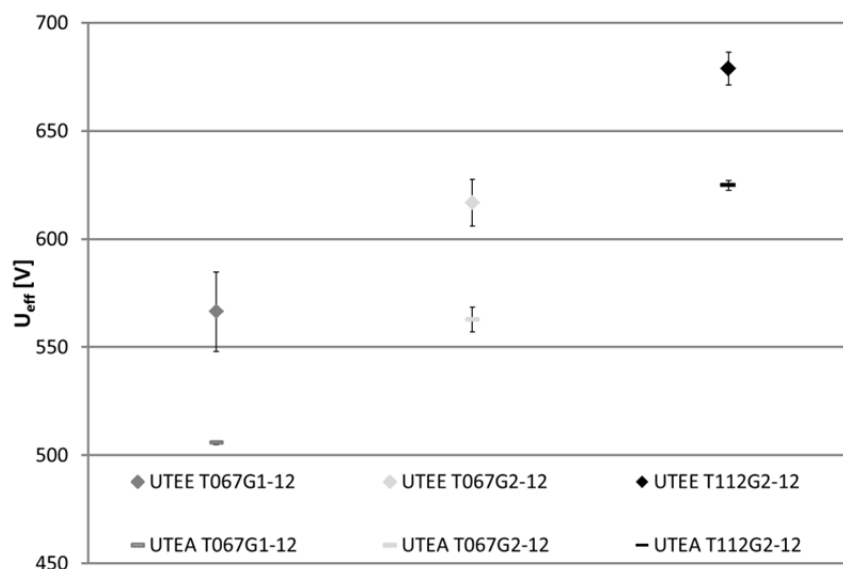


Abbildung 4.6: Einfluss der Lackdicke auf die TE-Einsatz- und Aussetzspannung

4.1.3 Einfluss von Temperatur, Feuchte und Druck

Die Kenntnisse über das TE-Verhalten der Windungsisolierung unter verschiedenen Umweltbedingungen sind aus unterschiedlichen Gründen sehr wichtig. Zum einen ist es aus Sicht einer TE-Messung als eine qualitätssichernde EoL-Prüfung wichtig zu wissen, welchen Einfluss verschiedene Umweltbedingungen auf die TE-Messung bzw. auf die TE-Messwerte nehmen können, und zum anderen aus Sicht des Betriebes der Maschinen unter verschiedenen Umweltbedingungen, welche bei Traktionsmotoren üblich sind. Wie die vorherigen TE-Untersuchungen an Draht-Twisten zei-

gen, kommt es bei erhöhter elektrischer Belastung der Windungsisolierung vorwiegend zu Entladungen im Luftwickel zwischen den Kupferlackdrähten. Daher wird ein Einfluss von verschiedenen Umweltbedingungen auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung erwartet. In welcher Weise der Einfluss von verschiedenen Umweltbedingungen sich auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung auswirkt, soll im Folgenden dargestellt werden.

Einfluss der Temperatur:

Die Untersuchungen bezüglich des Temperatureinflusses auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung wurden in einem Wärmeofen durchgeführt. Der Wärmeofen erlaubt es eine Temperatur auf $\pm 1^\circ\text{C}$ einzustellen. Die TE-Messungen wurden bei vier unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Pro Temperaturpunkt wurden zehn Draht-Twiste vom Typ T067G2-12 vermessen. Als Referenz dienen die Ergebnisse der TE-Messungen bei Raumtemperatur.

Abbildung 4.7 zeigt die Ergebnisse für die TE-Einsatz- und Aussetzspannung. Es sind die Mittelwerte der TE-Einsatz- und Aussetzspannung mit der dazugehörigen Standardabweichung der Werte dargestellt. Es kann eine Abnahme der TE-Einsatzspannung mit zunehmender Temperatur beobachtet werden. Setzt man voraus, dass die TE auf Entladungen im Luftwickel zurückzuführen sind, kommen zwei mögliche Ursachen für die Abnahme der TE-Einsatzspannung in Frage. Zum einen kann durch die erhöhte Temperatur eine Änderung der Lackeigenschaften erfolgen, insbesondere eine Änderung der relativen Permittivität der Lackschicht. Diese Änderung könnte ein Einfluss auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel nach sich ziehen, was die TE-Einsatz- und Aussetzspannung beeinflussen könnte. Nach Pohlmann liegt jedoch die Änderung der relativen Permittivität der Lackschicht im Bereich von 0,1–0,3 abhängig vom Temperaturniveau, so dass dieser Einfluss minimal die Verteilung der elektrischen Feldstärke über der Anordnung beeinflusst [Pho01]. Zum anderen nimmt die Durchschlagfestigkeit der Luft mit zunehmender Temperatur ab, was in einer niedrigeren Durchschlagsspannung der Luft resultiert und demzufolge auch zu früheren Entladungen im Luftwickel führt. Somit hätte die Temperatur Auswirkungen auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung, jedoch ist der Einfluss auf die TE-Messung an sich gering ausgeprägt. Im Betrieb der Motoren sind die Auswirkungen der Temperatur jedoch deutlich größer. So sinkt die TE-Einsatzspannung bei einer Betriebstemperatur von 150°C um 16% im Vergleich zur Umgebungstemperatur von 25°C bei den hier untersuchten Lackdrähten. Diese Tatsache müsste bei einem möglichen Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen berücksichtigt werden und eventuell durch Sicherheitsfaktoren ausgeglichen werden. Da eine Teilentladungsfreiheit der geprüften Moto-

ren bei einer Temperatur von 25°C und z. B. einer Spannung von 650V nicht gleichzusetzen ist mit einer Teilentladungsfreiheit bei Betriebstemperatur.

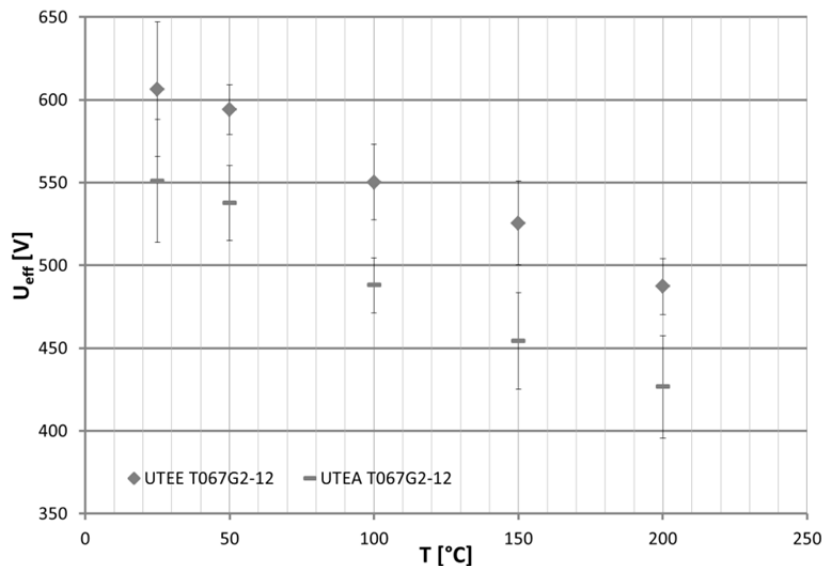


Abbildung 4.7: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die TE-Einsatzspannung von Draht-Twisten

Einfluss der Feuchte:

Der Feuchteinfluss auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung wurde in einer Klimakammer durchgeführt. Die Klimakammer erlaubt es bei einer Temperatur von 30°C den relativen Feuchtegehalt der Luft im Bereich zwischen 20%–90% einzustellen. Die Untersuchungen wurden bei der Temperatur von 30°C und einer rel. Luftfeuchte von 20%, 50% und 90% durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung war es, den möglichen Einfluss der rel. Luftfeuchte auf die aufgenommenen Parameter der TE-Messung, wie z. B. TE-Einsatzspannung zu untersuchen. Dies ist insoweit relevant, da bei EoL-Prüfungen keine standardisierten Umweltbedingungen sichergestellt werden können und es mit Schwankungen sowohl bei der Luftfeuchte als auch bei der Umgebungstemperatur zu rechnen ist. Des Weiteren sollen die Annahmen bezüglich der TE im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung bekräftigt werden, da Veränderungen der Umgebungsbedingungen direkten Einfluss auf das TE-Verhalten nehmen können. Wie in Abbildung 4.8 zu beobachten ist, ist eine Abnahme der TE-Einsatzspannung mit steigender Luftfeuchte bei einer Umgebungstemperatur von 30°C feststellbar. Weiterhin ist eine steigende Streuung der Messwerte bei einer rel. Luftfeuchte von 90% festzustellen. Beobachtungen des Prüflings haben gezeigt, dass es bei sehr hohen Luftfeuchten zu Tröpfchenbildung auf den Draht-Twisten kommen kann, welche einen Einfluss auf die elektrische Feldverteilung im Luftwickel haben können und somit zu stärkerer Streuung der Messwerte bei-

tragen können. Ähnliches Verhalten wurde auch für die TE-Aussetzspannung festgestellt. Die gewonnenen Ergebnisse hier deuten auch stark darauf hin, dass es sich bei den gemessenen TE um Entladungen im Luftzwickel der Draht-Twist-Anordnung handelt, da man nicht davon ausgehen kann, dass die Feuchte in so kurzer Zeit in mögliche Lackfehlstellen des Draht-Twists diffundieren kann.

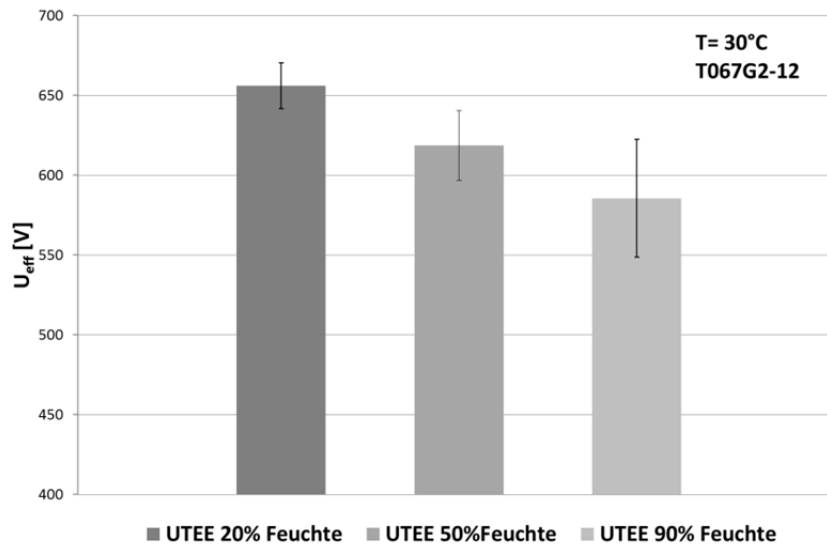


Abbildung 4.8: Einfluss der Luftfeuchte auf die TE-Einsatzspannung

Vergleichbare Ergebnisse zum Einfluss der relativen Luftfeuchte werden auch in [Kik08] berichtet. Weiterhin wurden hier die Untersuchungen zum Einfluss der Feuchte auf das TE-Verhalten auch bei höheren Temperaturen durchgeführt. Hierbei konnte bei höheren Temperaturen etwa bei 80°C keine eindeutige Abhängigkeit des TE-Verhaltens von der Feuchte festgestellt werden. [Kik08]

Einfluss des Drucks:

Die Untersuchungen bezüglich des Druckeinflusses auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung erfolgten in einem Druckgefäß. Mit einer Vakuumpumpe war es möglich, einen Unterdruck zu erzeugen. Der minimal eingestellte Druck betrug dabei 10mbar. Der Überdruck wurde mit Druckluft erzeugt. Es konnte maximal ein Überdruck von 3bar in dem Druckgefäß eingestellt werden. Für die Untersuchungen wurden jeweils zehn Draht-Twiste für das eingestellte Druckniveau vermessen und der Mittelwert mit der dazugehörigen Standardabweichung pro Druckniveau ermittelt. Die Ergebnisse für die TE-Einsatzspannung sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

Es zeigt sich ein abnehmender Verlauf der Messwerte der TE-Einsatzspannung mit Abnahme des Umgebungsdrucks. Im Bereich zwischen 100mbar und 10mbar ist ein erneutes Ansteigen der TE-Messwerte zu verzeichnen. Niedrigere Umgebungsdruckwerte konnten nicht über einen längeren Zeitraum, welcher für eine TE-Messung erforderlich ist, konstant eingestellt werden. Daher konnten keine TE-Einsatzspannungswerte für Drucke unterhalb 10mbar aufgenommen werden, ohne dass es zu Druckschwankungen im Gefäß gekommen wäre.

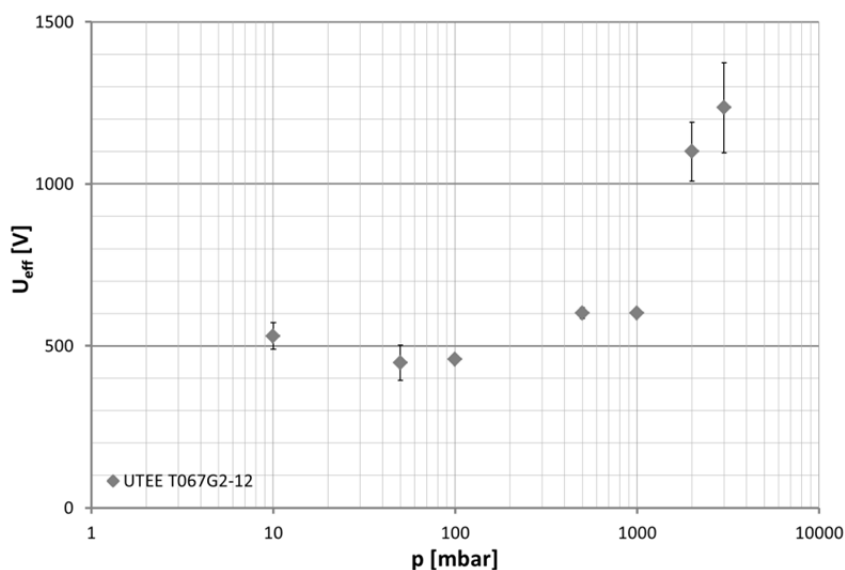


Abbildung 4.9: Einfluss des Umgebungsdruckes auf die TE-Einsatzspannung

Die Ursache für dieses Verhalten der TE-Einsatzspannung in Abhängigkeit des Drucks ist auch hier zum größten Teil die Veränderung der elektrischen Festigkeit der Luft im Luftwickel in Abhängigkeit des Umgebungsdrucks. Dieses soll später im Kapitel 4.2 „Theoretische Betrachtungen zum TE-Verhalten der Windungsisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung“ vertieft werden.

4.1.4 Einfluss der Frequenz

Da bei Umrichter-Betrieb mit Frequenzen von bis zu 20kHz gearbeitet wird, mit steigender Tendenz, soll auch der Einfluss der Frequenz auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung untersucht werden. Dabei stellt sich insbesondere die Frage, ob bei höheren Frequenzen der Spannung sich niedrigere TE-Einsatzspannungen an der Windungsisolierung einstellen. Dieses wurde wieder an Draht-Twisten untersucht. Es konnte in dem Bereich von 50Hz–20kHz kein Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsatz- und Ausspannung festgestellt werden, wie in der Abbildung 4.10 und Abbildung 4.11 zu sehen ist.

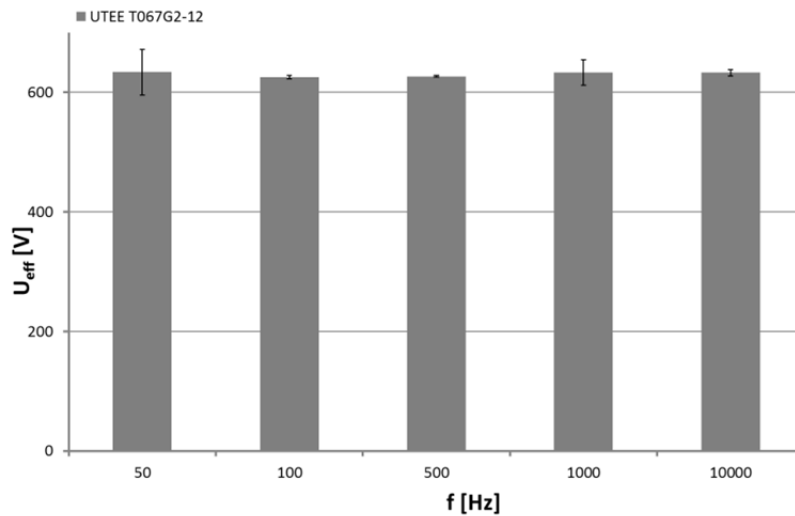


Abbildung 4.10: Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsatzspannung von Draht-Twisten bei sinusförmiger Prüfspannung

Die TE-Messung wurde mit der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Messschaltung durchgeführt, bei der zur Erfassung von TE ein HFCT verwendet wird. Hierbei sind die Mittelwerte von TE-Messungen an jeweils zehn Draht-Twisten pro Frequenz mit der dazugehörigen Standardabweichung abgetragen. Die Ergebnisse der Messungen bei 20kHz sind jedoch nicht aufgetragen, da bei einer Frequenz von 20kHz das Spannungssignal verzerrt wurde und so die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht gegeben sein könnte. Die Aussage der TE-Messung ist, dass die Frequenz und somit auch die Anstiegszeit der Spannung keinen signifikanten Einfluss auf die TE-Einsatzspannung haben.

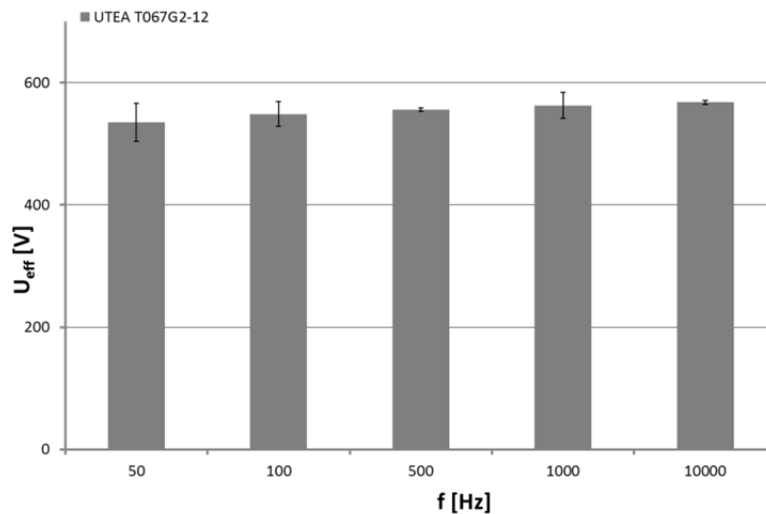


Abbildung 4.11: Einfluss der Frequenz auf die TE-Aussetzspannung von Draht-Twisten bei sinusförmiger Prüfspannung

Wie bereits in den Grundlagen aufgeführt, sind bezüglich des Einflusses der Anstiegszeit bereits unterschiedliche Ergebnisse in Veröffentlichungen berichtet wurden; so auch im Fall des Frequenzeinflusses auf die TE-Einsetzspannung.

Die hier aufgeführten Ergebnisse bestätigen die bereits in [liu06] veröffentlichten Ergebnisse, aus denen ebenso hervorgeht, dass die Frequenz keinen Einfluss auf die TE-Einsetzspannung hat, dabei wurde ein vergleichbarer Frequenzbereich betrachtet. Abweichend davon zeigen die in [Pfe99] berichteten Ergebnisse, dass der Frequenzeinfluss zwar im Bereich zwischen 500kHz–3000kHz keinen Einfluss auf die TE-Einsetzspannung aufweist, für niedrigere Frequenzen (50Hz–500kHz) jedoch ein negativer Einfluss, also die Abnahme der TE-Einsetzspannung mit steigender Frequenz, vorhanden ist. In beiden Fällen wurden jedoch unterschiedliche Detektoren für TE-Impulse verwendet. Im ersten Fall wurde, wie auch in dieser Arbeit, ein HFCT für die Erfassung der TE-Impulse verwendet, während im zweiten Fall ein Shunt-Widerstand verwendet wurde. Eventuell rühren die unterschiedlichen Ergebnisse hieraus. Da jedoch die in [Pfe99] berichteten Ergebnisse bei unterschiedlichen Kupferlackdrähten nicht gleich ausgeprägt waren, könnten auch andere Einflüsse noch eine Rolle spielen. Oder aber der hier betrachtete Frequenzbereich ist nicht ausreichend bzw. die Anstiegszeiten, die sich aus den unterschiedliche eingestellten Frequenz ergeben, sind nicht weit genug auseinander, um eventuelle Einflüsse der Anstiegszeit zu erkennen. Daher soll zum späteren Zeitpunkt bzw. bei der impulsförmigen Spannung der Einfluss der Anstiegszeit

nochmals vertieft werden und auch der Einsatz der TE bei Spannungsimpulsen mit Anstiegszeiten im ns-Bereich untersucht werden.

4.2 Theoretische Betrachtungen zum Teilentladungsverhalten der Windungsisolierung

Die Ergebnisse der TE-Messungen im vorherigen Abschnitt lassen die Vermutung zu, dass es sich bei den gemessenen TE um Entladungen im Luftwickel zwischen den lackisolierten Drähten handelt. Damit aus theoretischer Sicht TE im Luftwickel zünden können, muss die Durchschlagfeldstärke E_d der Luft überschritten werden. Ob dies tatsächlich so ist, soll im Folgenden mit der Berechnung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel zwischen den lackisolierten Kupferleitern überprüft werden. Des Weiteren sollen Berechnungen den Einfluss der Lackdicke sowie des Leiterdurchmessers auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel aufzeigen. Abschließend werden Simulationen des elektrischen Feldes vorgestellt und mit den errechneten Werten verglichen.

4.2.1 Berechnung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung

Für die Berechnung des elektrischen Feldes im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung wird das in Abbildung 4.12 gezeigte Draht-Twist-Modell verwendet, welches nur eine der Verdrillungen darstellen soll. Da diese Anordnung sehr stark an die sogenannte „Gleitanordnung“ aus der Hochspannungstechnik erinnert, mit der Ausnahme, dass hierbei beide Elektroden mit einer Isolierschicht (Lackschicht) überzogen sind, sind die folgenden Annahmen an die bereits in [Küc04] berichteten Annahmen für eine „Gleitanordnung“ sowie an die in [Kau95] berichteten Berechnung angelehnt.

Dabei wird angenommen, dass es sich hierbei um ein quer geschichtetes Dielektrikum mit bereichsweise homogenem Feld handelt. Die Weite des Luftspaltes nimmt dabei mit zunehmendem Abstand x von dem Punkt, an dem sich die beiden Lackdrähte berühren, zu. Weiterhin wird nur ein Ausschnitt Δx betrachtet, in dem das elektrische Feld als homogen angesehen werden kann.

Die Summe der Einzelspannungen U_1 , U_2 und U_3 , welche sich über den beiden Lackschichten und der Luftschicht aufteilen, ergibt die am Draht-Twist angelegte Spannung U , Gleichung (4.1).

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (4.1)$$

Diesen Ausdruck kann man auch als die Summe der einzelnen elektrischen Feldstärken multipliziert mit den jeweiligen Abständen, wie in Gleichung (4.2) darstellen. Unter Berücksichtigung der sogenannten „Feldverdrängung“ stehen die Feldstärken in den einzelnen Bereichen im umgekehrten Verhältnis wie die Dielektrizitätszahlen zueinander; Gleichung (4.3).

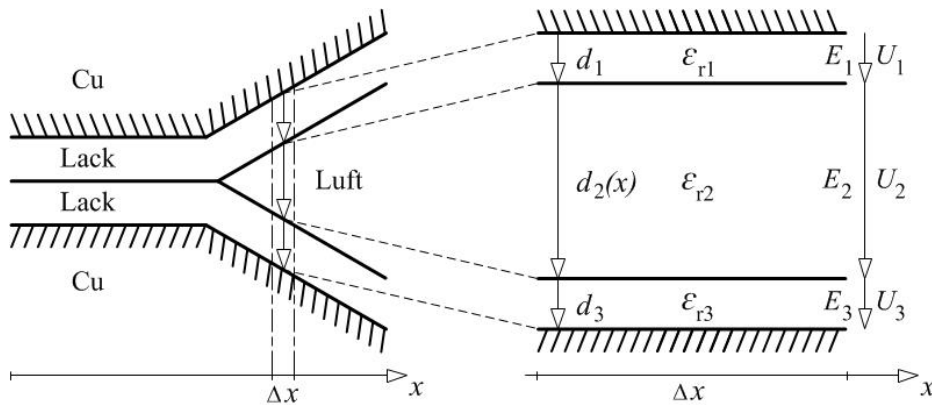


Abbildung 4.12: Vereinfachtes Draht-Twist-Modell

$$U = E_1 \cdot d_1 + E_2 \cdot d_2 + E_3 \cdot d_3 \quad (4.2)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}; \frac{E_2}{E_3} = \frac{\epsilon_3}{\epsilon_2} \quad (4.3)$$

Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die relative Permittivität sowie die Lackdicke der beiden Lackschichten gleich groß sind.

$$\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}; d_1 = d_3 \quad (4.4)$$

Mit diesen Annahmen folgt für die elektrische Feldstärke E_2 in dem Luftwickel in Abhängigkeit der Spaltweite d_2 die folgende Gleichung:

$$E_2(d_2) = \frac{U}{d_2 + 2 \cdot \left(d_1 \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}}\right)} \quad (4.5)$$

Mit Hilfe der Gleichung (4.5) wurde die elektrische Feldstärke im Luftspalt zwischen den lackisolierten Leitern in Abhängigkeit der Spaltweite für verschiedene Spannungen berechnet. Für die Dicke der Lackschicht wurde die Mindestlackzunahme vom Grad 2 angenommen, was bei einem Lackdraht mit einem Leiterdurchmesser von 0,67mm einer Lackdicke von 28µm entspricht. Die rel. Permittivität ϵ_{r2} der Luft sowie die rel. Permittivität der Lackschicht $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r3}$ wurde mit 1 bzw. 4 angesetzt. Das Ergebnis der Berechnungen für die Spannungen von 100V–1000V in 100V-Schritten ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

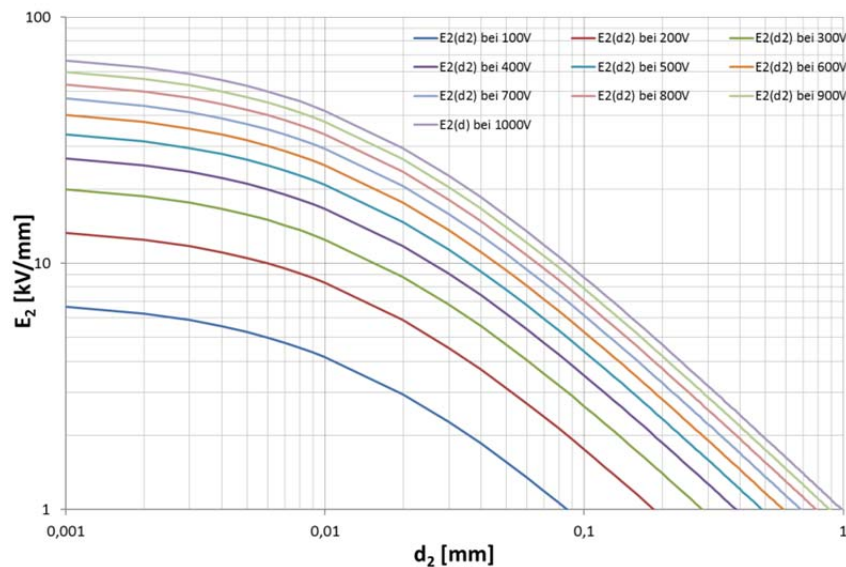


Abbildung 4.13: Berechnete elektrische Feldstärke im Luftspalt in Abhängigkeit des Abstandes bei unterschiedlichen Spannungen

Der Verlauf der elektrischen Feldstärke in der Luft ist doppelt logarithmisch über den Abstand zwischen den Lackdrähten aufgetragen. Die elektrische Feldstärke nimmt mit dem zunehmenden Abstand zwischen den Lackdrähten zueinander ab und mit anwachsender Spannung verschiebt sich der Verlauf der elektrischen Feldstärke nach oben. Wie oben bereits angemerkt, ist für das Auftreten von Entladungen in der Luft das Überschreiten der elektrischen Durchschlagsfeldstärke der Luft vonnöten. Daher ist hier der Vergleich des berechneten Verlaufs der elektrischen Feldstärke in der Luft mit dem Verlauf der elektrischen Festigkeit der Luft in Abhängigkeit der Schlagweite von Interesse. Für die Berechnung der elektrischen Festigkeit der Luft als Funktion der Schlagweite ist

es unabdingbar, das Gesetz von Paschen einzuführen. Das Paschen-Gesetz beschreibt die Abhängigkeit der Durchschlagsspannung von Gasen vom Produkt aus Druck und Elektrodenabstand.

Die Formel (4.6) gibt die analytische Näherungsbeziehung des Gesetzes von Paschen wieder und wurde für die Berechnung der elektrischen Festigkeit der Luft als Funktion der Schlagweite bei Normaldruck ($p=1\text{bar}$) und Normaltemperatur ($T=293\text{K}$) verwendet.

$$U_d = \frac{B \cdot pd}{\ln \frac{A \cdot pd}{\ln(1 + \frac{1}{\gamma})}} \quad (4.6)$$

Für die Konstanten A, B (experimentell ermittelte Gaskonstanten) und γ (Rückwirkungskoeffizient) gelten nach [Bey86]; [Sch25]; [Hil92] die folgenden Werte:

Tabelle 4.1: Werte für die Konstanten A und B sowie den Rückwirkungskoeffizienten γ

A	B	γ
1130	27,4	0,025

Zu beachten ist, dass das Paschen-Gesetz nur unter bestimmten Annahmen gültig ist. Zum einen beschränkt sich seine Gültigkeit auf Bereiche, die nicht durch Raumladungen beschwert sind bzw. bei denen der Entladungsprozess nach dem Townsendmechanismus stattfindet, und zum anderen auf Bereiche, bei denen man von einem homogenem Feldverlauf ausgehen kann. Abbildung 4.14 zeigt den nach der Formel (4.6) berechneten Verlauf der Durchschlagsspannung U_d in Abhängigkeit der Schlagweite d bei Normaldruck. Typisch für den Verlauf der Durchschlagsspannung (Paschenkurve) ist, dass es ein Minimum (Paschenminimum) aufweist und nach beiden Seiten ansteigt. Das Paschenminimum liegt bei Normaldruck nach der Formel (4.6) bei einer Schlagweite von $d=9\mu\text{m}$ und einer Spannung von $U_{\text{dmin}}=250\text{V}$. Nach [Gän53]; [Bey86] weichen die experimentell bestimmten Werte der Paschenkurve davon ab und liegen bei $U_{\text{dmin}}=330\dots350\text{V}$. Nach Küchler kann der Rückwirkungs faktor die Ursache für die Abweichung zwischen den berechneten und experimentell gewonnenen Werten verantwortlich sein. Er bestimmt aus den experimentelle gewonnenen Werten den neuen Rückwirkungs faktor mit $\gamma=5 \cdot 10^{-3}$. [Küc04]

Mit dem angepassten Rückwirkungs faktor γ wurde der in Abbildung 4.14 gestrichelt dargestellter Verlauf der Durchschlagsspannung von Luft nach Paschen berechnet. Es ist eine Anhebung der

Paschenkurve im gesamten Bereich zu beobachten, so dass das Spannungsminimum im Bereich von 350V liegt.

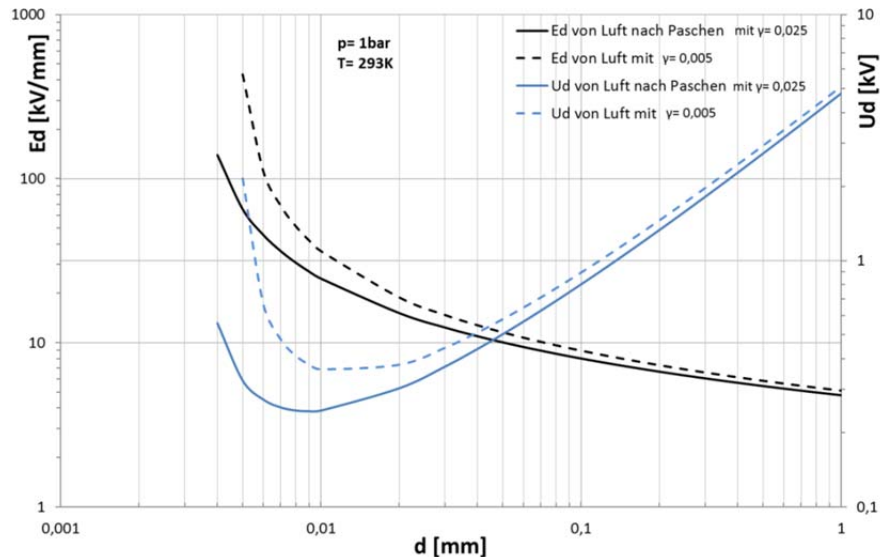


Abbildung 4.14: Berechnung der elektrischen Durchschlagfeldstärke/-spannung nach Paschen

Die schwarz dargestellten Kurven in der Abbildung stellen den Verlauf der elektrischen Durchschlagfeldstärke als Funktion der Schlagweite d dar. Diese sind aus den Werten der Durchschlagspannung U_d bezogen auf die Schlagweite d berechnet. Somit sind alle relevanten Parameter für die elektrische Festigkeit der Luft bestimmt. Der zuvor berechnete Verlauf der elektrischen Feldstärke im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung soll im nächsten Schritt mit der hier berechneten Durchschlagfeldstärke der Luft verglichen werden. Hierbei soll zunächst theoretisch bestimmt werden, ab welcher Spannung die elektrische Feldstärke im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung die Durchschlagfeldstärke der Luft überschreitet und somit die Bedingungen für eine Endladung in dem Luftwickel vorhanden wäre. Darüber hinaus soll der Vergleich mit den experimentell gewonnenen Werten für TE herangezogen, um die geäußerten Vermutungen bezüglich der TE zwischen den lackisolierten Kupferdrähten zu bestätigen. Hierfür wurden die berechneten Kurvenverläufe der elektrischen Feldstärke im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung und der Durchschlagfeldstärke der Luft in ein Diagramm überführt; siehe Abbildung 4.15.

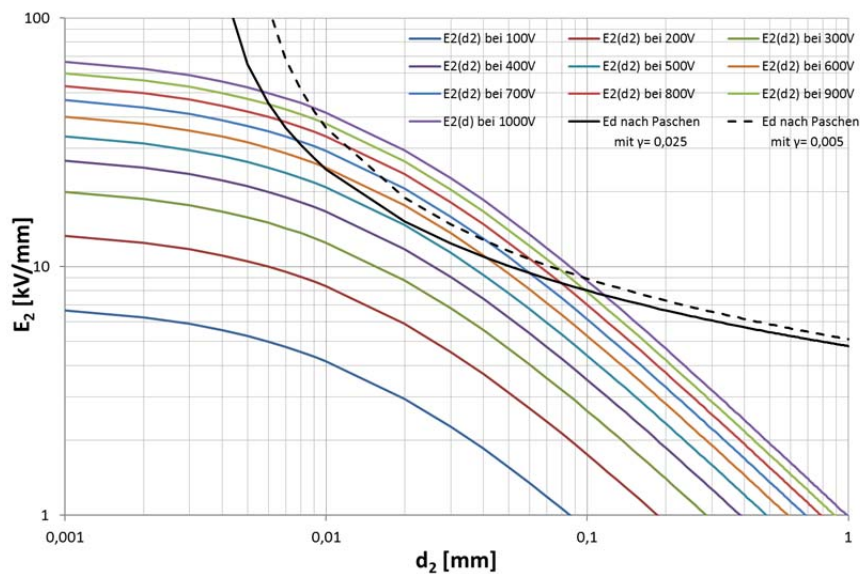


Abbildung 4.15: Überschreitung der elektrischen Durchschlagsfeldstärke im Luftwickel bei unterschiedlichen Spannungswerten (Berechnung)

Spannungswerte unterhalb von 500V verursachen eine elektrische Feldstärke im Luftwickel, welche über den gesamten betrachteten Bereich der Schlagweite die elektrische Festigkeit der Luft nicht überschreitet. Daher ist davon auszugehen, dass diese Spannungen theoretisch nicht zu Entladungen in dem Luftwickel führen können. Ab einer Spannung von 550 V findet eine Überschneidung der betrachteten Kurvenverläufe statt, so dass ab diesem Spannungswert theoretisch die Bedingungen für Entladungen in der Luft erfüllt sind. Bei diesem Spannungswert sind die Bedingungen für Entladungen im Luftwickel nur im Bereich einer Schlagweite von wenigen μm erfüllt. Für höhere Spannungen werden die Bedingungen in immer größerem Bereich der Schlagweite erfüllt. Hierbei ist zu beachten, dass die Bedingungen für Entladungen im Luftwickel nur für einen Wert von $\gamma=0,025$ erfüllt sind. Bei Betrachtung der Paschenkurve mit dem vom Küchler bestimmten Wert für $\gamma=0,005$ erfolgt die Überschreitung der elektrischen Festigkeit der Luft erst bei einer Spannung von 650V. Da bei dieser Berechnung die Lackdicke von $28\mu\text{m}$ angenommen wurde, was der Lackzunahme des Draht-Twists Typ T067G2-12 entspricht, sollen nun die experimentell ermittelten Werte für die TE-Einsatzspannung als Vergleich herangezogen werden. Bei dem Draht-Twist Typ T067G2-12 wurde eine TE-Einsatzspannung im Bereich von 620V als Mittelwert aus zehn TE-Messungen an zehn Draht-Twisten ermittelt. Dieser experimentell erlangte Spannungswert führt, wie der Abbildung 4.16 entnommen werden kann, zur Überschreitung der elektrischen Festigkeit der Luft im Luftwickel für $\gamma=0,025$. Für $\gamma=0,005$ ist das jedoch nicht der Fall. Bedenkt man jedoch, dass es sich bei der hier gezeigten Berechnung um ein stark vereinfachtes Model einer Draht-

Twist-Anordnung handelt, so liefern die hier berechneten Werte eine sehr gute Annäherung an die tatsächlichen Geschehnisse.

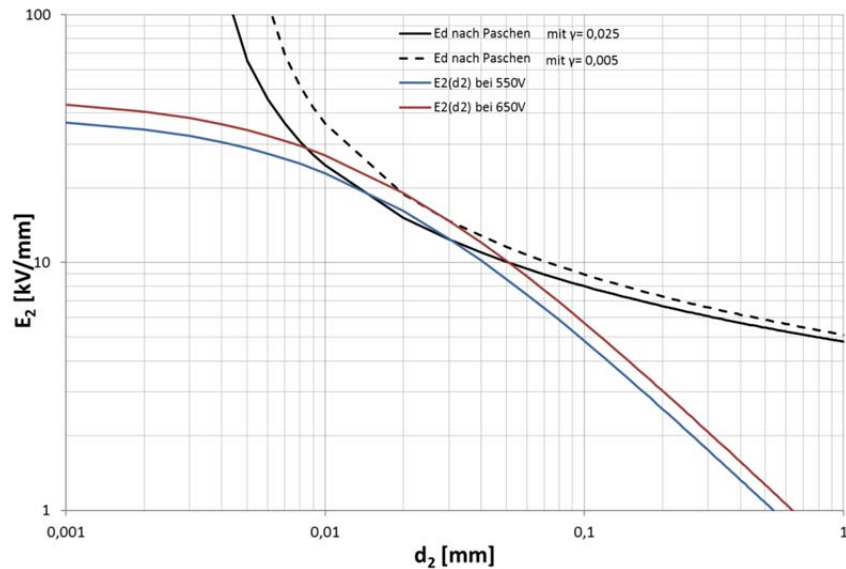


Abbildung 4.16: Bestimmung der elektrischen Durchschlagsfeldstärke im Luftzwickel bei einer Spannung von 550V und 650V

Somit kann der Ansatz für die Entladungen im Luftzwickel zwischen den lackisolierten Kupferleitern als eine realistisch angesehene Annahme betrachtet werden. Diese, an einem vereinfachtem Modell der Draht-Twist-Anordnung berechneten Werte für den Verlauf der elektrischen Feldstärke, werden im Kapitel 4.2.4 durch Simulation der elektrischen Feldstärke an einer Draht-Twist-Anordnung mit einem Feldberechnungsprogramm überprüft. Zuvor jedoch sollen Berechnungen am selben vereinfachten Modell den Einfluss der Lackdicke aufzeigen und eine mögliche Erklärung für die Streuung der TE-Einsatzspannungswerte unabhängig vom Einfluss des Startelektrons, welches ebenfalls für eine Streuung der TE-Einsatzwerte führen kann, aufzeigen.

4.2.2 Berechnung der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit von der Lackdicke

Wie bereits in den Grundlagen erklärt, wird die Dicke der Lackschicht als Lackzunahme bezeichnet und bei Kupferlackdrähten in Grad angegeben. Dabei unterscheidet man zwischen drei verschiedenen Graden (Grad 1, 2 und 3), welche eine Mindestlackzunahme definieren bzw. einen Bereich, in der sich die Lackdicke von Kupferlackdrähten bewegt. Somit kann keine feste Lackzunahme über die gesamte Länge einer Draht-Twist-Anordnung angenommen werden, sondern es ist davon aus-

zugehen, dass Schwankungen der Lackdicke über die Länge der Draht-Twist-Anordnung vorhanden sind. Da z. B. der Grad 2 der in dieser Arbeit verwendeten Kupferdrähte (T067G2-12) eine Lackdicke im Bereich zwischen mindestens $26,5\mu\text{m}$ und höchstens $59,5\mu\text{m}$ angibt, ist es denkbar, dass im „worst case“ unterschiedliche Draht-Twiste aus Kupferdraht gefertigt wurden, bei denen die „Mindestlackdicke“ unterschiedlich war, trotz der Tatsache, dass alle Draht-Twiste aus derselben Charge stammen. In den zuvor vorgestellten Berechnungen der elektrischen Feldstärke im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung ist man von einer gleichmäßigen Dicke der Lackschicht ausgegangen, was für diese Berechnung vollkommen ausreichend gewesen ist. Tatsächlich jedoch kann die Lackdicke auch größere Werte annehmen. Somit ist es denkbar, dass unterschiedliche Draht-Twiste unterschiedliche Mindestdicken der Lackschicht aufweisen und damit zur Streuung der TE-Einsetzwerte beitragen können. Des Weiteren wurde der Einfluss der Lackdicke bei Kupferdrähten mit unterschiedlichen Graden der Lackschicht in den TE-Messung im Kapitel 4.1.2 festgestellt. Diesbezüglich soll generell der Einfluss der Lackdicke auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel, welcher durchaus erwartet werden kann, berechnet werden, und die experimentell gewonnenen TE-Einsetzwerte bestätigt werden. In der Abbildung 4.17 sind die berechneten Verläufe der elektrischen Feldstärke im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung vom Grad 2 für die niedrigste experimentell ermittelte TE-Einsetzspannung sowie die schon bekannte Durchschlagfeldstärke der Luft dargestellt.

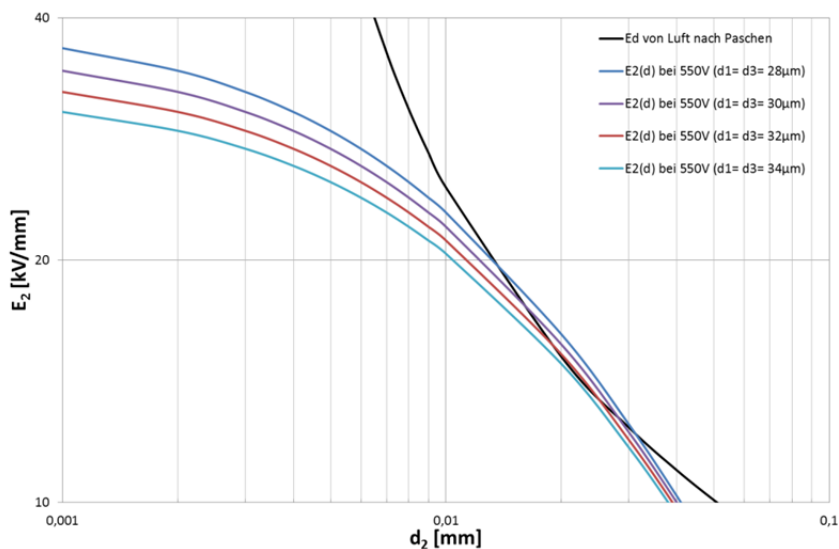


Abbildung 4.17: Einfluss der Lackdicke auf die elektrische Feldstärke im Luftwickel

Dabei wurde angenommen, dass die Lackdicke, angefangen mit der Lackdicke von $28\mu\text{m}$, in $2\mu\text{m}$ Schritten anwächst. Hierbei kann mit zunehmender Lackschichtdicke eine Abnahme der elektri-

schen Feldstärke in Luftwickel beobachtet werden, so dass eine Zunahme der Lackschicht um weniger als $10\mu\text{m}$ bei dem niedrigstem TE-Einsatzspannungswert keine Überschneidung der elektrischen Festigkeit der Luft im Luftwickel hat und somit keine Bedingungen für Entladungen in der Luft vorhanden sind. Ein Einfluss der Lackdicke auf die Messung der TE-Einsatzspannung ist somit gegeben und kann aufgrund des Herstellungsprozesses von Kupferlackdrähten nicht generell ausgeschlossen werden.

Um den generellen Einfluss der Lackdicke auf die elektrische Feldverteilung im Luftwickel zu berechnen, sind an dieser Stelle folgende Festlegungen zu treffen. Der Spannungswert soll 550V betragen und die Lackdicke wird angefangen bei einer $10\mu\text{m}$ -Dicke in $10\mu\text{m}$ -Schritten bis zu einer maximalen Lackdicke von $100\mu\text{m}$ gesteigert. Es wird die elektrische Feldstärke im Luftwickel berechnet und als Funktion der Lackdicke aufgetragen. Betrachtet werden zwei unterschiedliche Längen des Luftwickels, zum einen $1\mu\text{m}$ und zum anderen ein Luftwickel von $10\mu\text{m}$. Ein Einfluss der Lackdicke ist aus der Abbildung 4.18 deutlich ersichtlich. Mit steigender Lackdicke nimmt die elektrische Feldstärke im Luftwickel ab. Dies kann auf den wachsenden Abstand zwischen den Elektroden, in dem Fall die Kupferleiter, aufgrund der größeren Lackzunahme zurückgeführt werden.

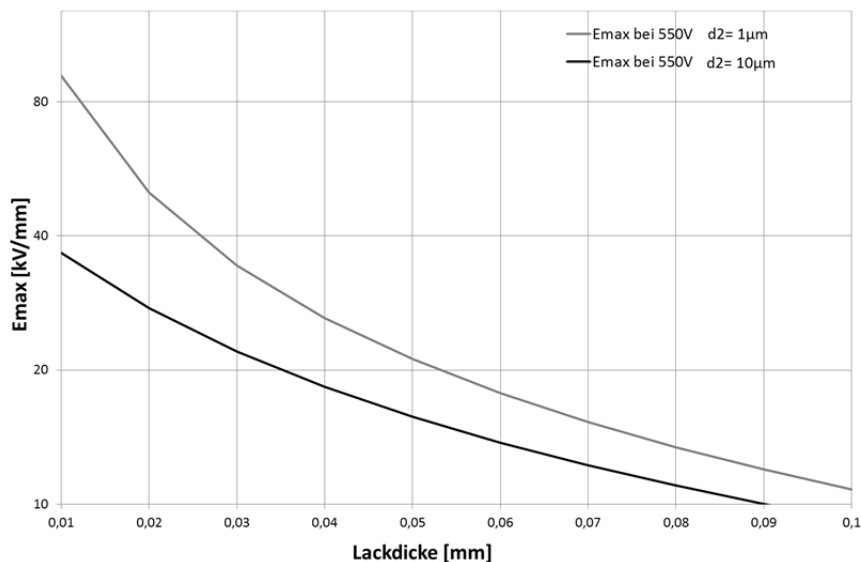


Abbildung 4.18: Genereller Einfluss der Lackdicke auf die elektrische Feldstärke im Luftwickel

4.2.3 Berechnung der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit des Leiterdurchmessers

Geht man davon aus, dass die gemessenen TE Entladungen aufgrund von Feldstärkeüberhöhung im Luftzwickel sind, so ist es denkbar, dass auch die Leitergeometrie einen Einfluss auf die Entladungen haben könnte, da die Leitergeometrie die Feldbedingungen im Luftzwickel beeinflussen kann. In den zuvor gezeigten Berechnungen der elektrischen Feldstärke ist man davon ausgegangen, dass es sich bei dem elektrischen Feld einer Draht-Twist-Anordnung um ein homogenes Feld handelt. Da jedoch für den Aufbau von Niederspannungswicklungen Lackdrähte mit unterschiedlichen Leiterdurchmessern, abhängig z. B. von der zu führenden Stromstärke und anderen Auslegungsparameter einer Maschine, eingesetzt werden, soll an dieser Stelle der Einfluss der Leitergeometrie auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung betrachtet werden. Die Norm Din En 60317-0-1 gibt die unterschiedlichen Leiternennendurchmesser an, welche grundsätzlich zur Verfügung stehen, wobei in der Regel für den Aufbau von Niederspannungswicklungen, Drähte mit Leiterdurchmessern im Bereich von 0,5mm – 1,5mm eingesetzt werden. **[DIN08]**

Nach Küchler wird in der Hochspannungstechnik für die Beantwortung der Frage nach der maximal auftretenden Feldstärke einer Elektrodenanordnung der sogenannte Homogenitätsgrad η bzw. der Inhomogenitätsgrad $1/\eta$ herangezogen. Hierbei wird die maximale Feldstärke als ein Vielfaches der homogenen Feldstärke eines Plattenkondensators mit den gleichen Elektrodenabstand angegeben; vergleiche Gleichung (4.7). Wobei die Werte für den Homogenitätsfaktor von verschiedenen Elektrodengeometrien aus Tabellenwerken in der Literatur entnommen werden können. **[Küc04]**

$$E_{max} = \frac{1}{\eta} \cdot E_0 \quad (4.7)$$

So muss zunächst bestimmt werden, um welchen Geometrietyp der Elektroden (Zylinderelektroden, Kugelelektroden) es sich handelt, aus dem dann der Geometriefaktor p angegeben werden kann. Der Geometriefaktor p wird dann aus den geometrischen Daten der Elektrodenanordnung berechnet. Bei zylindrischen Elektroden berechnet sich der Geometriefaktor aus dem Elektrodenradius und dem Abstand der Elektroden zueinander; siehe Abbildung 4.19 sowie Gleichung (4.8).

$$p = \frac{a + r}{r} \quad (4.8)$$

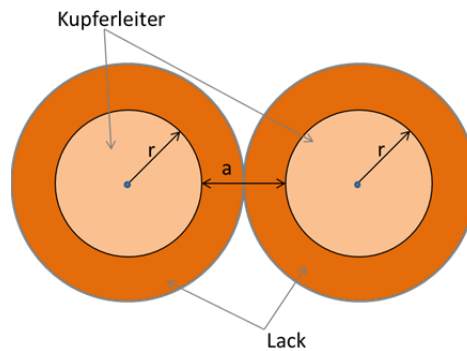


Abbildung 4.19: Zylindrische Elektrodenanordnung

Für die Berechnung des Geometriefaktors einer Draht-Twist-Anordnung bedeutet das, dass der Abstand a zwischen den Zylinderelektroden minimal die doppelte Lackdicke beträgt. Bei einem G1 Draht-Twist vom 0,67mm Durchmesser würde der Abstand mindestens $a = 28\mu\text{m}$ betragen. Somit bekommt man für den Geometriefaktor p eines Draht-Twists mit 0,67mm Durchmesser und einer Lackdicke von $14\mu\text{m}$ nach der oben angegebener Formel für $p = 1,08$. Die Abbildung 4.20 zeigt den Homogenitätsgrad als Funktion des Geometriefaktors für eine Zylinderelektrodenanordnung.

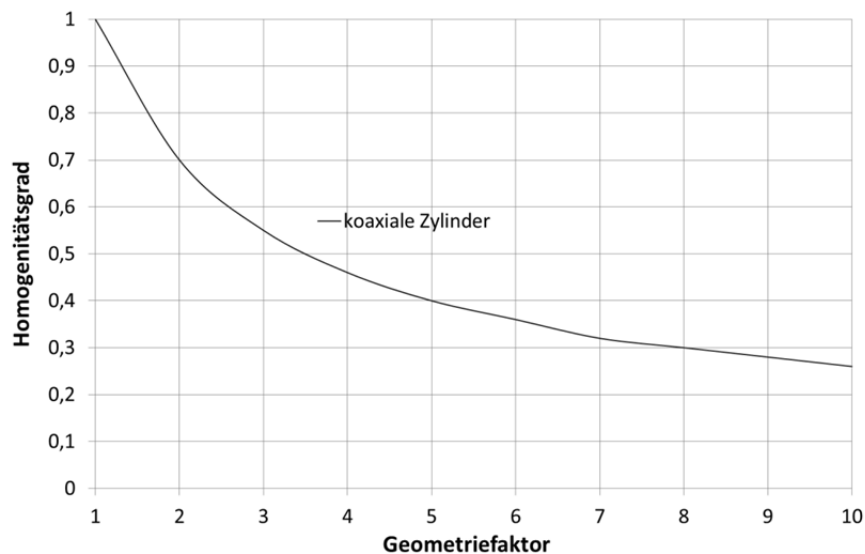


Abbildung 4.20: Homogenitätsgrad in Abhängigkeit des Geometriefaktors

Hierbei ist zu erkennen, dass für Werte von 1 und nahezu 1 des Geometriefaktors p der Homogenitätsgrad $\eta = 1$ ist. Nach der Formel (4.7) bedeutet dies, dass es nur zu einer sehr gering ausgepräg-

ten Beeinflussung des elektrischen Feldes durch die Geometrie mit den oben genannten geometrischen Daten kommen würde. Es muss jedoch beachtet werden, dass zum einen die Lackzunahme der Lackdrähte nicht konstant ist, sondern in einem definierten Bereich variieren kann, sowie dass für den Aufbau von Niederspannungswicklungen unterschiedliche Lackdrähte mit unterschiedlichen Lackdicken verwendet werden. Daher ist für die Bestimmung des Homogenitätsgrades der Geometriefaktor p als Funktion des Verhältnisses von Lackzunahme zu Leiterdurchmesser von Interesse. Somit wurde an dieser Stelle das Verhältnis der Lackzunahme zu Leiterdurchmesser für die in der Norm [DIN08] angegebenen Leiterdurchmesser (0,1mm – 1,6mm) und die dazugehörigen Lackzunahmen berechnet. Anschließend wurde der Geometriefaktor p berechnet und als Funktion des Verhältnisses der Lackzunahme zum Leiterdurchmesser dargestellt; siehe Abbildung 4.21.

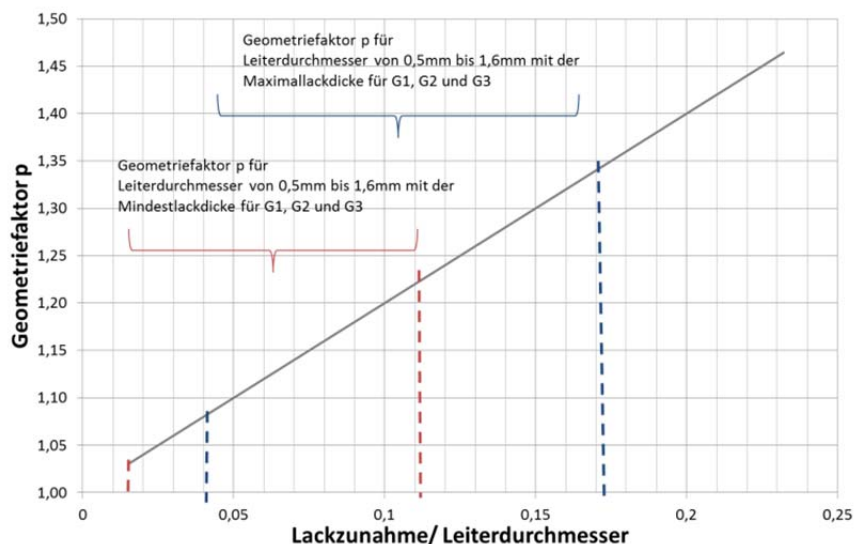


Abbildung 4.21: Einfluss des Leiterdurchmessers auf die elektrische Feldstärke im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung

Hierbei ist zu beobachten, dass keine der möglichen Verhältnisse von Lackzunahme zu Leiterdurchmesser für Lackdrähte mit Leiterdurchmesser im Bereich von 0,5mm bis 1,6mm für die Mindestlackdicken schlechteren Geometriefaktor p als 1,25 aufweisen (rot eingegrenzter Bereich). Da jedoch die Lackdicke nach [DIN08] auch größere Werte annehmen kann, wurde der Geometriefaktor p auch für die maximal zulässige Lackdicke bzw. für den maximal zulässigen Außendurchmesser der lackisolierten Drähte berechnet. Hierbei entsteht ein leichter Anstieg des Geometriefaktors p , der in der Abbildung 4.21 mit dem blau eingegrenzten Bereich dargestellt ist. Dies würde bedeuten, dass es nur zu einer sehr gering ausgeprägten Beeinflussung des elektrischen Feldes durch die

Leitergeometrie kommen kann und somit auch zu einer sehr geringen Beeinflussung des TE-Verhaltens.

4.2.4 Simulation der elektrischen Feldstärke im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung

Die bereits vorgestellten Berechnungen der elektrischen Feldstärke im Luftwickel einer Draht-Twist-Anordnung deuten darauf hin, dass es sich bei den im Kapitel 4.1 durchgeführten TE-Messungen und den dabei aufgenommenen TE, um Entladungen zwischen den lackisolierten Kupferleitern handelt. Da bei diesen Berechnungen gewisse Annahmen getroffen wurden, sollen diese Berechnungen anhand von Simulationen des elektrischen Feldes einer Draht-Twist-Anordnung überprüft werden, um ein möglichst reales Bild von den Abläufen in Falle von TE an Draht-Twisten zu bekommen. Die Simulationsrechnungen werden mit einem Feldberechnungsprogramm mit Hilfe der Finiten-Elemente-Methode durchgeführt. Das für die Simulation verwendete Modell ist in Abbildung 4.22 dargestellt. Es zeigt ein 3-D-Modell einer Draht-Twist-Anordnung mit dem dazugehörigen vereinfachten Modell, welches die Schnittebene des 3-D-Drahtmodells in der Draufsicht zeigt. Da man davon ausgehen kann, dass die Verteilung der elektrischen Feldstärke über den gesamten Draht-Twist vergleichbar ist, ist das vereinfachte Modell ausreichend, um die Verteilung der elektrischen Feldstärke um den Draht-Twist zu simulieren. Da die Simulationsergebnisse zum späteren Zeitpunkt auch mit den berechneten Werten verglichen werden, wurden dieselben Angaben für die Lackdicke ($28\mu\text{m}$), rel. Permittivität ($\epsilon_r = 4$) sowie Drahtdurchmesser ($0,67\text{mm}$) gewählt.

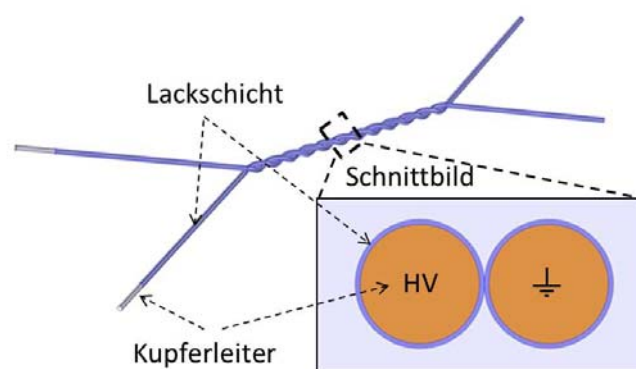


Abbildung 4.22: In der Simulation verwendetes Modell der Draht-Twist-Anordnung

Abbildung 4.23 zeigt die Verteilung der elektrischen Feldstärke, von sehr niedrig (blau) bis sehr hoch (rot), an einer Verdrehung des Draht-Twists für verschiedene Spannungen an. Es kann beo-

bachtet werden, dass die maximale elektrische Feldstärke im Luftwickel herrscht. Diese nimmt dann mit zunehmendem Abstand zwischen den zwei Drahtstücken im Luftwickel ab. Bei steigender Spannung nimmt die elektrische Feldstärke generell zu.

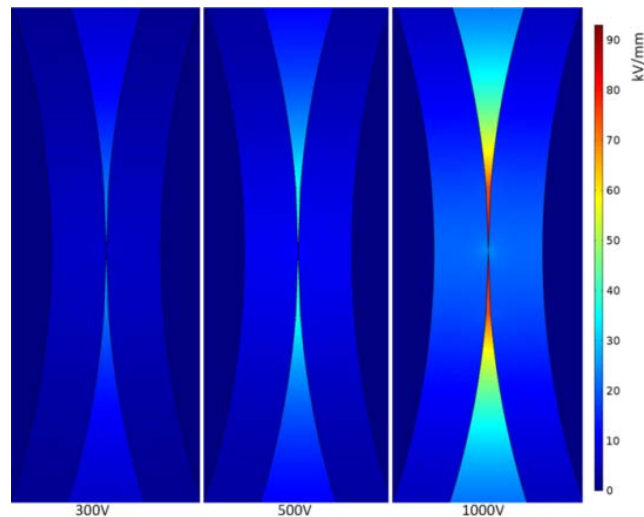


Abbildung 4.23: Verlauf der elektrische Feldstärke einer Draht-Twist-Anordnung beim Anlegen von unterschiedlichen Spannungswerten

Um den Verlauf der elektrischen Feldstärke im Luftwickel als Funktion des Abstandes der Lackdrähte darstellen zu können, wurde die Funktion des Simulationsprogramms verwendet, die elektrische Feldstärke entlang einer Linie auf der X-Achse aufzunehmen. Dies wurde dann für verschiedene Abstände zwischen den Lackdrähten wiederholt. Da entlang einer Linie auf der X-Achse die elektrische Feldstärke als nahezu konstant angesehen werden kann, bekommt man so für verschiedene Abstände einen Wert für die elektrische Feldstärke. In Abbildung 4.24 sind diese aufgenommenen Werte in einem Diagramm zusammengefasst und stellen den Verlauf der elektrischen Feldstärke im Luftwickel als Funktion des Abstandes zwischen den Lackdrähten dar. Der Verlauf der elektrischen Feldstärke ist doppelt logarithmisch aufgetragen und zeigt, wie erwartet, eine Abnahme der elektrischen Feldstärke mit zunehmendem Abstand der Lackdrähte an. Wie im Kapitel zuvor bereits gezeigt, ist vor allem der Punkt von Interesse, an dem die elektrische Feldstärke im Luftwickel die Durchschlagfeldstärke der Luft überschreitet. Daher wurde auch hier der Vergleich der in der Simulation gewonnenen Verläufe der elektrischen Feldstärke für verschiedene Spannungen mit dem Verlauf der Durchschlagfeldstärke bei Normaldruck und Normaltemperatur als Funktion des Abstandes herangezogen.

4. Untersuchung des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung

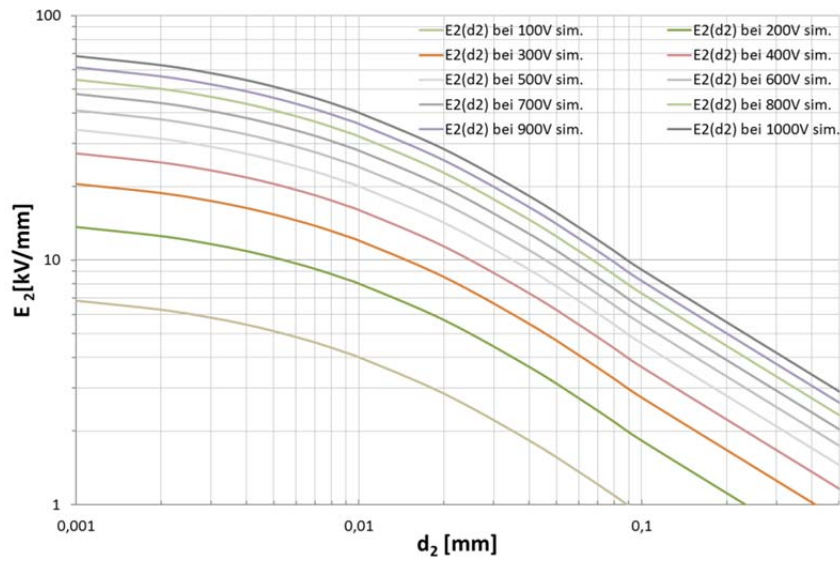


Abbildung 4.24: Simulierte elektrische Feldstärke im Luftspalt in Abhängigkeit des Abstandes bei unterschiedlichen Spannungen

In der Abbildung 4.25 sieht man, dass die Bedingungen für Entladungen im Luftwickel bei einer angelegten Spannung von 500V noch nicht erreicht sind, wobei bei dem nächsten Spannungsschritt von 600V die Bedingungen für Entladungen in der Luft schon für einen Bereich von $10\mu\text{m}$ – $40\mu\text{m}$ erfüllt sind.

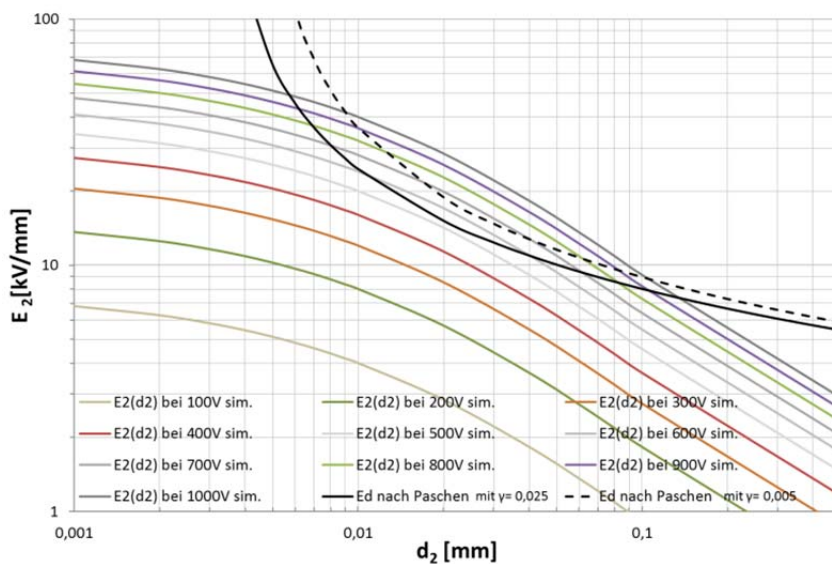


Abbildung 4.25: Überschreitung der elektrischen Durchschlagsfeldstärke im Luftwickel bei unterschiedlichen Spannungswerten (Simulation)

Der Zwischenschritt von 550V bringt eine Eingrenzung des Bereiches, bei dem die Bedingungen für Entladungen in dem Luftzwickel erfüllt sind, auf den Bereich zwischen $15\mu\text{m}$ – 25mm , vergleiche Abbildung 4.26. Hierbei ist auch der Vergleich zwischen den berechneten und den simulierten Verläufen der elektrischen Feldstärke als Funktion des Abstandes der Lackdrähte dargestellt. Für sehr kleine Abstände ist eine große Übereinstimmung des berechneten und simulierten Kurvenverlaufs der elektrischen Feldstärke feststellbar. Erst ab einem Abstand der Lackdrähte von $100\mu\text{m}$ driften die Kurvenverläufe immer weiter auseinander, was jedoch für die Abschätzung der theoretischen Einsetzspannung von TE im Luftzwickel der Draht-Twist-Anordnung nicht relevant ist. Die in der Simulation gewonnenen Ergebnisse bestätigen somit die bereits in den Berechnungen erzielten Ergebnisse, was die Annahme der Entladungen im Luftzwickel der Draht-Twist-Anordnung bekräftigt.

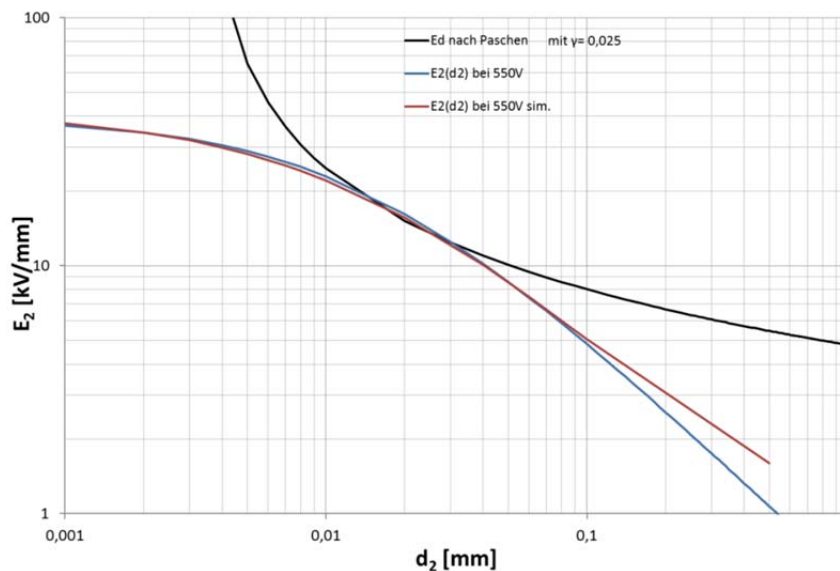


Abbildung 4.26: Vergleich der simulierten und berechneten Werte für die elektrische Feldstärke im Luftzwickel

4.2.5 Simulation der elektrischen Feldverteilung in Abhängigkeit von der Lackzunahme

Vollständigkeitshalber soll an dieser Stelle die Simulation der elektrischen Feldverteilung im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung in Abhängigkeit der Lackzunahme dargestellt werden. In der Simulation wurden für die Draht-Twist-Anordnung die gleiche geometrische Anordnung der Draht-Twiste verwendet wie zuvor in den experimentellen Untersuchungen. Hierbei handelt es sich um die Lackdrähte mit einem Leiterdurchmesser von $0,67\text{mm}$ und den Graden der Mindestlackzunahme

me G1 ($28\mu\text{m}$) sowie G2 ($53\mu\text{m}$). Abbildung 4.27 zeigt die Ergebnisse der Simulation, wobei deutlich zu sehen ist, dass das grundsätzliche Verhalten der elektrischen Feldstärke ähnliche Merkmale aufweist. Bei beiden Geometrien herrscht die maximale elektrische Feldstärke in dem Luftwickel und nimmt mit größer werdendem Luftwickel nach außen ab. Jedoch kann auch beobachtet werden, dass die elektrische Feldstärke beim Draht-Twist T067G2-12 eine niedrigere elektrische Feldstärke in dem Luftwickel aufweist. Dies hat zur Folge, dass die Bedingungen für Entladungen in dem Luftwickel erst bei höheren Spannungen erreicht werden können und es somit zu höheren TE-Einsatzspannungen bei den Draht-Twisten vom Grad G2 kommt.

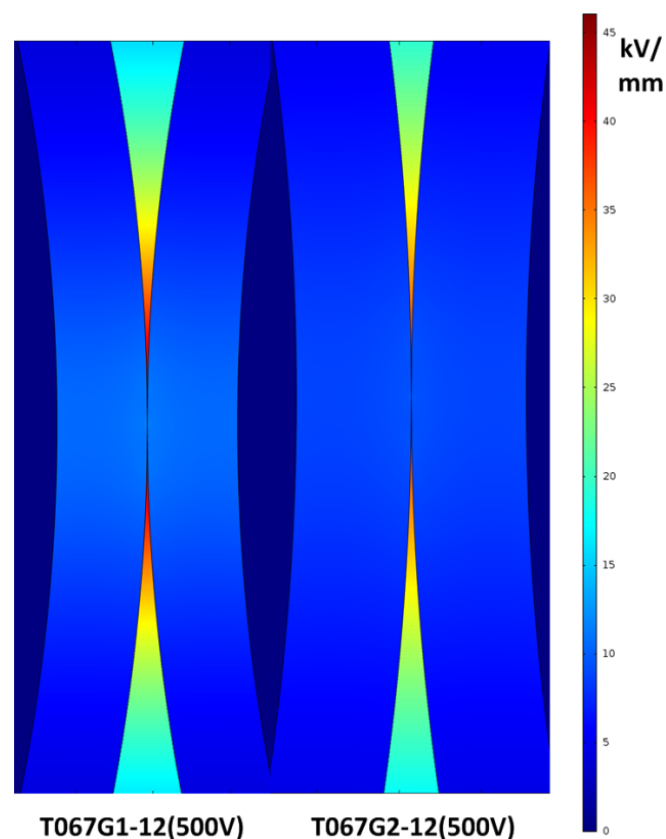


Abbildung 4.27: Einfluss der Lackzunahme auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel (Simulation)

4.3 Messung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung an Draht-Twisten bei impulsförmiger Prüfspannung

In diesem Abschnitt sollen die Untersuchungen bezüglich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bei impulsförmiger Prüfspannung vorgestellt werden. Solange nicht ausdrücklich darauf hingewiesen wird, sind alle gezeigten Messergebnisse der TE-Einsetz- und Aussetzspannung mit Hilfe eines HFCT und dem in Kapitel 3 gezeigten Messaufbau für die TE-Messung bei impulsförmiger Prüfspannung erzielt worden. Für die Durchführung der TE-Messungen wurde lediglich der Impulsgenerator variiert, je nachdem welche Anstiegszeiten der Spannungsimpulse untersucht wurden. Der verwendete Impulsgenerator wird ausführlich bei der Beschreibung der durchgeführten Untersuchung erwähnt. Untersucht wurde das TE-Verhalten der Windungsisolierung in Abhängigkeit unterschiedlicher Faktoren, wie z. B. Anstiegszeit, Dauer und Wiederholrate (Frequenz) der Impulse, aber auch der Einfluss der Lackdrahteigenschaften wie Lackzunahme und Leiterdurchmesser. Ebenfalls wurde der Einfluss der schon bei den Untersuchungen mit sinusförmiger Spannung verwendeten Parameter wie die Imprägnierung und Umwelteinflüsse untersucht. Ziel war es, die Abhängigkeit der Einsetz- und Aussetzspannung der TE in Abhängigkeit der genannten Faktoren zu hinterfragen sowie eine Basis in Bezug auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung zu schaffen. Die unter impulsförmiger Prüfspannung gewonnenen Ergebnisse sollen dann im nächsten Schritt mit den Ergebnissen, die unter sinusförmiger Prüfspannung gewonnen wurden, verglichen werden.

4.3.1 TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung

Die Messung der TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung erfolgt, wie zuvor bereits erklärt, mit Hilfe eines HFCT, welcher es ermöglichte, die TE bei impulsförmiger Prüfspannung zu detektieren. Für die in diesem Fall durchgeführten Untersuchungen wurde für die Erzeugung der Spannungsimpulse der im Kapitel 3 beschriebene Hochspannungsverstärker verwendet. Die Untersuchung wurde sowohl für unipolare als auch für bipolare Rechteck-Spannungsimpulse durchgeführt. Um die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden die Parameter wie Anstiegszeit (t_r), Dauer (t_d) und Frequenz (f) der Spannungsimpulse bei beiden Impulsformen konstant gehalten. Als Vergleichsgröße wurde zunächst der Maximalwert der Spannung gewählt. Die Ergebnisse dieser Messung können der Abbildung 4.28 entnommen werden. Hierbei sind die Ergebnisse für die TE-Einsetz- und Aussetzspannung als Mittelwerte, jeweils für eine unipolare und eine bipolare Impulsspannung, aufgetragen. Die Mittelwerte und die dazugehörigen

4. Untersuchung des Teilentladungsverhaltens der Windungsisolierung

Standardabweichungen sind aus den TE-Messungen an jeweils zehn Draht-Twisten bestimmt worden.

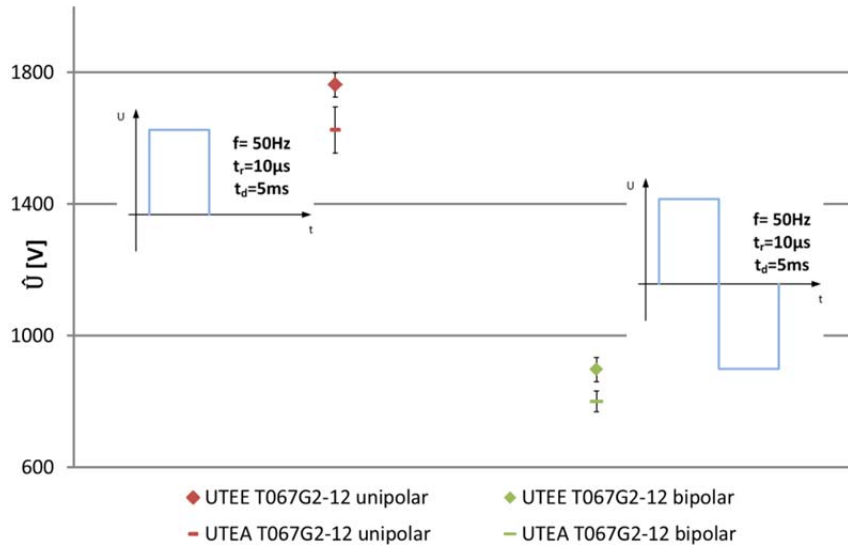


Abbildung 4.28: Vergleich der TE-Einsetz- und Aussetzspannungsmaximalwerte bei uni- und bipolarer Impulsspannung

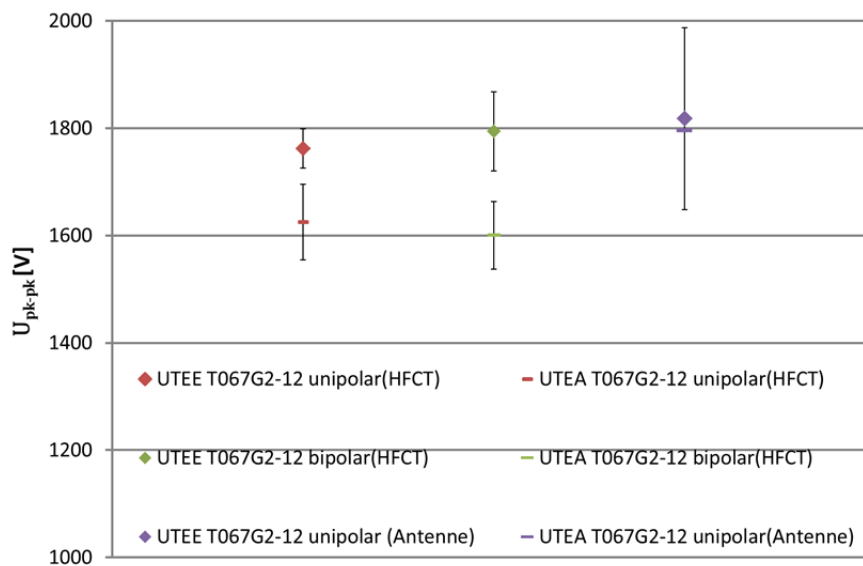


Abbildung 4.29: Vergleich der Spitze-Spitze-Werte der TE Einsetz- und Aussetzspannung bei uni- und bipolarer Impulsspannung

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, ist die TE-Einsetzspannung an den Draht-Twisten bei unipolarer Spannung in der Darstellung der Amplituden der Impulsspannungen höher im Vergleich zur

bipolaren Impulsspannung. Vergleicht man jedoch die Spitze-Spitze-Werte der Spannungen, was bei unipolarer Impulsspannung ebenfalls der Amplitude entspricht, so stellt man fest, dass die Ergebnisse der TE-Einsetzspannung ähnliche Werte aufweisen; vergleiche Abbildung 4.29. Um die Ergebnisse der TE-Messung zu überprüfen, wurden Vergleichsmessungen mit einem Windungstester, dessen Funktionsweise bereits im Kapitel 3.4 näher betrachtet wurde, überprüft. Auch hier sind die Ergebnisse für die TE-Einsetzspannung vergleichbar mit den Spitze-Spitze-Werten der Messung mit der bipolaren Impulsspannung, obwohl hierbei die Draht-Twiste mit unipolaren Spannungsimpulsen mit niedrigeren Anstiegszeiten ($t_r = 500\text{ns}$) beaufschlagt wurden.

Bei diesen Untersuchungen konnten die Ergebnisse von Kaufhold bezüglich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung unter unipolaren und bipolaren Spannungsimpulsen, trotz unterschiedlich verwendeter Messverfahren, bestätigt werden.

Kaufhold macht die heteropolaren Ladungsträgeransammlungen für die Tatsache verantwortlich, dass die Spitze-Spitze-Werte der TE-Einsetzspannung bei unipolarer und bipolarer Impulsbelastung vergleichbar sind. Im Fall von unipolarer Impulsbelastung können diese das von außen angelegte elektrische Feld abschwächen, so dass eine entsprechend höhere Spannung notwendig ist, um TE hervorzurufen [Kau95]. Dies soll zum späteren Zeitpunkt nochmals aufgegriffen werden, indem Draht-Twiste unter uni- und bipolarer Impulsspannung gealtert werden. Hierbei soll überprüft werden, ob der Vergleich der Spitze-Spitze-Spannung bei uni- und bipolarer Impulsspannung tatsächlich vollbracht werden kann. Des Weiteren konnte der Einfluss der Anstiegszeit nicht festgestellt werden, wie aus den Ergebnissen der dritten Messung hervorgeht. Hierbei wurden mit dem Windungstester deutlich schnellere Spannungsimpulse ($t_r=500\text{ns}$) generiert, jedoch konnten für die TE-Einsetzspannung nur vergleichbare Ergebnisse wie mit langsameren Spannungsimpulsen ($t_r=10\mu\text{s}$) erzielt werden. Dieses soll nochmals mit weiteren Anstiegszeiten durchgeführt werden, um den Einfluss der Anstiegszeit der Spannungsimpulse genauer zu untersuchen.

Die Tatsache, dass die Ergebnisse der TE-Einsetzspannung bei unipolarer und bipolarer Impulsspannung miteinander verglichen werden können, wirft die Frage auf, inwieweit es einen solchen Zusammenhang mit den Ergebnissen bei sinusförmiger Spannung gibt. Könnte eine TE-Messung unter sinusförmiger Prüfspannung eventuell die gleichen Aussagen bringen, wie die Messungen unter impulsförmiger Prüfspannung? Aus Sicht einer qualitätssichernden Prüfung ist die TE-Messung unter sinusförmiger Prüfspannung sicherlich ein Messverfahren, welches aufgrund seiner fortschrittlichen Entwicklung im Vergleich zu den Messverfahren unter impulsförmiger Prüfspannung einige Vorteile mit sich bringen würde. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, dass

bei der oben gezeigten Untersuchung die Einflüsse der Parameter wie Anstiegszeit, Dauer und Frequenz der Spannungsimpulse außer Acht gelassen wurden bzw. konstant gehalten wurden. Daher bedarf es weiterer Untersuchungen, die die bereits genannten Parameter miteinschließen, um eventuellen Einfluss dieser auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung zu untersuchen. Bevor jedoch der Einfluss der Impulsparameter untersucht wird, sollen an dieser Stelle zunächst Untersuchungen zum Einfluss der bereits bei sinusförmiger Spannung untersuchten Parameter wie Lackzunahme, Leiterdurchmesser sowie Umwelteinflüsse untersucht werden.

4.3.2 Einfluss von Drahteigenschaften

Bei den Untersuchungen unter sinusförmiger Spannung konnte ein Einfluss der Lackzunahme auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung nachgewiesen werden. Grund hierbei war, dass mit zunehmender Lackdicke die elektrische Feldstärke im Luftwickel abgenommen hat aufgrund des immer größeren Abstandes der Elektroden bzw. Kupferleiter und somit bei größer werdenden Lackdicken höhere Spannungen erforderlich waren, um Entladungen im Luftwickel zu generieren. Der Leiterdurchmesser hingegen brachte im betrachteten Bereich jedenfalls nahezu keine nennenswerte Änderung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel und somit auch keine nennenswerten Änderung der TE-Einsetz- und Aussetzspannungen. Diese Untersuchungen sollen an dieser Stelle unter impulsförmiger Spannung durchgeführt werden, um Aussagen darüber machen zu können, ob und in welcher Weise das TE-Verhalten bei impulsförmiger Spannung von den Drahteigenschaften beeinflusst wird.

Wie in Abbildung 4.30 zu sehen ist, ist auch bei impulsförmiger Spannung ein Einfluss der Lackdicke auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung feststellbar. Hierbei wurden die Draht-Twiste mit unipolaren Impulsen mit der Anstiegszeit von 500ns und einer Frequenz von 50Hz beaufschlagt. Für die Erzeugung der Spannungsimpulse wurde der unter Punkt 3.2 im Kapitel 3 beschriebene Impulsgenerator verwendet. Die TE-Einsetzspannung steigt mit größer werdender Lackdicke an, was natürlich zur Folge hat, dass auch die TE-Aussetzspannung einen Anstieg erfährt. Offensichtlich handelt es auch in diesem Fall um Entladungen im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung, so dass eine Änderung der Lackzunahme eine Änderung der elektrischen Feldstärke im Luftwickel bewirkt, was sich wiederum auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung auswirkt.

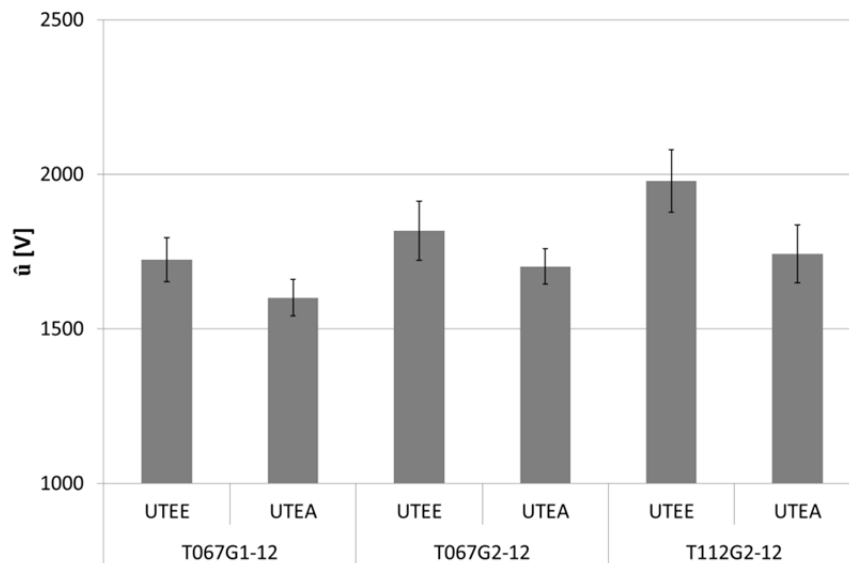


Abbildung 4.30: Einfluss der Lackzunahme auf die TE-Einsatzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung

Eine Imprägnierung der Draht-Twiste bringt eine Erhöhung der TE-Einsatz- und Aussetzspannung mit sich, wie es der Abbildung 4.31 entnommen werden kann.

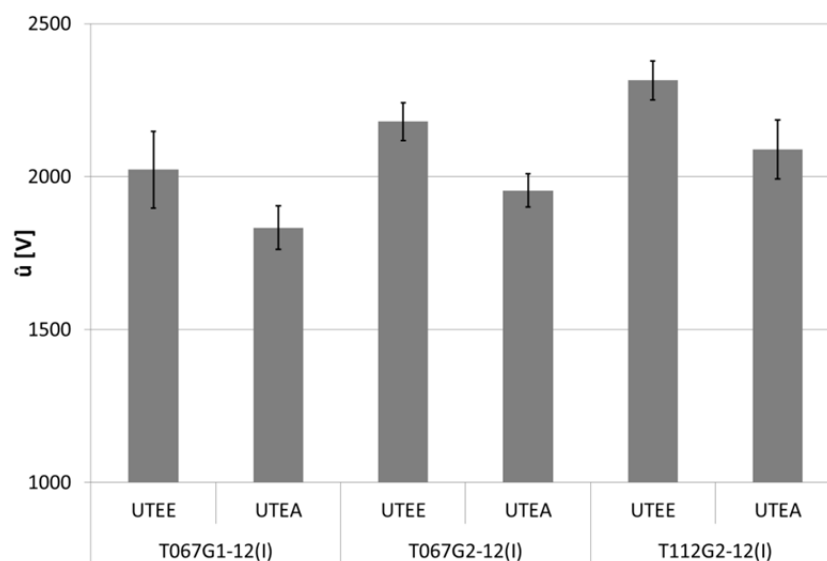


Abbildung 4.31: Einfluss der Imprägnierung auf die TE-Einsatzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung

Dies bekräftigt ebenfalls die Tatsache, dass es bei den zuvor gezeigten TE-Messung an nicht imprägnierten Draht-Twisten um Entladungen im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung handelt. Das Imprägnierharz füllt den Luftwickel aus und verbessert so die elektrischen Isoliereigenschaften.

ten der Draht-Twist-Anordnung. Die erhöhte Streuung der Messwerte kann auf die Qualität der Imprägnierung zurückgeführt werden, da Lufteinschlüsse nicht ausgeschlossen werden können.

4.3.3 Einfluss von Temperatur, Druck und Feuchte

Der Einfluss der Umweltbedingungen auf das TE-Verhalten ist auch unter impulsförmiger Spannung zu erwarten, wenn man voraussetzt, dass die Entladungen im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung stattfinden. Durch die Änderung der Umweltbedingungen ändern sich auch die Bedingungen für die elektrischen Entladungen im Luftwickel. Dieses kann anhand der Ergebnisse für die TE-Einsetz- und Aussetzspannung beobachtet werden. Im Folgenden sollen die Ergebnisse für die TE- Einsetz- und Aussetzspannung in Abhängigkeit von Temperatur, Druck und Feuchte bei impulsförmiger Spannung gezeigt werden. Der Verlauf der TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung in Abhängigkeit der Temperatur zeigt ein vergleichbares Verhalten, wie die bereits erzielten Ergebnisse bei einer sinusförmigen Prüfspannung. Der Trend der TE-Messwerte für die TE-Einsetz- und Aussetzspannung verläuft negativ mit ansteigender Temperatur; vergleiche Abbildung 4.32.

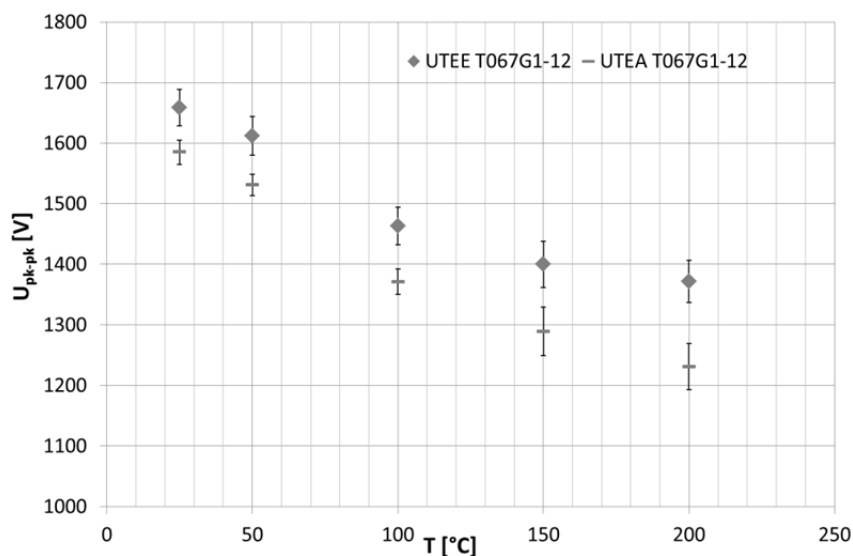


Abbildung 4.32: Einfluss der Umgebungstemperatur auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung

Auch der Einfluss der rel. Luftfeuchte sowie des Umgebungsdrucks bei impulsförmiger Prüfspannung auf die TE-Einsetzspannung, wie man der Abbildung 4.33 sowie Abbildung 4.34

entnehmen kann, ist mit dem Einfluss bei sinusförmiger Prüfspannung vergleichbar und somit von der Spannungsform unabhängig.

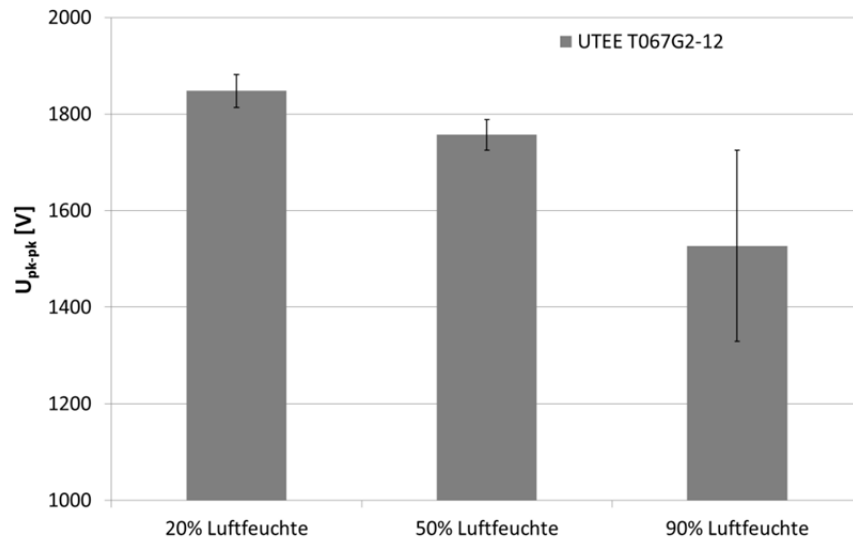


Abbildung 4.33: Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die TE-Einsatzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung ($T=30^{\circ}\text{C}$)

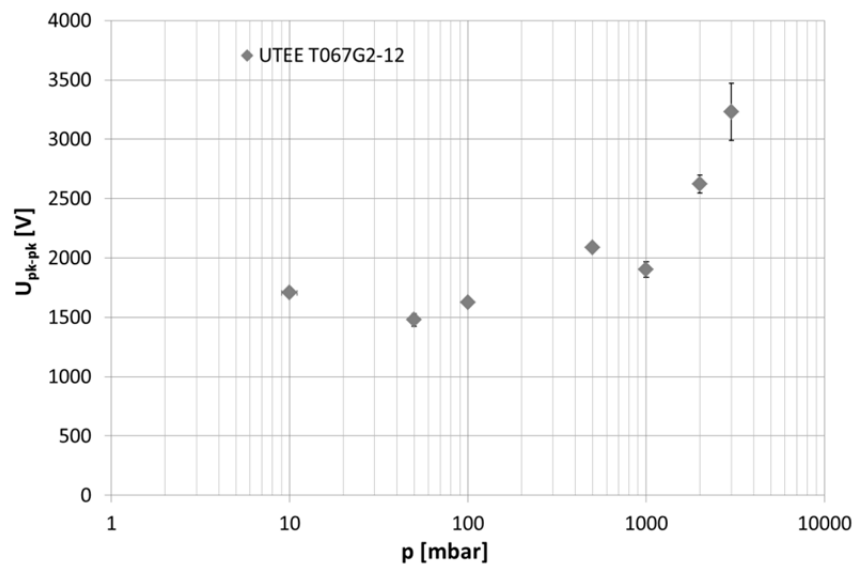


Abbildung 4.34: Einfluss des Umgebungsdruckes auf die TE-Einsatzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung

4.3.4 Einfluss von Anstiegszeit, Dauer und Frequenz der Spannungsimpulse

In diesem Kapitel soll der Einfluss der Spannungsform bzw. der einstellbaren Parameter einer impulsförmigen Spannung wie Anstiegszeit, Dauer sowie die Frequenz der Spannungsimpulse auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung untersucht werden.

Einfluss der Anstiegszeit von Spannungsimpulsen:

Die Untersuchungen in Bezug auf den Einfluss der Anstiegszeit wurden mit unipolaren Spannungsimpulsen und mit dem in Kapitel 3.2 bereits vorgestellten Impulsgenerator durchgeführt. Hierbei wurde die Anstiegszeit der Impulse zwischen 50ns und 10µs bei einer Frequenz der Spannungsimpulse von 50Hz variiert und die TE-Einsetz- und Aussetzspannung bestimmt. Die Bestimmung der TE-Einsetz- und Aussetzspannung erfolgte jeweils an zehn Prüflingen pro eingestellte Anstiegszeit der Spannungsimpulse. Als Ergebnis sind dann die Mittelwerte für die TE-Einsetz- und Aussetzspannung mit entsprechender Standardabweichung der Mittelwerte in der Abbildung 4.35 dargestellt.

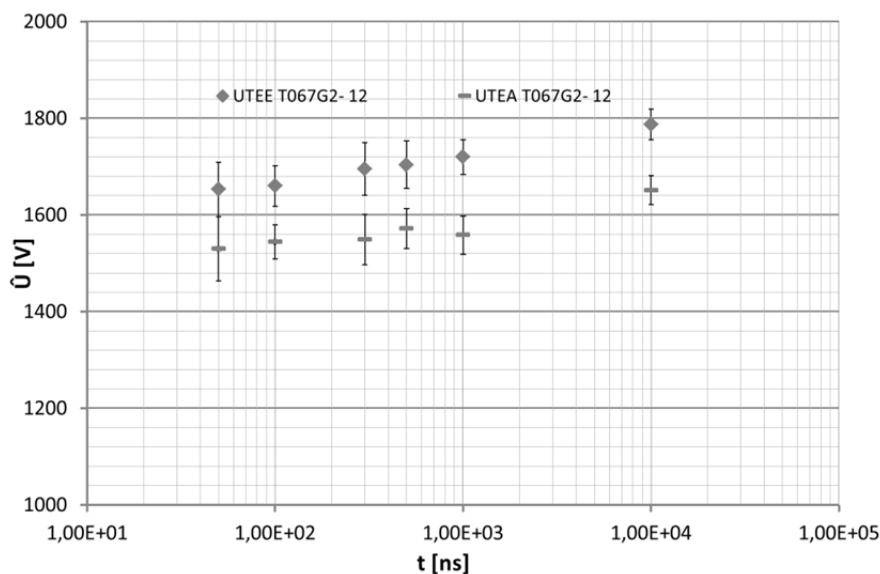


Abbildung 4.35: Einfluss der Impulsanstiegszeit auf die TE-Einsetzspannung

Es kann tendenziell ein Einfluss der Anstiegszeit auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung beobachtet werden. Bei niedrigeren Anstiegszeiten der Spannungsimpulse findet ein früheres Einsetzen der TE statt. Zwar kann bei Anstiegszeiten der Spannungsimpulse im Bereich zwischen 50ns und 1µs keine statistisch abgesicherte Aussage über einen negativen Einfluss der Anstiegszeit gemacht

werden, da es eine Überschneidung der Fehlerindikatoren gibt, nimmt man jedoch die Ergebnisse für langsamere Anstiegszeiten z. B. $10\mu\text{s}$ in Betracht, so kann ein Absinken der TE-Einsatzspannung bei Spannungsimpulsen bei schnelleren Anstiegszeiten beobachtet werden.

Vergleichbare Ergebnisse konnten mit imprägnierten Prüflingen nicht erzielt werden. Hier kann der Einfluss der Anstiegszeit aufgrund der höheren Streuung der Messwerte nicht beobachtet werden, so dass keine statistisch abgesicherten Aussagen über den Einfluss der Anstiegszeit gemacht werden können. Der Nachweis über die Ursache für ein solches Verhalten der TE-Einsatz- und Aussetzspannung ist mit diesen Untersuchungen schwierig zu erbringen, da nur eine Änderung der TE-Einsatz- und Aussetzspannung festgestellt werden kann.

Geht man jedoch davon aus, dass die Entladungen im Luftzwickel aufgrund von Überschreitung der elektrischen Festigkeit der Luft stattfinden, so müsste es einen Grund geben, weshalb bei schneller ansteigenden Spannungsimpulsen dieses Kriterium schneller erreicht wird als mit langsameren Spannungsimpulsen. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass bei langsameren Spannungsimpulsen sich freie Ladungsträger, die natürlich in Luft vorhanden sind, auf der Lackoberfläche ansammeln bzw. ausrichten können und dem außen angelegtem elektrischen Feld entgegenwirken können. Bei sehr schnellen Spannungsimpulsen dagegen können sich die Ladungsträger nicht so schnell ausrichten und ein Gegenfeld bilden, so dass die elektrische Festigkeit der Luft schon bei geringeren Spannungen erreicht werden kann und es so früher zu Entladungen kommt. Dies könnte auch der Grund sein, weshalb die Untersuchungen bei imprägnierten Draht-Twisten keine vergleichbaren Ergebnisse in Bezug auf die Abhängigkeit von der Anstiegszeit gebracht haben. Bei imprägnierten Draht-Twisten könnte jedoch die Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse auch aufgrund der hohen Streuung der Messwerte nicht sichtbar sein.

Des Weiteren ist interessant, dass bei impulsförmiger Spannung eine gewisse „Selbstheilung“ eintritt; dies bedeutet, dass die detektierten TE nach einer Weile nicht mehr zu detektieren sind. Es scheint so, als würde der TE-Prozess wieder aussetzen, ohne dass die angelegte Spannung herabgesetzt wird. Wird die Spannung dann wieder erhöht, so erfolgt wieder ein Einsetzen der TE. Dieses Verhalten wiederholt sich mehrmals, bis eine gewisse Spannung überschritten wird, ab der dann dauerhaft TE detektiert werden können, und zwar meist auch mit steigender Intensität der Entladungen. Aus Sicht einer EoL-Prüfung ist dieses Verhalten nicht gerade erwünscht, da dies eine eindeutige Aussage über das Auftreten von TE sehr einschränkt bzw. gar unmöglich macht. Aus diesem Grund soll dieses Phänomen näher untersucht werden, vor allem in Hinsicht auf die Ursa-

che für das Wiederaussetzen der TE bei gewissen Spannungen. Des Weiteren sollen die Untersuchungen auch an imprägnierten Draht-Twisten durchgeführt werden, um zu überprüfen, ob es sich nur um ein Phänomen, welches bei nicht imprägnierten Draht-Twisten auftritt, handelt. Da dieses Verhalten bei sinusförmiger Spannung nicht beobachtet werden konnte, ist davon auszugehen, dass die Prüfspannung maßgeblich zum beobachteten Prozess beitragen muss.

Einfluss der Dauer von Spannungsimpulsen:

Als ein weiterer Parameter wurde der Einfluss der Dauer von Spannungsimpulsen auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung untersucht. Hierbei wurden andere Parameter wie Anstiegszeit, Abfallzeit und Frequenz der Spannungsimpulse konstant gehalten und die Dauer der Impulse variiert. Die Einstellung der Dauer erfolgt über den sogenannten Duty-Cycle und wird in Prozent eingestellt. Die Anstiegs- und Abfallzeit betragen jeweils $15\mu\text{s}$ bei einer Frequenz der Spannungsimpulse von 50Hz.

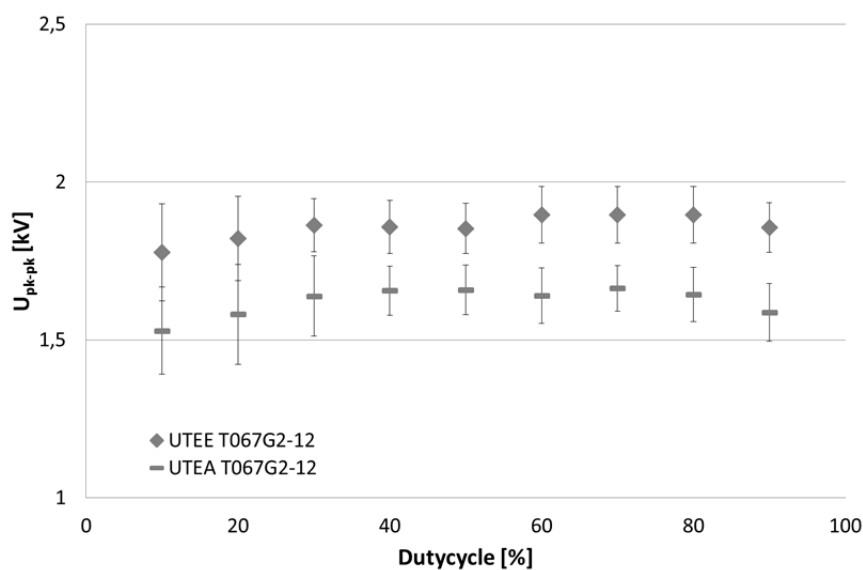


Abbildung 4.36: Einfluss der Impulsdauer auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung

Die Variation der Spannungsimpulse erfolgte zwischen 10%–90% des Duty-Cycle, wobei pro eingestellten Duty-Cycle jeweils zehn Twiste vermessen wurden. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4.36 als Mittelwerte mit der entsprechenden Standardabweichung zusammengefasst. Es kann kein Einfluss der Dauer von Spannungsimpulsen festgestellt werden. Alle Ergebnisse bewegen sich im gleichen Wertebereich und es findet eine Überschneidung der Standardabweichung aller Messpunkte statt. Ein Einfluss der Dauer von Spannungsimpulsen ist auch bei anderen

Anstiegs- und Abfallzeiten der Spannungsimpulse nicht zu erwarten. Wie bereits gesehen, finden die TE mit einer gewissen Verzugszeit im Bereich des größten Spannungsanstieges statt, unabhängig davon, wie lange der Spannungsimpuls auf dem Maximalwert der Spannung verweilt.

Einfluss der Frequenz von Spannungsimpulsen:

Wie bereits bei sinusförmiger Spannung durchgeführt, soll auch der Einfluss der Frequenz von Spannungsimpulsen auf das TE-Verhalten von Draht-Twisten bei impulsförmiger Spannung durchgeführt werden. Verwendet wurden bipolare Spannungsimpulse mit einer Anstiegszeit von $10\mu\text{s}$ und einer Abfallzeit von $15\mu\text{s}$. Zu beachten ist hierbei, dass die Anstiegs- und Abfallzeiten der Spannungsimpulse nicht bis 20kHz konstant gehalten werden konnten, da der verwendete Hochspannungsverstärker an seine Grenzen gestoßen ist und hierbei das Spannungssignal verzerrt wurde, so dass dies eine Auswirkung auf die Anstiegs- und Abfallzeiten der Spannungsimpulse gab. Die Auswirkung auf die Anstiegs- und Abfallzeit äußerte sich, indem die Anstiegs- und Abfallzeit der Spannungsimpulse vergrößert wurden.

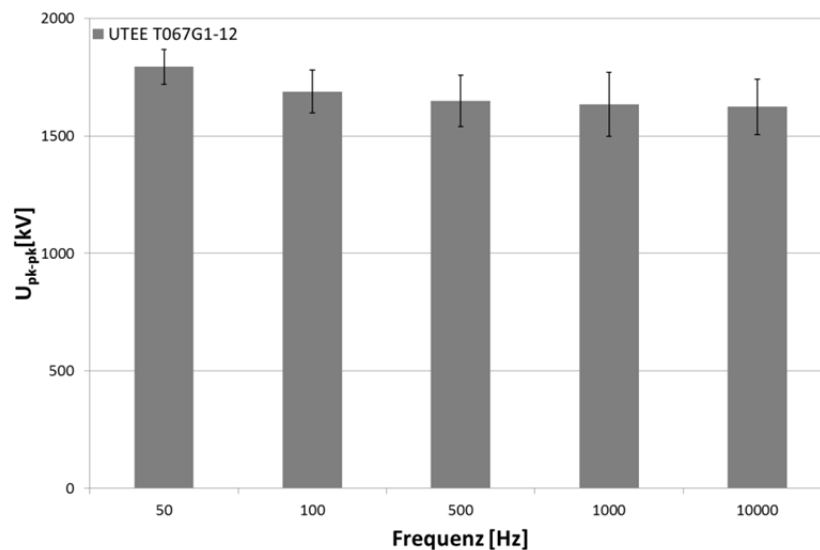


Abbildung 4.37: Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsatzspannung von Draht-Twisten bei impulsförmiger Prüfspannung

Wie jedoch der Abbildung 4.37 entnommen werden kann, konnte auch hier kein Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsatzspannung in dem betrachteten Frequenzbereich festgestellt werden.

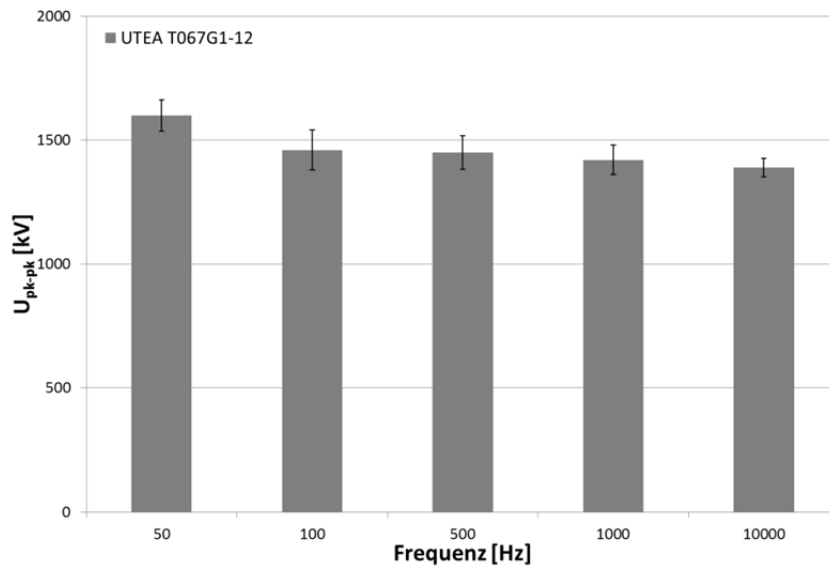


Abbildung 4.38: Einfluss der Frequenz auf die TE-Aussetzspannung von Draht-Twisten bei impulsförmiger Prüfspannung

Vergleicht man diese Ergebnisse der TE-Einsatzspannung mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3.1, die mit Einzelimpulsen erzielt wurden, so kann gesagt werden, dass vergleichbare Ergebnisse für die TE-Einsatzspannung erzielt werden. Auch für die TE-Aussetzspannung konnte kein Einfluss der Frequenz in dem betrachteten Bereich festgestellt werden, wie der Abbildung 4.38 entnommen werden kann.

Somit kann festgehalten werden, dass nur eine Anstiegszeitänderung der Spannungsimpulse eine Veränderung in der TE-Einsatzspannung hervorruft. Dies äußert sich so, dass die TE-Einsatzspannung mit abnehmender Anstiegszeit der Spannungsimpulse abnimmt. Wie bereits in den Ergebnissen gesehen, ist dieses Verhalten jedoch mit einer gewissen Streuung behaftet; außerdem tritt nach einer gewissen Zeit eine „Selbsteilung“ auf, welche ebenfalls mit einer Streuung behaftet ist. Die „Selbsteilung“ äußert sich so, dass nach einem messbar erfolgten TE-Einsatz die detektierten Entladungen nach einer undefinierten Zeit nicht mehr messbar sind. Somit kann ein direkter Zusammenhang zwischen der Anstiegszeit der Spannungsimpulse und der TE-Einsatzspannung nur beschränkt gelten. Es ist offensichtlich, dass andere Prozesse einen Einfluss auf das elektrische Feld im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung nehmen. Denkbar ist, dass aufgrund von Raumladungen das elektrische Feld im Luftwickel lokal beeinflusst wird, was dazu führt, dass die elektrische Feldstärke lokal herabgesetzt werden kann und es somit wieder zum Erlöschen der Entladungen im Luftwickel der Draht-Twist-Anordnung kommen kann. Dieses soll jedoch im nächsten Kapitel genauer betrachtet werden.

4.3.5 Einfluss von Aufladungsprozessen

Für den Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen von elektrischen Traktionsmotoren ist es unabdingbar, mögliche Störeinflüsse zu kennen. Nur wenn bekannt ist, welche Einflussgrößen die Messung in welcher Weise beeinflussen, ist es möglich, die aus den TE-Messungen gewonnene Ergebnisse genau zu interpretieren und eine Entscheidung (z. B. „IO“ „NIO“) über den Zustand der untersuchten Isolation zu treffen. Bei der oben beschriebene „Selbsteilung“, in der nach einer erfolgreichen Detektion von TE an einer Draht-Twist-Anordnung diese wieder aussetzen und nicht mehr messbar sind und ein erneuter Einsatz der TE erst nach einer wiederholten Steigerung der angelegten Prüfspannung erfolgt, ist eine „IO“- oder „NIO“-Entscheidung sehr schwer zu fällen. Schwierig ist dies deshalb, da eine eindeutige Entscheidung nach der ersten Detektion von TE nicht zweifellos getroffen werden kann. Es stellt sich z. B. die Frage, über welchen Zeitraum TE auftreten müssen und mit welcher Intensität, damit eine Prüfung als nichtbestanden gewertet werden kann bzw. der Prüfling die Qualitätsanforderungen nicht erfüllt. Lässt die Messung an sich schon keine eindeutigen Ergebnisse zu, bzw. treten durch die Messung Rückwirkungen auf die Ergebnisse der Messung auf, so könnten womöglich Statoren aussortiert werden, die gar nicht hätten aussortiert werden müssen, oder gar Statoren die Prüfung passieren, welche nicht den Qualitätsstandard halten können.

Daher soll an dieser Stelle, dieser Vorgang der „Selbsteilung“ einer Draht-Twist-Anordnung näher untersucht werden. Wie bereits angenommen, finden die Entladungen im Luftzwickel der Draht-Twist-Anordnung statt. Hierbei breitet sich durch die angelegte Prüfspannung ein elektrisches Feld an der Draht-Twist-Anordnung aus, wobei das elektrische Feld die elektrische Feldstärke der Luft im Luftzwickel dieser Anordnung überschreiten kann, was letztlich dazu führt, dass Entladungen in dem Luftzwickel stattfinden können. Bedenkt man, dass die Entladungen im Luftzwickel durch Stoßionisation weitere freie Ladungsträger generieren können, welche aufgrund der Lackschicht und deren hohem spezifischen Widerstand auf beiden Seiten der Draht-Twist-Anordnung nicht abfließen können, so ist es denkbar, dass es zu örtlichen Ansammlungen von Raumladungen kommen kann, welche einen Einfluss auf das von außen angelegte elektrische Feld haben können. Dieser Einfluss der Raumladungen könnte sich auch in der Schwächung des elektrischen Feldes äußern, so dass das elektrische Feld im Luftzwickel wieder unterhalb der elektrischen Durchschlagfeldstärke sinkt und es daher zum Erlöschen der Entladungen kommen kann.

Aus diesem Grund wurden Untersuchungen durchgeführt, die das Vorhandensein von Raumladungen an der Draht-Twist-Anordnung nach dem ersten Einsetzen der TE nachweisen sollen. Der

Nachweis von Raumladungen würde die oben beschriebene These unterstützen und als eine mögliche Erklärung des Vorganges der „Selbstheilung“ dienen können. Des Weiteren ist es von Interesse, ob dieser Effekt auch an imprägnierten Draht-Twisten zu beobachten ist, da im Normalfall einer „EoL-Prüfung“ die Statoren imprägniert sind. Wie die Ergebnisse der bereits durchgeführten TE-Messungen gezeigt haben, wird der TE-Einsatz dann maßgeblich von der Qualität der Imprägnierung mitbestimmt. Bei den ersten Untersuchungen zur „Selbstheilung“ ist aufgefallen, dass die „Selbstheilung“ nach unterschiedlichen Zeiten auftritt. Da ist zunächst einmal eine gewisse Streuung der Zeit bis zum Erlöschen der Entladungen, wenn man die Messungen an unterschiedlichen Draht-Twisten durchführt. Führt man jedoch die TE-Messungen immer wieder an demselben Draht-Twist durch, so stellt man fest, dass die Zeit bis zum vollständigen Erlöschen der Entladungen variiert. Werden TE-Messungen unmittelbar nacheinander durchgeführt, so nimmt die Zeit bis zum Erlöschen der Entladungen immer weiter ab und die „Selbstheilung“ erfolgt immer schneller. Führt man jedoch die TE-Messung am selben Draht-Twist nach 24h durch, so ist festzustellen, dass die Zeit bis zur „Selbstheilung“ wieder, bis auf eine geringe Streuung, der Zeit der ersten Messung entspricht. Es besteht offensichtlich eine Zeitkonstante, die verstreichen muss, nach der die „Selbstheilung“ wieder die gleiche Zeit für das Verlöschen der Entladungen wie bei der ersten Vermessung benötigt.

Abbildung 4.39 zeigt die Ergebnisse der TE-Messung an zehn Draht-Twisten, bei denen die Zeit nach dem Einsetzen der TE bis zum Verlöschen der TE gemessen wurde. Dabei wurde die angelegte Spannung (unipolare Spannungsimpulse) nach einem erfolgten Einsetzen der TE nicht mehr verändert. Die Ergebnisse sind als Mittelwerte aus zehn Messungen mit der dazugehörigen Standardabweichung aufgetragen. Die Referenzmessung wurde nach einer Zeitkonstante von 1min, 10min, 60min und 24h wiederholt. Es kann beobachtet werden, dass bei der Referenzmessung das Aussetzen der TE nach einer Zeit von ca. 3min vonstattengeht, wobei die Werte mit einer gewissen Streuung behaftet sind. Wie oben bereits angemerkt, ist die Zeit bis zum Verlöschen der TE nach einer Pause von 24h wieder mit der Referenzmessung vergleichbar. Die Messungen dazwischen zeigen alle eine abweichende Zeit bis zum Verlöschen der TE. Die Tendenz dieser Messungen ist: Umso kürzer die Zeitkonstante zwischen der Referenzmessung und der Folgemessung, desto schneller kommt es zur „Selbstheilung“ bzw. zum Verlöschen der TE. Es scheint so, als ob Ladungsträger eine gewisse Zeit an der Draht-Twist-Anordnung „haften“ bleiben, und dass so bei Folgemessungen nicht mehr so viele neue Ladungsträger benötigt werden, um ein Gegenfeld aufzubauen. Daher nimmt die Zeit bis zum Verlöschen der TE bei Folgemessungen immer weiter ab. Ist jedoch die Zeitkonstante lange genug, damit die Ladungsträger abgebaut werden können, wie das offensichtlich bei 24h der Fall ist, so sind keine Ladungsträger an der Draht-Twist-Anordnung

vorhanden und die Folgemessung nach 24h ergibt vergleichbare Ergebnisse wie die Referenzmessung.

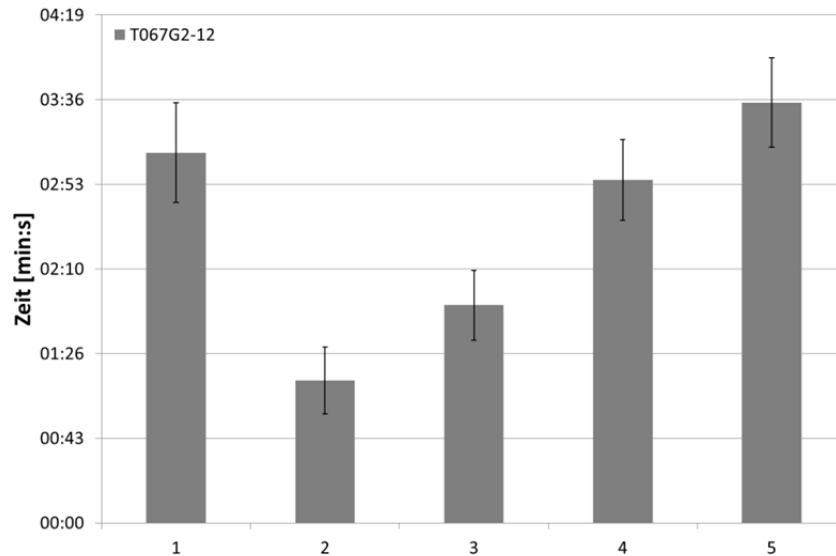


Abbildung 4.39: Messung der Zeit bis zum Verlöschen der TE

(1) Referenzmessung (2) nach 1min (3) nach 10min (4) nach 60min (5) nach 24h

Sollte das tatsächlich der Fall sein, so müsste ein Abtragen der Ladungsträger bzw. ein Entladen der Draht-Twist-Anordnung unmittelbar nach der TE-Messung dazu führen, dass die Zeit bis zum Verlöschen der TE unabhängig von der Zeitkonstante zwischen der Referenz- und der Folgemessung ist, so dass die Dauer bis zum Verlöschen der TE, bis auf eine gewisse Streuung, nicht mehr variiert. Daher wurde bei den Folgeuntersuchungen darauf geachtet, dass nach jeder Messung die Draht-Twiste entladen wurden. Hierfür wurden zwei unterschiedliche Arten der Entladung angewandt. Als erstes wurden die Lackschichten nach der TE-Messung mit einer Masseleitung für eine Dauer von 1min verbunden und danach wieder einer TE-Messung unterzogen. Nachteil dieser Entladung ist, dass die Kontaktierung nur an einer Stelle der Draht-Twiste erfolgt, so dass nur punktuell die Ladungsträger abfließen können. Daher wurde auch eine zweite Art der Entladung verwendet. Hierbei wurde der Draht-Twist mit einer leitfähigen, mit der Masse verbundenen Bürste abgetragen. Hier lag der Vorteil darin, dass der ganze Draht-Twist entladen werden konnte. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Abbildung 4.40 zusammengefasst. Es ist wieder der Mittelwert aus zehn Messungen der Dauer bis zum Verlöschen der TE nach der ersten Detektion der TE mit der dazugehörigen Standardabweichung abgetragen. Es kann beobachtet werden, dass ein einfaches Entladen der Draht-Twist-Anordnung mit dem Anlegen einer Masseleitung an die Lack-

schichten nicht ganz das erwartete Ergebnis bringt. Anscheinend wird die Draht-Twist-Anordnung nicht komplett entladen, da die Zeit bis zum Verlöschen der TE nicht ganz der Zeit der Referenzmessung entspricht. Ein Entladen der Draht-Twist-Anordnung mit dem „Abtragen“ der angesammelten Ladungsträger mit der leitfähigen Bürste bringt jedoch, wie man dem Diagramm entnehmen kann, das erwartete Ergebnis. Hierbei werden vergleichbare Zeiten bis zum Verlöschen der TE wie bei der Referenzmessung erzielt. Dies spricht zum einen dafür, dass das Entladen der Draht-Twist-Anordnung mit der leitfähigen Bürste eine bessere Möglichkeit zur Entladung derselben bietet, und zum anderen beweist es die Annahme, dass es zu Ladungsträgeransammlungen aufgrund der TE kommen kann.

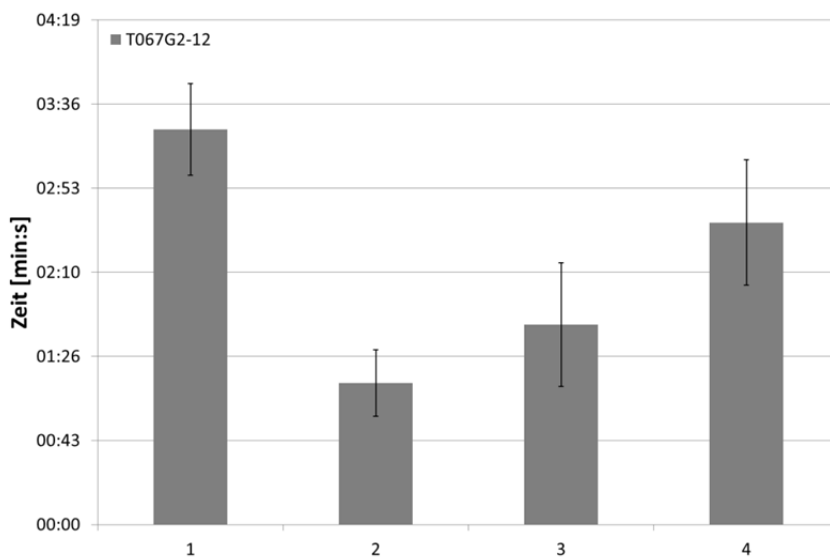


Abbildung 4.40: Messung der Zeit bis zum Verlöschen der TE

1. Referenzmessung
2. Nach 1min (ohne Entladen)
3. Nach 1min (Entladung durch Masseleitung)
4. Nach 1min (Entladung durch Bürste)

Hierbei stellt sich die Frage, warum mit größer werdenden Anstiegszeiten der Spannungsimpulse dieser Effekt der „Selbsteilung“ immer später auftritt bzw. bei sinusförmiger Prüfspannung nicht beobachtet werden kann. Denn wenn die „Selbsteilung“ aufgrund von Ladungsträgeransammlungen an der Draht-Twist-Anordnung eintritt, diese wiederum durch Stoßionisation freier Ladungsträger hervorgerufen werden und aufgrund des hohen spezifischen Widerstandes der Lackschicht nicht abfließen können, dann müsste es bei sinusförmiger Prüfspannung auch zu Ladungsträgeran-

sammlungen kommen. Auch bei sinusförmiger Prüfspannung kommt es zu Entladungen im Luftzwickel und zur Generierung freier Ladungsträger durch Stoßionisation, wobei die Prüflingsanordnung unverändert ist. Demzufolge müsste es auch zu Ladungsträgeransammlungen an Draht-Twist-Anordnung kommen.

Daher wurden die Draht-Twiste nach einer TE-Messung mit sinusförmiger Prüfspannung einem Entladevorgang unterzogen. Um einen möglichen Stromfluss zu detektieren, wurde der HFCT um die Masseleitung, mit der die Entladung durchgeführt wurde, angebracht und an das Oszilloskop angeschlossen. Die Abbildung 4.41 zeigt das Spannungssignal des HFCT nach einer TE-Messung. Es ist deutlich zu sehen, dass es auch nach einer TE-Messung unter sinusförmiger Prüfspannung zu Entladung der Draht-Twiste kommt. Was für eine Aufladung der Draht-Twist-Anordnung spricht, da ein offensichtlicher Ladungstransport stattfindet, jedoch ist die „Selbsteilung“ unter sinusförmiger Prüfspannung nicht so ausgeprägt. Mögliche Ursache hierfür könnte in der Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse liegen.

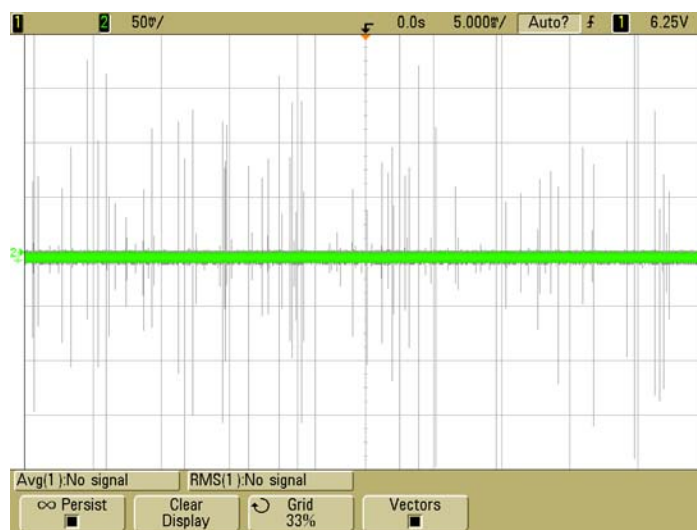


Abbildung 4.41: Spannungssignal (50mV/Div) des HFCT bei der Entladung einer Draht-Twist-Anordnung nach zehnminütiger TE-Phase

Die Untersuchungen bezüglich des „Selbsteilungs-Effektes“ wurden auch an imprägnierten Draht-Twisten durchgeführt. Hierbei konnte der „Selbsteilungs-Effekt“ nicht so eindeutig wie bei nicht imprägnierten Draht-Twisten beobachtet werden. Dabei wurde, wie auch zuvor bei den nicht imprägnierten Draht-Twisten, die Zeit bis zum Verlöschen der TE gemessen. Es kann beobachtet werden, dass nach einem erfolgten TE-Einsatz dieser auch nach einer Zeit von 10min nicht verlöscht. Offenbar ist es bei imprägnierten Draht-Twisten nicht möglich, durch TE eine heteropolare La-

dungsdichteverteilung aufzubauen, welche dem äußeren Feld entgegenwirkt und so stark ausgeprägt ist, dass es zum Verlöschen der TE kommt. Vermutlich liegt die Ursache hierfür in dem örtlich beschränkten Auftreten der TE bei imprägnierten Draht-Twisten. Es ist davon auszugehen, dass das Auftreten der TE bei imprägnierten Draht-Twisten auf die Bereiche mit Lufteinschlüssen im Imprägnier-Harz beschränkt ist. Diese Annahme wird durch bisherige TE-Messungen unterstützt. Die Ergebnisse dieser Messungen (vergleiche Kapitel 4.1.1) zeigen ein deutlich späteres Einsetzen der TE bei imprägnierten Draht-Twisten im Vergleich zu nicht imprägnierten Draht-Twisten. Was darauf hinweist, dass die Luft durch das Harz verdrängt wird und die Festigkeit der Isolieranordnung generell zunimmt. TE können nur noch in Lufteinschlüssen im Harz bei entsprechend höherer Spannung zünden, da die Bedingungen für Entladungen erst bei höheren Spannungen erreicht werden. Zudem deutet die größere Streuung der TE-Werte darauf, dass die Qualität der Imprägnierung wesentlichen Einfluss auf das Einsetzen der TE hat. Hinzu kommt noch, dass die Intensität der Entladungen, wie man den Untersuchungen bei sinusförmiger Spannung entnehmen kann, bei den imprägnierten Draht-Twisten geringer ausgeprägt ist, was auf Fehlstellen mit kleinen Dimensionen hindeutet.

Neben den Umwelteinflüssen sowie den Einflüssen der Drahteigenschaften auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung können die Aufladungsprozesse auch maßgeblich die TE-Messung an der Windungsisolierung beeinflussen. Dies gilt vor allem für TE-Messungen an nicht imprägnierten Draht-Twisten, welche nicht selten für diese Messungen eingesetzt werden. Daher sind die Angaben über die Impulsanstiegszeit, Lackdicke sowie Umweltbedingungen entscheidend beim Vergleich unterschiedlicher Messungen bzw. bei der Beurteilung der Messergebnisse. Interessant wäre auch der Einfluss der Teilentladungsintensität auf den Aufladungsprozess, da vermutlich bei steigender Intensität der TE dies ein Einfluss auf die Zeitkonstante zum Aufbau von Raumladungen hätte. Dies kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der nicht ausreichenden Messtechnik nicht untersucht werden.

4.4 Alterung der Windungsisolierung aufgrund von Teilentladungen

Wie bereits in den Grundlagen dargestellt, tragen TE maßgeblich zur Alterung einer Isolierung bei. Wie schnell eine Isolierung aufgrund von TE versagt, kann nicht so leicht vorhergesagt werden. Hierbei spielen verschiedene Faktoren eine Rolle, dabei sind vor allem die Intensität der Entladun-

gen, die Wiederholrate der Entladungen, der Ort der Entladungen aber auch die chemischen Spaltprodukte, welche die Isolierung zusätzlich chemisch angreifen können, oder die lokale Temperaturentwicklung aufgrund von TE, die wiederum die Isolierung thermisch beansprucht, zu nennen. Man kann auch sagen, dass aufgrund von TE die Isolierung verschiedenen Alterungsformen (elektrisch, chemisch und thermisch) gleichzeitig ausgesetzt wird.

In dieser Arbeit werden verschiedene Spannungsformen und deren Auswirkung auf das TE Verhalten der Windungsisolierung aufgrund eines möglichen Einsatzes der TE-Messung in „EoL-Prüfungen“ elektrischer Traktionsmotoren betrachtet. Aus diesem Grund soll auch der Einfluss dieser verschiedenen Spannungsformen auf das Alterungsverhalten der Windungsisolierung untersucht werden. Dabei kann aufgrund fehlender Messtechnik keine Aussage über den Einfluss der Spannungsform auf die Intensität sowie die Wiederholrate der TE gemacht werden. Wie schon in Kapitel 3 erörtert, werden für die verschiedenen Spannungsformen unterschiedliche TE-Messsysteme verwendet, deren Ergebnisse nicht ohne Weiteres vergleichbar sind. Außerdem ist auch der Einfluss einzelner, wie z. B. chemischer oder thermischer Alterung an der Gesamalterung, sehr schwer feststellbar. Für die Untersuchung des Alterungsverhaltens der Windungsisolierung aufgrund von TE kann lediglich die Windungsisolierung Spannungen oberhalb der gemessenen TE-Einsatzspannung ausgesetzt werden und die Zeit bis zum Versagen bzw. Durchschlag der Isolierung gemessen werden.

Sinusförmige Prüfspannung

In den folgenden Untersuchungen soll die Zeit bis zum Versagen der Windungsisolierung aufgrund von TE bei einer sinusförmigen Prüfspannung evaluiert werden. Diese Untersuchungen wurden an Draht-Twisten durchgeführt. Hierbei wurden die Draht-Twiste zunächst einmal dem Vielfachen der TE-Einsatzspannung ausgesetzt und die Zeit bis zum vollständigen Durchschlag bzw. Versagen der Isolierung gemessen. Insgesamt wurden pro Spannungsstufe zehn Prüflinge untersucht. Abbildung 4.42 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung für das zwei-, fünf- und zehnfache der TE-Einsatzspannung einer Draht-Twist-Anordnung (T067G1-12). Mit steigender Spannung nimmt die Zeit bis zum Versagen der Isolierung ab oder, anders gesagt, der Durchschlag der Isolierung erfolgt umso eher, desto größer das Vielfache der TE-Einsatzspannung ist. Man kann davon ausgehen, dass aufgrund der höheren Spannung die Intensität der Entladungen zunimmt und somit das Versagen der Isolierung früher erfolgt.

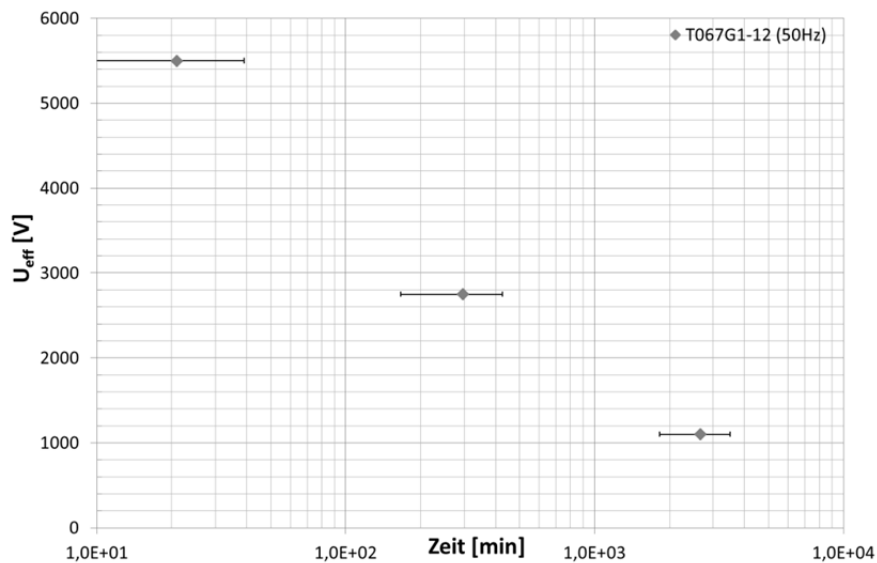


Abbildung 4.42: Ausfallzeit von Draht-Twisten nach Beanspruchung mit sinusförmiger Prüfspannung

Es kann beobachtet werden, dass bei höherer Spannung die Streuung der Prüflingsausfallrate abnimmt, zudem kann die Abnahme der Zeit bis zum Versagen als nichtlinear bezeichnet werden. Grund hierfür kann durchaus die Überlagerung bzw. die unterschiedliche Ausprägung der einzelnen Alterungsformen (elektrisch, chemisch und thermisch), hervorgerufen durch die TE, sein. In Bezug auf das TE- und Alterungsverhalten der Windungsisolierung kann die Aussage getroffen werden, dass umso größer die Überschreitung der TE-Einsatzspannung ist, desto eher ist das Versagen der Isolierung zu erwarten. Bei Isoliersystemen mit niedrigen TE-Einsatzspannung ist die Wahrscheinlichkeit zur Überschreitung der TE-Einsatzspannung durch Überspannungen höher und dementsprechend kann die Lebensdauer eher beeinträchtigt werden. Somit kann die Bestimmung der TE-Einsatzspannung dazu beitragen, gewisse Qualitätsanforderungen an die Lebensdauer des Isoliersystems zu überprüfen. Als Referenz für diese Untersuchung wurden Draht-Twiste einer Spannung von $\frac{1}{2} \times U_{\text{TEE}}$ (275V) sowie 500V (was einer Spannung minimal unterhalb der TE-Einsatzspannung entspricht) ausgesetzt und die Zeit bis zum Versagen der Isolierung gemessen. Bei diesen Spannungswerten ist davon auszugehen, dass keine TE auftreten. Als Ergebnis ist dabei herausgekommen, dass nach 30 Tagen (43.200min) keiner der 30 Prüflinge ausgefallen war. Offensichtlich ist die Alterung der Isolierung, solange die TE-Einsatzspannung nicht überschritten wird, minimal ausgeprägt. In [Kau95] berichtete Ergebnisse zeigen vergleichbare Resultate. Hierbei konnten keine Ausfälle, auch nach 1000h nicht, festgestellt werden. Wie oben schon angemerkt, trägt auch die Wiederholrate oder die Frequenz der auftretenden TE zur Alterung der Isolierung bei. Daher soll an dieser Stelle der Einfluss der Frequenz der angelegten Prüfspannung und damit auch

der Frequenz der auftretenden TE auf das Versagen der Isolierung untersucht werden. Wie bereits im Kapitel 4.1.1 gezeigt, treten die TE vorwiegend im Bereich des größten Spannungsanstieges der Prüfspannung auf. Erhöht man nun die Frequenz der angelegten Prüfspannung, erhöhen sich entsprechend auch die Nulldurchgänge der Spannung. Somit ergeben sich häufiger die Bedingungen für das Auftreten von TE in einer Periode der angelegten Prüfspannung. Übertragen auf umrichter- gespeiste Motoren können die Frequenzen der Motorversorgungsspannung von 20kHz und höher erreicht werden.

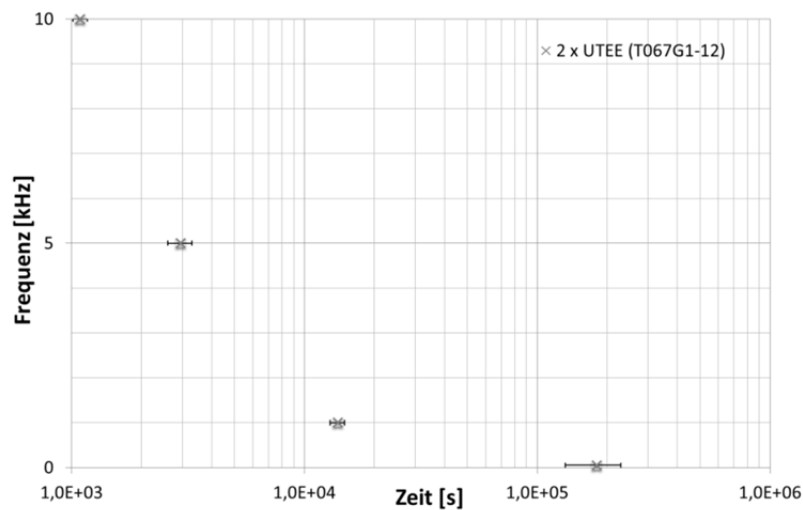


Abbildung 4.43: Ausfallzeit von Draht-Twisten bei unterschiedlichen Frequenzen einer sinusförmigen Prüfspannung

Abbildung 4.43 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung bezüglich der Abhängigkeit der Zeit bis zum Versagen der Windungsisolierung von der Frequenz der angelegten Prüfspannung. Dabei beträgt die angelegte Prüfspannung das Zweifache der TE-Einsatzspannung des verwendeten Draht-Twist-Typs. Die Zeit bis zum Versagen der Draht-Twiste ist hier halblogarithmisch als Funktion der Frequenz dargestellt. Es kann eine deutliche Abnahme der Zeit bis zum Versagen der Windungsisolierung mit zunehmender Frequenz der angelegten Prüfspannung beobachtet werden. Während bei 50Hz der Ausfall sich nach Tagen eingestellt hat, versagten die Prüflinge bei gleicher Spannung und einer Frequenz von 10kHz bereits nach wenigen Minuten. Des Weiteren sinkt die Streuung der Ausfallrate der Prüflinge mit steigender Frequenz. Außerdem können die Entladungen bei hohen Frequenzen mit bloßem Auge, wie in der Abbildung 4.44 zu sehen ist, festgestellt werden.



Abbildung 4.44: Entladungen einer Draht-Twist-Anordnung bei einer Frequenz von 10kHz

Hierbei kann beobachtet werden, dass die Entladungen im Luftzwickel zwischen den beiden ineinander verdrehten Kupferlackdrähten stattfinden, was die bereits aufgestellte und im Kapitel 4.2 theoretisch begründete These der äußeren TE bestätigt. Somit ist das Versagen der Windungsisolierung auf Erosion der Isolierung von außen, hervorgerufen durch das Auftreten von TE im Luftzwickel zwischen den Kupferlackdrähten, zurückzuführen. Dass durch TE die Windungsisolierung auch thermisch beansprucht wird, kann anhand von Aufnahmen mit einer Wärmebildkamera bestätigt werden. Abbildung 4.45 zeigt die Aufnahmen der Temperaturentwicklung an einer Draht-Twist-Anordnung, aufgenommen mit einer Wärmebildkamera. Hierbei kann beobachtet werden, dass mit zunehmender Frequenz auch die Temperatur der Draht-Twist-Anordnung steigt. Diese Aufnahmen wurden in einer abgeschlossenen Klimakammer aufgenommen, um den möglichen Kühlungseffekt durch Luftkonvektion zu minimieren. Der Anstieg der Temperatur bei steigender Frequenz ist deutlich gegenüber niedrigen Frequenzen ausgeprägt und erreicht Werte bei einer Frequenz von 10kHz und des Zweifachen der TE-Einsatzspannung von 50–70°C bei dem hier verwendeten Kupferlackdraht. Nicht nur die Frequenz sorgt für einen Anstieg der Temperatur, auch das Erhöhen der Spannung bewirkt eine Zunahme der Temperatur am Draht-Twist. Wie der Abbildung 4.46 entnommen werden kann, sorgt eine Erhöhung der Spannung vom Zweifachen auf das Dreifache der TE-Einsatzspannung zu einer starken Erhöhung der Temperatur. Die Erhöhung der Temperatur beträgt bei 1kHz mehr als das Doppelte und bei 10kHz mehr als das Vierfache der Temperatur im Vergleich zu den Temperaturentnahmen bei zweifacher TE-Einsatzspannung. Das Temperaturniveau von 200°C ist nahe an dem Einsatzgrenzbereich des verwendeten Kupferlackdrahtes, somit ist die thermische Beanspruchung der Lackisolierung bei hohen Frequenzen, hervorgerufen durch TE im Luftzwickel, nicht zu vernachlässigen und trägt entscheidend mit zur Alterung der Isolierung bei. Die Zunahme der Temperatur aufgrund der steigenden Spannung kann auf die Zunahme der TE-Intensität bei höherer Spannung zurückgeführt werden. Dabei ist die Zunahme der Temperatur bei steigender Frequenz auf die Zunahme der Wiederholrate der auftretenden TE zurück zu führen.

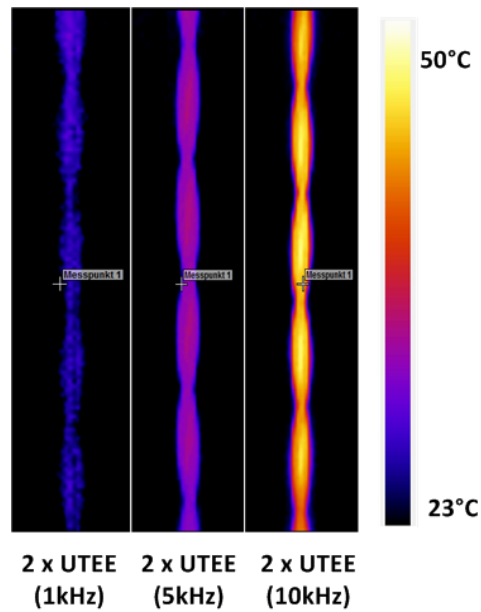


Abbildung 4.45: Temperaturentwicklung an der Draht-Twist-Anordnung in Abhängigkeit der Frequenz

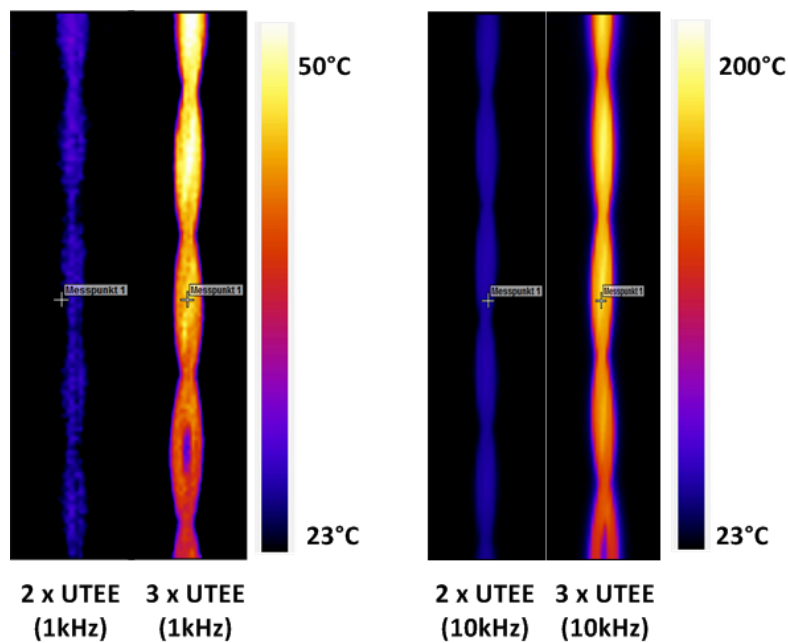


Abbildung 4.46: Temperaturentwicklung an der Draht-Twist-Anordnung in Abhängigkeit der Spannungshöhe bei unterschiedlichen Frequenzen

Die Zunahme der Beanspruchung der Windungsisolierung bei Erhöhung der Prüfspannung ist auch in der Abbildung 4.47 zu erkennen; hierbei ist wieder die Ausfallzeit der Draht-Twiste dargestellt.

Die Belastung der Isolierung erhöht sich und sorgt zusätzlich über den ganzen betrachteten Frequenzbereich für eine Reduzierung der Lebensdauer.

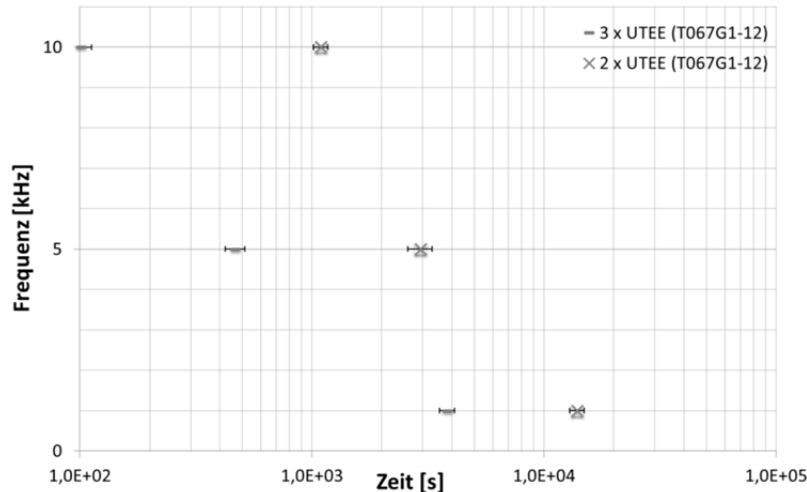


Abbildung 4.47: Einfluss der Spannungshöhe auf die Ausfallzeit der Draht-Twiste bei sinusförmiger Prüfspannung

Betrachtet man das Ausfallverhalten unterschiedlicher Kupferlackdrähte (siehe Abbildung 4.48), so wird deutlich, dass der Einfluss der Lackdrahteigenschaften auf die TE-Einsatzspannung auch einen Einfluss auf das Alterungsverhalten der Kupferlackdrähte aufweist. Der Vergleich des Alterungsverhaltens zwischen den Draht-Twisten vom Typ G1 und G2 bei gleichem Kupferdurchmesser verdeutlicht die bereits gezeigten Abhängigkeiten der TE-Einsatzspannung von der Lackzunahme der verwendeten Kupferlackdrähte. Es kann ein deutlich späteres Ausfallen der Prüflinge vom Grad 2 im Vergleich mit den Prüflingen vom Grad 1 beobachtet werden. Bedenkt man, dass bei dieser Untersuchung das Vielfache der TE-Einsatzspannung des Draht-Twists vom Grad 1 verwendet wurde, so ist aufgrund der Untersuchungen in Bezug auf das TE-Verhalten in Abhängigkeit der Drahteigenschaften, in diesem Fall der Lackdicke, aus Kapitel 4.1.2 davon auszugehen, dass aufgrund der dickeren Lackdicke es bei gleicher Spannung zu einem geringeren elektrischen Feld im Luftspalt des Prüflings vom Grad 2 kommt. Somit ist die Intensität der Entladungen höchst wahrscheinlich geringer ausgeprägt als bei den Prüflingen vom Grad 1, was eine längere Lebensdauer erlauben kann. Hinzu kommt, dass das Versagen der Isolierung, wie bereits angemerkt, durch TE-Erosion der Isolierung von außen zu Stande kommt. Ist dabei die Lackdicke entsprechend größer ausgeprägt, so trägt auch das zu einer längeren Lebensdauer bei, da die Erosion dann mehr Zeit benötigt.

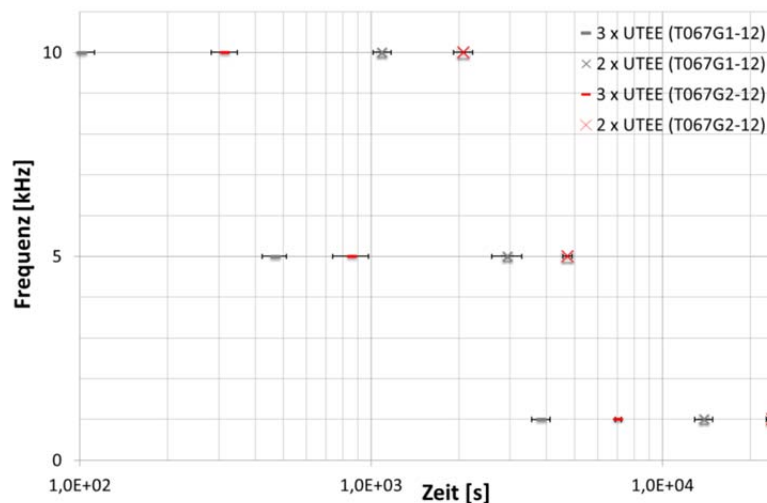


Abbildung 4.48: Vergleich der Ausfallzeit unterschiedlicher Draht-Twiste bei sinusförmiger Prüfspannung

Die Untersuchungen zeigen, dass das Auftreten von TE an der Windungsisolierung zur Reduzierung der Lebensdauer der Windungsisolierung beiträgt. Bei steigender Spannung bzw. Frequenz erhöht sich die Alterung drastisch und führt zur noch schnelleren Alterung der Windungsisolierung. Dabei kann sowohl bei der Variation der Spannung als auch bei Variation der Frequenz auf ein nichtlineares Alterungsverhalten der Windungsisolierung geschlossen werden. Gründe hierfür können in den unterschiedlichen Alterungsmechanismen gesucht werden, da es hierbei zur Überlagerung dieser kommt und die Ausprägung der einzelnen Alterungsmechanismen sicherlich nicht immer gleich gegeben ist.

Impulsförmige Prüfspannung

Die oben gezeigten Ergebnisse zur Alterung der Windungsisolierung berücksichtigen das Alterungsverhalten unter sinusförmiger Prüfspannung. Wie sich die Alterung der Windungsisolierung bei impulsförmiger Prüfspannung entwickelt, soll im Folgenden betrachtet werden.

Hierbei wurde bei der Durchführung der Alterungsuntersuchungen auf die Ergebnisse der TE-Untersuchungen im Kapitel 4.3 sowie auf die Ergebnisse zum Alterungsverhalten der Windungsisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung zurückgegriffen. Das soll bedeuten, dass aufgrund der Ergebnisse zum TE Verhalten z. B. davon ausgegangen werden kann, dass die Dauer der Impulse nicht zur Alterung der Windungsisolierung beitragen kann, da die Dauer der Impulse keinen direkten Einfluss auf das Auftreten von TE hat; vergleiche Kapitel 4.3.4. Verknüpft man diese Tatsache

mit den Ergebnisse zum Alterungsverhalten unter sinusförmiger Prüfspannung, wo keine ausgeprägte Alterung der Windungsisolierung bei nicht auftreten der TE festgestellt werden konnte, kann man sagen, dass aufgrund dieser Ergebnisse die Dauer der Impulse auch keinen wesentlichen Einfluss auf das Alterungsverhalten unter impulsförmiger Prüfspannung haben kann, da die Dauer der Impulse, wie aus den Ergebnissen vorgeht, weder die TE verstärkt noch abschwächt.

Als erster relevanter Faktor, welcher einen Einfluss auf die Alterung aufweisen könnte, wäre die Impulsanstiegszeit zu nennen. Diese hatte einen Einfluss auf die TE-Einsetzspannung und ist diesbezüglich ein möglicher Einflussfaktor auf das Alterungsverhalten der Windungsisolierung. In Abbildung 4.49 sind die Ergebnisse zum Einfluss der Anstiegszeit der Spannungsimpulse auf das Alterungsverhalten der Windungsisolierung dargestellt.

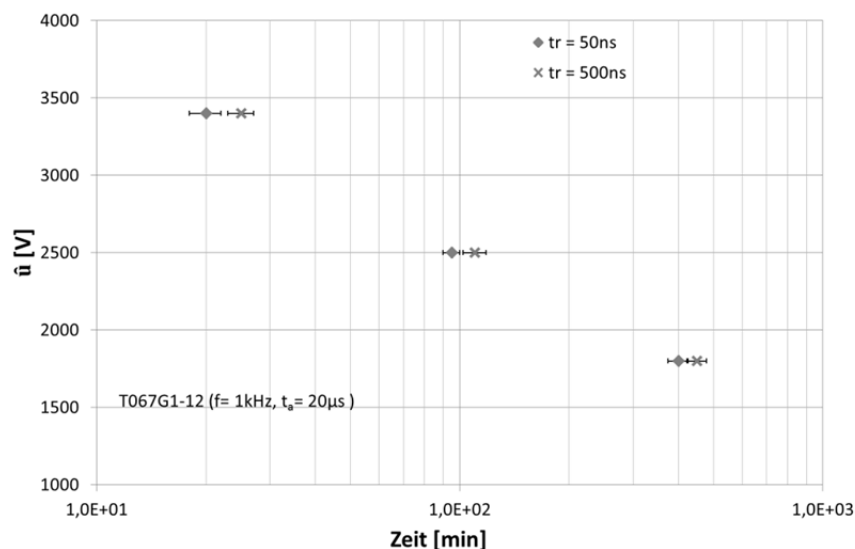


Abbildung 4.49: Einfluss der Impulsanstiegszeit auf die Ausfallzeit der Draht-Twiste

Zur Untersuchung wurden unipolare Spannungsimpulse mit einer Anstiegszeit von 50ns und 500ns sowie einer Spannung vom Ein-, Zwei- und Dreifachem der TE-Einsetzspannung des verwendeten Draht-Twist-Typs. Die Frequenz und die Abfallzeit der Spannungsimpulse lagen bei 1kHz bzw. bei 20µs. Deutlich zu sehen ist, dass es eine Abhängigkeit der Lebensdauer von der eingestellten Impulsanstiegszeit gibt. Mit fallender Impulsanstiegszeit nimmt die Zeit bis zum Ausfall der Prüflinge ebenfalls ab. Somit bestätigen sich die bei den Untersuchungen zum TE-Verhalten der Windungsisolierung gewonnenen Ergebnisse, dass Spannungsimpulse mit sehr steilen Flanken früher zu TE führen, was in einer stärkeren Beanspruchung und einer niedrigeren Lebenserwartung der Windungsisolierung führt. Wird die Windungsisolierung früher, wie das der Fall bei steilen Spannungs-

flanken ist, oder für längere Zeit TE ausgesetzt, so führt dies zu einer höheren Alterung der Windungsisolierung. Der frühere Einsatz der TE bei steileren Impulsen kann, wie bereits in Kapitel 4.3.4 angedeutet, auf die Zeitkonstante von heteropolaren Ladungsträgeransammlungen auf der Lackoberfläche, welche offensichtlich im Vergleich zu den Impulsanstiegszeiten größer ist, zurückgeführt werden.

Diese heteropolaren Ladungsträgeransammlungen wirken normalerweise dem außen angelegten elektrischen Feld entgegen; ist jedoch der Spannungsimpuls so schnell, dass die Ausbildung der Ladungsträgeransammlungen auf der Lackoberfläche nicht abgeschlossen ist, kann dies früher zur TE führen, da bei gleicher Spannung eine höhere elektrische Feldstärke im Luftzwickel herrscht. Generelle Aussagen über den Faktor, um wie viel schneller eine Windungsisolierung bei schneller ansteigenden Impulsen altert, sind sehr schwer zu machen, da dies von weiteren Faktoren abhängt. Die Frequenz der Spannungsimpulse, wie aus den Ergebnissen unter sinusförmiger Spannung bereits gesehen, spielt ebenfalls eine Rolle, ebenso die Höhe der Spannung. Des Weiteren wird das Ergebnis durch die Streuung der Lackdicken der Kupferlackdrähte mit beeinflusst. Abschließend ist der Einfluss der chemischen und thermischen Beanspruchung bei erhöhter Frequenz bzw. Spannung zu nennen, welcher im Rahmen dieser Arbeit nicht ausreichend untersucht werden konnte. Insbesondere ergibt sich hierbei die Frage, ob es einen direkten Einfluss der Impulsanstiegszeit, z. B. auf die Temperaturentwicklung, gibt.

Weiterhin soll untersucht werden, ob uni- und bipolare Spannungsimpulse unterschiedlich auf die Lebensdauer der Windungsisolierung Einfluss nehmen. Hierfür wurden jeweils zehn Prüflinge einem Lebensdauertest unterzogen und die Zeit bis zum Versagen der Prüflinge gemessen. Dabei wurden die ersten zehn Prüflinge mit einer unipolaren Spannung beaufschlagt, deren Frequenz 1kHz betrug. Die Prüflinge wurden dem Ein-, Zwei- und Dreifachen der TE-Einsatzspannung bei einer Anstiegszeit von $10\mu\text{s}$ ausgesetzt. Die weiteren zehn Prüflinge wurden einer bipolaren Spannung mit gleichen Amplituden und Anstiegszeit der Spannungsimpulse ausgesetzt. Wie der Abbildung 4.50 entnommen werden kann, ist die Lebensdauer der Prüflinge bei einer unipolaren Spannung etwa doppelt so groß wie die Lebensdauer der Prüflinge, welche einer bipolaren Spannung ausgesetzt wurden.

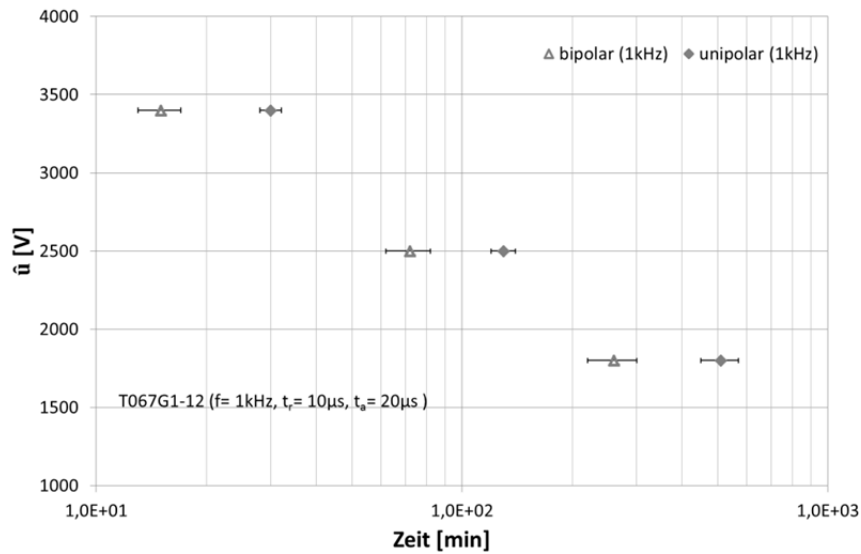


Abbildung 4.50: Vergleich der Ausfallzeit bei uni- und bipolarer Impulsspannung

Wie im Kapitel 4.3.1 bereits gezeigt, kann dieses Verhalten ebenfalls mit dem Auftreten von TE und derer Intensität begründet werden. Es konnte bereits festgestellt werden, dass die TE-Einsatzspannung von der Spitze-Spitze-Spannung sowie von der Anstiegszeit der Impulse abhängig ist. Nimmt man die Anstiegszeit in diesem Fall außer Acht, da Impulse mit gleicher Anstiegszeit verwendet wurden, kann die geringere Lebensdauer der Prüflingsreihe, welche mit bipolarer Spannung belastet wurden, nur auf die Höhe der Spannung zurückgeführt werden. Bedenkt man, dass für die Amplitude der bipolaren Prüfspannung die gleiche Amplitude wie bei der unipolaren Prüfspannung gewählt wurde, so bedeutet das, dass bei einer bipolaren Spannung, die Spitze-Spitze-Spannung genau den doppelten Wert der unipolaren Spannung, bei der die Amplitude gleichzeitig auch der Spitze-Spitze-Wert der Spannung ist, beträgt. Dies resultiert bei der bipolaren Prüfspannung mit einer höheren Intensität der TE, was zu einer geringeren Lebenserwartung und einem früherem Ausfall der Prüflinge führt.

4.5 Vergleich und Analyse der Ergebnisse zum Teilentladungsverhalten der Windungsisolierung bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung

Die in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnisse bezüglich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung lassen einige grundlegende Vergleiche zwischen dem TE-Verhalten der Windungsisolierung bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung zu. Generell kann gesagt werden, dass die „Schwachstelle“ bzw. der Ort für das Auftreten von TE an der Windungsisolierung ohne Imprägnierung sich an Kreuzungen von Kupferlackdrähten, die auf unterschiedlichem Potential liegen, befindet. Genauer gesagt: im Luftwickel zwischen den einzelnen Lackdrähten und das unabhängig von der Art der Spannung. Da beim Vergleich der Ergebnisse für die TE-Einsatz- und Aussetzspannungswerte, die bei uni- und bipolaren Spannungsimpulsen gewonnen wurden, festgestellt wurde, dass ein Vergleich der Ergebnisse als Spitze-Spitze-Werte sinnvoll ist, soll der Vergleich zu den Ergebnissen, die unter sinusförmiger Prüfspannung erzielt wurden, ebenfalls mit den Spitze-Spitze-Werten der Spannung erfolgen. In Abbildung 4.51 sind beispielsweise die Ergebnisse für die TE-Einsatz- und Aussetzspannungswerte der Draht-Twiste vom Typ T067G2-12 als Mittelwerte aus jeweils zehn Messwerten mit der dazugehörigen Standardabweichung dargestellt.

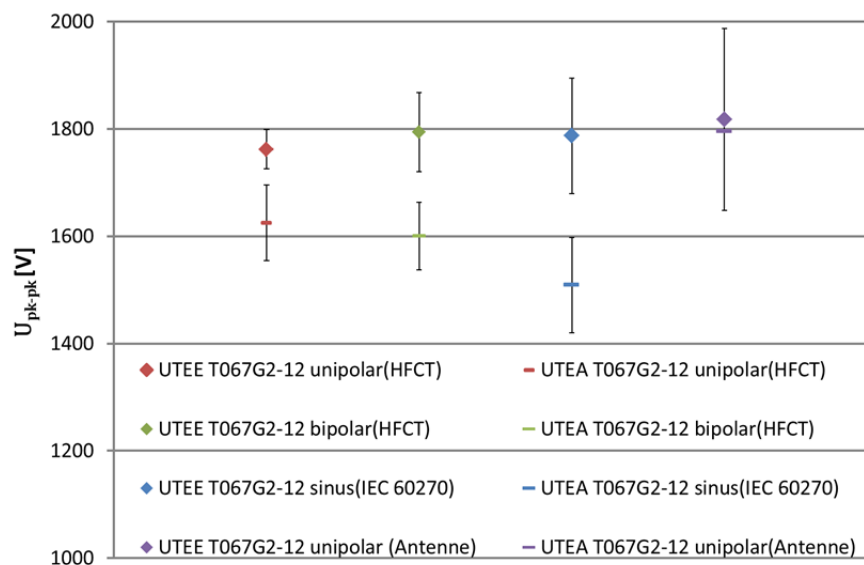


Abbildung 4.51: Vergleich der UTEE und UTEA für impuls- und sinusförmige Prüfspannung

Hierbei kann beobachtet werden, dass die gewonnenen Werte für die TE-Einsatzspannung bei impulsförmiger Prüfspannung vergleichbar sind mit den Ergebnissen der Draht-Twiste, die unter sinusförmiger Prüfspannung vermessen worden. Voraussetzung ist hierbei, dass man die Spitze-

Spitze-Werte der TE-Einsetzspannung betrachtet. Dies bestätigen sowohl die TE-Messungen, bei denen die TE mit einem HFCT erfasst worden sind, als auch die TE-Messungen, bei denen die Erfassung der TE mit Hilfe eines elektromagnetischen Richtkopplers erfolgten.

Aus Sicht der TE-Messung im Bereich der EoL-Prüfung ist dieses Ergebnis vielversprechend, da ein Einsatz der TE-Messung an der Windungsisolierung bei einer 50Hz-Sinusspannung erfolgen könnte. Allerdings ist diese Aussage an gewisse Einschränkungen geknüpft. Zunächst einmal wäre da die Anordnung des Prüflings, da nämlich diese Untersuchungen an Draht-Twisten durchgeführt worden sind. Überträgt man dieses auf einen Stator einer Maschine, so ergibt sich die Schwierigkeit, dass sich bei einer 50Hz-Sinusspannung möglicherweise nicht der erforderliche Potentialunterschied an der Windungsisolierung aufgrund der linearen Spannungsaufteilung über der Wicklung einstellen würde. Somit müsste eventuell die Prüfung in einem früheren Fertigungsschritt unternommen werden, beispielsweise könnte die TE-Messung bei Statoren, die durch das Aufstecken von fertiggeformten Spulen aufgebaut werden, bereits an den Spulen durchgeführt werden. Des Weiteren würde die im Kapitel 4.3.4 gesehene Abhängigkeit der TE-Einsetzspannung von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse, welche bei unipolaren Spannungsimpulsen festgestellt werden konnte, die Durchführung der TE-Messung in der EoL-Prüfung bei sinusförmiger Prüfspannung nur für einen bestimmten Anstiegszeitbereich der Spannungsimpulse ermöglichen. Außerdem erschweren die im Kapitel 4.3.5 festgestellten Aufladungsprozesse die Interpretation der TE-Messung und der damit verbundenen Aussortierung „schlechter“ Prüflinge. So ist eine automatische Interpretation der TE-Messung generell eine Problemstellung, so dass erfahrenes Personal benötigt wird. Dieses wiederum macht die Prüfung aus finanzieller Sicht nicht attraktiv. Bei bipolarer Impulsspannung konnte der Einfluss der Anstiegszeit auf die TE-Einsetzspannung nicht eindeutig beobachtet werden, so dass die Ergebnisse für die TE-Einsetzspannung bei bipolaren Spannungsimpulsen und sinusförmiger 50Hz-Spannung zumindest für den untersuchten Bereich als vergleichbar angesehen werden können. Allerdings muss hier auch erwähnt werden, dass aus schaltungstechnischer Sicht keine Impulse mit Anstiegszeiten im ns-Bereich erzeugt werden konnten und wie die in dieser Arbeit bei unipolarer Impulsspannung gemachten Erfahrungen zeigen, ist die Tendenz der Abhängigkeit der TE-Einsetzspannung von der Anstiegszeit der Spannungsimpulse erst im niedrigen ns-Bereich zu erkennen.

Die Ergebnisse des Alterungsverhaltens der Windungsisolierung bekräftigen die Annahme, dass zumindest im μ s-Bereich die Beanspruchung der Windungsisolierung zwischen impulsförmiger und sinusförmiger Spannung vergleichbar ist. Hierbei konnte festgestellt werden, dass die Windungsisolierung keinen früheren Ausfall erleidet, wenn diese einer Spannung mit Anstiegszeit im

μ s-Bereich, bei der es auf jeden Fall zu TE kommt, ausgesetzt wird. In Abbildung 4.52 ist die Ausfallzeit als Mittelwert aus jeweils fünf Draht-Twisten des Typs T067G1-12 pro Spannungsart bei einer Frequenz von 1kHz, 5kHz und 10kHz dargestellt. Somit wäre die Beanspruchung der Windungsisolierung bei entsprechend hoher Spannung unabhängig von der Einwirkzeit der Spannung auf die Isolierung, sondern nur von der Spitze-Spitze-Spannung, die in der Lage ist, TE zu zünden.

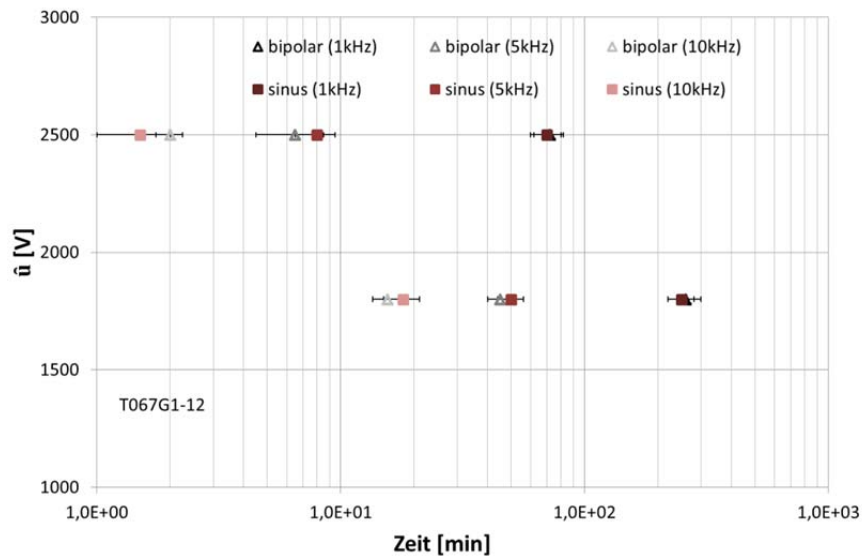


Abbildung 4.52: Vergleich der Ausfallzeit bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung

Des Weiteren konnte in dieser Arbeit festgestellt werden, dass Umwelteinflüsse wie Temperatur, Luftfeuchte und Druck ein Einfluss auf die TE-Einsatz- und Aussetzspannung der Windungsisolierung aufzeigen. Dieses konnte sowohl bei einer sinusförmigen als auch bei einer impulsförmigen Prüfspannung festgestellt werden. Ebenfalls konnte ein Einfluss der Lackdicke auf die TE-Einsatzspannung bei allen Spannungsformen festgestellt werden. Abschließend ist der Einfluss der Imprägnierung zu nennen, der in allen Fällen zu einer Erhöhung der TE-Einsatz- und Aussetzspannung geführt hat. Diese Einflussgrößen erschweren die ohnehin komplexe Interpretation der TE-Messung, so dass die Eignung der TE-Messung als EoL-Prüfung fragwürdig erscheint. Insbesondere, weil aufgrund der Streuung der gewonnenen Ergebnisse schwierig automatische Prüfverfahren entwickelt werden können. Nichtsdestotrotz wird im nächsten Kapitel anhand von Motoretten-Prüfkörpern das TE-Verhalten des ganzen Isoliersystems betrachtet.

5. Untersuchung des Teilentladungsverhaltens von elektrischen Traktionsmotoren an Motoretten

Die bisher im Kapitel 4 gezeigten Untersuchungen zum TE-Verhalten und Alterungsverhalten haben sich allesamt auf die Windungsisolierung bezogen. Wie jedoch in den Grundlagen erklärt, verfügen elektrische Niederspannungsmaschinen über ein Isoliersystem, das aus drei Bereichen (Haut-, Phasen- und Windungsisolierung) aufgebaut ist. Daher soll in diesem Kapitel das TE-Verhalten des Isoliersystems im Verbund untersucht werden. Erfolgen sollen die Untersuchungen an den im Kapitel „Versuchsmethodik“ dargestellten Motoretten, welche nur einen Ausschnitt bzw. einen Teil eines Stators einer Niederspannungsmaschine repräsentieren sollen, indem jedoch die wichtigsten Teile des Isoliersystems enthalten sind. Die Hauptisolierung ist durch einen Flächenisolierstoff gegeben und isoliert die in die Motorette eingelegte(n) Spule(n) gegenüber der Motorettenwand. Die Phasenisolierung ist ebenfalls mit dem Flächenisolierstoff ausgeführt und isoliert die in die Motoretten eingelegten Spulen gegeneinander. Abschließend ist die Windungsisolierung der Kupferdrähte in Form der Lackschicht sowie die Imprägnierung zu nennen.

In den bisher gezeigten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass es gewisse Unterschiede im TE-Verhalten der Windungsisolierung bei impuls- und sinusförmiger Spannung gibt, die sich wiederum auf das Alterungsverhalten der Windungsisolierung auswirken können und auch zum früheren Versagen der Windungsisolierung führen können. Daher soll in diesem Kapitel möglichst die Fragestellung nach dem TE-Verhalten des gesamten Isoliersystems bei impuls- und sinusförmiger beantwortet werden. Dabei soll insbesondere geklärt werden, ob die im Kapitel 4 festgestellten Unterschiede im TE-Verhalten der Windungsisolierung auch die Haupt- und Phasenisolierung betreffen können. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen könnten entscheidende Kriterien für den Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen von elektrischen Traktionsmotoren bieten.

Auch hier sollen zunächst einmal die Untersuchungen bei sinusförmiger Spannung erfolgen. Dabei werden die Untersuchungen an verschiedenen Arten der Motoretten durchgeführt, welche im Einzelnen dann in den jeweiligen Unterkapiteln näher dargestellt werden. Den Untersuchungen bei sinusförmiger Spannung folgen dann die Untersuchungen bei impulsförmiger Spannung und anschließend soll ein Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mögliche Unterschiede im TE-Verhalten des Isolationssystems aufzeigen. Des Weiteren werden Überlegungen angestellt, inwieweit sich die Ergebnisse auf Statoren übertragen lassen, und ob es die Möglichkeit gibt, gewisse Grenzwerte für die TE-Einsatzspannung anhand der Ergebnisse zu identifizieren bzw. auch zu definieren.

5.1 Teilentladungsverhalten bei sinusförmiger Prüfspannung

Für die Untersuchung des TE-Verhaltens des Isolationssystems elektrischer Traktionsmotoren werden als wichtigste Faktoren die TE-Einsetz- und Aussetzspannung betrachtet. Diese Faktoren sind auch aus der Sicht einer EoL-Prüfung und der möglichen Qualitätsbeurteilung von elektrischen Traktionsmotoren von Bedeutung, da diese Faktoren indirekte Beurteilung der Qualität der Isolierung erlauben. Die Entwicklung der TE-Intensität sowie die Häufigkeitsrate der TE sollen im Rahmen dieser Untersuchungen eine untergeordnete Rolle spielen, da, wie bereits im Kapitel 3 dargestellt, ein Vergleich dieser Parameter bei sinus- und impulsförmiger Spannung nicht eindeutig gegeben ist. Lediglich bei der Einordnung der TE-Quellen sowie Art der TE unter sinusförmiger Spannung können diese Parameter in Betracht gezogen werden.

TE-Verhalten der Hauptisolierung

Für die Untersuchung des TE Verhaltens an der Hauptisolierung wurden verschiedene Arten von Motoretten aufgebaut, um auch einige konstruktionsbedingte Eigenschaften von Statoren zu berücksichtigen. Zunächst einmal wäre da die Ausführung der Wicklung in der sogenannten „wilden“ Wicklung. Hierbei soll der Einfluss von der Lage der einzelnen Windungen einer Spule auf das TE-Verhalten untersucht werden. Hierfür wurden Motoretten in zwei verschiedenen Ausführungen angefertigt. Bei der einen Art wurde darauf geachtet, dass sich Anfang und Ende einer Spule unmittelbar nebeneinander befinden, was das „worst case“-Szenario einer „wilden“ Wicklung simulieren soll. Diese Motoretten werden mit einem kleinen „w“ in der Bezeichnung gekennzeichnet. Bei der anderen Art wurde darauf geachtet, dass Anfang und Ende einer Spule möglichst weit auseinander liegen. Hierbei wird kein spezielles Bezeichnungsfeld verwendet, somit zählt dieser Aufbau zum „default“-Aufbau der Motoretten. Abschließend soll auch der Einfluss der Imprägnierung untersucht werden.

Die TE-Messung erfolgt nach dem bereits aus Kapitel 4 bekanntem Schema. Hierbei wird die Spannung an die kurzgeschlossene Spule angelegt und das Blechpaket der Motorette auf Erdpotential gelegt. Somit bekommt man eine Beanspruchung der Hauptisolierung gegen Erdpotential. Die Spannung wird dann mit einer Spannungsanstiegsgeschwindigkeit von 100 V/s gesteigert bis ein TE-Pegel von mindestens 5pC gemessen werden kann. Anschließend wird die Spannung mit der gleichen Geschwindigkeit heruntergefahren, bis der TE-Pegel wieder auf den Pegel des Grundstörrauschens abgesunken ist. Die beiden Spannungsstufen, bei denen die genannten Bedingungen erfüllt sind, werden dann als TE-Einsetz- bzw. Aussetzspannung bezeichnet.

Die Abbildung 5.1 zeigt die Ergebnisse der TE-Untersuchung für die TE-Einsatzspannung bei Motoretten vom Typ M067G1-1-150 sowie vom Typ M067G1-1-150-w. Da bereits im Kapitel 4 festgestellt wurde, dass für den Vergleich der TE-Einsatzspannung zwischen sinus- und impulsförmiger Spannung sich die Spitze-Spitze-Werte einer Spannung sehr gut eignen, werden die hier gezeigten Ergebnisse als solche angegeben. Wie zu erkennen ist, gibt es keinen wesentlichen Unterschied in der TE-Einsatzspannung zwischen den unterschiedlichen Motoretten-Typen. Damit kann davon ausgegangen werden, dass bei sinusförmiger Prüfspannung die Art der Wicklung keinen nennenswerten Einfluss auf die TE-Einsatzspannung hat. Bedenkt man, dass bei dieser Beanspruchung der Isolierung im Wesentlichen die Hauptisolierung belastet wird, so kann man sagen, dass die Art der Wicklung nicht entscheidend das TE-Verhalten der Hauptisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung prägt. Das erscheint auch logisch, da die gesamte Spule unter Spannung gesetzt wird, wobei bei sinusförmiger Spannung davon ausgegangen werden kann, dass es zu einer linearen Spannungsaufteilung über der Spule kommt. Ähnlich verhält sich auch die TE-Aussetzspannung, welche sich in etwa bei 2500V–2600V befindet.

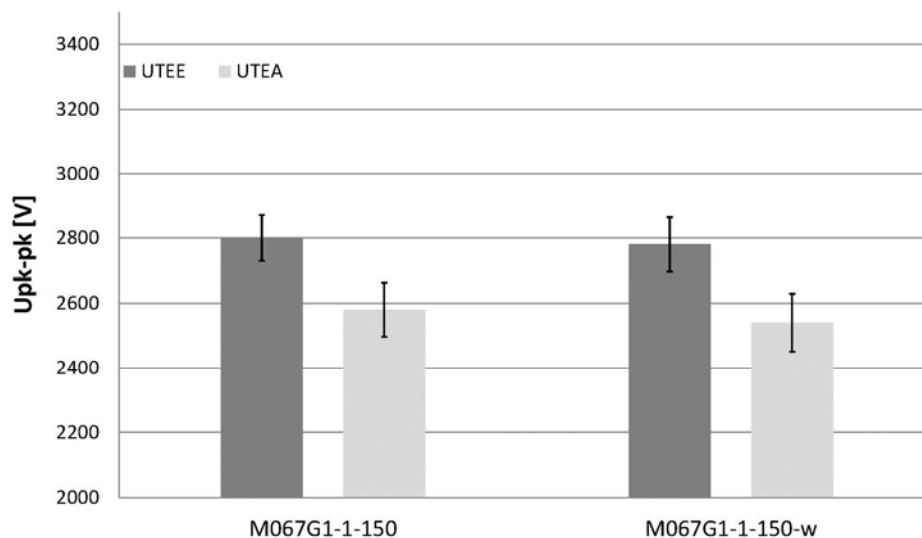


Abbildung 5.1: Vergleich der TE-Einsatz- und Aussetzspannungswerte der Motoretten-Typen M067G1-1-150 und M067G1-1-150-w

Die TE-Werte sind mit einer gewissen Streuung der Werte behaftet, da pro Motoretten-Typ fünf Motoretten vermessen wurden. Bereits im Kapitel 3 „Versuchsmethodik“ wurde auf den Herstellungsprozess der Motoretten eingegangen, bei dem versucht wurde, standardisierte Motoretten herzustellen, um so möglichst statistisch gesicherte Ergebnisse zu bekommen. Hierbei wurden die Motoretten verschiedenen Qualifizierungsmessungen unterzogen, um anhand derer einheitliche

Eigenschaften gewähren zu können. Dennoch kommt es zur Streuung der TE-Werte, was zum größten Teil auf den Herstellungsprozess zurückzuführen ist. Des Weiteren weist der TE-Prozess an sich Streuungen auf, da für das Auftreten von TE z. B. ein Startelektron zur Verfügung stehen muss.

Im zweiten Schritten wurde die TE-Messung an jeweils fünf imprägnierten Motoretten vom Typ M067G1-1-150-(I) und M067G1-1-150-w-(I) durchgeführt. Hierbei soll der Einfluss der Imprägnierung auf das TE-Verhalten der Hauptisolierung betrachtet werden. Auch hier wurden die Spitze-Spitze-Werte der TE-Einsetzspannung aufgenommen und in Abbildung 5.2 zusammengefasst. Hierbei ist ebenfalls kein Einfluss des Wicklungstyps auf das TE-Verhalten der Hauptisolierung zu beobachten. Einen deutlichen Einfluss auf die TE-Einsetzspannung zeigt jedoch, wie erwartet, die Imprägnierung der Motoretten. Es ist ein Anstieg der TE-Einsetzspannung zu beobachten, was ein späteres Einsetzen der TE bedeutet. In beiden Fällen ist die Erhöhung der TE-Einsetzspannung in etwa gleich groß.

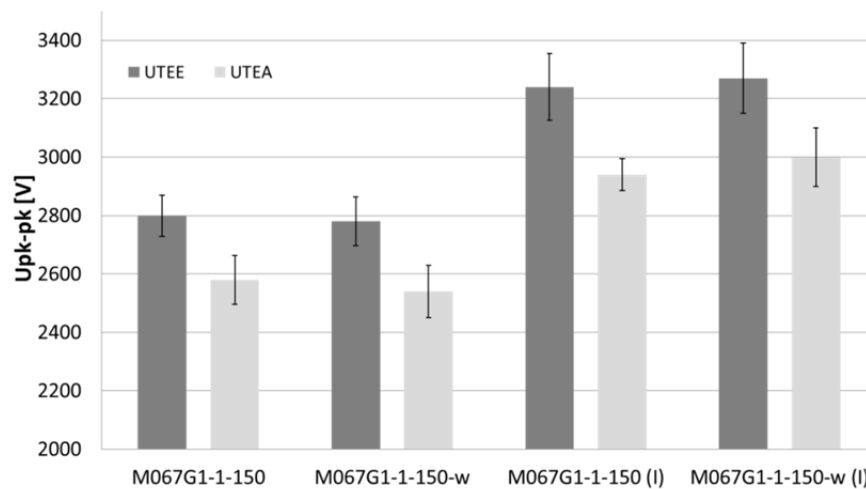


Abbildung 5.2: Vergleich der TE-Messergebnisse der Hauptisolierung für imprägnierte und nichtimprägnierte Motoretten

Was allerdings auch beobachtet werden kann, ist, dass die Streuung der Messwerte einen Anstieg zu verzeichnen hat. Dieser Fall hatte sich auch bei den Untersuchungen von Draht-Twisten im Kapitel 4 gezeigt und ist auf die Qualität der Imprägnierung zurückzuführen. Die Qualität der Imprägnierung wird u. a. auch durch die Anwesenheit von Lufteinschlüssen geprägt. Dieses hängt vom Imprägnierprozess ab und ist ebenfalls einer Streuung unterworfen.

TE-Verhalten der Phasenisolierung

Für die Untersuchung des TE-Verhaltens an der Phasenisolierung wurden Motoretten mit zwei eingelegten Spulen aufgebaut. Hierbei wurden Motoretten mit einer Phasenisolierung, bestehend aus dem Flächenisolierstoff, sowie Motoretten ohne die zusätzliche Phasenisolierung angefertigt. Bei den Motoretten mit der zusätzlichen Phasenisolierung werden die zwei Spulen gegeneinander verstärkt isoliert. Des Weiteren besitzt somit die erste, also die obere Spule, eine doppelte Isolierung gegenüber dem Blechpaket. Die Durchführung der Untersuchung erfolgte, indem die Spannung an der ersten Spule angelegt wurde und die zweite Spule auf Erdpotential gebracht wurde. Die Steigerung der Spannung erfolgte analog zu der bereits aufgeführten Untersuchung bei der Hauptisolierung. Dabei wurde das Blechpaket einmal auf Erdpotential gehalten und einmal ohne ein definiertes Potential, also „schwebend“, gelassen. Außerdem wurden die zwei genannten Ausführungen der Motoretten, auch in der imprägnierten Variante angefertigt.

Abbildung 5.3 zeigt die Ergebnisse der TE-Einsatzspannung für die Motoretten-Typen M067G2-2-75m sowie M067G2-2-75o. Es kann ein deutlicher Unterschied in der TE-Einsatzspannung zwischen den Motoretten-Typen M067G2-2-75m und M067G2-2-75o beobachtet werden. Dieses Ergebnis ist auch zu erwarten gewesen, da die Verstärkung der Isolierung durch den zusätzlichen Flächenisolierstoff zur Erhöhung des Isoliervermögens führt. Das Erden des Blechpaketes brachte im Vergleich mit dem auf „schwebendem“ Potential gelassenen Motoretten keine nennenswerten Änderungen in der TE-Einsatz- und Aussetzspannung.

Wie der Abbildung 5.4 entnommen werden kann, wirkte sich die Imprägnierung der Motoretten wie bei der TE-Messung an der Hauptisolierung ebenfalls mit der Erhöhung der TE-Einsatzwerte aus. Ein Anstieg der Messwertstreuung ist ebenfalls zu verzeichnen.

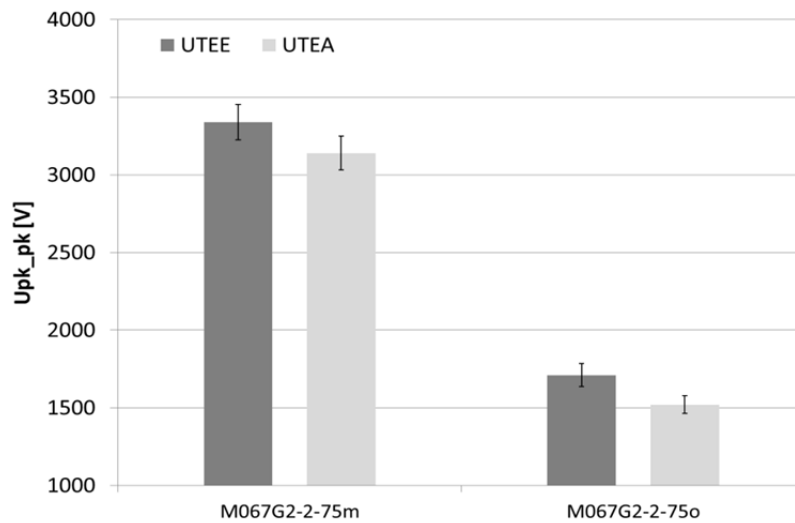


Abbildung 5.3: Vergleich der TE-Messergebnisse der Phasenisolierung für Motoretten mit und ohne zusätzliche Phasenisolierung

Der Einfluss der Lackdicke konnte bei den Untersuchungen an den Motoretten nochmals bestätigt werden, wie der Abbildung 5.5 entnommen werden kann. Hierbei ist ein späteres Einsetzen der TE bei den Motoretten mit Spulen, die aus Kupferlackdraht mit einer dickeren Lackschicht hergestellt wurden, festzustellen.

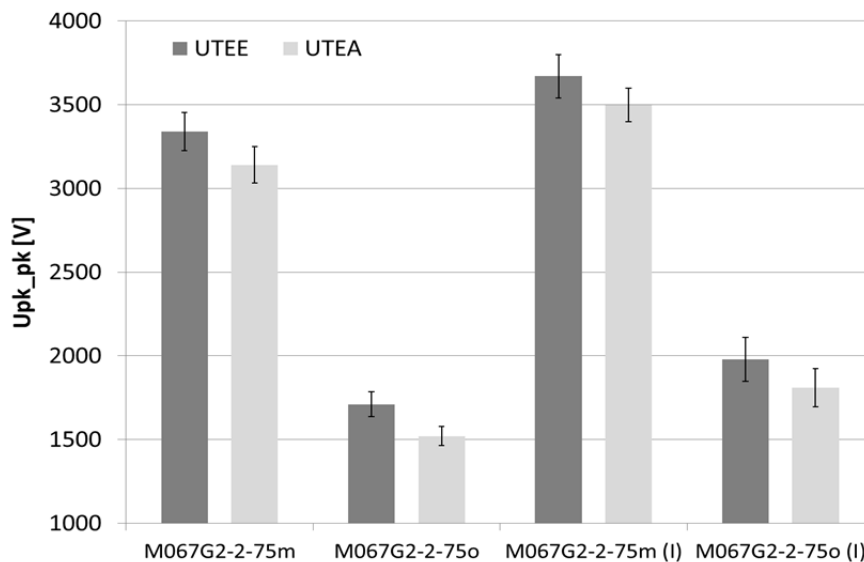


Abbildung 5.4: Vergleich der TE-Messergebnisse der Phasenisolierung für imprägnierte und nichtimprägnierte Motoretten

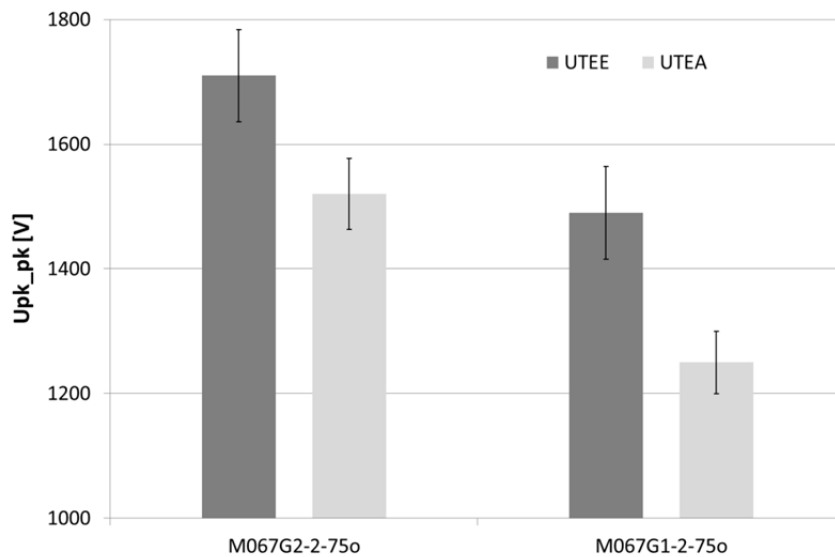


Abbildung 5.5: Vergleich der TE-Messergebnisse der Phasenisolierung für unterschiedliche Lackzunahmen des verwendeten Kupferlackdrahtes

TE-Verhalten der Windungsisolierung

Das TE-Verhalten der Windungsisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung wurde bereits im Kapitel 4 an den Draht-Twisten untersucht. Eine erneute Untersuchung an den Motoretten ist daher nicht erforderlich, da davon ausgegangen werden kann, dass keine wesentlichen Unterschiede zu den Ergebnissen bei Draht-Twisten festgestellt werden. Des Weiteren ist die Durchführung der TE-Messung der Windungsisolierung an den Motoretten aufgrund des geringen Widerstandes der Motoretten und des daraus resultierenden hohen Stromes bei sinusförmiger Prüfspannung schwierig. Hierbei wird die Spule durch den fließenden Strom erhitzt, weshalb ein thermisches Versagen der Windungsisolierung nicht auszuschließen ist bzw. zumindest eine erhöhte thermische Belastung der Windungsisolierung stattfinden würde. Dies würde die Ergebnisse der TE-Messung verfälschen, da sich sowohl eine thermische als auch eine elektrische Belastung der Windungsisolierung einstellen würde.

Das TE-Verhalten des Motorisoliersystems wird also maßgeblich von den verwendeten Isolationsmaterialien bestimmt. Bei der Haupt- und Phasenisolierung spielt der Flächenisolierstoff eine wesentliche Rolle bei der Höhe der TE-Einsatz- und Aussetzspannung. Außerdem wird das TE-Verhalten durch die Imprägnierung deutlich verbessert, jedoch ist die Qualität der Imprägnierung bzw. der Imprägnier-Prozess entscheidend an der Verbesserung des TE-Verhaltens beteiligt. Die hier durchgeführten Untersuchungen sollen jedoch in erster Linie dazu dienen, einen möglichen

Unterschied des TE-Verhaltens bei impulsförmiger Prüfspannung aufzuzeigen, und erheben nicht den Anspruch generelle Aussagen über die Höhe der TE-Einsatz- und Aussetzspannung von Motorisoliertsystemen zu definieren. Beim Einsatz anderer Isolationsmaterialien bzw. Imprägnierharze oder andere Imprägnier-Verfahren sind durchaus andere Ergebnisse zur Höhe der TE-Einsatz- und Aussetzspannung denkbar. Im Folgenden sollen die Untersuchungen zum TE-Verhalten bei impulsförmiger Prüfspannung gezeigt werden, um anschließend den Vergleich zwischen den gewonnenen Messergebnissen ziehen zu können.

5.2 Teilentladungsverhalten bei impulsförmiger Prüfspannung

Für die Untersuchung des TE-Verhaltens unter impulsförmiger Prüfspannung wurden die gleichen Motoretten-Typen verwendet wie schon bei der Untersuchung mit sinusförmiger Prüfspannung. Da allgemein bekannt ist, dass die TE-Messung eine zerstörungsfreie Messung ist, kann davon ausgegangen werden, dass die TE-Messungen unter sinusförmiger Prüfspannung aufgrund der kurzen Dauer der TE-Messungen keine Veränderungen im Isoliersystem hervorgerufen haben, so dass eine Verfälschung der TE-Messergebnisse bei impulsförmiger Prüfspannung auszuschließen ist. Die Erfassung der TE unter impulsförmiger Prüfspannung erfolgt bei der Haupt- und Phasenisolierung mit dem im Kapitel 3 „Versuchsmethodik“ gezeigten HFCT, während die Erzeugung der Spannungsimpulse mit dem ebenfalls im Kapitel „Versuchsmethodik“ vorgestellten Impulsgenerator erfolgt. Die TE-Messungen an der Windungsisolierung dagegen werden mit dem im Unterkapitel 3.4 beschriebenen Messsystem durchgeführt, bei dem die Erfassung der TE mittels eines elektromagnetischen Richtkopplers erfolgt.

TE-Verhalten der Hauptisolierung

Vergleichbar mit den TE-Messung bei der sinusförmigen Prüfspannung wurden die TE-Messungen der Hauptisolierung bei impulsförmiger Prüfspannung (unipolare Spannungsimpulse) an den Motoretten-Typen M067G2-1-150 sowie M067G2-1-150-w durchgeführt. Hierbei wurde die Amplitude der Prüfspannung manuell über ein Potentiometer geregelt. Um die TE-Einsatz- und Aussetzspannung aufzunehmen, wurde die Prüfspannung bis zum Einsetzen der TE gesteigert und anschließend wieder so weit reduziert, bis der TE-Pegel auf den Grundstörpegel gesunken ist. Dabei wurde die Prüfspannung an die kurzgeschlossene Spule angelegt und das Blechpaket auf das Erdpotential gebracht. Da bei den Untersuchungen an den Draht-Twisten ein Einfluss der Anstiegszeit der Span-

nungsimpulse auf die TE-Einsatzspannung festgestellt wurde, wurden auch hier Spannungsimpulse mit unterschiedlichen Anstiegszeiten verwendet.

Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse für die zwei Motoretten-Typen bei unterschiedlichen Anstiegszeiten der Spannungsimpulse. Zunächst einmal ist festzuhalten, dass die zwei unterschiedlichen Arten der Motoretten auch bei impulsförmiger Prüfspannung keinen Unterschied in der TE-Einsatzspannung aufweisen. Aufgrund der kurzgeschlossenen Spule liegt die Spannungsbelastung zwischen der Spule und dem auf Erdpotential liegendem Blechpaket, so dass kein ausreichender Spannungsabfall zwischen der Windungsisolierung zustande kommen kann, um eventuelle TE an der Windungsisolierung hervorzurufen, somit kann kein Einfluss der Spulenwicklung beobachtet werden. Des Weiteren kann auch kein Einfluss von unterschiedlichen Anstiegszeiten der Spannungsimpulse auf das TE-Verhalten der Hauptisolierung beobachtet werden. Weder bei der Motorette des Typs M067G2-1-150 noch bei dem Typ M067G2-1-150-w können statistisch gesicherte Aussagen über den Einfluss der unterschiedlichen Anstiegszeiten der Spannungsimpulse auf die TE-Einsatzspannung gemacht werden. Aufgrund des komplexeren Aufbaus der Motoretten im

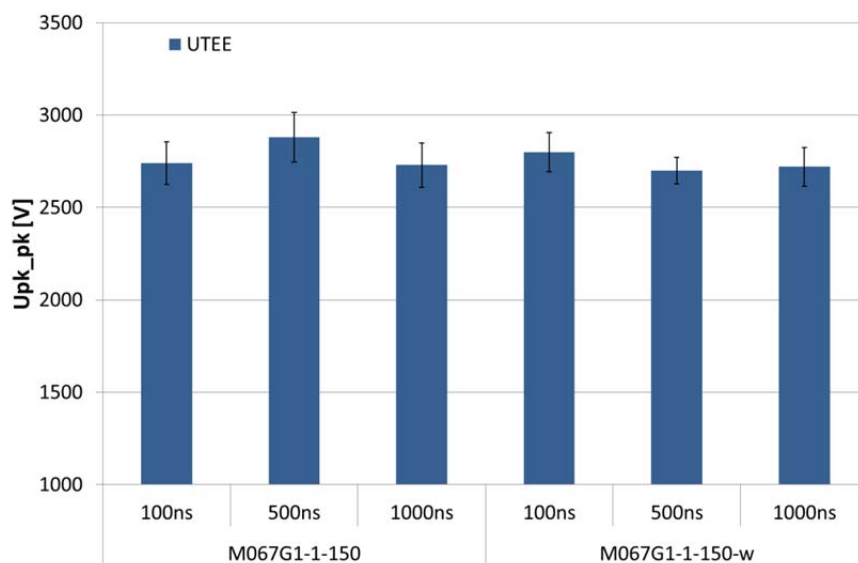


Abbildung 5.6: Ergebnisse der TE-Einsatzspannungsmessung an der Hauptisolierung in Abhängigkeit der Impulsanstiegszeit

Vergleich zu den Draht-Twisten ist die Anzahl der möglichen Ursachen für dieses Verhalten deutlich größer. Zum einen können die Gründe im Herstellungsprozess der Motoretten gesucht werden, da auch der Herstellungsprozess der Motoretten deutlich mehr Fertigungsschritte erfordert im Vergleich zu den Draht-Twisten. Zum anderen können, wie bereits bei den Draht-Twisten gesehen,

Einflüsse auf die Verteilung der elektrischen Feldstärke durch Raumladungen Gründe für die TE-Ergebnisse sein.

Um den möglichen Einfluss des Herstellungsprozesses der Motoretten auf die Streuung der TE-Messergebnisse, aufgrund derer keine statistisch gesicherten Aussagen über den Einfluss der Anstiegszeit der Spannungsimpulse auf die TE-Einsetzspannung von Motoretten getroffen werden können, zu untersuchen, wurden die TE-Messung mehrmals an denselben Motoretten bei unterschiedlichen Anstiegszeit der Spannungsimpulse durchgeführt. Abbildung 5.7 zeigt die Ergebnisse der TE-Messungen der einzelnen Motoretten bei unterschiedlichen Anstiegszeiten der Impulse. Dargestellt ist der Mittelwert aus fünf aufeinanderfolgenden Messungen pro Motoretten-Typ. Die Wartezeit zwischen den Messungen betrug jeweils 24h. Auch hier konnte beobachtet werden, dass ein Einfluss der Anstiegszeit auf das TE-Verhalten der Hauptisolierung nicht gegeben ist. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch mit kürzeren Wartezeiten zwischen den Messungen erzielt, so dass ein Einfluss von Aufladungsprozessen nicht nachgewiesen werden konnte.

Einen Einfluss der Anstiegszeit auf die TE-Einsetzspannung, wie man ihn bei den Draht-Twisten bei unipolaren Spannungsimpulsen beobachten konnte, scheint es im Fall der Hauptisolierung von Motoretten nicht zu geben. Hierfür sprechen auch die Untersuchungen an imprägnierten Motoretten, wie der Abbildung 5.8 entnommen werden kann. Dabei sind hier die Ergebnisse der TE-Messung, durchgeführt an jeweils fünf Motoretten der Typen M067G2-1-150-(I) sowie M067G2-1-150-w-(I), als Mittelwerte der TE-Einsetzspannung dargestellt. Auch in diesem Fall kann kein Einfluss der Anstiegszeit betrachtet werden. Lediglich eine Erhöhung der TE-Einsetzwerte aufgrund der Imprägnierung der Motoretten ist festzustellen.

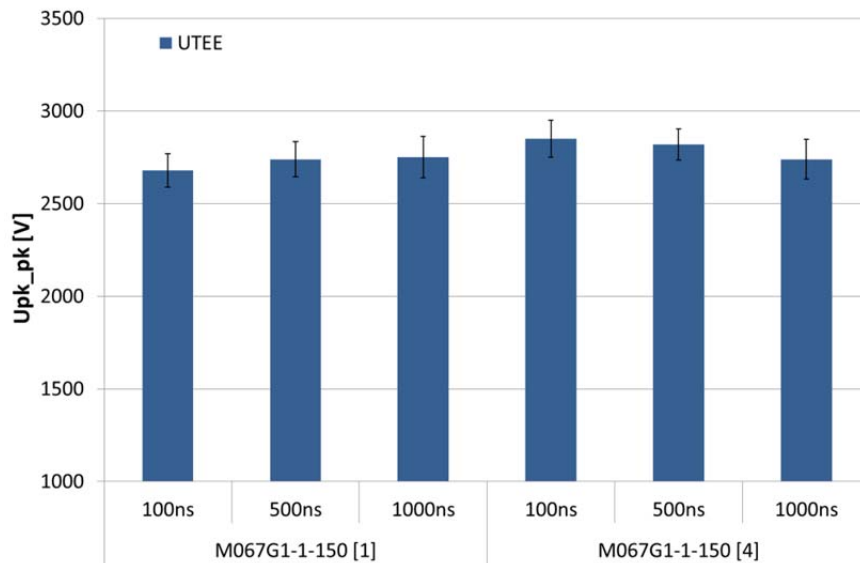


Abbildung 5.7: Ergebnisse der TE-Einsatzspannungsmessung an der Hauptisolierung in Abhängigkeit der Impulsanstiegszeit bei zwei unterschiedlichen Motoretten desselben Typs

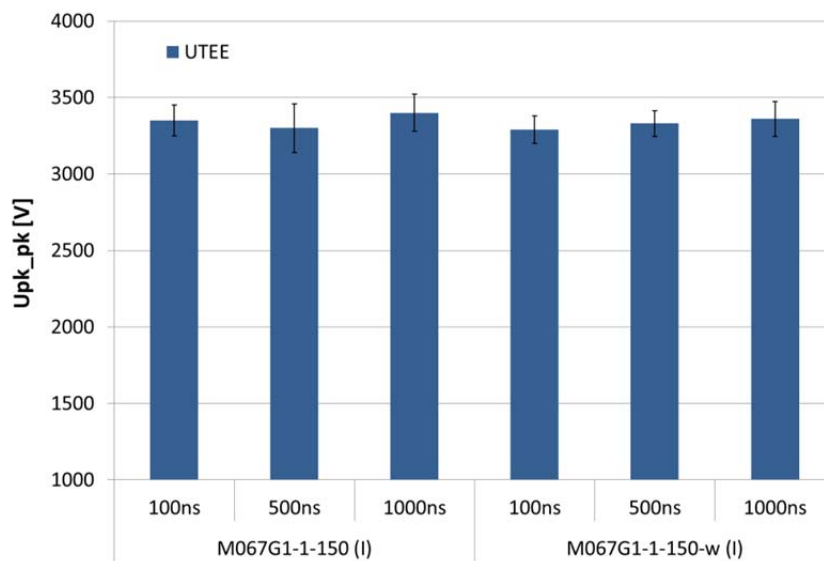


Abbildung 5.8: Ergebnisse der TE-Einsatzspannungsmessung an der Hauptisolierung für imprägnierte Motoretten

TE-Verhalten der Phasenisolierung

Das TE-Verhalten der Phasenisolierung wurde ähnlich den Untersuchungen bei sinusförmiger Prüfspannung an den Motoretten-Typen M067G2-2-75m sowie M067G2-2-75o untersucht. Das Anlegen der Prüfspannung erfolgte zwischen den zwei Spulen, wobei das Blechpaket auf dem Erd-

potential lag. Als Prüfspannung wurden unipolare Spannungsimpulse mit einer Anstiegszeit von 100ns, 500ns und 1000ns bei einer Frequenz von 1kHz verwendet. Für die Ermittlung der TE-Einsatzspannung wurde die Amplitude der Prüfspannung analog über ein Potentiometer geregelt.

Die Ergebnisse der ermittelten TE-Einsatzspannung für die Phasenisolierung sind in Abbildung 5.9 zusammengefasst. Dabei sind die Mittelwerte aus den TE-Messung an jeweils fünf Motoretten der Typen M067G2-2-75m sowie M067G2-2-75o dargestellt. Wie man erkennen kann, ist auch hier ein deutlicher Unterschied in den TE-Einsatzwerten zwischen den Motoretten mit und ohne die zusätzliche Phasenisolierung gegeben. Außerdem sind auch die Ergebnisse der TE-Einsatzspannung für die imprägnierten Motoretten-Typen M067G2-2-75m (I) sowie M067G2-2-75o (I) dargestellt. Die Imprägnierung bewirkt ein Anheben der TE-Einsatzspannung, wobei der Unterschied zwischen den beiden Motoretten-Typen entsprechend vorhanden ist.

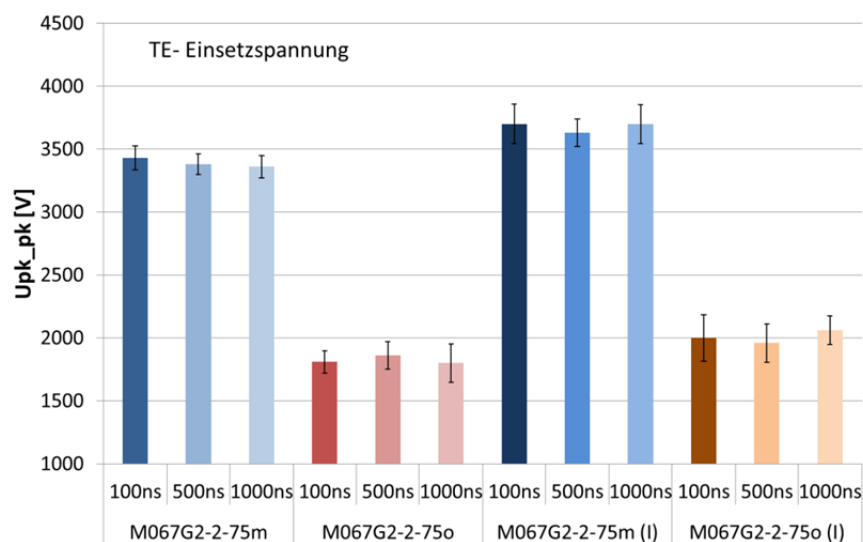


Abbildung 5.9: Ergebnisse der TE-Einsatzspannungsmessung an der Phasenisolierung für unterschiedliche Typen der Motoretten

Wie bei der Hauptisolierung wurde auch hier der Einfluss der Anstiegszeit der Spannungsimpulse auf das TE-Verhalten der Phasenisolierung überprüft. Es wurden die gleichen Parameter der Spannungsimpulse wie bei den Untersuchungen der Hauptisolierung verwendet. Entsprechend den Untersuchungen der Hauptisolierung ist auch hier eine Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von den eingestellten Anstiegszeiten der Spannungsimpulse nicht zu beobachten. Dies ist insoweit nicht zu erwarten gewesen, da es einen Widerspruch zu den Ergebnissen, welche bereits bei den Untersuchungen mit den Draht-Twisten gewonnen wurden, darstellt. Vor allem bei den Motoretten vom

Typ M067G2-2-75o konnte eine Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von den Anstiegszeiten erwartet werden, da eine vergleichbare Anordnung, nämlich die Angrenzung von Kupferlackdrähten, die sich auf unterschiedlichem Potential befinden, vorliegt. Zumal die Größenordnung der festgestellten TE-Einsatzspannung für die Anstiegszeit der Spannungsimpulse von 500ns vergleichbar ist.

TE-Verhalten der Windungsisolierung

Die Untersuchung des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bei impulsförmiger Prüfspannung wurde bereits mit den Draht-Twisten durchgeführt. In diesem Abschnitt sollen die im Kapitel 4.3 gewonnenen Ergebnisse bezüglich der TE-Einsatzspannung der Windungsisolierung überprüft werden. Bei den Untersuchungen an den Draht-Twisten ist man davon ausgegangen, dass die Draht-Twiste ein „worst case“-Szenario einer „wilden“ Wicklung, nämlich die unmittelbare Berührung des Anfangs und Endes einer Wicklung, darstellen. Daher soll anhand der Motoretten-Typen M067G1-1-150 sowie M067G1-1-150-w der Einfluss des Wicklungsaufbaus auf die TE-Einsatzspannung untersucht werden.

Die Untersuchung erfolgte mit dem im Kapitel 3.4 gezeigten Prüfaufbau. Dabei wurden die Motoretten mit Spannungsimpulsen beaufschlagt, welche Anstiegszeiten von 500ns und Abfallzeiten von 20 μ s aufwiesen. Die Spannungsimpulse wurden direkt auf die Spule gegeben, wobei das Blechpaket auf Erdpotential gelegt wurde. Die Amplitude der Spannungsimpulse wurde automatisch in 1%-Schritten bis zum Erreichen der TE-Einsatzspannung gesteigert.

In Abbildung 5.10 sind die Mittelwerte der TE-Einsatzspannungen der einzelnen Motoretten-Typen dargestellt. Ein Einfluss des Wicklungstyps kann auf die TE-Einsatzspannung beobachtet werden. Die TE-Einsatzspannung ist bei den Motoretten des Typs M067G1-1-150-w, also bei dem Motoretten-Typ, bei dem im Herstellungsprozess drauf geachtet wurde, dass sich Anfang und Ende der Spule unmittelbar nebeneinander befinden, geringer ausgeprägt als bei den Motoretten, wo Anfang und Ende der Spule den größtmöglichen Abstand haben.

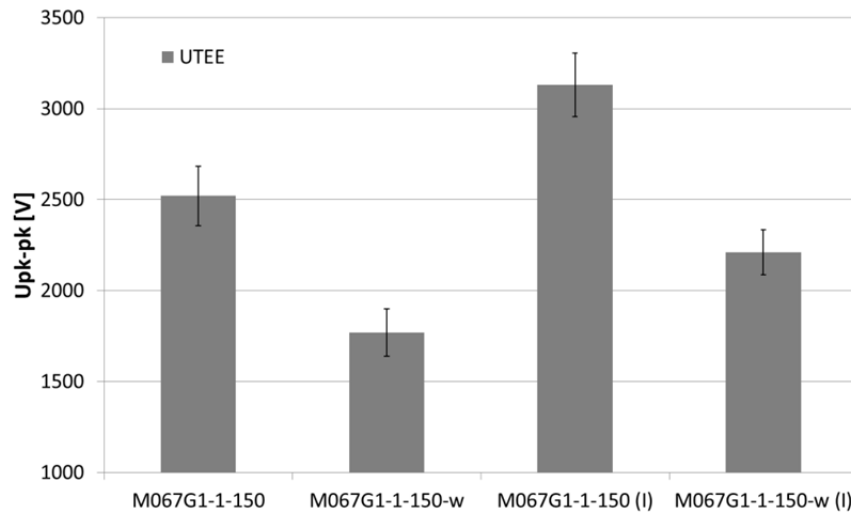


Abbildung 5.10: Einfluss des Wicklungstyps auf die TE-Einsetzspannung der Windungsisolierung

Vergleicht man jedoch die Höhe der TE-Einsetzspannung mit den Ergebnissen, die mit Draht-Twisten gewonnen wurden, in dem Fall mit den Draht-Twisten vom Typ T067G1-12, so ist zu erkennen, dass die erzielten TE-Einsetzspannungswerte bei den Draht-Twisten geringer sind im Vergleich zu den hier gewonnenen TE-Werten. Die Ursache hierfür ist in der Spannungsaufteilung über der Spule zu suchen. Während bei den Draht-Twisten der volle Potentialunterschied herrscht, da ein Drahtstück auf Spannung gelegt ist und der andere auf Erdpotential, ist bei den Motoretten in diesem Fall der Potentialunterschied abhängig von der Spannungsaufteilung. Beispielsweise ist es bei den Motoretten möglich, dass am Anfange der Spule 90% der Spannung und am Ende der Spule nur noch 10% der angelegten Spannung abfallen. In diesem Fall hätte man keinen 100%igen Potentialunterschied wie bei den Draht-Twisten, deshalb kann auch ein TE-Einsatz erst bei höheren Impulsspannungen erreicht werden. Im Kapitel 4.3.4 wurde der Einfluss der TE-Einsetzspannung von der Impulsanstiegszeit gezeigt, wobei diese Untersuchungen an Draht-Twisten durchgeführt wurden. Im Fall von Motoretten spielt die Impulsanstiegszeit noch eine wesentlichere Rolle, da diese auch die Spannungsaufteilung über der Wicklung bzw. Spule beeinflusst, wie bereits in den Grundlagen dargestellt. Somit ist hier eine zusätzliche Abhängigkeit der TE-Einsetzspannung von der Impulsanstiegszeit gegeben, da diese im Fall des „worst case“, also der unmittelbaren Berührung von Anfang und Ende der Spule, die Höhe des Potentialunterschiedes und somit der anliegenden Spannung an den Kupferlackdrähten beeinflusst.

Des Weiteren lässt sich auch hier ein tendenzieller Einfluss der Lackdicke auf die TE-Einsetzspannung erkennen. Die Untersuchungen an den Motoretten vom Typ M067G2-1-150-w

sowie M067G2-1-150 zeigen dies; vergleiche Abbildung 5.11. Es ist eine Tendenz zum späteren Einsatz der TE im Vergleich zu den Motoretten vom Typ M067G1-1-150-w festzustellen. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der TE-Messung an Draht-Twisten zeigt auch in diesem Fall, dass der TE-Einsatz an den Motoretten bei etwas höherer Spannung stattfindet.

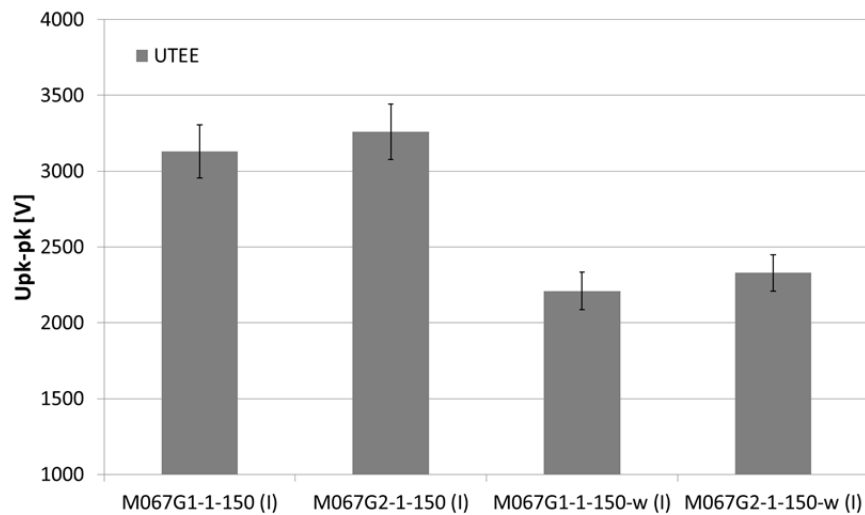


Abbildung 5.11: Einfluss der Lackzunahme auf die TE-Einsatzspannung der Windungsisolierung

Auch hier wäre es interessant, den Einfluss der Anstiegszeit auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung zu untersuchen, jedoch konnte dies im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden, da die Schaltungstechnik in diesem Fall keine geeignete Variation der Impulsanstiegszeit zugelassen hat. Allerdings kann mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein vergleichbares TE-Verhalten, wie das bei Draht-Twisten erzielte TE-Verhalten, sich einstellen würde, da die Anordnung ein sehr hohes Maß an Ähnlichkeit besitzt. Die Werte der TE-Einsatzspannung würden, wie bereits dargestellt, aufgrund der Abhängigkeit der Spannungsverteilung von der Impulsanstiegszeit etwas höher ausfallen.

5.3 Vergleich und Analyse des TE-Verhaltens bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung

Die in Kapitel 5.1 und 5.2 gewonnenen Ergebnisse bezüglich des TE-Verhaltens des Motorisoliersystems bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung sollen nun in diesem Abschnitt miteinander verglichen werden, um eventuelle Aussagen über die Auswahl der Spannungsform bei einem möglichen Einsatz der TE-Messung in EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren ableiten zu können. Die Untersuchungen zum TE-Verhalten wurden nach den Isolationsabschnitten Haupt-, Phasen- und Windungsisolierung durchgeführt. Daher soll auch der Vergleich in diese drei Abschnitte gegliedert werden. Für den Vergleich werden die Spitze-Spitze-Werte der TE-Einsatzspannung herangezogen.

Die Abbildung 5.12 zeigt die Ergebnisse der TE-Einsatzspannung gemessen an der Hauptisolierung von Motoretten-Typen M067G2-1-150, M067G2-1-150-w, M067G2-1-150 (I) sowie M067G2-1-150-w (I) bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung.

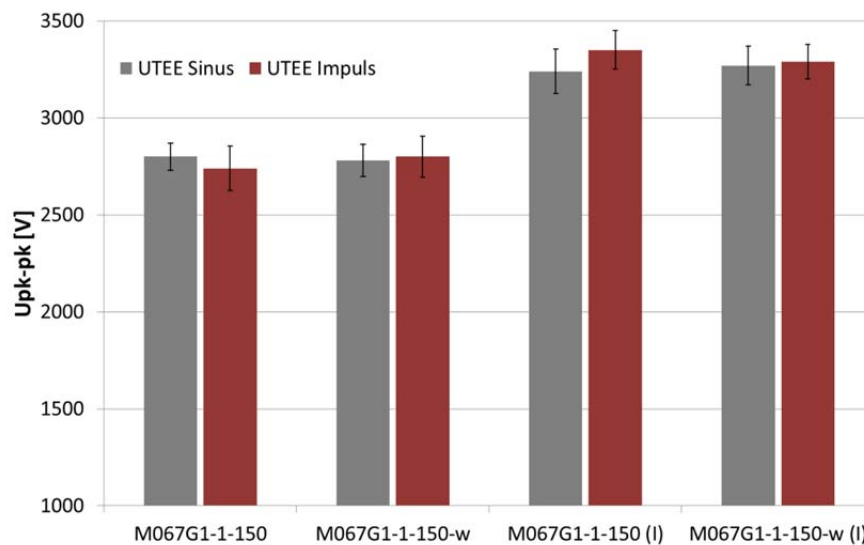


Abbildung 5.12: Vergleich der TE-Einsatzspannungsmessergebnisse der Hauptisolierung bei sinus- und impulsförmiger Spannung

Wie bereits in Kapitel 5.2 dargestellt, konnte bei der impulsförmigen Prüfspannung kein Einfluss der Anstiegszeit festgestellt werden. Somit wird hier nur der Vergleich zwischen den Ergebnissen der TE-Einsatzspannung, deren Anstiegszeit/Abfallzeit der Spannungsimpulse 500ns/20µs betrug, und den Ergebnissen, die bei sinusförmiger Prüfspannung gewonnen wurden, angestellt. Bei die-

sem Vergleich kann kein nennenswerter Unterschied in der TE-Einsatzspannung festgestellt werden. Zwar gibt es bei einigen Motoretten-Typen gewisse Tendenzen, dass es einen früheren TE-Einsatz gibt, jedoch überschneiden sich die Standardabweichungen der gezeigten Ergebnisse, so dass eine statistisch gesicherte Aussage nicht gegeben ist. Die Ergebnisse der TE-Einsatzspannung der imprägnierten Motoretten-Typen bestätigen die Aussage, dass kein Unterschied in der TE-Einsatzspannung vorhanden ist. Demzufolge kann daraus gefolgert werden, dass eine TE-Prüfung der Hauptisolierung mit einer sinusförmigen Prüfspannung die gleichen Rückschlüsse auf die TE-Einsatzspannung der Hauptisolierung eines Stators zulässt wie eine bei impulsförmiger Prüfspannung, vorausgesetzt es erfolgt die Betrachtung der Spitze-Spitze-Spannungswerte.

Da jedoch bei diesen Untersuchungen der Vergleich der Intensität sowie der Häufigkeit von Entladungen nicht eindeutig gegeben ist, können auch keine Aussagen darüber getroffen werden, ob die Intensität sowie Häufigkeit der gemessenen TE bei der TE-Einsatzspannung unter sinus- und impulsförmiger Prüfspannung identisch sind. Dies ist insoweit ein Nachteil, da nur Aussagen über das Einsetzen der TE gemacht werden können, jedoch beantwortet dies nicht z. B. die Frage, ob beim gleichzeitigen Einsetzen der TE bei sinus- und impulsförmiger Spannung auch die Intensität der eingesetzten TE identisch ist. Sollte das nämlich nicht der Fall sein, ist es denkbar, dass das Isolationsssystem aufgrund der möglichen höheren Intensität der TE einer größeren Belastung ausgesetzt wird, was in einem Qualitätstest berücksichtigt werden sollte. Legt man die Qualitätstest so aus, dass die zu prüfenden Objekte oberhalb einer Grenzspannung, welche der TE-Einsatzspannung entspricht, liegen müssen, um den Test erfolgreich zu absolvieren, so ist die Kenntnis der TE-Intensität jedoch zweitrangig. In diesem Fall wäre die Festlegung von Grenzwerten für die TE-Einsatzspannung in erster Linie abhängig von der Art des Imprägnier-Harzes, der Art des Imprägnier-Verfahrens, also der Qualität der Imprägnierung an sich, sowie von der Qualität bzw. Dicke der anderen Isoliermaterialien wie z. B. des Flächenisolierstoffes. Diese Grenzwerte für die TE-Einsatzspannung müssten in Typprüfungen für die jeweiligen Stator-Typen ermittelt werden.

Vergleichbare Ergebnisse in dem TE-Verhalten zeigt auch die Phasenisolierung. Hierbei ist auch kein Unterschied in der TE-Einsatzspannung bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung zu beobachten. Der Vergleich der Ergebnisse für die Phasenisolierung ist in der Abbildung 5.13 dargestellt. Weder bei nicht imprägnierten noch bei imprägnierten Motoretten kann eine Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von der Spannungsform beobachtet werden. Hierbei gilt aber auch wie bei der Hauptisolierung, dass die Betrachtung der Intensität sowie Häufigkeit der Entladungen bei der TE-Einsatzspannung nicht berücksichtigt werden konnte.

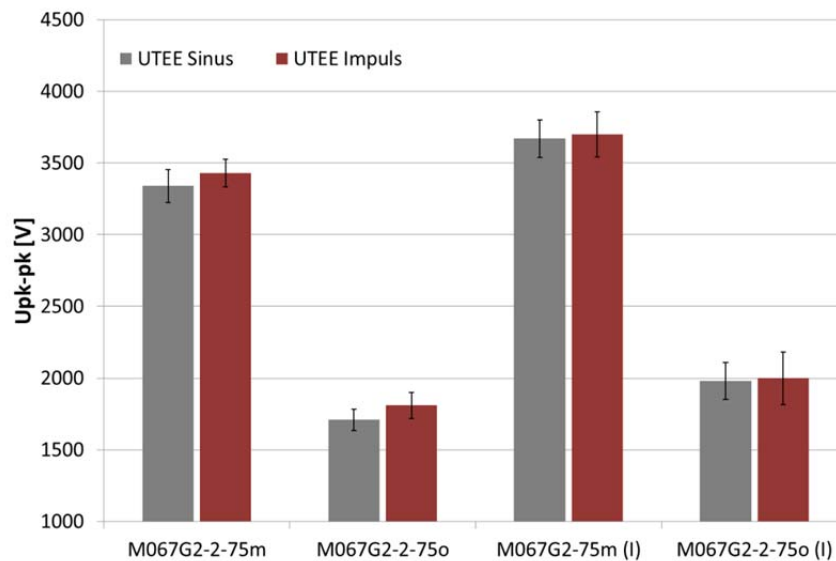


Abbildung 5.13: Vergleich der TE-Einsetzspannungsmessergebnisse der Phasenisolierung bei sinus- und impulsförmiger Spannung

Aufgrund der im Kapitel 5.2 gewonnenen Ergebnisse in Bezug auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung kann davon ausgegangen werden, dass der Vergleich des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bei sinus- und impulsförmiger Prüfspannung aus dem Kapitel 4 auf die Motoretten übertragen werden kann. Die an den Motoretten durchgeführten TE-Messungen zum TE-Verhalten der Windungsisolierung zeigen, dass die bei den Draht-Twisten erreichten Werte für die TE-Einsetzspannung auch bei Motoretten mit ungünstiger Anordnung der Wicklung bzw. der Spule erreicht werden können, zumindest von der Größenordnung her. Die Werte für die TE-Einsetzspannung der Windungsisolierung bei den untersuchten Motoretten lagen allerdings auch mal oberhalb der Werte für die TE-Einsetzspannung, die bei den Draht-Twisten erreicht wurden. Grund hierfür ist möglicherweise der volle Potentialunterschied bei den Draht-Twisten, welcher bei den Motoretten vermutlich aufgrund der Spannungsverteilung über der Spule nicht immer erreicht werden kann. Somit stellt sich die Frage, ob die an den Draht-Twisten gemessenen TE-Einsetzspannungswerte als Grenzwerte für TE an der Windungsisolierung angesehen werden können. So kann theoretisch für eine sinusförmige Prüfspannung die TE-Einsetzspannung an der Windungsisolierung, wie in Abbildung 5.14 zu sehen ist, bestimmt werden. Abgesehen von den Umweltbedingungen (Temperatur, Druck und Feuchte) beeinflusst die Lackdicke der Kupferlackdrähte maßgeblich die TE-Einsetzspannung. Daher kann bei sinusförmiger Prüfspannung die TE-Einsetzspannung für bestimmte Lackdicken nach der im Kapitel 4.2 gezeigten Formel berechnet werden. Es ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der TE-Einsetzspannung und der

Lackdicke des Kupferlackdrahtes. Somit wäre es denkbar, dass diese Kennlinie als eine Art Grenzkurve für EoL-Prüfungen eingesetzt werden kann, welche es zulassen würde, Entscheidungen wie „IO“ und „NIO“ zu treffen.

Bei impulsförmiger Prüfspannung wurde zumindest bei unipolaren Spannungsimpulsen eine Abhängigkeit der TE-Einsatzspannung von der Impulsanstiegszeit an der Windungsisolierung festgestellt. Hierbei traten TE bei schneller ansteigenden Spannungsimpulsen früher ein. Die Gründe hierfür wurden bereits im Kapitel 4.3.4 erörtert. Somit würde die hier gezeigte Kennlinie der TE-Einsatzspannung eine Verschiebung bei impulsförmiger Prüfspannung erfahren. Wie stark diese Verschiebung der Kennlinie ausgeprägt wäre, darüber kann nur gemutmaßt werden, da dies wiederum von weiteren Faktoren abhängt. Vor allem sind es die Einflüsse durch Raumladungen, die das elektrische Feld verzerren, welche nicht einkalkuliert werden können. Die berechnete Kennlinie könnte somit als minimal zu erfüllende Grenzkennlinie für die TE-Einsatzspannung verwendet werden, welche von dem zu prüfenden Objekt, in diesem Fall ein Stator, nicht unterschritten werden darf.

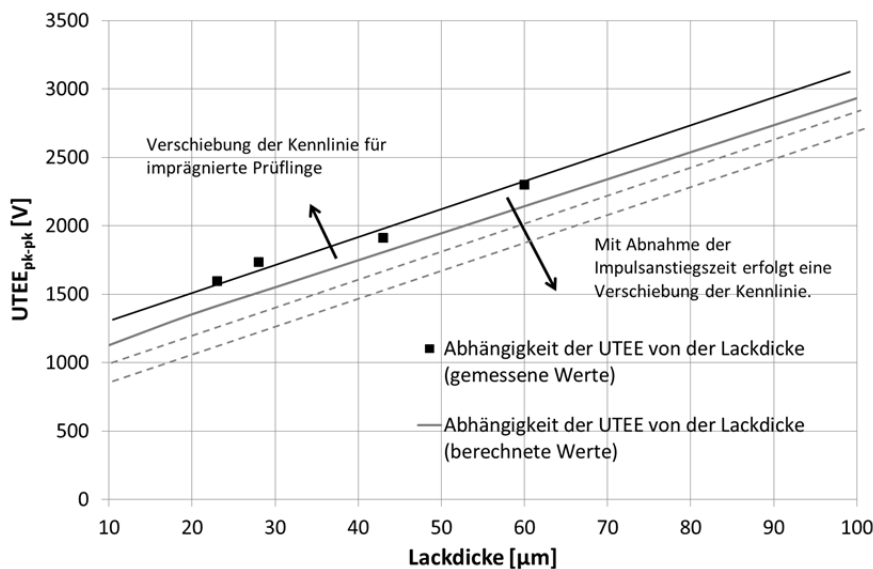


Abbildung 5.14: Grenzkennlinie für die UTEE an der Windungsisolierung

Beim unterschreiten dieser Kennlinie würde sich eine Alterung der Windungsisolierung, wie im Kapitel 4.4 dargestellt, einstellen. Liegt jedoch die TE-Einsatzspannung des geprüften Stators oberhalb dieser Kennlinie, so kann davon ausgegangen werden, dass die Windungsisolierung elektrisch, also durch TE, nicht altert, da die gemessenen TE dann nicht von der Windungsisolierung stammen können. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass dieses nur gilt, solange

die an den Klemmen des Stators angelegte Spannung auch zwischen der Windungsisolierung, beispielsweise an der schwächsten Stelle (Berührung von Anfang und Ende einer Spule) herrscht. Liegt jedoch an den Klemmen eines Stators eine impulsförmige Spannung vor, so ist der Potentialunterschied zwischen Anfang und Ende der Wicklung abhängig von der Spannungsaufteilung und diese wiederum von der Impulsanstiegszeit der Spannungsimpulse. Hierbei können durchaus höhere TE-Einsatzspannungswerte an der Windungsisolierung erzielt werden, da der Potentialunterschied an der schwächsten Stelle nicht 100%, sondern nur einen Anteil dessen beträgt. Daher muss die Spannungsaufteilung über der Wicklung sowie die Impulsanstiegszeit bekannt sein, um die oben gezeigte Grenzkennlinie individuell anpassen zu können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die berechnete Kennlinie abweichenden Verlauf im Vergleich mit den gemessenen Werten der TE-Einsatzspannung zeigt. Vermutlich kommt die Abweichung der theoretischen und praktischen Werte zustande, weil in der Berechnung die Aufladungsprozesse nicht berücksichtigt werden können. Außerdem ist für eine imprägnierte Windungsisolierung die Verschiebung der Grenzkennlinie nach oben zu erwarten. Wie stark die Verschiebung ausfällt, hängt sehr stark von den verwendeten Imprägnierharzen, Imprägnierverfahren sowie letzten Endes von der aufgenommenen Menge an Harz ab.

Theoretisch lässt sich also unter gewissen Annahmen eine Grenzkennlinie für die nichtimprägnierte Windungsisolierung aufstellen, die bei einer TE-Messung nicht unterschritten werden darf. Berücksichtigt man die in experimentellen Versuchen gewonnenen Ergebnisse für die TE-Messung an der Windungsisolierung, so müsste man einen Korrekturfaktor k von mindestens 1,15 einführen, um eine Anpassung der theoretischen an die experimentell gewonnene Kennlinie durchzuführen. Eine allgemeine Gültigkeit hätte die Grenzkennlinie jedoch nicht, da, wie schon erwähnt, weitere Faktoren wie Imprägnierverfahren, Imprägnierharz und die Spannungsaufteilung in der Wicklung eine prägende Rolle spielen. Somit müsste eine vom Stator abhängige Anpassung erfolgen, um ein solches Vorgehen zu ermöglichen. Dieses ist wiederum sehr kostenintensiv und technisch aufwendig, so dass ein solches Vorgehen in Anbetracht der Stückzahlen elektrischer Traktionsmotoren im Moment noch praktikabel wäre; bei einer vergleichbaren Entwicklung der elektrischen Mobilität mit der Mobilität basierend auf Verbrennungsmotoren wäre dies jedoch kaum vorstellbar.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Die TE-Messung ist im Bereich der Hochspannungstechnik ein bewährtes Diagnoseverfahren, welches es erlaubt, den Zustand von Isolationssystemen elektrischer Betriebsmittel zu ermitteln und Aussagen über dessen Qualität zu treffen. Dabei findet die TE-Messung sowohl on-line als auch off-line Anwendung, wenn es darum geht, Isolationssysteme und deren Güte zu beurteilen. Gerade die on-line TE-Messung erlaubt es Monitoring-Aufgaben zu übernehmen, die es ermöglichen, z. B. Wartungsintervalle gezielt einzuplanen. Des Weiteren findet der Einsatz der TE-Messung im Bereich der Stück- und Typprüfungen elektrischer Betriebsmittel, die für den Einsatz in der Hochspannungstechnik konzipiert sind. Die TE-Problematik bei umrichter gespeisten Niederspannungsmotoren haben dazu beigetragen, dass die TE-Messung auch im Bereich der Niederspannung ihren Einsatz findet. Zumal diese Problematik zur Herabsetzung der zu erwartenden Lebensdauer der Motoren geführt hat. Jedoch ist die konventionelle Art der TE-Messung, wie sie in der IEC-Norm 60270 beschrieben ist, bei umrichter gespeisten Niederspannungsmotoren nur bedingt einsetzbar.

Dieses Kapitel soll die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sowie die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen zusammenfassen und dem Leser in verkürzter Form die wichtigsten Eckdaten präsentieren. Zudem soll es die erreichten Ziele der Arbeit darstellen und abschließend noch einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten und Aufgaben zum Thema der EoL-Prüfung elektrischer Traktionsmotoren geben sowie die Fragestellungen, welche sich während der Bearbeitung dieser Arbeit ergeben haben, zusammenfassen.

Die TE-Messungen an der Windungsisolierung unter sinusförmiger Prüfspannung, die an den Draht-Twist-Prüfkörpern durchgeführt wurden, haben in erster Linie zum Verständnis beigetragen, um welche Art von Entladungen es sich handelt bzw. an welchem Ort die Entladungen an der Windungsisolierung stattfinden können. Aufgrund der gewonnenen Ergebnisse der TE-Messung hat es sich herausgestellt, dass der Luftwickel zwischen den ineinander verdrehten Drähten als Schwachstelle für Entladungen angesehen werden kann. Vergleichende TE-Messungen an Draht-Twisten in Luft und anderen Isoliermedien wie Isolieröl weisen darauf hin, dass die in Luftumgebung gemessenen TE nur aus dem Luftwickel stammen können. Dieses ist aus zwei Gründen wichtig: Zum einen ist für das Auftreten von TE zwischen zwei isolierten Leitern nicht unbedingt eine Fehlstelle im Lack des Leiters notwendig, da TE auch ohne eine Fehlstelle im Lack bei entsprechendem Potentialunterschied in Luftwickeln zwischen den Leitern zünden können, und zum anderen kann es für die Lebensdauer der Windungsisolierung eines Stators entscheidend sein, ob benachbarte Leiter, die nur durch die Windungsisolierung gegeneinander isoliert werden, sich auf unterschiedlichem

Potential befinden. Können TE im Luftwickel von zwei benachbarten Leitern zünden, so kann dies die Lebensdauer negativ beeinflussen, wie aus den Ergebnissen zum Alterungsverhalten der Windungsisolierung hervorgeht. Der Einsatz der TE-Messung als qualitätssichernde Prüfung kann dazu beitragen, dass diese kritischen Stellen frühzeitig erkannt werden. Wie die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, weisen benachbarte Leiter, die sich auf unterschiedlichem Potential befinden, charakteristische TE-Einsetzspannungswerte auf. Diese TE-Einsetzspannungswerte können als Grenzwerte in EoL-Prüfungen für „IO“- und „NIO“-Entscheidungen der Prüfung eingesetzt werden. Allerdings sind diese charakteristischen TE-Einsetzspannungswerte abhängig von unterschiedlichen Faktoren, die bei einer EoL-Prüfung berücksichtigt werden müssen. So ist der Einfluss der Lackzunahme auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung zu nennen, welcher zugleich auch die These bekräftigt, dass TE im Luftwickel auch ohne vorhanden Fehlstellen in der Windungsisolierung zünden können. Mit Zunahme der Lackschicht nahm die TE-Einsetzspannung zu, was einem späteren TE-Einsatz entspricht. Aus Sicht einer Qualitätsprüfung ist diese Tatsache, dass die Lackzunahme über das Einsetzen von TE mitentscheidet, ein wesentlicher Aspekt. Denn für unterschiedlich eingesetzte Lackdrähte müssen unterschiedliche Kriterien über das Bestehen einer TE-Prüfung gelten. Des Weiteren hatten neben der Voraussetzung eines frei zur Verfügung stehenden Startelektrons auch fertigungstechnische Schwankungen in der Lackzunahme bei den untersuchten Kupferlackdrähten Einfluss auf die Streuung der TE-Messergebnisse. Auch Umgebungsbedingungen wirken sich auf die TE-Einsetz- und Aussetzspannung aus. So konnte eine Abnahme der TE-Einsetzspannung mit zunehmender Temperatur festgestellt werden. Eine Erhöhung der Umgebungstemperatur von 25°C auf 50°C bewirkte eine um etwa 5% niedrigere TE-Einsetzspannung, was den Einfluss der Temperatur auf die Streuung der TE-Messergebnisse widerspiegelt. Während die Erhöhung der Umgebungstemperatur auf 200°C eine um 20% niedrigere TE-Einsetzspannung bewirkte. Dies spielt wiederum bei der Beurteilung der TE-Einsetzspannungswerte während einer EoL-Prüfung eine Rolle, da hierbei mitberücksichtigt werden muss, dass die TE-Einsetzwerte im Betrieb der zu prüfenden Motoren deutlich geringer ausfallen können. Auch Luftfeuchte und der Umgebungsdruck haben Einfluss auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung. Während mit zunehmender Luftfeuchte die TE-Einsetz- und Aussetzspannungswerte sinken, so steigen diese mit zunehmendem Umgebungsdruck. Beim Absinken des Umgebungsdrucks nehmen die TE-Einsetz- und Aussetzspannungswerte wieder ab. Dieses ist besonders bei Traktionsmotoren mit Einsatzgebieten oberhalb von 1000 Höhenmetern zu berücksichtigen.

Abschließend wurde bei der Untersuchung des TE-Verhaltens der Windungsisolierung bei sinusförmiger Prüfspannung auch der Einfluss der Prüfspannungsfrequenz auf die TE-Einsetz- und Aus-

setzungsspannung untersucht. Hierbei konnte in dem betrachteten Frequenzbereich (50Hz – 20kHz) kein Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung festgestellt werden.

Die Untersuchungen zum TE-Verhalten der Windungsisolierung bei impulsförmiger Prüfspannung zeigen eine vergleichbare Abhängigkeit der TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung von den Parametern Temperatur, Luftfeuchte und Druck wie bei einer sinusförmigen Prüfspannung. Weiterhin konnte auch bei der impulsförmigen Prüfspannung der Einfluss der Lackzunahme der Kupferdrähte auf die TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung nachgewiesen werden, was auch in diesem Fall dafür spricht, dass die Entladungen in dem Luftwickel zwischen den verdrehten Kupferleitern zustande kommen. Eine Imprägnierung der Prüflinge brachte eine Verbesserung der TE-Einsetzungsspannung um etwa 20%, was unter anderem von dem Imprägnierverfahren abhängig ist. Unterschiede in der TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung aufgrund der Spannungsform sind nur bedingt feststellbar gewesen. So konnte bei einer impulsförmigen Prüfspannung ebenfalls in einem Bereich bis 20kHz kein Einfluss der Frequenz auf die TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung festgestellt werden. Auch eine Variation in der Impulsdauer brachte keine erkennbaren Auswirkungen auf das TE-Verhalten der Windungsisolierung. Ein Einfluss auf die TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung konnte jedoch bei der Impulsanstiegszeit der Spannungsimpulse beobachtet werden. Während bis herunter in den einstelligen μ s-Bereich der Impulsanstiegszeit beim Vergleich der Spitze-Spitze-Werte der TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung kein wesentlicher Einfluss festgestellt werden konnte, so konnte insbesondere bei den unipolaren Spannungsimpulsen mit Spannungsanstiegszeiten bis herunter in den ns-Bereich (50ns) ein Absinken der TE-Einsetz- und Aussetzungsspannung $< 10\%$ festgestellt werden. Damit wäre eine TE-Messung der Windungsisolierung in einer EoL-Prüfung bei impulsförmiger Prüfspannung prinzipiell nur dann notwendig, wenn die Isolierung auch im Betrieb Spannungsimpulsen mit Anstiegszeiten im niedrigen ns-Bereich ausgesetzt würde. Allerdings kann aufgrund der nichtlinearen Spannungsverteilung der impulsförmigen Spannung bei impulsförmiger Spannung nicht davon ausgegangen werden, dass ein Potentialunterschied nur im Falle von Berührung des Anfangs und Endes einer Wicklung zustande kommt, sondern auch in anderen Berührungspunkten der Wicklung. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass es bei der TE-Messung zum Aufbau von Raumladungen durch die Entladungen selbst kommt, die Einfluss auf die TE-Messung nehmen können. Im Falle von TE werden freie Ladungsträger generiert, die jedoch aufgrund des hohen spezifischen Widerstandes der Lackschichten nicht abfließen können. Diese freien Ladungsträger bleiben an den Lackschichten „haften“, so dass die elektrischen Feldverhältnisse im Luftwickel beeinflusst werden.

Die theoretischen Betrachtungen zum TE-Verhalten stützen die These über die Entladungen im Luftzwickel. So ist die Voraussetzung für Entladungen in der Luft, dass die elektrische Durchschlagsfeldstärke der Luft überschritten wird. Die durchgeführten Berechnungen der elektrischen Feldstärke im Luftzwickel einer Draht-Twist-Anordnung in Abhängigkeit des Luftspaltes zeigen, dass bei einer Lackdicke von $28\mu\text{m}$ die Bedingungen für Entladungen ab einer Spannung von 550V erreicht sind. Diese Berechnungen stimmen bis auf geringe Abweichungen von etwa 10% sehr gut mit den experimentell gewonnenen Werten überein. Vermutlich rühren die Abweichungen zwischen Theorie und den experimentell bestimmten Werten daher, dass in den Berechnungen keine Verzerrungen der elektrischen Feldstärke durch Raumladungen berücksichtigt wurden sowie durch die Vereinfachungen in der betrachteten Anordnung. Weiterhin wurde in den theoretischen Betrachtungen der Einfluss der Lackzunahme auf die Entladungsbedingungen betrachtet. So konnte hierbei aufgezeigt werden, dass bereits Abweichungen von wenigen μm der Lackdicke von Kupferdrähten schon dazu führen können, dass die Bedingungen für Entladungen in der Luft nicht mehr erfüllt sind. Dieses zeigt, dass die Streuung der experimentell gewonnenen TE-Messergebnisse mitunter auf die fertigungstechnischen Schwankungen in der Lackzunahme der Kupferdrähte zurückgeführt werden kann. Diese Überlegungen und Berechnungen wurden zusätzlich durch Simulationsrechnungen überprüft. Dabei lieferten die Simulationsrechnungen ein sehr hohes Maß an Übereinstimmung zu den vorangegangenen Berechnungen.

Die Ergebnisse zum Alterungsverhalten der Windungsisolierung bestätigen die Ergebnisse der TE-Messungen an der Windungsisolierung. So konnte zum Beispiel kein Unterschied im Alterungsverhalten der Windungsisolierung zwischen sinus- und impulsförmiger Prüfspannung festgestellt werden; hierbei lag die Impulsanstiegszeit der impulsförmigen Spannung im niedrigen zweistelligen μs -Bereich. Bei unipolaren Spannungsimpulsen konnte jedoch der Einfluss der Impulsanstiegszeit auch im Alterungsverhalten der Windungsisolierung festgestellt werden. So fielen Prüflinge bei Belastung mit Spannungsimpulsen, deren Anstiegszeit um Faktor 100 niedriger war, etwa um 10% eher aus. Damit bestätigt sich offenbar, dass der Einfluss der Impulsanstiegszeit erst im ns-Bereich wirksam wird und zur Alterung der Windungsisolierung beiträgt. Vergleichbare Ergebnisse konnten mit bipolaren Spannungsimpulsen aus schaltungstechnischen Gründen nicht realisiert werden.

Die Untersuchungen zum TE-Verhalten elektrischer Traktionsmotoren, die an Motoretten durchgeführt wurden, zeigen, dass die TE-Messung an der Haupt- und Phasenisolierung nicht zwingend bei impulsförmiger Prüfspannung durchgeführt werden muss. Es konnten keine Unterschiede in der TE-Einsetz- und Aussetzspannung der Haupt- und Phasenisolierung bei sinus- und impulsförmiger Spannung beobachtet werden. Voraussetzung ist, dass zum Vergleich der TE-Einsetz- und Aussetz-

spannung die Spitze-Spitze-Spannung gewählt wird. Allerdings beruht diese Aussage ohne Betrachtung der TE-Intensität bzw. Häufigkeit der auftretenden TE, so dass hierbei weiterführende Untersuchungen vonnöten sind, vor allem in Hinblick auf mögliche Unterschiede in der TE-Intensität bzw. Häufigkeit der Entladungen in Abhängigkeit der Spannungsform. Denn dieses hätte einen Einfluss auf die Lebensdauer der betrachteten Isolierung. Die durchgeführten TE-Messungen an der Windungsisolierung bestätigen nochmals die Untersuchungen an den Draht-Twisten. Insbesondere zeigen die Ergebnisse an den „wild“ gewickelten Motoretten, dass vergleichbare Ergebnisse für die TE-Einsatz- und Aussetzspannung wie bei den Draht-Twisten zustande kommen können. Hierbei ist jedoch die Prüfung bei einer impulsförmigen Spannung erforderlich, da bei einer sinusförmigen Spannung der nötige Potentialunterschied zwischen den benachbarten Windungen eventuell nicht zustande kommen würde. Vor allem ist die Anstiegszeit der Spannungsimpulse wichtig, um die realitätsnahe Spannungsaufteilung über der Wicklung zu bekommen. Hierbei bestünde also die Möglichkeit, durch eine TE-Messung solche „Schwachstellen“, die vor allem bei Speisung der Maschinen durch Umrichter zur Begrenzung der Lebensdauer der Maschinen führen können, in qualitätssichernden Maßnahmen zu entdecken.

Dem entgegen steht in erster Linie, wie in dieser Arbeit gezeigt, dass aufgrund der Streuung in den Ergebnissen der TE-Messung eine intelligente Entscheidungsfindung vonnöten ist. Insbesondere kann es bei Überlagerung von Fehlern Schwierigkeiten geben, diese den Fehlerorten zuzuordnen. Dieses ist schon bei der Messung von TE bei einer sinusförmigen Spannung nur bedingt möglich. Hinzu kommt, dass extra geschultes Personal benötigt wird. Der erlangte Wissenstand in dieser Arbeit kann dazu beitragen, dass die Etablierung der TE-Messung im Bereich der EoL-Prüfung weiter voranschreitet. Allerdings bleiben jedoch auch Fragen offen. So ist die Störempfindlichkeit der TE-Messung eine entscheidende Größe, die es zu beurteilen gilt, bevor ein Einsatz der TE-Messung in Umgebungen mit hohem Störpotential möglich ist. Weiterhin sind Fragen nach der Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher TE-Messsysteme, die zur Verfügung stehen, und deren Aussagekraft in Bezug auf das TE-Verhalten des Isolationssystems zu beantworten. Abschließend ist noch die Verifizierung dieser Ergebnisse an gesamten Statoren zu nennen.

Literaturverzeichnis

- [Ber12] Berbic, A.; Claudi, A.: Teilentladungsmessung im End of Line Test von elektrischen Traktionsmotoren. *Diagnostik elektrischer Betriebsmittel* 134 (2012).
- [Ber96] Berth, M.: Elektrische Belastung der Wicklungsisolierung pulsumrichter gespeister Niederspannungsmotoren. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden (1996).
- [Bey86] Beyer, M.; Boeck, W.; Möller, K.; Zaengl, W.: Hochspannungstechnik: Springer (1986).
- [Bra01] Braess, H. H.; Seiffert, U.: Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik (2001).
- [Büs42] Büssing, W.: Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen. *Archiv für Elektrotechnik* 6, S. 333–357 (1942).
- [Cav10] Cavallini, A.; Fabiani, D.; Montanari, G. C.: Power Electronics and Electrical Insulation Systems – Part 1: Phenomenology Overview. *IEEE Electrical Insulation Magazin* (2010).
- [Dak48] Dakin, T.: Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon. *AIEE Transactions* Vol. 67, S. 113–122 (1948).
- [DAT] Technische Beschreibung und Bedienungsanleitung Digitales Stoßspannungsprüfgerät DWX Serie, RM Prüftechnik GmbH
- [DAT1] Bedienungsanleitung Teilentladungsmessgerät LDS-6, Lemke Diagnostics GmbH
- [DIN11] DIN EN Entwurf 61934: Elektrische Isolierstoffe- und Systeme. Elektrische Messung von Teilentladungen bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit (2011).
- [DIN09] DIN EN 60851-5: Wickeldrähte – Prüfverfahren – Teil 5: Elektrische Eigenschaften (IEC 60851-5:2008); Deutsche Fassung EN 60851-5:2008 (2009).
- [DIN08] DIN EN 60317-0-1: Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0-1: Allgemeine Anforderungen- Runddrähte aus Kupfer, lackisoliert (IEC 60317-0-1:2008); Deutsche Fassung EN 60317-0-1:2008 (2009).
- [Far07] Farahani, M.; Borsi, H.; Gockenbach, E.: Study of Capacitance and Dissipation Factor Tip-Up to Evaluate the Condition of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines. *Electr Eng* 4, S. 263–270 (2007).
- [Fen02] Fenger, M.; Stone, G.; Lloyd, B.: The Impact of Humidity on PD Inception Voltage as a Function of Rise-Time in Random Wound Motors of Different Designs. *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*, S. 501–505 (2002).

- [Fru02]** Fruth, B.; Claudi, A.; Seibel, A.: Zustandsüberwachung der Isolation von Motoren und Generatoren. *ETG Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel* (2002).
- [Gän53]** Gänger, B.: Der elektrische Durchschlag von Gasen: Springer (1953).
- [Gei12]** Geis, D.: Entwurf und Aufbau eines Hochspannungs-Impulsgenerators mit Anstiegszeiten im ns-Bereich. Diplomarbeit, Universität Kassel, Kassel 2012
- [Gue89]** Guerra, C. M.: Langzeitverhalten der Windungsisolierung von Niederspannungs-Asynchronmaschinen bei komplexer thermischer und elektrischer Belastung mit Impulsspannung. Technische Universität Dresden, Dresden (1989).
- [Han87]** Hanitsch, R.: Die Prüfung elektrischer Maschinen: Springer Verlag (1987).
- [Hay05]** Hayakawa, N.; Okubo, H.: Partial discharge characteristics of inverter-fed motor coil samples under AC and surge voltage conditions. *IEEE Electrical Insulation Magazin* Vol.21, No.1 (2005).
- [Hil98]** Hilfert, S.: Die Beanspruchung der Wicklung von Niederspannungs-Asynchronmotoren durch Frequenzumrichter und ihr Nachweis. Dissertation. Gesamthochschule Essen, Essen (1998).
- [Hil92]** Hilgarth, G.: Hochspannungstechnik: Teubner (1992).
- [IEC08]** IEC/TS 60034-18-42: Rotating electrical machines – Part 18–42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters (2008).
- [IEC11a]** IEC 60034-18-41: Rotating electrical machines – Part 18–41: Qualification and quality control tests for partial discharge free (Type I) electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters (2011).
- [IEC10]** IEC 60060: High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements (2010).
- [IEC04]** IEC 60270: High-voltage test technique – Partial discharge measurements (2004).
- [IEC11b]** IEC/TS 61934: Electrical insulating materials and systems – Electrical measurement of partial discharges (PD) under short rise time and repetitive voltage impulses (2011).
- [Jen95]** Jenni, F.; Wüest, D.: Steuerverfahren für selbstgeführte Stromrichter: B.G. Teubner Stuttgart (1995).
- [Kah89]** Kahle, M.: Elektrische Isoliertechnik: Springer Verlag (1989).

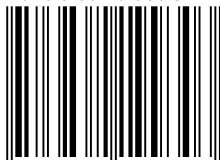
- [**Kau95**] Kaufhold, M.: Elektrisches Verhalten der Windungsisolierung von Niederspannungsmaschinen bei Speisung durch Pulsumrichter. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden (1995).
- [**Kie81**] Kiersztyn, S.: Formal theoretical foundation of electrical aging of dielectrics. *Power Engineering Review, IEEE* (1981).
- [**Kik08**] Kikuchi, Y.; Murata, T.; Uozumi, Y.; Fukumoto, N.; Nagata, M.; Wakimoto, Y.; Yoshimitsu, T.: Effects of Ambient Humidity and Temperature on Partial Discharge Characteristics of Conventional and Nanocomposite Enamelled Magnet Wires. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol.15 No. 6 (2008).
- [**Kli96**] Kliman, G.; Premerlani, W.; Hoeweler, D.: A New Approach to On-Line Turn Fault Detection in AC Motors. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, S. 687–693 (1996).
- [**Küc04**] Küchler, A.: Hochspannungstechnik. Grundlagen – Technologie – Anwendungen: Springer (2004).
- [**liu06**] Liu, X.; Wu, G.; Tong, L.; Lin, T.; Zhang, G.: Influence of Frequency on Partial Discharge under high frequency pulse voltage. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation* (2006).
- [**Man**] Mannhaupt, R.; Ume zu K.: Ein neues Verfahren zur automatischen Gewinnung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung an elektrischen Wicklungen nach IEC TS 60034-18-41 und IEC TS 61934, Baker Instrument GmbH, Nürnberg
- [**Mor05**] Morikawa, M.; Hayakawa, N.; Okubo, H.: Partial Discharge Inception and Degradation Characteristics of Inverter-Fed Motor Sample under Surge Voltage Condition. *IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena*, S. 426–429 (2005).
- [**Mül03**] Müller, K.: Entwicklung und Anwendung eines Messsystems zur Erfassung von Teilentladungen bei an Frequenzumrichtern betriebenen elektrischen Maschinen. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Duisburg-Essen (2003).
- [**OPM09**] Operating Manual RF Current Probe, Fischer Custom Communications Inc (2009)
- [**Pat02**] Patsch, R.; Kindersberger, J.; König, D.: Alterung von Betriebsmittel- ein Überblick. *ETG Fachtagung Diagnostik elektrischer Betriebsmittel* 87 (2002).
- [**Pfe99**] Pfeiffer, W.; Paede, M.: About the Influence of the Frequency on the Partial Discharge Characteristics of Enamelled Wires. *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference* (1999).

- [Pho01]** Pholmann, F.: Isoliersysteme für Drehstrom-Niederspannungsmotoren, die von Pulsfrequenzumrichtern angesteuert werden. Dissertation. Universität Essen, Essen (2001).
- [Rec00]** Rechenberg, K.: Beitrag zum Nachweis und Prognose von Lebensdauerminde- rung bei Niederspannungswicklungen und Umrichterspeisung. *Elektrie* 54, S. 74–129 (2000).
- [Roc09]** Rocks, A.: Einsatz von Metalloxid-Varistoren zum Überspannungsschutz pulsumrichter- gespeister Drehfeldmaschinen. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt (2009).
- [Rod11]** Rodrigo, A.; Llovera, P.; Fuster, V.; Quijano, A.: Influence of high frequency current trans- formers bandwidth on charge evaluation in partial discharge measurements. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 18 No. 5, S. 1798–1802 (2011).
- [Rüd68]** Rüdberg, R.: Electrical shock waves in power systems. *Traveling Waves in Lumped and Distributed Circuit Elements*: Harvard University Press (1968).
- [Sch06]** Schmidt, W.: Umweltverträgliche Harz imprägnierung elektrischer Maschinen mittels Stromwärme. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 62 (2006).
- [Sch25]** Schweiger, A.: Elektrische Festigkeitslehre: Springer (1925).
- [Sto04]** Stone, G.; Boulter, E.; Culbert, I.; Dhirani, H.: *Electrical Insulation for Rotating Mashines. Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair*: IEEE Press Series on Power Engineering (2004).
- [Sub06]** Subhasis, N.: Detection of Stator Faults in Induction Machines Using Residual Saturation Harmonics. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 5, S. 1201–1208 (2006).
- [Sub02]** Subhasis, N.; Toliyat, H.: Novel frequency-domain-based technique to detect stator inter- turn faults in induction machines using stator-induced voltages after switch-off. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* Vol. 38, S. 101–109 (2002).
- [Tal07]** Tallam, R. M.; Lee, S. B.; Stone, G. C.; Kliman, G. B.; Yoo, J.; Habetler, T. G.; Harley, R. G.: A Survey of Methods for Detection of Stator-Related Faults in Induction Machines. *IEEE Trans. on Ind. Applicat.* 4, S. 920–933 (2007).
- [Toz10]** Tozzi, M.; Cavallini, A.; Montanari, G. C.: Monitoring Off-Line and On-Line PD under impulse voltage on induction motors – Part 1: Standard Procedure. *IEEE Electrical Insulation Ma- gazin* Vol. 26 (2010).
- [TRH09]** 1K-Tränkharz DuPont Voltatex 4250, Datenblatt Synflex Elektro GmbH Stand 02/2009
- [VDE08]** VDE 0530-18-21: Drehende elektrische Maschinen – Teil 18 –21: Funktionelle Bewer- tung von Isoliersystemen – Prüfverfahren für Runddrahtwicklungen – Thermische Bewertung und Klassifizierung (2008).

Mit dem Fortschritt der Mobilität hin zur Elektrifizierung des Antriebstranges eröffnet sich kurz- und mittelfristig ein Markt für elektrische Maschinen, die über Umrichter gespeist werden, und deren Anforderungskriterien an das Isolationssystem elektrischer Maschinen besonders hoch sind. Das Isolationssystem umrichter gespeister Maschinen wird Spannungsimpulsen mit sehr kurzen Anstiegszeiten und hohen Impulsfolgefrequenzen ausgesetzt. Vor allem wird hierbei die Windungsisolierung stark beansprucht. Als Folge dieser erhöhten elektrischen Belastung können Teilentladungen (TE) auftreten, welche auf Dauer zur Reduzierung der Lebensdauer bzw. zum Ausfall einer Maschine führen.

Somit liegt das Ziel dieser Arbeit, neben einer Vertiefung der Kenntnisse über das TE-Verhalten der Windungsisolierung umrichtergespeister Niederspannungsmotoren, in einer Beurteilung der TE-Messung als mögliche qualitätssichernde Prüfung für EoL-Prüfungen elektrischer Traktionsmotoren. Insbesondere sollen die Unterschiede im TE-Verhalten der einzelnen Teile des Motorisoliersystems aufgezeigt werden und deren Aussagekraft für EoL-Prüfungen von elektrischen Traktionsmotoren erörtert werden.

ISBN 978-3-86219-930-3



9 783862 199303 >