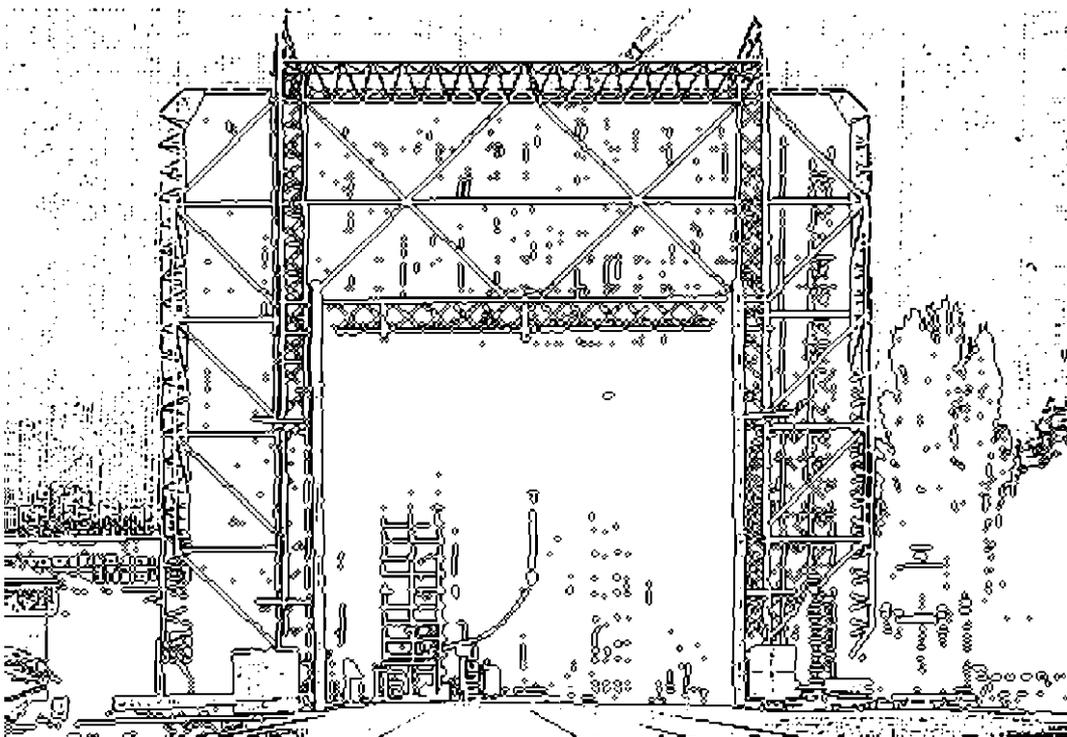


# Technische Universität Graz

## DIPLOMARBEIT



INSTITUT FÜR HOCHSPANNUNGSTECHNIK  
UND SYSTEMMANAGEMENT

# TEILENTLADUNGSDIAGNOSTIK BEI UMRICHTERBETRIEBENEN ROTIERENDEN ELEKTRISCHEN MASCHINEN

Diplomarbeit



Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Technische Universität Graz

Betreuer

Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr  
Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian



Doble-Lemke GmbH

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Kornhuber

Vorgelegt von Eva Maria Kahr

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I

Telefon: (+43 316) 873 – 7401

Telefax: (+43 316) 873 – 7408

<http://www.ihs.tugraz.at>

<http://www.tugraz.at>

Graz / November 2012



## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Institutes für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, insbesondere bei Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Michael Muhr und Dipl.-Ing. Dr. techn. Jürgen Fabian, sowie bei Dipl.-Ing. Dr. techn. Stefan Kornhuber von Doble Lemke GmbH für die Unterstützung bei dieser Arbeit bedanken.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Alfred Spalt von der Firma Spalt Elektromechanik und -maschinenbau GmbH und Herrn Dipl.-Ing Reimar Mannhaupt von der Firma RM-Prüftechnik GmbH für einige ausführliche Telefongespräche, in denen sie mir eine sehr praxisorientierte Hilfestellung geben konnten. Weiters möchte ich mich auch bei den Firmen Routeco GmbH und Vacon AT Antriebssysteme GmbH für das zur Verfügung stellen von Informationsmaterial bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem Bruder Andreas, der mich während der Fertigstellung dieser Arbeit nur in Notfällen zum Arbeiten in die Firma gerufen hat. Ebenso möchte ich mich bei meinem Partner Gernot, der all meinen stressbedingten Launen während meines gesamten Studiums ausgesetzt war, für seine Geduld bedanken. Weiters danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für die langjährige Hilfe und Unterstützung.

Abschließend möchte ich mich noch bei allen anderen Personen die mich während meiner Studienzeit unterstützt haben und mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen bedanken. Dazu gehören alle Mitglieder des Hochspannungszeichensaales insbesondere Roland Kresnik und Leopold Wiener mit denen ich im Laufe meines Studiums zahlreiche Prüfungen gemeinsam bestritten habe.

Meinem Vater gewidmet, der mein erster Lehrer und immer ein wundervoller  
Diskussionspartner war.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht verwendet, und die den benutzten Quellen, wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz am, .....

.....

Eva Maria Kahr

## Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources and resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....

date

.....

Eva Maria Kahr

## **Kurzfassung**

Teilentladungen in festen Isolierstoffen werden durch übermäßige elektrische, thermische und mechanische Beanspruchung wie auch durch umgebungsbedingte Verschmutzungen hervorgerufen. Von modernen Antriebssystemen werden heutzutage immer häufiger drehzahlvariable Ausführungen gefordert, wobei die elektrische Beanspruchung durch Teilentladungen durch die immer fortschrittlichere Leistungselektronik ansteigt. Dabei spielt der Typ des Isolationssystems der elektrischen rotierenden Maschine eine wesentliche Rolle, da anorganische Isolierstoffe, wie zum Beispiel Glimmer eine Teilentladungsbeständigkeit und organische Isolierstoffe wie Epoxidharz eine Teilentladungsunbeständigkeit aufweisen. Die Spannungsimpulse mit kleiner Anstiegszeit und hoher Wiederholungsrate, welche von Frequenzumrichtern ausgehen, können zu einer frühzeitigen Alterung des Isoliersystems von rotierenden elektrischen Maschinen führen. Deshalb nimmt die Notwendigkeit neue Teilentladungsmesssysteme zu entwickeln, die eine verlässliche Aussage über den Alterungszustand einer umrichterbetriebenen elektrischen Maschine liefern können, zu.

Diese Diplomarbeit behandelt Teilentladungen und deren Auswirkung auf die verschiedenen Isolationssysteme von elektrischen rotierenden Maschinen. Der Fokus wird auf verschiedene Teilentladungsmessverfahren gelegt, im Speziellen auf die TE-Messung nach IEC/TS 61934 und auf ein TE-Erfassungssystem mit Mikrowellensensor.

Schlüsselwörter:

Isolierung, Teilentladung, Teilentladungsmessung, elektrische rotierende Maschine, Frequenzumrichter

## **Abstract**

Partial discharges in solid insulation materials are caused by excessive electrical, thermal and mechanical stress as well as ambient pollution. As modern drive systems require more and more sophisticated speed control, the stress brought about by partial discharges grows with the use of advanced power electronics. In this context the type of insulation system used in the electrical rotating machine plays a significant role because inorganic insulation materials such as mica are resistant to partial discharges while organic insulation materials such as epoxy resin are not. The voltage pulses caused by frequency converters are marked by very short rise times and high repetition rates, which can result in an early aging of the insulation systems. It is therefore becoming increasingly important to develop new systems to measure partial discharges which yield reliable data about the aging status of converter-fed electrical machines.

This diploma thesis deals with partial discharges and their effects on the different types of insulation systems for electrical rotating machines. The main focus is on describing different ways to diagnose these discharges, in particular on measuring partial discharges according to IEC/TS 61934 and on capturing partial discharges using a microwave sensor.

Keywords:

Insulation, partial discharge, partial discharge measurement, electrical rotating machine, frequency converter

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Begriffsbestimmungen und Definitionen</b> .....	<b>2</b>
2.1	Isolierung, Isolation .....	2
2.2	Teilentladung, Teilentladungsimpuls .....	2
<b>3</b>	<b>Grundlagen zu Teilentladungen in elektrischen Betriebsmitteln</b> .....	<b>3</b>
3.1	Teilentladungsarten.....	3
3.2	Teilentladungen in festen Isolierstoffen .....	4
3.2.1	Einteilung der festen Isolierstoffe .....	4
3.2.2	Ursachen und Auswirkungen von inneren Teilentladungen in festen Isolierstoffen.....	5
3.2.3	Auftretende Effekte bei Teilentladungen .....	6
3.3	Teilentladungsdiagnostik .....	7
3.4	Methoden der Teilentladungsmessung .....	7
3.4.1	Elektrische Teilentladungsmessung .....	8
3.4.1.1	Konventionelle Teilentladungsmessung .....	8
3.4.1.2	HF/VHF Teilentladungsmesstechnik.....	9
3.4.1.3	UHF-Teilentladungsmessung .....	9
3.4.2	Optoakustische Teilentladungsmessung .....	10
3.4.3	Optische Teilentladungsmessung .....	10
3.4.4	Akustische Teilentladungsmessung .....	10
3.4.5	Chemische Teilentladungsmessung .....	11
<b>4</b>	<b>Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen</b> .....	<b>12</b>
4.1	Isolationssystem rotierender elektrischer Maschinen.....	12
4.1.1	Anforderungen an die Isolierung .....	13
4.1.2	Verwendete Materialien und Aufbau einer Hochspannungsisolierung (Typ II) .....	13
4.1.2.1	Trägermaterialien für Glimmer .....	16

4.1.2.2	Powerformer™ und Windformer™ .....	16
4.1.3	Verwendete Materialien und Aufbau einer Niederspannungsisolierung (Typ I) .....	18
4.2	Arten von Teilentladungen und deren Auswirkungen auf die Hochspannungsisolierung (Typ II) .....	21
4.2.1	Innere Hohlräume .....	23
4.2.2	Innere Delamination.....	23
4.2.3	Delamination zwischen Leiter und Isolierung .....	24
4.2.4	Nutentladungen .....	24
4.2.5	Oberflächenentladungen am Wickelkopf.....	24
4.2.6	Leitende Partikel .....	24
4.3	Alterungsmechanismen von Glimmerbändern .....	25
4.3.1	Electrical treeing .....	25
4.4	Teilentladungen und Alterungsmechanismen bei Niederspannungsisolierungen (Typ I) .....	29
4.4.1	Verbesserung der Isolierung .....	30
<b>5</b>	<b>Teilentladungsdiagnostik in Umrichter betriebenen rotierenden elektrischen Maschinen .....</b>	<b>32</b>
5.1	Begriffsbestimmungen.....	32
5.2	Leistungselektronik Stand der Technik .....	33
5.2.1	IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor).....	35
5.2.2	GTO (Gate Turn Off Thyristor) / IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) / SGCT (Symmetric Gate Commutated Thyristor) .....	38
5.2.3	Einteilung und Arten von Umrichtern.....	40
5.3	Auswirkungen auf die elektrische Maschinenisolierung aufgrund von Umrichterimpulsen.....	42
5.3.1	Beanspruchungskategorien und Spannungsmerkmale für Isoliersysteme des Typ I und des Typ II bei Umrichterbetrieb .....	45

5.3.2	Isolationsprobleme von Typ II Isolationssystemen unter Impulsspannungsbedingungen.....	47
5.4	Teilentladungsdiagnoseverfahren nach IEC/TS 61934.....	51
5.4.1	TE-Detektionsverfahren .....	53
5.4.1.1	Koppelkondensator mit mehrpoligem Filter.....	54
5.4.1.2	HFCT mit mehrpoligem Filter.....	55
5.4.1.3	Elektromagnetische Richtkoppler .....	56
5.5	Messung von TE bei unterschiedlichen Kurvenformen .....	58
5.5.1	Ergebnisse der Messung .....	60
5.6	Teilentladungserfassungssystem mit Mikrowellensensor DWX-05PD (RM- Prüftechnik) .....	63
5.7	Ein automatischen PDIV-Messsystems mit Impulsgenerator um die Tauglichkeit der Isolierung von umrichterbetriebenen Maschinen zu überprüfen ..	67
<b>6</b>	<b>Umrichterbetriebene Anlagen .....</b>	<b>71</b>
6.1	Drehzahlvariable Windkraftanlagen mit Frequenzumrichter.....	72
6.2	Beanspruchungen und Fehler die in der Generatorisolierung von Windkraftwerken auftreten können .....	77
6.2.1	Fehler die in der Isolierung des Windgenerators auftreten können .....	78
6.2.1.1	Ausfall der Läuferwicklung verursacht durch Spannungsspitzen durch die PWM.....	78
6.2.1.2	Schlecht gekrimpte Ausleitungen der Läuferspulen .....	79
6.2.1.3	Verlust bzw. Bruch der Bänderung am Wickelkopf des Rotors .....	79
6.2.1.4	Umwelteinflüsse .....	80
6.2.1.5	Untaugliche Isolation zwischen den Schleifringen .....	80
6.3	Umrichterbetriebenes Schuttfördersystem.....	82
6.4	Lösungsansätze für den besseren Schutz des Generators/Motors vor TE ..	83
<b>7</b>	<b>Resümee und Ausblick.....</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>87</b>

<b>10</b>	<b>Symbolverzeichnis.....</b>	<b>89</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>90</b>
<b>12</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>98</b>
12.1	Anhang 1: Technische Daten des Mittelspannungs-Frequenzumrichters PowerFlex 7000 von Rockwell-Automation .....	98
12.2	Anhang 2: Technische Daten des VACON 8000 WIND.....	101
12.3	Anhang 3: Technische Daten des LC Sine Wave Filter for Motor Drives FN 5040/FN 5045 von Schaffner .....	102
12.4	Anhang 4: Technische Daten von High-current Three-phase EMC/RFI Filters FN 3359 von Schaffner .....	103

# 1 Einleitung

***„Denkt auch daran, daß die Techniker es sind, die erst wahre Demokratie möglich machen. Denn sie erleichtern nicht nur des Menschen Tagewerk, sondern machen auch die Werke der feinsten Denker und Künstler, deren Genuß noch vor kurzem ein Privileg bevorzugter Klassen war, jedem zugänglich.“***

***(Albert Einstein 1879-1955)***

Die Antriebstechnik nimmt weltweit in der wirtschaftlichen Entwicklung eine Schlüsselposition ein. Aufgrund der Forderung nach immer höheren Feldstärken und besserer Regelbarkeit ist das Isoliersystem elektrischer rotierender Maschinen immer höheren Belastungen ausgesetzt. Der rasante Fortschritt der Leistungselektronik fordert eine Anpassung des Isoliersystems von elektrischen rotierenden Maschinen an neue, erschwerte Bedingungen. Durch sehr hochfrequente, schnell ansteigende Impulse, die von einem Frequenzumrichter ausgehen, steigt die Beanspruchung aller verwendeten Isoliermaterialien erheblich [1]. Die Messung von Teilentladungen in der Isolation von rotierenden elektrischen Maschinen ist ein wirksames Verfahren um Aussagen über den Alterungszustand des Isoliersystems treffen zu können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den verschiedenen Methoden der Teilentladungsmessung bei Umrichterbetrieb. Ziel ist es Verfahren zu finden, die eine Messung von Teilentladungen unter Impulsspannungsbeanspruchung möglich machen. Weiters sollen die Auswirkungen der auftretenden Teilentladungen, auf die verschiedenen Typen von Isoliersystemen von rotierenden elektrischen Maschinen, untersucht werden. Die Basis bilden dabei wissenschaftliche Quellen wie Publikationen, klassische Bücher der Hochspannungstechnik und der Leistungselektronik sowie die Inhalte verschiedener Fachvorträge und Zeitschriftenartikel als auch technische Standards (Normen).

In dieser Diplomarbeit wird auf die verschiedenen Arten von Maschinenisolationen und Fehler, die durch Teilentladungen entstehen können eingegangen. Weiters soll ein Überblick über die unterschiedlichen Typen leistungselektronischer Schalter und Umrichter gegeben werden. Schließlich werden verschiedene praxisorientierte Beispiele von umrichterbetriebenen Anlagen vorgestellt und auftretende Probleme und deren mögliche Lösung beschrieben.

## 2 Begriffsbestimmungen und Definitionen

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Begriffe, die in der vorliegenden Arbeit immer wieder vorkommen, definiert.

### 2.1 Isolierung, Isolation

#### **Isolierung:**

*„Unter dem Begriff ISOLIERUNG ist die Wirkung aller Materialien und Teile zu verstehen, die die Funktion der Potentialtrennung hochspannungsführender Komponenten gegeneinander oder des gesamten Geräts gegen Erde übernehmen. Zu der Isolierung sind die konstruktive Ausführung bzw. die eingesetzten Werkstoffe zu zählen, oftmals wird auch der Begriff Isolationssystem verwendet.“ [2]*

#### **Isolation:**

*„Unter dem Begriff ISOLATION sind alle Eigenschaften zu verstehen, die für die Funktionsfähigkeit der Isolierung verantwortlich sind. Solche Eigenschaften können beispielsweise der Isolationswiderstand, die Durchschlagsspannung oder der Feuchtigkeitsgehalt eines Materials oder einer Isolieranordnung sein.“ [2]*

### 2.2 Teilentladung, Teilentladungsimpuls

#### **Teilentladung:**

*„Örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einem Leiter auftreten kann, aber nicht muss“ [3].*

#### **Teilentladungsimpuls:**

*„Strom- oder Spannungsimpuls, der von einer Teilentladung des Prüflings herrührt. Der Impuls wird mittels eines geeigneten Detektorkreises gemessen, der in den Prüfkreis zum Prüfzweck eingebracht wird“ [3].*

### 3 Grundlagen zu Teilentladungen in elektrischen Betriebsmitteln

Wie schon in Kapitel 2.2 erläutert sind Teilentladungen (TE) örtlich begrenzte unvollständige Durchschläge in einem Isoliermedium oder an dessen Oberfläche. Eine der Ursachen für diese Erscheinungen sind lokale Feldstärkeerhöhungen, beispielsweise an leitfähigen Spitzen oder durch Feldverdrängung. Weiters kann es zu einer lokalen Minderung der elektrischen Festigkeit kommen, welche zum Beispiel durch gasgefüllte Hohlräume in Isoliermedien entstehen kann [4], [5].

#### 3.1 Teilentladungsarten

Nach [6] können Teilentladungen folgendermaßen klassifiziert werden:

- **Koronaentladungen:** Sie werden auch äußere Teilentladungen genannt und sind Entladungen im stark inhomogenen Feld an Spitzen und Drähten. Sie kommen beispielsweise bei Freileitungen und an scharfkantigen Armaturen von Betriebsmitteln vor.
- **Gleitentladungen:** Sie entstehen an Grenzflächen mit hoher Tangentialfeldstärke, zum Beispiel am Nutaustritt von Wicklungen bei rotierenden elektrischen Maschinen oder bei Durchführungen und Kabelendverschlüssen.
- **Hohlraumentladungen:** Sie werden auch innere Teilentladungen genannt und kommen in gasgefüllten Einschlüssen, in Lunkern und bei Delamination (Ablösung) des verwendeten Isoliermediums, beispielsweise in festen Isolierstoffen oder in Mischisolierungen, vor. Durch diese Art von Teilentladungen kann es zum sogenannten „electrical-treeing“ kommen. Das bedeutet, dass sich an der Fehlstelle verästelte, gasgefüllte Kanäle bilden, welche sich bis zur Gegenelektrode fortsetzen und schließlich zum vollständigen Durchschlag führen können.

Teilentladungen kommen bei allen Arten von Isolierstoffen (gasförmige, flüssige und feste Medien) vor, jedoch werden in der vorliegenden Arbeit nur TE betrachtet, die sich auf feste Isolierstoffe beziehen, da aufgrund des Isolationsaufbaus der

Wicklungen von rotierenden elektrischen Maschinen die Notwendigkeit einer Betrachtung von gasförmigen und flüssigen Isoliermedien entfällt. Allerdings sind Hohlraumentladungen in festen Isolierstoffen strenggenommen Gasentladungen. Zusätzlich gilt für folgende Betrachtungen ausschließlich das Teilentladungsverhalten bei Wechselspannung.

### 3.2 Teilentladungen in festen Isolierstoffen

Feste Isolierstoffe sind bedeutend für jene Betriebsmittel, in welchen neben der Potenzialtrennung auch eine notwendige mechanische Abstützung übernommen wird. Feste Isoliermedien können aus anorganischen oder aus organischen Materialien gewonnen oder synthetisch hergestellt werden [7]. Da feste Isolierstoffe im Allgemeinen keine selbstheilenden Eigenschaften besitzen, (im Gegensatz zu gasförmigen (z.B. Luft, SF<sub>6</sub>) oder mit Einschränkungen auch flüssigen Isolierstoffen (z.B. Mineralöl)), ist es von großer Bedeutung die TE-Beständigkeit der unterschiedlichen Arten von festen Isolierstoffe zu definieren.

#### 3.2.1 Einteilung der festen Isolierstoffe

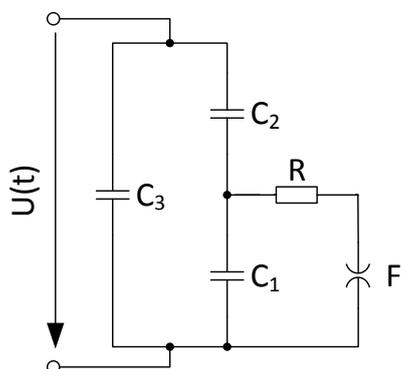
Bei der Betrachtung fester Isolierstoffe in Bezug auf die Teilentladungsgefährdung können diese nach [7] in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- **Teilentladungsbeständige Isolierstoffe:** Glimmer, Porzellan und mit gewissen Einschränkungen auch Glas sind als TE-beständig anzusehen. Das bedeutet, dass durch eine langanhaltende TE-Beanspruchung keine nennenswerte Beeinträchtigung des Isoliermediums entsteht.
- **Teilentladungsunbeständige Isolierstoffe:** Hochpolymere Kunststoffe, wie zum Beispiel Polyethylen (PE) und vernetztes Polyethylen (VPE) oder Gießharze, gelten als empfindlich gegenüber Teilentladungen. Folglich kann eine dauerhafte TE-Beanspruchung im Isolierstoffvolumen nach gewisser Zeit zum vollständigen Durchschlag führen.

### 3.2.2 Ursachen und Auswirkungen von inneren Teilentladungen in festen Isolierstoffen

Ursachen von Teilentladungen in einem festen Isolierstoffvolumen sind fast immer gasgefüllte Hohlräume oder Fremdstoffe mit einer geringeren elektrischen Festigkeit innerhalb der Isolierung. Allseitig geschlossene Hohlräume entstehen meistens in unvollständig entgasten Gießharzen oder durch chemische Nebenreaktionen. Auch Erosion, mechanische Spannungen, Versprödungen, Ablösungen zwischen Elektrode und Dielektrikum sowie Risse, Spalten, Delamination an Fasergrenzen und schlecht imprägnierte Schichtungen können in festen Isolierstoffen zu einer Hohlraumbildung führen [4].

Im kapazitiven Ersatzschaltbild können Teilentladungen als Entladung einer Hohlraumkapazität angesehen werden. Das Nachladen der Kapazität erfolgt bei Wechselfspannung durch einen kapazitiven Verschiebungsstrom, der über eine Teilkapazität, die in Serie zur Hohlraumkapazität geschaltet ist, fließt. Überschreitet die Hohlraumspannung die Zündspannung  $U_Z$  der Gasstrecke, bricht die Hohlraumspannung bis auf einen bestimmten Wert einer Löschspannung  $U_L$  zusammen. Treten solche TE über einen längeren Zeitraum auf, wird das feste Isoliermedium nachhaltig geschädigt und schließlich zerstört [4].



- $C_1$  Kapazität der Fehlerstelle
- $C_2$  Kapazität in Serie zur Fehlerstelle
- $C_3$  Kapazität des Prüflings
- $R$  Widerstand des Entladungskanals
- $F$  Funkenstrecke

Abbildung 3.1 Vereinfachtes kapazitives Ersatzschaltbild für innere TE, nach [8]

### 3.2.3 Auftretende Effekte bei Teilentladungen

Aufgrund der TE wird auf einem kleinen Volumen (Hohlraum) in der Isolierung eine relativ große Leistung umgesetzt und der Energieeintrag durch TE, welche auf ein kleines Volumen reduziert sind, ist relativ groß. Infolge dessen besteht besonders bei festen Isolierstoffen eine hohe Durchschlagsgefährdung [6].

Folgende Effekte und Auswirkungen die durch Teilentladungen hervorgerufen werden sind in Tabelle 3-1 dargestellt:

**Tabelle 3-1: Effekte und Auswirkungen durch TE [6]**

Auftretender Effekt	Auswirkungen auf die Isolierung
Die Energiezufuhr, die in einigen ns stattfindet, führt zur Erwärmung und dabei auch zu einer Druckerhöhung an der Stelle, an der die Entladung auftritt. Es wird eine Druckwelle in der Isolierung erzeugt	Kann zur mechanischen Zerstörung beitragen  Basis für die akustische TE-Messung
Unmittelbar nach der Entladung entsteht Strahlung im sichtbaren UV-Bereich	Langfristiger chemischer Abbau organischer hochpolymerer Isolierstoffe  Basis der optischen TE-Messung in transparenten Isolierstoffen
Durch die Entladung im Hohlraum (Gasraum) kommt es zu chemischen Veränderungen des Isoliermaterials	Im Beisein von Feuchtigkeit kann es zu aggressiven Verbindungen und somit zur Korrosion von Metallen und zur Schädigung von Isolierstoffoberflächen kommen
Der sehr kurzzeitige Ladungstransport verursacht in den Zuleitungen Stromimpulse, die mit elektromagnetischer Strahlung einhergehen	Grundlage für den überwiegenden Teil der Teilentladungsmess- und Diagnoseverfahren  Durch TE hochfrequente Störungen im Nachrichtenverkehr

### **3.3 Teilentladungsdiagnostik**

Neben verschiedenen Diagnoseverfahren, wie zum Beispiel die Verlustfaktormessung oder dielektrische Messungen, ist die Teilentladungsdiagnostik ein gängiges Mittel, um den Zustand eines Hochspannungsbetriebsmittels zu beurteilen. Der Pegel der TE wird mit einem geeigneten Prüfkreis gemessen und beurteilt [2].

Das Ziel bei der Durchführung von Teilentladungsmessungen ist es einerseits Zerstörungen der elektrischen Isolierung durch Teilentladungen im Betrieb zu erkennen und andererseits Teilentladungsursachen in allen Phasen der Entwicklung und Herstellung eines Hochspannungsbetriebsmittels zu evaluieren [6].

### **3.4 Methoden der Teilentladungsmessung**

Das Auftreten und die Stärke von Teilentladungen sind in der technischen Diagnostik ein wichtige Qualitätskriterien bei der Beurteilung von Betriebsmitteln. Teilentladungsmessungen sind daher wichtige Instrumente zur Diagnose, wobei für die Detektion und Ortung verschiedenste Techniken eingesetzt werden können [9] [5].

Grundsätzlich unterscheidet man bei der Messung von Teilentladungen zwischen elektrischen und nicht elektrischen Methoden. Zu den elektrischen Methoden zählen die konventionelle, die HF/VHF- und die UHF-Teilentladungsmessung, während die nicht elektrischen Messmethoden in optische, akustische, optoakustische und chemische Messmethoden eingeteilt sind. Abbildung 3.2 soll die verschiedenen Messmethoden veranschaulichen:

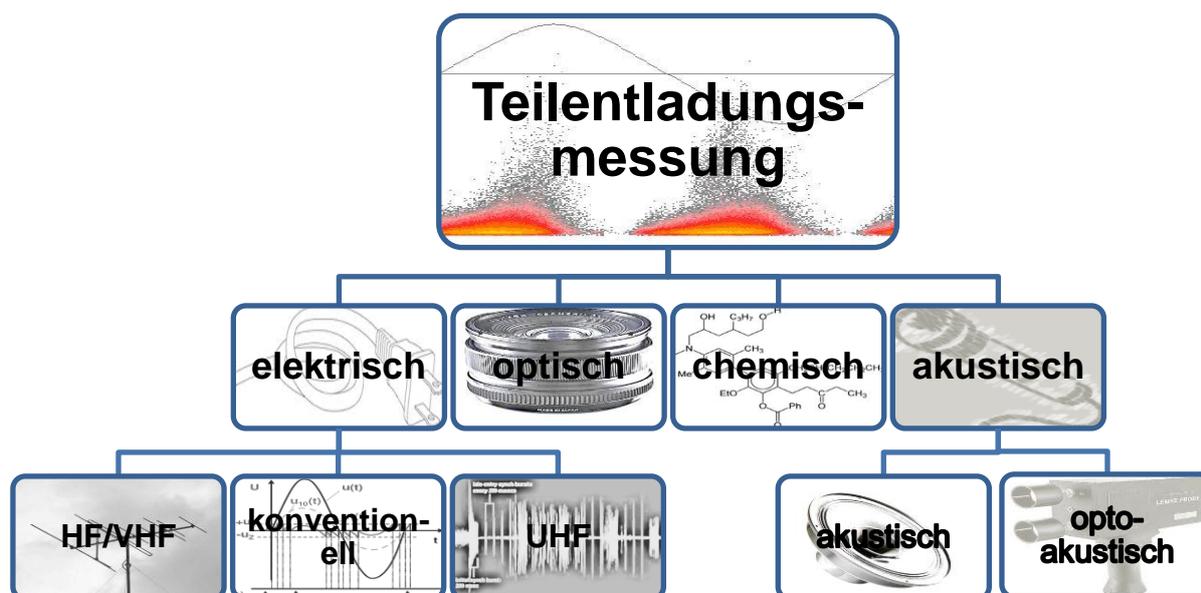


Abbildung 3.2 Überblick über die TE-Messmethoden nach [9]

### 3.4.1 Elektrische Teilentladungsmessung

#### 3.4.1.1 Konventionelle Teilentladungsmessung

Für die konventionelle Teilentladungsmessung werden Messkreise nach IEC 60270 verwendet. Der Prüfkreis enthält eine Hochspannungsquelle, eine Messimpedanz, einen Koppelkondensator, einen Ankoppelvierpol und den Prüfling selbst [10], [11].

Jede einzelne Teilentladung verursacht im Messkreis einen kurzen sehr hochfrequenten Stromimpuls, der mittels Messimpedanz ausgekoppelt und dem Messsystem zugeführt wird. Das Messsystem kann schmalbandig, breitbandig oder begrenzt breitbandig ausgeführt sein. Gemessen wird die scheinbare Ladung  $q$  in pC oder nC [9].

Die Grundgrößen bei der klassischen Teilentladungsinterpretation sind in Tabelle 3-2 dargestellt:

**Tabelle 3-2 Grundgrößen der klassischen Teilentladungsinterpretation [12]**

Grundgrößen	Symbol	Einheit
Scheinbare Ladung bzw. Intensität	q	pC od. nC
Phasenlage der TE zur Versorgungsspannung	$\varphi$	Grad
Impulshäufigkeit	n	Impulse / s
Einsetzspannung	$U_E$	V
Aussetzspannung	$U_A$	V
Polarität der TE	+, -	

### **3.4.1.2 HF/VHF Teilentladungsmesstechnik**

Diese Messmethoden werden oft bei hochpolymeren Isolierungen, wie zum Beispiel Kabeln, angewendet. Die TE in diesen Isolierstoffen weisen eine sehr kurze Dauer (wenige ns) auf. Der Frequenzbereich dieser Messmethode liegt bei 3 MHz bis 30 MHz (HF) bzw. 30 MHz bis 300 MHz (VHF). Die an der Fehlerstelle auftretende TE breitet sich in Form von Wanderwellen aus, wobei die Amplitude gedämpft und der Impuls verzerrt wird. Gemessen wird mit kapazitiven, induktiven oder elektromagnetischen Sensoren. Das Messsystem kann schmalbandig oder breitbandig ausgeführt werden. Die Empfindlichkeit des Messkreises kann durch Brechung, Reflexionen, frequenzabhängige Dämpfung und die geometrische Anordnung der Sensoren beeinflusst werden. Diese Messmethode wird meist zur Lokalisierung von TE eingesetzt [9], [12].

### **3.4.1.3 UHF-Teilentladungsmessung**

Es hat sich gezeigt, dass TE in einem Isoliermedium auch sehr hochfrequente spektrale Anteile, die bis in den Bereich von 3 GHz reichen können, besitzen [4], [12]. Es entstehen durch die TE elektromagnetische Wanderwellen. Die Signalkomponenten bei Freiluftkorona sind deutlich niedriger als bei inneren TE (unter 400 MHz [13]). Diese Frequenzen können bei der UHF-TE-Messung erfolgreich durch Hochpassfilter unterdrückt werden und somit mit hoher Wahrscheinlichkeit TE in einem Isoliermedium nachgewiesen werden. Die Signalauskopplung bei diesem Messprinzip erfolgt über Sensoren (Scheibensensor, Konussensor) oder Feldsteuerelektroden. Die verstärkten Sensorsignale können über Multiplexer, einem Oszilloskop oder einem Spektrum Analysator zugeführt werden. Die Messung kann schmalbandig oder auch breitbandig ausgeführt werden [4], [10], [12].

### **3.4.2 Optoakustische Teilentladungsmessung**

Durch die elektrische Hohlräumladung in einem Isoliermedium kommt es zu einer Schallwelle. Wenn diese Welle auf eine optische Faser wirkt, wird diese durch Verformung mechanisch beansprucht. Die optischen Übertragungseigenschaften des in der Faser geführten Lichts werden dadurch beeinflusst. Es kommt auch zu einer Veränderung der optischen Weglänge und des Polarisationszustands, welche für die Messung genutzt werden können. [9], [12].

### **3.4.3 Optische Teilentladungsmessung**

Bei der elektrischen Entladung kommt es zu einer Abstrahlung von Licht im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Bereich. Dieser Effekt wird bei der optischen Teilentladungsdetektion genutzt. Das Spektrum des von TE emittierten Lichtes ist in einer groben Näherung proportional zur Ladung. Die Beschaffenheit des Isoliermediums spielt bei der optischen TE-Messung eine große Rolle. Grundsätzlich gilt: Je transparenter der Isolierstoff (Luft und Gas sind transparent) desto besser können TE optisch erfasst werden. Bei flüssigen und festen Isolierstoffen wird das emittierte Licht zum Großteil oder sogar vollständig absorbiert. Zur Erfassung von TE werden Fotodioden, Fotomultiplier, Restlichtverstärker und UV-Koronaskope eingesetzt. Parallel zur optischen Messung wird oft auch eine konventionelle Teilentladungsmessung durchgeführt, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Diese Messmethode wird hauptsächlich zur Ortung von TE-Quellen eingesetzt [9], [12], [14].

### **3.4.4 Akustische Teilentladungsmessung**

Wie schon in 3.2.3 erwähnt, entsteht bei der elektrischen Entladung eine Schallwelle. Dieses akustische Signal wird mit einem oder mehreren Sensoren detektiert (das Frequenzspektrum liegt zwischen 10 Hz und 300 kHz). Abhängig von der Kombination der umgebenden Medien wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Schallwelle beeinflusst. Weitere Einflussgrößen sind Reflexion, Brechung und Dämpfung, die bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Als Sensoren kommen bei dieser Messmethode piezoelektrische Sensoren und Beschleunigungsaufnehmer zum Einsatz. Auch diese Messmethode wird bevorzugt

zur Ortung von Fehlstellen eingesetzt. Der Vorteil liegt in der Anwendbarkeit bei einem Großteil der Hochspannungsbetriebsmittel [9], [12].

### **3.4.5 Chemische Teilentladungsmessung**

Teilentladungen und lokale Überhitzungen können zu einer chemischen Zersetzung des Isoliermediums führen. Im Zuge dieser Zersetzung werden sogenannte Spaltgase freigesetzt, wobei die Art dieser Gase von der Energiedichte in der Fehlerstelle und vom Isolierstoff abhängig ist. Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung von Isolationsfehlern in Hochspannungsbetriebsmittel stellt die Analyse von gelösten und freien Gasen (Schadgase) dar. Mit dieser Methode ist es jedoch nicht möglich, direkt die TE-Aktivität zu erfassen. Mittels DGA (Dissolved Gas Analysis) können sich langsam entwickelnde Fehler analysiert werden und es wird somit eine Lebensdauerprognose eines Isolieröls ermöglicht, wobei mit dieser integrativen Messmethode nur eine Aussage über einen vergangenen Zeitraum getroffen werden kann [15], [9], [4].

## 4 Teilentladungen in rotierenden elektrischen Maschinen

### 4.1 Isolationssystem rotierender elektrischer Maschinen

Das Isolationssystem rotierender elektrischer Maschinen ist sehr komplex und kann hinsichtlich der Konstruktion und Ausführung und der Betriebsbedingungen variieren [6]. Die Anforderungen, der Aufbau, die eingesetzten Isolierstoffe und die derzeit übliche Verfahren zur Herstellung von Hochspannungsisolierungen werden in diesem Kapitel behandelt.

Grundsätzlich gibt es zwei Typen von Wicklungsisolierungen. In den technischen Spezifikationen (IEC 60034-18-4; IEC 60034-18-41) [16] und [17] werden diese als Typ I und Typ II Isoliersysteme klassifiziert. Bei Typ I Isolierungen wird nicht erwartet, dass sie während ihrer Lebensdauer Teilentladungen ausgesetzt sind. Bei Maschinen deren Bemessungsspannung kleiner 700 V (Effektivwert) ist, wird meist die Typ I Isolierung verwendet. Typ II Isolierungen werden während ihrer Lebensdauer mit großer Wahrscheinlichkeit Teilentladungen ausgesetzt sein, deshalb sollten möglichst teilentladungsresistente Isolierstoffe eingesetzt werden. Bei Maschinen mit einer Bemessungsspannung größer 700 V (Effektivwert) wird meist die Typ II Isolierung verwendet.

Für Maschinen mit einer Bemessungsspannung kleiner 700 V effektiv (Typ I) kommen als Material für die Wicklungen lackisolierte Runddrähte zum Einsatz, Maschinen mit einer Bemessungsspannung größer 700 V effektiv (Typ II) sind meist mit Formspulen gewickelt [18].

Sind Maschinen von Umrichtern gespeist ist allerdings die bekannte Definition der Bemessungsspannung nicht mehr anwendbar. Die vom Hersteller zugewiesene betriebsfrequente Bemessungsspannung bei 50 Hz / 60 Hz ist für die Isolationsbeanspruchung nicht geeignet, wenn sie durch einen Umrichter gespeist wird [16], [17]. Deshalb gibt es Beanspruchungskategorien und Parameter, nach denen eine Qualifizierung elektrischer Maschinen für den Umrichterbetrieb bemessen werden kann. In Kapitel 5.3.1 werden diese Beanspruchungskategorien für beide Isolierungstypen behandelt.

#### **4.1.1 Anforderungen an die Isolierung**

Da elektrische Maschinen in der Praxis hohen Belastungen ausgesetzt sind und diese Belastungen in Zukunft, aufgrund der immer fortschrittlicheren Stromrichtertechnik stetig größer werden, ist es notwendig, Anforderungen die an eine moderne Isolierung von rotierenden elektrischen Maschinen gestellt werden, zu formulieren. In [19] sind sie folgendermaßen definiert:

- Elektrische Feldstärken größer 3kV/mm müssen möglich sein
- Hohe Durchschlagsspannung
- Eine Lebensdauer von mehr als 30 Jahren muss gewährleistet sein
- Geringer Verlustfaktor
- Gute Verarbeitbarkeit
- Hohe mechanische Festigkeit
- Kompatibilität mit derzeit eingesetzten Technologien
- Umweltfreundliche Materialien sollen verwendet werden
- Keine Gesundheitsgefährdung

#### **4.1.2 Verwendete Materialien und Aufbau einer Hochspannungsisolierung (Typ II)**

Das Isolationssystem von rotierenden elektrischen Maschinen ist im Betrieb thermischen, elektrischen, mechanischen und umweltbedingten Belastungen ausgesetzt. Da ein nicht Auftreten von Teilentladungen nicht garantiert werden kann, müssen Isoliermaterialien eingesetzt werden, die der andauernden TE-Erosion widerstehen können [20]. In 3.2.1 wurden bereits die festen Isolierstoffe in teilentladungsbeständige und teilentladungsunbeständige Arten eingeteilt. Glimmerprodukte gelten als teilentladungs- und temperaturbeständig und haben sich aufgrund dieser besonderen Eigenschaften in der Praxis als Isolierstoff für rotierende elektrische Maschinen des Typs II bewährt. Das Ausgangsmaterial ist Glimmerpapier, das auf ein Trägermaterial aufgebracht wird. Diese glimmerhaltigen Bänder werden dazu verwendet, um vorgeformte Leiter zu bewickeln. Das Bindemittel (Harz) ist beim Bewicklungsprozess noch nicht gehärtet, wobei die Bänder je nach Herstellungsprozess viel oder wenig Bindemittel enthalten können [4].

Abbildung 4.1 zeigt eine typische Hochspannungsisolierung:

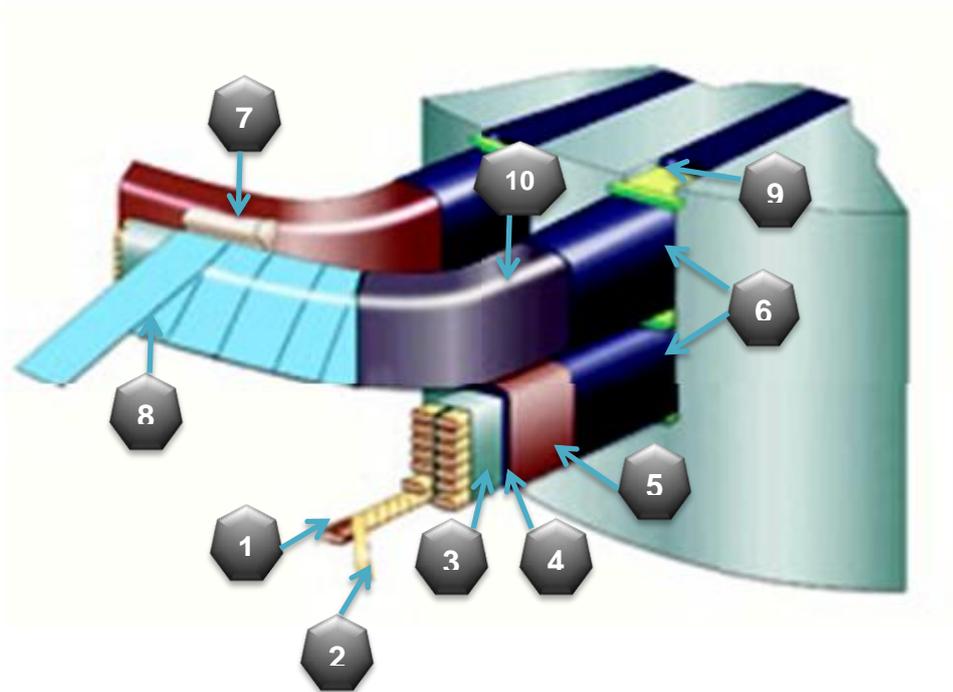


Abbildung 4.1 Aufbau einer Hochspannungsisolierung nach [2]

- 1 Teilleiter aus blankem oder poliertem Kupfer
- 2 Teilleiterisolierung
- 3 Strangisolierung
- 4 Hauptisolierung
- 5 Schutzband gegen Umwelteinflüsse
- 6 Leitfähige Bänder um Blechpaket und Oberfläche der Isolierung auf das gleiche Spannungsniveau zu bringen (Außenglimmschutz)
- 7 Abstandhalter
- 8 Glimmerband für die Hauptisolierung
- 9 Nutverschlusskeil
- 10 Endenglimmschutz zur Feldsteuerung

Danach wird der Außenglimmschutz und der Endenglimmschutz aufgebracht [21]. Zur Herstellung von Maschinenisolierungen werden im Moment zwei Verfahren eingesetzt, das Vakuum Druck Verfahren auch VPI (Vaccum Pressure Impregnation) genannt und das Spulen Pressverfahren auch RR (Resin Rich) genannt. Tabelle 4-1 soll einen Überblick über die Unterschiede und die damit verbundenen Vor- und Nachteile beider Verfahren verschaffen [19].

**Tabelle 4-1 Überblick über die Herstellungsverfahren [19]**

	VPI-Verfahren	RR-Verfahren
<b>Hauptisolierung</b>	Kontinuierlich	diskontinuierlich
<b>Bänder</b>	Poröse Bänder mit einem Harzgehalt von 7%-10%. Das Harz hat die Aufgabe den Glimmer zu verkleben und eine Anbindung des Imprägnierharzes an das Isoliermaterial herzustellen.	Harzreiche Bänder mit einem Harzgehalt von 35%-40%. Das zur Herstellung der Isolierung benötigte Harz ist zur Gänze in den Bändern enthalten.
<b>Verfahren</b>	Spulen und Stäbe werden mit allen erforderlichen Bändern bewickelt und in den Stator eingebaut, danach beginnt der Imprägnierprozess.	Spulen und Stäbe werden mit den harzreichen Bändern bewickelt, dem Pressprozess unterzogen und erst danach in den Stator eingebaut.
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sehr gute elektrische und mechanische Werte</li> <li>▪ Durch die kontinuierliche Isolierung gibt es keine Stoßstellen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Geringe Maschinenkosten</li> <li>▪ Jede Spule ist gleich nach dem Pressprozess prüfbar</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hohe Herstellungskosten</li> <li>▪ Erhöhte Energiekosten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Begrenzte Lebensdauer der Bänder</li> <li>▪ Höherer Aufwand beim Zusammenbau der Maschine</li> </ul>

#### **4.1.2.1 Trägermaterialien für Glimmer**

Da Glimmerpapier nicht gut verarbeitet werden kann, benötigt es eine mechanische Abstützung in Form eines Trägers. Das Glimmerpapier wird auf Glasgewebe, Folien und Vliese, die als Trägermaterialien zum Einsatz kommen, aufgebracht [19].

Trägermaterialien und ihre Eigenschaften:

- **Glasgewebe:** Besitzt eine hohe mechanische Festigkeit, ist gut imprägnierbar und erreicht eine sehr gute Lagenhaftung. Es lassen sich Isolierungen mit sehr niedrigen Verlustfaktoren und hoher Lebensdauer herstellen [19].
- **Folien:** Folien bestehen entweder aus Polyethylenterephthalat (PET) oder Polyethylennaphtalat (PEN). PEN-Folien erreichen eine höhere Temperaturbeständigkeit, sind schwer entflammbar und selbstverlöschend. Foliengestützte Bänder erreichen sehr hohe Durchschlagsspannungen und sind kostengünstiger, allerdings ist die Imprägnierfähigkeit (VPI) für dickere Isolierungen nicht mehr gegeben [19].
- **Vliese:** Werden aus nicht verwebten Glasfäden hergestellt. Vliese als Trägermaterial sind gut wickelbar und sehr flexibel. Sie haben gute elektrische Fähigkeiten aber nur geringe mechanische Eigenschaften. Darum werden sie im Allgemeinen nur für kleine bis mittlere Hochspannungsmotoren verwendet [19].

#### **4.1.2.2 Powerformer™ und Windformer™**

Eine andere Methode der Statorwicklung einer Hochspannungsmaschine ist in [22] und in [23] beschrieben. Die Statorwicklung besteht beim Powerformer™ aus extrudierten VPE (vernetztes Polyethylen im englischen mit XLPE abgekürzt) Kabeln. Dadurch wurde es möglich, Generatoren zu bauen, die mit höheren Spannungen als die üblichen 30 kV-35 kV betrieben werden können. Die Prototypen wurden für 45 kV, 11 MVA und 600 rpm, 136 kV, 42 MVA und 3000 rpm und für 155 kV, 75 MVA, und 125 rpm ausgelegt.

Abbildung 4.2 zeigt den Isolationsaufbau eines solchen Hochspannungskabels, das für die Wicklungen verwendet wurde.

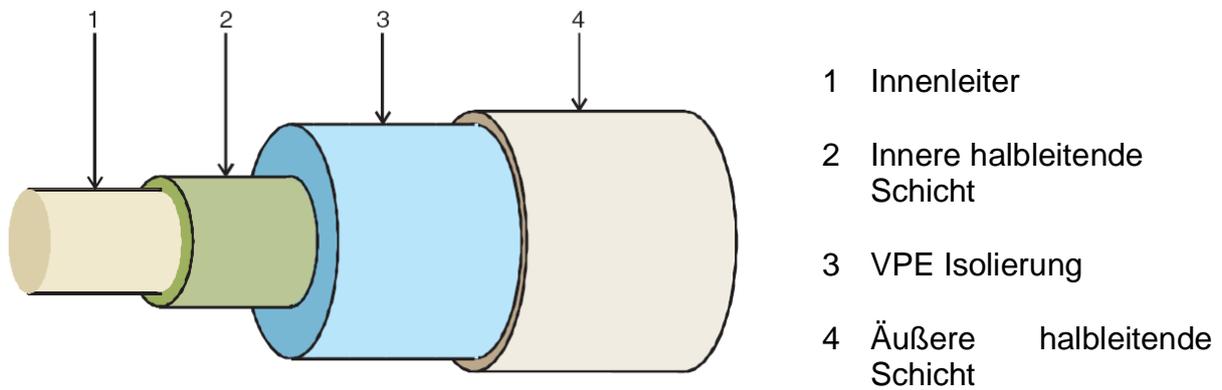


Abbildung 4.2 Aufbau HV-Wicklungskabels [23]

Abbildung 4.3 zeigt einen Vergleich zwischen der Isolierung eines konventionellen Generators und der Kabelisolierung des Powerformers™.

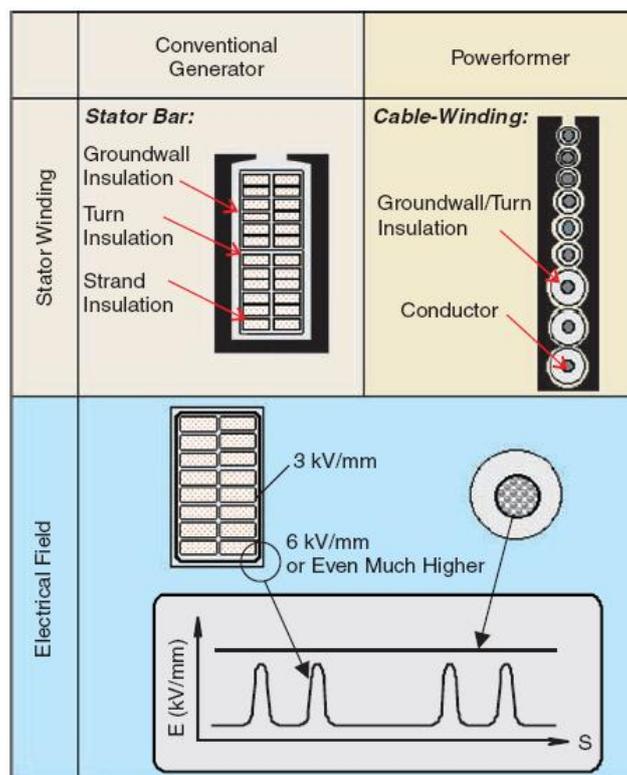


Abbildung 4.3 Vergleich von konventioneller Statorisolierung und Kabel-Wicklung vom Powerformer™ [23]

### 4.1.3 Verwendete Materialien und Aufbau einer Niederspannungsisolierung (Typ I)

Die Isolierung von Niederspannungsmotoren besteht im Gegensatz zur Typ II Isolierung, welche im Stator Formspulen die im VPI-Verfahren oder im RR-Verfahren isoliert werden, aus mehreren konzentrisch angeordneten oder gleichmäßig versetzten Spulen, die jeweils eine Spulengruppe bilden. Da die häufig eingesetzten Asynchronmotoren meist mit Käfigläufer betrieben werden, wird die Lebensdauer der Maschine fast ausschließlich von dem Alterungszustand der Stator-Wicklung bestimmt [24].

Die Isolierung wird in Phasenisolierung, Hauptisolierung und Windungsisolierung eingeteilt:

- **Phasenisolierung:** Bei Einschichtwicklungen befindet sie sich im Wickelkopf, bei Zweischichtwicklungen kann sie sich auch zusätzlich zwischen zwei in der Nut liegenden Spulen befinden. Es werden oft Flächenisolierstoffe, die als Phasentrenner fungieren, aus Polyester-Verbundvlies verwendet (gut imprägnierbar) [24].
- **Hauptisolierung:** Ist die Isolierung, welche die Spule, die in der Nut liegt, vom Blechpaket trennt. Häufig verwendete Isoliermaterialien sind Aramidpapier, Polyesterverbundspan oder Polyesterfolien. Wenn die Spule in die Nut eingezogen ist, wird diese oft mit dem gleichen Material verschlossen (Nutabdeckung) [24].
- **Windungsisolierung:** diese wird in der Literatur auch als Längsisolierung bezeichnet und kommt ohne zusätzliche Flächenisolierstoffe aus. Sie besteht aus dem Lack, der sich zwischen den sich berührenden Drähten befindet. Auch die einzelnen Spulen desselben Windungsstranges sind so isoliert [24].

Abbildung 4.4 zeigt im Überblick das Isolationssystem einer Asynchronmaschine (ASM).

Abbildung 4.5 zeigt schematisch den Aufbau einer Runddrahtwicklung.

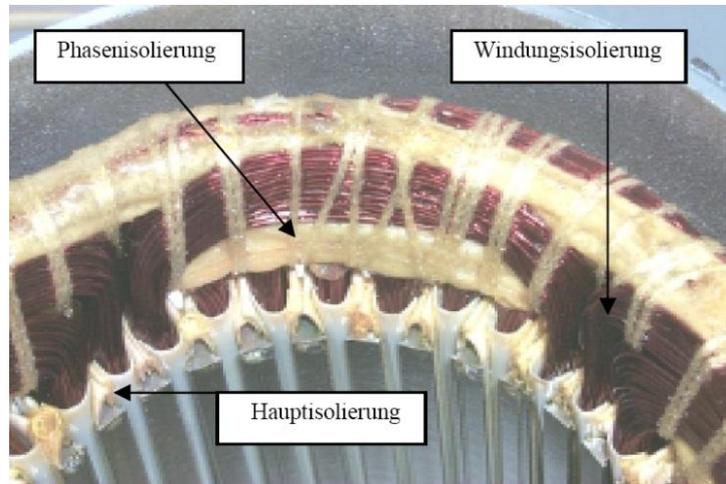


Abbildung 4.4 Isolationssystem des Ständers einer ASM [24]

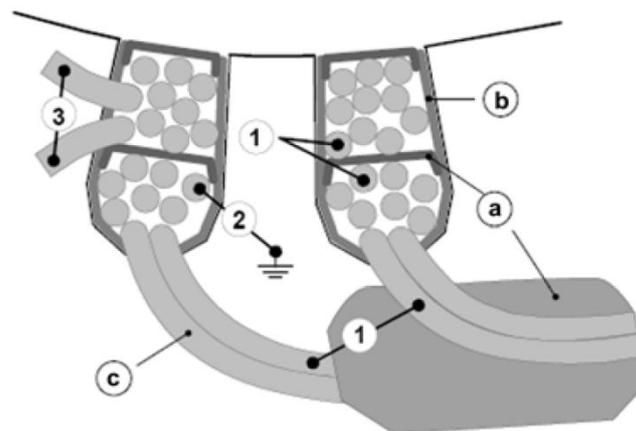
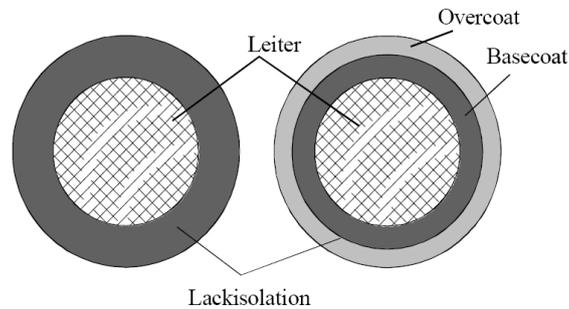


Abbildung 4.5 Beispiel einer Runddrahtwicklung [17]

- a Phasenisolierung/Wickelkopfisolierung
- b Hauptisolierung
- c Windungsisolierung
- 1 Leiter-Leiter
- 2 Leiter-Erde
- 3 Windung-Windung

Für die Windungsisolierung werden Einschicht- oder Zweischichtlackdrähte verwendet. Wichtig für die Verarbeitung dieser Lackdrähte sind Eigenschaften, wie eine hohe Abriebfestigkeit und glatte Oberflächen, da so durch den niedrigen Reibungskoeffizienten mehr Wicklungen in einer Nut untergebracht werden können [24].



**Abbildung 4.6** Einschicht- und zweischichtlackierter Draht [24]



**Abbildung 4.7** Querschnitt durch einen lackisolierten Draht [24]

Nach dem Wickeln des Motors wird zur mechanischen Festigung, zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit des Isolationssystems und zur Verbesserung der Verlustwärmeabführung, die gesamte Wicklung harzprägniert. Trotz der zum Teil beachtlichen Aufnahme von Tränkmittel kann nicht gewährleistet werden, dass es zu keiner Lunker-Bildung und somit zu ungewollten Teilentladungen kommt [24]. Es gibt drei verschiedenen Imprägniermethoden:

- **Tauch-Tränkung:** Der Stator wird kurz in kaltes Harz getaucht (ungesättigte Polyesterimidharze) und nach einer Abtropfzeit bei 130°C bis 160°C im Ofen ausgehärtet [24].
- **Vakuum-Tränkung:** Zuerst wird die Vakuumkammer evakuiert (ca. 25 mbar), dann das Tränkharz (ungesättigte Polyesterimidharze) zugeführt und durch das Vakuum in den Stator gezogen. Danach wird belüftet. Damit eine Blasenbildung vermieden wird, bleibt der Stator noch ca. eine halbe Stunde im Harz liegen und wird dann nach dem Abtropfen bei ca. 150°C im Ofen ausgehärtet [24].
- **Strom-UV-Tränkung:** Der Stator wird durch einen Strom der durch die Wicklung fließt auf ca. 110°C bis 120°C erwärmt und danach kurz ins Harz (UV-härtende Harze auf der Basis ungesättigter Polyesterimidharze) getaucht. Danach folgt die Abtropfphase. Anschließend wird der Stator, damit das Harz aushärten kann, erneut durch einen Strom auf ca. 150 bis 170°C erwärmt. Abschließend wird er mit UV-Licht bestrahlt, damit auch das Harz an der Wicklungsoberfläche aushärtet [24].

#### 4.2 Arten von Teilentladungen und deren Auswirkungen auf die Hochspannungsisolierung (Typ II)

Die Isoliersysteme der Statorwicklung von Hochspannungsmaschinen weisen im Betrieb immer eine gewisse TE-Aktivität auf, jedoch sollte es aufgrund der TE-Resistenz des eingesetzten Glimmers zu keiner Schädigung der Isolierung kommen. Eine ausgeprägte TE-Aktivität in Hochspannungsmaschinen ist meist ein Anzeichen für Isolationsmängel infolge von Fertigungsfehlern, normale betriebliche Alterung oder anormale Alterung. Es gibt unterschiedliche TE-Quellen, die durch ihr charakteristisches TE-Verhalten erkannt und unterschieden werden können [25]. Nicht jede TE-Quelle ist potenziell gefährlich für die Maschine (Beschleunigung der Alterung). In [2] wird das Risiko der auftretenden Teilentladungen und der dadurch beschleunigten Alterung in drei Kategorien eingeteilt: geringe, normale und hohe Gefahr der frühzeitigen Alterung. Als normales Risiko werden produktionsbedingte Hohlräume und Verschmutzungen gesehen, da sie üblicherweise keine negative Auswirkung auf die Alterung und Lebensdauer der Isolierstoffe haben sollten. Produktionsbedingte Hohlräume können mittels der Qualitätskontrolle des Herstellers

überprüft werden. Im Betrieb gehören Verschmutzungen zum Erscheinungsbild eines Generators und können im Zuge einer Revision erfolgreich entfernt werden. Die folgenden Betrachtungen der unterschiedlichen TE-Arten schließen die oben erwähnte Risikobetrachtung mit ein.



Abbildung 4.8 TE-Quellen in Generatorstäben nach [2]



**Abbildung 4.9 Querschnitt eines realen Generatorstabes**

#### **4.2.1 Innere Hohlräume**

Bei den harzprägnierten glimmerbandisolierten Systemen, die für Hochspannungsmaschinen üblicherweise eingesetzt werden, ist beim Fertigungsprozess ein geringfügiger Gehalt von Hohlräumen unvermeidbar. Der Glimmer verhindert, dass durch die auftretenden Teilentladungen ein vollständiger Durchschlag entsteht. Wenn die Hohlräume klein sind und sich nicht sehr vergrößern, entsteht keine nennenswerte Schädigung der Isolierung [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: gering [25]

#### **4.2.2 Innere Delamination**

Große Hohlräume bzw. Ablösungen (Delamination) innerhalb der Hauptisolierung können sich über eine große Fläche erstrecken und relativ energiereiche Entladungen verursachen, welche die Isolierung stark angreifen können. Verursacht werden diese Hohlräume durch unvollständige Aushärtung des Isoliersystems während der Fertigung oder durch mechanische bzw. thermische Überbeanspruchung im Betrieb. Die Delamination kann die Lebensdauer der elektrischen Maschine erheblich verkürzen [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: hoch [25]

### **4.2.3 Delamination zwischen Leiter und Isolierung**

Die Ablösung der Hauptisolierung vom Kupferleiter kann eine Folge von einer kurzzeitigen thermischen Überbelastung der Maschine sein. Die Windungs- oder Teilleiterisolierung kann erheblich beschädigt werden [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: hoch [25]

### **4.2.4 Nutentladungen**

Die Entstehung von Nutentladung ist auf einen schlechten oder ganz fehlenden Kontakt des Außenglimmschutzes mit dem Blechpaket zurückzuführen. Es entstehen hochenergetische Entladungen, die die Hauptisolierung angreifen und schließlich einen Isolationsfehler hervorrufen können [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: hoch [25]

### **4.2.5 Oberflächenentladungen am Wickelkopf**

Diese Art von Oberflächenentladungen entsteht meist an den Grenzflächen zwischen den unterschiedlichen Elementen des Wickelkopfes der Statorwicklung, wenn die Funktionalität des Endglimmschutzes (Aufgabe der Feldsteuerung) nicht mehr gegeben ist. Die Materialien erodieren allmählich [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: normal [25]

### **4.2.6 Leitende Partikel**

TE aufgrund von leitfähigen Partikeln kommen an der Oberfläche der Wicklung vor. Diese Partikeln können aufgrund von Verunreinigungen der Wicklung (Staub, Ruß etc.) vorkommen und die TE-Konzentration (hauptsächlich im Bereich des Wickelkopfes) kann an diesen Stellen erheblich ansteigen. Dies kann zu einem „Nadelloch“ in der Isolierung führen [2] [25].

Risiko für frühzeitige Alterung: normal [25]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle TE, denen eine Ablösung der Isolierung oder ein schlechter Kontakt zwischen leitendenden Schichten und dem Blechpaket voran gehen, ein großes Risiko für das Isolationssystem der elektrischen Maschine darstellen.

### 4.3 Alterungsmechanismen von Glimmerbändern

Viele Statistiken beschäftigen sich mit Isolationsfehlern in elektrischen rotierenden Maschinen. Sie zeigen auf, dass gut ein Viertel aller Fehler, die bei rotierenden elektrischen Maschinen auftreten können, aufgrund von Isolationsfehlern auftreten, aber sie geben wenig Einblick in die Mechanismen, die sich im Isolationsmaterial abspielen.

In [21], [26], [27] und [28] wurden diese Mechanismen anhand von Versuchen beschrieben, welche in den folgenden Ausführungen dargestellt werden.

Grundsätzlich gibt es vier Alterungsmechanismen von Isolationsmaterialien: die thermische, die elektrische, die mechanische Alterung und Alterung aufgrund von Umgebungseinflüssen. Die elektrische Alterung lässt sich zusätzlich noch in drei weitere Unterkategorien unterteilen, nämlich in die Feldalterung, die Teilentladungsalterung und die elektrothermische Alterung [24].

Untersuchungen von Glimmerisolierungen von elektrischen Hochspannungsmaschinen ergeben, dass das elektrische Versagen einer Isolierung nur der finale Fehler ist. Man geht davon aus, dass die thermische Beanspruchung gefolgt vom mechanischen Stress schließlich zu einem elektrischen Durchschlag führen kann. Für eine erhebliche Reduktion der Lebenszeit einer solchen Harz-Glimmer Isolierung sorgen Temperaturen über 130°C oder sogar über 180°C.

Alterung ist also nicht durch die elektrische Belastung alleine beschreibbar, sondern ist eine Kombination aus thermischer, mechanischer und elektrischer Belastung [26] [29].

#### 4.3.1 Electrical treeing

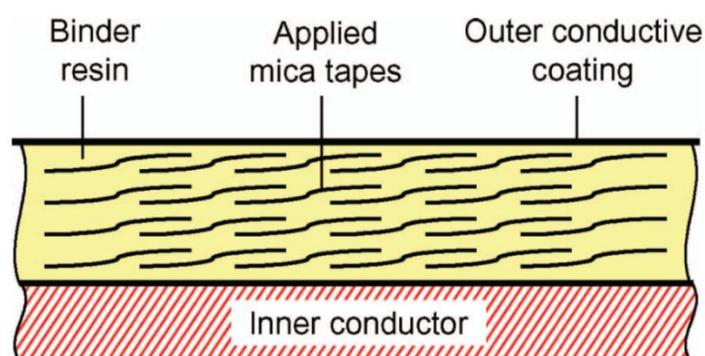
Electrical treeing kann wie bereits in Kapitel 3 beschrieben in letzter Konsequenz zum vollständigen Durchschlag in einem festen Isoliermedium führen. An beschädigten Stellen der Isolierung wie zum Beispiel in Hohlräumen und an verunreinigten Stellen treten Teilentladungen auf. Es kommt zu lokalen Feldstärkeerhöhungen an diesen Stellen, wobei auch die Durchschlagsfeldstärke überschritten werden kann. Die Zerstörungskraft dieser Teilentladungen führt zur Ausbildung von verästelten Kanälen (electrical treeing), die sich in der Isolierung fortpflanzen und das Dielektrikum irreversibel zerstören. Dieses Phänomen wird in

der Fachliteratur auch als Teilentladungsalterung bezeichnet [24]. Da die Kombination aus Glimmer und Harz ein Mischdielektrikum ist, ist es von großem Interesse das Vorkommen und das Verhalten dieser trees zu verstehen, um ein Versagen der Isolierung zu vermeiden und die Lebensdauer zu verlängern. Electrical treeing ist ein Prozess bei dem das Isolationsmaterial aufgrund von Teilentladungen erodiert. Der Einsatz dieser trees wird von der Beschichtung oder vom Leiter beeinflusst (z.B. Delamination). Die Häufigkeit und Fortpflanzung dieser trees ist vom Isoliermedium abhängig. Bevor auf den Mechanismus der Electrical-tree-Bildung eingegangen wird, ist es zielführend die Zeit des vollständigen Versagens der Isolierung zu definieren (time to breakdown  $T_{bd}$ ). Wenn die Spannung angelegt wird, ist  $T_{bd}$  abhängig von der tree-Einsatzzeit ( $T_{tEinsatz}$ ) und der tree-Fortpflanzungszeit ( $T_{tFortpf}$ ) [21].

$$T_{bd} = T_{tEinsatz} + T_{tFortpf}$$

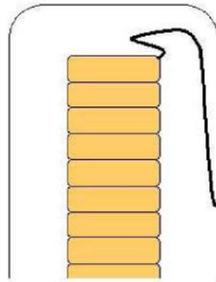
**Formel 4-1 [21]**

Abbildung 4.10 zeigt die grundsätzliche Struktur einer Wicklungsisolierung. Abgebildet sind der Innenleiter (Inner conductor), die Schichten vom Glimmerpapier (Applied mica tapes) und der Aussenglimmschutz (Outer conductive coating). Das Glimmerpapier fungiert als Barriere im Trägerharz (Binder resin). Da Glimmer als teilentladungsbeständig gilt, sollen diese Glimmerbarrieren die Electrical-tree-Bildung eindämmen bzw. aufhalten, um eine irreversible Beschädigung der Maschinenisolierung zu vermeiden [27], [28].

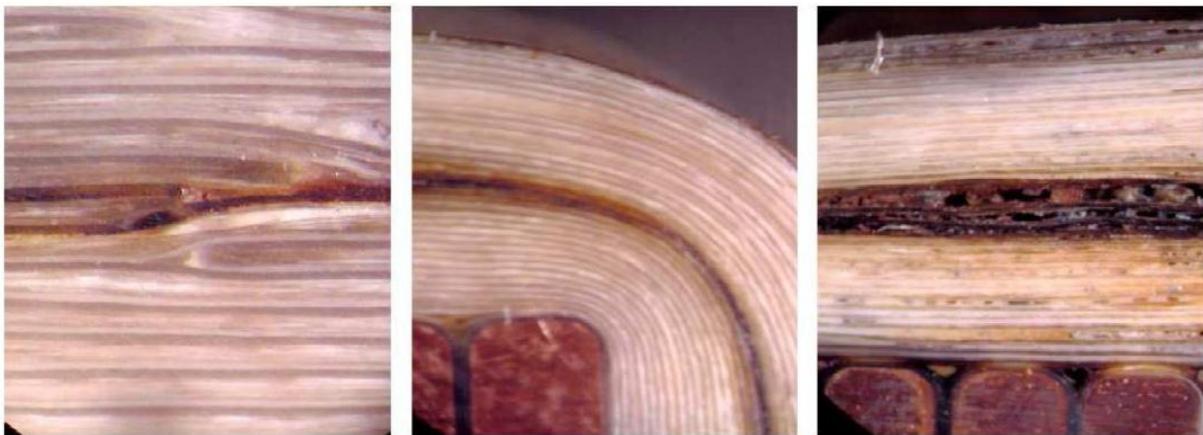


**Abbildung 4.10 Struktur einer Wicklungsisolierung (Seitenansicht) [21]**

Bei Versuchen die in [21], [26], [27] und [28] durchgeführt wurden, wurde erkannt, dass die trees meistens an der Ecke des Kupferleiters starten (Effekt des erhöhten elektrischen Feldes an diesem Punkt) und sich entlang des Glimmers innerhalb der Isolierung weiter ausbreiten (siehe Abbildung 4.11). Der tree durchbricht erst dann die Wicklungslage, wenn an einer Stelle der Glimmer beschädigt ist. Solche Beschädigungen können produktionsbedingt sein, oder auch beim Bewickeln der Leiter mit dem Glimmerband auftreten.



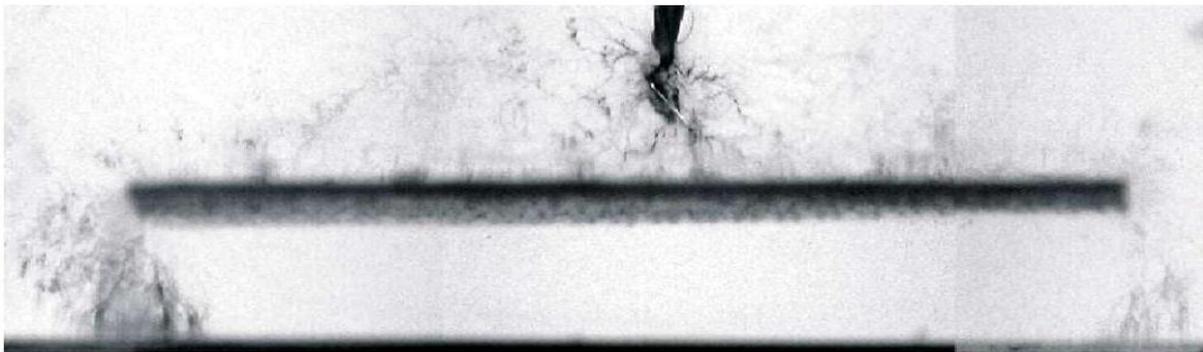
**Abbildung 4.11 Ausbreitung eines trees von der Ecke des Kupferleiters aus [26]**



**Abbildung 4.12 Mikrobilder Isolationsschäden [26]**

Abbildung 4.12 zeigt einen tree an einer Überlappungsstelle der Glimmerbänder (Bild links) an der Stator-Stab-Kante (Bild Mitte) und das Versagen der Isolierung (Bild rechts).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich durch die elektrische Beanspruchung der Isolation in Hohlräumen, Rissen oder an Ablösungsstellen electrical trees bilden können, die sich durch Teilentladungen weiter ausweiten. Sind die Glimmerschichten innerhalb der Isolierung intakt, können sich die trees keinen Weg zur Gegenelektrode bahnen sondern wandern der Glimmerschicht entlang. Sind die Glimmerlagen an Stellen produktionsbedingt defekt, hat der tree die Möglichkeit sich weiter fortzupflanzen und auf diese Art Schicht für Schicht die Isolierung zu durchdringen (siehe Abbildung 4.13).



**Abbildung 4.13 Ausbreitung der trees im Harz mit einer Glimmerbarriere dazwischen (Testaufbau Spitze-Platte-Anordnung) [26]**

#### 4.4 Teilentladungen und Alterungsmechanismen bei Niederspannungsisolierungen (Typ I)

Auch bei Niederspannungsmotoren ist die Alterung abhängig von mechanischen, thermischen, elektrischen Belastung und der Belastung aufgrund von Umwelteinflüssen. Die elektrische Alterung lässt sich hier ebenfalls in reine Feldalterung, Teilentladungsalterung (electrical treeing siehe Kapitel 4.3.1) und elektrothermische Alterung einteilen. Besonders an den Stellen an dem die Drähte zusammenstoßen (kleiner Luftspalt zwischen den lackisolierten Leitern) treten nach [30] sehr hohe Feldstärken auf. Der Motor fällt dann aus, wenn sich die elektrische Festigkeit infolge der elektrischen Alterung soweit verschlechtert, dass die vorhandene Beanspruchungsfeldstärke größer ist als die Durchschlagfeldstärke des Isoliermaterials [24].

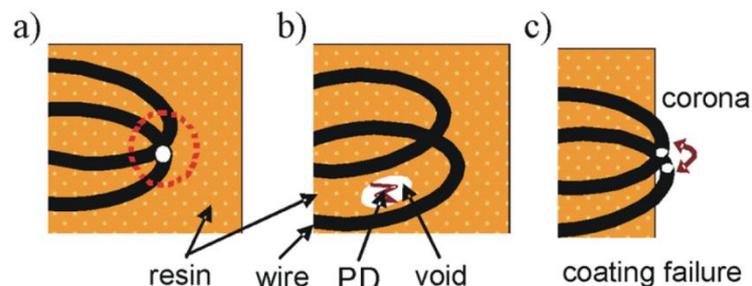
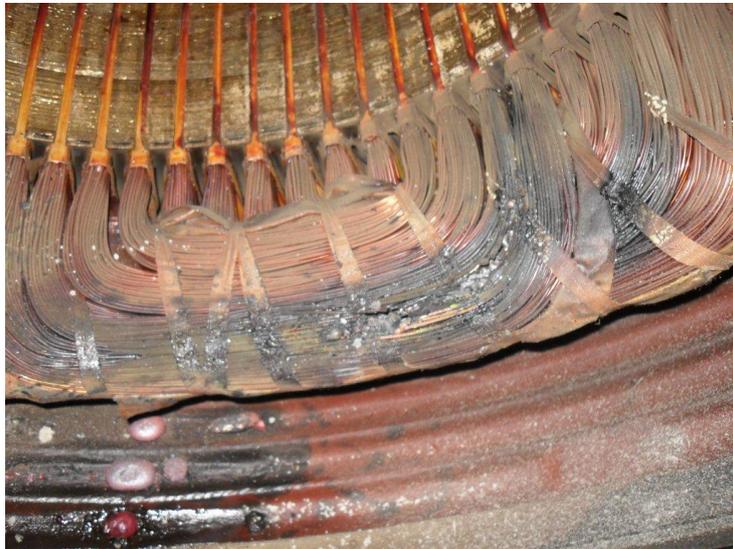


Abbildung 4.14 Windungsschlüsse aufgrund von TE [31]

Abbildung 4.14 gibt einen Überblick über die Fehler die aufgrund von Teilentladungen im Isolationsmaterial auftreten können.

- Zeigt einen Kurzschluss zwischen benachbarten lackisolierten Leitern
- Zeigt einen Hohlraum im Harz (resin) der sich aufgrund von TE über verästelte Kanäle (electrical treeing) fortsetzen kann und im Folgenden zu einem Windungsschluss führen kann.
- Zeigt äußere TE die aufgrund von Verletzungen an der Beschichtung (Lack) auftreten können.

Die TE-Beständigkeit von lackisolierten Drähten mit einer Harzimprägnierung ist schlechter als bei Hochspannungsisolierungen, welche als Barrieren Glimmer verwenden. Die Typ I Isolierung wird maximal bis zu einer Spannungsbeanspruchung von 700V (Effektivwert) verwendet.



**Abbildung 4.15** Windungsschluss eines Typ I Isoliersystems durch Teilentladungen. Quelle: mit freundlicher Genehmigung von Spalt Elektromechanik und –maschinenbau GmbH

#### 4.4.1 Verbesserung der Isolierung

Da bei der Typ I Isolierung laut [16] keine TE erwartet werden dürfen, ist es wichtig, die lackisolierten Drähte weitgehend teilentladungsresident auszuführen. Es gibt zwei Lösungsansätze, um das TE-Phänomen zu vermeiden. Der erste Ansatz ist teilentladungsbeständige Drahtisolierungen zu verwenden, der andere Weg ist die standard-lackisolierten Drähte in Verbindung mit TE-residenten Lacken zu verwenden. Solche Lacke sind aus einer Polymer Matrix aufgebaut, die anorganische Partikeln enthalten. In [32] ist die 2. Methode anhand von üblichen Einschichtlackisolierten Drähten (PEI Drähte) untersucht und analysiert worden, wobei der Lack mit Nano- bzw. Mikro-Siliziumdioxid-Teilchen versetzt war (PEI+SiO<sub>2</sub>).

Die Untersuchungen, die in [32] genau erläutert werden, haben gezeigt, dass Lacke mit Partikeln, deren Größenordnung im Nanomaßstab lag (durchschnittlich eine

Korngröße von 10nm) in Bezug auf die Teilentladungseinsetzspannung (PDIV) und die Lebensdauer gute Ergebnisse lieferten. Für Maschinen, die von Umrichtern gespeist werden, sind solche Lacke eine gute Alternative zur Verbesserung der Lebensdauer.

## 5 Teilentladungsdiagnostik in Umrichter betriebenen rotierenden elektrischen Maschinen

Um TE bei einer 50 Hz Wechselspannung zu detektieren, wird die konventionelle Teilentladungsmesstechnik nach DIN EN 60270 verwendet. Beim Betrieb einer Maschine an einem Frequenzumrichter entstehen sehr kurze Spannungsimpulse mit ebenfalls sehr kurzen Anstiegszeiten. In solch einem Fall kann die konventionelle Messmethode keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern, da sich umgebungsbedingte Störungen (die unter anderem durch den Frequenzumrichter selbst entstehen) dem Messsignal überlagern [33]. Sowohl akustische (zu geringer Abstand zwischen Nutz- und Störsignal aufgrund von Maschinen und Umrichtergeräuschen) als auch optische (aufgrund des geschlossenen Gehäuses ist die Wicklung nicht frei einsehbar) Verfahren sind nicht geeignet, um TE in der Isolierung kompletter Maschinenwicklungen zu detektieren [24].

### 5.1 Begriffsbestimmungen

Für die folgenden Ausführungen sind die in diesem Kapitel angeführten Begriffsbestimmungen und Definitionen relevant:

#### **Wiederkehrende Spannungsimpulse:**

*„Spannungsimpulse, die als Prüfspannung für die Bewertung von Schaltspannungen der Leistungselektronik mit einer Träger- oder eingepprägten Frequenz eingesetzt werden“ [1].*

#### **Wiederkehrende Teilentladungseinsetzspannung (RPDIV):**

*„niedrigste Spitze-Spitze-Impulsspannung, bei der mehr als fünf TE-Impulse bei zehn Spannungsimpulsen gleicher Polarität auftreten“ [1].*

#### **Wiederkehrende Teilentladungsaussetzspannung (RPDEV):**

*„höchste Spitze-Spitze-Impulsspannung, bei der weniger als fünf TE-Impulse bei zehn Spannungsimpulsen gleicher Polarität auftreten“ [1].*

#### **Impulsanstiegszeit:**

*„Zeit des Spannungsimpulses zwischen 0 % und 100 %“ [1]*

**Impulsabfallszeit:**

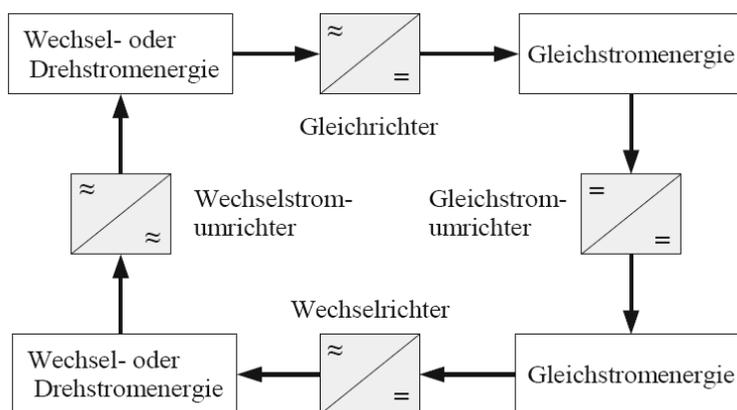
„Zeitabstand zwischen zwei Zeitpunkten innerhalb derer der Impuls von einem oberen Grenzwert auf einen unteren Grenzwert abfällt“ [1].

**Impulsbreite:**

„Zeitintervall zwischen dem ersten und dem letzten Zeitpunkt, bei denen der momentane Wert des Impulses einen festgelegten anteiligen Wert der Impulsamplitude oder eines festgelegten Schwellwertes erreicht“ [1].

**5.2 Leistungselektronik Stand der Technik**

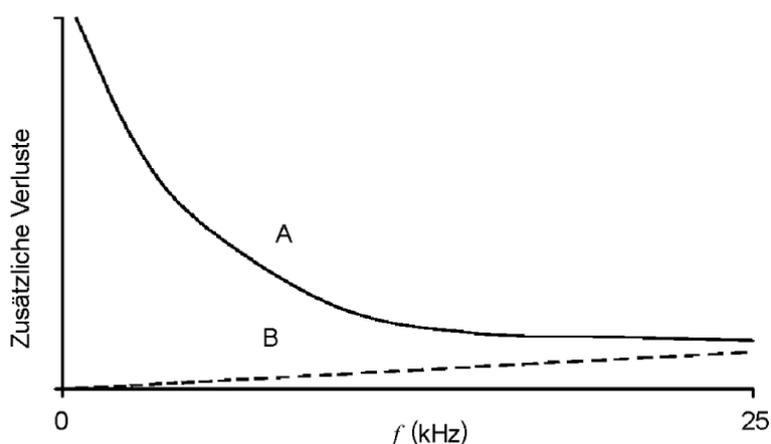
Die Leistungselektronik kann als Schlüsseltechnologie von mechatronischen Systemen gesehen werden. Sie hat die Aufgabe, die bereitgestellte elektrische Energie (Gleichspannung oder einphasige- bzw. mehrphasige Wechselspannung) in die vom Verbraucher benötigte Form möglichst verlustarm umzuformen (siehe Abbildung 5.1). Dabei wird ein großer Leistungsbereich abgedeckt (mW bis MW) [34].



**Abbildung 5.1 Grundfunktion der Stromrichtertechnik – Umformen von bereitgestellter elektrischer Energie [34]**

Durch die ansteigende Schaltleistung der Bauelemente kommt es zu immer kürzeren Schaltzeiten und damit zur möglichen Erhöhung der Schaltfrequenz, die oftmals gefordert wird, um zusätzliche Verluste in einem Motor zu minimieren. Allerdings steigen mit der Schaltfrequenz die Kommutierungsverluste im Umrichter selbst, folglich gibt es ein Optimum bei einigen kHz [35].

Abbildung 5.2 zeigt qualitativ einen deutlichen Abfall der Motorverluste (Kurve A) und die steigenden Umrichterverluste (Kurve B) mit zunehmender Schaltfrequenz des Umrichters.



**Abbildung 5.2 Auswirkungen der Schaltfrequenz  $f(\text{kHz})$  auf Motorverluste (Kurve A) und Umrichterverluste (Kurve B) [35]**

Durch Erhöhen der Schaltfrequenz kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung der Bauelemente durch elektrische und magnetische Felder und deren Abstrahlung nach außen. Auch die Abführung der elektrischen Verlustleistung durch effektiv arbeitende Kühlsysteme bestimmt die Leistungsfähigkeit von modernen leistungselektronischen Anlagen und Geräten [34].

Abbildung 5.3 zeigt einen Überblick über die derzeit eingesetzten Halbleiterschalter. In Kapitel 5.2.1 und in Kapitel 5.2.2 wird genauer auf den IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor) und den GTO (Gate Turn Off Thyristor) bzw. IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) und SGCT (Symmetric Gate Commutated Thyristor) eingegangen.

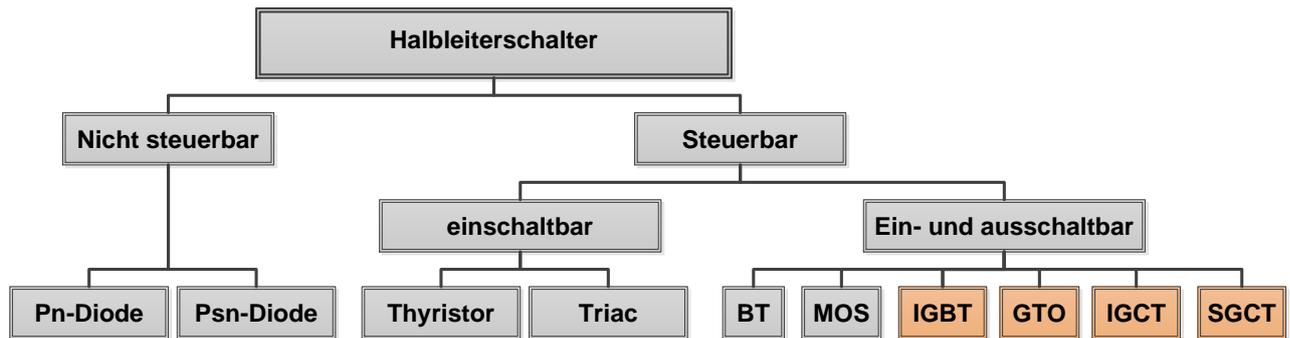


Abbildung 5.3 Übersicht über eingesetzte Halbleiterschalter, nach [34]

### 5.2.1 IGBT (Integrated Gate Bipolar Transistor)

Der IGBT verbindet die Vorteile des Feldeffekttransistors mit den Vorteilen des Bipolartransistors. Das bedeutet, dass der MOSFET im Ersatzschaltbild (Abbildung 5.4) den hochohmigen Eingangssteuerteil liefert und der Bipolartransistor für geringe Durchlassverluste sorgt [36] [37].

Der IGBT ist als Schalter konzipiert und setzt sich, wie im Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 5.4) ersichtlich, aus einem MOSFET ( $T_1$ ) und einem Bipolartransistor ( $T_2$ ) zusammen.

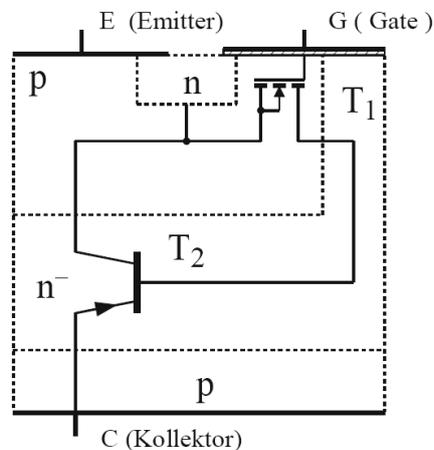


Abbildung 5.4 Vereinfachtes ESB eines IGBT [34]

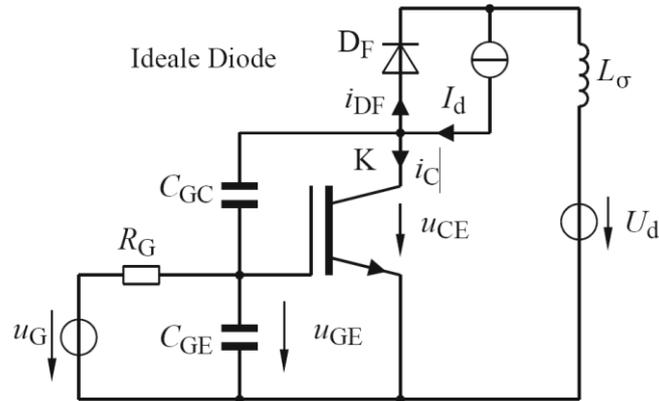


Abbildung 5.5 Ein- bzw. Ausschaltvorgang eines eingepprägten Stromes. Anfangszustand: Transistor ist ausgeschaltet und die Diode ist leitend [34]

**Einschaltvorgang:** Wird am Gate eine Spannung angelegt, schaltet  $T_1$  durch und verringert das Potential an der Basis des Bipolartransistors  $T_2$ . Daher kommt es zu einem Spannungsabfall zwischen der Basis von  $T_2$  und dem Kollektor C. Dieser Spannungsabfall (Kollektorpotential ist höher als das Potential an der Basis) bewirkt bei einem pnp-Transistor, dass dieser leitend wird und damit den IGBT einschaltet.

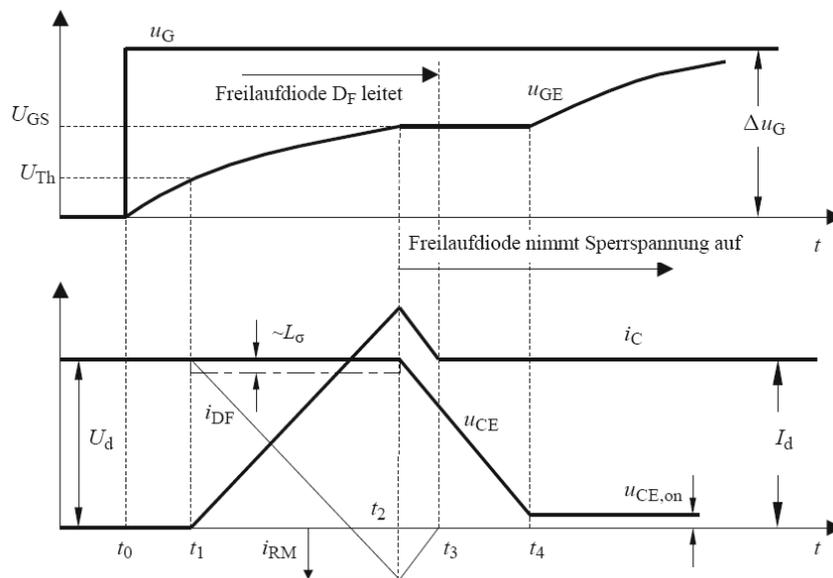


Abbildung 5.6 IGBT-Einschaltvorgang idealisiert betrachtet [34]

$t_0$ : Mit  $u_G$  wird das Gate des Transistors mit einem Spannungshub beaufschlagt.  $u_{GE}$  steigt von 0V mit der Zeitkonstante  $\tau_1$  an.

**t<sub>1</sub>:** Wenn  $u_{GE}$  die MOSFET-Threshold-Spannung  $U_{Th}$  erreicht, existiert ein leitfähiger Kanal und  $i_C$  steigt proportional zu  $u_{GE}$  an. Die Freilaufdiode leitet weiterhin, bis  $i_{DF}$  an den Transistor übergeben ist, und legt das Potential des Knoten K auf  $U_d$  fest. Am Transistor liegt nun die Spannung  $u_{CE}=U_d$  an.

**t<sub>2</sub>:**  $i_C$  erreicht sein Maximum.  $D_F$  kann jetzt über die Raumladungszone Sperrspannung aufnehmen und  $u_{CE}$  bricht zusammen.  $C_{GC}$  entladet sich und die Kapazität  $C_{GC}$  steigt an. Dies verzögert den weiteren Spannungsanstieg am Gate, so dass ungefähr  $u_{GE} \approx U_{GS}$  gilt.

**t<sub>3</sub>:** DF ist stromlos und  $i_C = i_d$ .

**t<sub>4</sub>:** Transistor ist durchgeschaltet und  $u_{CE}$  sinkt auf den Restwert  $U_{CE,on}$  [34].

**Ausschaltvorgang:** Das Gate wird auf Nullpotential geschaltet und damit geht die Leitfähigkeit des MOSFET verloren. Auch der Spannungsabfall zwischen Kollektor und Basis von T<sub>2</sub> verschwindet. T<sub>2</sub> beginnt zu sperren, dadurch ist der IGBT ausgeschaltet.

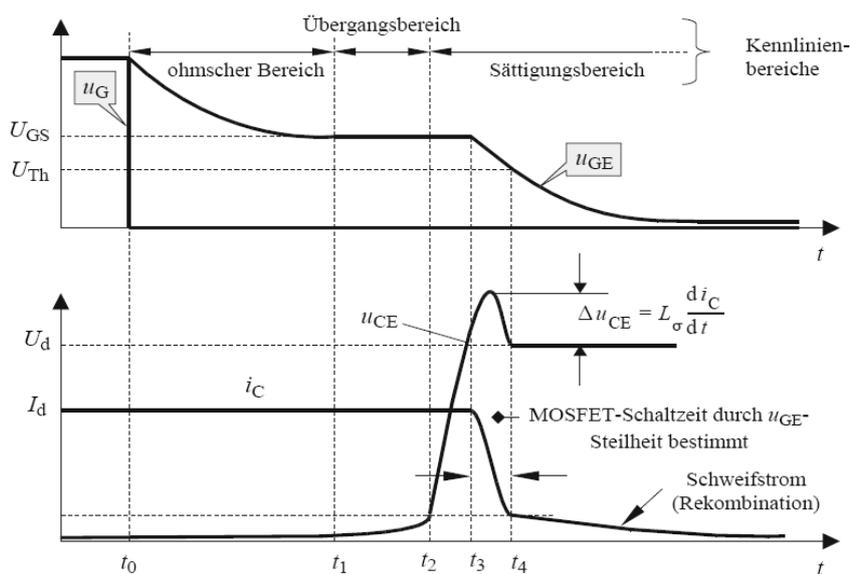


Abbildung 5.7 IGBT-Ausschaltvorgang idealisiert betrachtet [34]

**t<sub>0</sub>:**  $u_G$  wird auf 0V umgeschaltet und  $u_{GE}$  fällt mit der Zeitkonstante  $\tau_2$  ab.

**t<sub>1</sub>:**  $u_{GE}$  sinkt bis auf  $U_{GS}$ , ab diesem Zeitpunkt arbeitet der Transistor im Sättigungsbereich und  $u_{CE}$  steigt an.

**t<sub>2</sub>:** Bei eingepprägtem  $i_C$  steigt  $u_{CE}$  an und die Kapazität  $C_{GC}$  verringert sich. Der äußere Ladungsabfluss vom Gate kompensiert sich mit der durch den Kapazitätsabfall von  $C_{GC}$  im Gate frei werdenden Ladung und  $u_{GE} \approx U_{GS}$ .

**t<sub>3</sub>:**  $u_{CE}$  erreicht  $U_d$  und  $D_F$  wird in Durchlassrichtung betrieben.  $i_C$  fällt proportional zu  $u_{GE}$  und  $i_{DF}$  steigt an.

**t<sub>4</sub>:** MOSFET ist abgeschaltet und die restliche gespeicherte Ladung wird durch Rekombination abgebaut (Schweifstromphase) [34].

### 5.2.2 GTO (Gate Turn Off Thyristor) / IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) / SGCT (Symmetric Gate Commutated Thyristor)

Der GTO stellt eine Weiterentwicklung des einschaltbaren Thyristors dar [36].

**Einschaltvorgang:** Das Einschalten erfolgt nach demselben Prinzip wie bei dem gewöhnlichen Thyristor. Am Gate wird eine positive Spannung angelegt und der npn-Transistor wird leitend. Das bewirkt, dass an der Basis des pnp-Transistors das Potenzial absinkt, damit wird auch der pnp-Transistor leitend. Da nun beide Transistoren durchgeschaltet sind, stellen sie sich gegenseitig den benötigten Basisstrom zur Verfügung, sodass die am Gate angelegte Spannung nicht mehr notwendig ist.

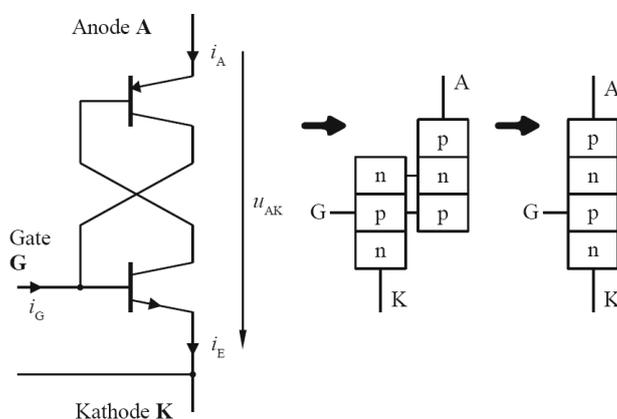


Abbildung 5.8 ESB eines Thyristors [34]

**Ausschaltvorgang:** Im Gegensatz zum Thyristor, der nur durch eine Unterschreitung des Haltestroms (kleinster möglicher Laststrom bei dem der Thyristor noch leitet) abgeschaltet werden kann, kann der GTO auch gateseitig definiert abgeschaltet werden. Die Hilfsspannungsquelle  $U_0$  liefert dem Gate einen negativen Strom. Dadurch werden die Ladungsträger aus dem Transistor  $T_2$  ausgeräumt und dieser beginnt zu sperren. Folglich wird auch der Basisstrom von  $T_1$  verringert und auch der Transistor beginnt zu sperren, womit wiederum eine Verringerung des Basisstromes  $T_1$  erreicht wird. Der GTO schaltet sich erst vollständig ab, wenn keine Basisströme mehr fließen.

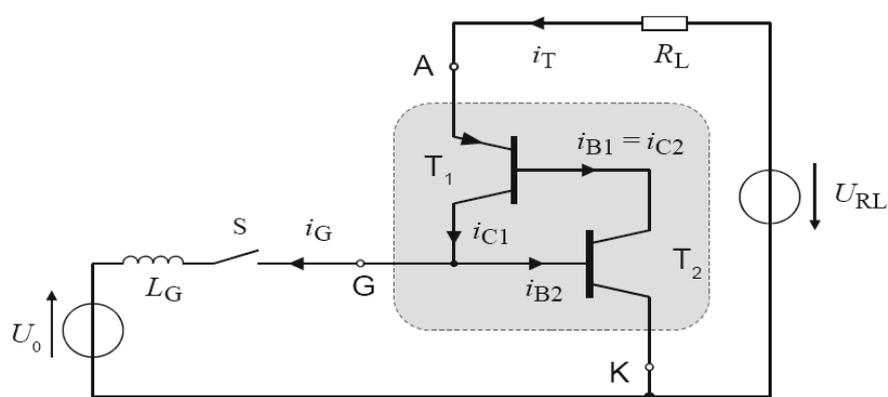


Abbildung 5.9 ESB zum Abschaltvorgang des GTO [34]

Der **IGCT** arbeitet nach dem Prinzip eines GTO und wurde aus diesem weiterentwickelt. Eine induktivitätsarme Ausführung der Gate Zuleitung ermöglicht einen Strom mit niedrigerer Anstiegszeit (steiler), der ein schnelleres Ausschalten herbeiführt und zusätzlich eine Optimierung der Siliziumdicke zulässt. Dadurch konnten Durchlass- und Schaltverluste im Vergleich zum GTO erheblich reduziert werden [34] [38]. Eingesetzt wird der IGCT meist in spannungsgeführten 3-Level-Wechselrichtern und bei Leistungen über 1 MW [36].

Auch der **SGCT** ist ein modifizierter GTO, der einen Gatetreiber integriert hat. Der Treiber wird dicht am SGCT angeordnet und gewährleistet so einen niederinduktiven Anschluss. Das ermöglicht eine effiziente und gleichmäßige Ansteuerung des Thyristors. Dadurch zeigt der SGCT im Vergleich zum GTO ein besseres Schaltverhalten. Der SGCT hat die gleichen Kennwerte wie der IGCT, was bedeutet, dass er ebenfalls nur geringe Leit- und Schaltverluste aufweist und eine geringe

Ausfallsrate besitzt. Jedoch kann der SGCT unidirektional arbeiten, was bedeutet, dass er sowohl in Sperr- wie auch in Blockierichtung Spannungen von bis zu 6,5 kV halten kann [39], [40].

Folgende Vorteile bringt nach [39] und [41] der Einsatz von SGCTs in Frequenzumrichtern:

- Einfacheres Design des Hilfskreises (engl. Snubber)
- Es können höhere Schaltfrequenzen erreicht werden
- Verbessertes Umrichterverhalten
- Reduzierung der Anzahl der Bauelemente, das erhöht die Zuverlässigkeit und verringert die Kosten und die Größe des Umrichters

### 5.2.3 Einteilung und Arten von Umrichtern

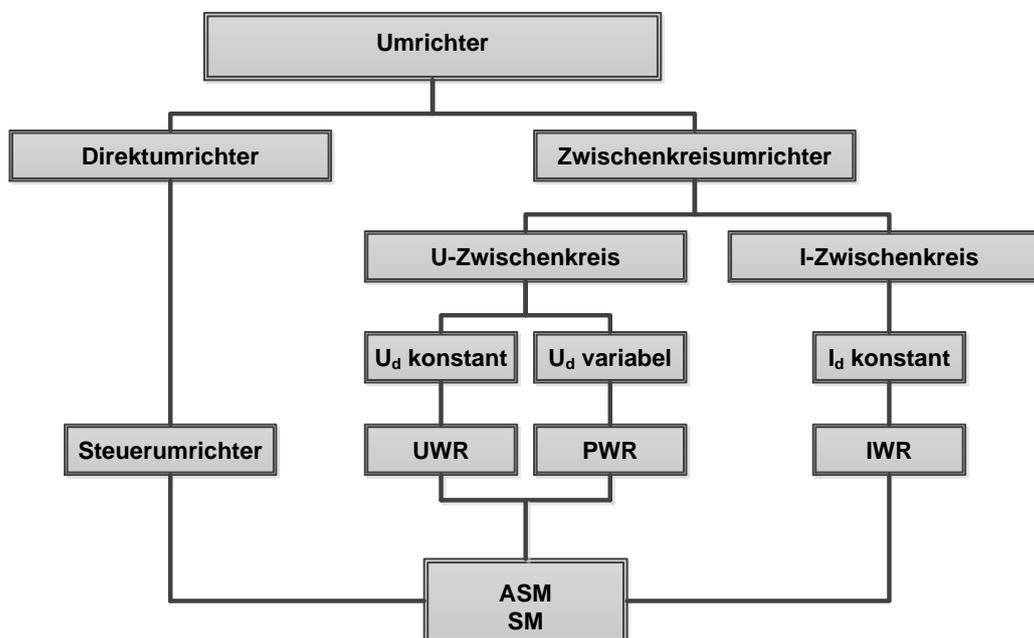


Abbildung 5.10 Umrichterarten Übersicht nach [34]

$U_d$  = Zwischenkreisspannung,  $I_d$  = Zwischenkreisstrom

Der Direktumrichter ist ein Umkehrstromrichter, der durch eine geeignete Steuerung als einphasiger Umrichter mit einer eingprägten Wechselspannung oder einem eingprägten Wechselstrom betrieben werden kann. Er ist ein Umrichter ohne Zwischenkreis (welcher als Energiespeicher fungiert). Grundsätzlich gibt es zwei

Arten von Direktumrichtern, den Trapezumrichter und den Steuerumrichter. Beim Trapezumrichter ist die Ausgangsspannung durch die volle Aussteuerbarkeit der Ventile vorgegeben und ist trapezförmig. Die Ausgangsfrequenz ist nur in festen Stufen verstellbar. Beim Steuerumrichter sind die Steuerwinkel frei einstellbar und es können beliebige Frequenzen erreicht werden [42].

Der Ausdruck Frequenzumrichter (FU) ist der Überbegriff für ein Stromrichtersystem, das aus Eingangstromrichter (ESR), Zwischenkreis (ZK) und Ausgangswechselrichter (WR) besteht und alle erforderliche Steuer-, Regel- und Kommunikationseinrichtungen enthält. Es gibt drei unterschiedliche Arten von Frequenzumrichtern (siehe Abbildung 5.11) [34]:

- Stromzwischenkreisumrichter mit Blocktaktung (IWR),
- Spannungszwischenkreisumrichter mit Blocktaktung (UWR)
- Spannungszwischenkreisumrichter mit Pulsbreitensteuerung (PWR)

Der in der Praxis weltweit am häufigsten eingesetzte Frequenzumrichter ist der PWR, jedoch gibt es auch noch für den IWR Einsatzgebiete, beispielsweise bei Synchronmaschinenantrieben im höchsten Leistungsbereich, weil er vergleichsweise geringe Schaltverluste aufweist [34], [24].

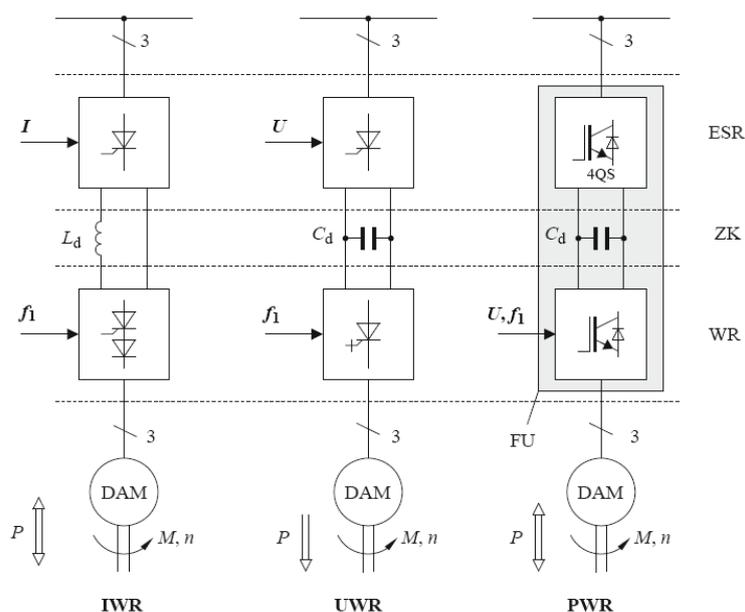


Abbildung 5.11 Aufbau der verschiedenen Frequenzumrichter [34]

### 5.3 Auswirkungen auf die elektrische Maschinenisolation aufgrund von Umrichterimpulsen

Das Isolationssystem von Umrichter betriebenen rotierenden elektrischen Maschinen wird aufgrund von den immer auftretenden schnellen, sich wiederholenden Schaltimpulsen erheblich beansprucht (Wiederholungsrate: bis zu 100 kHz). Pulsweitenmodulierte Umrichter mit einem Gleichspannungszwischenkreis (U-Umrichter) sind die vor allem bei Niederspannungsmotoren am häufigsten eingesetzten Umrichter, um elektrische Maschinen zu speisen und diese drehzahlvariabel betreiben zu können. Ein U-Umrichter erzeugt rechteckige Spannungsimpulse in einer festen Spannungshöhe. Durch eine geeignete Steuerung der Pulsbreite kann daraus ein näherungsweise sinusförmiger Motorstrom erzielt werden. Durch Pufferung der Zwischenkreisspannung, die als konstant angenommen werden kann, werden der Eingangsgleichrichter und der Ausgangswechselrichter entkoppelt. Der Ausgangswechselrichter erzeugt mit Hilfe von leistungselektronischer Schalter (GTO, IGBT etc.) aus der Zwischenkreisspannung Spannungsimpulse mit einer konstanten Amplitude und veränderlicher Pulsbreite und Pulsfrequenz (Abbildung 5.12) [24], [43], [35].

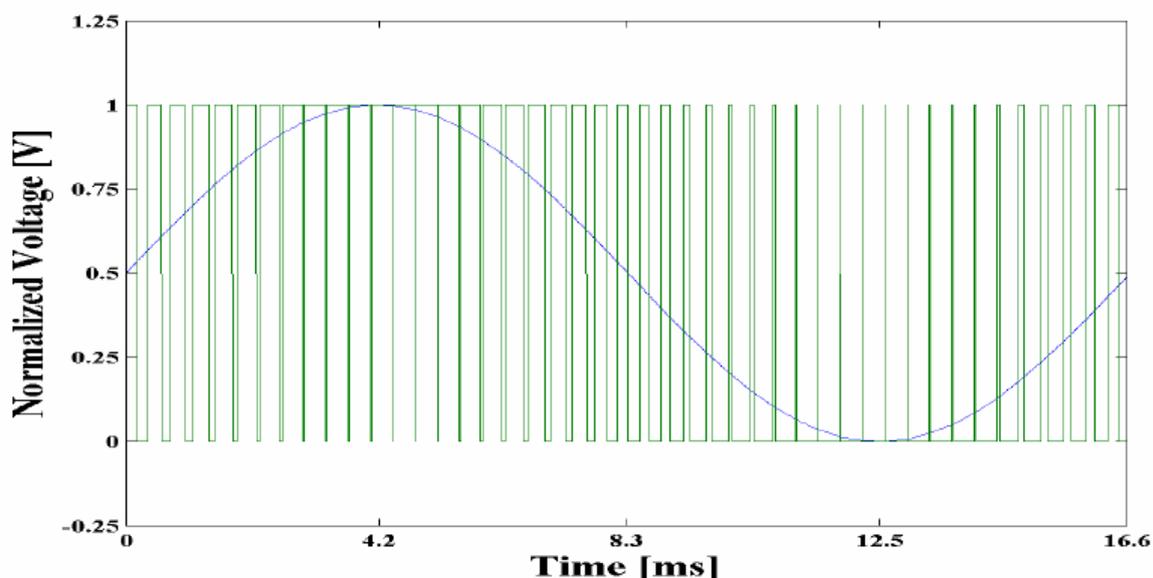
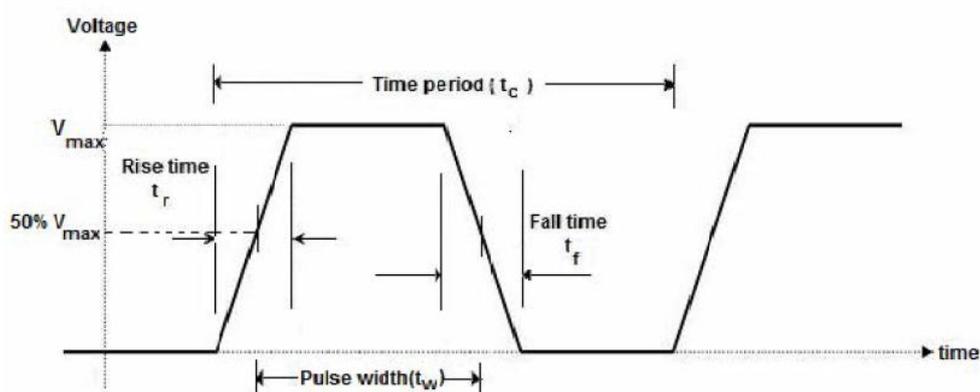


Abbildung 5.12 Beispiel einer PWM mit 2,5 kHz Pulsfrequenz um einen 60 Hz Sinus zu modulieren [44]

Abbildung 5.13 zeigt eine Rechteckimpulsspannung und beschreibt übersichtlich deren Parameter, wie Anstiegszeit, Abfallzeit, Pulsweite und Periodendauer.



**Abbildung 5.13 Rechteckimpulsspannung und deren Parameter: Anstiegszeit  $t_r$ , Abfallzeit  $t_f$ , Pulsweite  $t_w$  und Periodendauer  $t_c$  [44]**

Folgende Eigenschaften der Impulse wirken sich wie in [31], [45], [46] und [47] beschrieben nachteilig auf die Maschinenisolierung aus:

- Schnelle Anstiegszeit  $t_r$  der Impulse (hohes  $dU/dt$ )
- Kurze Impulsdauer
- Schnelle Wiederholungsrate der Impulse
- Überspannungen, die aufgrund der schnell wiederkehrenden Impulse entstehen (Schalten einer Induktivität).

Das Schalten ist eine der wichtigsten Aufgaben der Leistungselektronik, die sich aus der Regelungstechnik und der Halbleitertechnologie entwickelt hat [1]. Der IGBT wird im Allgemeinen in Spannungsumrichtern, die für hohe Leistungen und hohe Spannungen ausgelegt sind, verwendet. Sie können mit Spannungen zwischen 3,3 bis 6,5 kV und Strömen bis ungefähr 1 kA arbeiten [48]. Die Schaltzeit von IGBT's erreicht Werte, die unterhalb von  $\mu s$  liegen. Diese kurzen Anstiegszeiten ( $dU/dt$ ) können zu transienten Überspannungen oder Wanderwellen in einem Isolationssystem führen [49]. Wenn diese impulsförmige Spannung (siehe Abbildung 5.15) so hoch wird, dass die Durchschlagsfestigkeit einer Luftfunkenstrecke erreicht wird, können TE auftreten. Durch die PWM wiederholen sich diese Spannungsimpulse. Da Teilentladungen, zu einer signifikanten Verschlechterung der

elektrischen Isolierung beitragen können, ist es von Bedeutung diese mit verlässlichen Messsystemen messen zu können [1].

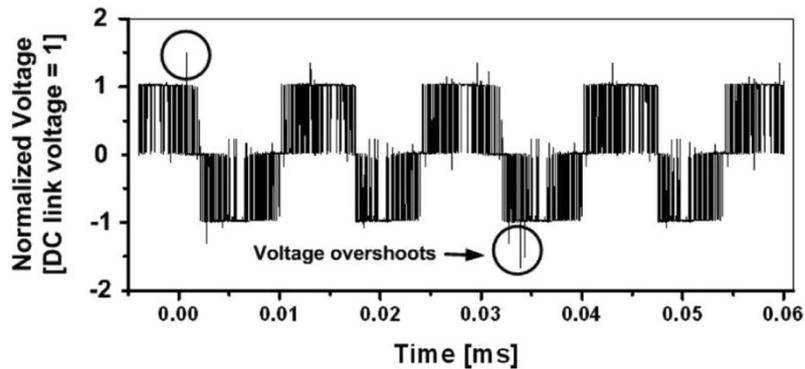


Abbildung 5.14 Gemessene Kurvenform mit Überspannungen, die an Motorklemmen gemessen wurde, verursacht durch einen PWM-Spannungswischenkreisumrichter [48]

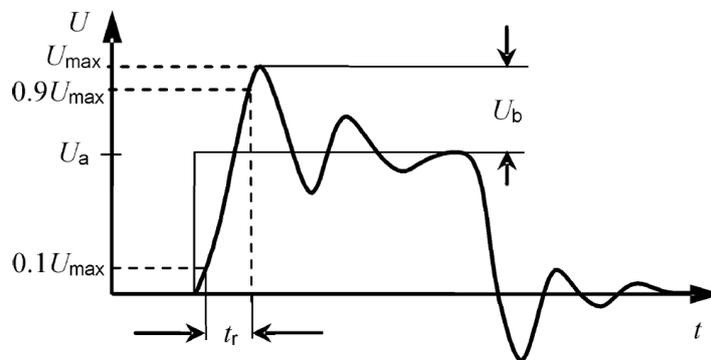


Abbildung 5.15 Spannungsimpuls und dessen Parameter nach [31]

U <sub>max</sub>	.....	Höchster Wert der Überspannung
U <sub>a</sub>	.....	Wert der Dauerbetriebsimpulsspannung
t <sub>r</sub>	.....	Anstiegszeit
U <sub>b</sub>	.....	Überschwingen

Die mittlere Änderungsrate der Spannung (dU/dt) lässt sich in Bezug auf Abbildung 5.15, wie in Formel 5-1 gezeigt berechnen:

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{max} = \frac{0,9 \cdot U_{max} - 0,1 \cdot U_{max}}{t_r}$$

Formel 5-1 Mittlere Änderungsrate der Spannung [31]

### 5.3.1 Beanspruchungskategorien und Spannungsmerkmale für Isoliersysteme des Typ I und des Typ II bei Umrichterbetrieb

Der erwartete Spannungswert, welcher voraussichtlich an den Motorklemmen auftreten wird, sollte bekannt sein.

Tabelle 5-1 zeigt den Umfang der Beanspruchung eines Typ I Isoliersystems, wenn es mit verschiedene Wellenformen des Umrichters belastet wird. Eine Kombination aus Anstiegszeit und des stattfindenden Sprunges kann für das Isoliersystem kritisch werden [16].

**Tabelle 5-1 Einfluss der Spannungsmerkmale an den Maschinenanschlussklemmen auf die Bestandteile eines Isoliersystems des Typ I [16]**

Komponenten der Isolierung	Grundfrequenz	Impulsfolgefrequenz	Scheitel/Scheitel-Impulsspannung (Grundfrequenz)	Sprungspannung	Scheitel/Scheitel-Impulsspannung (Impulsfrequenz)	Impulsanstiegszeit
Isolierung zwischen den Windungen	○	○	○	●	○	●
Hauptisolierung	○	○	●	○	●	○
Isolierung zwischen den Außenleitern	○	○	●	○	●	○
● mehr wichtig    ○ weniger wichtig						

In Tabelle 5-2 sind die Parameter angegeben, die bei der Beanspruchung eines Isoliersystems des Typ II für die Alterung ausschlaggebend sind. Für die Auslegung ist die Tatsache, dass die Hauptisolierung und der Enden- und Außenglimmschutz durch die Höhe der Überschwingspannung  $U_b$ , die Spannungsanstiegsgeschwindigkeit und der Impuls-Wiederholrate beeinflusst wird, von Bedeutung. Wenn die Impulsanstiegszeit verringert wird, steigt die Spannungsbeanspruchung an der Isolierung von benachbarten Windungen [17].

**Tabelle 5-2 Einfluss der Parameter der Umrichterspannung auf die Alterung von Komponenten in einem Typ II Isoliersystem nach [17]**

Komponenten der Isolierung	Grundfrequenz	Impuls- Wiederhol- frequenz	Scheitel-zu- Scheitel- Spannung bei Grundfrequenz	Sprungspannung	Scheitel-zu- Scheitel- Spannung bei Impuls-Wiederhol- frequenz	Impulsanstiegs- zeit
<b>Windungs- isolierung</b>	○	●	○	●	○	●
<b>Haupt- isolierung</b>	●	○	●	○	○	○
<b>Nutteil- und Endenglimm- schutz</b>	○	●	●	●	●	●
● mehr wichtig    ○ weniger wichtig						

### 5.3.2 Isolationsprobleme von Typ II Isolationssystemen unter Impulsspannungsbedingungen

In [48] wurde experimentell die Hauptisolierung von Stator-Stäben auf thermische Einflüsse und Teilentladungsvorkommen bei impulsförmiger Spannungsbeanspruchung untersucht. Die Isolierung wurde bis zum endgültigen Zusammenbruch thermisch und elektrisch untersucht.

Getestet wurde bei impulsförmiger Beanspruchung (bei 4, 5, 6 kV / 0,5; 1,5; 3 kHz / 23, 120, 155 °C) und bei sinusförmiger 60 Hz Kurvenform zum Vergleich.

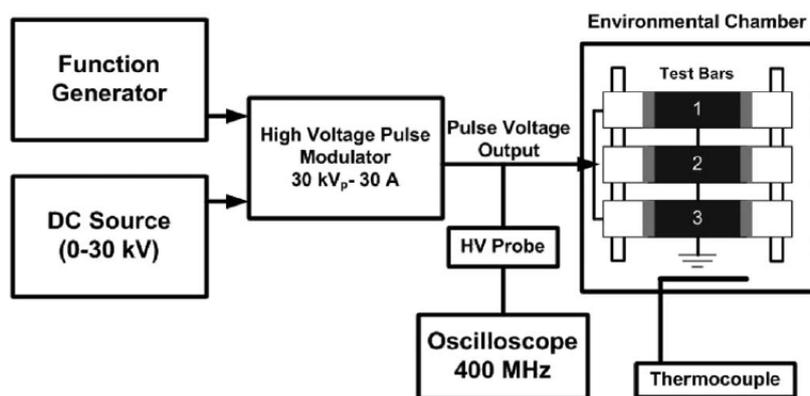


Abbildung 5.16 Schematischer Aufbau des Messkreises für den Impuls-Dauerversuch [48]

Folgende Ergebnisse lieferte die experimentelle Untersuchung von den Stator Stäben des Typ II Isoliersystems:

- In umrichterbetriebenen Motoren können an der Oberfläche der Hauptisolierung sogenannte „Hotspots“ entstehen. Durchschnittlich ist die Temperatur bei 1kHz Schaltfrequenz um ungefähr 10°C höher als bei normaler sinusförmiger Beanspruchung und steigt gleichmäßig bei Erhöhung der Schaltfrequenz in 1 kHz-Schritten.

Abbildung 5.17 veranschaulicht den gleichmäßigen Temperaturanstieg bei gleichzeitiger Erhöhung der Schaltfrequenz.

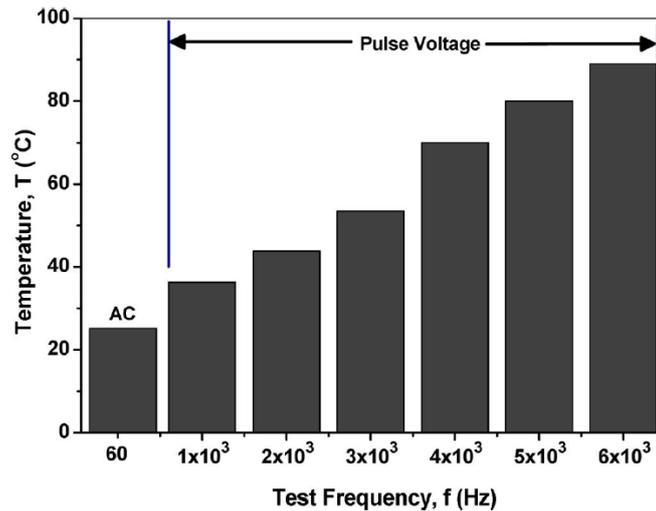


Abbildung 5.17 Temperaturanstieg bezogen auf die Schaltfrequenz, nach [48]

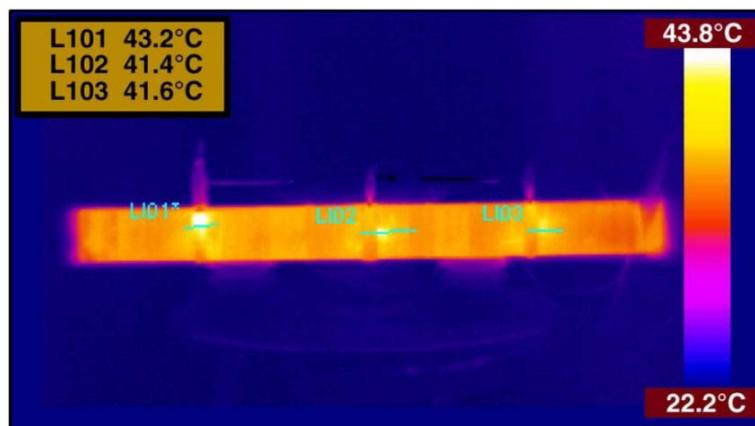


Abbildung 5.18 Identifizierte Hotspots bei 3,5 kV / 3 kHz Impulsen [48]

- Bei Beaufschlagung des Testobjektes mit einer impulsförmigen Spannung konnte gezeigt werden, dass die Isolierung des Prüflings deutlich schneller degenerierte als im Vergleich zur sinusförmigen Spannung [48].

Abbildung 5.19 zeigt die Teilentladungseinsetzspannung (PDIV) bei unterschiedlichen Alterungszuständen bis zum endgültigen Zusammenbruch der Isolierung.

In Abbildung 5.20 sind die Teilentladungsimpulse bei unterschiedlichen Alterungszuständen aufgelistet. Daraus kann man ersehen, dass Teilentladungsaktivität und beschleunigte Alterung des Testobjektes eindeutig korrelieren.

60 Hz ac aging, 5 kV peak		3 kHz pulse aging, 5 kV peak	
Time (h)	PDIV	Time (h)	PDIV
0	3.1	0	3.1
50	3.0	50	2.9
75	2.9	75	2.6
100	2.9	100	2.4
125	2.9	125	2.2
150	2.8	Specimen failed	
200	2.6	-	-
225	2.4	-	-
Specimen failed		-	-

Abbildung 5.19 PDIV Höhe für unterschiedliche Bedingungen [48]

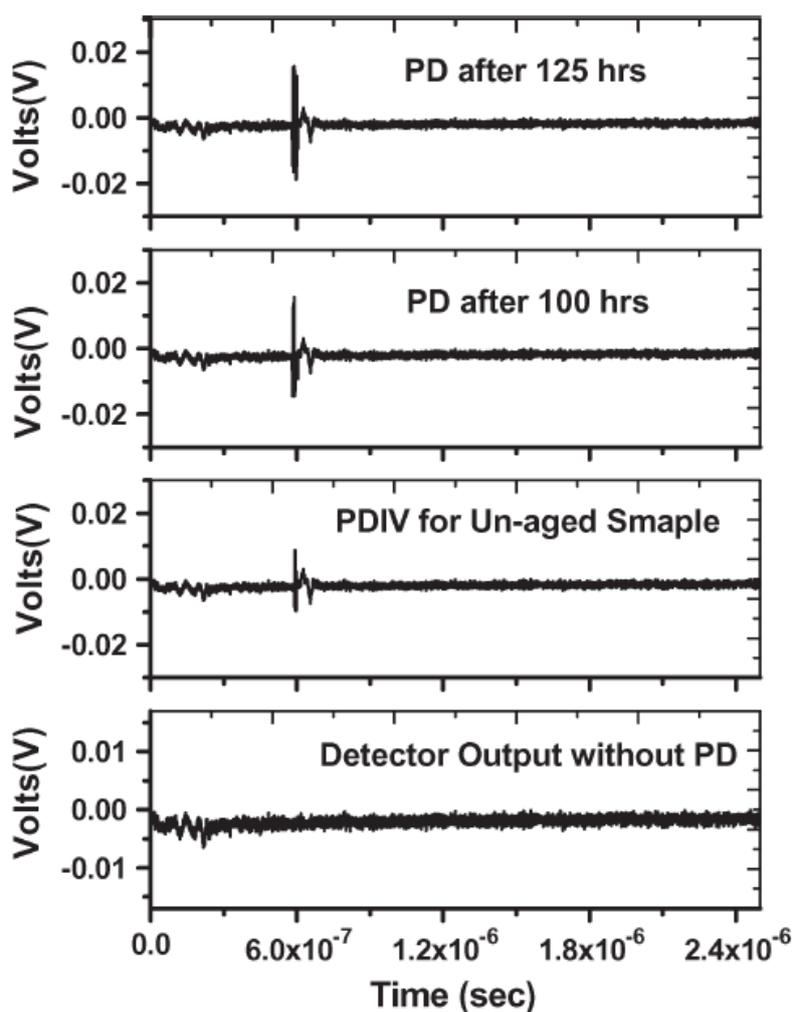


Abbildung 5.20 Teilentladungsimpulse in der Hauptisolierung bei 5kV / 3kHz bei Raumtemperatur [48]

- Bei einem Langzeitalterungstest bei Raumtemperatur stellte sich heraus, dass im Vergleich zur normalen sinusförmigen 60 Hz Spannung der Prüfling eine um ca. 58% verkürzte Lebensdauer hat, wenn er mit impulsförmiger Spannung belastet wird. Wird der Prüfling jedoch gekühlt (Wasser-Kühlung und Klimakammer) konnte festgestellt werden, dass die Lebensdauer des Prüflings, der mit impulsförmiger Spannung belastet wurde, im Vergleich zur AC 60 Hz Spannung nur um ca. 31 % reduziert wurde [48].

Abbildung 5.21 zeigt wie die Lebensdauer der Isolierung im Vergleich zur sinusförmigen Spannung bei verschiedenen Schaltfrequenzen herabgesetzt wird.

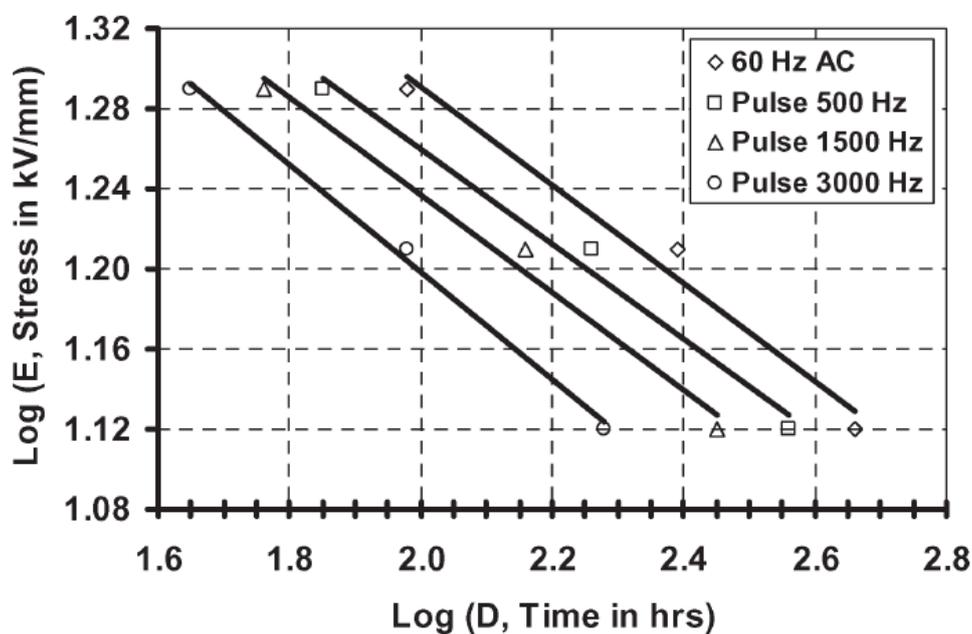
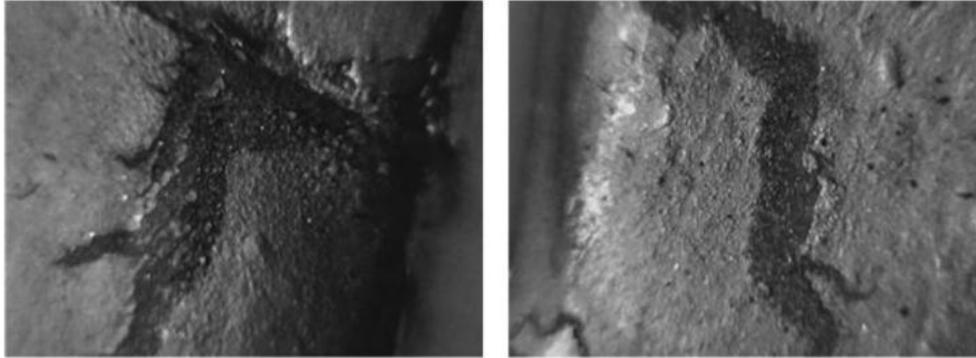


Abbildung 5.21 Zusammenhang zwischen Beanspruchungsdauer und elektrischer Beanspruchung bei verschiedenen Schaltfrequenzen [48]

- Durch Beaufschlagung mit einer Impulsspannung wird der Alterungsprozess durch die hohe thermische und elektrische Beanspruchung, beschleunigt. Dazu treten noch Ablösungen der Isolation, Hohlrumbildungen und horizontale Rissbildungen auf [48].



**Abbildung 5.22 Beschädigte Stellen der Hauptisolierung von Stator-Stäben, nach Beaufschlagung mit Impulsspannung [48]**

- Weiters hat diese Versuchsreihe gezeigt, dass es in Zukunft notwendig werden wird, die Isolation in Bezug auf thermische und elektrische Belastung bei hohen Frequenzen zu verbessern und Materialien und Verfahren zu finden, die der Belastung durch die sich immer schneller entwickelnde Stromrichtertechnik besser standhalten können [48].

#### **5.4 Teilentladungsdiagnoseverfahren nach IEC/TS 61934**

Die IEC/TS 61934 ist eine technische Spezifikation, um Teilentladungen in Isoliersystemen offline elektrisch messen zu können, die in Verbindung mit sich wiederholenden schnell ansteigenden Spannungsimpulsen auftreten. Diese Spannungsimpulse werden von leistungselektronischen Einrichtungen generiert. Typische Anwendungen sind z.B.: Motoren, Drosselspulen oder Windkraftgeneratoren [1].

Folgende Messgrößen sind relevant:

- Wiederkehrende TE-Einsatzspannung (RPDIV)
- Wiederkehrende TE-Aussetzspannung (RPDEV)
- Höchste Teilentladungsgröße
- TE-Impulswiederholungsrate

Die Versorgung wird mittels eines Impulsgenerators realisiert. Der Impulsgenerator muss repetierende Spannungsimpulse mit niedrigem Störpegel erzeugen. Zusätzlich ist die Polarität der Impulse für das TE-Verhalten ein beeinflussender Faktor. Bevorzugt sollten Impulsgeneratoren eingesetzt werden, welche wiederholende, bipolare Impulse erzeugen, da bipolare Impulse die Beanspruchung der PWM

Spannungssteuerung in geeigneter Weise darstellen können (alternativ können auch Impulsgeneratoren eingesetzt werden, die unipolare Impulse erzeugen). Der Impulsgenerator sollte, entsprechend elektromagnetisch geschirmt sein, um Störungen zu unterdrücken. Die Beschreibung des Impulsgenerators muss folgende Parameter enthalten [1]:

- Impulsanstiegszeit
- Impulsspannungspolarität
- Impulsspannungswiederholrate
- Impulsbreite
- Impulszyklus

**Tabelle 5-3 Beispiele der Parameterwerte für impulsförmige Spannungen ohne Belastung [1]**

Parameter	Bereich
Anstiegszeit	0,04 bis 1 $\mu$ s
Wiederholrate	1 bis 1000 Hz
Impulsdauer	0,08 bis 25 $\mu$ s
Form	Rechteckig oder dreieckig
Polarität	Bevorzugt bipolar oder unipolar

Die Form des Impulses ist nicht nur von den Eigenschaften des Impulsgenerators sondern auch von der Impedanz des Prüfobjekts abhängig, da durch die Last die Impulsform beeinflusst wird. Wenn die Kapazität des Prüfobjekts erhöht wird, steigt auch die Anstiegszeit der Impulsspannung. Induktive Prüfobjekte (z.B.: Stator- und Rotorwicklungen) oder solche mit verteilten Impedanzen (z.B.: Windungsisolierung von Stator- und Rotorwicklungen) können zusätzlich zu den gedämpften Schwingungen zu einer Änderung der Anstiegszeit der Impulsspannung beitragen. Deshalb sollte der Impuls und der TE-Impuls über den ganzen Zeitraum der TE-Messung mit einem Breitbandoszilloskop überwacht werden.

Es gibt verschiedene Einflussgrößen, die die TE-Erscheinungen erheblich beeinflussen können. Abbildung 5.23 stellt nach [1] einen Überblick der Einflüsse, die in die Teilentladungsmessung mit eingehen können dar.

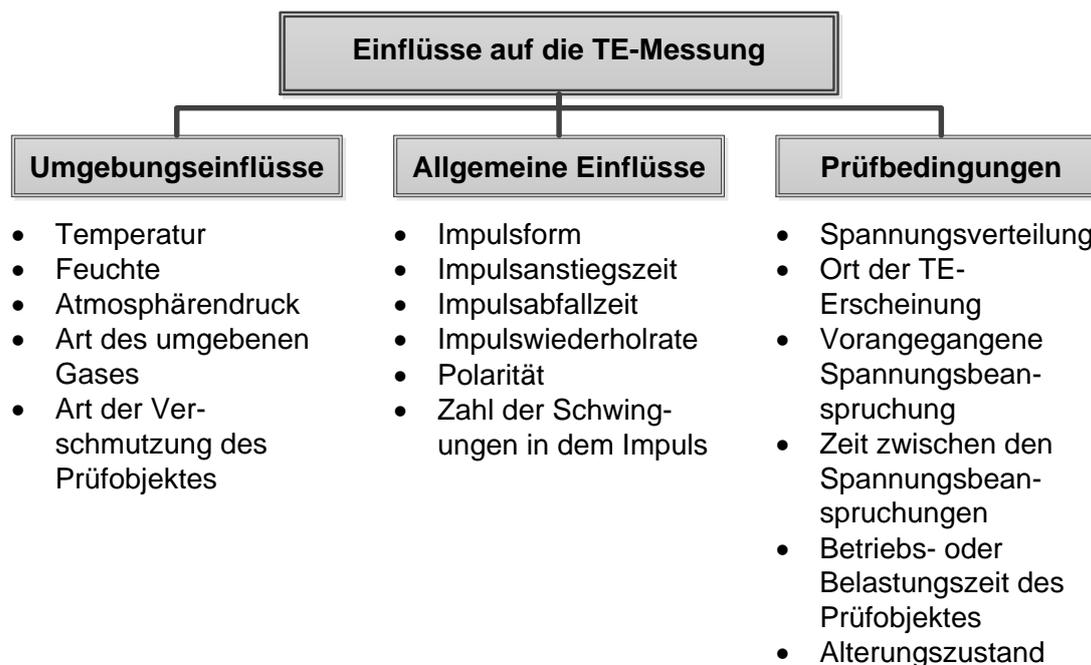


Abbildung 5.23 Einflussgrößen auf die TE-Messung nach [1]

#### 5.4.1 TE-Detektionsverfahren

Da das Prüfobjekt mit Spannungsimpulsen beansprucht wird, ist eine starke Unterdrückung des eingepprägten Spannungsimpulses aber eine vernachlässigbare Unterdrückung des TE-Impulses durch das TE-Messsystem notwendig. Diese Unterdrückung ist deshalb zielführend, da sich der erzeugte Spannungsimpuls dem TE-Impuls überlagern und zu einer Verfälschung des Messergebnisses führen kann. Das bedeutet, dass die Teilentladungsimpulse nach der Verarbeitung größer sein müssen als die übertragenen verbleibenden Spannungsimpulse. Je höher die Amplitude der Impulsspannung, desto stärker muss die Unterdrückung sein. Ähnliches gilt für größere Anstiegszeiten. Durch geeignete Filtertechnik kann die Impulsspannung in Abhängigkeit der Spannungshöhe und der Anstiegszeit erfolgreich unterdrückt werden. Die Grenzfrequenz sollte so gewählt werden, dass nach der Filterung das TE-Signal das Signal des Spannungsimpulses übersteigt. Am besten geeignet dafür ist ein breitbandiger Detektor [1].

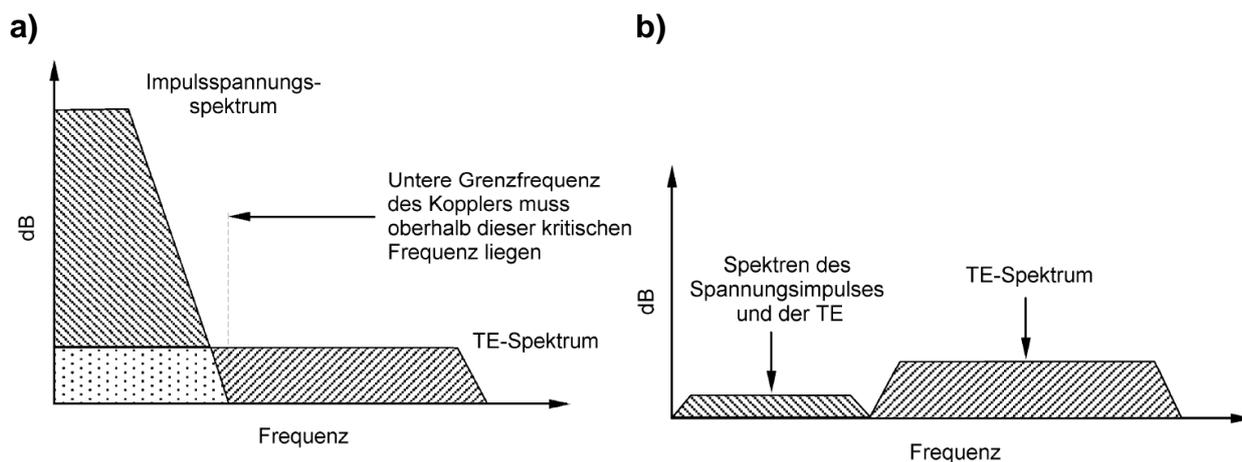


Abbildung 5.24 a) Überlappung der Frequenzspektren b) Frequenzspektrum nach der Filterung aus [1]

Zur Auskopplung des TE-Signals können entweder Hochspannungskondensatoren, Hochfrequenzwandler (HFCT) oder elektromagnetische Koppler (z.B. Antennen) verwendet werden. Die Impulsversorgung muss so nahe wie möglich am Prüfobjekt positioniert werden, um Impulsverformungen und -abschwächungen zu vermeiden (Kabellänge darf max. 1m betragen) [1].

#### 5.4.1.1 Koppelkondensator mit mehrpoligem Filter

Der Koppelkondensator muss eine Spannungsfestigkeit, die höher als die Spannung des zu erwartenden Impulses ist, aufweisen. Er kann gemeinsam mit einem mehrpoligen Filter verwendet werden. Das Filter kann ein passives oder ein aktives Filter sein, der die Aufgaben übernimmt, die Spannungsimpulse zu dämpfen und eine Überkopplung des Eingangs- zum Ausgangssignal zu vermeiden. Der Koppelkondensator liegt dabei auf der hochspannungsführenden Klemme [1].

Abbildung 5.25 zeigt den schematischen Messaufbau, während Abbildung 5.26 das Frequenzspektrum der Spannungsimpulse und TE-Impulse vor und nach der Filterung darstellt.

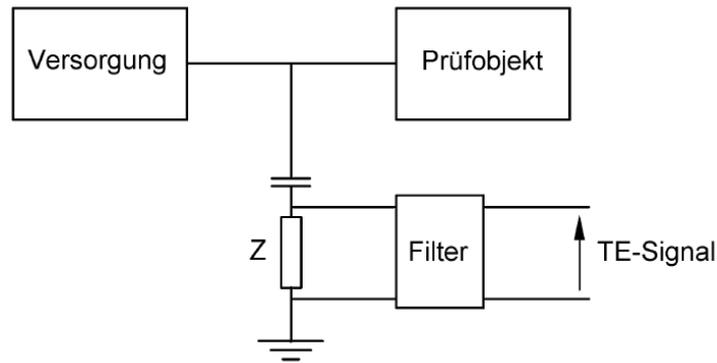


Abbildung 5.25 Koppelkondensator mit mehrpoligem Filter [1]

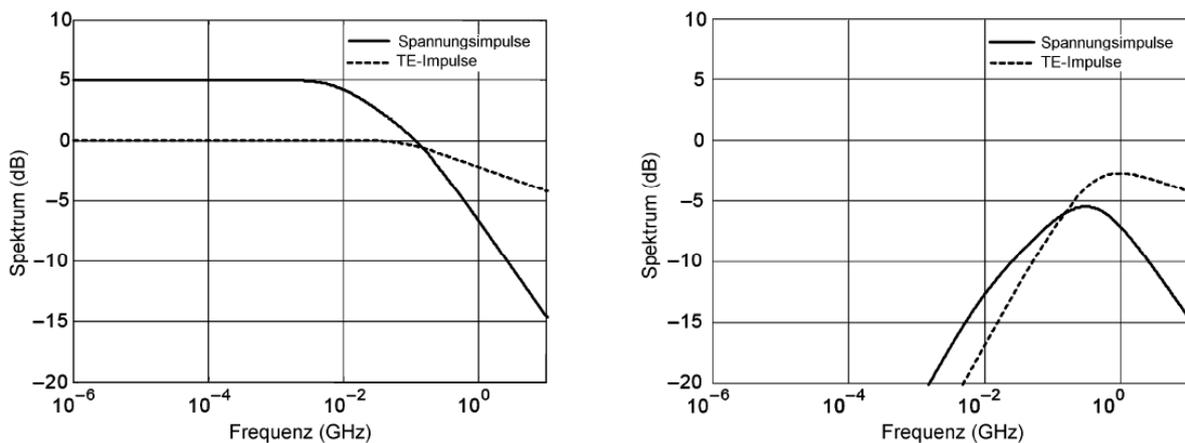


Abbildung 5.26 Frequenzspektren vor und nach der Filterung [1]

#### 5.4.1.2 HFCT mit mehrpoligem Filter

Ein HFCT kann ebenfalls mit einem Filter benutzt werden. Es ist zu beachten, dass der HFCT eine höhere Grenzfrequenz als die Frequenz des Spannungsimpulses haben muss. Er kann entweder am Hochspannungskabel zwischen der Impulsversorgung und dem Prüfobjekt angeschlossen (siehe Abbildung 5.27 wobei eine ausreichend elektrische Isolierung gefordert ist) oder aber auch zwischen Prüfobjekt und Erde (siehe Abbildung 5.28) angebracht werden. Der zuletzt genannte Aufbau ist nur dann zu verwenden, wenn die metallische Kapselung des Prüfobjekts von der Erde isoliert werden kann [1].

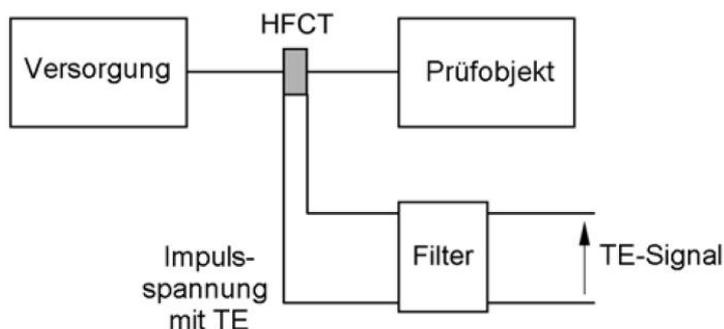


Abbildung 5.27 HFCT zwischen Prüfobjekt und Spannungsversorgung [1]

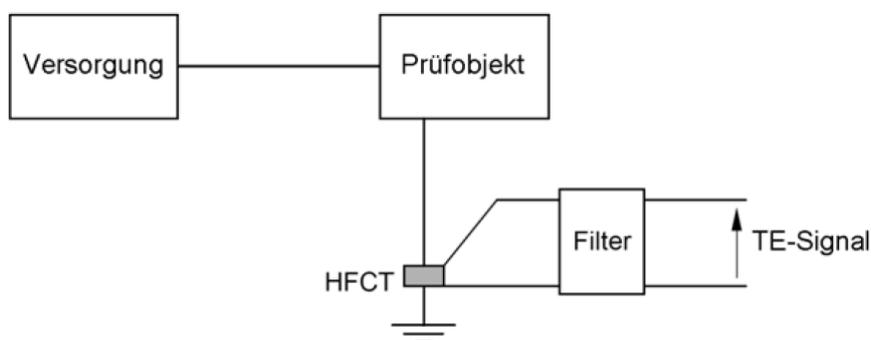
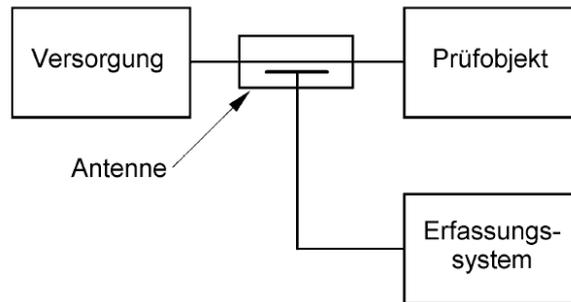


Abbildung 5.28 HFCT zwischen Prüfobjekt und Erde [1]

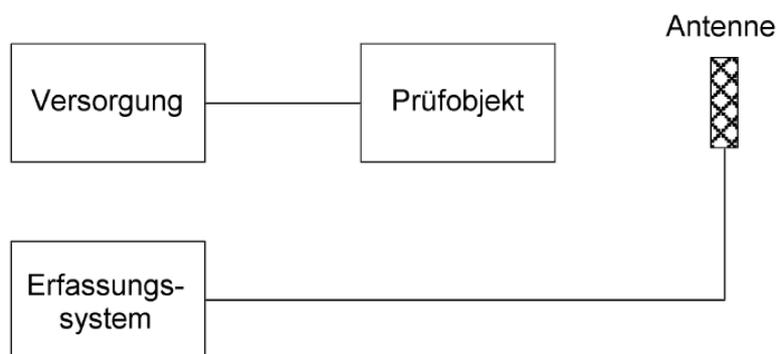
#### 5.4.1.3 Elektromagnetische Richtkoppler

Sie können zur Trennung von Versorgungsimpulsen und TE-Impulsen, die im Prüfobjekt erzeugt werden verwendet werden. Ein UWB-Richtkoppler (engl. Ultra Wide Band) kann ein TE-Signal mit impulsförmigen Störern detektieren, allerdings sollte die Impulsspannung unterdrückt werden. Dies lässt sich mit elektromagnetischen Nahfelddetektoren mit fester Koppelimpedanz (Verbindung von Prüfobjekt und Versorgung) realisieren [1].



**Abbildung 5.29 Prüfkreis mit Richtkoppler (Antenne) zur Unterdrückung von den Versorgungsimpulsen [1]**

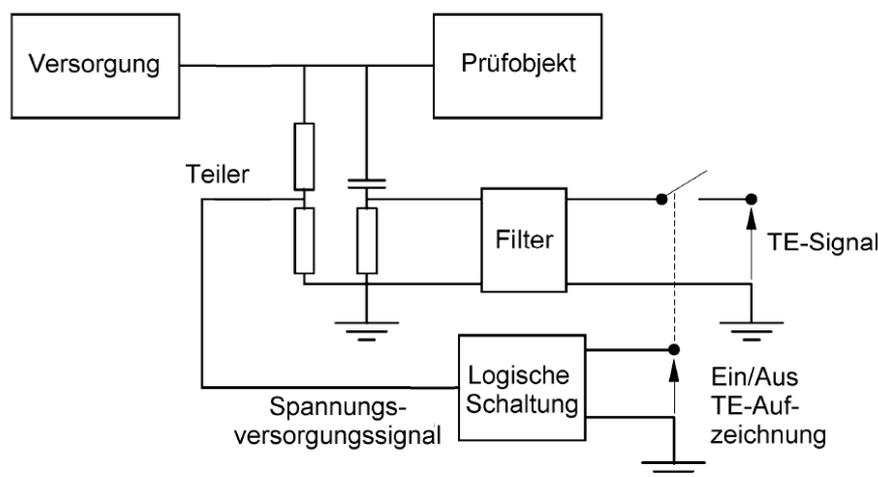
Eine weitere Antenne kann die sich im freien Raum ausbreitenden elektromagnetischen Signale, die vom TE-Ort ausgehen, erfassen (siehe Abbildung 5.30). Dazu können verschiedene Antennen verwendet werden. Eine Messantenne mit UWB-Charakteristik, die extrem breitbandige Empfangseigenschaften aufweist, benötigt eine Filterung der niederfrequenten Frequenzanteile (unterhalb von 0,5 GHz) da sonst Störer wie sie beispielsweise von Rundfunksendeeinrichtungen erzeugt werden, in die Messung mit eingehen können. Hornantennen haben eine Grenzfrequenz oberhalb von 0,5 GHz und sind aus diesem Grund nicht stör anfällig. Auch bei schmalbandigen UHF-Antennen, die auf eine Mittelfrequenz oberhalb von 0,5 GHz abgestimmt sind ist eine Filterung nicht notwendig [1] [50].



**Abbildung 5.30 Prüfkreis mit UHF-Antenne [1]**

Alternativ kann zur Unterdrückung des Versorgungsspannungsimpulses das TE-Signal elektronisch unterdrückt werden, sodass jedes TE-Signal, das in den Anfangsbereich der Anstiegszeit des Spannungsimpulses fällt, nicht erfasst wird.

Dieses Verfahren wird quellengesteuerte Unterdrückung genannt und kann für alle beschriebenen Sensoren eingesetzt werden (siehe Abbildung 5.31) [1].



**Abbildung 5.31 TE-Erfassung mit einer elektronischen quellengesteuerten Unterdrückung [1]**

RPDIV und RPDEV und TE-bezogene Größen hängen von der Empfindlichkeit (gemessen in mV) des Messsystems ab. Um äußere Störer zu eliminieren, muss vor Messbeginn die Empfindlichkeit des TE-Messsystems gemessen werden. In [1] wird dies ausführlich beschrieben.

## 5.5 Messung von TE bei unterschiedlichen Kurvenformen

Die Ursache von verzerrten Versorgungsspannungen ist auf die Pulsweitenmodulation in Frequenzumrichtern zurückzuführen. Die Steilheit der verwendeten Spannung ist viel höher als bei sinusförmigen Spannungsformen, folglich ist die Spannungsverteilung innerhalb der Spulen und Wicklungen nicht linear und verursacht eine hohe Spannungsbeanspruchung innerhalb der Wicklung. Zusätzlich steigen mit zunehmender Länge der Versorgungsleitung die transienten Überspannungen an den Motorklemmen. Diese transienten Vorgänge können mit der Wanderwellentheorie vollständig beschrieben werden. Die sinusförmige Versorgungsspannung von 50 Hz/60 Hz reicht nicht mehr aus, um das Teilentladungsaufkommen in einer Isolierung zu beschreiben. Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, ist es sinnvoll Teilentladungen bei unterschiedlichen Kurvenformen der Versorgungsspannung zu messen [43].

Es wurde, um einen Vergleich zwischen verschiedenen Kurvenformen und der Teilentladungsaktivität zu erhalten, eine neuartige Messmethode entwickelt. Diese Messmethode soll die Beanspruchung des Isoliersystems PWM-Umrichter gespeister Maschinen durch Teilentladungen simulieren [43].

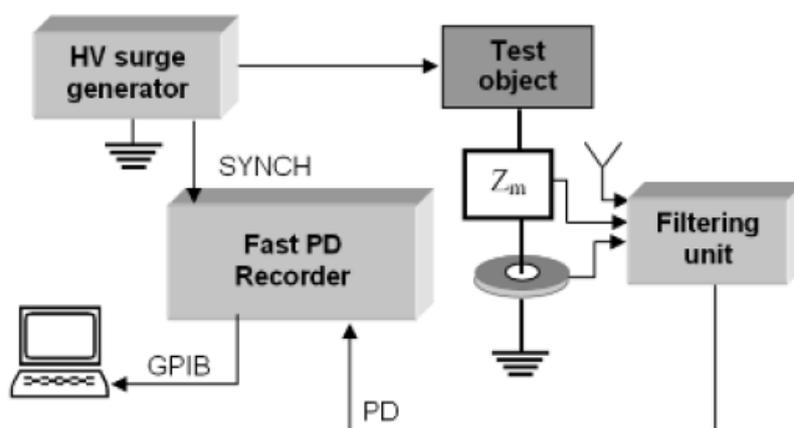


Abbildung 5.32 Messaufbau für die zeitaufgelöste Impulserfassung [43]

Der schnell ansteigende Impuls, der vom Impulsgenerator geliefert wird, kann in Bezug auf Anstiegszeit der Spannung, ihrer Abfallzeit, Amplitude und Wiederholungsrate angepasst werden. Das TE-Signal kann von drei verschiedenen Sensoren erfasst werden, von einer Antenne, einer Koppelimpedanz in Form eines Hochpassfilters oder einem Ultra-breitbandigen Stromwandler. Die TE werden während der Impulsdauer aufgenommen, über eine Software verarbeitet und als zeitaufgelöstes Bild (TE-Pattern) am Hauptrechner dargestellt. Bei den Testobjekten handelte es sich um formstabile Stator-Stäbe die mit der in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Typ II Isolierung ausgestattet waren. Die Isolierung wurde mit schnell ansteigenden Impulsen mit einer steilen Stirn beaufschlagt [43]. Um die Teilentladungsmuster vergleichen zu können, wurde zusätzlich zur Impulsspannung ( $t_r=100\text{ns}$ ;  $t_f=100\mu\text{s}$  Wiederholungsrate im Bereich von ms und s) eine trapezförmige ( $t_r=140\mu\text{s}$ ; 50Hz) und ein sinusförmige Spannung (50Hz) genommen [43].

Abbildung 5.33 zeigt verwendeten Kurvenformen sowie die unterschiedlichen Anstiegszeiten  $t_r$  und die mittlere Änderungsrate der Spannung  $dU/dt$  (Steilheit).

Waveform	$dU/dt$ [kV/ $\mu$ s]	Rise time $t_r$ [ $\mu$ s]
	0.0019	5000
	0.044	140
	90	0.1

Abbildung 5.33 Verwendete Kurvenformen mit Anstiegszeit und Änderungsrate der Spannung aus [43]

### 5.5.1 Ergebnisse der Messung

Das Teilentladungsmuster bei der sinusförmigen Spannung zeigt die typische Form von Hohlraumentladungen in einer Stator-Stab-Isolation mit vielen einzelnen Entladungen (siehe Abbildung 5.34).

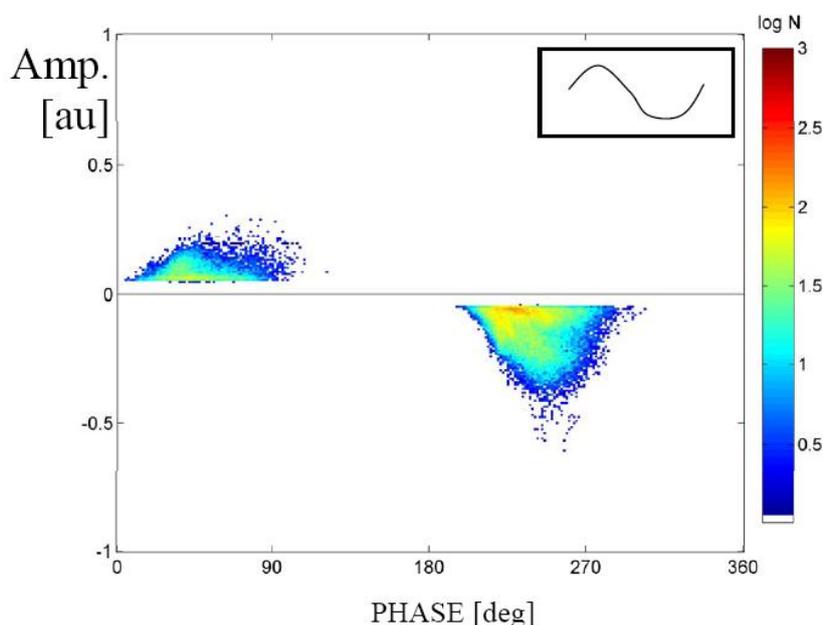
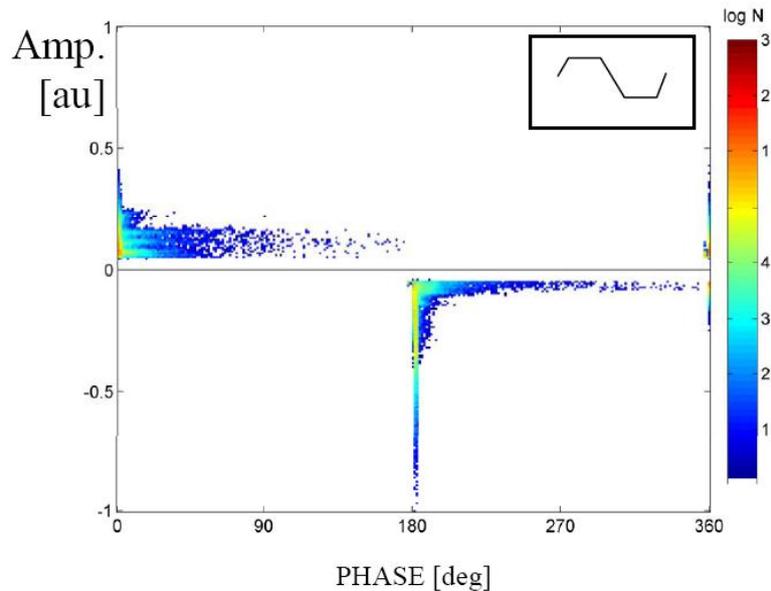


Abbildung 5.34 Teilentladungsmuster einer sinusförmigen Spannung bei 1,5-facher Teilentladungseinsetzspannung  $U_{PDIV}$  [43]

Das Teilentladungsmuster für die trapezförmige Spannung zeigt zwei Gruppen von Teilentladungsimpulsen in jeder Hälfte der Periode. Es zeigen sich Teilentladungen am steigenden und am abfallenden Teil des Spannungsverlaufs, allerdings gibt es wenige TE an dem Teil des Spannungsverlaufs bei dem  $dU/dt$  null ist (siehe Abbildung 5.35) [43].



**Abbildung 5.35** Teilentladungsmuster bei trapezförmiger Spannung bei  $t_r=140\mu\text{s}$ ;  $1,5 \cdot U_{\text{PDIV\_sin}}$ ;  $f=50\text{Hz}$  [43]

Die Teilentladungsmuster lassen erkennen, dass sich die Teilentladungen am ansteigenden bzw. abfallenden Teil der trapezförmigen Spannung konzentrieren. Diese Beobachtung ist ein Indikator für den Einfluss der Steilheit des Spannungsverlaufs ( $dU/dt$ ) auf die Teilentladungsaktivität.

Unter dem Einfluss von schnell ansteigenden sich wiederholenden Spannungsimpulsen musste zuerst die Teilentladungseinsetzspannung ermittelt werden (siehe Abbildung 5.36). Der Scheitelwert der Impulsspannung wurde allmählich erhöht (zuerst auf das 1,25 fache, dann auf das 1,5 fache der Teilentladungseinsetzspannung, siehe Abbildung 5.37 und Abbildung 5.38). In [43] konnte folgendes beobachtet werden:

- Die TE zeigten die Tendenz früher einzusetzen je höher die Impulsspannung war
- Die TE-Häufigkeit nahm zu
- Die TE waren über eine größere Fläche verteilt
- Die TE kamen im abfallenden Teil des Impulses (Impulsschwanz) konzentriert vor

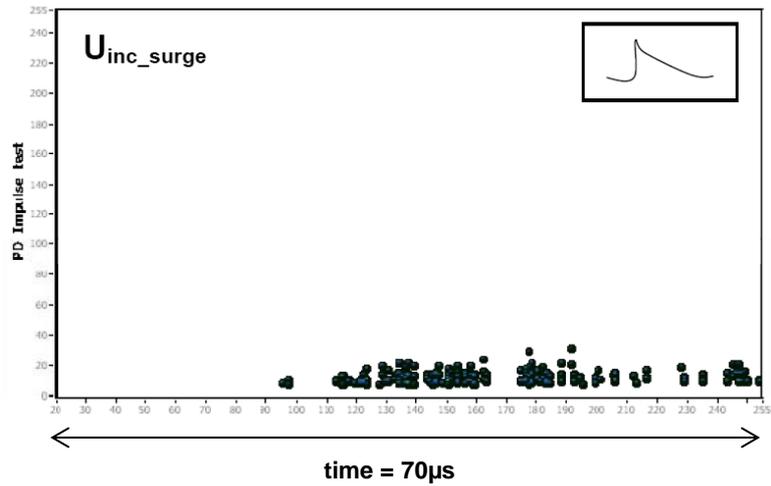


Abbildung 5.36 Ermittlung der Teilentladungseinsetzspannung [43]

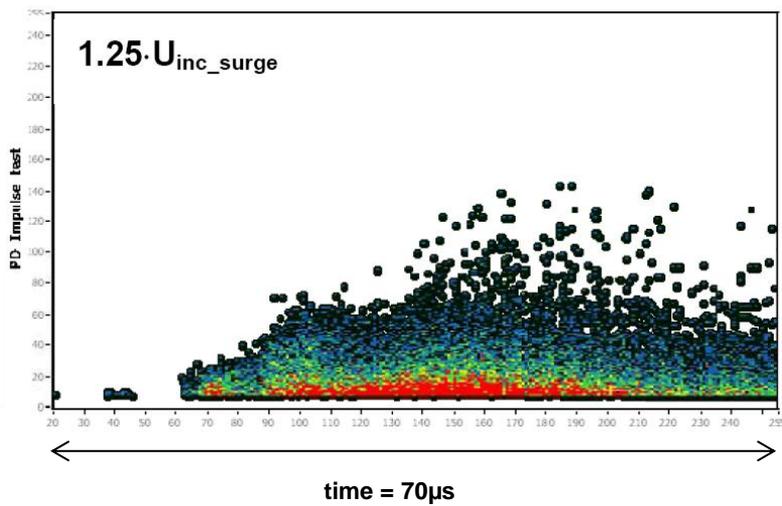


Abbildung 5.37 Teilentladungsmuster bei 1,25-facher Teilentladungseinsetzspannung [43]

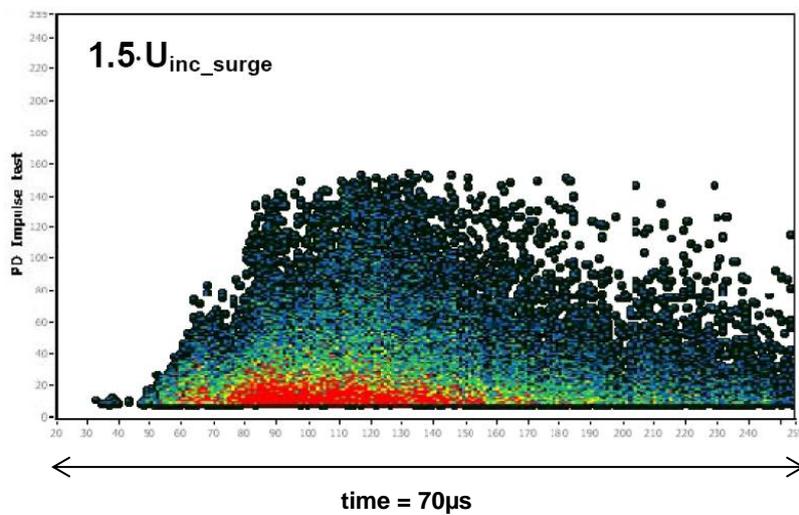


Abbildung 5.38 Teilentladungsmuster bei 1,5-facher Teilentladungseinsetzspannung [43]

Im Falle der sinusförmigen und der trapezförmigen Kurvenform ist die Einsetzspannung vom Scheitelwert der Kurve abhängig. Beim schnell ansteigenden, sich wiederholenden Impuls wird festgestellt, dass die steile Stirnzeit Einfluss auf das Teilentladungsvorkommen im abfallenden Teile des Impulses hat. Der Vergleich aller drei Kurvenformen zeigt, dass die Teilentladungseinsetzspannung sinkt, wenn man  $dU/dt$  erhöht (siehe Abbildung 5.39) [43].

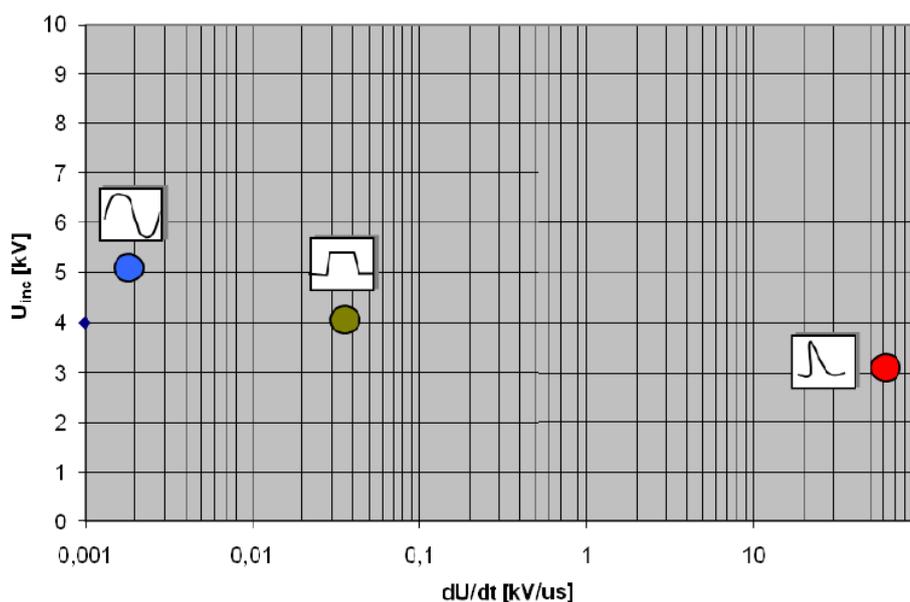


Abbildung 5.39 Zusammenhang zwischen Teilentladungseinsetzspannung und  $dU/dt$  in einer Stator-Stab-Isolierung für alle drei beschriebenen Kurvenformen [43]

## 5.6 Teilentladungserfassungssystem mit Mikrowellensensor DWX-05PD (RM-Prüftechnik)

Die Firma RM Prüftechnik hat schon 2009 eine Möglichkeit gefunden, TE effektiv und automatisiert zu messen. Die Methoden, die in der technischen Spezifikation IEC/TS 61934 beschrieben werden, wurden überprüft und folgende Probleme bei der Signalauskopplung gefunden. Bei der kapazitiven Auskopplung kann es zu Schädigungen des Prüfobjektes kommen, weil der Koppelkondensator nur begrenzt spannungsfest ist. Der Stromwandler ist nicht vollständig entstörbar und im Frequenzgang begrenzt. Das Testobjekt darf nicht an Masse gelegt werden, wenn der Sensor im LV Pfad hängt, weil so störende Impedanzen miteingekoppelt werden

können. Die Messung mit einer HF Antenne ist insofern problematisch, da sie in der Regel sehr störungsempfindlich reagiert.

Das vorgestellte Messsystem DWX-05PD wurde deshalb entwickelt, da es schwierig ist die üblicherweise eingesetzte Sensorik bei älteren Motoren und Generatoren nachzurüsten. Eine berührungslose Erfassung (Antennen) der Teilentladungssignale würde eine gute Alternative darstellen, wenn nicht das Problem der Signalunempfindlichkeit mit einhergehender Störungsempfindlichkeit auftreten würde [51]. In [52] wird eine schmalbandige Patch Antenne beschrieben, die in einer Bandbreite von 1,5 GHz bis 2 GHz arbeitet und durch einen speziell entwickelten Filter- und Signalverarbeitungskreis weitgehend störsignalunempfindlich ist. Nach [52] nimmt auch der Einbau und die Orientierung der Antenne im Generatorgehäuse keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Solch ein Mikrowellen Sensor wird beim DWX-05PD Messsystem verwendet, allerdings wurde die Signalverarbeitungsgruppe modifiziert und an den A/D Wandler und einen Stoßspannungsgenerator angepasst. Zusätzlich zu diesen Maßnahmen wurde der integrierte Bandpass auf 1,7 GHz modifiziert.

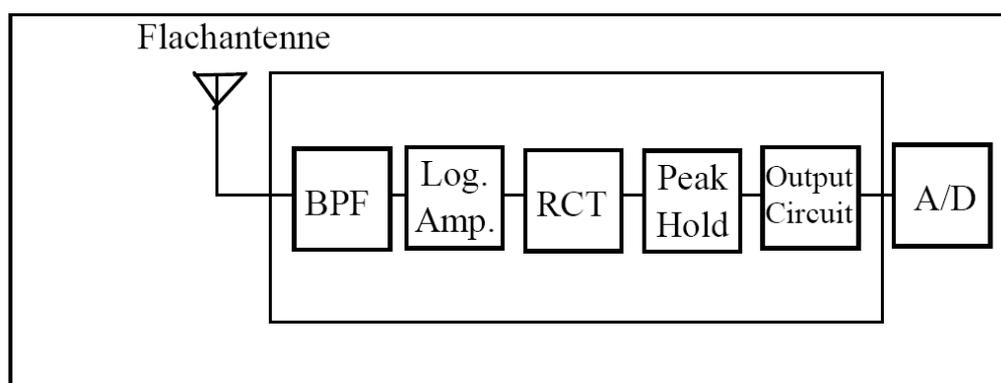


Abbildung 5.40 Blockdiagramm des Mikrowellensensors [51]

Abbildung 5.40 zeigt den schematischen Aufbau des verwendeten Bandpass-Mikrowellensensors. Neben einer mehrfachen Schirmung besteht der Sensor aus einem Bandpassfilter (BPF) einer Verstärkereinheit (Log. Amp.), einem Gleichrichter, der die Polaritäten der Impulse gleichrichtet, und einem Ausgabeverstärker mit einem Signalanpassungskreis. Das TE-Signal wird analog gewonnen und anschließend mit

Hilfe eines Analog-Digitalwandlers in ein digitales Signal umgewandelt, welches danach vom Gerät weiterverarbeitet wird.

Der grundsätzliche Aufbau und ein realer Testaufbau dieses Messsystems sind in Abbildung 5.41 und Abbildung 5.42 dargestellt:

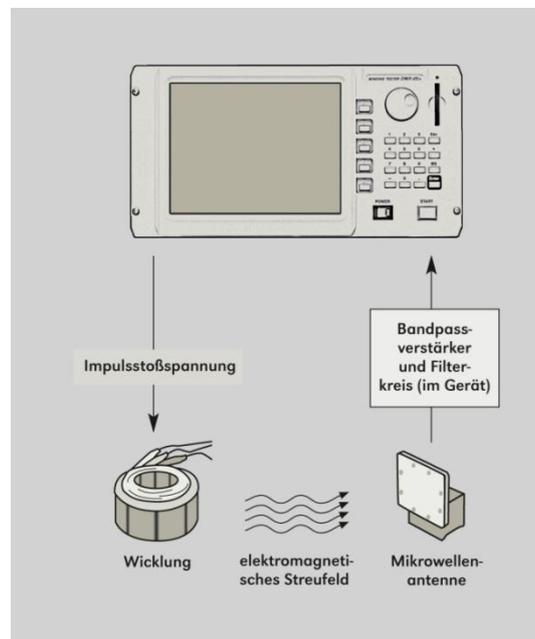


Abbildung 5.41 Schema des Prüfaufbaus mit dem DWX-05PD [53]



Abbildung 5.42 Realer Testaufbau [51]

Der Impulsgenerator liefert Anstiegszeiten, die sich lastimpedanzabhängig zwischen 100 ns und 350 ns befinden und im Bereich des  $dU/dt$  eines schnellen Umrichters liegen. Die Wiederholrate liegt etwa bei 20 Hz. Der Impulsgenerator kann je nach Ausführungsform Spannungen von 6kV, 10kV oder sogar 20kV bereitstellen. Zwischen dem Mikrowellensensor und dem A/D Wandler ist die Triggertaktung synchronisiert. Die Flachantenne, welche mit einem kurzen geschirmten Kabel mit dem Gerät verbunden ist, soll in einem möglichst geringen Abstand zum Prüfobjekt (5-20 cm) angeordnet sein. Das Gerät liefert automatisch über einen eigens entwickelten Prüfalgorithmus eine Spannung die mit fest eingestellter Impulsanzahl stufenweise erhöht wird, bis die Teilentladungseinsetzspannung erreicht ist, bzw. wird sie verringert, bis die Teilentladungsaussetzspannung unterschritten wird. Nachdem das Signal digitalisiert wurde, wird ein Wert gewonnen, dessen Toleranzgrenze frei einstellbar ist um mögliches Digitalisierungsrauschen zu unterdrücken. Die Anzahl der Impulse, die diese Toleranzgrenze überschreiten, werden festgehalten und die repetierende TE-Einsetzspannung (RPDIV) bzw. TE-Aussetzspannung (RPDEV) bestimmt. Anschließend werden die TE-Impulse durch eine Visualisierung dargestellt [51].

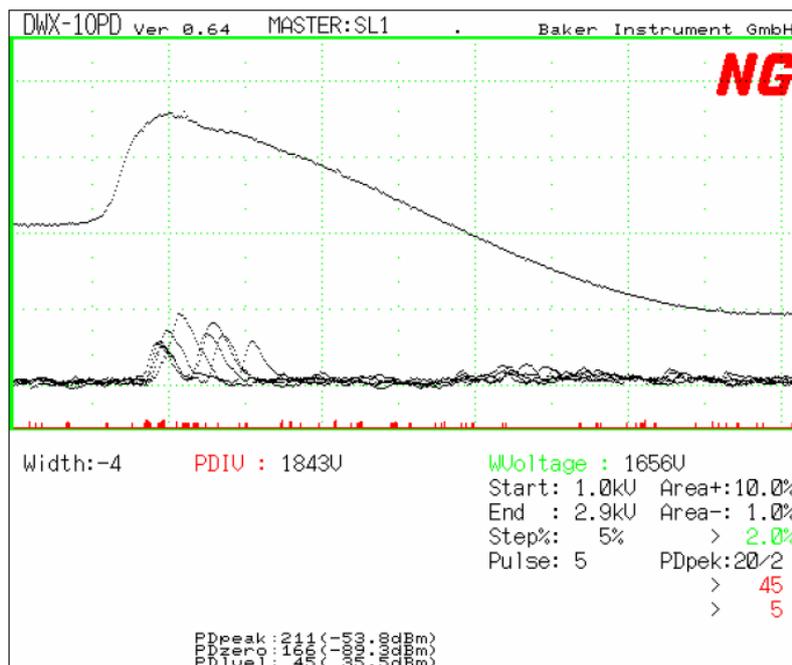


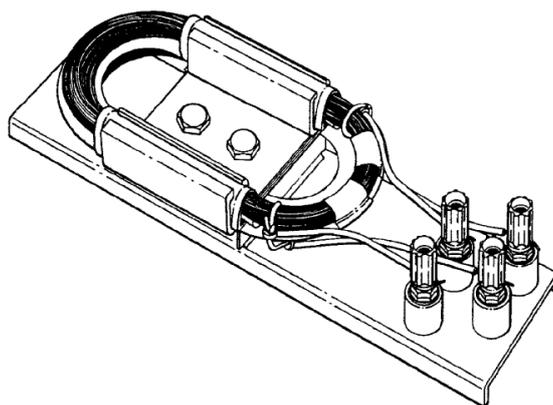
Abbildung 5.43 Beispiel für eine PDIV Prüfung. Eingebildet sind PDIV, Ladespannung, relative Ladungsmenge und Anzahl der Impulse [51]

Grundsätzlich ist das DWX-05PD seit 2009 praxiserprobt und bietet den Vorteil, dass es durch den schmalbandigen 1,7 GHz Sensor sehr störungsarm arbeitet. Es wurde beispielsweise erfolgreich in [54] für die Teilentladungsmessung an einem runddrahtgewickelten Stator eingesetzt. Aufgrund des Impulsgenerators, der eine Obergrenze von 20 kV besitzt, ist es allerdings nicht für die Messung von kompletten Wicklungen großer elektrischer Maschinen einsetzbar, aber eine Prüfung einzelner Formspulen lässt sich aufgrund der zur Verfügung stehenden 20 kV Variante des Impulsgenerators durchaus realisieren. Auch wenn das Testobjekt gekapselt ist, kann es nur mit Einschränkungen verwendet werden, da das Mikrowellensignal nur sehr abgeschwächt gemessen werden kann [51].

### **5.7 Ein automatisches PDIV-Messsystem mit Impulsgenerator um die Tauglichkeit der Isolierung von umrichterbetriebenen Maschinen zu überprüfen**

In [55] wurde ein Impulsgenerator und ein automatisches RPDIV Messsystem entwickelt, um bei Motoretten die Phasen-, die Phasen-Erde- und die Isolierung zwischen den Windungen auf Teilentladungen zu überprüfen.

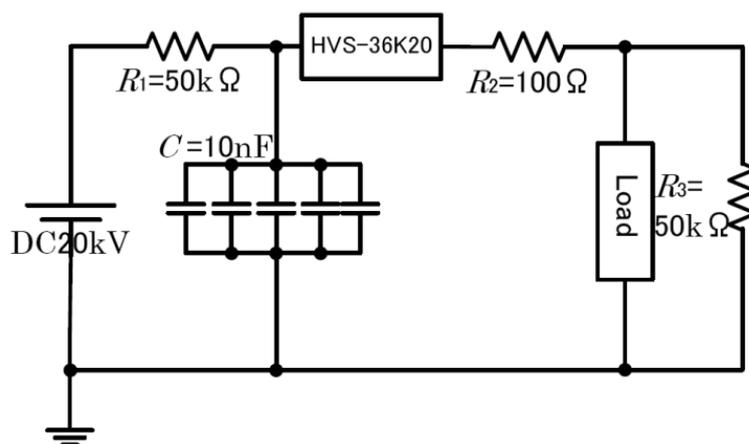
Eine Motorette ist ein Prüfobjekt, welches eine möglichst naturgetreue Nachbildung eines Wicklungs- bzw. Isoliersystems eines Motors ist. Motoretten können hilfreich bei der Beurteilung eines Isoliersystems von einem Motor sein und gelten als „Erprobungs-Isoliersystem“. Sie besteht aus zwei Spulen, die in demselben Nutpaar eingebaut sind (die Nut wird aus Blechen aus rostfreiem Stahl nachgebildet), einer Grundplatte und vier Isolatoren an denen die Anschlussenden der Spulen aufgebracht sind [56].



**Abbildung 5.44 Schematischer Aufbau einer Motorette [56]**

**Entwicklung des Impulsgenerators:**

Basierend auf [16], [17] und [25], war es notwendig einen Impulsgenerator zu entwerfen, der Kurvenformen von Umrichtern in geeigneter Weise nachbilden kann (siehe Abbildung 5.45). Bei diesem sollte der Scheitelwert und Anstiegszeit des Impulses so einstellbar sein, dass die in der Praxis vorkommende elektrische Beanspruchung der Isolierung eines Motors nachgebildet werden kann [55].

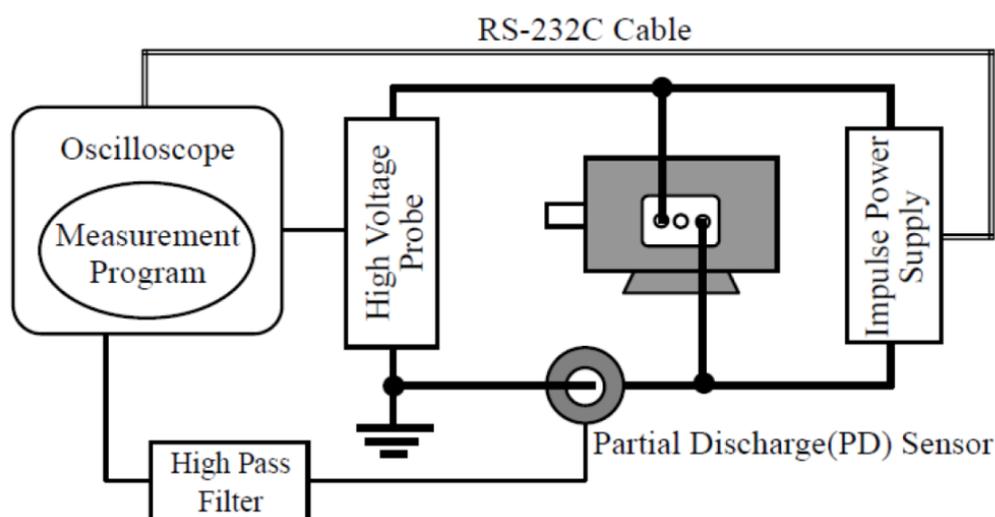


**Abbildung 5.45 Schaltbild des entwickelten Impulsgenerators [55]**

Der Impulsgenerator besteht aus einem Halbleiterschalter (HVS-36K20/ 15A, rise time: 200 ns) und aus 5 Kondensatoren (2nF) die parallel geschaltet sind um 10 pF zu erhalten, um die Induktivität des Schaltkreises zu reduzieren. Die Kondensatoren werden über eine Gleichspannungsquelle (DC 20 kV) aufgeladen, der Strom fließt über den Halbleiterschalter. Die Pulsweite wird über einen Funktionsgenerator verändert, der die erzeugte Impulsspannung triggert.  $R_1$  und  $R_2$  haben die Aufgabe die Kondensatoren zu laden und den eingeschalteten Zustand des Halbleiterschalters zu sichern.  $R_3$  ist der Entladewiderstand für die kapazitive Ladung. Der erzeugte Spannungsimpuls wird mit einem Hochspannungstastkopf hinuntergeteilt und von einem Oszilloskop gemessen. Die Kurvenform des Stromes wird von einem RFCT (Radio Frequency Current Transformer) detektiert [55].

### **Automatisches RPDIV-Messsystem:**

Unter Verwendung von dem oben beschriebenen Impulsgenerator wurde in [55] ein automatisches Messsystem entwickelt, welches die RPDIV misst, aber auch, wenn die Spannung wieder fällt, eine PDEV- bzw. RPDEV-Messung zulässt.



**Abbildung 5.46 Schematischer Aufbau des RPDIV-Messsystems [55]**

Abbildung 5.46 zeigt den schematischen Aufbau des beschriebenen Messsystems. Der Impulsgenerator wird von einem Funktionsgenerator getriggert, der mit einem Oszilloskop, welches die Messsoftware enthält, verbunden ist. Über das in dem Oszilloskop implementierte Programm kann die Höhe der Impulsspannung und die Anzahl der Impulse, die auftreten, eingestellt werden (verbunden mit der RS-232C Kommunikationsleitung). Das Output-Signal des Hochspannungsteilers und das von einem Sensor (im Zuge einer Testreihe an Motoretten wurden verschiedene Sensoren eingesetzt) detektierte TE-Signal werden erfasst und am Oszilloskop ausgegeben [55].

Die Messung der RPDIV funktioniert folgendermaßen (siehe Abbildung 5.47): Das Programm gibt an den Impulsgenerator den Befehl weiter in der Spannungshöhe  $V_0$  zehn Spannungsimpulse zu generieren, welche vom Oszilloskop aufgezeichnet werden. Sind keine Teilentladungen vorhanden, wird die Spannungshöhe um ein vordefiniertes  $\Delta V$  auf  $V_1$  erhöht und es werden wiederum zehn Impulse generiert. Dies wird so lange weitergeführt ( $V_2$  bis  $V_4$ ) bis mindestens fünf TE-Impulse erfasst werden.  $V_4$  stellt in Abbildung 5.47 die RPDIV dar [55].

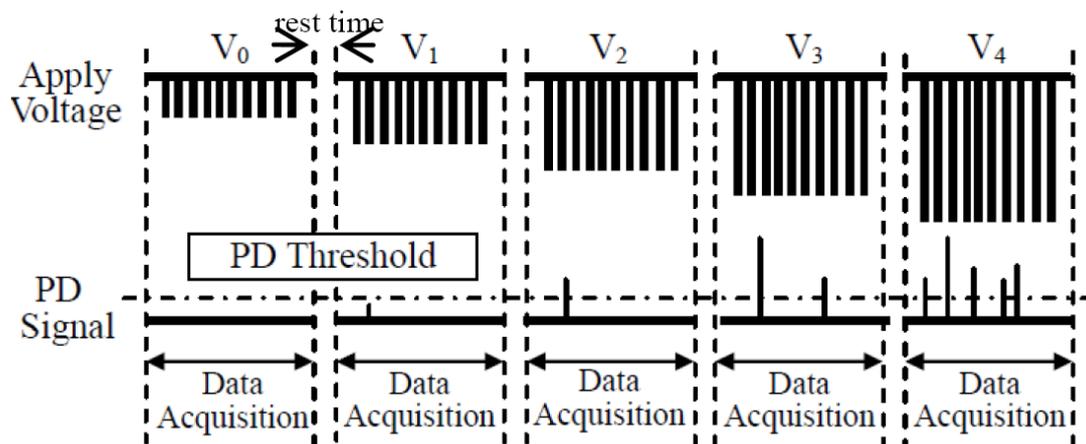


Abbildung 5.47 Konzept der automatischen RPDIV-Messung [55]

## 6 Umrichterbetriebene Anlagen

Moderne elektrische Antriebe aber auch dezentrale Energieerzeuger arbeiten drehzahlvariabel, um die Effizienz und Funktionalität zu steigern. Die eingesetzten Umrichter erhöhen die elektrische Belastung in der Wicklungsisolierung, die von der Umrichtertopologie aber auch vom Anlagenkonzept abhängt [57]. Die Windkraft, die Bahntechnik, viele Schiffsmotoren und verschiedene Kranantriebe sind nur einige wenige Anwendungsbeispiele für Frequenzumrichter betriebene Maschinen.

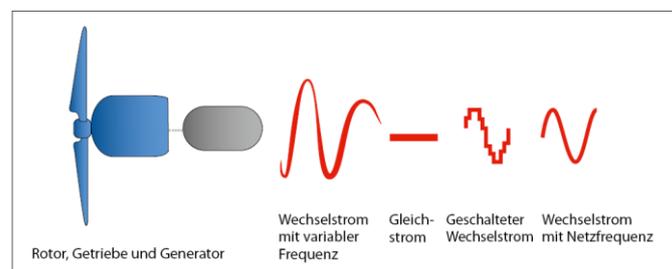
In diesem Kapitel sollen Beispiele von Umrichtern und Umrichter-Maschinensystemen vorgestellt werden. Der Schwerpunkt wird auf die Windkraft gelegt, da sich diese Form der Energieerzeugung im Zuge der Diskussion um erneuerbare Energieträger immer mehr durchsetzt. Aber auch ein Anwendungsbeispiel mit einem Mittelspannungsumrichter an einer 6,6 kV ASM mit Schleifringläufer wird im Folgenden erläutert.



Abbildung 6.1 Beispiele für drehzahlvariable Anlagen [57]

## 6.1 Drehzahlvariable Windkraftanlagen mit Frequenzumrichter

Die Windenergie gilt heutzutage als sehr zukunftssträchtig für die zur Verfügung stehenden emissionsfreien Konzepte, um elektrische Energie zu gewinnen. Es werden immer mehr große Windparks auf dem Land (onshore) und auf See (offshore) gebaut. Die technologische Herausforderung liegt darin, den Wirkungsgrad zu verbessern und eine zuverlässige Umwandlung der Windenergie in elektrische Energie zu gewährleisten. Die Windgeschwindigkeiten, die sehr wechselhaft sein können, wirken auf den Rotor und schließlich auf den Generator ein und müssen in einen Wechselstrom mit einer konstanten Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz umgewandelt werden. Heutzutage werden in Windkraftanlagen über 2 MW diese variablen Frequenzen und Spannungen des Generators mittels Frequenzumrichter an die erforderliche Netzfrequenz, Phasenlage und Netzspannung angepasst [58] [59].



**Abbildung 6.2 Energieumwandlungsprozess [58]**

Drehzahlvariable Systeme bieten gegenüber drehzahlstarr Systemen nach [60] folgende Vorteile:

- Sie bieten eine einfache Pitch-Regelung.
- Sie reduzieren die mechanische Beanspruchung.
- Sie kompensieren dynamisch die Drehmoment- und Leistungsschwankungen.
- Sie verbessern die Effizienz des Systems, da die Geschwindigkeit als Funktion von Windgeschwindigkeit und maximaler Ausgangsleistung eingestellt werden kann.
- Es kann der erzeugte Lärm durch langsam laufende Rotoren reduziert werden.

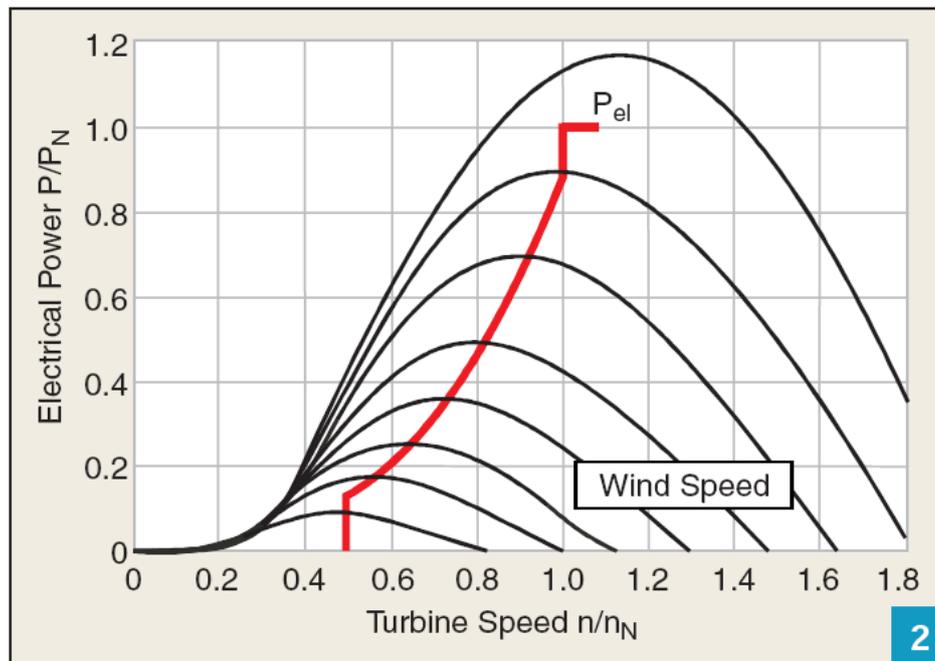


Abbildung 6.3 Die elektrische Ausgangsleistung als Funktion der Turbinendrehzahl. [60]

Abbildung 6.3 zeigt die elektrische Ausgangsleistung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Mit drehzahlvariablen Systemen kann durch geeignete Regelung am Maximum power Point (MPP) operiert werden [60]. Der „Maximum power Point“ ist der Punkt in einem Diagramm, an dem die Kurve ihr Maximum erreicht. Maximum power point tracking (MPPT) bedeutet in diesem Fall, dass die Turbinendrehzahl auf den benötigten Wert geregelt wird [61].

Grundsätzlich kommen nach [58] und [62] in der Praxis folgende drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter zur Anwendung:

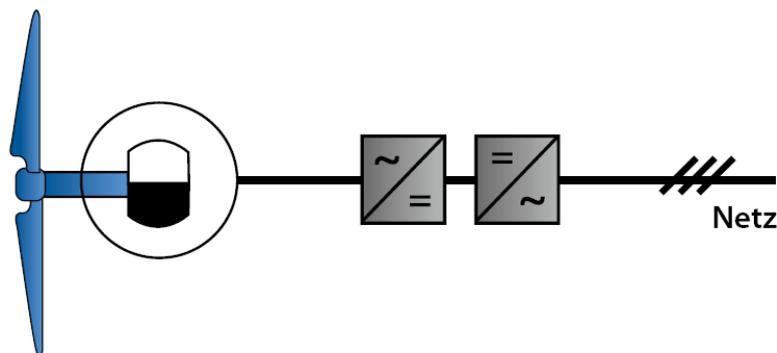
- Anlagen mit doppelt gespeisten Asynchrongeneratoren (ASM)
- Anlagen mit fremderregten Synchrongeneratoren (SM)
- Anlagen mit permanenterregten Synchrongeneratoren (SM)

In den folgenden Ausführungen werden doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren und permanenterregte Synchrongeneratoren näher behandelt und Anwendungsbeispiele anhand von in der Praxis tatsächlich eingesetzten Umrichtersystemen von zwei verschiedenen Herstellern vorgestellt. Darüber hinaus werden Probleme und Fehlerursachen von solchen drehzahlvariablen Generatoren beschrieben und bewertet.

### Anlagen mit permanenterregten Synchrongeneratoren

Bei Windkraftanlagen, die mit einem permanenterregten Synchrongenerator betrieben werden, muss die volle Generatorleistung über einen Frequenzumrichter an die Netzspannung bzw. Netzfrequenz angepasst werden [58], [63].

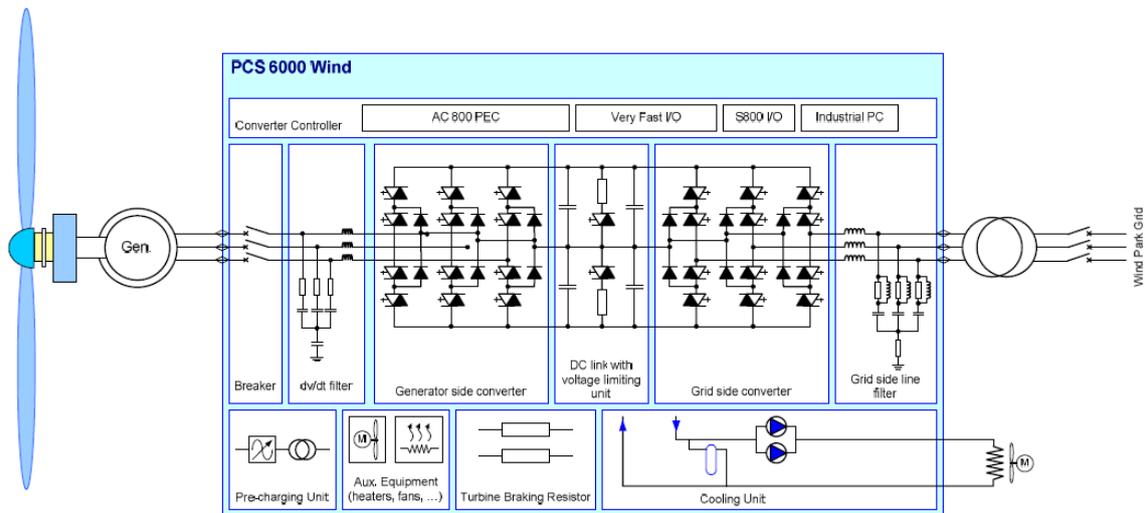
Abbildung 6.4 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Windkraftanlage mit permanenterregtem Synchrongenerator. Der Zwischenkreisumrichter muss die volle Generatorleistung umsetzen und speist dann die erwünschte Frequenz ins Netz ein.



**Abbildung 6.4** Prinzipieller Aufbau eines permanenterregten Synchrongenerators [58]

Der große Vorteil dieses Systems liegt darin, dass es sehr kompakt ist, was bedeutet, dass größere Leistungsdichten auf kleinerem Raum umgesetzt werden können. Weiters kann dieses System getriebeles betrieben werden. Solche Generatoren erreichen sehr hohe Wirkungsgrade (bis 98 %). Sie sind jedoch aufgrund der Tatsache, dass die Ausgangsspannung nicht über die Erregerfrequenz eingestellt werden kann, schlechter regelbar [62].

Die Firma ABB hat einen verlässlichen Mittelspannungsvollumrichter den PCS 6000 Wind entwickelt, der bevorzugt in Offshore-Anwendungen (bei denen es darauf ankommt, dass der Wartungsaufwand möglichst gering gehalten wird) eingesetzt wird. Der PCS 6000 Wind ist ein Vierquadrantenumrichter und arbeitet mit der IGCT-Technologie. Er kann im Turm der Windkraftanlage untergebracht werden und benötigt mit allen Hilfseinrichtungen wie Wasserkühlung, Netz- bzw.  $dU/dt$ -Filter nur eine Plattform im Turm [63], [64], [65].



**Abbildung 6.5** Prinzipschaltbild des PC 6000 Wind [65]

Abbildung 6.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Windkraftanlage mit dem PC 6000 Wind und soll in den folgenden Ausführungen kurz beschrieben werden.

Nach dem Trennschalter ist ein ein  $dU/dt$  Filter, der den Spannungsanstieg an den Klemmen begrenzt, hineingeschaltet. Dahinter befindet sich der generatorseitige Stromrichter gefolgt vom Gleichstromzwischenkreis und dem netzseitigen Stromrichter. Vor dem Trafo befindet sich noch ein Netzfilter (LC-Filter). Der Transformator ist so ausgelegt, dass er dem Spannungsanstieg der schaltenden IGBTs standhält [63], [65]. Der vom Generator erzeugte Strom wird von der generatorseitigen Stromrichtereinheit in einen Gleichstrom in den Gleichstrom-Zwischenkreis gleichgerichtet und von dort über die netzseitige Stromrichtereinheit in das Netz eingespeist [63].

Der PC 6000 Wind wird bei dem 5 MW Offshore Windpark von Alpha Ventus eingesetzt. Er befindet sich ca. 45 km nördlich von Bokum in seichten Abschnitten entlang der Küste und ist ein Pionierprojekt von E.ON Climate & Renewables, EWE und Vattenfall Europa [63], [66], [67]. 2011 haben die zwölf Windenergieanlagen ca. 267 Gigawattstunden Strom ins deutsche Übertragungsnetz eingespeist, das übertrifft damit die Prognosen für das Jahr 2011 um 15% [66].

### Anlagen mit doppelt gespeisten Asynchronmotoren

Doppelt gespeiste Asynchrongeneratoren sind in Verbindung mit einem Frequenzumrichter sehr viel wirtschaftlicher als drehzahlstarre Systeme. Der große Vorteil von solchen Windgenerator-Systemen liegt vor allem darin, dass nicht die volle Leistung über den Frequenzumrichter umgesetzt werden muss. Dadurch können die Baugröße des Umrücker und die damit verbundenen Kosten erheblich reduziert werden [68], [60]. Ein mathematisches Modell, um das Betriebsverhalten vorhersagen zu können, ist für den Hersteller des Generators von entscheidender Bedeutung und wird in [68] genau erläutert.

Abbildung 6.6 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators.

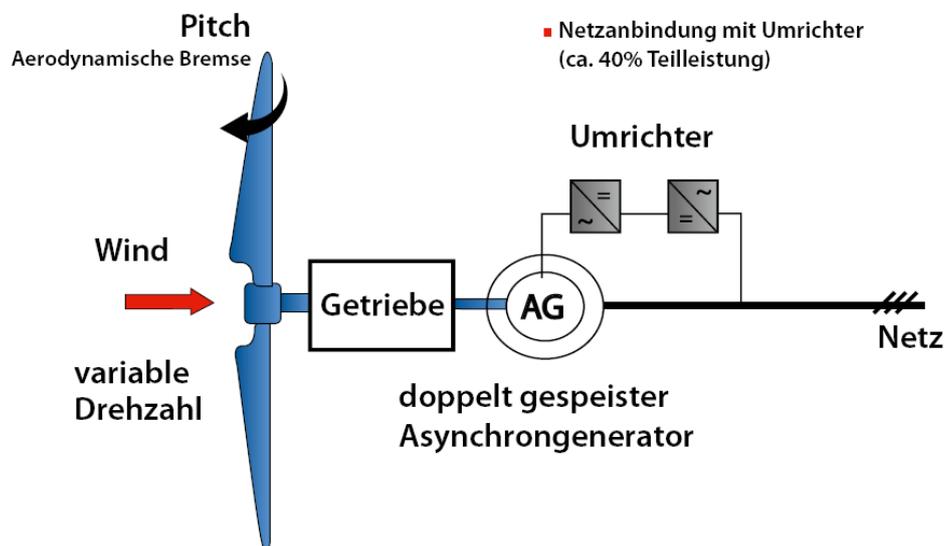
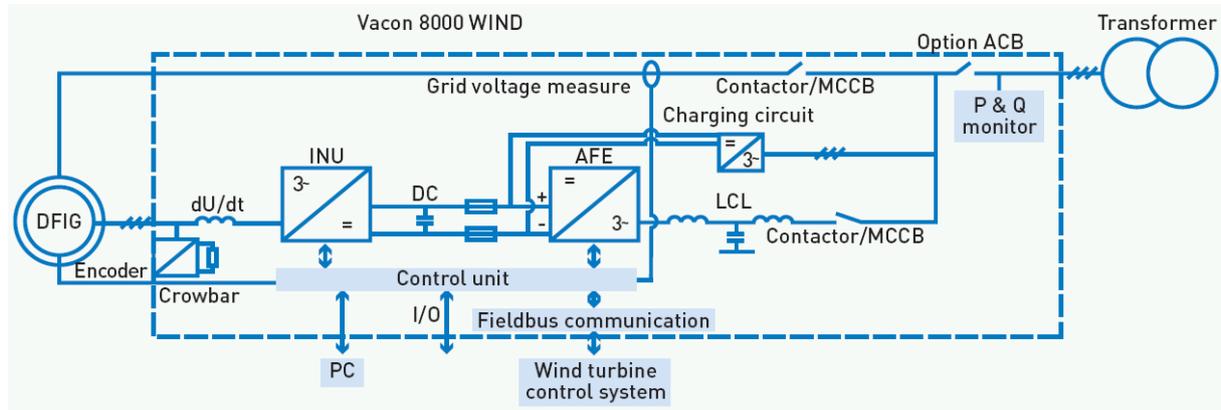


Abbildung 6.6 Prinzipschaltbild eines doppelt gespeisten Asynchrongenerators [58]

Der drehzahlvariable Rotor treibt über ein Getriebe die Asynchronmaschine an. Der Läufer, der als Schleifringläufer ausgeführt ist, wird über einen Umrücker an das Netz gekoppelt. Die Asynchronmaschine kann so übersynchron und untersynchron sowohl generatorisch wie auch motorisch betrieben werden. Durch die Steuerung des Stroms im Läuferkreis nach Betrag und Phase kann jeder beliebige Blind- und Wirkstrom eingestellt werden (beliebiger Leistungsfaktor für den Generator) [58], [62].

Als Beispiel für so ein drehzahlvariables System soll an dieser Stelle der Frequenzumrichter von Vacon, der Vacon 8000 Wind angeführt werden. Er ist ein Spannungszwischenkreis Umrichter und hat eine Nennleistung von 2 MW [69].



**Abbildung 6.7** Prinzipieller Aufbau einer doppelt gespeisten Asynchronmaschine mit dem Frequenzumrichter Vacon 8000 Wind [69]

## 6.2 Beanspruchungen und Fehler die in der Generatorisolierung von Windkraftwerken auftreten können

Asynchronmaschinen (ASM) mit Schleifringläufer werden schon seit über 40 Jahren erfolgreich eingesetzt. Diese Art von Maschinen werden bis ungefähr 15 MW gebaut. Wird eine ASM mit Schleifringläufer an einem Frequenzumrichter betrieben, wie es beispielsweise bei doppelt gespeisten Asynchronmaschinen in Windkraftanlagen vorkommt, muss wie schon in Kapitel 5 besprochen ein Hauptaugenmerk auf die Isolierung gelegt werden. Durch die vorzeitige Alterung ausgelöst von den Spannungsüberhöhungen in den Generatorwicklungen und den daraus resultierenden Teilentladungen, hat zum Teil sehr kostspielige Serviceeinsätze zur Folge. Diese Einsätze müssen oft an sehr entlegenen oder schwer erreichbaren Orten (z.B.: Offshore-Anlagen) durchgeführt werden [58], [70], [71]. Laut [70] müssen in manchen Fällen Generatoren innerhalb eines Zeitraumes von fünf bis sieben Jahren zwei- bis dreimal komplett neu gewickelt werden.

## **6.2.1 Fehler die in der Isolierung des Windgenerators auftreten können**

In den folgenden Ausführungen werden Fehlerarten beschrieben, die in der Praxis bei Asynchronmaschinen mit Schleifringläufern tatsächlich aufgetreten sind. In [70] und [71] werden diese genau beschrieben und dokumentiert und werden in den nächsten Punkten auszugsweise zitiert. Natürlich gelten diese Art von Fehlern nicht ausschließlich für Windgeneratoren, sie können durchaus in industriellen Antriebssystemen auftreten. Alle Darstellungen in den folgenden Punkten beziehen sich aber auf Windgeneratoren.

### **6.2.1.1 Ausfall der Läuferwicklung verursacht durch Spannungsspitzen durch die PWM**

Durch die Spannungsspitzen des Frequenzumrichters, die um ein Vielfaches höher als die Versorgungsspannung sind und repetierend auftreten, wird die Beanspruchung der Rotorisolierung vergrößert. Dieser Umstand wirkt sich sowohl auf die Windungsisolierung und die Phasenisolierung wie auch auf die Hauptisolierung negativ aus. Abbildung 6.8 Beispiel eines Ausfalls der Windungsisolierung zeigt einen Fehler in der Windungsisolierung eines Schleifringläufers.



**Abbildung 6.8 Beispiel eines Ausfalls der Windungsisolierung [70]**

### **6.2.1.2 Schlecht gekrimpte Ausleitungen der Läuferpulen**

Windgeneratoren sind regelmäßigen Lastwechseln aufgrund des dynamischen Verhaltens des Windes ausgesetzt. Die Folge daraus ist, dass auch die Wicklungen einer höheren thermischen und mechanischen Beanspruchung ausgesetzt sind. Die traditionell verwendeten Schleifringanschlüsse können solchen Bedingungen nur schlecht standhalten.



**Abbildung 6.9 Fehler am Schleifringanschluss [71]**

### **6.2.1.3 Verlust bzw. Bruch der Bänderung am Wickelkopf des Rotors**

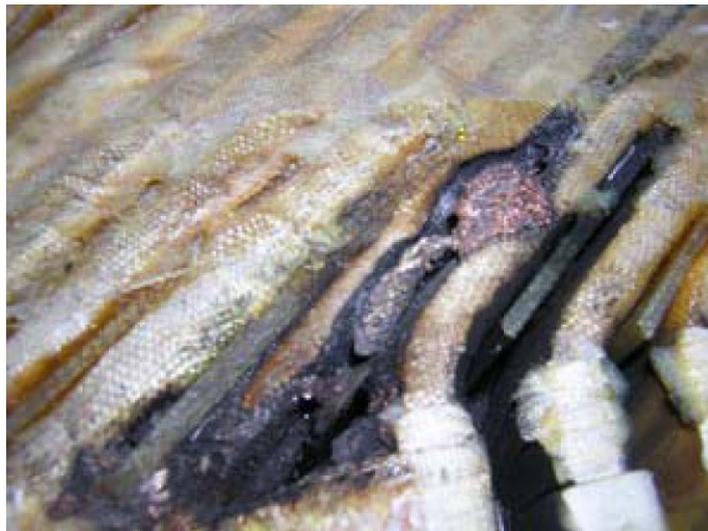
Aufgrund der thermischen Belastung wegen der häufigen Lastwechsel, wird der Läufer und dessen Wickelköpfe einer höheren Belastung durch Ausdehnungen und Kontraktionen ausgesetzt als im Normalbetrieb. Das hat zur Folge, dass die Rotorwicklung überlastet und der Leistungsfluss nicht mehr entsprechend ausbalanciert werden kann. Diese Verhaltensweise beansprucht die Wickelkopf Bandagenbänder um einiges mehr.



**Abbildung 6.10 Katastrophaler Rotorausfall [71]**

#### **6.2.1.4 Umwelteinflüsse**

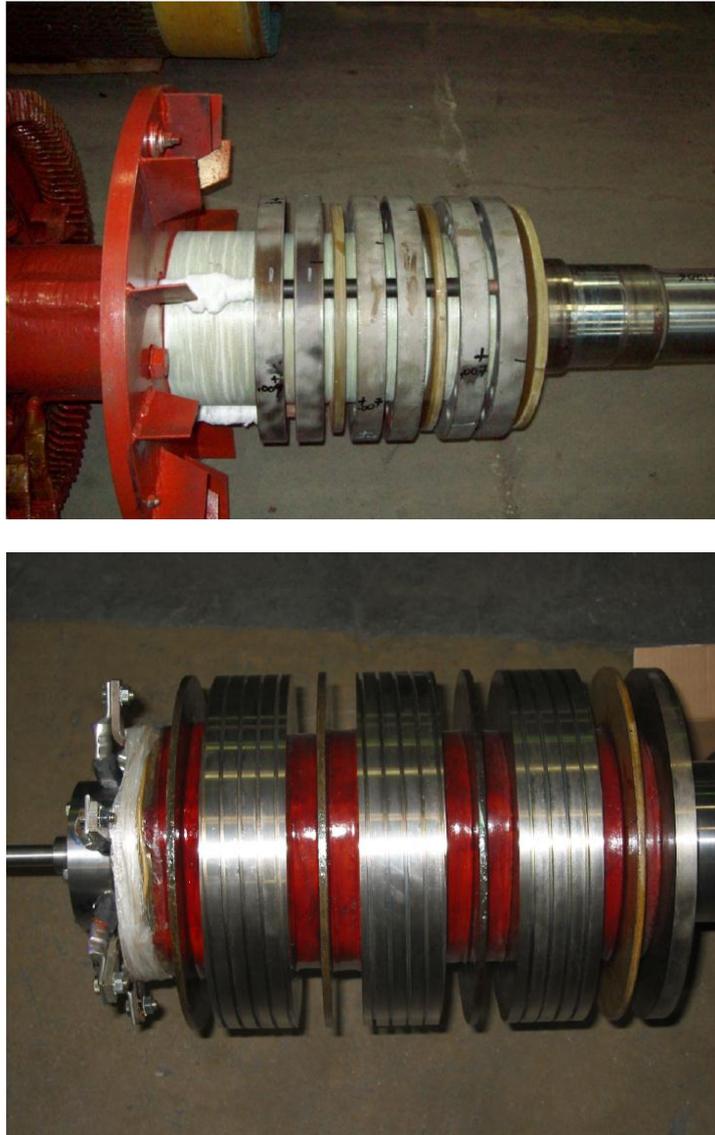
Windgeneratoren operieren unter schwierigen Umweltbedingungen. Sie arbeiten in großer Höhe und sind schwer einschätzbaren Windrichtungen, Feuchtigkeit (vor allem bei Offshore-Anlagen), Staub und Sand ausgesetzt. Wenn beispielsweise Feuchtigkeit oder Sand in die Gondel bzw. ins Generatorgehäuse eindringen, kann es zu Verunreinigungen der Wicklungen, insbesondere des Wickelkopfes, und damit zu Oberflächenentladungen kommen.



**Abbildung 6.11 Beispiel von einem Fehler in der Windungsisolierung ausgelöst durch Feuchtigkeit am Wickelkopf [70]**

#### **6.2.1.5 Untaugliche Isolation zwischen den Schleifringen**

Die Schleifringe werden von hohen Spannungsspitzen zwischen den Ringen beansprucht, es kann somit zu Spannungsüberschlägen zwischen diesen Ringen kommen. Eine adäquate Isolation zwischen diesen Schleifringen ist für Maschinen, die von steilen Spannungsanstiegen durch Frequenzumrichter beansprucht werden, unbedingt notwendig [70].



**Abbildung 6.12** Das obere Bild zeigt eine konventionelle Isolierung zwischen den Schleifringen, das untere Bild zeigt eine verbesserte Isolierung für den Umrichterbetrieb [70].

Die Isolierung von Asynchronmaschinen mit Schleifringläufern, die an Umrichtern betrieben werden, ist um ein Vielfaches höher belastet als bei normalen (50 Hz / 60 Hz) Betriebsbedingungen. Die hohe Frequenz, die Steilheit und der repetierende Charakter dieser Schaltimpulse können Teilentladungen in der Isolierung hervorrufen. Sehr stark davon betroffen ist die Läuferisolation, diese sollte entsprechend dieser starken Belastung ausgelegt werden. Umfassende Tests diesbezüglich sind in Form von Vergleichen zwischen 50 Hz / 60 Hz Versorgungsspannungen und Spannungen mit hoher Frequenz sehr gut in [72] beschrieben.

### 6.3 Umrichterbetriebenes Schutfördersystem

Nicht nur die Windkraft ist ein Einsatzgebiet von Maschinen-Umriecherkombinationen, in vielen Bereichen der Industrie werden drehzahlvariable Anlagen benötigt. Ein weiteres Beispiel das in dieser Arbeit angeführt werden soll, ist der Einsatz eines Mittelspannungsumrichters mit einem 6,6 kV Motor zur Geschwindigkeitsregelung eines Schutfördersystems.

Vattenfall Europe Mining AG beschloss in Welzow Süd in Deutschland ihr Schutfördersystem zu modernisieren. Der ursprüngliche Motor mit Schleifringläufer verursachte im Betrieb hohe Instandhaltungskosten und konnte nur lastabhängig Beschleunigen, aber er hatte noch keine Geschwindigkeitsregelung.

Der erste Schritt zur Lösung war, dass der existierende 6,6 kV Motor mit dem Allen-Bradley® PowerFlex® 7000 Mittelspannungs-AC-Frequenzumrichter in einem Labor auf Umriechertauglichkeit getestet wurde. Das Ergebnis war, dass es keine Einwände gegen einen Betrieb des Motors mit diesem Frequenzumrichter gab. Der Motor wurde saniert und der Frequenzumrichter wurde ohne Trenntransformator, also in der Direct-to-Drive Technologie, an diesem betrieben [73].

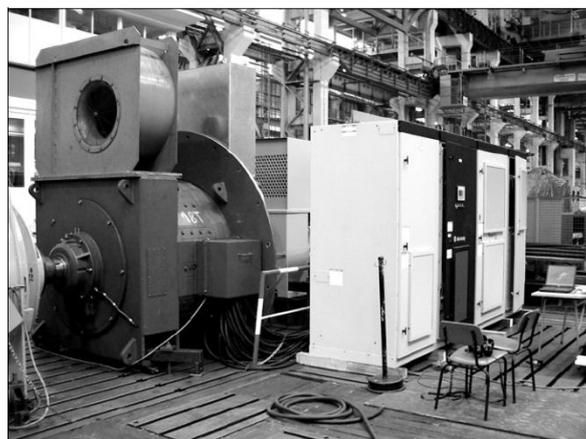


Abbildung 6.13 Aufbau Frequenzumrichter und Motor während den Tests [73]

Der PowerFlex® 7000 verwendet als Leistungshalbleiter SGCTs. Das System besitzt im Vergleich zu anderen Umriechertopologien die kleinste Anzahl an Umriecherschaltgeräten. Die Leistungsstruktur ist sicherungslos, rückspeisefähig und verwendet im Gleichstromzwischenkreis strombegrenzende Drosseln [74], [75].

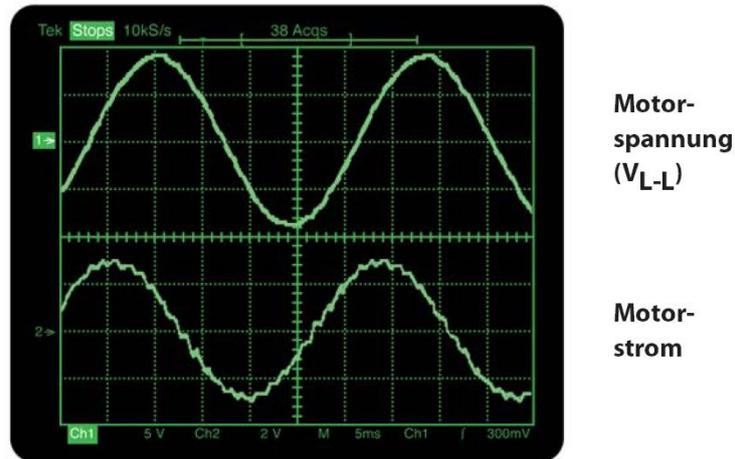


Abbildung 6.14 Motorspannung bzw. Motorstrom [74]

Abbildung 6.14 zeigt die Motorspannung bzw. den Motorstrom. Das PWM Schaltmuster des Umrichters reduziert die Oberwellen, die den Motor erreichen könnten, bei niedrigen Frequenzen. Die Kombination aus PWM Schaltmuster und einem Kondensator reduziert Oberwellen höherer Ordnung bei hohen Frequenzen [74].

#### 6.4 Lösungsansätze für den besseren Schutz des Generators/Motors vor TE

Wenn man einem Umrichter geeignete Filter vorschaltet, kann man durch Reduzierung der Steilheit der Umrichterimpulse oder durch Eliminierung von Spannungsspitzen erreichen, dass die Teilentladungseinsetzspannung hinaufgesetzt wird. Auf diese Weise kann man den Generator bzw. Motor vor einer frühzeitigen Alterung durch Teilentladungen schützen. In der Praxis eingesetzte Filtertechnologien sind dU/dt-Filter, LC-Filter, LCL-Filter und EMV-Filter. Um TE in Generatorisierungen vermeiden zu können werden dU/dt-Filter eingesetzt. Wie in Abbildung 6.5 ersichtlich, ist vor dem generatorseitigen bzw. motorseitigen Stromrichter ein dU/dt-Filter hineingeschaltet. Dieses Filter dient dazu, die Steilheit der Spannung an den Generatorklemmen zu reduzieren. Es begrenzt außerdem die maximale Amplitude der transienten Spannungsspitzen auf einen zulässigen Wert. Um Verluste zu minimieren, sollten die Filterkapazitäten relativ klein gewählt werden, damit die Filterströme auf ein Minimum reduziert werden. Auch das Auftreten von Lagerströmen kann mit diesem Filter reduziert werden [76], [77], [78], [79], [80], [81].

## 7 Resümee und Ausblick

***„Wer nicht an die Zukunft denkt wird bald Sorgen haben“***

***(Konfuzius 551-479 v. Chr.)***

Die Auswirkungen von Teilentladungen auf die verschiedenen Arten der Isolierungsformen wurde eingehend besprochen, dabei stellte sich heraus, dass nicht alle auftretenden Teilentladungen schädlich auf eine Hochspannungsisolierung wirken, da Glimmer als Isolationsmaterial teilentladungsbeständig ist. Doch alle Arten von Ablösung der Isolierung oder schlechte Kontakte zwischen leitenden Schichten und dem Blechpaket der elektrischen Maschine bergen in Bezug auf die fortschreitende Alterung und Lebensdauerverkürzung, ein großes Risiko.

Der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit liegt auf den Möglichkeiten der Teilentladungsdiagnostik bei umrichterbetriebenen rotierenden elektrischen Maschinen. Der Leistungselektronik, als Schlüsseltechnologie für drehzahlvariable Antriebe, wurde ein Teil dieser Arbeit gewidmet, dabei wurden Halbleiterschalter die in verschiedenen Arten von eingesetzten Frequenzumrichtern vorkommen können genauer erklärt. Durch den Betrieb einer Maschine mit einem Umrichter wird das Isolationssystem aufgrund der auftretenden schnellen, repetierenden Spannungsimpulse, die eine sehr kleine Anstiegszeit aufweisen, sehr stark beansprucht. Diese kurzen Anstiegszeiten können zu Überspannungen und Wanderwellen innerhalb der Isolierung führen und es können verstärkt Teilentladungen auftreten. Diese Teilentladungen können gravierende Schäden im Isoliersystem von elektrischen rotierenden Maschinen verursachen. Dieser Umstand kann zu einer frühzeitigen Alterung der Isolierung führen und damit die Lebensdauer einer Maschine erheblich herabsetzen.

Auf das Teilentladungsdiagnoseverfahren nach IEC/TS 61934 wurde genauer eingegangen und ein Messverfahren beschrieben, das unterschiedliche Kurvenformen der Versorgungsspannung miteinander vergleicht. Dabei wurde festgestellt, dass bei impulsförmiger, repetierender Spannung das Teilentladungsvorkommen im abfallenden Teil des Impulses vorkommt. Weiters konnte festgestellt werden, dass die Teilentladungseinsetzspannung sinkt je höher  $dU/dt$  ist.

Ein Messsystem, welches von RM-Prüftechnik am Markt angeboten wird, ist das DWX-05PD. Es arbeitet mit einem Impulsgenerator und einem Bandpass-Mikrowellensensor, der das Teilentladungssignal erfasst und verstärkt und danach mittels Analog-Digital-Wandlung weiterverarbeitet. Die Vorteile dieses Systems liegen eindeutig darin, dass das Messsignal berührungslos und sehr störungsarm erfasst werden kann. Gemessen wird die RPDIV bzw. die RPDEV. Entwickelt wurde dieses Messsystem für Typ I Isolierungen, da aber der Impulsgenerator auch in einer 20 kV Ausführung bestellt werden kann ist auch die Messung einzelner Formspulen, die üblicherweise als Typ II Isolierung ausgeführt sind, möglich.

Ein weiteres Messsystem wurde in Japan entwickelt und an Motoretten erfolgreich getestet. Es hat den Vorteil, dass es mit verschiedenen Sensoren kompatibel ist. Allerdings ist auch dieses Messsystem nur für Isolierungen des Typ I geeignet.

Nicht immer liefern die Messsysteme eindeutige Patterns, die den Ort und die Art der Teilentladungen bestimmt. In der DIN CLC/TS 60034-27 sind im Anhang E Beispiele von Teilentladungsmuster vorgestellt, an die sich der Anwender halten kann. Diese können jedoch abhängig von der Art der Maschine, des Isolationstyps und den Umgebungsbedingungen (Störungen) stark variieren. Um ein Teilentladungsmuster richtig interpretieren zu können, ist nach wie vor viel Erfahrung und eine gute Dokumentation von schon gemessenen TE notwendig. Im Falle von Maschinen die mit einem Frequenzumrichter betrieben werden wird die Interpretation noch zusätzlich durch die repetierend auftretenden Spannungsimpulse die von einem Umrichter ausgehen erschwert. Es ist notwendig diese Spannungsimpulse geeignet zu filtern. Methoden dazu werden in der DIN IEC/TS 61934 beschrieben.

In Zukunft werden drehzahlvariable Antriebe noch wichtiger werden, da die Forderung nach Regelung von Antriebssystemen beispielsweise in der Windkraft oder in der Bahntechnik immer höher werden wird. Es wird immer notwendiger werden die Isoliersysteme aber auch das Schaltverhalten der Umrichter zu verbessern. Ein weiterer Schritt in der Messtechnik wäre auch die Entwicklung von Online-Messsystemen, die Teilentladungen bei schnellen repetierenden Spannungsimpulsen messen und so die Maschine im Betrieb überwachen können.

## **8 Zusammenfassung**

Die Thematik dieser Arbeit ist die Teilentladungsdiagnostik bei umrichterbetriebenen rotierenden elektrischen Maschinen. Eingangs wurden einige wichtige Begriffe definiert und die Grundlagen zu Teilentladungen in elektrischen Betriebsmitteln behandelt, wobei das Teilentladungsverhalten hauptsächlich für feste Isolierstoffe besprochen wurde. Um das Teilentladungsverhalten in komplexen Isolierstoffen darstellen zu können, wurden diese Materialien im nächsten Kapitel beschrieben. Weiters wurden die Arten von Teilentladungen erläutert und deren Auswirkungen auf feste Isolierstoffe. Ein wichtiger Punkt ist auch das Alterungsverhalten dieser Werkstoffe und die damit verbundene Teilentladungsintensität.

Um die Detektion von Teilentladungen in den verschiedenen Maschinenisolierungen besser verstehen zu können, wurden anhand von Beispielen umrichterbetriebene Anlagen vorgestellt und damit auch die Möglichkeit und Problematik der Teilentladungsdiagnostik. Des Weiteren wurden die derzeit angewandten Verfahren zur Teilentladungsdiagnostik erläutert und die Ergebnisse von Messungen dargestellt. Um die ganze Problematik besser überschauen zu können, wurden auch die verschiedenen derzeit eingesetzten leistungselektronischen Halbleiterschalter und ihre Auswirkungen auf die Isoliersysteme von rotierenden elektrischen Maschinen vorgestellt.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden zwei verschiedene praxisorientierte Einsatzmöglichkeiten von Maschinen-Umrichterkombinationen und Lösungsansätze für den Schutz eines Generators bzw. Motors bei Umrichterbetrieb.

Zuletzt wurde noch einmal in einem kurzen Abschnitt die Problematik der Teilentladungsdiagnose, die Auswirkungen von Teilentladungen auf Isoliersysteme und diverse Lösungsvorschläge diskutiert.

## 9 Abkürzungsverzeichnis

ASM	Asynchronmaschine
BPF	Bandpassfilter
DGA	Dissolved Gas Analysis
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESR	Eingangsstromrichter
FU	Frequenzumrichter
GTO	Gate-Turn-Off Thyristor
HF	High Frequency
HFCT	Hochfrequenzwandler
HV	High Voltage (Hochspannung)
IGBT	Integrated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
IWR	Stromzwischenkreisumrichter
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PD	Partial Discharge (Teilentladung)
PDIV	Partial Discharge Inception Voltage (Teilentladungseinsetzspannung)
PE	Polyethylen
PEI	Einschichtlackisoliert
PEN	Polyethylennaphtalat
PET	Polyethylenteraphat
PWM	Pulsweitenmodulation

PWR	Spannungszwischenkreisumrichter mit Pulsbreitensteuerung
RFCT	Radio Frequency Current Transformer
RPDEV	Repetitive Partial Discharge Extinction Voltage (wiederkehrende Teilentladungsaussetzspannung)
RPDIV	Repetitive Partial Discharge Inception Voltage (wiederkehrende Teilentladungseinsetzspannung)
RR	Resin Rich
SGCT	Symmetric Gate Commutated Thyristor
SM	Synchronmaschine
TE	Teilentladung
UHF	Ultra High Frequency
UWB	Ultra Wide Band
UWR	Spannungszwischenkreisumrichter mit Blocktaktung
VHF	Very High Frequency
VPE	Vernetztes Polyethylen
VPI	Vacuum Pressure Impregnation
WR	Wechselrichter
ZK	Zwischenkreis

## 10 Symbolverzeichnis

$U_z$	Zündspannung
$U_L$	Löschspannung
$C$	Kapazität
$F$	Funkenstrecke
$R$	ohmscher Widerstand
$q$	Ladung
$pC$	pico Coulomb
$nC$	nano Coulomb
$T_{bd}$	time to breakdown
$T_{tEinsatz}$	Einsatzzeit der electrical trees
$T_{tFortpf}$	Tree-Fortpflanzungszeit
$U_0$	Hilfsspannung bei GTO
$T$	Transistor
$U_d$	Zwischenkreisspannung bei einem Umrichter
$t_r$	Anstiegszeit
$t_f$	Abfallzeit
$t_w$	Pulsweite
$t_c$	Periodendauer
$U_{max}$	höchster Wert einer Überspannung
$U_a$	Wert der Dauerbetriebsimpulsspannung
$U_b$	Überschwingen
$f$	Frequenz
$dU/dt$	mittlere Änderungsrate der Spannung
$U_{inc}$	Teilentladungseinsetzspannung

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] DIN IEC/TS 61934, *Elektrische Isolierstoffe und -systeme - Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit*, DKE, 2011.
- [2] C. Sumeder, *Habilitation Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik*, Graz, 2010 2. Auflage.
- [3] DIN EN 60270, *Hochspannungs-Prüftechnik, Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000)*, CENELEC, März 2001.
- [4] A. Küchler, *Hochspannungstechnik Grundlagen-Technologie-Anwendungen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1997,2004,2009 3. Auflage.
- [5] B. Florkowska, M. Florkowski und P. Zydron, „Measurements and analysis of partial discharges in high voltage insulating systems at exploitation stresses,“ *Przeglad Elektrotechniczny*, April 2010.
- [6] R. Porzel, E. Neudert und M. Sturm, *Diagnostik der Elektrischen Energietechnik, Techniken und Prozeduren zur Zustandsanalyse von elektrotechnischen Betriebsmitteln*, expert verlag, 1996.
- [7] K. Dieter, *Teilentladungen in Betriebsmittel der Energietechnik*, vde verlag, 1993.
- [8] A. J. Schwab, *Hochspannungsmesstechnik - Messgeräte und Messverfahren*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [9] M. Muhr, S. Pack, R. Schwarz und B. Körbler, „Monitoring und Diagnostik in der Hochspannungstechnik,“ *e&i elektrotechnik und informationstechnik*, Mai 2002.
- [10] F. A. Gartler, *Methoden der Teilentladungsmessung*, Graz: Diplomarbeit TU Graz, 2001.
- [11] C. Sumeder, M. Muhr, M. Marketz, C. Rupp und M. Krüger, „Unconventional Diagnostic Methods for Testing Generator Stator Windings,“ *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 18-24, September/October 2009.

- [12] R. Schwarz, Teilentladungen in der elektrischen Energietechnik, Vorlesungsskriptum, SS 2012.
- [13] X. Li, C. Li, W. Wang, W. Wan und X. Shen, „Application of UHF on Partial Discharge Detection in Generator Stator Bar,“ IEEE, International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, France July 5-8, 2004.
- [14] L. Hofstätter, Optische Erfassung von teilentladungen, Graz: Diplomarbeit, TU Graz, Mai 2001.
- [15] „www. trafo-filtertechnik.de,“ WS Industrietechnik GmbH. [Online]. [Zugriff am 04 09 2012].
- [16] DIN IEC/TS 60044-18-41 , *Drehende elektrische Maschinen- Teil 18-41: Qualifizierung und Typprüfung elektrischer Isoliersysteme vom Typ I in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden*, 2006.
- [17] DIN CLC/TS 60034-18-42 , *Drehende elektrische Maschinen - Teil 18-42: Qualifizierungs- und Abnahmeprüfungen teilentladungsresistenter Isoliersysteme (Typ II) von drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden*, Deutsche Fassung 2011.
- [18] A. Cavallini, D. Fabiani und G. C. Montanari, „A Novel Methode to Diagnose PWM-fed Induction Motors,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.15, No. 5 October 2008.
- [19] P. Marek, Neues Trägermaterial für Hochspannungsisolierungen, Graz: Dissertation TU Graz, 2006.
- [20] M. K. Stranges, G. C. Stone und D. L. Bogh, „New specs for ASD Motors - Exploring the IEC 60034-18-41 and IEC 600034-18-42 Technical Specifications for inverter duty Motor Insulation,“ *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 37-42, January/February 2007.
- [21] R. Vogelsang, T. Weiers, K. Fröhlich und R. Brütsch, „Electrical Breakdown in High-Voltage Winding Insulations of Different Manufacturing Qualities,“ *DEIS, IEEE Elektrical Insulation Magazine*, pp. 6-12, Vol. 22, No.3 May/June 2006.

- [22] M. Leijon, S. G. Johansson, F. Owman, S. Alfredson, T. Karlsson, S. Lindahl, C. Parkegren und S. Thoren, „Powerformer™-Experiences from the Application of Extruded Solid Dielectric Cables in the Stator Winding of Rotating Machines,“ *IEEE*, 2000.
- [23] M. Leijon, M. Dahlgren, L. Walfridsson, L. Ming und A. Jaksts, „A Recent Development in the Electrical Insulation Systems of Generators and Transformers,“ *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 10-15, Vol.17, No. 3 May/June 2001.
- [24] K. Müller, Entwicklung und Anwendung eines Messsystems zur Erfassung von Teilentladungen bei an Frequenzumrichtern betriebenen elektrischen Maschinen, Universität Duisburg Essen: Dissertation, 2003.
- [25] DIN CLC/TS 60034-27, *Drehende elektrische Maschinen - Teil 27: Off-line-Teilentladungsmessungen an der Statorwicklungsisolierung drehender Maschinen*, Berlin: VDE Verlag, 2011.
- [26] R. Bruetsch, K. Froehlich, T. Weiers, R. Vogelsang und M. Tari, „High Voltage Insulation Failure Mechanisms,“ *IEEE*, 2008.
- [27] R. Vogelsang, R. Brütsch und K. Fröhlich, „The effect of tape overlappings in winding insulations on tree growth and breakdown time,“ in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2004.
- [28] R. Vogelsang, T. Farr und K. Fröhlich, „The Effect of Barriers on Electrical Tree Propagation in Composite Insulation Materials,“ *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. Vol.13, No. 1, February 2006.
- [29] Zhidong Jia, Yanpeng Hao und Hengkun Xie, „The Degradation Assessment of Epoxy/Mica Insulation under Multi-stresses Aging,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. Vol. 13, No.1, February 2006.
- [30] B. Florkowska, J. Roehrich, P. Zydron und M. Florkowski, „Partial discharge characteristics of enameled wire of electric machine winding under exploitation stresses,“ in *International Conference on Solid Dielectrics*, Potsdam Germany, 2010.
- [31] B. Florkowska, P. Zydron und M. Florkowski, *Effects of Inverter Pulses on the Electrical Insulation System of Motors*, Poland: IEEE, 2011.

- [32] M. Q. Nguyen, D. Malec, D. Mary, P. Werynski, B. Gornicka, L. Therese und P. Guillot, „Investigations on Dielectric Properties of Enameled Wires with Nanofilled Varnish for Rotating Machines Fed by Inverters,“ in *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal Canada , 31. May-3.June, 2009.
- [33] E. Lindell, T. Bengtsson, J. Blennow und S. M. Gubanski, „Measurement of Partial Discharges at Rapidly Changing Voltages,“ *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 15, No. 3 June 2008.
- [34] J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik-Bauelemente, Schaltungen, Systeme, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 5. Auflage 2011.
- [35] IEC/TS 60034-25, *Drehende elektrische Maschinen - Teil 25: Leitfaden für den Entwurf und das Betriebsverhalten von Drehstrommotoren, die speziell für Umrichterbetrieb bemessen sind*, CENELEC Brüssel, 2007.
- [36] P. F. Brosch, *Moderne Stromrichterantriebe - Leistungselektronik und Maschinen*, Hannover: Vogel Buchverlag, 4. Auflage 2002.
- [37] R. Felderhoff und U. Busch, *Leistungselektronik*, Düsseldorf: Hanser, 4. Auflage 2006.
- [38] P. K. Steimer, H. E. Grüning, J. Werninger, E. Carroll, S. Klaka und S. Lindner, „ABB Power and productivity for a better world,“ "IGCT - eine neue, zukunftsweisende Technik für kostengünstige Hochleistungs-Umrichter". [Online]. Available: [www.abb.at](http://www.abb.at). [Zugriff am 1 September 2012].
- [39] A. Rockwell, *Power Flex 700, Mittelspannungs-Frequenzumrichter (Luftgekühlt)*, Benutzerhandbuch, Juni 2002.
- [40] Weber, Andre; Kern, Pascal; Dalibor, Thomas; ABB Semiconductors AG, „Rückwärts blockierende IGCTs,“ October 2000. [Online]. Available: [www.5scomponents.com/pdf/fr01aw4.pdf](http://www.5scomponents.com/pdf/fr01aw4.pdf). [Zugriff am 28 September 2012].
- [41] N. Zargari, S. Rizzo, Y. Hiao, H. Iwamoto, K. Sato und J. Donlon, „A New Current Source Converter Using A Symmetric Gate Commutated Thyristor (SGCT),“ IEEE, 2001.

- [42] D. Schröder, Leistungselektronische Schaltungen - Funktion, Auslegung und Anwendung, München: Springer Verlag, 2. Auflage 2008.
- [43] B. Florkowska, M. Florkowski, J. Furgal, J. Roehrich und P. Zydron, „The voltage stresses of insulation systems under PWM inverter supplies,“ in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, IEEE, 2009.
- [44] S. Grzybowski, C. D. Taylor und S. R. Chalise, „Electrical Degradation Study of Machine Winding Insulation,“ in *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing China, IEEE, 2008.
- [45] M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck und M. Eberhardt, „Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors,“ *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. Vol. 47, No. 2, April 2000.
- [46] B. Florkowska, P. Zydron, J. Roehrich und M. Florkowski, „Performance of cables and machines insulation at various parameters of impulse Stimulus,“ IEEE, 2010.
- [47] F. Gustavino, A. Dardano und E. Torello, „Measuring Partial Discharges under Pulsed Voltage Conditions,“ IEEE, 2008.
- [48] S. Ul Haq, S. H. Jayaram und E. A. Cherney, „Insulation Problems in Medium-Voltage Stator Coils Under Fast Repetitive Voltage Pulses,“ *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. vol. 44, No. 4, July/August 2008.
- [49] F. Gustavino, A. Dardano, E. Torello und G. F. Massa, „PD Activity Inside Random Wire Wound Motor Stator Insulation and early Failures: a Case Study Analysis,“ IEEE, 2011.
- [50] M. Greiner, „Regulierung von UWB Spektrum-Management und Koexistenz,“ 11 November 2004. [Online]. Available: <http://www.vde.com/de/fg/ITG/Arbeitsgebiete/Fachbereich%207/Documents/MCMS/0>. [Zugriff am 24 Jänner 2013].
- [51] R. Mannhaupt und K. Umezu, „Ein neues Verfahren zur automatischen Gewinnung der Teilentladungseinsetz- und Aussetzspannung an elektrischen Wicklungen nach IEC TS 60034-18-41 und IEC TS 61934,“ 2009. [Online]. Available: [www.rm-](http://www.rm-)

- prüftechnik.de. [Zugriff am 29 September 2012].
- [52] H. Muto, Y. Kaneda, H. Aoki und O. Hamamoto, „On-line PD monitoring system for rotating machines using narrow band dedection of EM wave in GHz range,“ in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis/IEEE*, Beijing China, 2008.
- [53] „RM Prüftechnik,“ Prüfsysteme für elektrische Maschinen und Wicklungen. [Online]. [Zugriff am 29 September 2012].
- [54] G. C. Stone und I. Culbert, „Partial Discharge Testing of Random Wound Stators During Short Risetime Voltage Surges,“ in *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal Canada, 2009.
- [55] M. Hikita, T. Ueno, Y. Kudo, M. Kozako, H. Ogawa, T. Sakurai, K. Nakayama, T. Yoshimitsu, T. Hirose und S. Hiroshima, *Development of Repetitive Voltage Impulse Generator and Automatic Repetitive PD Inception Voltage Measurement System for Testing Inverter-fed Motor Insulation*, Japan: IEEE, 2012.
- [56] DIN IEC 60034-18-21, *Drehende elektrische Maschinen-Teil 18-21: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen - Prüfverfahren für Runddrahtwicklungen - Thermische Bewertung und Klassifizierung*, DKE, 2008.
- [57] M. Kaufhold, „Wicklungsisolierung umrichter gespeister rotierender Maschinen - Belastung, Festigkeit, Qualifizierung,“ *ETG-Fachbericht, Isoliersysteme bei repetierenden impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen*, pp. 65-79, 8 Juli 2009.
- [58] Schaffner Gruppe, „Wind Energie Netzverträglichkeit und Zuverlässigkeit von Windenergieanlagen,“ 01 Oktober 2012. [Online]. Available: [www.schaffner.ch/de/downloads.html](http://www.schaffner.ch/de/downloads.html). [Zugriff am 28 August 2012].
- [59] L. H. Hansen, P. H. Madsen, F. Blaabjerg, H. C. Christensen, U. Lindhard und K. Eskildsen, „Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines,“ in *IECON`01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2001.
- [60] S. Müller, M. Deicke und W. Rick, „Doubly fed Induction Generatorsystems for Wind Turbines,“ *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 26-33, May/June 2002.

- [61] „Wikipedia - Die freie Enklopädie,“ [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org>. [Zugriff am 08 Oktober 2012].
- [62] E. Hau, Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, Kraling: Springer 4. Auflage, 2008.
- [63] M. Eichler, „Umrichter für den Offshore-Einsatz - Anbindung von 5-MW-Offshore-Anlagen mit dem PCS 6000 Wind,“ 2011 Oktober 2012. [Online]. Available: <http://www.abb.at>. [Zugriff am 28 August 2012].
- [64] R. Grinberg, S. Ebner und O. Apeldoorn, „Reliability in Medium Voltage Converters for Wind Turbines,“ 02 Oktober 2012. [Online]. Available: <http://www.abb.at>. [Zugriff am 07 Oktober 2012].
- [65] B. Backlund und S. Ebner, „The wind power converter for tomorrow is already here,“ 21 Oktober 2011. [Online]. Available: <http://www.abb.at>. [Zugriff am 7 Oktober 2012].
- [66] „Stiftung Offshore Windenergie,“ [Online]. Available: <http://www.offshore-stiftung.com>. [Zugriff am 07 Oktober 2012].
- [67] M. Nyfeler, „Leistungselektronik - Pionierarbeit auf hoher See,“ Jänner 2010. [Online]. Available: <http://www.abb.com>. [Zugriff am 08 August 2012].
- [68] G. Ofner, P. Handgruber und R. Seebacher, „Doubly fed induction generators for wind turbines - modeling the steady state,“ *Elektrotechnik und Informationstechnik*, pp. 174-180, Heft 5 2005.
- [69] Vacon, „A driving force in Wind Energy,“ Produktbroschüre zur Verfügung gestellt von der Firma Vacon, 2012.
- [70] G. Gao und W. Chen, „Design Challenges of Wind Turbine Generators,“ in *IEEE Electrical Insulation Conference*, Montreal, QC, Canada, 2009.
- [71] K. Alewine und W. Chen, „A Review of Electrical Winding Failures in Wind Turbine Generators,“ *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 8-13, July/August 2012.
- [72] W. Chen und G. Gao, „A Review of New Insulation Development for Wind Generator Applications,“ IEEE, Round Rock, Texas, USA, 2012.
- [73] B. Loose, T. Paetzold und S. Kroschk, „Cutting Investment costs by using a new

solution of speed controlled belt conveyer with available medium voltage 6 kV-slipping-motors," *Gornictwo i Geoinzynieria*, pp. 437-442, 2007.

[74] A. Rockwell, *Auswahlanleitung für Mittelspannungs-Frequenzumrichter*, 2012.

[75] F. DeWinter, N. Zargari, S. Rizzo und Y. Xiao, „Medium Voltage Drives: Are Isolation Transformers Required?“, IEEE, 2002.

[76] M. Yasin Dali, U. Rädcl, T. Ellinger, J. Büttner und J. Petzoldt, „Vergleich zweier Topologien von Windkraftanlagen auf der Basis einer permanenterregten Synchronmaschine sowie die Realisierung einer MPP-Regelung für das Gesamtsystem,“ in *51st Internationales Wissenschaftliches Kolloquium*, Technische Universität Ilmenau, September 2006.

[77] „Schaffner - Energy efficiency and reliability,“ [Online]. Available: <http://www.schaffner.ch>.

[78] T. Laczynski, „Prädiktiver Stromregler für umrichter gespeiste Mittelspannungsantriebe,“ *Jahresbericht des Instituts für Antriebssysteme und Leistungselektronik der Leibniz Universität Hannover*, pp. 32-33, 2006/2007.

[79] Schaffner, *LC Sine Wave Filter for Motor Drives*, <http://www.schaffner.ch>, 2012.

[80] M. Winkelkemper, Reduzierung von Zwischenkreiskapazitäten in Frequenzumrichtern für Niederspannungsantriebe, Berlin: Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 2005.

[81] Schaffner, *High-current Three-phase EMC/RFI Filter*, Datenblatt, 2012.

## 12 Anhang

### 12.1 Anhang 1: Technische Daten des Mittelspannungs-Frequenzumrichters PowerFlex 7000 von Rockwell-Automation [39]

#### Beschreibung der Leistungsmerkmale

##### Entwickelt für maximale Betriebszeit, einfache Handhabung und niedrige Betriebskosten

- Vollständig isolierte und getrennte Bereiche für Niederspannung und Mittelspannung
- LWL-Isolation für Kommunikation zum Gleichrichter und Umrichter
- Mechanische und elektrische Verriegelungen zwischen Frequenzumrichter und Eingangstrenner
- Versetzt platzierte Belüftungsöffnungen in den Türen des Frequenzumrichters gewährleisten die Sicherheit des Bedieners
- Not-Halt-Schaltung mit Sicherheitsrelais
- Leistungshalbleiter (SGCT) mit einem Nennwert von 6500 Volt reduzieren die Anzahl der Komponenten und der Verbindungen, die Struktur des Leistungsteils wird vereinfacht
- SGCT hat einen extrem niedrigen FIT-Wert (Ausfallrate): 100 pro Milliarde Betriebsstunden
- Die Leistungsminderung der elektrischen Komponenten reduziert die Spannung und die Wärmebelastung
- Einwählzugriff per Modem
- >99,9-prozentige Verfügbarkeit
- Patentiertes PowerCage-Modul erlaubt den Geräte austausch in weniger als 5 Minuten ohne Spezialwerkzeug – bei luftgekühlten und flüssigkeitsgekühlten Varianten
- Einfach zu benutzendes Bedienerterminal mit interaktivem Konfigurationsassistenten für schnelle Inbetriebnahme, problemlosen Betrieb und weniger Ausfallzeiten
- Kabelanschlussschrank für einfachen Zugang zu Netz- und Motorkabelanschlüssen, Kabelführung ist oben und unten möglich
- PC-Tools (DriveTools, DriveExplorer) unterstützen Programmierung, Überwachung und Fehlersuche
- Premier Integration integriert Funktionen zur Frequenzumrichterkonfiguration mit RSLogix™ 5000 zur Beschleunigung der Einrichtung um bis zu 70 %
- Das Frequenzumrichter-Identitätsmodul erlaubt die Vorabprogrammierung kundenspezifischer Frequenzumrichter- und Anwendungsparameter für schnellere Inbetriebnahmen
- Bedienerchnittstelle für komfortable Nutzung am Niederspannungszugang montiert, komplett mit LCD-Bildschirm (16 Zeilen mit je 40 Zeichen) und Konfigurationsassistenten
- Standardbedienelemente mit Funktionen wie Start, Stopp, Not-Halt-Schalter, Auswahlschalter für lokalen bzw. dezentralen Betrieb und Drehzahlpotentiometer
- Digitalanzeigen in Balkenform für Ausgangsstrom, Spannung, Drehzahl und Last an der Bedienerchnittstelle
- Integrierte Zwischenkreisdrossel macht Halbleitersicherungen überflüssig
- Vollständig digitale Steuerung mit digitalen Signalprozessoren (DSP) und feldprogrammierbaren Gate-Arrays (FPGA) für erweiterte Fehlerverwaltung, Gate-Ansteuerung und Diagnose sowie Synchronisierungssteuerung für den Frequenzumrichter
- Sensorlose Vektorsteuerung, volle Vektorsteuerung mit Drehzahlrückführung ist optional erhältlich
- Trendpuffer für 16 Variablen (Einzel- oder Mehrfachimpuls)
- 16 Digitaleingänge und 16 Digitalausgänge auf externer E/A-Platine
- Integrierte Programmierung (Update der Firmware via Laptop)
- Vier (4) Testmodi inklusive Niederspannungsprüfung der Gate-Ansteuerung
- Nahezu sinusförmige Strom- und Spannungskurvenformen für den Betrieb aller vorhandenen und neuen Motoren
- Optionaler AFE- oder 18-Puls-Gleichrichter für maximale Flexibilität bei der Reduzierung der Oberwellen auf Netzseite
- Elektronischer Frequenzumrichter- und Motorüberlastschutz macht ein separates Schutzrelais überflüssig
- 5-Zyklus-Netzüberbrückung (erweiterte Netzüberbrückung mit optionaler USV) sorgt für Verfügbarkeit der Antriebssteuerung bei einem Stromausfall
- Standardmäßige Rückspeisefähigkeit für bessere Prozesssteuerung (Motorbremse) und Energieersparnis (kontinuierlicher Betrieb im Rückspeisemodus möglich)

## NENNWERTE

Beschreibung	Luftgekühlt	Flüssigkeitsgekühlt
Nennleistung	150–3000 kW (200–5500 hp)	2240–6700 kW (3000–9000 hp)
Motortyp	Induktion oder synchron	
Eingangsspannungsbereich	2400 V, 3300 V, 4160 V, 6600 V	4160 V, 6600 V, 6900 V <sup>①</sup>
Eingangsspannungstoleranz	± 10 % der Netzennspannung	
Spannungseinbruch	-30 %	
Netzüberbrückung bei Steuerspannungsverlust	5 Zyklen (Standard), >5 Zyklen (optionale USV)	
Eingangsschutz	Überspannungsschutz – AFE-Gleichrichter/Metalloxidvaristor (MOV) – 18P	
Eingangsfrequenz	50/60 Hz, ± 5 %	
Eingangskurzschlußstromdauer	5 Zyklen	
Kurzschlußstrom	2400–6600 V (25 kA eff. SYM)	
Basisstoßspannungspegel (bei einer Höhe von 1000 m (3300 Fuß))	50 kV	45 kV
Sammelschienendesign	Kupfer, verzinkt	
Erdungsschiene	Kupfer, verzinkt 6 x 51 mm (¼ x 2 Zoll)	
Verdrahtungskanal für Kundensteuerung	Separat und isoliert	
Eingangsschalter (optional)	Vakuumschütz mit abgesichertem Trennschalter oder Leistungsschalter	
Eingangsimpedanz	Trenntransformator oder Netzdrossel	
Ausgangsspannung	0–2300 V, 0–3300 V, 0–4160 V, 0–6000 V, 0–6300 V, 0–6600 V	0–4160 V, 0–6600 V, 0–6900 V
Steuerspannung	220/240 V oder 110/120 V, 1 Phase, 50/60 Hz (20 A)	208–575 V, 3 Phasen, 50/60 Hz

① Für die Varianten mit 2300 V, 3300 V und 6900 V erhalten Sie weitere Informationen ggf. von der Fabrik.

## AUFBAU

Beschreibung	Luftgekühlt	Flüssigkeitsgekühlt
Umrichterdesign	Pulsweitenmodulation	
Halbleitertyp	SGCT (Symmetrical Gate Commutated Thyristor)	
Fehlermodus des Leistungshalbleiters	Kein Bruch, kein Lichtbogen	
Ausfallrate des Leistungshalbleiters (FIT)	100 pro 1 Milliarde Betriebsstunden	
Kühlung der Leistungshalbleiter	Beidseitig, niedrige Wärmebelastung	
Leistungshalbleiterschaltfrequenz	420–540 Hz	
Anzahl der Inverter-SGCTs (pro Phase)	2 bei 2400 V, 4 bei 3300/4160 V, 6 bei 6600 V	4 bei 4160 V, 6 bei 6600/6900 V
Nennwert der SGCT-Spitzenperrspannung	6500 V pro Gerät	
Gleichrichterdesigns	AFE-Gleichrichter (AFE) oder 18-Puls	
Typischer Leitungsüberschwingungsanteil	<5 % Strom-THD (AFE-Gleichrichter)	
Typischer Leistungsfaktor	Auswählbar bis 1 (AFE-Gleichrichter)	
Gleichrichter- Leistungshalbleitertypen	SGCT (AFE-Gleichrichter), SCR (18-Puls-Gleichrichter)	
Fehlermodus des Gleichrichterleistungshalbleiters	Kein Bruch, kein Lichtbogen	
Ausfallrate des Gleichrichterleistungshalbleiters (FIT)	50 (SCR)/100 (SGCT) pro 1 Milliarde Betriebsstunden	
Anzahl der Gleichrichterleistungshalbleiter (pro Phase)	AFE: 2 bei 2400 V, 4 bei 3300/4160 V, 6 bei 6600 V 18-Puls: 6 für alle Spannungen	AFE: 4 bei 4160 V, 6 bei 6600 V 18-Puls: 6 für alle Spannungen
Nennwert der SCR-Spitzenperrspannung (pro Gerät)	18-Puls: 4500 V bei 2400 V, 3300 V, 4160 V 6500 V bei 6600 V	18-Puls: 4500 V bei 4160 V 6500 V bei 6600 V
Lichtwellenleiterschnittstelle	Gleichrichter – Umrichter – Schaltschrank (Warnung/Auslösung)	
Industrienormen	CSA, UL, IEC, NEMA, ANSI, IEEE	

## KÜHLUNG

Beschreibung	Luftgekühlt	Flüssigkeitsgekühlt
Kühlung	forcierte Luft	Flüssigkeit
Kühlmittel	–	Eisen- und Chlor-freies Ethylenglykol mit vollentsalztem Wasser
Spezifischer Leitwert des Kühlmittels	–	1–2 Mikrosiemens pro cm/Alarm/Auslösung
Wärmetauscher	–	Flüssigkeit an Luft, Flüssigkeit an Flüssigkeit

## LEISTUNG

Beschreibung	Luftgekühlt	Flüssigkeitsgekühlt
Ausgangsform an Motor	Sinusstrom/-spannung	
Mittelspannungsisolierung	Lichtwellenleiter	
Modulationstechniken	SHE (Selective Harmonic Elimination); PWM (Pulsweitenmodulation)	
Steuerungsverfahren	Digitaler sensorloser Direktvektor, Vollvektorsteuerung <i>mit</i> Tachometerfeedback (optional)	
Abstimmungsverfahren	Autotuning mit Setup-Assistent	
Bandbreite der Drehzahlregelung	0,1–15 Bogenmaß/Sekunde	
Drehmomentreaktionsbandbreite	20–100 Bogenmaß/Sekunde	
Nennwerte (Überlastnennwerte)	Normallast (variables Drehmoment): 110 % Überlast für 1 Minute, alle 10 Minuten Volllast (konstantes Drehmoment): 150 % Überlast für 1 Minute alle 10 Minuten	Normallast (variables Drehmoment): 110 % Überlast für 1 Minute alle 10 Minuten Volllast (konstantes Drehmoment): Fabrik kontaktieren
Drehzahlregelung	0,1 % <i>ohne</i> Tachometerfeedback 0,01–0,02 % <i>mit</i> Tachometerfeedback	
Beschleunigungs-/Verzögerungsbereich	Unabhängige Beschleunigung/Verzögerung – 1200 Sek.	
Beschleunigungs-/Verzögerungsrampenzeit	4 x Unabhängige Beschleunigung/Verzögerung	
S-Rampenzeit	2 x Unabhängige Beschleunigung/Verzögerung – 1200 Sek.	
Vermeidung kritischer Drehzahlen	3 x Unabhängig <i>mit</i> einstellbarer Bandbreite	
Blockierschutz	Verzögerung/Drehzahl	
Lastverlusterkennung	Einstellbarer Pegel, Verzögerung, Drehzahlsollwerte	
Steuerungsmodus	Drehzahl oder Drehmoment	
Strombegrenzung	Einstellbar (Motor, Rückspeisung)	
Ausgangsfrequenzbereich	0,2 Hz bis 85 Hz	
Typischer Frequenzrichter- Wirkungsgrad	>98,0 % (18-Puls) >97,5 % (AFE-Gleichrichter)	
Leistungsfaktor	AFE-Gleichrichter: 0,98 Min., 30–100 % Last 18-Puls-Gleichrichter mit PFCC: 0,95 Min., 20–100 % Last	
Richtlinien zu Oberschwingungen	IEEE 519-1992-konform	
Geräuschpegel des Frequenzrichters	<85 db(A) gemäß OSHA-Standard 3074	
Rückspeisefähigkeit	Keine zusätzliche Hardware oder Software erforderlich	
Fliegender Start	Ja vorwärts und rückwärts möglich	

## 12.2 Anhang 2: Technische Daten des VACON 8000 WIND [69]

RATED POWER	1.5 MW	2 MW
DIMENSIONS W x H x D (mm)	2406 x 2000 x 605*	2606 x 2000 x 605*
GRID RATED CURRENT	634 A	634 A
GRID MAXIMUM CURRENT	698 A	698 A
ROTOR RATED CURRENT	590 A	920 A
ROTOR SIDE MAXIMUM CURRENT	649 A	1012 A
GRID VOLTAGE	690 VAC, -10%...+10%	
GRID FREQUENCY	45-66 Hz	
SWITCHING FREQUENCY	1.5 – 3.6 kHz	
SPEED FEEDBACK	Incremental encoder	
TORQUE CORRESPONDING TIME	≤10 ms	
AMBIENT OPERATING TEMPERATURE	-10°C – +40°C**	
STORAGE ENVIRONMENT TEMPERATURE	-40°C – +70°C	
COOLING MODE	Air cooling	
ALTITUDE	≤1000 m***	
IP CLASSES	IP23/IP54	
FEATURES	Internal crowbar and crowbar resistor Internal input LCL and output filters Wide range of fieldbuses Automatic synchronization Overvoltage, overcurrent, input phase monitor	

OPTIONS	DESCRIPTION
+WCB	Main breaker (ACB)
+WPS	220V Aux. control power supply (UPS)
+WCC	ACB (stator) + MCCB (rotor)
+PAP	Arc protection system
+PLT	Lightning protection
+AT3	4 kVA auxiliary transformer

FIELDBUS OPTIONS	DESCRIPTION
OPT-C2	RS485 (Multiprotocol), Note: Modbus, N2
OPT-C3	Profibus DP
OPT-C4	Lonworks
OPT-C5	Profibus DP (D9-type connector)
OPT-C6	CanOpen (Slave)
OPT-C7	DeviceNet
OPT-C8	RS485, Note: Modbus, N2
OPT-CF	CAN/Euromap
OPT-CI	Modbus/TCP

\* D = 781 mm with fan housing

\*\* If the ambient operating temperature exceeds +40°C, the load capacity of the converter decreases.

\*\*\* If the altitude exceeds 1000 m, the load capacity of the converter decreases.

For further information, please contact Vacon.

### SIZES AND RATINGS

ORDER TYPE CODE	IP PROTECTION	DIMENSIONS W x H x D (mm)*	WEIGHT (kg)
NXE15006G2L1RSG_	IP23	2406 x 2000 x 605	2000
NXE15006G5L1RSG_	IP54	2406 x 2000 x 605	2000
NXE20006G2L1RSG_	IP23	2606 x 2000 x 605	2100
NXE20006G5L1RSG_	IP54	2606 x 2000 x 605	2100

## 12.3 Anhang 3: Technische Daten des LC Sine Wave Filter for Motor Drives FN 5040/FN 5045 von Schaffner [79]



- ! Smooth sine wave without voltage peaks
- ! Perfect motor protection
- ! Reduce bearing currents
- ! Motor frequency up to 200Hz
- ! Extended motor cable length capability

### Approvals



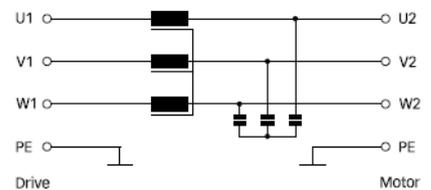
UL508C up to 260A. For use with AC or DC drives (power conversion equipment) only

**RoHS**

### Technical specifications

Nominal operating voltage:	3× 500 VAC ±10%
Motor frequency:	0 to 70 Hz (up to 200Hz with derating (see graph))
Switching frequency:	See filter selection table
Rated currents:	4.5 to 1200 A @ 45°C
Motor cable length:	Up to 2,000 m (see graph)
Impedance (uk):	8 to 10% @ 400 V, 50 Hz and rated current
Residual ripple voltage:	<5%
High potential test voltage:	P → E 3000 VAC, 1 minute P → P 2500 VAC, 1 minute
Protection category:	IP00 (FN 5040) IP20 (FN 5045)
Overload capability:	1.5× rated current for 1 minute, once per hour
Temperature range (operation and storage):	-25°C to +70°C (25/070/21)
Acoustic noise level:	<70dB(A) @ 1 m
Insulation class:	EIS 200
Flammability corresponding to:	UL 94V-2 or better
Design corresponding to:	IEC 61558-2-20
Environmental reliability:	IEC 60068-2-1
MTBF:	>100,000 hours
Approvals:	UL 508 pending
Declaration of conformity:	CE / LVD

### Typical electrical schematic



## 12.4 Anhang 4: Technische Daten von High-current Three-phase EMC/RFI Filters FN 3359 von Schaffner [81]



- Off-the-shelf high-power filter for rated currents up to 2500A
- HV versions designed for 690VAC IT power networks
- Busbars for convenient and universal electrical connection
- Protective plastic covers optionally available for unsurpassed safety

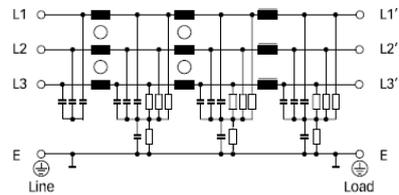
Approvals (filters up to 1000A)



### Technical specifications

Maximum continuous operating voltage:	3x 520/300VAC (FN 3359) 3x 690/400VAC (FN 3359HV)
Operating frequency:	dc to 60Hz
Rated currents:	150 to 2500A @ 50°C
High potential test voltage:	P → E 2700VDC for 2 sec (FN 3359) P → P 2150VDC for 2 sec (FN 3359) P → E 3100VDC for 2 sec (FN 3359HV) P → P 3000VDC for 2 sec (FN 3359HV)
Protection category:	IP00
Overload capability:	4x rated current at switch on, 1.5x rated current for 1 minute, once per hour
Temperature range (operation and storage):	-25°C to +100°C (25/100/21)
Flammability corresponding to:	UL 94V-2 or better
Design corresponding to:	UL 1283, CSA 22.2 No. 8 1986, IEC/EN 60939
MTBF @ 45°C/480V (Mil-HB-217F):	130,000 hours

### Typical electrical schematic



Note: HV versions without discharge resistor to ground.