

Einfluss kontinuierlich auftretender, steiler Spannungsimpulse auf das Durchschlagverhalten von Kabelisoliersystemen

E. Gockenbach

Einleitung

Die kontinuierliche Spannungsbeanspruchung von Kabelisoliersystemen bestand bisher aus der Beanspruchung durch eine Gleichspannung oder eine betriebsfrequente Wechselspannung in Abhängigkeit der verwendeten Spannungsart. Bei Wechselspannungssystemen war die sogenannte stationäre Überspannung als zusätzliche kontinuierliche Beanspruchung zu beachten, wenn in einem Netz mit isoliertem Sternpunkt ein einfacher Erdschluss auftrat und das Netz weiter betrieben wurde. Da die Dauer dieser Spannungsbeanspruchung sehr stark von der Netzkonfiguration und der Beseitigung des Fehlers abhängt, kann hier nur noch bedingt von einer kontinuierlichen Spannungsbeanspruchung ausgegangen werden. Alle diese Spannungsbeanspruchungen sind aber betriebsfrequent mit einer durch die Frequenz von 50 Hz oder 60 Hz vorgegebenen Spannungsteilheit. Steile Spannungsimpulse traten bisher nur bei Schalthandlungen, repräsentiert durch Schaltstoßspannungen, oder bei Blitzeinwirkungen, repräsentiert durch Blitzstoßspannungen, auf, wobei diese Beanspruchungsarten relativ selten auftreten und somit für die Beanspruchung der Kabelisolierung keine kontinuierliche Beanspruchung darstellen.

Die Entwicklung der Leistungselektronik in den letzten Jahrzehnten hat dazu geführt, dass in der Spannungsversorgung insbesondere von elektrischen Maschinen „insulated gate bipolar transistor“ IGBT eingesetzt werden, mit deren Hilfe die Spannung durch eine Puls-Weiten-Modulation (PWM) sehr einfach und kontinuierlich geregelt werden kann. Dieser Vorteil in der Spannungsregelung ist aber mit einer Erzeugung von steilen Spannungsimpulsen mit einer Frequenz im kHz-Bereich verknüpft, so dass für die Isoliersysteme eine neue Beanspruchung durch kontinuierlich auftretende, steile Spannungsimpulse generiert wurde und es bezüglich der Bewertung der Isoliersysteme von Bedeutung ist, wie sie sich auf Dauer unter dieser Beanspruchung verhalten. Da diese Leistungselektronik zuerst zur Speisung von elektrischen Maschinen eingesetzt wurde, liegen im wesentlichen Untersuchungen über das Durchschlagverhalten von Wicklungsisolierung von Niederspannungsmaschinen vor [1 – 2]. Bei Betrachtung des vollständigen Systems einer Motoransteuerung ist auch noch zu beachten, dass es bei steilen Spannungsimpulsen und nicht angepassten Impedanzen zusätzlich zu der steilen, impulsförmigen dauerhaften Beanspruchung durch die Leistungselektronik noch zu einer weiteren Erhöhung der Spannungsamplitude infolge von Reflexionen kommen kann, durch die dann die Beanspruchungsfeldstärke des Isoliersystems zusätzlich vergrößert wird.

Die Isoliersysteme der Geräte mit Leistungselektronik müssen so dimensioniert werden, dass sie der betrieblichen Spannungsbeanspruchung genügen und darüber hinaus eine Lebensdauer von vielen Jahren aufweisen. Da die Spannungszuführung in der Regel

durch Kabel erfolgt, ist es daher notwendig, das Verhalten der Kabelisolierung bei kontinuierlich auftretenden steilen Spannungsimpulsen zu kennen und nach Möglichkeit typische Parameter zu evaluieren, die eine Bewertung der Kabelisolierung im Kurzzeitbereich oder durch Kurzzeitprüfungen ermöglichen im Hinblick auf das Langzeitverhalten. Da die Leistungselektronik für eine puls-weiten-modulierte Spannungseinspeisung im Bereich der Niederspannung eingesetzt wird, erfolgten die Untersuchungen des Durchschlagverhaltens von Kabelisolierungen an Kabeln mit geringer Isolierungswandstärke im Bereich von wenigen Millimetern. Unter Beachtung des physikalischen und statistischen Volumeneffekts ist aber eine Übertragung auf größere Wandstärken der Kabelisolierung möglich [3].

Durchschlagverhalten in Abhängigkeit der Spannungsbeanspruchung

Zur Beurteilung der elektrischen Eigenschaften der Kabelisolierung wird in der Regel das Durchschlagverhalten als Bewertungskriterium herangezogen. Dieses Verhalten wird von den Eigenschaften des Isolierstoffes, von der elektrischen Feldstärke und Feldstärkeverteilung im Isolierstoff und von der Dauer der Spannungsbeanspruchung bestimmt. Für in der Kabelisolierung eingesetzten polymeren Isolierstoffe ist die Zeitabhängigkeit der Durchschlagfestigkeit von sehr großer Bedeutung. Ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen der Durchschlagfeldstärke E_D und der Beanspruchungszeit ist in Bild 1 dargestellt.

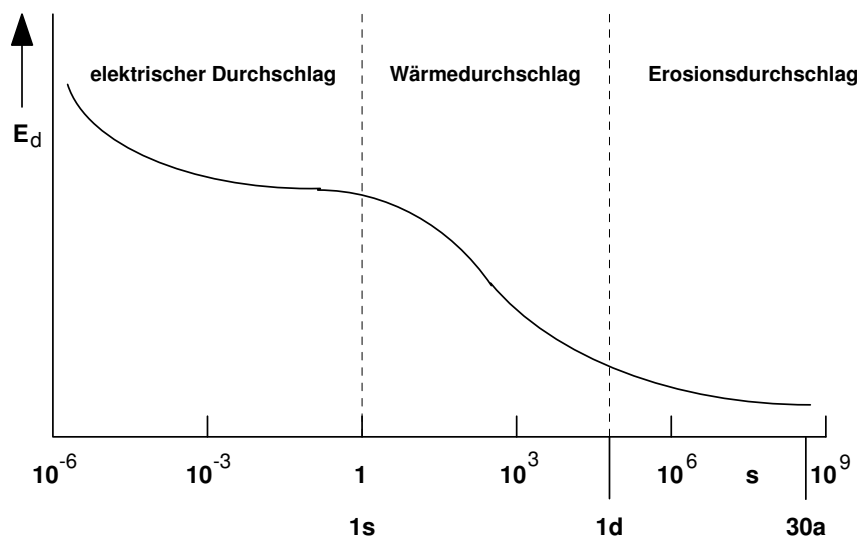


Bild 1: Durchschlagfeldstärke E_D in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit

In diesem Bild sind drei Bereiche eingezeichnet; der erste Bereich beschreibt den elektrischen Durchschlag, bei dem im wesentlichen die Höhe der Feldstärke den Durchschlag bestimmt. In diesem Zeitbereich liegen die Blitz- und Schaltstoßspannung. Der zweite Bereich beschreibt den Wärmedurchschlag, der dadurch bestimmt wird, dass die durch die elektrische Beanspruchung erzeugte Verlustleistung im Isolierstoff abgeführt werden muss, um ein thermisches Gleichgewicht zu erhalten. Je nach Art der Wärmeabgabe und der Zeitkonstante des Isoliersystems kann durch eine schlechte Wärmeabfuhr die erlaubte Beanspruchungsfeldstärke sehr stark herabgesetzt werden. Dieses Verhalten ist typisch für Isolierungen mit einem hohen Verlustfaktor $\tan \delta$.

insbesondere beim Einsatz mit sehr hohen Spannungen, da die Verlustleistung in einem Isolierstoff proportional zum Quadrat der Spannung, zur Frequenz der anliegenden Spannung, zur Kapazität der Anordnung und zum $\tan \delta$ ist. Der dritte Bereich, der sogenannte Erosionsdurchschlag, bestimmt die Langzeitfestigkeit des Isolierstoffes und kann durch Änderungen in der Struktur oder durch Vorwachsen und Vergrößerung kleinster Fehler z.B. infolge von Teilentladungsvorgängen wesentlich beeinflusst werden, so dass die Teilentladungsmessung eine sehr wichtige und aussagekräftige Qualitätskontrolle darstellt, die ergänzend auch zur Diagnose verwendet werden kann.

Für polymere Isolierstoffe mit einem kleinen Verlustfaktor wie z.B. Polyethylen (PE) oder vernetztes Polyethylen (VPE), die im Bereich der Kabeltechnik heute in allen Spannungsbereich eingesetzt werden, kann der Bereich des Wärmedurchschlages vernachlässigt werden, so dass sich bei entsprechender Wahl der Darstellung im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Gerade ergibt, die als Lebensdauer kennlinie bezeichnet wird [4]. Diese Kennlinie wird als Lebensdauergesetz mit der folgenden Gleichung

$$E^N \cdot t = \text{const} \quad (1)$$

beschrieben, wobei der Exponent N die Steigung der Geraden darstellt und mit der Größe „const“ das elektrische Verhalten dieses Isolierstoffes beschrieben wird. Die experimentelle Bestimmung dieser Größen kann durch unterschiedliche Verfahren wie Konstantspannungsversuch oder Spannungssteigerungsversuch erfolgen, wobei die Ergebnisse von Spannungssteigerungsversuchen sehr viel wirtschaftlicher zu erreichen sind [5]. Beim Konstantspannungsversuch wird eine bestimmte Zahl von Prüflingen einer konstanten Spannungsbeanspruchung unterzogen und es werden die Durchschlagzeiten ermittelt. Das Ergebnis dieser Versuche ist eine empirische Verteilungsfunktion der Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagszeit. Diese Verteilung kann sehr gut durch eine Weibull Verteilung nach Gl. 2 beschrieben wird:

$$F(t_d; u) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t_d}{t_{d63}}\right)^\delta\right] \quad (2)$$

Die Zeit t_d ist die Zeit, bei der die Wahrscheinlichkeit 63 % beträgt, dass bei der angelegten Spannung u ein Durchschlag bei dieser Art von Prüflingen erfolgt. Der Exponent δ beschreibt die Steigung der Funktion, d.h. die Änderung der Durchschlagwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Durchschlagzeit bei der angelegten Spannung u . Werden diese Versuche bei verschiedenen Spannungen durchgeführt, können daraus die Lebensdauer kennlinie und die für Gl. 1 erforderlichen Kenngrößen ermittelt werden. Bild 2 zeigt exemplarisch die Lebensdauer kennlinie für ein PE-Kabel. Die Werte für den Lebensdauer koeffizienten N liegen zwischen 9 für den unteren Spannungsbereich und 17 für den Höchstspannungsbereich [3].

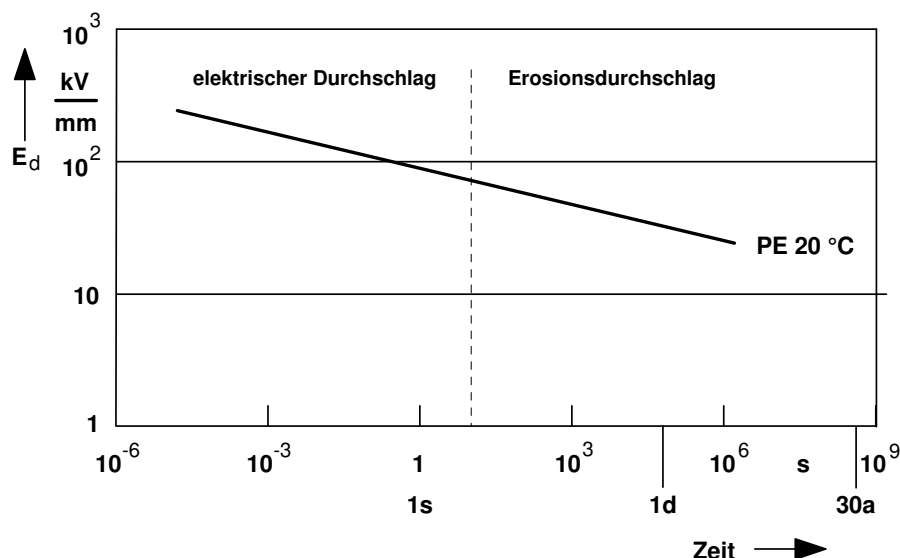


Bild 2: Lebensdauer kennlinie für ein PE Kabel

In den bisherigen Untersuchungen der Langzeitfestigkeit von polymeren Isolierstoffen wurde zunächst als Spannungsbeanspruchung eine Gleichspannung oder eine sinusförmige betriebsfrequente Wechselspannung angenommen. Für diese Art der Spannungsbeanspruchung konnte die Lebensdauer kennlinie relativ einfach über Konstantspannungsversuche oder Spannungssteigerungsversuche ermittelt werden. Auch die Durchschlagwahrscheinlichkeit bei Beanspruchung mit impulsförmigen Spannungen konnte mit diesen Methoden ermittelt werden, wenn die Beanspruchung mit gleichen, d.h. konstanten Stoßspannungen, oder mit gleichmäßig steigenden Stoßspannungen erfolgte. Die Experimente zeigen auch, dass die Durchschlagwahrscheinlichkeiten nicht sehr stark voneinander abweichen und das insbesondere im Bereich der mittleren Durchschlagwahrscheinlichkeiten die Werte der beiden Verfahren sehr gut übereinstimmen. Voraussetzung für diese gute Übereinstimmung ist aber, dass die Lebensdauer kennlinie bekannt ist und der Exponent N einen bekannten festen Wert hat.

Da die bisherigen Spannungsbeanspruchungen polymerer Isolierstoffe aus einer zeitlich langen Beanspruchung mit Gleich- oder Wechselspannung und einer relativ geringen Anzahl von überlagerten Blitz- und Schaltstoßspannungen bestand, war die Bewertung des Einflusses der hohen impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen auf die Langzeitfestigkeit nicht von sehr großer Bedeutung, da die Kurzzeitfestigkeit des Isolierstoffes bei impulsförmigen Spannungsbeanspruchungen und die Langzeitfestigkeit bei Betriebsspannung bekannt waren. Trotzdem wurden Überlegungen angestellt, wie der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Spannungssteigerungsversuche und der Konstantspannungsversuche mathematisch bestimmt werden kann [6]. Es wird davon ausgegangen, dass jede Spannungsbeanspruchung einen Beitrag zur Schadensakkumulation und damit zur Reduktion der Lebensdauer des Isolierstoffes liefert. Diese irreversible Zerstörung der Isolierung kann durch einen relativen Lebensdauer verbrauch L_r gemäß Gl. 3 angegeben werden:

$$L_r = \frac{t_b}{t_d} \quad (3)$$

wenn mit t_d die Durchschlagzeit und mit t_b die Beanspruchungszeit der Isolierung bezeichnet wird. Bei einem konstanten und bekannten Lebensdauerkoeffizienten, der in Gl. 1 mit N bezeichnet wird, kann die Beanspruchungszeit t_b auf eine äquivalente Beanspruchungszeit t_b^* umgerechnet werden nach der folgenden Gleichung:

$$t_b^* = t_b \cdot \left(\frac{u_b}{u_b^*} \right)^N \quad (4)$$

Eine kurzzeitige hohe Spannungsbeanspruchung kann zur selben Schädigung führen wie eine langzeitige niedrige Spannungsbeanspruchung. Welche der Beanspruchungsarten aber am stärksten zum Lebensdauerverbrauch beiträgt, hängt sehr stark vom Wert des Lebensdauerkoeffizienten N ab.

Durchschlagverhalten in Abhängigkeit der Spannungsverteilung

Bei der Beurteilung der Kabelisolierung wird in der Regel nur die radiale Spannungsverteilung innerhalb des Kabels betrachtet, da die axiale Spannungsverteilung nicht durch die Konstruktion und die Art der Spannungsbeanspruchung, sondern lediglich durch die Systemeinbindung des Kabels bestimmt wird. Die Anwendung der Leistungselektronik erfordert jedoch auch eine Berücksichtigung der Systemeinbindung, da durch unterschiedliche Impedanzen z.B. zwischen Kabel und dem angeschlossenen Motor eine Reflektion der durch die Leistungselektronik erzeugten Spannungsimpulse erfolgen und somit eine Spannungserhöhung eintreten kann. In Abhängigkeit der eingesetzten Kabellänge und den jeweiligen Impedanzen des Kabels und der elektrischen Maschine können dabei Spannungserhöhungen bis zum doppelten Wert der Impulsamplitude auftreten. Bild 3 aus [8] zeigt beispielhaft den Spannungsverlauf am Ausgang der Leistungselektronik und am Beginn einer Motorwicklung.

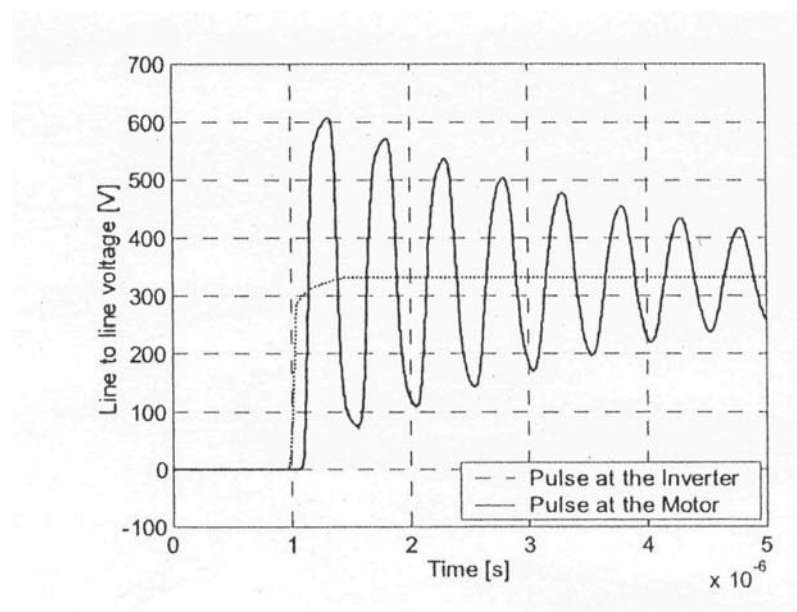


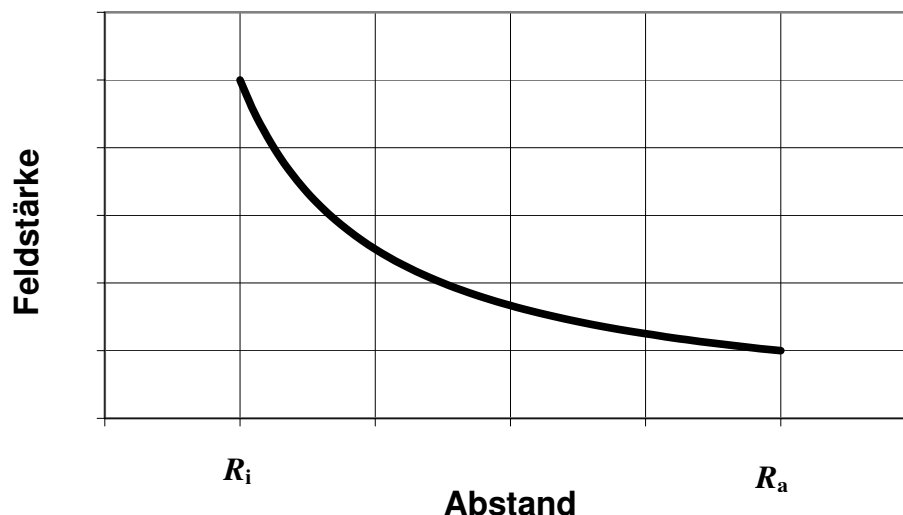
Bild 3: Spannungsverlauf am Ausgang der Leistungselektronik (Inverter) und am Anfang der Motorwicklung (Motor)

Dieser Spannungsverlauf ist wichtig für die Spannungsaufteilung und Spannungsbeanspruchung innerhalb der Windungen einer Wicklung der elektrischen Maschine [1], aber auch für die Spannungsbeanspruchung des die Energie zuführenden Kabels. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ist beim Einsatz eines Kabels in Verbindung mit Leistungselektronik auf die mögliche hohe Spannungsbeanspruchung zu achten, die sich dann allerdings mehr oder weniger gleichmäßig über die gesamte Länge des Kabels erstreckt, so dass für die Dimensionierung der Isolierung wiederum nur die radiale Spannungsverteilung in Betracht kommt.

Die radiale Spannungsverteilung richtet sich nach der Art der Spannung, indem bei Wechsel- und impulsförmigen Spannungen die kapazitive Spannungsverteilung auftritt, während bei Gleichspannung auch die resistive Spannungsaufteilung beachtet werden muss. Die kapazitive Spannungsaufteilung kann bei Kabeln sehr einfach durch die koaxiale Anordnung mit der folgenden Gleichung für die radiale Feldstärke bestimmt werden:

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right)} \quad (5)$$

wenn mit R_a der Radius der äußeren Elektrode bzw. des Kabelschirms und mit R_i der Radius des Leiters bezeichnet wird. Die Größe r ist die Laufvariable, die den Abstand vom Leitermittelpunkt beschreibt. Es ist einfach zu erkennen, dass die Feldstärke am Innenleiter am größten ist, da hier der Wert von r am kleinsten ist. Der absolute Wert



der maximalen Feldstärke kann durch das Radienverhältnis von Außenleiter und Innenleiter noch optimiert werden. Im Bild 4 ist die Feldstärkeverteilung innerhalb eines Kabels für den Fall der kapazitiven Spannungsaufteilung in Abhängigkeit des Abstandes vom Leitermittelpunkt beispielhaft dargestellt.

Bild 4: Feldstärkeverlauf in einem Kabel für kapazitive Spannungsverteilung

Da die polymeren Isolierstoffe sehr empfindlich auf Teilentladungen reagieren, ist für die Bemessung der Isolierung im Hinblick auf eine Lebenszeit von 25 Jahren oder mehr die maximale Feldstärke am Innenleiter die bestimmende Größe, wobei vorausgesetzt wird, dass innerhalb der Isolierung keine weiteren unzulässigen Feldstärkerhöhungen durch Einschlüsse im Isolierstoff oder durch Hohlräume auftreten.

Beanspruchung der Kabelisolierung durch kontinuierliche, steile Spannungsimpulse

Der Einsatz der Leistungselektronik zur Spannungssteuerung von Maschinen führt bei der puls-weiten-modulierten Spannungsansteuerung zu der im folgenden Bild 5 dargestellten Spannungsbeanspruchung der Isolierung, die aus steilen Spannungsimpulsen mit einer Anstiegszeit im Bereich von 50 bis 200 ns besteht, was einer Spannungsteilheit von 6 kV/ μ s bis 13 kV/ μ s entspricht [8]. Diese Art der Beanspruchung unterscheidet sich von der bisherigen Beanspruchung durch steile Spannungsimpulse in drei wesentlichen Punkten:

- Die Anstiegszeit der Spannungsimpulse ist deutlich kleiner als bei der Beanspruchung mit Blitzstoßspannungsimpulsen.**
- Die Spannungsimpulse treten kontinuierlich auf mit Frequenzen zwischen 2 und 10 kHz.**
- Die Spannungsamplituden können in Abhängigkeit der Impedanzen von Kabel und Motor deutlich höher als bei Betrieb mit netzfrequenter Wechselspannung sein [9].**

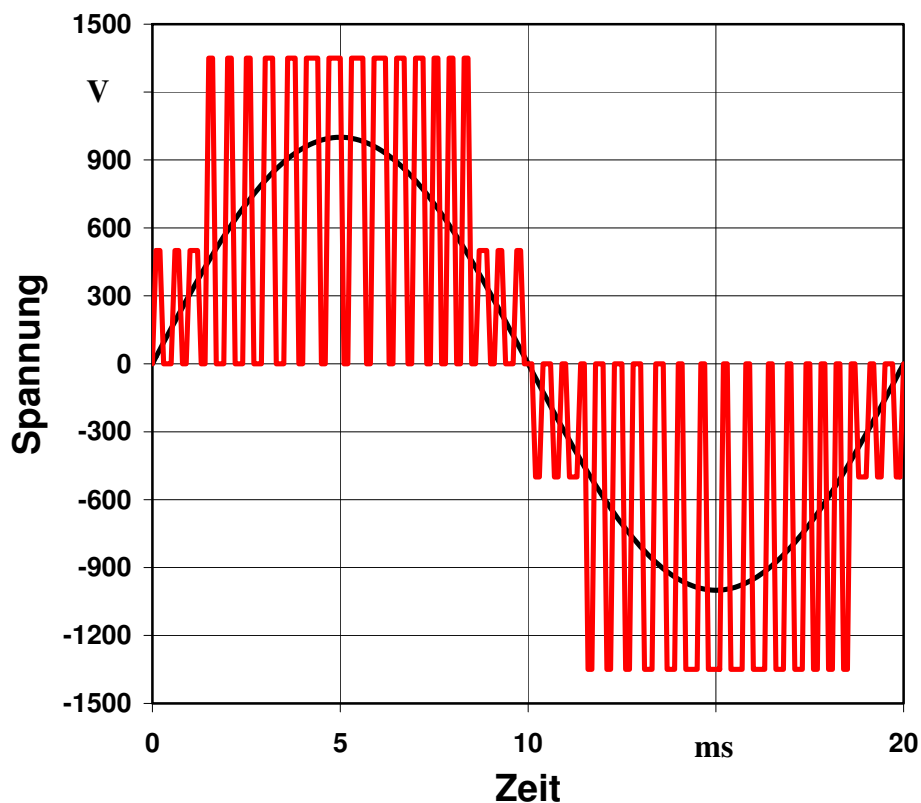


Bild 5: Beanspruchung durch kontinuierliche, steile Spannungsimpulse

Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens von polymeren Isolierstoffen sind die beschriebenen Randbedingungen von Bedeutung, da die bisherigen Beanspruchungen für die Isolierung in einer kontinuierlichen Gleich- oder Wechselspannungsbeanspruchung mit niedrigen Frequenzen bestand und die impulsförmigen Beanspruchungen nur sporadisch auftraten bei Schalthandlungen oder Einwirkungen von Blitzereignissen. Beim Einsatz von Leistungselektronik ist aber die impulsförmige Spannungsbeanspruchung die dauerhaft auftretende Spannungsbeanspruchung und es sind Informationen erforderlich, wie eine solche Spannungsbeanspruchung sich auf die Lebensdauer der Isolierung auswirkt.

Für die Untersuchungen des Durchschlagverhaltens von Kabelisoliersystemen bei kontinuierlicher Beanspruchung durch steile Spannungsimpulse sind daher folgende Parameter von Bedeutung:

- Amplitude der Spannung
- Einfluss der Steilheit des Spannungsanstieges
- Einfluss der Frequenz der Spannungsimpulse
- Einfluss der Polaritätswechsel der Spannungsimpulse
- Einfluss der Beanspruchungszeit

Erkenntnisse aus Untersuchungen an Wicklungsisolierungen

Wenn Teilentladungen in kleinen Hohlräumen auftreten und diese die Isolierung langsam zerstören, dann ist die Teilentladungseinsetzspannung die bestimmende Größe

für die Lebensdauer des Isoliersystems. Entstehen bei den Teilentladungen noch zusätzlich Raumladungen, dann ergibt sich ein Unterschied in der Beanspruchung mit unipolaren oder alternierenden Spannungsimpulsen. In Bild 6 ist die Zahl der Spannungsimpulse bis zum Durchschlag in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und der Impulsfolge (unipolar oder alternierend) dargestellt und in Relation zur Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Teilentladungen gebracht. Diese Wahrscheinlichkeit drückt das Verhältnis von Spannungsimpulsen mit Teilentladungen zur Gesamtzahl der Spannungsimpulse aus.

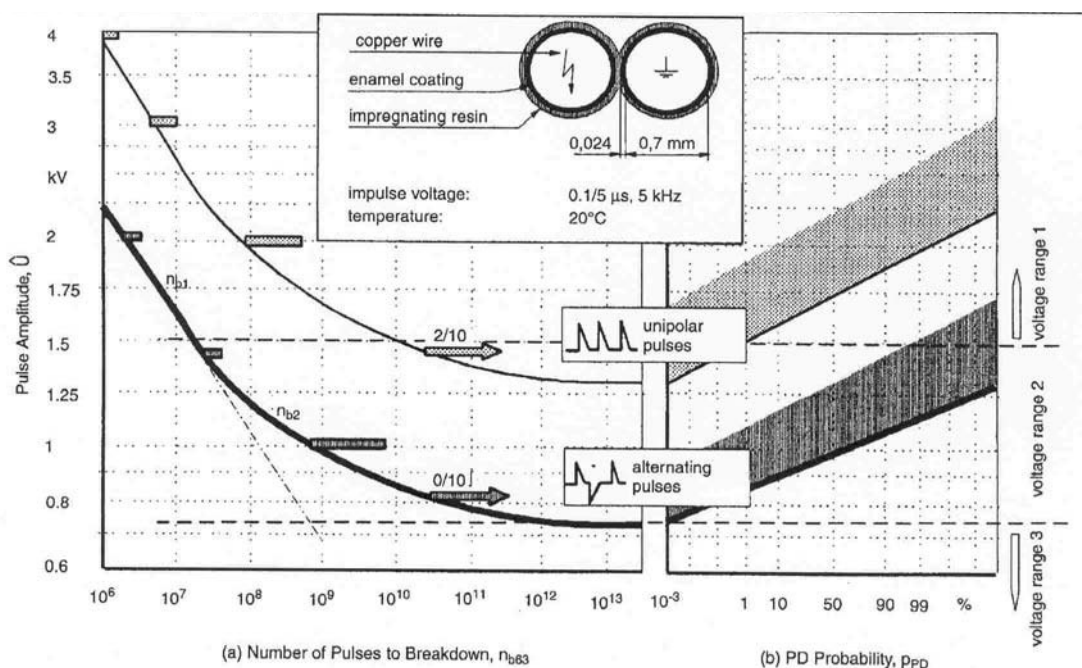


Bild 6: Anzahl der Spannungsimpulse für den Durchschlag in Abhängigkeit der Spannungsamplitude und der Impulsfolge aus [1]

Es ist gut zu erkennen, dass die Zahl der Spannungsimpulse sehr groß wird und kein Durchschlag registriert werden kann, wenn keine Teilentladungen auftreten. Die für einen Durchschlag erforderliche Amplitude ist bei alternierenden Impulsfolgen sehr viel geringer aufgrund der durch die Raumladungen verursachten Erhöhung der lokalen Feldstärke. Wenn Teilentladungen auftreten und der Zerstörungsprozess beginnt, dann ist das Durchschlagverhalten unabhängig von der Frequenz der Spannungsimpulse und die Zeit bis zum Durchschlag wächst linear mit abnehmender Frequenz der Spannungsimpulse. Dieses Verhalten ist in Bild 7 dargestellt.

Im unteren Teil von Bild 7 ist die Zahl der Spannungsimpulse bis zum Durchschlag in Abhängigkeit der Frequenz der Spannungsimpulse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass diese Zahl für die gewählte Spannungsamplitude konstant ist und unabhängig von der Frequenz der Spannungsimpulse. Das hat zur Folge, dass die im oberen Teil von Bild 7 dargestellte Durchschlagzeit linear ansteigt mit abnehmender Frequenz der Spannungsimpulse, da bei niedriger Frequenz eine längere Zeit für die zum Durchschlag erforderliche Impulszahl benötigt wird.

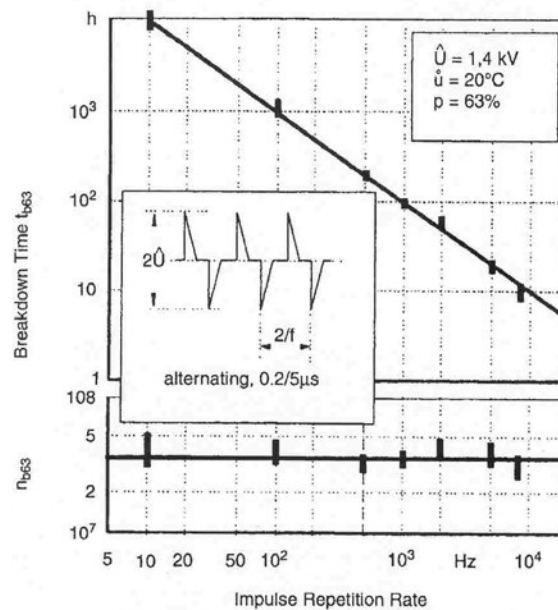


Bild 7: Einfluss der Frequenz der Spannungsimpulse auf das Durchschlagverhalten aus [1]

Das auch für die Isolierung von elektrischen Maschinen wichtige Langzeitverhalten wurde unter extremen Bedingungen bezüglich thermischer und elektrischer Beanspruchung untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 8 dargestellt.

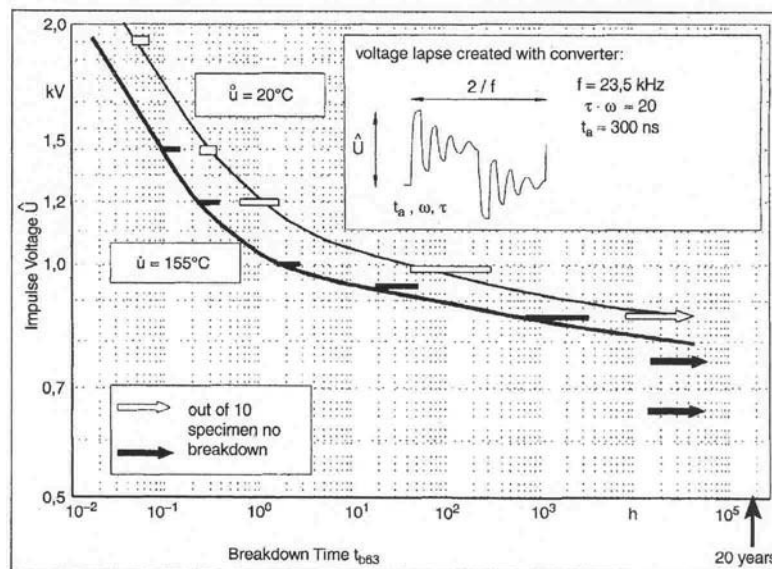


Bild 8: Langzeitbeanspruchung unter extremer thermischer und elektrischer Beanspruchung aus [1]

Es ist hier noch einmal deutlich erkennbar, dass für dieses Isoliersystem und diese Beanspruchung das Lebensdauergesetz nicht in der Form gemäß Gl. 1 gültig ist. Für einen ersten Bereich mit hohen Spannungsamplituden ist eine Näherung nach Gl. 1 möglich, für niedrigere Spannungsamplituden mit geringer Teilentladungsaktivität pro Spannungsimpulse ergeben sich aber längere Durchschlagzeiten die sogar bei

Spannungsamplituden ohne Teilentladungsaktivitäten zu sehr langen Durchschlagzeiten führen, die oberhalb der geforderten Betriebsdauer liegen.

Wenn die Spannungsverteilung und die Feldstärkeverteilung von der Anstiegszeit des Spannungsimpulses abhängen, dann kann eine Kurve für die Stehspannung ermittelt werden unter der Annahme, dass unterhalb dieser Kurve keine Teilentladungen auftreten und somit auch keine Zerstörung oder Alterung des Isoliersystems eintritt. In Bild 9 aus [8] ist eine solche Kurve beispielhaft dargestellt.

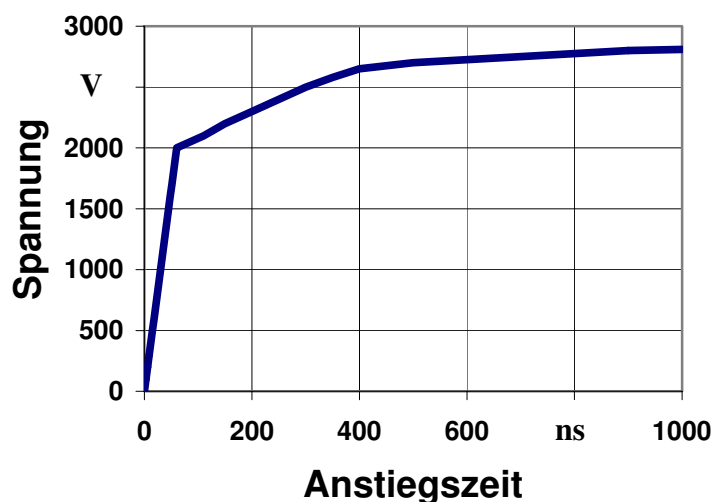


Bild 9: Stehspannung basierend auf einer Beanspruchung ohne Teilentladungen aus [8]

Es ist auch in diesem Bild gut zu erkennen, dass sich in Abhängigkeit der Steilheit der Spannungsimpulse die Spannungsverteilung und somit die für einen Einsatz der Teilentladungen erforderliche Spannungsamplitude ändert, die bestimmend für die elektrische Festigkeit der Isolierung ist.

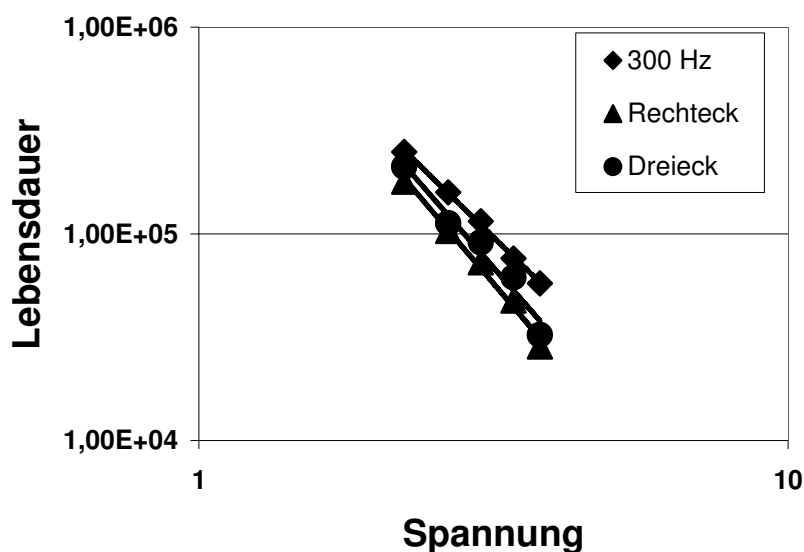
Erkenntnisse aus Untersuchungen an Kabeln für Niederspannungsmaschinen

In Untersuchungen der Spannungsfestigkeit von Kabeln für die Spannungsversorgung für Maschinen mit puls-weiten-modulierter Spannungsregelung wurde die Durchschlagfestigkeit und die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Frequenz und der Impulsform der Spannung ermittelt. Als Spannungen wurden als Referenz eine sinusförmige Wechselspannung mit 300 Hz und als Prüfspannungen eine dreiecksförmige Spannung und eine rechteckförmige Spannung (ähnlich Bild 5) mit einer Frequenz von 2,4 kHz eingesetzt [10].

Die Prüflinge wurden mit den verschiedenen Spannungsformen bei konstanter Amplitude beansprucht und die Zeit bis zum Durchschlag ermittelt, wobei bei allen Spannungen bereits Teilentladungen auftraten.

Es ist aus Bild 10 gut zu erkennen, dass die Lebensdauer einer Isolierung gut mit Gl. 1 beschrieben werden kann und dass der Lebensdauerkoeffizient nicht von der Spannungsform abhängt, wenn Teilentladungen auftreten. Für die Bewertung der Lebensdauer ist es aber erforderlich, auch das Verhalten zu kennen, wenn in der

Isolierung keine Teilentladungen auftreten, so dass die hier dargestellten Ergebnisse bei



einer Extrapolation für niedrige Spannungen zu kurze Lebensdauerwerte ergeben.

Bild 10: Lebensdauer als Funktion der Spannung für verschiedene Spannungsarten aus [10]

Die Lebensdauer der VPE Isolierung bei Beanspruchung mit Wechselspannung kann durch die im Bild 11 dargestellten Kurven beschrieben werden und stimmt gut mit den langjährigen Betriebserfahrungen überein [11]. Für die Nutzung dieser Kurven können folgende Überlegungen angestellt werden Für Kabel mit unterschiedlichen Isolierwandstärken ergeben sich unterschiedliche Durchschlag- und Teilentladungseinsetzspannungen unter der Voraussetzung, dass die Feldstärkeverteilung der für den Durchschlag und die Teilentladungen entscheidende Parameter ist. Die in Bild 11 dargestellten Kurven sind aus Messungen der Durchschlagspannungen und Teilentladungseinsetzspannung für das Kabel 2 als Referenzkabel und aus Messungen der Durchschlag- und Teilentladungseinsetzspannung für kurze Zeiten (im Bild 11 mit 0,1 Jahr im logarithmischen Maßstab dargestellt) und dann sich anschließender Extrapolation zu längeren Zeit gemäß dem Verlauf von Kabel 2 entstanden. Unter der Annahme, dass beim Auftreten von Teilentladungen die Kabelisolierung in relativ kurzer Zeit zerstört und damit das Ende der Lebensdauer der Isolierung erreicht wird, können dann die Kurven für Kabel 1 und Kabel 3, die Kabel mit anderer Isolierwandstärke im Vergleich zu Kabel 2 repräsentieren, auch als Grenzkurve für die Teilentladungseinsetzspannung verwendet werden.

Dabei wird unterstellt, dass sich die Änderung der Lebensdauer über der Beanspruchungszeit infolge der Wechselspannungsbeanspruchung genauso verhält, wie die Änderung der Teilentladungseinsetzspannung über der Beanspruchungszeit. Mit diesen Bedingungen kann nun die erwartete Lebensdauer einer Isolierung abgeschätzt werden, indem die Teilentladungseinsetzspannung zu Beginn ermittelt wird und der Verlauf analog zu den dargestellten Kurven für längere Betriebszeiten extrapoliert wird. Da bei einer Beanspruchung mit kontinuierlich auftretenden Spannungsimpulsen

ebenfalls keine Teilentladungen auftreten dürfen, kann aus den in Bild 11 dargestellten Kurven die maximale Spannungsbeanspruchung für eine bestimmte Isolierung in Abhängigkeit der Spannungsamplitude abgeschätzt werden.

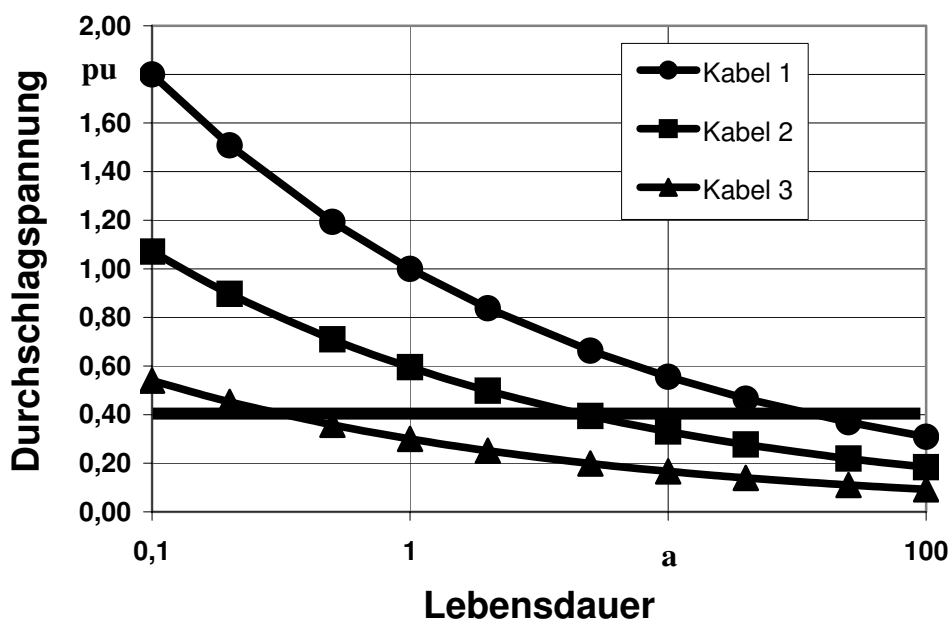


Bild 11: Lebensdauer als Funktion der Spannungsamplitude aus [10]

Als Beispiel soll hier die in Bild markierte Linie bei 0,4 pu angeführt werden. Bei dieser Spannungsamplitude ergibt sich für den Kabeltyp 1 eine Lebensdauer von etwa 0,2 Jahren, für den Kabeltyp 2 von etwa 5 Jahren und für den Kabeltyp 3 von 25 Jahren.

Ergebnisse der Untersuchungen an Kabelisoliersystemen

Für Mittelspannungskabel bis zu einer Spannung von 6 kV wurden Untersuchungen des Durchschlagverhaltens und des Teilentladungsverhaltens in Abhängigkeit der Spannungsamplitude, der Art der impulsförmigen Spannungsbeanspruchung (unipolar oder alternierend) und der Steilheit der impulsförmigen Spannungen am Schering-Institut begonnen. Der erste Schritte der Untersuchungen war eine Messung der Teilentladungseinsetzspannung bei betriebsfrequenter Wechselspannung. Anschließend wurden die Kabel zunächst mit Blitzstoßspannung beansprucht, wobei die Grenze der Beanspruchung nicht durch die Kabelisolierung, sondern durch die verwendeten Kabelendverschlüsse bestimmt wurde.

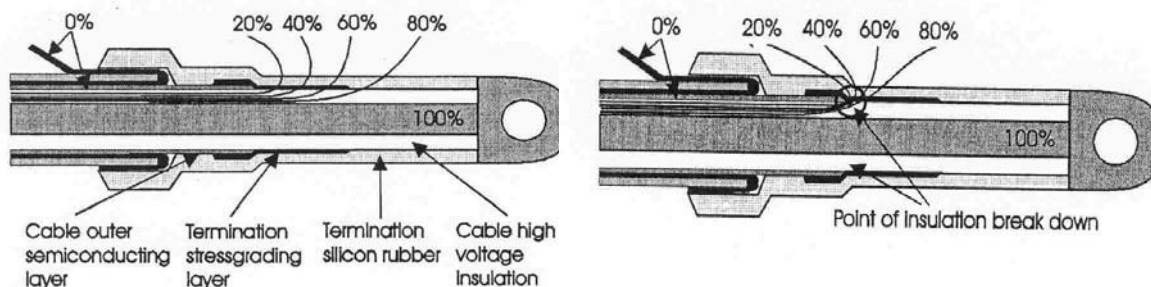


Bild 12: Äquipotentiallinien an einem Kabelendverschluss aus [12]

linkes Bild: 50 Hz Wechselspannung

rechtes Bild: hohe Frequenzen

Diese Erfahrung ist in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen in [12], in denen über die Probleme infolge der nicht linearen Spannungsverteilung an Kabelendverschlüssen bei Beanspruchung mit steilen, kontinuierlichen Spannungsimpulsen berichtet wird. In Bild 12 sind daher die Äquipotentiallinien für einen Endverschluss schematisch dargestellt für betriebsfrequente Wechselspannung und für hohe Frequenzen, stellvertretend für eine Pulsfrequenz von 12 kHz. Es ist gut zu erkennen, dass sich die bei 50 Hz vorliegende mehr oder weniger lineare Spannungsverteilung aufgrund der hohen Frequenzen und des damit stärker wirkenden kapazitiven Einflusses auf die Spannungsverteilung erheblich verändert und zu einer sehr stark nicht linearen Verteilung wird, die die Grenze für die Spannungsbeanspruchung darstellt.

Die ersten Ergebnisse der Untersuchungen zeigten, dass eine impulsförmige Beanspruchung mit einem blitzstoßähnlichen Spannungsverlauf selbst nach einer Impulszahl von über 90 Millionen kein Durchschlag der Kabelisolierung verursachte, wobei diese Spannung deutlich unter der erwarteten Durchschlagspannung etwa im Bereich der Teilentladungseinsetzspannung lag. Als nächste Schritte werden Untersuchungen des Teilentladungsverhalten der mit Blitzstoßspannung beanspruchten Kabel folgen. Zur Zeit wird ein Versuchsstand aufgebaut, der es erlaubt, die Amplitude und die Spannungsform der impulsförmigen Beanspruchungen zu variieren, so dass aus den Ergebnissen Parameter für die Dimensionierung von Kabelisoliersystemen für eine Beanspruchungen mit kontinuierlichen, steilen Spannungsimpulsen ermittelt werden können. Ergänzend werden Teilentladungsmessungen durchgeführt, um eine Kenngröße neben der Durchschlagspannung zu erhalten, die ein Monitoring und eine Diagnose der mit Spannungsimpulsen beanspruchten Kabelisoliersystem ermöglicht.

Ausblick

Die verfügbaren Erkenntnisse über das Durchschlagverhalten und die Lebensdauer von polymeren Isolierstoffen basieren im wesentlichen auf Maschinenwicklungsisolierungen und auf Kabelisolierungen mit sehr geringen Isolierwandstärken, wie sie in der Niederspannung nur erforderlich sind. Die bekannte Lebensdauer kennlinie für polymere Isolierstoffe mit geringem Verlustfaktor, die im doppeltlogarithmischen Maßstab eine Gerade ergibt, scheint auch für die Bestimmung der Lebensdauer bei kontinuierlichen, steilen Spannungsimpulsen gültig zu sein, wenn vorausgesetzt wird, dass durch das Einsetzen von Teilentladungen bei einer bestimmten Spannungsamplitude die Grenze der Lebensdauer mehr oder weniger erreicht ist. Die Zeit vom Einsatz der ersten Teilentladungen bis zum vollständigen Durchschlag der Isolierung wird dabei im Hinblick auf die zu beurteilende lange Lebensdauer vernachlässigt.

Aus den Untersuchungen der Maschinenwicklungsisolierung ist zu erkennen, dass in Abhängigkeit des Einflusses vorangegangener Entladungen auf die Teilentladungsaktivität der Polaritätswechsel der impulsförmigen Spannungsbeanspruchung eine wesentliche Rolle spielt, da hier der Einsatz der Teilentladungen von der Vorgeschichte abhängt. Es ist aber besonders zu beachten, dass mit abnehmender Spannung und damit abnehmender Teilentladungsaktivität der Verlauf der Lebensdauerkurve sich nicht mehr linear fortsetzt, sondern sich zu längeren Lebenszeiten verschiebt. Das damit verbundene Auftreten eines Grenzwertes unterhalb

dessen keine Teilentladungen mehr auftreten ist auch aus den Diskussionen über den Nutzen und die Aussagekraft der Lebensdauerkurve bekannt, da auch hier ein Grenzwert existiert, unterhalb dessen auch für sehr lange Zeiten nicht mit einem Durchschlag gerechnet werden kann.

Für eine Übertragung der Ergebnisse auf Kabelisoliersysteme für höhere Spannungen, bei denen kontinuierliche, steile Spannungsimpulse auftreten können, sind daher noch folgende Untersuchungen erforderlich:

- Ermittlung des Durchschlagverhaltens bei unipolaren und alternierenden kontinuierlichen Spannungsimpulsen in Abhängigkeit der Amplitude
- Bestimmung der Teilentladungseinsetzspannung in Abhängigkeit der Beanspruchung
- Prüfung der Aussage "Abnahme der Teilentladungseinsetzspannung in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit ist identisch mit dem Verlauf der Durchschlagspannung über der Beanspruchungszeit" für Kabel mit größerer Isolierwandstärke
- Ermittlung des Durchschlagverhaltens bei unipolaren und alternierenden kontinuierlichen Spannungsimpulsen in Abhängigkeit der Beanspruchungszeit
- Ermittlung des Durchschlagverhaltens bei unipolaren und alternierenden kontinuierlichen Spannungsimpulsen in Abhängigkeit der Impulsparameter

Diese Untersuchungen werden in den nächsten Monaten und Jahren am Schering-Institut durchgeführt, so dass zu einem späteren Zeitpunkt darüber berichtet werden kann.

Schrifttum

- [1] M. Kaufhold, G. Börner, M. Eberhardt, J. Speck: Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters. IEEE Insulation Magazine Vol. 12, No. 5, p. 9 – 16, 1996
- [2] D. Fabiani, G. C. Montanari, A. Contin: Aging acceleration of insulating materials for electrical machines supplied by PWM in the presence and in the absence of partial discharges. IEEE ICSD Eindhoven, p. 283 – 286, 2001
- [3] E. Peschke, R. von Olshausen: Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung. Publicis MCD Verlag, 1998
- [4] M. Beyer, W. Boeck, K. Moeller, W. Zaengl: Hochspannungstechnik, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1986
- [5] W. Hauschild, W. Mosch: Statistik für Elektrotechniker. VEB Verlag Berlin, 1984
- [6] H. Meyer: Zur Zeitabhängigkeit des elektrischen Durchschlages technischer Isolierungen. Dissertation TH Hannover, 1966
- [7] A.F. Moreira, T.A. Lipo, G. Venatarmanan, S. Bernet: High frequency modeling for cable over-voltage studies in long cable drives. IEEE Industrial Application Society, 36th Annual Meeting, Chicago, USA, 2002
- [8] M. Mel, A. M. Jason Sung, S. Bell, G. L. Skibinski: Effect of surge voltage risetime on the insulation of low-voltage machines fed by PWM converters. IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 34, No. 4, p. 766 – 775, 1998

- [9] E. Hentschel, K. Niedermeier, K. Schäfer: Beanspruchung der Wicklungsisolierung von Drehstrommaschinen, etz Bd. 114, Hedt 17, S. 1074 – 1077, 1993
- [10] F. Guastavino, G. Coletti, E. Torello: Twisted pairs specimens subjected to several waveform voltages in presence of partial discharges. CEIDP 2002, p. 450 - 453
- [11] E. Bullington, S. Abney, G. Skibinski: Cable alternatives for PWM AC drive applications. IEEE PCIC 1998,
- [12] L. Paulsson, B. Ekehov, S. Halen, T. Larsson, L. Plamqvist, A. Edris, D. Kidd, A. Keri, B. Mehrban: High-frequency impacts in a converter-based back-to-back tie: The eagle pass installation. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 18. No. 4, p. 1410 - 1415, 2003