

# **1 Rotierende Hochspannungsmaschine als Prüfobjekt**

## **1.1 Einleitung**

Eine elektrische Maschine besteht aus einem Ständer mit verteilten Wicklungen und einem Voll- oder Schenkelpolläufer. Ständerwicklungen bestehen aus einzelnen Wicklungssträngen. Jeder Strang besteht aus einzelnen Spulen. Eine Spule ist eine Kombination zweier Stäbe, die in unterschiedlichen, bezüglich des Drehfeldes um  $180^\circ$  elektrisch verschobenen Ständernuten liegen. Spulen können wiederum in mehrere Windungen unterteilt sein, die alle dieselben beiden Nuten durchlaufen und gegen einander isoliert sind. Jede Spule oder jeder Stab der Ständerwicklung stellt elektrisch eine klassische Durchführung eines isolierten spannungsführenden Leiters durch das geerdete Blechpaket dar.

Zur Darstellung einer elektrischen Maschine als Prüfobjekt werden im folgenden Kapitel die Isoliersysteme, die Mechanismen der Alterung und die Diagnoseverfahren erläutert.

## **1.2 Isoliersystem einer rotierenden Hochspannungsmaschine**

Ein wichtiger Teil einer elektrischen Maschine, besonders bei Hochspannungsmaschinen, ist das elektrische Isoliersystem der Ständerwicklung. Die wesentliche Aufgabe der Isolierung besteht in der Trennung spannungsführender Wicklungsteile untereinander und von dem auf Erdpotential befindlichen Ständereisen. Die eingesetzten Isoliermaterialien für Ständerwicklungen von elektrischen Maschinen müssen aber nicht nur elektrischen sondern auch mechanischen und thermischen Beanspruchungen standhalten.

### **1.2.1 Isoliermaterial für Wicklungen**

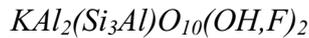
Die Entwicklung des Elektromaschinenbaues begann fast gleichzeitig mit der Veröffentlichung des Induktionsgesetzes durch Faraday im Jahr 1832. Es wurde versucht, geeignete Maschinen zur elektromagnetischen Stromerzeugung zu bauen. Holz, Kautschuk, Glas, Guttapercha, Textilgewebe waren die ersten Isolierstoffe.

Die Erfindung des Mikafoliums im Jahr 1900 und des Bügelprozesses zur Herstellung fester Umpressungen im Nutteil der Wicklungen im Jahre 1910 machte den Einsatz des thermisch, chemisch und elektrisch hochwertigen Glimmers als tragender Bestandteil der Hauptisolierung möglich. Man entwickelte Mikafolien, die aus Glimmerplättchen (Mika), Bindemittel und Trägerbahnen bestehen. Als Trägerbahnen wurde Zellulose-, Kunstfaserpapier, Kunststofffolien (Polyesterfolie) oder Glasseidengewebe (Glasseide, Glassfasern) eingesetzt, auf die Glimmerplättchen mit dem Bindemittel überlappend festgeklebt wurden. Als Bindemittel wurde zuerst Schallack und dann Asphalt an Stelle von Schallack eingesetzt. Danach versuchte man die neuen härtbaren Kunststoffe (thermolastic) als Bindemittel in Glimmerisolierungen an Stelle der thermoplastischen Naturstoffe Schallack und Asphalt einzusetzen. Die lösungsmittelfreien, polymerisierenden Polyesterharze und

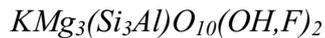
später Epoxidharze fanden zur Imprägnierung von Glimmerbandisolierungen seit 1949 einen sehr großen Anwendungsbereich und werden wegen ihrer Vorteile bis heute in den meisten Isoliersystemen verwendet [1].

Es existieren zwei Arten von Glimmerarten, die am häufigsten in elektrischer Applikation eingesetzt werden [17]:

**Muskovit:** Kaliglimmer oder Kalium-Aluminium-Hydro-Silikat



**Phlogopit:** Magnesiumglimmer oder Kalium-Magnesium-Aluminium-Eisen-Silikat



Die chemische Struktur des Glimmers bietet die Erklärung für die guten elektrischen Eigenschaften. Die Trennung der positiven Kalium-Ionen bezüglich der negativen Oxid-Ionen erzeugt ein permanentes Dipolmoment, auch in Abwesenheit eines elektrischen Felds. Wegen dieser polaren Natur hat Glimmer eine relativ hohe Dielektrizitätszahl [18].

Die Glimmerarten gehören chemisch in die umfangreiche Gruppe der Silikate. Elektrisch zeichnen sie sich eine hohe elektrische Festigkeit (über 150 kV/mm), gleichförmige Dielektrizitätszahl, niedrige elektrische Verluste, hohen elektrischen Widerstand, niedrigen Temperaturkoeffizienten und hohe Kapazität. Thermisch zeigen sie eine niedrige Wärmeleitfähigkeit, sehr gute Stabilität, Nichtbrennbarkeit und eine Hitzebeständigkeit von 600 °C bis 900 °C. Mechanisch sind sie flexibel, hart und besitzen eine hohe Zerreißfestigkeit, obwohl Glimmer relativ weich ist [18].

Zur Verwendung in elektrischen Maschinen kommt im Wesentlichen nur Muskovit in Frage, weil seine elektrischen und mechanischen Eigenschaften besser sind als Phlogopit. Die Temperaturbeständigkeit von Phlogopit ist wegen des Magnesiums allerdings höher. Muskovit ist gegenüber organischen Lösungsmitteln und den meisten Säuren unempfindlich, dagegen wird Phlogopit durch viele Säuren beschädigt. In **Tabelle 1.2** sind die Dielektrizitätszahl und der Verlustfaktor von Muskovit und Phlogopit gegenübergestellt.

**Tabelle 1.1:** Vergleich der Dielektrizitätszahl und des Verlustfaktors von Muskovit und Phlogopit [19]

Glimmersorte	Dielektrizitätszahl ( $\epsilon_r$ )	Verlustfaktor ( $\tan \delta$ ) $\times 10^{-4}$
Muskovit	6,72 - 7,20	1,4 - 52
Phlogopit	3,82 - 5,4	350 - 780

Da die erwähnten Glimmerprodukte in Bezug auf den Glimmer noch nicht als homogen angesehen werden können, wurde die Entwicklung von Glimmerpapiere erforderlich. Zu ihrer Herstellung wird Glimmer durch einen chemisch-thermischen oder andere Prozesse in feinste Flocken aufgespaltet und in eine breiähnliche Masse umgewandelt, aus der analog zur Gewinnung des Papiers aus der Papierpupe eine dünne papierähnliche Glimmer-Isolierfolie hervorgeht. Diese Glimmerpapiere sind unter Markenbezeichnungen wie Samica, Isomica, Mica-Mat, Gogemica und Romica bekannt. Diese großflächigen, gleichmäßig dicken und

homogenen Glimmerpapiere werden durch Imprägnieren mit Kunstharzen, durch Kombination mit Trägerstoffen oder durch Zusammenpressen bei höherer Temperatur zu dichten und gleichmäßigen Isolierstoffen verarbeitet [2].

Die elektrischen Eigenschaften der Mikafolien werden vorwiegend durch den Glimmer und die thermischen Eigenschaften durch Bindemittel bestimmt. Der Glimmeranteil beträgt bis zu 60%. Die Imprägnierung mit dem jeweiligen Bindemittel erfolgt unter Vakuum, um Lufteinschlüsse und damit Teilentladungen weitgehend zu vermeiden. Mit den thermisch stabileren Tränklacken auf Polyamidbasis erreicht man eine maximale Grenztemperatur von etwas 250 °C oder die Wärmeklasse F (155 °C). Für noch höhere Betriebstemperaturen sind dann Silikonharze (Silikonkautschuk) zu verwenden [20]. Silikon ist ein Kunststoff aus den Elementen Silizium, Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff. Die hohe Wärmebeständigkeit von Silikon, die zu Isolierstoffen der Wärmeklasse H (180 °C) führt, ist auf die Si-O-Si-Bindung zurückzuführen [2]. Das Silikonharz wird Glimmerfrei oder mit Glimmer verwendet. Wegen der mechanischen Verletzbarkeit der Silikonharze, werden diese nur bis 4 kV eingesetzt [7]. Eine Verbinde mit Glimmer erlaubt jedoch höhere Betriebsspannungen. Allerdings sind die Kosten für ein solches Isoliersystem höher als für ein Epoxidharzsystem.

Die Wärmeklasse von Isoliersystemen wird durch die thermische Eigenschaft der verwendeten Materialien bestimmt. Einige Varianten der heute gebräuchlichen elektrischen Maschinen-isolierungen und ihre Wärmeklasse sind in **Tabelle 1.2** aufgelistet. Bei den aufgegebenen Temperaturen ändert der Isolierstoff seine Eigenschaften während der Prüfzeit, die oft einer Betriebszeit von 20000 oder 25000 Stunden entspricht. Die Isolierung soll daher eine durchschnittliche Lebensdauer von ungefähr 3 Jahren bei dieser Temperatur aufweisen [3], [21].

**Tabelle 1.2:** Varianten elektrischer Maschinenisolierungen und ihre Wärmeklasse [7], [21]

Wärmeklasse	Isolierungsmaterialien
A 105 °C	Baumwolle, Seide, Zellulosepapier, Zellwolle
B 130 °C	Materialien auf Basis von Glimmer (auch auf organischen Unterlagen), Asbest oder Glasfasern, die mit geeigneten organischen Bindemitteln verwendet werden. Typische Bindemitteln sind Schellack, Asphalt und einige Polyesterharze.
F 155 °C	Materialien auf Basis von Glimmer, Asbest oder Glasfasern mit Bindemitteln der Wärmeklasse F. Häufig wird Epoxidharz als Bindemittel verwendet.
H 180 °C	Materialien auf Basis von Glimmer, Asbest oder Glasfasern mit Bindemitteln Silikon, Silikongummi und andere der vorliegenden Klasse entsprechenden Materialien oder Materialkompositionen.
G über 180 °C	Materialien auf Basis von Glimmer, keramische Stoffe, Glas oder Quarz, die ohne oder mit für Klasse G geeigneten anorganischen Bindemitteln verwendet werden.

### 1.2.2 Aufbau der Ständerwicklungen

Die Ständerwicklungen großer Maschinen sind aus einzelnen Stäben oder Spulen aufgebaut. Jede Spule oder jeder Stab der Ständerwicklung wird aus einzelnen, gegeneinander isolierten Teileitern zusammengesetzt. Innerhalb des Systems unterscheidet man die Isolierung der einzelnen Leiter (Teilleiterisolierung) und die Hauptisolierung im Nut- und Wickelkopfbereich. Die Dicke der Hauptisolierung ist sowohl der Nennspannung der Maschine als auch den Betriebs- und Fertigungsbedingungen angepasst.

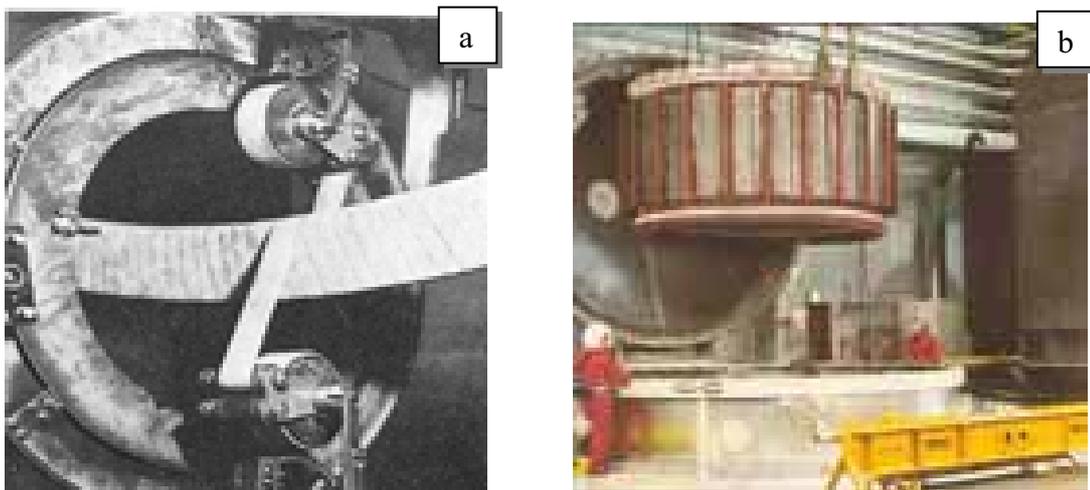
Bevor die Stäbe der einzelnen Spulen mit Mikanietbändern umwickelt werden, versieht man sie bei Maschinen hoher Nennspannungen mit einem halbleitenden Belag, dem sogenannten Innenglimmschutz (IGS). Damit können die elektrischen Feldstärken an den Kanten der Einzelleiter unter ca. 5 kV/mm gehalten werden [22].

Zur Fertigung der Hauptisolierung der aus den isolierten Teileitern hergestellten Formspulen der Hochspannungsmaschinen werden heute geschichtete Glimmerisolierungen eingesetzt, die hauptsächlich in zwei unterschiedlichen Verfahren durchgeführt wird. Das erste ist die Anwendung des Harzreichmikafoliums (Resin-Rich). Dabei wird das Mikafolium in vorbereiteten Bahnen oder Bändern von Hand oder maschinell um den zu isolierenden Nutteil mit einer Kraft von 40-60 N herumgewickelt und anschließend wird die Aushärtung und Formgebung unter Drücken von ca. 30-100 bar in beheizbaren hydraulischen Pressen bei Temperaturen zwischen 100-180 °C über mehrere Stunden vorgenommen. Die verwendeten Glimmerbänder bei diesem Verfahren weisen einen Harzanteil von ca. 40% bis 45% Harz auf. Bei dem Bügelvorgang werden das existierende Harz im Mikafolium flüssig und die ganze Spule durch das Harz durchgetränkt. Die fest um den Stab herumgezogenen Mikafoliumlagen werden noch in heißem Zustand aus den Bügelmaschinen genommen und in die Formpressen gebracht, in denen die zunächst noch plastische Isolierung auf die Abmessungen der Nut gepresst und das Harz gleichmäßig in der Spule verteilt wird. Es ergibt sich ein Kompressionsverhältnis von ungefähr 25-30% nach der Pressung. Zur Aushärtung der Isolierung bleibt die Spule für 30 bis 40 Minuten bei einer Temperatur von ungefähr 170 °C in der Formpresse. Danach montiert man alle Spulen in das Ständerblechpaket und fertigt die Verbindungen. Eine Nachhärtung der Isolierung erfolgt dann bei einer Temperatur von 140 °C für eine Zeit von ungefähr 12 Stunden [2], [23].

Beim zweiten Verfahren werden die aus isolierten Teileitern hergestellten Formspulen mit Glimmerbändern von 20 bis 40 mm Breite und von 0,12 bis 0,3 mm Dicke von Hand oder maschinell überlappend mit genau vorgegebener Lagenzahl umwickelt (**Bild 1.1-a**), einem Vakuum-Druck-Prozess (VPI) entgast und mit Kunstharz imprägniert. Die verwendeten Glimmerbänder bei dem VPI-Verfahren haben etwa 10% bis 25% Harz. Durch den sorgfältig gesteuerten VPI-Prozess sollen auch kleinste Hohlräume in der Isolierung verhindert werden, die zu inneren Gas-Feststoff-Grenzflächen führen und die elektrische Festigkeit der Isolierung schwächen könnten [6], [24].

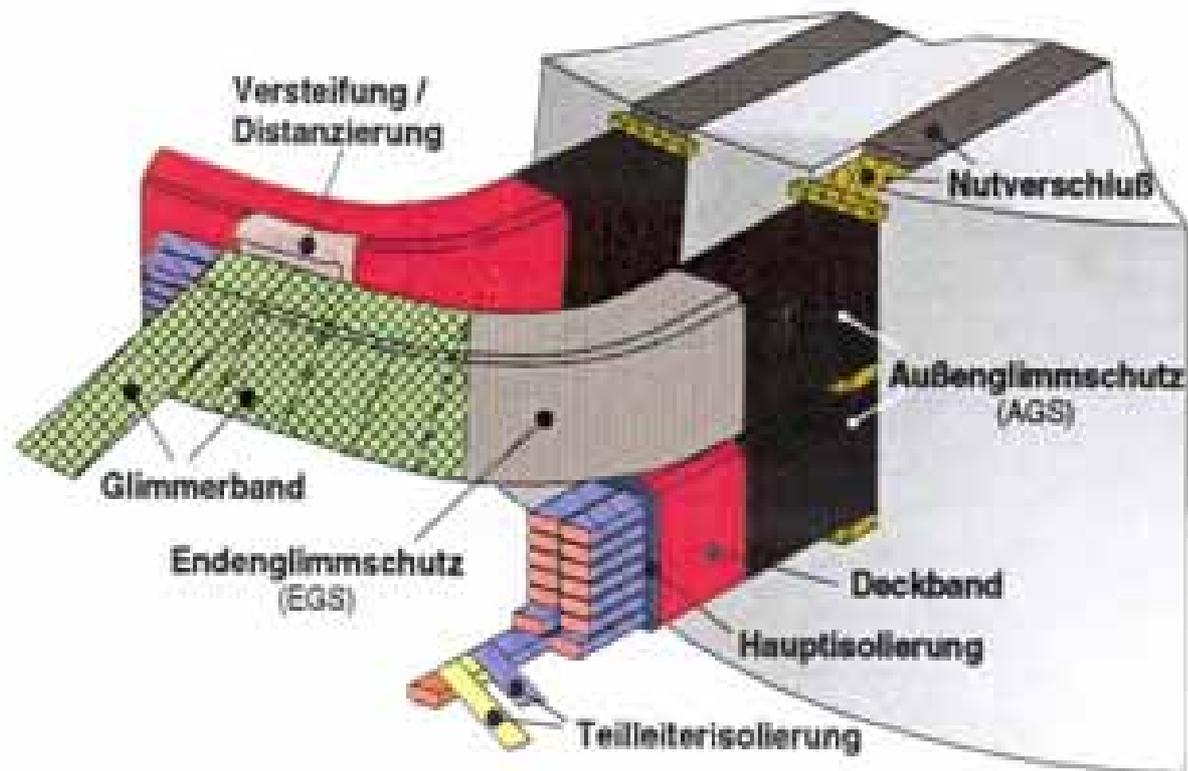
Abhängig von der Größe des Imprägnierungstanks werden ein vollständiger Ständer oder für große Maschinen einzelne Ständerstäbe imprägniert (**Bild 1.1-b**). Im Falle der Imprägnierung eines vollständigen Ständers, werden zuerst alle Spulen in das Ständerblechpaket eingesetzt.

Dann findet eine Vortrocknung des Ständers bei 80-120 °C statt, die 1 bis 12 Stunden dauern kann. An Stelle einer besonderen Vortrocknung im Ofen werden auch beheizbare Tränkanlagen verwendet, in denen Trocknung und Evakuierung gleichzeitig vorgenommen werden können. Der Vakuumprozess im Imprägnierungstank kann 1 bis 8 Stunden bei einem Vakuum von 0,1 bis 1 mbar dauern. Bevor das Harz in den Imprägnierungstank gelangt, wird die Temperatur auf Raumtemperatur gebracht. Der Imprägnierungstank wird dann bis ungefähr 10 Zentimeter über Ständerniveau gefüllt. Dieser Prozess kann bis 2 Stunden dauern. Anschließend wird der Druck im Imprägnierungstank auf 2 bis 10 bar erhöht und bleibt abhängig von der Viskosität des Harzes auf diesem Druck für 2 bis 12 Stunden, damit die Wicklungen vollständig mit Harz imprägniert werden. Der zeitliche Ablauf der Imprägnierung und der Druckhaltung ist auf die Dicke und Durchtränkbarkeit der Glimmerbandbewicklung und das verwendete Harzsystem abgestimmt. Nach der Entnahme des Ständers aus der Tränkwanne wird, abhängig von der Größe des Ständers und des Typs des verwendeten Harzes, die Aushärtung bei in einem Ofen einer Temperatur von 120 °C bis 150 °C für 8 bis 20 Stunden vorgenommen. Eine Nachhärtung erfolgt in der ersten Zeit des Einsatzes [2], [23].



**Bild 1.1:** (a) Maschinelle Bewicklung eines Stabes mit Glimmerband [2]  
(b) ein bewickelter Stator, fertig zur Imprägnierung in Imprägnierungstank  
(von Roll Isola)

Um das Erdpotential gleichmäßig über die gesamte Länge der Stäbe zu verteilen und Entladungen in den Luftspalten zwischen der Staboberfläche und dem Blechpaket im Nutbereich zu verhindern, wird ein leitfähiger Belag, den Außenglimmschutz (AGS) aufgebracht (**Bild 1.2**). Der AGS muss genügend leitfähig sein, um einen sicheren Potentialausgleich über dem gesamten Stab in Länge und Umfang zu garantieren. Damit wird auch bei ungünstiger punktueller Kontaktierung des Stabes mit dem Blechpaket an keiner Stelle der Staboberflächen der Minimalwert der Paschen-Kurve (ca. 350 V für Luft) erreicht und es kann nicht zu Nutentladungen kommen [5]. Allerdings niederohmig darf der AGS auch nicht zu niederohmig ausgeführt werden, da er sonst das Eisenpaket des Ständers kurzschließt. Die eingesetzten leitfähigen Beläge für den AGS haben einen Oberflächenwiderstand von etwa  $10^3 - 10^5 \Omega$  bei einer quadratischen Fläche [25].

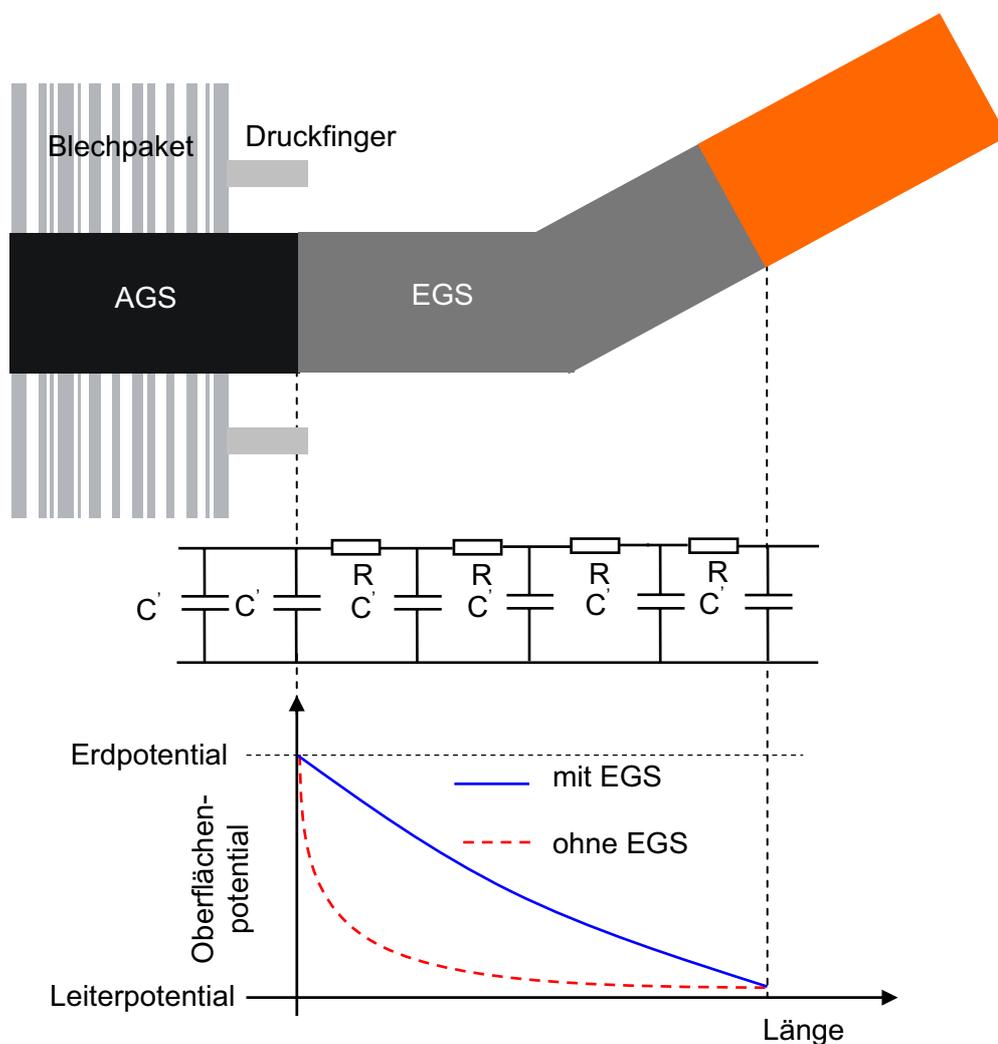


**Bild 1.2:** Prinzipieller Aufbau von Isoliersystemen für Ständerwicklungen [6]

Bevor die Nut mit dem Verschlusskeil geschlossen wird, werden die durch Zwischenschieber getrennten Ober- und Unterstäbe noch mit Federelementen versehen. Auf diese Weise kann ein dauerhafter, mechanisch gut fixierter Sitz der Stäbe in den Nuten gewährleistet werden.

Ein weiterer Glimmschutz, der Endenglimmschutz (EGS), dient zur Steuerung des elektrischen Feldes an den Nutaustritten bei Nennspannungen über 6 kV, da am Ende des Nutbereiches der Spulen das elektrische Feld hoch und stark inhomogen ist. Der EGS wird direkt auf die Isolierung oder den Außenglimmschutz aufgetragen und weist hochohmigen (halbleitfähigen) Charakter auf. Durch das Aufbringen des EGS wird der Potentialverlauf in diesem Bereiche so beeinflusst, dass die Feldverteilung gleichmäßiger ist und keine TE im Betrieb auftreten. **Bild 1.3** zeigt das Ersatzschaltbild des Glimmschutzes und die Potentialverteilung am Nutaustritt mit und ohne EGS.

Die Beläge, die als EGS eingesetzt werden, bestehen entweder aus Anstrichen, die mit einem trocknenden und härtbaren Harz unmittelbar auf die Isolierstoffoberflächen aufgetragen werden, oder aus Anstrichen, die zusammen mit geeigneten Bändern verarbeitbar sind. Die erforderlichen Widerstände liegen bei einer quadratischen Fläche im Bereich von  $10^8 - 10^{10} \Omega$  [2]. Beläge mit nichtlinearem Widerstand bezüglich der elektrischen Feldstärke kommen ebenfalls als EGS zum Einsatz [25].



**Bild 1.3:** Ersatzschaltbild des Glimmschutz und Potentialverlauf entlang der Längsgrenzfläche des EGS am Austritt der Spulenschenkel aus der Nut

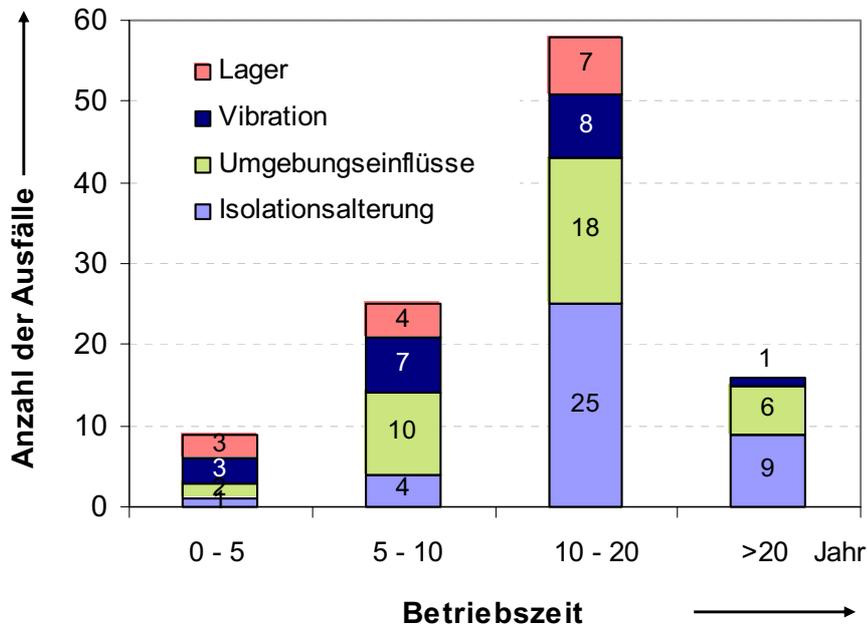
### 1.3 Alterungsmechanismen und Lebensdauermodelle

Eine wichtige Frage für Entwicklung und Verwendung der Diagnoseverfahren ist Entstehung und Weiterentwicklung der Defekte in den Isoliersystemen. Es wurden daher viele Untersuchungen zur Erklärung der Alterungsmechanismen und der Modellierung der Lebensdauer der Isoliersysteme durchgeführt.

Elektrische Isolierstoffe verändern ihre Eigenschaft unter dauernden Beanspruchungen im Laufe der Betriebszeit. Diese Eigenschaftsänderung ist häufig Wandlung des molekularen Gefüges und wird im allgemeinen Alterung genannt. Alterung ist eine nichtumkehrbare, schädliche Änderung der Betriebsfähigkeit und Betriebslebensdauer von Isoliersystemen. Die Betriebslebensdauer eines Isoliersystems ist die tatsächliche Lebensdauer mit einer definierten Bedeutung, wie z.B. Zeit bis zum Ausfall, Zeit bis zu einer unwirtschaftlich hohen Fehlerhäufigkeit, Betriebszeit ohne Fehler usw. [26].

Für die Ausfälle der Maschinen während des Betriebes können eine Kombination von thermischen, elektrischen und mechanischen Beanspruchungen sowie Umgebungseinflüsse

verantwortlich sein. Als ein Beispiel kann die in **Bild 1.4** dargestellte Ausfallstatistik von Hochspannungsmotoren mit Nennspannung von 3 bis 6 kV betrachtet werden, welche zeigt, dass die Ursache der meisten Ausfälle bei den untersuchten Maschinen die Alterung des Isolationssystems ist. Es ist in dieser Statistik zu beachten, dass die Anzahl der Ausfälle bei den Maschinen, die mehr als 21 Jahre alt sind, abgenommen hat, da die meisten Motoren mit mehr als 21 Jahren Betriebszeit entweder ersetzt oder außer Betrieb genommen wurden.



**Bild 1.4:** Ursache der Ausfälle bei untersuchten Hochspannungsmotoren in Abhängigkeit vom Maschinalten [27]

### 1.3.1 Thermische Alterung

Von allen Beanspruchungen hat die thermische Beanspruchung den größten Einfluss auf die Lebensdauer der Isolierung. Die Wärme kann durch verschiedene Verluste wie ohmsche Verluste ( $RI^2$ ), Wirbelstromverluste, Streulastverluste im Kupferleiter, Eisenverluste der Belechpakete und dielektrische Verluste erzeugt werden. Die Erwärmung der Maschinen im Betrieb hat im Laufe der Betriebszeit chemische und physikalische Veränderungen in allen organischen Bestandteilen der Isolierungen zur Folge, die als Bindemittel eingesetzt werden. Durch Wärme können chemische Veränderungen, wie Kettenbrüche, Strukturveränderungen, Abspaltungs-, Vernetzungsreaktion und Oxidation der organischen Bestandteile bewirkt werden, die zu einer chemischen Zerstörung führen. Zusätzlich treten mechanische Zerstörungen durch verschiedenen große Wärmeausdehnungen von metallischen Leitern und der anliegenden Isolierung auf [2]. Eine Überschreitung der vom Hersteller der Maschinen vorgesehenen Betriebstemperaturen durch Überlastung, ungenügende Kühlung infolge Fehlbedienung oder Verschmutzung von Kühlwegen kann zur Beschleunigung der Alterungsvorgänge führen [1], [4]. Als Ergebnis steigt der Gasdruck in den Hohlräumen an und mindert die Klebfestigkeit zwischen Epoxidharz und Mika. Diese Erscheinung kann zur Delamination an der Grenzfläche von Epoxidharz und Mika führen. Die thermo-mechanischen Beanspruchungen z.B. durch Lastwechsel der Maschine können dazu führen,