

# **Trockendurchführungen mit Silikonbeschirmung**

**Thomas Dischinger**  
**Technischer Leiter Durchführungen**  
**MICAFIL AG, Zürich**

# Einleitung

Der Einsatz von Silikon bei Hochspannungsisolatoren hat sich in den letzten 25 Jahren bewährt. Speziell unter schwierigen Umweltbedingungen zeigte sich, dass die Silikonoberfläche wesentliche Vorteile gegenüber dem Porzellan bringt.

Dies begründet sich im wesentlichen auf der Hydrophobie der Oberfläche und der sogenannten „Hydrophobierung“ von Verschmutzungen, die sich auf dem Material ablagern.

Nachdem sich die hochspannungstechnische Tauglichkeit der Silikonoberfläche erwiesen hatte, begannen wir vor ca. 10 Jahren Composite-Isolatoren bei Durchführungen einzusetzen. Durch den vergleichsweise hohen Preis gegenüber Porzellanisolatoren blieb der Anteil an Durchführungen mit Verbundisolatoren recht klein. Derzeit werden ca. 10% unserer Durchführungen mit Verbundisolatoren ausgerüstet. Bei anderen Anwendungen ist der Einsatz von Verbundisolatoren deutlich höher, wie z.B. Kabelendverschlüsse oder Hochspannungsableiter, in denen sich betriebsmässig ein relativ hoher Druck aufbauen kann.

## 1 Auswahlkriterien

Der Einsatz von Verbundisolatoren hat technisch ganz wesentliche Vorteile gegenüber Porzellanisolatoren. Bei bestimmten Anwendungen gibt es nach unserer Meinung keine Alternative zu Verbundisolatoren. Die dabei wesentlichen Eigenschaften sind:

- Explosionssicherheit des Isolators
- Verschmutzungsunempfindlichkeit
- Hohe mechanische Stabilität
- Geringes Gewicht
- Einfache Handhabung

Aufgrund der Personengefährdung durch umherfliegende Teile sollten grundsätzlich alle Durchführungen, die betriebsmässig mit Innendruck beaufschlagt werden, mit einem Verbundisolator ausgerüstet werden. Es entspricht nicht mehr dem Stand der Technik, wenn heute eine gasgefüllte Durchführung mit einem Porzellan versehen wird. Dies ist für uns ein zwingender Grund in diesen Fällen immer einen Verbundisolator einzusetzen.

Weitere Einsatzfälle sind erdbebengefährdete oder küstennahe Einsatzgebiete und Wanddurchführungen für beidseitigen Freilufteinsatz.

Die relativ hohen Kosten des Verbundisolators schrecken viele Kunden ab, so dass die Entscheidung sehr häufig zugunsten des Porzellanisolators ausfällt. Dabei werden häufig die Vorteile nicht beachtet, die man durch das geringe Gewicht und die einfachere Handhabung erreichen kann.

Die in der Anfangszeit des Verbundisolators propagierte Reduktion des Kriechweges beim Einsatz von Silikon wird heute in dieser Form nicht mehr akzeptiert. Obwohl seit Jahren Verbundisolatoren mit verkürzten Kriechwegen problemlos im Einsatz sind, wird von den meisten Kunden beim Verbundisolator der gleiche Kriechweg verlangt wie beim Porzellanisolator. Dies resultiert aus der Gewissheit, dass in Extremfällen die Hydrophobie des Verbundisolators verlorengehen kann. In diesem Fall will man die selbe Sicherheit haben, die man auch vom Porzellanisolator verlangt, der von sich aus hydrophil ist.

## 2 Einsatz von Composite-Materialien bei Durchführungen

Es gibt verschiedene Möglichkeiten des Einsatzes von Composite-Materialien bei Durchführungen. Bei modernen Durchführungen wird der Durchführungskörper aus epoxidharzgetränktem Papier hergestellt. Zusätzlich wird der Raum zwischen Durchführungskörper und Isolator mit einer Trockenfüllung (Polyurethan) versehen, die sehr gute elektrische Eigenschaften aufweist. Der Porzellanisolator wird durch einen Verbundhohlisolator ersetzt.

Somit sind in einer modernen Durchführung ausser den metallischen Teilen, die der Stromleitung und der Potentialsteuerung dienen, alle Materialien durch Composite-Werkstoffe ersetzt worden.

### 2.1 Ausführungsformen verschiedener Durchführungen mit Composite-Materialien

#### Grob gesteuerte gasisolierte Durchführung

Bei diesem Durchführungstyp wird die Potentialsteuerung durch zwei Elektroden im Bereich des Hochspannungsanschlusses und des Erdanschlusses gebildet (Bild 1). Durch den Einsatz von lediglich zwei Elektroden wird keine optimale Feldsteuerung auf der Oberfläche des Isolators erreicht. Dadurch ist dieser Durchführungstyp sehr anfällig gegen leitfähige Verschmutzung auf der Isolatoroberfläche, die eine Veränderung der Potentialsteuerung bewirkt. Wegen dieser Empfindlichkeit ist es angeraten eine Isolatoroberfläche zu verwenden, die auch bei starker Verschmutzung keine Leitfähigkeit auf der Oberfläche hat.

Dies ist eine der herausragenden Eigenschaften eines Verbundisolators mit Silikonoberfläche, die Verschmutzungen hydrophobiert und somit keinen leitfähigen Film auf der Oberfläche bekommt.

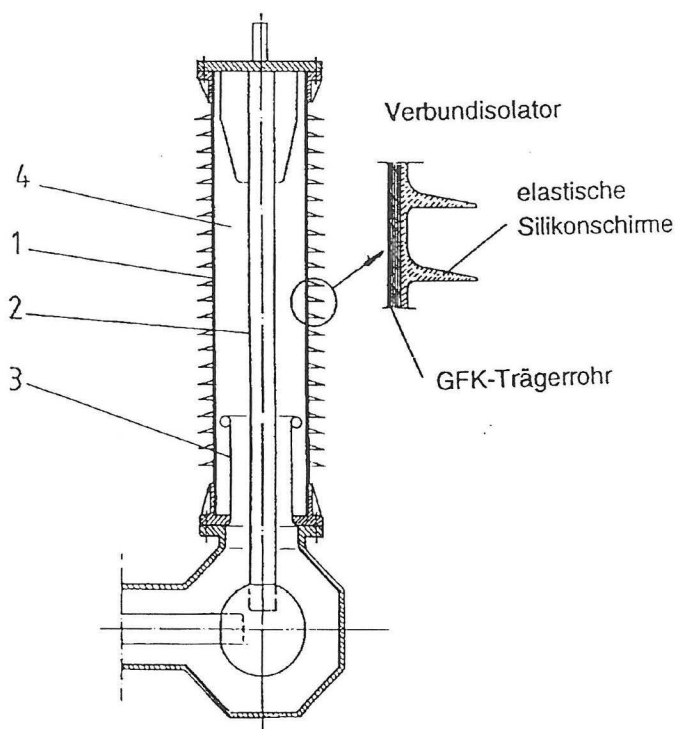


Bild 1: Schnittzeichnung durch eine typische Anordnung einer grob gesteuerten gasisolierten Durchführung

Zudem ist diese Durchführung gasisoliert. Das bedeutet, dass  $\text{SF}_6$  unter 3 - 5 bar Druck die innere Isolation der Durchführung darstellt. In diesem Fall ist es nach unserer Meinung Stand der Technik keinen Isolator mehr einzusetzen, der im Fehlerfall zu einer Explosion mit verheerenden Folgen führen kann. Porzellan unter Druck stellt immer ein Risiko für die in der Umgebung arbeitenden Personen und im Umkreis stehendes Equipment dar.

Dieser Durchführungstyp stellt die einfachste Durchführung für einen gasgefüllten Apparat dar. Durch die Gasverbindung mit der Schaltanlage, in der im allgemeinen ein Gasdichtewächter Undichtigkeiten feststellt, ist keine Überwachung der Durchführung selbst notwendig.

In Bild 2 ist ein Beispiel für die Potentialsteuerung dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass ein grosser Teil der Spannung im Bereich der Erdelektrode abgebaut wird und nur relativ wenig Spannung über dem restlichen Isolator liegt.

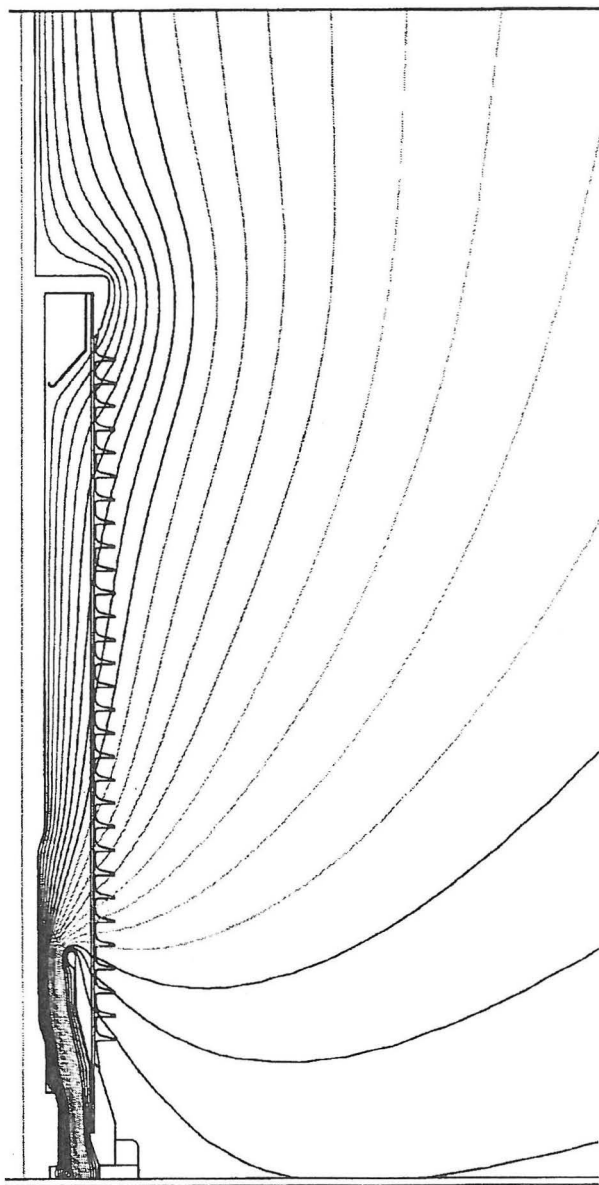


Bild 2: Äquipotentiallinien an einer grob gesteuerten gasisolierten Durchführung

## Fein gesteuerte Durchführungen

Bei den feingesteuerten Durchführungen gibt es verschiedene Ausführungen, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

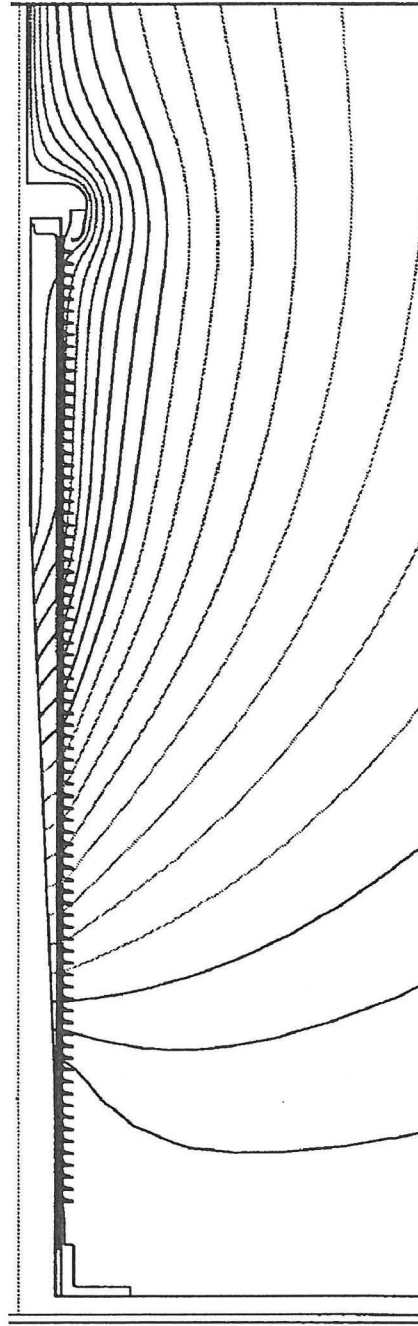


Bild 3: Äquipotentiallinien an einer fein gesteuerten Durchführung

Bei einer fein gesteuerten Durchführung ist die Potentialverteilung deutlich besser über den ganzen Isolator verteilt, so dass Verschmutzungen auf der Oberfläche keinen so grossen Einfluss haben wie bei grob gesteuerten Durchführungen. Dennoch bringt der Einsatz eines Verbundisolators eine wesentliche Verbesserung der Eigenschaften der Durchführung.

## Ölisolierte Durchführung

Zunächst die klassische ölisolierte Durchführung, die bereits sehr lange im Hochspannungsbereich eingesetzt wird.

Bei diesem Durchführungstyp, die sogenannte Weichpapierdurchführung, wird ein Wickel aus Papier hergestellt, der mit entsprechenden Steuereinlagen versehen ist und nach Trocknung im Vakuum mit Öl imprägniert wird. Als Behälter für das Öl und zum Schutz wird i. a. ein Porzellanüberwurf verwendet. Dieser kann auch durch einen Verbundisolator ersetzt werden. Um die Ölmenge möglichst gering zu halten wird in vielen Fällen ein konischer Isolator eingesetzt. Die Auswahl an konischen Verbundisolatoren auf dem Markt ist sehr klein, so dass bevorzugt Porzellan eingesetzt wird. Bei diesen Durchführungen stellt das Öl die Hauptisolation der Durchführung dar. Da eine der häufigsten Fehlerursachen bei Durchführungen Leckagen sind, ist es notwendig diese Durchführungen regelmässig auf Dichtigkeit zu kontrollieren, um grössere Schäden zu vermeiden. Bei Ölverlust ist es sehr kurzfristig notwendig die Durchführung zu demontieren und wieder abzudichten, um einen Verlust der Isolation zu vermeiden.

Dieser Durchführungstyp wird im wesentlichen bei Transformatoren eingesetzt, da die Transformatoren bereits mit Öl gefüllt sind. Trotzdem wird der Ölraum der Durchführung vom Ölraum des Transformators abgeschlossen, um ein Auslaufen des Transformators bei einer Leckage an der Durchführung zu vermeiden. Da die Öldurchführungen eine spezielle Konstruktion bei waagrechtem Einbau benötigen und auch aus Umweltschutzgründen, wird heute auch bei ölgefüllten Transformatoren vermehrt auf Trockendurchführungen zurückgegriffen.

### **Hartpapierdurchführungen**

Bei Hartpapierdurchführungen wird der Wickelkörper aus lackiertem Papier aufgewickelt und Steuereinlagen eingelegt. Da sich bei diesem Verfahren Lufteinschlüsse nicht vermeiden lassen, sind diese Durchführungen immer mit Teilentladungen behaftet. Da das Material durch die Teilentladungen aber nicht zerstört wird, kann eine geringfügig über der Phase-Erde-Spannung liegender Teilentladungseinsatz toleriert werden. Teilentladungen sind bei diesem Material kein Anzeichen für eine Degradation der Isolierung. Nachteilig wirkt sich aus, dass bereits beim Prüfspannungspegel der Transformatoren Teilentladung an der Durchführung auftreten kann, so dass kein Rückschluss auf den Isolationszustand des Transformators mehr getroffen werden kann. Zur Füllung des Zwischenraums kommt Öl oder eine Trockenfüllung zum Einsatz. Somit kann bei dieser Herstellungsmethode eine ölfreie trockene Durchführung hergestellt werden, die bei Einsatz eines Verbundisolators komplett aus Composite-Materialien aufgebaut ist.

Bei Hartpapierdurchführungen ist als zusätzlicher Nachteil zu erwähnen, dass der Durchführungskörper nicht absolut dicht ist. In Abhängigkeit von der Art der Lackierung nimmt der Isolierkörper im Laufe der Zeit Öl auf, das bis in den Kopf der Durchführung gelangen kann, wodurch sich dieser füllt. Durch Abkühlung und Erwärmung kann dies zu einer Undichtigkeit der Durchführung am Kopf führen.

### **Durchführung aus harzprägniertem Papier**

Die neueste Entwicklung im Bereich der Durchführungen ist derzeit der Durchführungskörper aus harzprägniertem Papier. Dabei wird ein Wickel aus Krepppapier mit entsprechenden Aluminiueinlagen zur Potentialsteuerung vakuumgetrocknet und unter Vakuum mit Epoxidharz imprägniert. Bei diesem Verfahren erreicht man völlig luftfreie Durchführungskörper, die bis zu einem Mehrfachen der Phase-Erde-Spannung teilentladungsfrei sind. Mit dieser Methode wurden vor ca. 20 Jahren erste Prototypen hergestellt. Serienmässig werden diese RIP-Durchführungen seit gut 10 Jahren hergestellt. Bei Freiluftdurchführungen kann der Zwischenraum zwischen Isolator und Durchführungskörper mit Öl, SF<sub>6</sub> oder einer Trockenfüllung gefüllt

Micafil-Symposium 1999, Stuttgart

werden. Beim Einsatz von  $\text{SF}_6$  unter Druck muss aus vorgenannten Gründen ein Verbundisolator eingesetzt werden. Die Anzahl der RIP-Durchführungen, die pro Jahr hergestellt werden, nahm in den letzten Jahren erheblich zu.

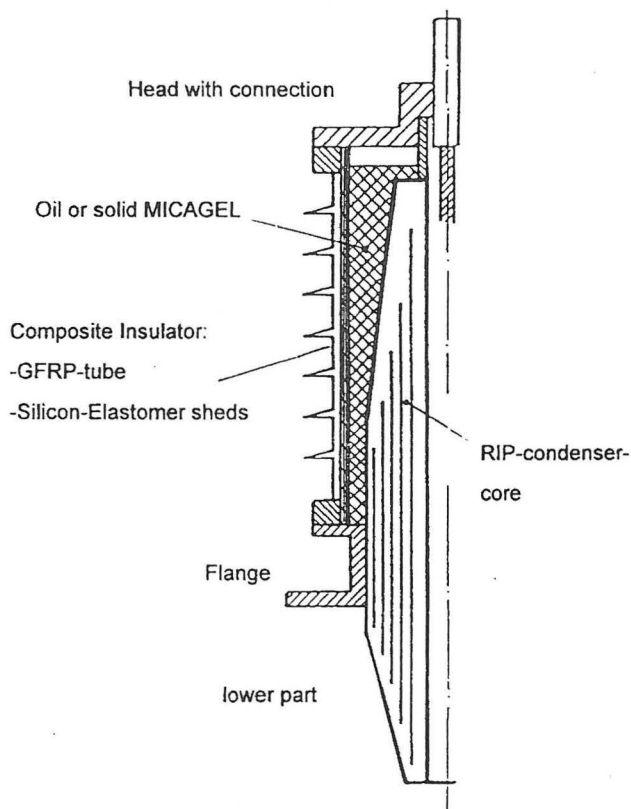


Bild 4: Schnittbild einer feingesteuerten Durchführung mit harz imprägniertem Papier

Dies resultiert aus den verschiedenen Vorteilen, die diese Durchführungen gegenüber allen anderen Typen vorweisen können:

- Hauptisolation vollständig ölfrei - keine Überwachung notwendig
- Bei Einsatz einer Trockenfüllung - keine Einschränkung der Einbaulage
- Teilentladungsfrei - Transformatorprüfung mit Durchführung möglich
- Kein Unterteil notwendig, da Wickelkörper absolut dicht.
- Durch Feinsteuerung geringe Empfindlichkeit gegenüber Verschmutzung
- Durch Eigenstabilität bei Innenraumanwendung kein Isolator notwendig
- Einsatz als Öl- $\text{SF}_6$ - oder Öl-Öl-Durchführung ohne Isolatoren möglich
- Bei kleineren Spannungen ( $\leq 170$  kV) direktes Aufbringen von Silikon-schirmen auf den Isolierkörper möglich - sehr kompakte Durchführung
- Mit Verbundisolator wird eine sehr hohe mechanische Stabilität erreicht wodurch die Durchführungen absolut erdbebensicher werden.
- Bei Trockenfüllung und Verbundisolator - Gewichtsersparnis ca. 30%, bei Wanddurchführungen bis zu 50%
- sehr einfaches Handling bei der Montage durch geringes Gewicht und Ölfreiheit



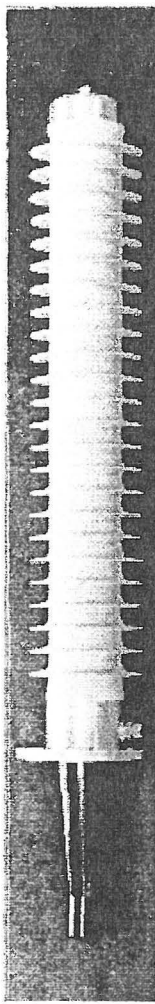


Bild 5: Direktbeschirmte  
Transformator-durchführung  
123 kV

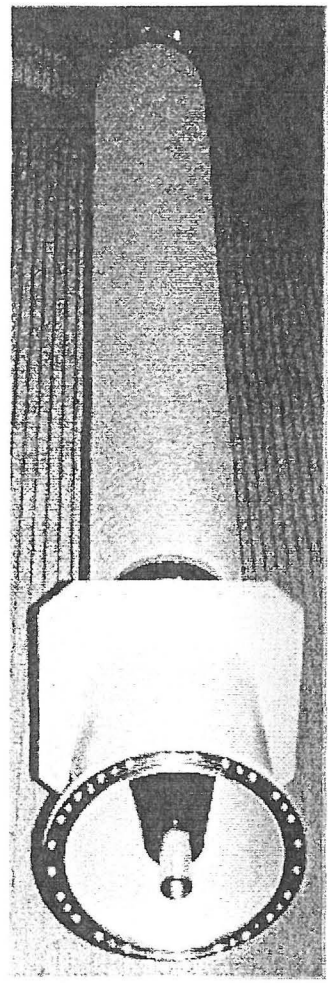


Bild 6: Gasisolierte feingesteuerte SF<sub>6</sub>-  
Freiluftdurchführung

### 3 Erfahrungen mit Verbundisolatoren bei Durchführungen

Seit ca. 10 Jahren werden Durchführungen mit Verbundisolatoren angeboten und verkauft. Der Anteil von Verbundisolatoren liegt bei ca. 10% der gesamten Anzahl verkaufter Durchführungen bei Micafil. Das bedeutet, dass sich der Verbundisolator bei Durchführungen bei weitem nicht so stark durchgesetzt hat, wie dies bei anderen Produkten der Fall ist, z.B. Hochspannungsableiter oder Kabelendverschlüsse. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Verbundisolator nach wie vor teurer ist als der Porzellanisolator. Da heute die finanziellen Erwägungen beim Einkauf höheres Gewicht haben als technische Aspekte, fällt in den meisten Fällen die Entscheidung zu Gunsten des Porzellans. Die anfänglich teilweise kritische Beurteilung des Verbundisolators ist im allgemeinen einer Akzeptanz gewichen. Es sind sehr selten technische Gründe vorhanden, die zu einer Ablehnung des Verbundisolators führen.

Bei Ableitern oder Kabelendverschlüssen hat sich der Verbundisolator durchgesetzt, um eine Personengefährdung zu vermeiden, da bei Ableitern im Fehlerfall eine Drucküberlastung des Gehäuses auftreten kann und Kabelendverschlüsse generell unter Druck stehen. Wenn Porzellanisolatoren eingesetzt werden, ist ein relativ



grosser Aufwand notwendig, um entsprechenden Gefahren vorzubeugen, der bei Verbundisolatoren entfallen kann.

Bei druckbeaufschlagten Durchführungen wird der Einsatz von Verbundisolatoren bei uns vorausgesetzt, obwohl dies meist die teurere Variante ist. Wir setzen uns nicht mehr dem Risiko der Explosion eines Porzellanisolators aus wegen eines Haarrisses im Porzellan oder ähnlichem.

Somit sind weltweit ca. 1000 Micafil-Durchführungen im Betrieb, die mit Verbundisolatoren ausgerüstet oder mit einer Silikondirektbeschirmung versehen sind. Diese Durchführungen sind jetzt bis maximale 10 Jahre in Betrieb. Während dieser Zeit gab es bisher nur vereinzelte Meldungen, dass ein Mangel aufgetreten ist.

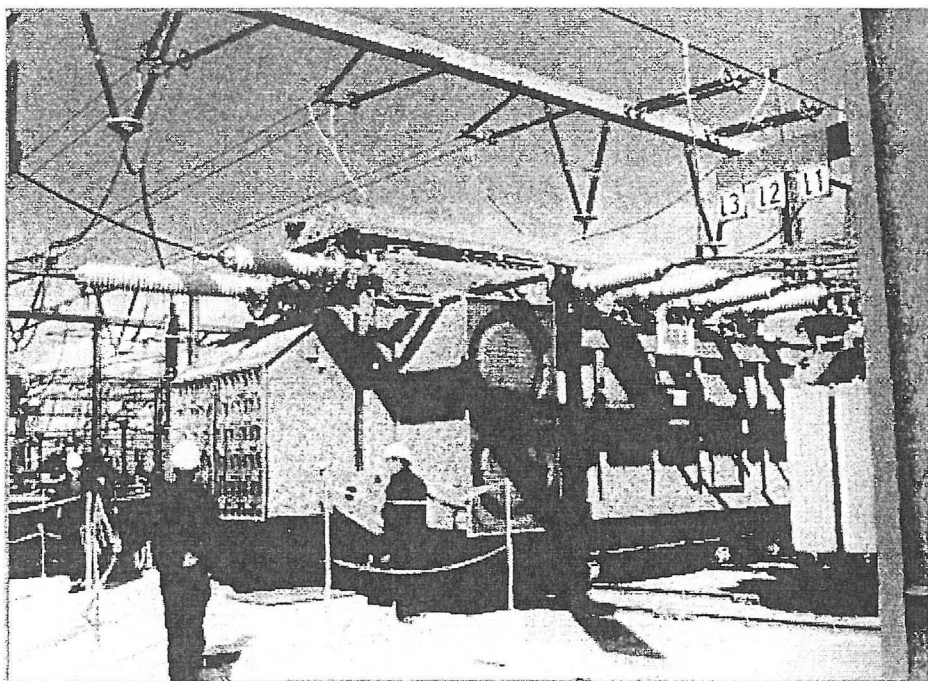


Bild 7: Leistungstransformator ausgerüstet mit waagrecht angeordneten RIP-Durchführungen mit Trockenfüllung

Ein Problem, das bei Silikonisolatoren bekannt wurde, ist das Wachstum grünen „Lebens“ auf den Silikonschirmen. Dies wurde zunächst in den U.S.A. festgestellt, wo eine Untersuchung ergeben hat, dass bestimmte Kiefernsporen auf der Oberfläche der Isolatoren einen Bewuchs von Moos oder Algen ermöglichen. Dieselbe Erscheinung wurde aber auch in Europa an verschiedenen Standorten bemerkt. Offensichtlich hängt dieser Bewuchs nicht unbedingt von dieser speziellen Art Kiefernsporen ab. Schäden, die durch diesen sehr selten auftretenden Belag entstanden sind, wurden bislang noch nicht bekannt. Interessanterweise konnte an einer grob gesteuerten Durchführung, die solchen Bewuchs aufweist, ein deutlich geringeres Wachstum in den Bereichen, wo die höchste Feldstärke auftritt, festgestellt werden. Dies kann durch das Auftreten von geringen Entladungen an der Oberfläche verursacht sein. Es konnte eine höhere Leitfähigkeit bei Befeuchtung der Oberfläche gemessen werden. Durch Abwischen kann der Bewuchs problemlos entfernt werden.

Es wurden bisher auch Fälle von Marderbiss an Durchführungen gemeldet. Dies trat aber in einem Gebiet auf, wo man es gewöhnt ist, dass Überschlüge von Mardern verursacht werden, die auf den Isolatoren selbst unter Spannung herumturnen. Die Schäden an den Isolatoren waren aber in so kleinem Umfang, dass der Betrieb ohne weiteres weitergeführt werden konnte, ohne Überschlüge befürchten zu müssen. Bei

Abschaltung des entsprechenden Transformators kann eine Reparatur des Isolators ausgeführt werden.