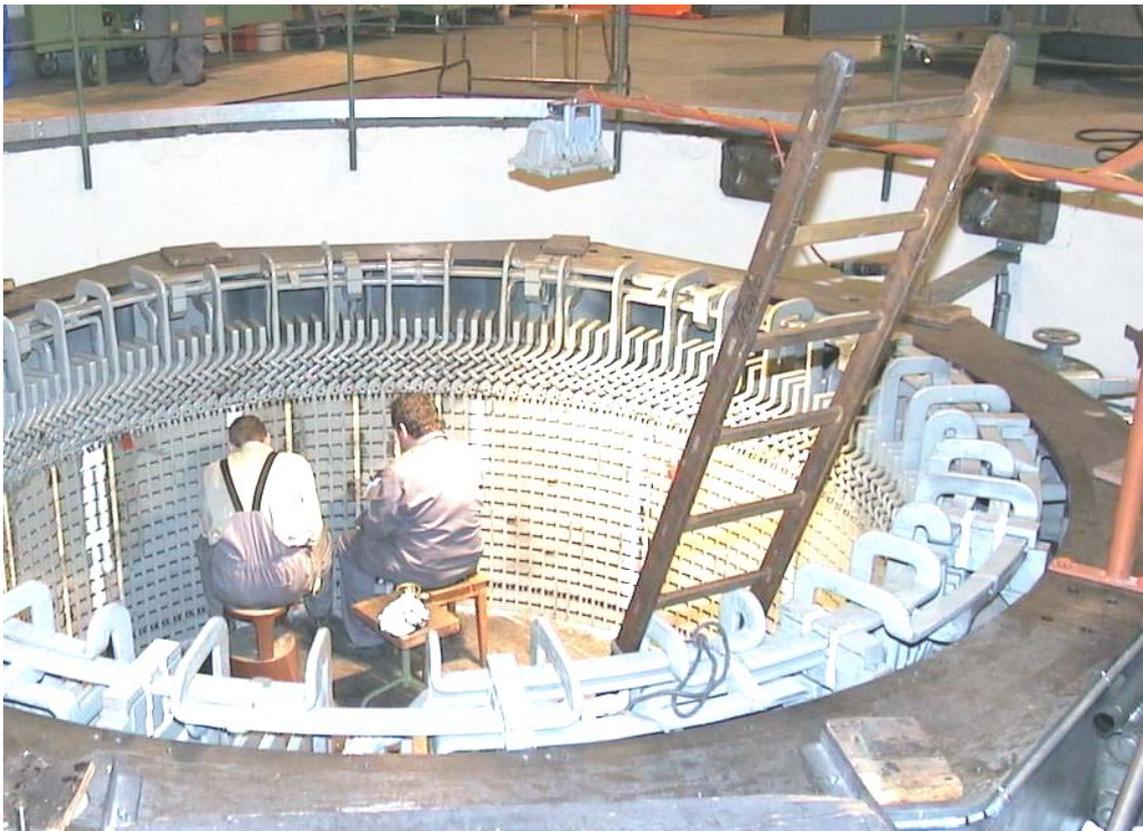


**FKH - / VSE - Fachtagung  
17. Oktober 2000  
ETH Zürich  
Hauptgebäude, Hörsaal E7  
8092 Zürich**

## ***Life-Time-Management von elektrischen Maschinen***



**VSE-Druckschrift 5.50 d**

**FKH - / VSE - Fachtagung**  
**17. Oktober 2000**  
**ETH Zürich**  
**Hauptgebäude, Hörsaal E7**  
**8092 Zürich**

## ***Life-Time-Management von elektrischen Maschinen***

**Veranstalter:**

*Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH*  
*Voltastrasse 9*  
*8044 Zürich*



*Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE*  
*Postfach 6140*  
*8023 Zürich*



***VSE-Druckschrift 5.50 d***



**FKH - / VSE - Fachtagung, 17. Oktober 2001  
ETH Zürich**

# ***Life-Time-Management von elektrischen Maschinen***

## **Vorwort**

Elektrische Generatoren und Antriebsmaschinen stellen für den Energieerzeuger und den industriellen Verbraucher wichtige Schlüsselkomponenten aber auch finanziell aufwändige Betriebsmittel dar. Kostenentscheidend sind nicht nur die Investitionen selbst, sondern auch die laufenden Betriebs- und Instandhaltungsausgaben während der gesamten Lebensdauer der Maschinen. Generatoren und Motoren halten Energie und Materialflüsse und somit die wirtschaftlich relevanten Produktionsprozesse in Gang. Die Sicherstellung eines kurzfristigen Ersatzes bei Ausfällen ist kostspielig oder in vielen Fällen nicht möglich, wodurch grosse Folgeschäden entstehen können.

Der Vorliegende Band beinhaltet Zusammenfassungen von ausgesuchten Referaten über Mittel und Wege zur Optimierung der Lebensdauerkosten von Grossmaschinen. Ein besonderer Schwerpunkt stellt dabei die elektrische und mechanische Zustandsbeurteilung der Maschinen dar. Es wird auf die unterschiedlichen Probleme, welche bei Antriebsmaschinen, Hydro- und Turbogeneratoren im Vordergrund stehen, eingegangen. Nebst elektrischen Prüfmethode werden auch visuelle, mechanische, thermische und chemische Verfahren behandelt. Dabei werden sowohl traditionelle, standardisierte Tests, wie auch neue, noch unerprobte Untersuchungsmethoden diskutiert.

Abgerundet wird der Tagungsinhalt mit übergeordneten Fragestellungen der Betriebswirtschaftlichkeit und der finanziellen Absicherung bzw. des Risikomanagements.



# Tagungsprogramm

Datum: Zeit: 17. Oktober 2001, Beginn 09<sup>15</sup>

Ort: ETH Zürich, Hauptgebäude, Rämistr. 101, Hörsaal E7

Titel: Life-Time-Management von elektrischen Maschinen

Tagungsleitung: Prof. Dr. K. Reichert

	<b>Titel / Inhalt</b>	<b>Referent</b>
09 <sup>15</sup> -09 <sup>20</sup>	Begrüssung im Namen der FKH	Dr. R. Bräunlich
09 <sup>20</sup> -09 <sup>50</sup>	Einführung in das Tagungsthema	Prof. Dr. K. Reichert
09 <sup>50</sup> -10 <sup>20</sup>	Instandhaltung elektrischer Maschinen aus der Sicht des Kraftwerksbetreibers	U. Jampen, BKW FMB Energie AG
10 <sup>20</sup> -10 <sup>50</sup>	Versicherungsfragen von Maschinenbetreibern	A. Amstutz, National Versicherung
10 <sup>50</sup> -11 <sup>15</sup>	<b>Kaffeepause</b>	
11 <sup>15</sup> -11 <sup>45</sup>	Elektrische Prüfmethode an Maschinenisolationen	Dr. R. Bräunlich, FKH
11 <sup>45</sup> -12 <sup>15</sup>	„Electrical treeing“ als Schadensmechanismus in Maschinenisolationen	Th. Farr, R. Vogelsang, ETH, Fachgruppe Hochspannungstechnologie
12 <sup>15</sup> -12 <sup>45</sup>	Diagnose und Monitoring von Maschinenisolationen	Dr. B. Fruth, PD-Tech Power Engineering AG
12 <sup>45</sup> -14 <sup>15</sup>	<b>Mittagessen</b>	
14 <sup>15</sup> -14 <sup>45</sup>	Zustandsorientierte Instandhaltung von Kraftwerksgeneratoren	Dr. C.-E. Stephan, Alstom (Schweiz) AG
14 <sup>45</sup> -15 <sup>15</sup>	Instandhaltung von industriellen Antriebsmaschinen	R. Kleissler, Gebrüder Meier AG
15 <sup>15</sup> -16 <sup>00</sup>	Diskussion	Prof. Dr. K. Reichert

Ende der Veranstaltung ca. 16<sup>00</sup>

# Zusammenfassung der Referate

## *Inhaltsverzeichnis*

	Seite
<b>Instandhaltung elektrischer Maschinen aus der Sicht des Kraftwerksbetreibers</b> Ulrich Jampen, BKW FMB Energie AG	1
<b>Versicherungsfragen von Maschinenbetreibern</b> Armin Amstutz, National Versicherung	10
<b>Elektrische Prüfmethode an Maschinenisolationen</b> Reinhold Bräunlich, FKH	22
<b>„Electrical treeing“ als Schadensmechanismus in Maschinenisolationen</b> Thomas Farr, Ruben Vogelsang, ETH, Fachgruppe Hochspannungstechnologie	30
<b>Diagnose und Monitoring von Maschinenisolationen</b> Bernhard Fruth, PD-Tech Power Engineering AG	40
<b>Zustandsorientierte Instandhaltung von Kraftwerksgeneratoren</b> Carl-Ernst Stephan, Martin Hoof, Tom Bertheau, Alstom (Schweiz) AG	55
<b>Instandhaltung von industriellen Antriebsmaschinen</b> Rolf Kleissler, Gebrüder Meier AG	60
Teilnehmerverzeichnis	65
Referentenadressen	67

# Instandhaltung elektrischer Maschinen aus der Sicht des Betreibers

Ulrich Jampen,  
BKW FMB Energie AG, Bern

## 1 Einleitung

Die Anforderungen eines Betreibers an die Instandhaltung von elektrischen Maschinen (Generatoren, Antriebsmotoren) in seinen Produktionsanlagen kann in Stichworten folgendermassen lauten:

- **Zwischen zwei Instandhaltungsphasen möglichst lange störungsfrei produzieren in gleichbleibender Qualität und Produktivität.**
- **Minimale Stillstandszeiten für Instandhaltungsarbeiten.**
- **Die Instandhaltungsaufwendungen auf das Notwendigste beschränken.**
- **Kostenoptimierte Ersatzteillager.**
- **Eventuelle behördliche Auflagen permanent erfüllen.**

Wir sehen aber sofort ein, dass diese Anforderungen so leicht nicht zu erfüllen sind. Eine elektrische Maschine steht ja nicht allein in der Landschaft, sondern wird entweder von einer anderen Maschine angetrieben oder sie treibt an. Aus diesem Grunde muss die Instandhaltung immer im Rahmen des gesamten Systems betrachtet werden. Wer kennt das Gesamtsystem besser als der Betreiber? Es liegt daher auf der Hand, wer die koordinierte Instandhaltungsplanung durchführen muss, nämlich der Betreiber oder sein Projektant.

In jedem System finden sich immer Komponenten mit **ereignis-, zustands- und zeitorientierter Instandhaltung**. Diese drei Instandhaltungsarten sind sinnvoll so zu komponieren, dass ein Minimum an Ausfallzeiten und Kosten produziert wird. Das Wort "komponieren" deutet ein bisschen an, dass es in Richtung Kunst geht!

Neben diesen allgemeinen Anforderungen an die Instandhaltung sind auch spezielle Anforderungen zu erfüllen, welche von Betrieb zu Betrieb natürlich verschieden sind. Nachfolgend stelle ich Ihnen die bei uns praktizierte Instandhaltung in den rund 20 von BKW betreuten Wasserkraftwerken vor.

## 2 Spezielle Anforderungen an die Instandhaltung

Der Betreiber muss seine Anforderungen an die Instandhaltung seiner Teilsysteme bereits in der Projektierungsphase beeinflussen. Wenn die Instandhaltungsplanung erst beginnt, wenn die Ware im Hause steht, ist es definitiv zu spät. Er hat dann keine andere Wahl, als zu nehmen, was auf der Rampe abgeladen wurde.

Instandhaltungs-Anforderungen und Ersatzteillager kosten Geld. Um diese Kosten im Griff zu haben ist es unerlässlich, dass vor der Umsetzung die Wirtschaftlichkeit der Anforderung überprüft wird. Dabei sind nicht nur die Anfangsinvestitionen, sondern die gesamten Kosten, die Lebenskosten, in der geplanten Einsatzdauer zu betrachten. Das Instandhaltungs-Engineering entscheidet massgeblich über Erfolg oder Misserfolg in der Nutzungsphase. Es lohnt sich also, diese Arbeit einem erfahrenen internen oder externen Projektanten zu übertragen.

Einige Ansätze zum Instandhaltungs-Engineering:



### **Ereignisorientierte Instandhaltung:**

Hat die Anlage eine tiefe Wertigkeit oder sind Redundanzen vorhanden, kann die Instandhaltung ereignisorientiert gestaltet werden, was soviel heisst wie Fahren bis zum Ausfall. Für elektrische Maschinen ist das wenig sinnvoll und selten wirtschaftlich. Die Defekte können so gravierend sein, dass bei einem Schadenfall ein Totalschaden vorliegt. Für die zugehörige redundante Leittechnik ist diese Instandhaltungsart jedoch absolut sinnvoll.

### **Zustandsorientierte (vorsorgliche) Instandhaltung:**

Liegt eine hohe Wertigkeit der Anlage vor, so wird im Normalfall die Instandhaltung zustandsabhängig durchgeführt. Ohne automatisierte Zustandsüberwachung müssen die Inspektionen zeit- oder betriebsstundenabhängig durchgeführt werden.

Um eine Anlage zustandsabhängig instand zu halten sind einige Voraussetzungen nötig, z. B.:

- Leichter Zugang zu den Aktivteilen der Maschine, um optimale Prüf- und Kontrollmöglichkeiten an den kritischen Komponenten durchführen zu können (Sichtkontrollen, Messungen, Risskontrollen etc.).
- Zustands-Überwachungssysteme:  
*Eingebaute Sensoren in kritischen Komponenten sollen Demontagen und Grossrevisionen auf das absolute Minimum beschränken:* Istwert, Trend und Grenzwerte von Temperaturen, Füllständen, Durchflüssen, Drücken, Schwingungen, Stossimpulsen von Wälzlagern, on line Teilentladungen in Hochspannungsmaschinen etc.  
Der Einsatz von automatischen Monitoringsystemen zur Abbildung des Maschinenzustands und der Leistungsfähigkeit erlaubt eine manuelle Bestimmung des Abnutzungsgrades. Der Einsatz von Zustands-Diagnosesystemen, welche noch nicht verbreitet auf dem Markt anzutreffen sind, zeigt den Abnutzungsgrad und die Restlaufzeit bis zur nächsten Instandhaltungsphase (dazu wird heute noch berichtet).
- *Zur Verkürzung und Verminderung der Instandhaltungsphasen müssen auch verschleissmindernde, instandhaltungsfreundliche und - neben den üblichen Schutzsystemen - zusätzliche Schutzmassnahmen in die Planung einbezogen werden, z.B.:*  
**B3;** Geschlossene Kühlkreisläufe.  
Bürstenlose Erregungssysteme für Synchronmaschinen.  
Staubfilteranlagen in durchzugsgekühlten Maschinen  
Schmutzabweisende Spezialbeschichtungen auf Hochspannungswicklungen.  
Überspannungsableiter in den Ableitungen und im Nullpunkt von Maschinen mit Hochspannungswicklungen.  
Einbau von Softstarteinrichtungen für grosse Antriebsmotoren (Frequenzanlauf).  
Schutzbeschaltung der Stator- und Rotorwicklungen gegen subtransiente und transiente Überspannungsbeanspruchungen (Schaltüberspannungen, Umrichteranspeisungen).  
Einbau von Redundanzen (z. B. n-1- bis n-x-Betrieb).

Dies nur einige der möglichen Massnahmen im Bereich der elektrischen Maschinen.

Bei der zustandsabhängigen Instandhaltung ist in der Revisionsphase die Maschine normalerweise nur teilweise demontiert. Nicht alle Konstruktionselemente können kontrolliert werden. Eine gewisse Fehlerquote muss in Kauf genommen werden.

### **Zeitorientierte vorsorgliche Instandhaltung**

Hängt vom System der Erfolg der Firma ab oder setzen Personenschutz-Massnahmen oder behördliche Auflagen Priorität, ist eine zeitorientierte Instandhaltung zu prüfen. Der zeitliche Abstand zwischen den Revisionen und des Revisionsumfangs bzw. die Sanierung muss so gewählt werden, dass ein Ausfall sehr unwahrscheinlich ist.



Diese Instandhaltungsart ist die kostenintensivste, aber nicht strikte abzulehnen. Auch sie hat ihre Vorteile. Ein Ausfall findet nach menschlichem Ermessen nicht statt, also kann ein Teil der Kosten als Versicherungsprämie bewertet werden. Der Abschluss einer Maschinenbruch- und/oder einer Betriebsausfallversicherung muss mindestens in Frage gestellt werden.

### 3 Durchführung der Instandhaltungsarbeiten

#### Inspektion

Vor der Durchführung eventueller Revisionsarbeiten fällt immer 0.5 - 1 Jahr vor einer evtl. Revision eine Inspektion mit einfachen Teildemontagen an. Diese Inspektion unterstützt in hohem Mass den Revisionsentscheid des Betreibers und der Finanzbedarf kann auch abgeschätzt werden.

Neben den Zustandsparametern aus Monitoring- und Diagnosesystemen oder auch einfach aus den Informationen der Leittechnik sind anlässlich der Inspektion mindestens folgende Informationen zu erheben:

##### *Beobachtungen und Messungen im Lauf und im Stillstand:*

Sichtkontrollen

Instandhaltungsrelevante Messwerte und Trends

Leistungsfähigkeit

Vibrationen

Stossimpulse an Wälzlagern

**B7**; Infrarotuntersuchung an kritischen Stellen (darüber wird heute noch berichtet)

##### *Messungen im Stillstand:*

Endoskopische Untersuchungen

**B8**, Alterungszustand und Prüfung von Wicklungsisolierungen (darüber wird heute noch berichtet)

Alterungszustand von Schmierölen

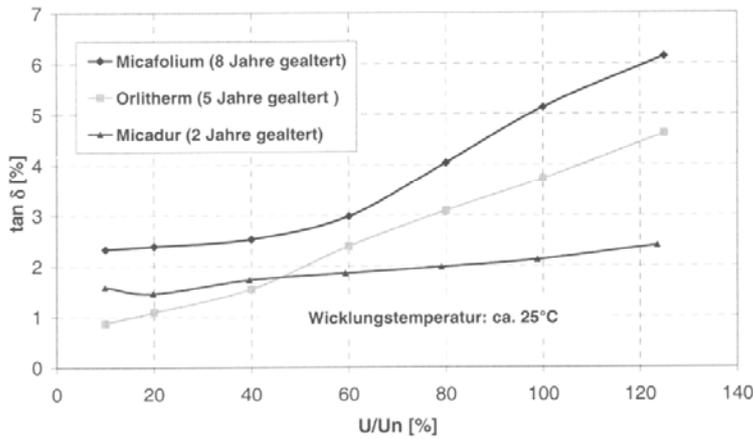
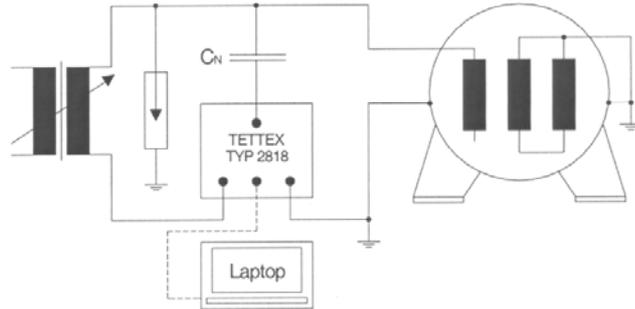
### 4 Zusammenfassung

Maschinenstillstände und damit Produktionsausfälle müssen unbedingt auf ein Minimum beschränkt werden. Die Instandhaltungsplanung von grossen elektrischen Maschinen wird bei den Lieferanten in der Regel nicht anlagenspezifisch, sondern formal durchgeführt. Der Betreiber ist angehalten frühzeitig mitzuarbeiten. Ein optimales Life-Time-Management findet nur statt, wenn der Endkunde auf die Instandhaltung seiner Systeme sensibilisiert ist, aktiv wird und eine ganzheitliche Anlageinstandhaltung durchsetzt. Dazu stehen ihm eine fast unendliche Palette von einfachen konstruktiven Möglichkeiten und unzähligen Hilfsmitteln bis hin zur High-Tech-Elektronik zur Verfügung.

Instandhaltungsmassnahmen, der Einsatz von Hilfsmitteln und messtechnischen Einrichtungen sowie Fremdleistungen und plötzliche Ausfälle beeinflussen in hohem Masse die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Sie muss vom Betreiber periodisch, z. B. vierteljährlich, überprüft werden.

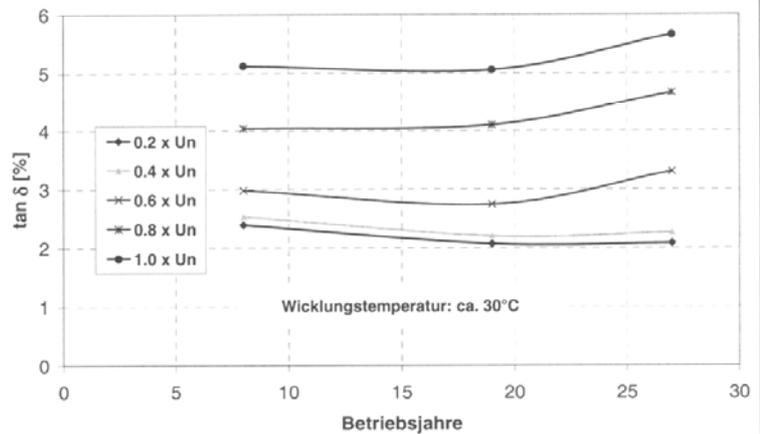
## Isolationsdiagnostik an rotierenden Maschinen Verlustfaktor $\tan\delta$

Mess-Schema



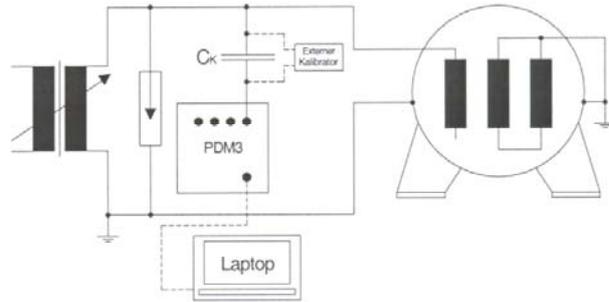
Tanδ von diversen  
Isolations-Techniken in  
Funktion der Spannung

Tanδ-Verlauf in Funktion  
der Betriebs-Jahre  
(Micafolium)

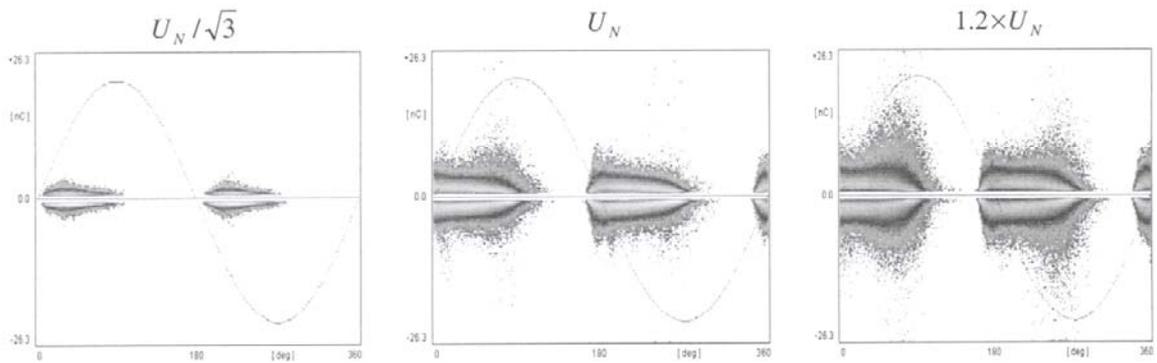


## Isolationsdiagnostik an rotierenden Maschinen Teilentladungen (TE)

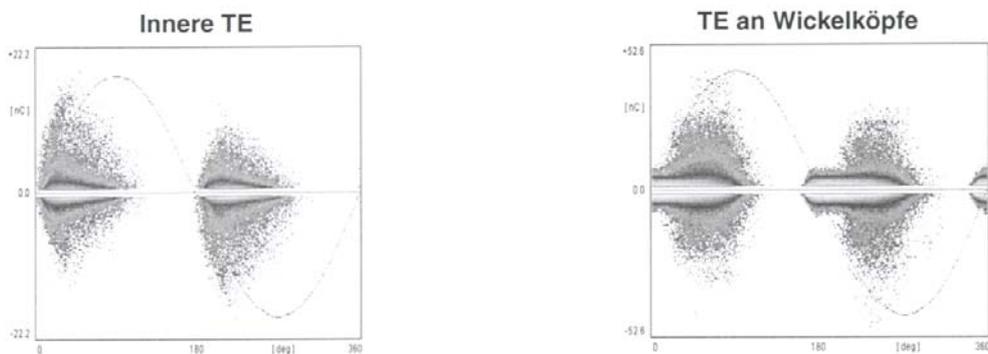
Mess-Schema



### Tan $\delta$ von diversen Isolations-Techniken in Funktion der Spannung



### Erkennung von Isolierungs-Schwachstellen je nach TE-Art

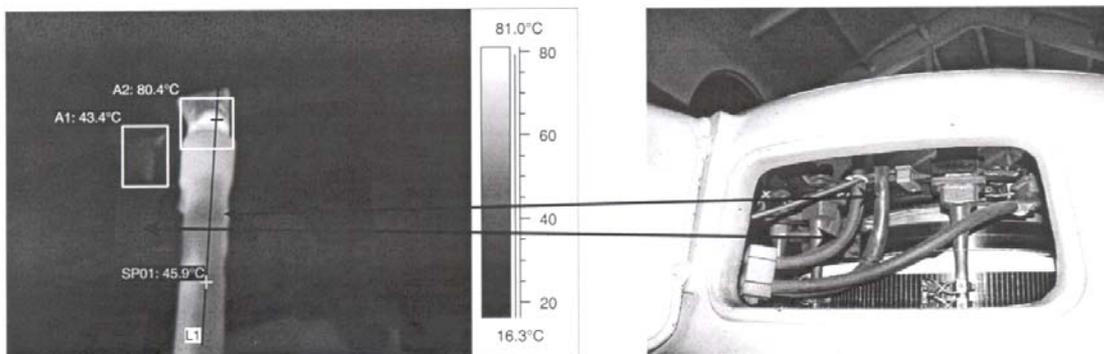


Hohlräumen, Oberflächenlunkern, Spalten zwischen Dielektrikum und Blechpaket oder innerhalb des Dielektrikums.

Glimm- und Korona-Entladung

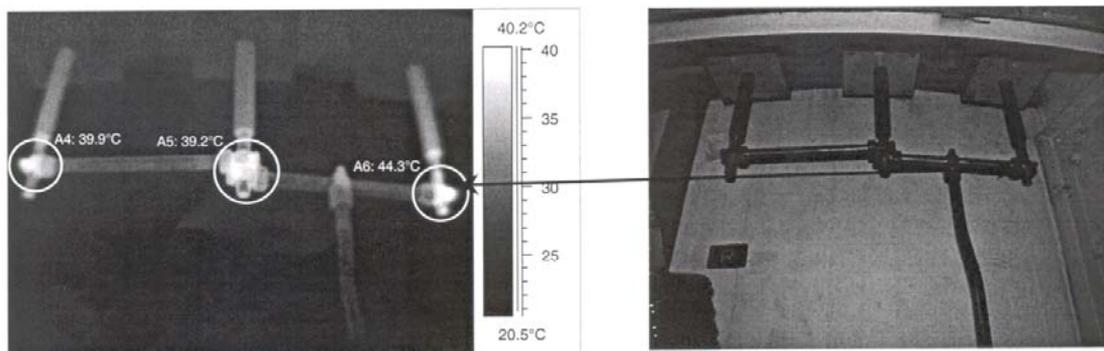
## Instandhaltung an rotierenden Maschinen Thermografie

### Kontrolle vor der Revision



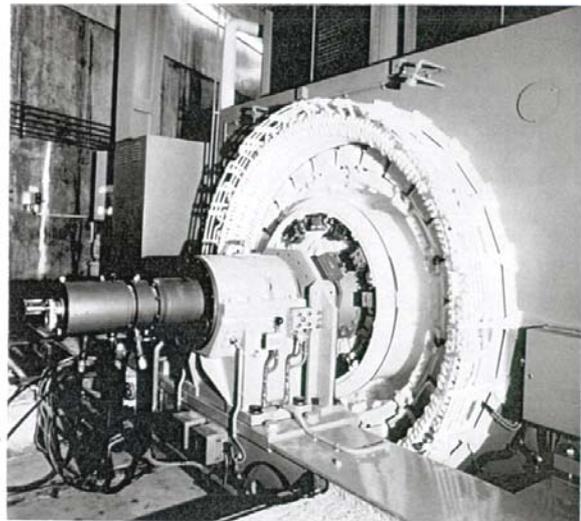
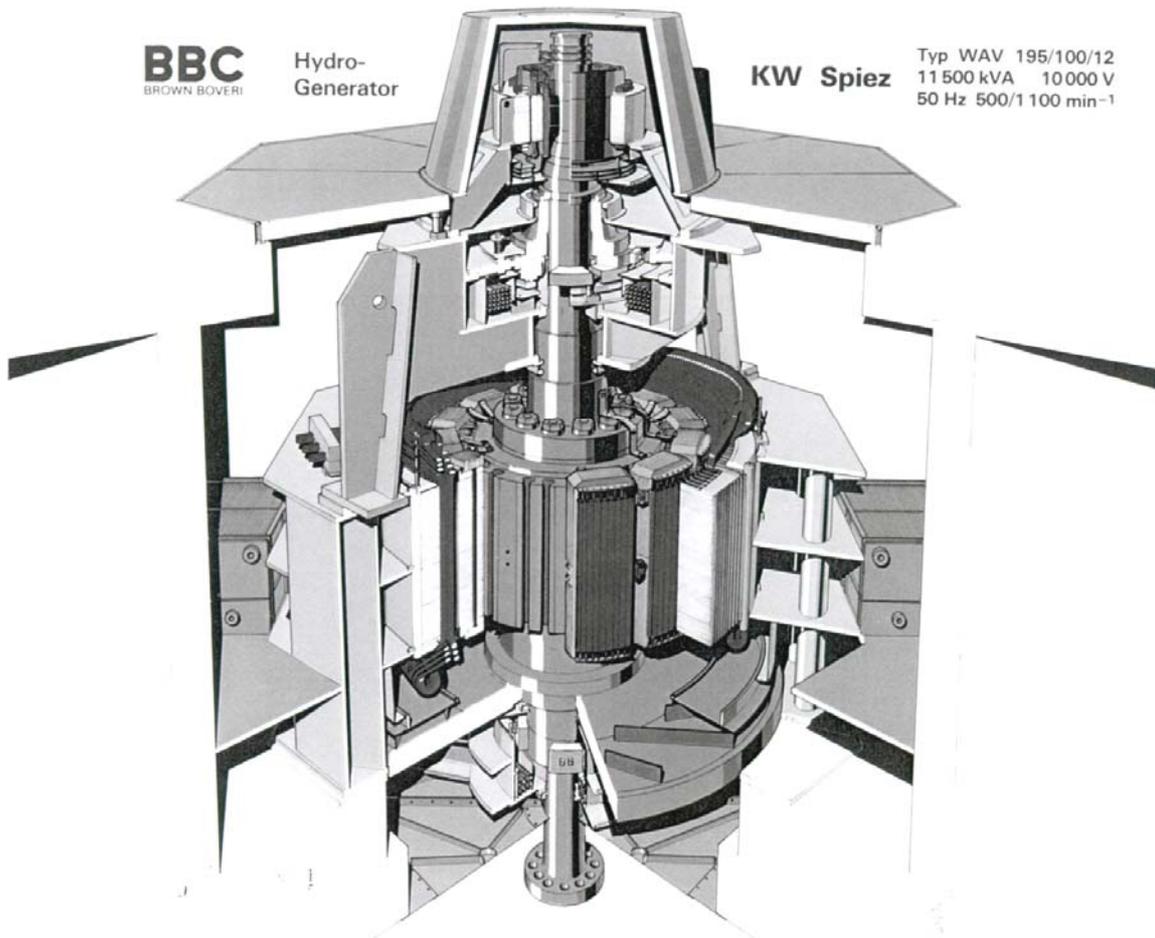
Schwachstelle in Erregerstromkabel

### Kontrolle der Anschlüsse nach der Messung

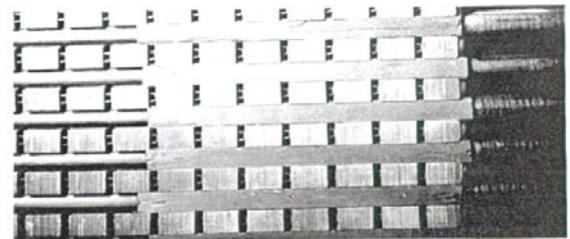
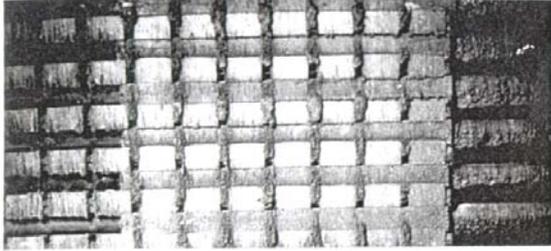


Kontaktproblem im Sternpunkt

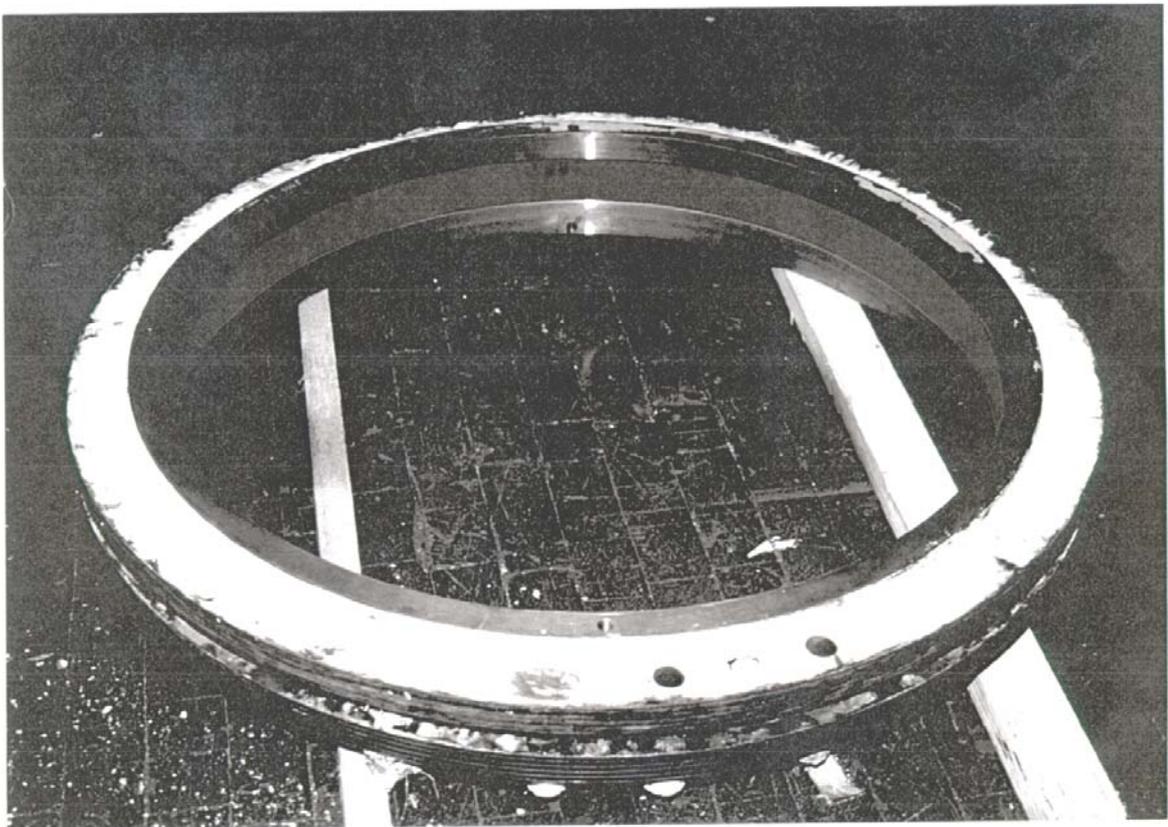
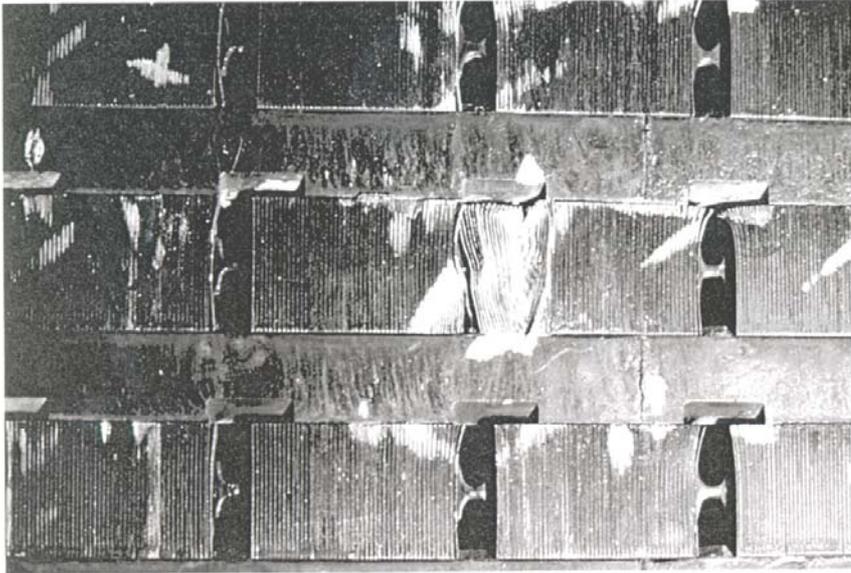
Beispiele instandhaltungsfreundlicher Maschinenkonstruktionen



Beispiele nachträglich eingebauter Zuluftfilteranlagen



Risiken der zustandsabhängigen Instandhaltung





# Versicherungsfragen von Maschinenbetreibern

Armin Amstutz, National Versicherung, Basel

## 1 Aus der Geschichte der Versicherung

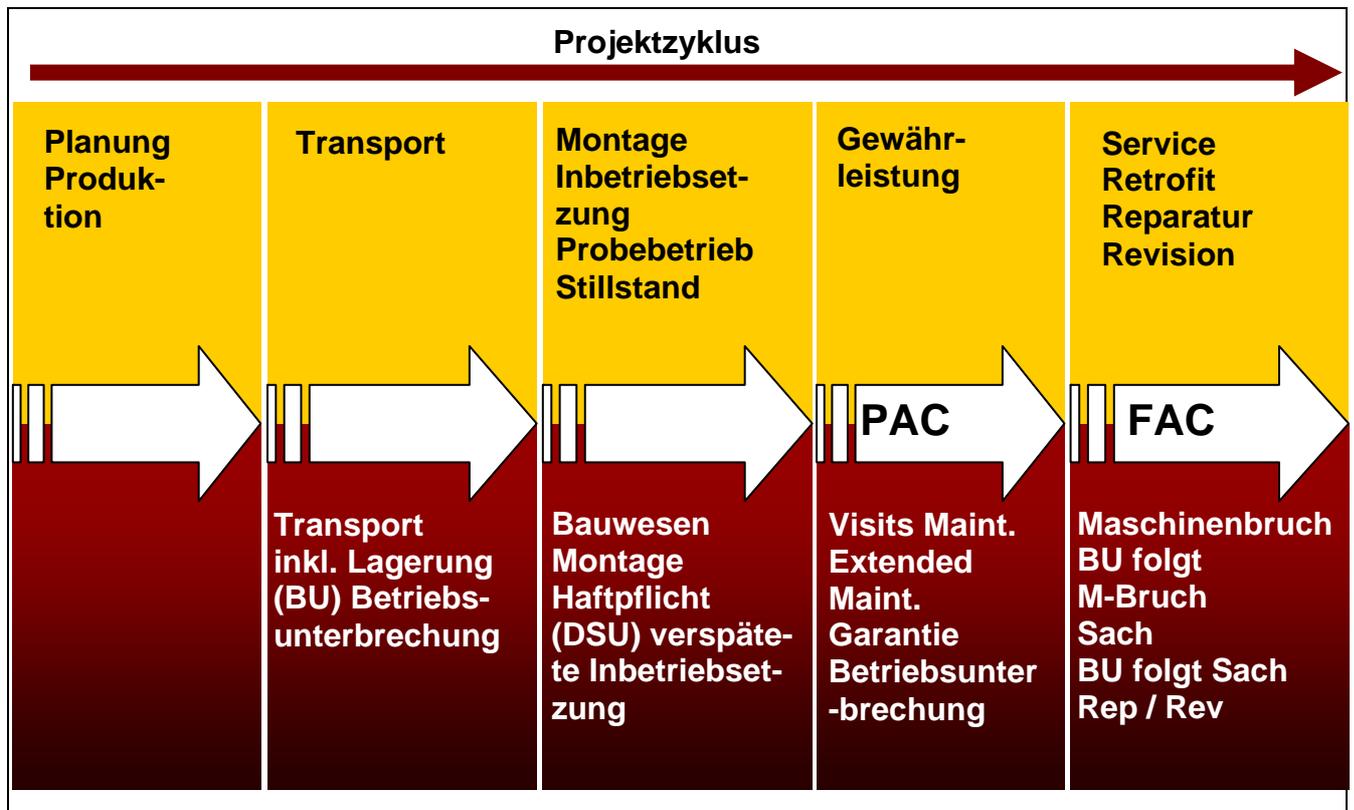
Um 1700 v.Chr. galt in Babylon der Codex Hammurabi, welcher das öffentliche und private Recht regelte und die Basis für die wirtschaftliche Blüte war. Unter anderem legte er z.B. die Haftung beim Bau eines Hauses fest, denn Bauwesenversicherungen gab es noch keine. Etwa zur selben Zeit hatten die Transporteure mit ihren Karawanen durch die Wüste immer wieder mit Beraubung und Überfällen zu kämpfen. Sie schlossen sich deshalb zu einer Schicksalsgemeinschaft zusammen und begründeten damit faktisch die erste Versicherung.

### 1.1 Die Maschinenversicherung

Die Entwicklung der technischen Versicherung begann Mitte des 19. Jahrhunderts in England mit der industriellen Revolution. Diese wurde durch die Erfindung der doppelt wirkenden Dampfmaschine durch James Watt um 1781 ausgelöst. Dampfkesselexplosionen und das Bersten der grossen Schwunräder waren neben Feuerschäden neuartige, ungewohnte Sachschäden, die auch zu Personenschäden in den Fabriken und ihrer Umgebung führten. Die Kesselbetreiber gründeten daher 1854 die Manchester Steam User Association, mit dem Zweck, die Dampferzeuger der Mitglieder in regelmässigen Abständen auf Mängel zu untersuchen und das Bedienpersonal im Gebrauch zu unterrichten. Hiermit waren die technische Inspektion und Revision begründet worden. 1859 entstand ebenfalls in Manchester die Steam Boiler Assurance Company.

## 2 Aufbau und Ablauf der klassischen Projektversicherung

### 2.1 Zeitlicher Ablauf



### 2.2 Das Wesentliche der Bauwesenversicherung

(ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

Versichert sind:

- durch unvorhergesehene Bauunfälle verursachte Beschädigungen oder Zerstörungen
- der Verlust durch Diebstahl.

Ausgeschlossen sind:

- normale Witterungseinflüsse
- Aufwendungen zur Behebung von Mängel

#### Beispiel: Bauplatzversicherung des Gotthard-Basistunnels

Der Gotthard-Basistunnel, ein herausragendes Projekt in der Geschichte der Schweiz und der National. Zusammen mit einem weltweit renommierten Partner der Versicherungsbranche haben wir Anfang 2000 den Vertrag für die Bauplatzversicherung des Gotthard-Basistunnels abgeschlossen. Als führender technischer Versicherer der Schweiz dürfen wir nun dieses weltweit einmalige und zukunftsgerichtete Projekt in den kommenden 12 Jahren begleiten.

Die Bauplatzversicherung der AlpTransit Gotthard AG, mit einem generellen Selbstbehalt von 100'000 CHF, umfasst die Branchen Bauherren- und Betriebshaftpflicht (Haftungslimite 500 Mio. CHF), Besucher-Unfall sowie eine für den gesamten Baustellenbereich gültige Bauwesen- und Montageversicherung (Versicherungssumme 6 Mia. CHF).

Versichert sind grundsätzlich alle am Bau beteiligten Unternehmungen. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass die Firmen selber je nach Unternehmerkategorie über eine Haftpflichtbasispolice von 5 oder 10 Mio. CHF verfügen. Ausgeschlossen vom Versicherungsschutz sind alle Stollen- und Tunnelbaumaschinen. Es muss aber nachgewiesen werden, dass ein solcher in adäquater Form vorhanden ist.



Für die von der AlpTransit Gotthard AG geforderten Basisdeckungen empfehlen wir uns als kompetenten Partner für einen gezielten, risikogerechten und prämienoptimierten Versicherungsschutz.

Die Vorteile sind:

- keine Schnittstellenprobleme
- keine Deckungslücken im Rahmen der Bauplatzpolice
- im Schadenfall nur ein Ansprechpartner
- eine umfangreiche, ganzheitliche Beratung mit einem entsprechenden Serviceangebot.

### **2.3 Das Wesentliche der Maschinenversicherung**

Versichert sind:

- unvorhergesehene und plötzlich eintretende Beschädigungen oder Zerstörungen

Beispiel : Ausbruch eines Bechers aus einem Peltonrad

Nicht versichert sind Schäden und Verluste durch:

- Brand, Rauch, Blitzschlag, Explosion, abstürzende Luft- und Raumfahrzeuge;
- die Elementarereignisse Hochwasser, Überschwemmung, Hagel, Lawine, Schneedruck, Felssturz, Steinschlag, Erdbeben oder Erdsenkung;
- Diebstahl oder Beraubung;
- als direkte Folge von dauernden, voraussehbaren Einflüssen mechanischer, thermischer, chemischer oder elektrischer Art wie Alterung, Abnutzung, Korrosion (Folgeschäden jedoch sind versichert).

Sicherheitsvorschriften

- Fehler und Mängel, die dem Versicherungsnehmer, seinem Vertreter oder der verantwortlichen Betriebsleitung bekannt sind oder bekannt sein müssten und die zu einem Schaden führen könnten, sind so rasch als möglich auf eigene Kosten zu beseitigen oder beseitigen zu lassen.
- Die Isolation von Generatoren und Motoren (>20MVA oder >6kV) sind alle 5 Jahre einer den anerkannten Regeln der Technik entsprechenden Prüfung zu unterziehen. Eine dabei als ungenügend erkannte Isolation ist auf eigene Kosten in ordnungsgemässen Zustand zu bringen.

Beispiel: Betriebsgeräusche

Sie stellen seit längerer Zeit eine Veränderung der magnetischen Geräusche ihres Schenkelpolgenerators fest. Grosse Synchrongeneratoren, die mit Teilfugen ausgebildet sind, weisen durch ein charakteristisches Brummen auf ein Zermahlen und den Verbrauch der zwischen den Statorteilen liegenden Isolierung hin. Es besteht die Gefahr einer Beschädigung des Blechpaketes durch Eisenbrand. Die Teilfugenisolation ist unter dem Gesichtspunkt obiger Sicherheitsvorschriften vom Betreiber zu ersetzen.

## **3 Life-Time-Management und Schadenbeispiele**

Sämtliche beschriebenen Schadenfälle müssen aus Gründen der Vertraulichkeit gewisse Details offen lassen. Ausführungen in Bezug auf die Deckung sind immer auf der Grundlage von allgemein gültigen Überlegungen der Maschinenversicherung und berücksichtigen keine allfälligen Spezialbedingungen.

### 3.1 Instandhaltung allgemein

#### Reliability Centered Maintenance – RCM (1)

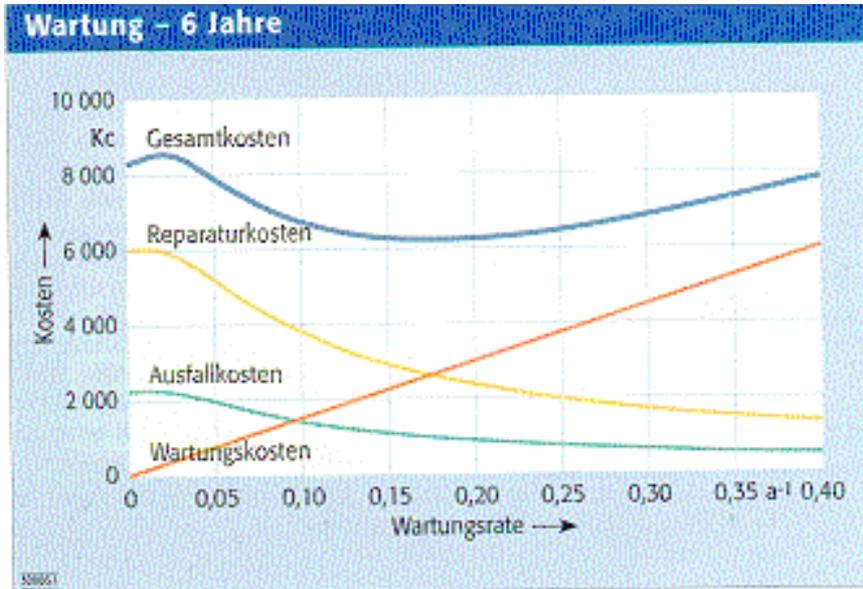


Bild 1. Verlauf der Kosten abhängig von der Wartungsrate bei spezifischen Ausfallkosten von 1 500 Kc/MWh: die optimale Wartungsrate beträgt 0,17 a<sup>-1</sup>, d. h. eine Wartung alle 6 Jahre

Der Zweck einer zuverlässigkeitsorientierten Wartung ist die Erstellung einer spezifischen Wartungsstrategie, die unter Einhaltung der notwendigen Verfügbarkeit, der Zuverlässigkeit und der Umweltfreundlichkeit zu einer Minimierung der Betriebskosten führt.

Praktisch bedeutet dies, dass für jede Systemkomponente eine Betriebskostenfunktion erstellt und das Lokalminimum

Die Wartung mit festen Wartungsintervallen für alle Systemkomponenten berücksichtigt weder den tatsächlichen Komponentenzustand noch die Komponentenwichtigkeit im Verbundnetz. Eine solche Wartung ist kostenintensiv und meistens auch nicht effektiv.

Das RCM-Verfahren ermöglicht die Wartungseffektivität zu verbessern und führt zur Senkung der Wartungskosten. Derzeit befindet sich das RCM-Verfahren in der Einführungsphase für das Teilnetz „Nord-Mähren“.

### 3.2 Schaden nach Erhöhung des Revisionsintervalls

Was ist passiert:

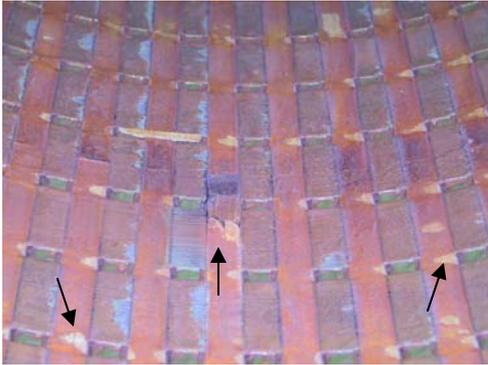
Ein Maschinenbetreiber hat drei identische Hochspannungs-Motoren (1MW) seit 16 Jahren in Betrieb. Nach 10 Jahren wird einer davon beim Hersteller einer Inspektion unterzogen. Aufgrund des Befundes entscheidet man sich, das Revisionsintervall für alle Maschinen von 10 auf 20 Jahre zu erhöhen. Nach 16 Betriebsjahren werden leichte Vibrationen registriert. Eine Endoskopie bringt Flugrost an den Wickelköpfen hervor.

Schadenursache:

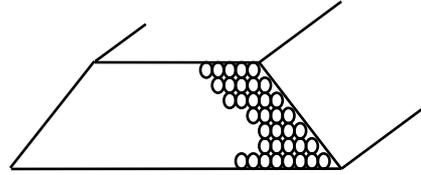
Es wird vermutet, dass die Nutenkeile das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und durch die konstante mechanische Belastung zerstört wurden. Dabei dürften sowohl Vibrationen wie auch thermische Aspekte mitbeteiligt gewesen sein.

Schadenhergang:

Die Nutenkeile bestehen aus vielen einzelnen Drähten, welche mit Isolationsmaterial ummantelt sind und stirnseitig an den Stossstellen mit NOMEX gegeneinander isoliert sind. Da das Isolationsmaterial im Laufe der Zeit zerstört wurde, konnten an diversen Stellen entlang des gesamten Stators einzelne Drähte aus den Nutenkeilen austreten.



beschädigte magnetische Verschlusskeile



Diese wurden dann im kleinen Luftspalt zwischen Rotor und Stator zerrieben. Dies führte einerseits zum Flugrost, welcher an den Wickelköpfen beobachtet werden konnte, andererseits zur Beschädigung einzelner Blechpakete am Rotor.

Deckung in der Maschinenversicherung:

Da nicht ein einzelner Nutenkeil unfallmässig zerstört ist, sondern entlang dem ganzen Statorumfang viele Beschädigungen festgestellt werden, ist man zur Überzeugung gelangt, dass die Keile das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben. Einerseits fehlt die Plötzlichkeit, zudem kommt der Ausschluss für Schäden als unmittelbare Folge dauernder voraussehbarer Einflüsse mechanischer oder elektrischer Art zum Zuge. Allfällige Folgeschäden daraus, wie die Beschädigung des Rotors, wären hingegen als unvorhergesehen und plötzlich zu betrachten und daher entschädigungspflichtig.

Schadenverhütungsmassnahmen: Die neuen Nutenkeile sind aus gepresstem Metallpulver (Pulvermagnetkeile), mit Harz verbacken und somit kompakter als die alte Konstruktion. Sie sind kürzer und somit sollten Reibeffekte an den Stirnseiten vermieden werden können.

Gib es andere gleichartige Motoren, die dieselbe Problematik aufweisen könnten?

Hinweis an Sie als Maschinenbetreiber:

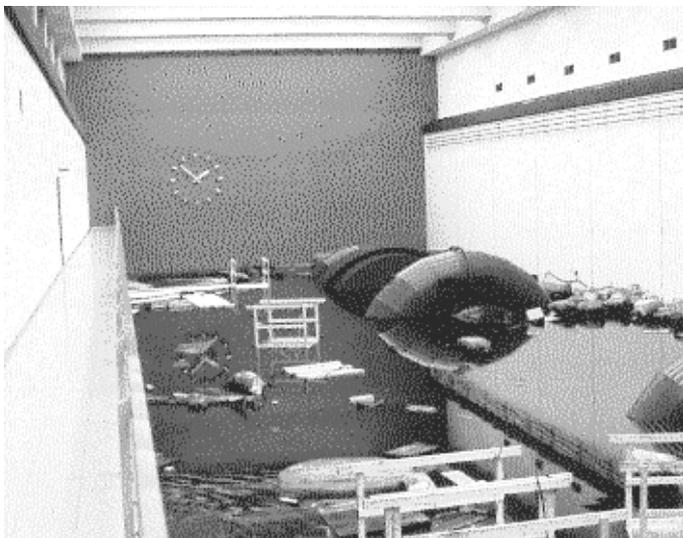
Sind solche Konstruktionen auch bei Ihnen im Einsatz?

Überprüfung des Alterungsmodelles und der Wichtigkeit der betroffenen Komponenten.

Anpassung der Wartungsintensität, wenn nötig.

### 3.3 Millionenschaden durch Überflutung eines Pumpspeicherkraftwerks

Das vom Schaden betroffene Pumpspeicherwerk war seit 1965 in Betrieb (2). Nach 33 Jahren legte man es wegen notwendiger Revisions- und Modernisierungsarbeiten vorübergehend still.



#### So kam es zum Schaden

Der folgenschwere Überflutungsschaden ereignete sich im Anschluss an eine Grundüberholung des dritten Maschinensatzes. Für die insgesamt vier Maschinensätze am Einlass des Unterbeckens gab es nur zwei Dammbalkensätze. Da der am dritten Maschinensatz vorhandene Dammtafelsatz kurzfristig an anderer Stelle benötigt wurde, fasste man den Entschluss, ihn zu entfernen, obwohl am dritten Maschinensatz noch nicht alle geplanten Revisionsarbeiten abgeschlossen waren.

Unter anderem war der Schieber zur Entleerung der Pumpenspirale noch nicht einsatzfähig. Um einen Wasseraustritt aus der Pumpe zu verhindern, montierte man an der noch offenen Flanschverbindung an Stelle des Schiebers einen Blindflansch. Nach dem Ziehen des Dammtafelsatzes füllte sich die Pumpenspirale erwartungsgemäss mit Wasser - Hinweise auf einen sich anbahnenden Schaden gab es zu diesem Zeitpunkt nicht.

Neun Stunden später drang ein lauter Knall aus dem Maschinenhaus. Der komplette Flansch, einschliesslich dem montierten, Blindflansch wurde von der Entwässerungsleitung abgesprengt. Die Wassermassen bahnten sich ihren Weg und drangen mit grosser Wucht aus dem höher gelegenen Unterbecken in das Maschinenhaus ein.

Der tiefste Punkt der Pumpenspirale stand bereits nach wenigen Minuten unter Wasser; die Schadenstelle konnte daher zunächst nicht lokalisiert werden. Erst als es die Strömungsverhältnisse zuliesse, gelang es Tauchern, den Schaden im Maschinenhaus zu orten. Der daraufhin eingeleitete Versuch, die Dammtafeln wieder in Position zu bringen, blieb ohne Erfolg, da diese aufgrund der starken Strömung so weit in die seitlichen Führungsschienen gedrückt wurden, dass sie sich nicht mehr bewegen liessen. Dieses Problem dürfte grundsätzlich bei allen Dammbalkenausführungen auftreten, denn ein Verschieben ist nur in strömungsfreiem Zustand vorgesehen. Mit anderen Worten: Der Wassereintritt liess sich nicht stoppen, in der Maschinenhalle stieg der Wasserpegel weiter kontinuierlich an. Erst nach 15 Stunden, als die Maschinenhalle bis unter das Dach geflutet war und die Differenz zwischen den Wasserständen in Unterbecken und Maschinenhalle nur noch 1,20 m betrug, konnte man die Dammtafeln schliessen. Im Maschinenhaus befanden sich zu diesem Zeitpunkt etwa 65 000 m<sup>3</sup> Wasser sowie 30 m<sup>3</sup> Steuer- und Lageröl.

### **Ein folgenschweres Versäumnis**

In den Bestandsplänen war ein konstruktives Detail aus der Bauzeit nicht dokumentiert. Hätte man die tatsächliche Konstruktion gekannt, wäre man sicher anders vorgegangen.

Zum besseren Verständnis der Schadenursache muss man wissen, dass die Saugrohrleitungen der Pumpenspirale einbetoniert sind. Um nun auftretende Schwingungen und Dehnungen zwischen Saugrohr und Entleerungsschieber auszugleichen und abzufangen, wurde der Abschlussflansch zum Entleerungsschieber dementsprechend nicht starr, sondern verschiebbar als so genannter Schiebeflansch ausgeführt. Diese Konstruktion war mit blossem Auge nicht zu erkennen und in den Bestandsplänen auch nicht eingetragen. Der Schiebeflansch war nicht zusätzlich gesichert, was erforderlich gewesen wäre. Die sonst als Widerlager dienende Entwässerungsarmatur war noch in Revision und konnte daher ein Verschieben des Flansches nicht verhindern. Etwa neun Stunden lang hielt der Flansch - vermutlich nur wegen des Farbstrichs und der Dichtung - dem Wasserdruck stand, bevor er abgesprengt wurde und es zur Überflutung der Maschinenhalle kam.

### **Schadenmanagement und Sanierung**

Bei den sofort eingeleiteten Sanierungsmassnahmen konzentrierte man sich auf die Erhaltung der Hauptkomponenten wie Generatoren, Turbinen, Pumpen und Kugelschieber. Da diese Aggregate nur mit Kranen bewegt werden konnten, setzte man die Hallenkrane wieder instand. Aus dem Wasser wurde das ausgelaufene Steuer- und Lageröl abgesaugt und entsorgt. Ein Sanierungsunternehmen beseitigte die Ölrückstände aus Maschinenhaus und Werkstatt mit speziellen Lösungsmitteln. Das Abpumpen des Wassers dauerte etwa drei Wochen. Danach setzte man gegen die verbliebene Feuchte eine grosse Zahl von Lufttrocknern ein.

Obwohl die Maschinensätze wochenlang unter Wasser gestanden hatten, bestätigte sich die Vermutung, dass an Turbinen, Pumpen und Kugelschiebern keine grösseren Schäden aufgetreten waren.

Wesentlich aufwändiger erwiesen sich dagegen die Arbeiten an den ölhydraulischen Steuerungseinrichtungen. Durch die Belüftung der Öltanks war das Wasser in sämtliche Steuerleitungen vorgedrungen. Kleinere Leitungen und Armaturen mussten vollständig ausge-

tauscht werden. Die noch eingebauten Kugelschieber und Servoantriebe wurden demontiert und überholt. Nicht mehr sanierungsfähig war die Kraftwerkssteuerung, die zum grössten Teil noch aus konventioneller Relais-technik bestand.

Besonderes Augenmerk galt der Sanierung der vier Generatoren. Drei von ihnen hatten ein Isoliersystem aus dem Fertigungsjahr 1964, einer war vor zehn Jahren neu geblecht und mit neuer Ständerwicklung ausgestattet worden. Man prüfte, ob sich die Wicklungen vor Ort durch Stromeinspeisung mit einem Schweissumformer trocknen liessen. Bei diesem Verfahren darf die Höchsttemperatur 80 °C nicht überschreiten, sonst kann es zur Dampfbildung und zu einem Aufplatzen der Isolierung kommen.

Die Generatoren wurden zunächst eingehaust. Anschliessend versuchte man, die Isolationswerte durch Lufttrocknung zu erhöhen. Dies misslang jedoch aufgrund der grossen Abmessungen. Da sich an Blechpaketen und Gehäuseteilen bereits grössere Korrosionsspuren gebildet hatten, entschied man sich letztendlich für eine Vakuumtrocknung in den jeweiligen Reparaturwerken. Diese brachte dann auch den gewünschten Erfolg. Die Statorwicklung erreichte wieder akzeptable Isolationswerte und bestand die erforderlichen Spannungsprüfungen. Bei weiteren eingehenden Untersuchungen fand man vereinzelt Warmstellen und Verrostungen an den Blechpaketen sowie eine aufgequollene Papierkernisolation. Wo erforderlich, wurden Abstützungen, Isolation und Wicklungen erneuert.

Die vertrauensvolle Zusammenarbeit aller Beteiligten und die konsequenten Sanierungs- und Reparaturmassnahmen trugen wesentlich zu einer weitgehenden Wiederherstellung bei minimalem Betriebsunterbruch bei und ermöglichten eine Schadenminderung in zweistelliger Millionenhöhe: Mit dem Versicherungsnehmer war vereinbart worden, die Generatoren durch Trocknung und Teilreparatur wieder in einen funktionstüchtigen Zustand zu versetzen. Die Sanierungskosten aller vier Generatoren entsprachen in etwa dem Anschaffungspreis eines neuen Generators.

Im Ergebnis lag der Gesamtschaden bei etwa 17,5 Millionen Euro. Die grössten Summen davon entfielen mit jeweils 3,5 Millionen auf die Gebäudesanierung und die Leittechnik. Die Instandsetzung der Generatoren schlug mit 5 Millionen Euro zu Buche.

## **Schlussfolgerung**

Dieser Fall zeigt eindrucksvoll, dass selbst Grossschäden ihren Ursprung in scheinbar unbedeutenden Versäumnissen der Vergangenheit haben können, so wie die fehlende Dokumentation in den Bestandsplänen.

Weil es sich bei dem Schiebeflansch, der mit dem gleichen grünen Anstrich wie die Rohrleitung versehen war, um ein selten verwendetes Maschinenelement handelt, wurde er von den Mitarbeitern des Herstellers und des Betreibers nicht erkannt. Durch eine andere Farbgebung und die Kennzeichnung „Vorsicht, Schiebeflansch !“ hätte dieser Schaden möglicherweise verhindert werden können.

## **3.4 Monitoringaufwand**

Die Diagnosemessungen und die daraus als notwendig erkannten Instandhaltungsmassnahmen sind keine Schadenkosten und somit nicht entschädigungspflichtig.

Ist es demnach nicht billiger, es darauf ankommen zu lassen, wenn man maschinenversichert ist?

Grundsätzlich haben wir als Ihr Partner dieselben Interessen wie Sie, nämlich:

- Betriebssichere Einrichtungen
- Möglichst kleine und kalkulierbare Betriebsrisiken
- Optimierte Unterhaltskosten



Aus unserer Sicht zahlt sich eine „Run to death“-Strategie nie aus:

- Die Imageprobleme können viel grösser sein als der eigentliche Sachschaden  
Bsp. Natelpanne der Swisscom oder ICE-Katastrophe
- Die spezifischen Ausfallkosten sind im voraus schwierig zu bestimmen und der allfällige Betriebsunterbruch ist nicht immer versichert.
- Unter Umständen kommen Sie in Konflikt mit den Sicherheitsvorschriften (Fehler und Mängel, die dem Versicherungsnehmer bekannt sein müssten -> Pflicht zur Schadenverhütung) und riskieren, dass Ihnen die Entschädigung gekürzt wird.
- Ihr Risikoprofil und Rendement wird durch ein solches Verhalten verschlechtert. Dies kann Sanierungsmassnahmen zur Folge haben (Selbstbehalte, Prämie). Im Extremfall zeichnet sich heute eine Tendenz ab, welche dazu führt, dass für gewisse Risiken gar kein Versicherungsschutz mehr gefunden wird.
- Sie schlafen mit Sicherheit ruhiger.

### **3.5 Beteiligung des Versicherers am Monitoringaufwand**

Bsp. nach einem grossen Trafoschaden wird die Einführung eines Schiefastmonitoringsystems als Schadenverhütungsmassnahme mit uns diskutiert. Wir können uns aber finanziell an solchen Massnahmen nicht beteiligen.

- Unsere primäre Aufgabe ist es im Schadenfall Entschädigung zu leisten und mitzuhelfen Massnahmen auszuarbeiten um weitere Schäden zu verhüten. Weitere Leistungen wären nicht versicherungsvertragskonform.
- Da eine Kündigung der Police möglich ist, wäre die Investition durch den Versicherer nicht zu rechtfertigen.

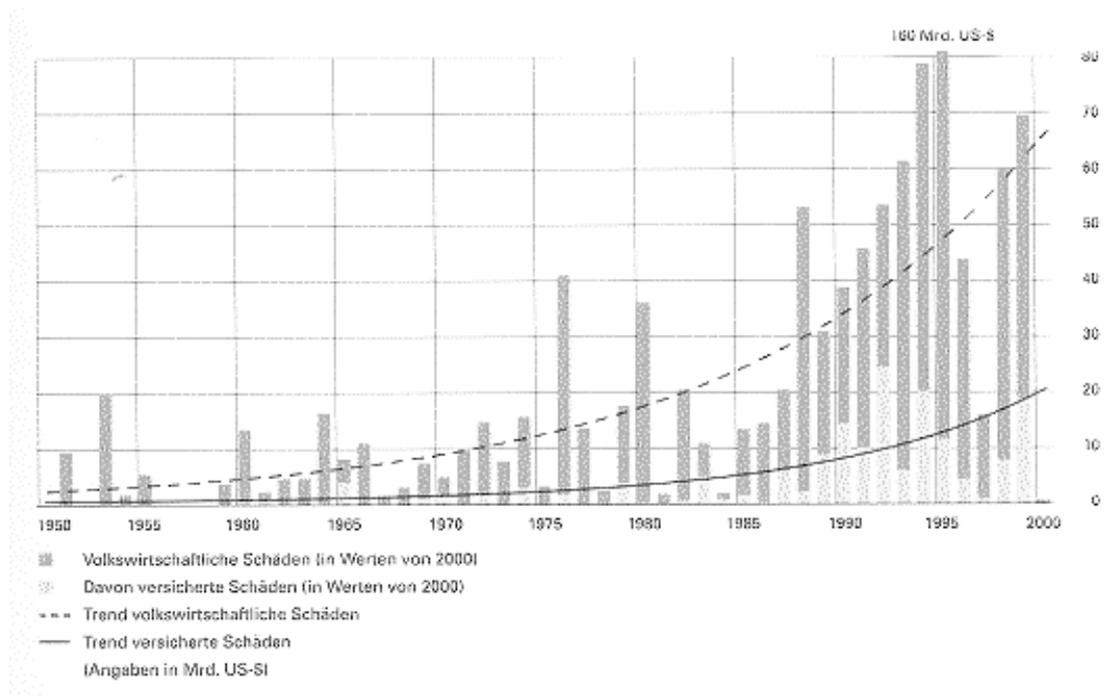
### **3.6 Beispiel einer Präventionsleistung an die Allgemeinheit**

Bei Schulbeginn müssen viele Kinder neu mit der Situation im Strassenverkehr vertraut gemacht werden. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit den Polizeibehörden die Kampagne „Gäll, du bassisch uff mi uff“ zur Sensibilisierung der Verkehrsteilnehmer lanciert.

## **4 Risikoverschiebung in der Zukunft**

### **4.1 Naturgefahren**

Die nachfolgende Grafik zeigt die Tendenz der Entwicklung bei den Elementarschäden über die letzten 50 Jahre (3).



#### 4.1.1 Schäden infolge Erdbeben

Erdbebenschäden werden in der Schweiz wegen des Katastrophenausmasses, das sie annehmen können, aber auch wegen der relativ geringen Eintrittswahrscheinlichkeit, nicht generell versichert. Sie sind daher in der Sachversicherung von der Deckung ausgeschlossen.

Um diese Deckungslücke zumindest teilweise zu schliessen, haben die privaten Versicherer bereits vor vielen Jahren Massnahmen getroffen, um bei Erdbebenschäden in gewissem Umfang und auf ausservertraglicher Basis Entschädigungen leisten zu können. Zu diesem Zweck haben die Privatversicherer die **Interessengemeinschaft zur Übernahme von Erdbebenschäden** (IG Erdbeben) ins Leben gerufen. Die Mitglieder stellen insgesamt einen Betrag von derzeit Fr. 200 Mio. zur Verfügung (ab 1. Januar 2002, Fr. 500 Mio.). Aus diesen Mitteln werden auf freiwilliger Basis Leistungen für Erdbebenschäden erbracht, die an feuerversicherten Gebäuden in den Kantonen Genf, Uri, Schwyz, Tessin, Appenzell IR, Wallis, Obwalden entstehen. Schäden an Fahrhabe werden nicht vergütet. Die Entschädigung bleibt auf den Zeitwert beschränkt. Sie beträgt höchstens Fr. 500'000.-- pro Gebäudeeigentümer. Der Selbstbehalt beträgt 10 % der Entschädigung, mindestens Fr. 5'000.-- (ab 1. Januar 2002, 10 % der Versicherungssumme). Übersteigt das Total der Vergütungen die Mittel der Gemeinschaft, so werden die Leistungen entsprechend gekürzt.

Auch die kantonalen Gebäudeversicherer gründeten vor über zwanzig Jahren unter dem Patronat der Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) den **Pool für Erdbebendeckung**. Zweck des Erdbebenpools ist es, für die nicht versicherten Erdbebenschäden an Gebäuden finanzielle Mittel bereitzustellen, um so den Geschädigten auf freiwilliger Basis Beiträge ausrichten zu können. Während bei der Gründung des Pools ein Betrag von Fr. 100 Mio. zur Verfügung stand, beträgt diese Summe seit dem 1. Januar 2001 Fr. 2 Mrd. Mitglieder des Erdbebenpools sind heute 18 von 19 kantonalen Gebäudeversicherungen. Zürich, als grösste kantonale Gebäudeversicherung, hat sich für eine eigene Lösung entschieden. Auch bei den Modellen der kantonalen Gebäudeversicherer erfolgt die Leistung auf freiwilliger Basis und wird bei Übersteigen der zur Verfügung stehenden Mittel proportional gekürzt.

#### Entwicklung

Aus den eingangs erwähnten Gründen sind Schäden durch Erdbeben nur in Einzelfällen und zu restriktiven Konditionen (Sublimate, Selbstbehalt) versichert, vorwiegend in Sachversicherungsprogrammen der weltweit tätigen Grossindustrie. U.a. die von der Swiss Re im vergangenen Jahr veröffentlichte Studie "Erdbeben in der Schweiz" hat für einiges Aufsehen und ein grosses

Medienecho gesorgt. Grund dafür war die Aussage von Experten, dass Erdbeben in der Schweiz die Naturgefahr mit dem grössten Schadenpotential darstellen. Allerdings gilt es zu bedenken, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines schadenverursachenden Bebens trotz allem verhältnismässig gering ist.

### Aussichten

Derzeit sind innerhalb der Gremien des Schweizerischen Versicherungsverbandes (SVV) Bestrebungen im Gange, eine flächendeckende Erdbebenversicherung zu schaffen. Obschon die Einzelheiten noch nicht bekannt sind, kann davon ausgegangen werden, dass im weitesten Sinne das System des Schweizerischen Elementarschadenpools als Vorbild dienen wird. Mit der Einführung kann frühestens auf den 1. Januar 2003 gerechnet werden.

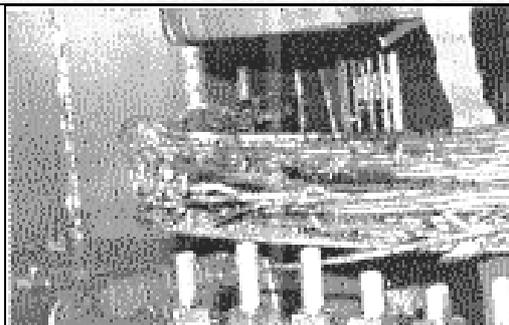
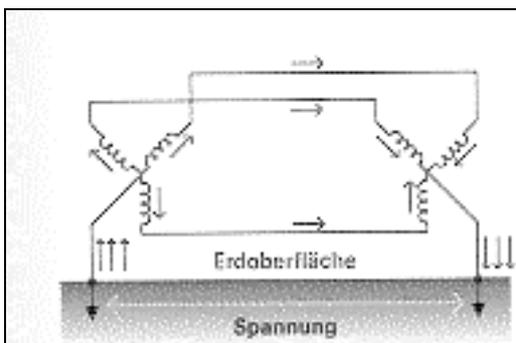
#### 4.1.2 *Space weather*

Wenn der Sonnenwind besonders schnell wird, viele geladene Teilchen mit sich trägt und auf die Magnetosphäre trifft, bringt dessen Magnetfeld die geladenen Teilchen bis weit hinunter in die Erdatmosphäre und besonders in hohe geographische Breiten. Deshalb sind dort Polarlichter zu sehen. Die Teilchen von der Sonne verursachen zeitlich veränderliche Ströme in Ionosphäre und Magnetosphäre. Diese Ströme verursachen dort ein Magnetfeld. Dieses induziert ein elektrisches Feld (Faradays Induktionsgesetz), welches Ströme in der Erde produziert (4).

Zudem bedingt dieses elektrische Feld Spannungen zwischen verschiedenen Punkten an der Erdoberfläche. Folge ist auch ein Spannungsunterschied beispielsweise zwischen den Erdungspunkten zweier Transformatoren. Deshalb fliesst ein Strom im Hochspannungskabel, das die Transformatoren verbindet. Dieser Strom wird als geomagnetisch induzierter Strom (**Geomagnetically Induced Current, GIC**) bezeichnet.

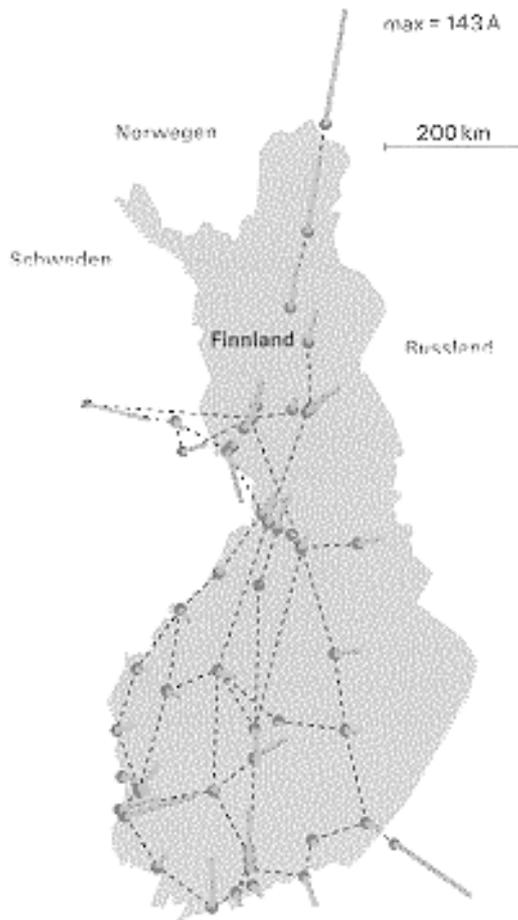
Das geoelektrische Feld erzeugt GICs nicht nur in Energieübertragungssystemen, sondern auch in anderen technischen Leitern wie Öl- und Gaspipelines, Telekommunikationskabeln und Eisenbahninstallationen. GICs können Korrosion in Pipelines sowie Totalschäden bei Bauteilen und Fehlfunktionen im Eisenbahnverkehr verursachen. Ähnlich fliessen GICs in allen grossen metallenen Konstruktionen wie zum Beispiel Brücken oder Eisenbahnschienennetze. Keines dieser Systeme ist bis anhin ausreichend auf mögliche Auswirkungen der GICs untersucht worden. Ausserdem ist in allen fest geerdeten metallenen Konstruktionen GIC-bedingte Korrosion möglich, zum Beispiel bei Hochspannungsmasten.

### Risiken in der Stromversorgung



Eine Veränderung des geomagnetischen Feldes induziert während einer magnetischen Störung oder eines Sturms ein geoelektrisches Feld, was zu Spannungsunterschieden zwischen den Erdungspunkten bei Transformatoren führt. Wie die Abb. zeigt, leiten diese Spannungsunterschiede die geomagnetisch induzierten Ströme durch die Transformatoren und entlang der Hochspannungsleitungen. GICs führen zur Sättigung von Transformatoren. Ein normalerweise mit einem sehr kleinen Anregungsstrom arbeitender Transformator erfährt einen viel stärkeren Strom und arbeitet somit ausserhalb seines vorgegebenen Grenzbereichs. Die Konsequenzen hängen stark vom Transformatortyp ab, können aber bis hin zu Abschaltungen oder Zerstörung führen.

Der geomagnetische Sturm vom 13. März 1989 zerstörte diesen Transformator in New Jersey, USA



Die Keulenförmigen Markie zeigen die Richtung und Stärke des geoelektrischen Feldes, welches die grössten GICs bei verschiedenen Transformatoren innerhalb des finnischen 400 kV Stromversorgungsnetzes (punktiierte Linien) verursachen. Bemerkenswert sind die grossen GIC-Werte an den Ecken des Netzes.

Die Stärke der GICs in Energieversorgungssystemen während eines geomagnetischen Sturms hängt ab vom geoelektrischen Feld, das durch das ionosphärisch-magnetosphärische Stromsystem vorgegeben wird, von der Struktur der Erdleitfähigkeit und von der Distanz zwischen zwei Erdungspunkten von Stromversorgungsleitungen. Mit Computermodellen können die Bereiche in einem Energieversorgungssystem berechnet werden, die am wahrscheinlichsten auf GICs reagieren. Im allgemeinen erleiden jene Transformatoren den grössten Schaden durch GICs, die sich an den Ecken eines Energieversorgungssystems befinden.

## 4.2 EDV Risiken

### 4.2.1 Viren:

Was Computerviren anrichten und wie schnell sich diese ausbreiten können, ist uns spätestens seit dem „I love you“-Virus bewusst. Es muss davon ausgegangen werden, dass selbst mit immer raffinierteren Schutzprogrammen immer neuere Virenarten Schäden verursachen werden. Eine generelle Versicherungslösung besteht bis heute noch nicht.

### 4.2.2 Verletzlichkeit durch Vernetzung:

Swisscom Natel-Panne -> Mobility Car-sharing. Die Autos besitzen einen Bordcomputer, welcher die Reservation resp. Freigabe der Fahrzeuge kontrolliert.

### 4.2.3 Spionage

ICE und TGV haben sich um einen bedeutenden Auftrag in Korea beworben. Die Franzosen haben den Auftrag erhalten. Deren Angebot lag in allen Punkten jeweils knapp unter der Offerte der Deutschen. Obwohl nie offiziell bestätigt, kann man heute davon ausgehen, dass der



französische Geheimdienst die E-mails der miteinander korrespondierenden Abteilungen der deutschen Konkurrenz angezapft hatte. -> Verschlüsselungssoftware

### **Literaturnachweis**

- [1] Dr. Stanislav Rusek, TU Ostrava, ew Jg. 100 (2001), Heft 18, S 50-53
- [2] Munich Re, Schadenspiegel 1/2001, S.2-9
- [3] Munich Re, Jahresrückblick Naturkatastrophen 2000, S. 14
- [4] Swiss Re, Space Weather, Gefahren aus dem Weltraum

# Elektrische Prüfmethode an Maschinenisolationen

Reinhold Bräunlich,  
FKH, Fachkommission für Hochspannungsfragen, Zürich

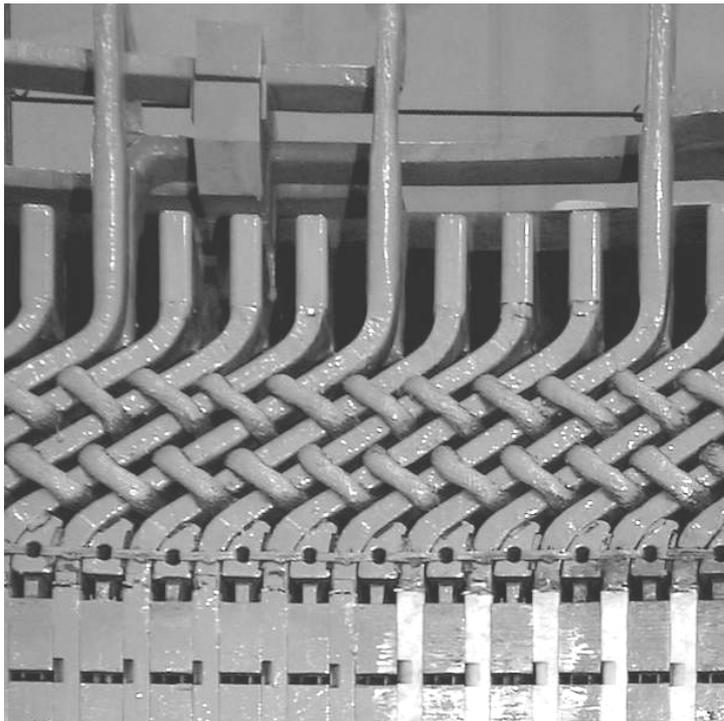
## 1 Einleitung

Elektrische Maschinen stehen am Anfang (Generatoren) und am Ende (Motoren) fast aller elektrischer Energieübertragungswege. In ihrer Funktion als elektromechanische Energiewandler werden sie gleichsam mechanisch und elektrisch beansprucht. Die Belastung mit hohen Leistungsdichten zwingt zur Optimierung der Energieverluste und der thermischen Auslegung. Weitere Anforderungen werden durch die Umgebung der Maschinen definiert. Eine aussagekräftige Zustandsbeurteilung einer elektrischen Maschine setzt deshalb die Untersuchung einer grossen Zahl von Parametern voraus, weshalb meist mehrere Fachspezialisten mit der Aufgabe der Zustandsdiagnose betraut sind.

Der nachfolgend zusammengefasste Beitrag beschränkt sich auf das Thema der isolationstechnischen Zustandserfassung von Maschinen. Allein dieser Aspekt beinhaltet eine umfangreiche Palette an Fragestellungen. Sie ergeben sich einerseits durch die multifaktorielle Beanspruchung andererseits aber durch die unterschiedlichen Grössenordnungen (viele Zehnerpotenzen in der Leistung) sowie durch die Palette unterschiedlicher Konstruktionen und Anwendungen von Maschinen. Entsprechend vielfältig fallen deshalb auch die Isolationssysteme aus.

## 2 Isolationssysteme

Zur Isolation von Maschinen werden zahlreiche sehr unterschiedliche Materialien bzw. Materialverbindungen eingesetzt. Gemeinsam ist allen Isolationssystemen nebst der dielektrischen Festigkeit die hohe thermische und mechanische Festigkeit. Hochwertige Maschinenisolationen sind deshalb kostspielig. Die individuellen Eigenschaften müssen auf ihren Einsatzort angepasst werden (siehe Tabelle 1).



**Abbildung 1** Kritische Stelle einer Maschinenisolation: Ausschnitt eines Statorwickelkopfs eines Hydrogenerators. Sichtbar ist der Austritt der Röbelstäbe aus den Statorblechpaketen und die Verschaltung (Verschränkung) der einzelnen Wicklungsteile. Alle Oberflächen sind mit einer Zweikomponenten-Epoxidharzfarbe überdeckt.

Die Maschinenisolationstechnik befasst sich nebst mit der Auslegung von konstruktiven Isolier-  
teilen wie Stützer und Durchführungen in erster Linie mit den Wicklungen: Bei kleinen und mit-  
telgrossen Maschinen und Antrieben werden Lackisolationen, imprägnierte Bänder und Poly-  
urethan-Vergussmassen eingesetzt. Bei hochwertigen Ausführungen werden vakuumimprä-  
gnierte Bandagen verwendet.

Grossmaschinen, bei welchen der Stator mit hohen Spannungen betrieben wird (bis ca. 40 kV)  
werden heute mit vorgefertigten Statorröbelstäben ausgerüstet. Die untereinander isolierten  
Einzelleiter werden in eine Hauptisolation mit einem Verbundisolerstoff aus Epoxidharz und  
Glimmerplättchen isoliert. Die Aussenschicht besitzt eine halbleitende Schicht als Glimmschutz,  
welcher durch Kontaktierung mit dem Statorblechpaket auf dessen Potential gelegt wird,  
wodurch Entladungen in den Nutenspalten verhindert werden sollen. Die Halbleiterbeläge wer-  
den an den Enden hochohmig abgesteuert, so dass nach Möglichkeit eine lineare Spannungs-  
verteilung an der isolierten Staboberfläche zwischen Nutaustritt (Erdpotential) und Verbind-  
ungsklemme (Hochspannungspotential) resultiert (Abbildung 1). An den Stabenden wird oft  
auch glimmer- oder glasfasergefüllte Silikonvergussmasse verwendet.

Ältere Maschinen sind teilweise noch mit Statorstabisolationen aus Bitumen-imprägnierten  
Gewebebändern ausgerüstet, mit welchen wesentlich geringere Temperaturen und kleinere  
elektrische Feldstärken beherrschbar sind.

		Isolationstypen	Beanspruchungen			
			<i>elektrisch</i>	<i>mechanisch</i>	<i>thermisch</i>	<i>Umwelt</i>
Klein- maschi- nen	Klein- antriebe	2.1.1 <i>Lackdrahtisol- ation</i>	klein	Abrieb	mässig	Je nach Umfeld, Witterung, Versch- mutzung, chemisch
	Mittlere Industrie- motoren	<i>Lack und Bandisola- tionen,</i>	bei Umrichter- antrieb hohe und steile Impulse	Lastwechsel, Schläge	Temperatur- zyklen	Je nach Umfeld Staub und Korro- sion
	Kleingene- ratoren	<i>Stator und Rotorstäbe</i>	mässig	mässig	Unter- schiedlich	Je nach Umfeld, Witterung, Ver- schmutzung
Gross- maschi- nen	Gross- antriebe	<i>Stator: Glimmer- Epoxidharz, Bitumen, Vakuumimprägnierung</i>	hoch	mässig	hoch	mässig
		<i>Potentialsteuerungen Wickelköpfe</i>	hoch	hoch	mässig	Konstruktion abhängig, Kühl- system
	Turbogene- ratoren	<i>Rotorstäbe,</i>	klein	hoch	hoch	konstruktions- abhängig, Kühl- system
	Hydro- genera- toren	<i>Isolierende Konstruk- tionsteile</i>	unterschiedlich	Unterschied- lich	mässig	hoch

Tabelle 1 Überblick über Isolationstypen und ihre Beanspruchung

### 3 Anwendung von Diagnosemethoden bei Grossmaschinen

#### 3.1 Allgemeines

Die Zustandsbeurteilung der Komponenten eines Generators basiert auf mehreren Informa-  
tionsquellen, welche in folgenden Gruppen zusammengefasst werden kann [9]:

- Auslegung und Fabrikation
- Betriebs und Instandhaltungsgeschichte
- Visuelle Kontrollen
- Tests
- Externe Faktoren

Es muss zunächst darauf hingewiesen werden, dass die Auslösung von Instandhaltungsmassnahmen, von Revisionen oder Ersatz in vielen Fällen durch offensichtliche Schadens- und Alterungsmechanismen ausgelöst werden, die keine Diagnosetätigkeit erfordern. Teilweise ergeben sich auslösende Gründe direkt aus dem Betrieb:

Gesteigerter Betriebsaufwand, Ausfälle, tiefer Wirkungsgrad, Umgebungsprobleme: Lärm, Vibrationen Fundamentprobleme.

Zwingende maschinentechnische Gründe für eine Generalüberholung sind, Totalhavarien, starke Deformationen, Berührungen zwischen Stator und Rotor, Statorwicklungsfehler, Windungsschlüsse, Sprünge und Risse in mechanischen und elektrischen Komponenten, Öl-Lecks, verbrannte Isolation, Verlust der dielektrischen Festigkeit bzw. Durchschläge.

Neben diesen unmittelbar erkennbaren Schäden, die zu schnellen Entscheidungen zwingen, stehen die diagnostischen Ergebnisse, mit welchen die Instandhaltungsmassnahmen geplant werden. Wichtige Zeichen einer Alterung bzw. eine Abnahme der Zuverlässigkeit sind:

1. Abnahme des Isolationswiderstands
  2. Abnahme des Polarisationsindex
  3. Zunahme des Ableitstroms
  4. Zunahme des Wicklungswiderstands
  5. Zunahme der Betriebstemperatur
  6. Zunahme der Stromunsymmetrien in geteilten Wicklungen
  7. Zunahme von Teilentladungen
  8. Abnahme der Polimpedanz
  9. Ungleichmässiger Luftspaltabstand
- Zunahme der Wellenvibrationen

Die Frage der Zweckmässigkeit einer Diagnose wird im Rahmen der Betriebskosten (Lebensdauerkostenoptimierung) beantwortet. Die Kosten der Diagnose oder eines Monitorings werden mit den zu erwarteten bzw. vermeidbaren Schadenskosten über eine Instandhaltungsperiode verglichen.

Bei der Beurteilung der Zweckmässigkeit von Diagnosemassnahmen muss berücksichtigt werden, dass die Komponenten einer Maschine einerseits eine unterschiedliche Lebensdauer besitzen und andererseits aber der Teilersatz oder die Revision sehr unterschiedlich aufwändig sein kann. Die Anstrengungen für Diagnose und Monitoring konzentrieren sich deshalb in der Regel auf den Statorteil, da er wegen seiner Form und wegen der Hochspannungsisolationen eine teure Komponente darstellt. Rotoren besitzen eine grössere Lebensdauer und sind leichter beurteilbar.

## 3.2 Dielektrische Prüfmethoden

### 3.2.1 Dielektrische Eigenschaften von Maschinenisolationen

Die dielektrischen Eigenschaften der Wicklungsisolationen sind durch ihre inhomogene Zusammensetzung (Verbundwerkstoff) geprägt, welche einen mineralischen Bestandteil (Glimmer, Keramikfasern) und eine organische Komponente (Matrix) beinhaltet. Die physikalischen Eigenschaften der Komponenten sind unterschiedlich, wobei insbesondere auch ihre Temperaturabhängigkeit wie ihre Abhängigkeit von der Feldstärke signifikant voneinander abweichen. Tabelle II zeigt Materialwerte für die Bestandteile Glimmer und Epoxidharz und den Bereich der erzielbaren Eigenschaften beim Verbundisolerstoff. Da die Isolerstoffdaten stark von der Fabri-

kationstechnologie abhängen, variieren sie erheblich. In der Praxis müssen die spezifischen Herstellerdaten herangezogen werden.

Eigenschaft	Glimmer (Muskowit)	Epoxidharz heiss gehärtet	Glimmer-Epoxid- Compounds
Wärmebeständigkeit	500 °C	120 °C	130 ... 155 °C (Kl. B ... F)
Durchschlagsfestigkeit Bei 1mm Dicke	25 ... 70 kV/mm	15 ... 20 kV/mm	12 ... 15 kV/mm
Durchschlagsfestigkeit Bei 0.1mm Dicke	25 ... 70 kV/mm 100 ... 200 kV/mm		
Relative Permittivität $\epsilon_r$	6 ... 7	3.6 ... 4.0	8
Verlustfaktor $\text{tg}\delta$ , 50 Hz	$0.2 \dots 1.5 \times 10^{-3}$ (stark ansteigend mit $\theta$ )	$5 \dots 15 \times 10^{-3}$	$2 \dots 30 \times 10^{-3}$
Spezifischer Widerstand 20 °C	$10^{15} \dots 10^{17}$	$10^{13} \dots 10^{15}$ (stark abnehmend mit $\theta$ )	$10^{13} \dots 10^{14}$

**Tabelle II Physikalische Eigenschaften von Glimmer, Epoxidharz und von Kombinationsprodukten.**

Die Kombination der Werkstoffe bewirkt eine Überlagerung der Komponenteneigenschaften, mit welcher eine Optimierung der Isolation angestrebt wird. Ein Folge daraus ist aber, dass die Materialdaten, die Alterungsmechanismen und ihre Variabilität in einem weiten Bereich der Betriebsbedingungen von vielen Parametern abhängig sind. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Grenzflächeneigenschaften zwischen den unterschiedlichen Komponenten.

Die dielektrische Eigenschaften von Verbundisolierstoffen zeichnen sich deshalb durch eine Reihe komplexer Eigenschaften aus, welche sich makroskopisch wie folgt äussern:

1. Bei einem Grossteil der Parameterabhängigkeiten liegen lineare und nichtlineare Bereiche vor.
2. Der Alterungsverlauf und die Schadensentwicklung beinhalten sowohl kontinuierliche wie diskontinuierliche Prozesse.

Das heterogene Verhalten wird durch die Verwendung von Verbundisolierstoffen zusätzlich verstärkt. Die Zusammenhänge und Gesetzmässigkeiten zwischen den Isolationsparametern sind wegen der vielen Einflussfaktoren oft nicht erkennbar. In vielen Fällen ist deshalb bei der Datenerfassung bzw. Beurteilung eine statistisch orientierte Vorgehensweise erfolgreicher als eine rein deterministische.

### 3.2.2 Klassifizierung der Messmethoden

Im wesentlichen können drei Gruppen von Tests unterschieden werden:

- Spannungsprüfungen zum Nachweis der Durchschlagsfestigkeit
- Erfassung dielektrischer Polarisationsseigenschaften
- Teilentladungsmessungen
- Messung von Übertragungsfunktionen.

Die zahlreichen dielektrischen Tests an elektrischen Grossmaschinen basieren auf langjährigen Erfahrungen, wobei z.T. erhebliche länderspezifische, historisch bedingte Unterschiede bestehen. Oft werden Isolationsprüfungen zusammen mit elektrischen Messungen von Betriebsparametern ausgeführt, auf welche hier aber nicht eingegangen wird (siehe [1]-[7]).

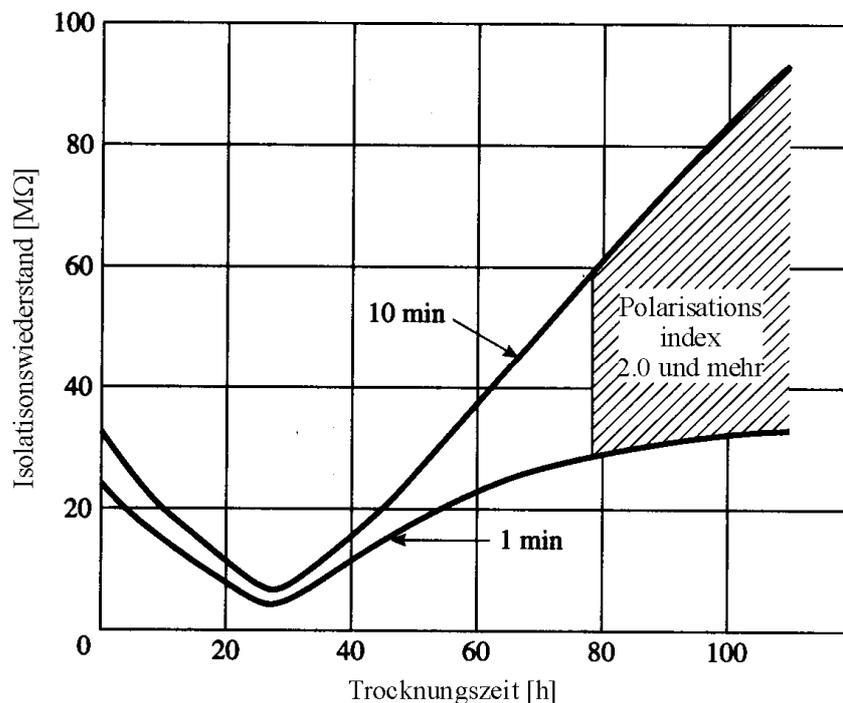
Während frühere Isolationstests fast ausschliesslich im **Stillstand** ausgeführt wurden (offline diagnostics) setzten sich in den letzten Jahrzehnten **Betriebsmessungen** (online-diagnostics

bzw. monitoring), welche bei Veränderungen im Betrieb schnelle Informationen liefern sollen, zunehmend durch.

### 3.2.3 Übersicht der Standardmessungen

Zu den wichtigsten Stillstandsmessungen gehören diverse Gleichspannungsprüfungen. Einige Tests wurden hauptsächlich in den USA bekannt und sind in IEEE-Standards definiert.

- Messung des Isolationswiderstands bzw. Leckstrommessungen (ANSI/IEE Std 43-1974).
- Messung von Polarisations-eigenschaften (Polarisations- und Depolarisationsströme), Polarisationsindex (PI) nach EPRI. (EL-5036 Electrical Reference Series, vol I-16). Hier wird das Verhältnis des nach zehn Minuten und nach einer Minute Messzeit angezeigten Werts des Isolationswiderstands einer Wicklung gebildet. Dieses Verhältnis soll je nach Isolationstyp im trockenen und sauberen Zustand mindestens 1.5 bis 2 erreichen. Polarisationsstrommessungen sind im amerikanischen Sprachgebrauch auch als „dielectric absorption-measurements“ bekannt.



**Abbildung 2** Entwicklung des Polarisationsindex im Verlauf eines Trocknungsprozesses. Nach etwa 80 h erreicht der Index den angestrebten Mindestwert von zwei (aus [15]).

- DC-Spannungsprüfungen des Rotors mit 1000 V bis 1500 V Prüfspannungspegel.
- Statoren werden in der Regel mit Wechselspannungen und Stossspannungen gegen den Kern und zwischen den Windungen geprüft:
- AC Spannungsprüfung mit 2- bis 2.5-facher Betriebsspannung.
  - Test mit schwingenden Stößen zwischen den Windungen im Frequenzbereich von einigen Kilohertz bei Spannungen bis zur 10-fachen Betriebsspannung.
  - Ähnliche Tests werden zur Messung von Übertragungsfunktionen zwischen Wicklungen eingesetzt. Abweichungen und Veränderungen in den meist als Spektren gemessenen Resultaten dienen als Indikatoren für Deformationen, Unterbrüche und Kurzschlüsse.
  - Detektion von Windungsschlüssen an Schenkelpolrotoren durch Anlegen einer Wechselspannung der Größenordnung 100 V über der gesamten Wicklung und Messung der Spannungsverteilung an allen Polen. Bei Turborotoren wird dieser Test durch Messung der austretenden magnetischen Flussdichte mit C-Kern-Messspulen durchgeführt. Eine Ver-

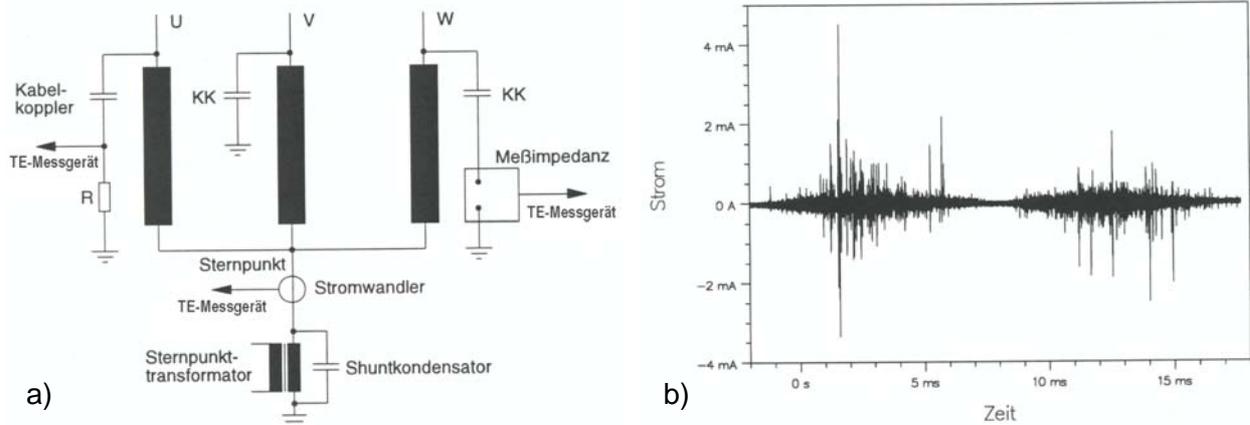
schiebung der Phasenlage zeigt einen Windungsschluss an. Erschwerend bei der Fehlersuche ist, dass Windungsschlüsse oft nur bei bestimmten mechanischen Belastungen auftreten. Die meist notwendige Teildemontage der Maschine stellt einen grossen Nachteil dar. Modernere computerunterstützte Messsysteme erlauben heute auch Messung durch Einführung bzw. durch Einbau magnetischer Sensoren in den Luftspalt.

- Messung des Verlustfaktors  $\tan\delta$  bei Hochspannungsstatoren. Aus der Nichtlinearität der Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors kann auf das Vorhandensein von Teilentladungen geschlossen werden.
- Oberwellenmessungen. Bei Asynchronmaschinen deuten Oberwellen auf einen Bruch des Kurzschlussläufers, der Stäbe oder auf Kurzschlüsse mit dem Kern hin.

### 3.2.4 Messung von Entladungen und Teilentladungen

Teilentladungsmessungen stellen heute für Statoren von Grossmaschinen die wichtigste Isolationsdiagnosemessung dar. Sie werden im Stillstand und auch im Betrieb durchgeführt. Es ist dabei zu bemerken, dass bei Stillstandsmessung im Gegensatz zu den Betriebsmessungen der Statorsternpunkt auf Potential liegt, wonach die gesamte Wicklungsisolation mit der gleichen Spannung geprüft wird. Zur Ankopplung existieren zahlreiche Möglichkeiten (Abbildung 3a). Aus der Charakteristik der Entladungen können heute weitreichende Informationen über den Ursprung der Entladungen abgeleitet werden.

Teilentladungsmessungen an Statoren lösen zunehmend die früheren Hochfrequenzemissionsmessungen im Bereich 10 kHz bis 10 MHz ab. Diese Messungen wurden mit Rundfunkempfänger-ähnlichen Geräten teils mit galvanischer Ankopplung, teils aber auch über Antennen durch Messung von hochfrequenten durchgeführt. In ähnlicher Form wird diese Messtechnik auch heute noch mit Handsensoren zur Lokalisierung von Entladungsquellen im MHz-Bereich eingesetzt.



**Abbildung 3** Teilentladungsmessung an Statorisolationen (aus [17]),  
**a) Klassische Ankoppelmethoden,**  
**b) Teilentladungsstromsignal im Zeitbereich**

Seit einigen Jahren werden auch optische, akustische und chemische Methoden zur TE-Detektion herangezogen.

Für die ausführliche Besprechung der jüngsten Fortschritte der Teilentladungsmesstechnik wird auf die nachfolgenden Referate und die Literatur verwiesen [10]-[13].

Als nicht-elektrische Messungen können folgende Methoden genannt werden:

- Infrarotaufnahmen
- Diagnose des Kühlwassers oder Kühlgases mit chemische Sensoren oder im Gas mit Feuchtigkeitssensoren.

### 3.2.5 Weitere Messungen zur Fehlerdiagnose

Nebst den eigentlichen Isolationstests seien an dieser Stelle noch weitere verwandte elektrische Diagnoseprüfungen genannt:

- Ultraschall-Transmissionsmessungen durch das Eisenpaket zur Prüfung der Paketpressung.
- Diagnose von Eisenfehlern: Statorjochs werden mit Magnetisierungswindungen zirkularmagnetisiert, wonach die Verteilung der austretenden magnetischen Flussdichte gemessen wird. Phasenfehler und Oberwellen weisen auf Schlüsse zwischen den Eisenblechen hin.

Auf die zahlreichen Messmethoden zur Erfassung nichtelektrischer Zustandsparameter von Maschinen, wie Schwingungsmessungen, Lagerbeurteilungen etc. kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

## 4 Trends, Tätigkeit internationaler Gremien, Ausblick auf zukünftige Diagnosemethoden

Die Liberalisierung im Elektrizitätsmarkt führt besonders bei grossen unternehmenswichtigen Anlagen zu einem intensivierten Lifetimemanagement: Bei den teuren Komponenten, Statoren von Grossgeneratoren wird ein Monitoring oder eine verstärkte Diagnoseaktivität in vielen Fällen als rentabel eingeschätzt, wodurch Monitoring-Anlagen einen weltweiten Zuwachs erfahren.

Eine heute sehr aussagekräftige Methode stellt die TE-Überwachung (TE-Monitoring) dar, welche in den letzten Jahren verfeinert wurde und für welche computer- und datenbankunterstützte Auswertungstools entwickelt werden [9] – [12].

Weitere Sensoren werden in Monitoringsysteme integriert. Nebst den konventionellen Temperaturmessungen und den Messungen der elektrischen Parametern werden vermehrt auch mechanische, chemische (Ozon) und optische Sensoren herangezogen.

Eine Forschungsrichtung, deren Bedeutung heute noch schwer absehbar ist, bemüht sich um die Echtzeit-Modellierung von Abläufen in Grossmaschinen mit dem Ziel, gefährlich Veränderungen und Alterungsvorgänge frühzeitig zu erkennen.

In Diskussionen der Cigré-Studiengruppe 11 wird festgestellt, dass heute bereits wichtige Entscheidungen aufgrund von Monitoringdaten gefällt werden. Es besteht aber die breite Auffassung, dass sich solche Entscheidungen auf mehrere unabhängige Parameter abstützen müssen.

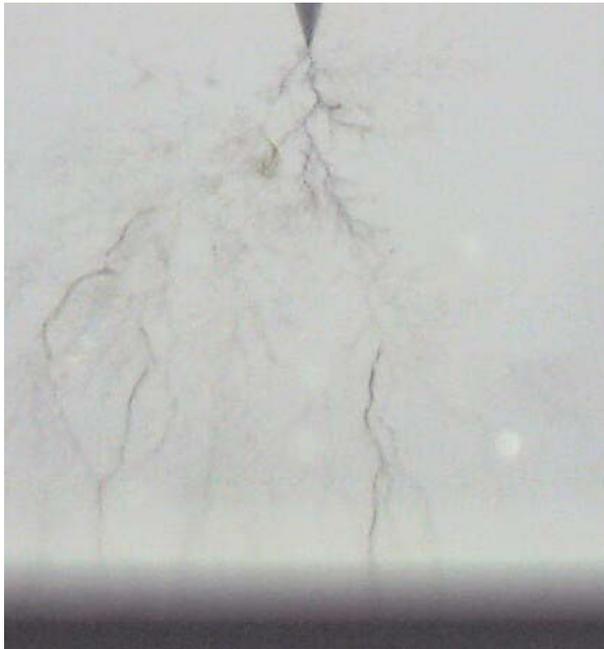
### Literaturnachweis

- [1] IEC 34-2A „Zusatz 1: Messung der Verluste mit der kalorimetrischen Methode“
- [2] IEC 34-4 „Methode zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen durch Versuche“.
- [3] IEC 34-4A „Zusatz 1: unbestätigte Versuche zur Bestimmung der charakteristischen Grössen von Synchronmaschinen durch Versuche“.
- [4] IEC 279(1969) „Messung der Wicklungswiderstände in elektrischen Wechselstrommaschinen während dem Betrieb“.
- [5] IEC 467(1974) „Physikalische Messmethoden für Kohlebürsten elektrischer Maschinen“.
- [6] IEC 773(1983) „Versuchsmethoden und Apparate zur Messung der Betriebseigenschaften von Kohlebürsten“.
- [7] IEEE P1434: Draft IEEE Guide to the Measurement of Partial Discharges in Rotating Machinery.

- [8] R. G. Yelle P. Ménard, Hydro-Québec, Canada „Guide to evaluate the need to rebuild hydroelectric generators“ CIGRE Session 2000, Paris, Paper 11-201.
- [9] E. Binder .A. Draxler H. Egger A. Hummer H.R. Fuchs, H. Koglek F. Müller M. Drpic, M. Hoof ,R. Käfer, S. Lanz, „Developments and verification tests of diagnosis methods for hydro-generators“, CIGRE Session 2000, Paris, Paper 11-301.
- [10] G.C. Stone: "Partial discharge measurements to assess rotating machine insulation condition: a survey", (International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, 1996, pp. 19-23).
- [11] B. Fruth, D.W. Gross: "Partial Discharge Signal Generation Transmission and Acquisition"; IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., Vol 142, No. 1, 1995, pp. 22-28.
- [12] Hutter, W.: „Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines“; IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 8, No. 3, (1992), 21-32.
- [13] A. E. Alksandrov, J.N. Irtegov, V.M. Nadtochy, V.G. Rodionov; „ Information diagnostic system for hydrop power units“; Cigré Session 2000, paper 11-303.
- [14] IEC 34-19 (1995) „Prüfmethoden für Gleichstrommaschinen mit konventioneller oder gleichgerichteter Speisung.
- [15] Kerszenbaum I.; „Inspection of large synchronous machines, checklists, failure identification and troubleshooting“; IEEE Power Engineering Series, IEEE Press 1996.
- [16] Comte B.; „Betrieb und Wartung von Wasserkraftwerken“, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, Baden, Verbandsschrift 57, 1998.
- [17] Lehmann K. „Teilentladungs-Monitoring an Grossgeneratoren“, Dissertation, Fachgruppe Hochspannungstechnik, ETH, Nr. 10824, 1994.

# Electrical treeing als Schadensmechanismus in Maschinenisolationen

Ruben Vogelsang, Thomas Farr  
 Fachgruppe Hochspannungstechnologie ETH, Zürich



*Bild 1: Aufnahme eines electrical tree beim Wachstum in reinem Epoxidharz.*

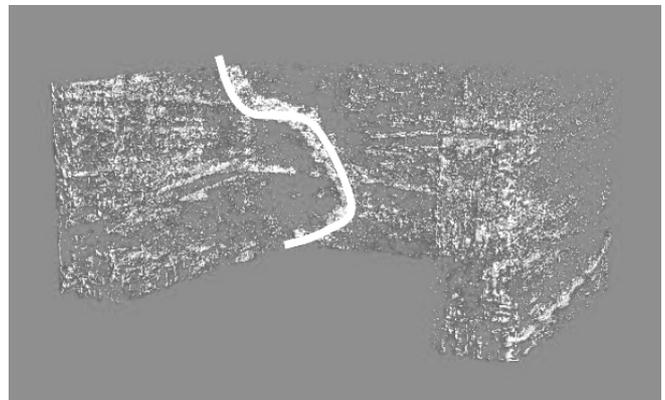
Im Vortrag werden Ergebnisse aus Versuchen zum electrical treeing vorgestellt. Insbesondere wurde die örtliche Ausbreitung des trees im Material sowie das zeitabhängige Vorwachsen des trees untersucht. Die Versuche sind zunächst in reinem Epoxidharz durchgeführt worden (Bild 1).

Im Hinblick auf die Durchschlagmechanismen in der komplexen Struktur der Komposit-Wicklungsisolationen von HS-Maschinen (Bild 2), wurde das electrical treeing weiterführend in Epoxidharzen mit verschiedenen Barrieren untersucht. Um eine möglichst „ideale“ Barriere zu finden, sind verschiedene Materialien auf ihre Barriereigenschaften hin



*Bild 3: Aufnahme eines electrical tree beim Wachstum um eine Barriere.*

Eine intakte Isolation ist die Voraussetzung für einen störungsfreien Betrieb von Hochspannungsmaschinen. Der Hauptteil vieler Wicklungsisolationen von Hochspannungsmaschinen ist Glimmer in Verbindung mit Epoxidharz. Die elektrische Belastung während des Betriebes der Maschinen kann einen kontinuierlichen Zerstörungsprozess der Isolation bewirken. Dabei werden schrittweise Teilbereiche des Isolierstoffes elektrisch leitend. Dieser Prozess wird aufgrund der dabei entstehenden baumartigen Struktur als „electrical treeing“ bezeichnet. Die sich aufsummierende Teilzerstörung des Isolierstoffes durch das electrical treeing kann in einem elektrischen Gesamtdurchschlag der Isolation resultieren, welcher dann zum Ausfall der Maschine führt.



*Bild 2: Durchschlagkanal in einer Wicklungsisolation einer HS-Maschine (Tomographie).*

untersucht worden (Bild 3). Weiterhin wurden Versuche mit verschiedenen Glimmermaterialien sowie in Maschinen

verwendeten Glimmerbändern durchgeführt.

Im Hinblick auf die Messbarkeit des treeings und möglicher



Diagnoseverfahren für Isolationssysteme von HS-Maschinen sind erste Versuche durchgeführt worden, in denen das electrical treeing zeitgleich optisch und elektrisch gemessen werden konnte.

Ergebnisse aus allen Versuchen werden präsentiert und in Beziehungen zu theoretischen Betrachtungen zum electrical treeing im homogenen Dielektrikum ebenso wie im Kompositmaterial gebracht. Dabei wird der Fokus immer auf die Anwendbarkeit der Ergebnisse auf praktisch relevante Wicklungsisolierungen von HS-Maschinen gelegt.



# Diagnose und Monitoring von Maschinenisolationen

Bernhard Fruth,  
PD Tech Power Engineering AG, Stetten, Schweiz

## Übersicht

Das Auftreten von Teilentladungen (TE) in Isolationssystemen ist grundsätzlich ein Anzeichen für Schwachstellen. Je nach Isolationssystem können diese Teilentladungen zu einem ungeplanten Ausfall einer Komponente führen und damit erhebliche Produktionsausfall- und Reparaturkosten verursachen. Der Teilentladungsprüfung und -überwachung (Monitoring) kommt daher erhebliche Bedeutung zu. Sie ist unverzichtbares Element der vorbeugenden Instandhaltung und Wertanalyse und spielt eine Schlüsselrolle im Asset Management.

Die Teilentladungsmessung ist ein Teilmodul eines Diagnosepaketes, das sowohl dielektrische (isolationsspezifische) als auch weitere Module, wie visuelle Inspektion, mechanische Diagnosen usw. enthält.

Es werden moderne Teilentladungsmesstechniken und dielektrische Prüfverfahren für Feld- und Laboranwendungen dargestellt, dabei wird besonders auf die Prüfung von elektrischen Maschinen eingegangen indem spezifische Fehlerszenarien analysiert und einige physikalischen Grundlagen erklärt werden.

Diese Prüfverfahren werden ergänzt durch nichtkonventionelle Teilentladungsdetektions- und ortungsverfahren, wie Ultraschall, chemische Sensoren, Ultraviolettamera.

Wie Wartung und Betrieb unterliegt Prüfung und Diagnose einem starken Kostendruck. Die Zahl der erfahrenen Experten bei den Betreibern nimmt ab. Daraus leitet sich ein steigender Bedarf nach optimierten, effizienteren und automatisierten Diagnoseverfahren ab.

## Die Isolation elektrischer Maschinen

Das Isolationssystem elektrischer Maschinen ist einer Vielzahl, gemeinsam auftretender Belastungen ausgesetzt. Wir sprechen hier vom TEAM der Belastungen.

Englisch: **t**hermal, **e**lectrical, **a**mbient and **m**echanical (**team**) oder thermische, elektrische, umweltbedingte und mechanische Belastungen.

Diese Belastungen führen zu einer lokalen oder globalen Veränderung der dielektrischen oder Isolationseigenschaften des Isoliersystems.

Diese Veränderung kann als Alterung bezeichnet werden.

Die Maschinenisolation ist vergleichsweise komplex. Daher wird bei der Wahl der Isolierstoffe und Isolationsverfahren Wert auf Defekttoleranz gelegt. Zum Aufbau der Verbundisolation werden eine Vielzahl unterschiedlicher Materialien eingesetzt:

- organische Harze, verschiedenste Polymere, organische und anorganische Faserwerkstoffe, Folien, Glimmer, Schutz- und halbleitende und nichtlineare Beschichtungen und Bänder.
- verschiedenste Konstruktionsvarianten zur mechanischen Fixierung, Verkeilung etc.

Dielektrische Testverfahren sind in der Regel zerstörungsfrei. Sie werden oft ergänzt durch online und offline Überwachungsverfahren, wie:

- Vibrationsanalyse
- Kernblech- und Überhitzungsdiagnose



- Lokalisierung von Glimmentladungen mit Ultraviolettamera, Ultraschall oder elektromagnetischer Sonde
- visuelle und mechanische Inspektion
- Ozon und Stickoxidmessungen, die auch auf Schleifring- und Rotorprobleme reagieren.

Häufig werden Isolationsfehler und Alterung von nichtelektrischen Vorgängen herbeigeführt (lokales Überhitzen der Kernbleche, mechanische Probleme). In diesem Sinne sind Isolationsprobleme die Folge und weniger die Ursache von Schäden.

Allerdings sind dielektrische Untersuchungen geeignet, diese Fehler zu identifizieren.

## **DIELEKTRISCHE PRÜFUNGEN**

Die im Folgenden dargestellten Prüfungen sind Resultat von über 3000 Untersuchungen elektrischer (Hochspannungs-) Maschinen.

### **DRA, Dielektrische Antwort**

DRA ist ein Verfahren, das Lade- und Entladeströme bei Gleichspannung analysiert.

Die charakteristischen Zeitkonstanten und Kurvenformparameter werden ionischen und dipolaren Polarisations- und Transportmechanismen zugeordnet, die mit Alterung und Lebensdauerverbrauch verknüpft sind.

### **Prüfsystem**

Lade- und Entladeströme werden in der Regel über einen Zeitraum im Bereich von je einer halben Stunde aufgezeichnet. Dabei variieren die Ströme über mehrere Dekaden. Aus diesem Grund wurde ein vollautomatisches Prüfsystem (DRA3, PD Tech GmbH, Schweiz) entwickelt, das die individuellen Ströme jeder Phase, aller Phasen zusammen und die Leckströme zwischen den Phasen aufzeichnet. Dies wird möglich durch den Einsatz eines Messsystems mit automatischer Bereichswahl, 1mA bis 100pA, einer Hochspannungsschaltmatrix und einer programmierbaren, potentialfreien Spannungsquelle (0 bis 10 kV). Mit diesem System wurden automatische Testsequenzen über 6 Stunden realisiert.

### **Theoretische Überlegungen**

Im allgemeinen wird der Zustand einer Isolation durch ihren Isolationswiderstand (z.B. nach 1 oder 10 min. nach Spannungsaufschaltung) und ihren Polarisationsindex beschrieben.

Dieser Ansatz beschreibt kaum den physikalischen Ursprung der dielektrischen Antwort. Es wurde ein Modell entwickelt, das folgende Mechanismen berücksichtigt:

- Leckströme im Wickelkopf (Dispersion von Oberflächenströmen)
- Volumenströme im Nutbereich, die von drei exponentiell abklingenden Stromkomponenten approximiert werden [1, 5]

Diese drei Komponenten sind:

- Bewegung von langsamen Ionen im Imprägnierharz
- Ladungsträgerrelaxation
- Grenzflächenpolarisation zwischen unterschiedliche Isolierstoffen (z.B. Glimmer und Harz)

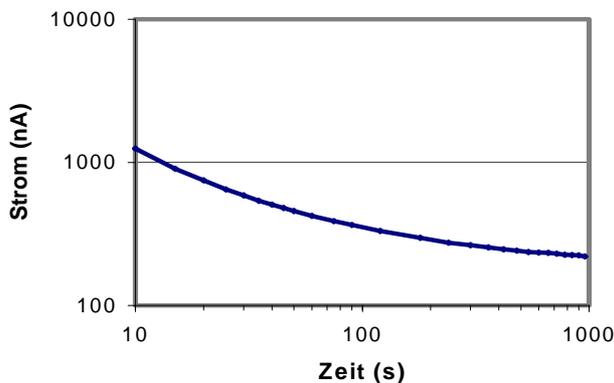
Der transiente Ladestrom folgt dann der allgemeinen Form, [1], (1):

$$I_A = I_R + A \cdot t^{-1/2} + I_{01} \cdot e^{-t/\tau_1} + I_{02} \cdot e^{-t/\tau_2} + I_{03} \cdot e^{-t/\tau_3} \quad (1)$$

mit:

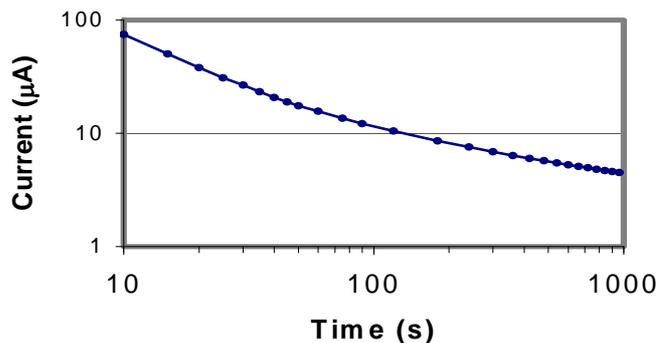
- $I_R$  resistiver Strom
- $A \cdot t^{-1/2}$  Anteil des Oberflächenleckstromes der Wickelköpfe
- $I_{01} \cdot e^{-t/\tau_1}$ , Harzdepolymerisation
- $I_{02} \cdot e^{-t/\tau_2}$ , Harzpolymerisation, Nachhärtung
- $I_{03} \cdot e^{-t/\tau_3}$ , Grenzflächen

Bild 1 zeigt beispielsweise einen exponentiell Abklingenden Strom im Nutzbereich:



**Bild 1:**  $I(t)$  nähert sich einer Konstanten ( $I_R$ ), Generator 4.8MVA, 6.3kV

Bild 2 zeigt das Gegenbeispiel eines Stromes der durch Dispersion im Wickelkopf dominiert wird.



**Bild 2:** Hauptanteil des Stromes vom Wickelkopf ( $I(t) \sim I_R + A \cdot t^{-1/2}$ , Generator 13.8kV, 115 MVA)

## Zeitkonstanten

Eine Vielzahl von Resultaten wurden im Rahmen von Wartungsaktivitäten und Vor-Ort-Messungen erzielt:

- Bewertung von Reinigungs- und Trocknungsmassnahmen
- Bewertung des Wickelkopfzustandes
- Aushärtung von Schutzlacken usw. [2].

Tabelle I zeigt einige Prüfergebnisse von einem 6.3 kV – 8 MVA Motor.

Nach einem Schaden in einer Industrieumgebung musste die Wicklung getrocknet werden. Nach der ersten Trocknung hatten Isolationswiderstand und Polarisationsindex gute Werte. Die Zeitkonstanten wurden jedoch als zu gering erachtet. Eine zweite Trocknung vergrößerte die Zeitkonstanten beträchtlich, wobei der Isolationswiderstand sich verdoppelte bei etwas verringertem Polarisationsindex. D.h. eine Auswertung der Zeitkonstanten erlaubt eine feinere Überwachung des Trocknungsvorganges.

	$R_{isol}$ ( $G\Omega$ )	PI	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$
1. Trocknung	27	6	<5	18	103
2. Trocknung	49	4.7	28	87	497

**Tabelle 1: Dielektrische Eigenschaften in Abhängigkeit von Trocknung, Zeitkonstanten in s.**

### Leitungsindex CI

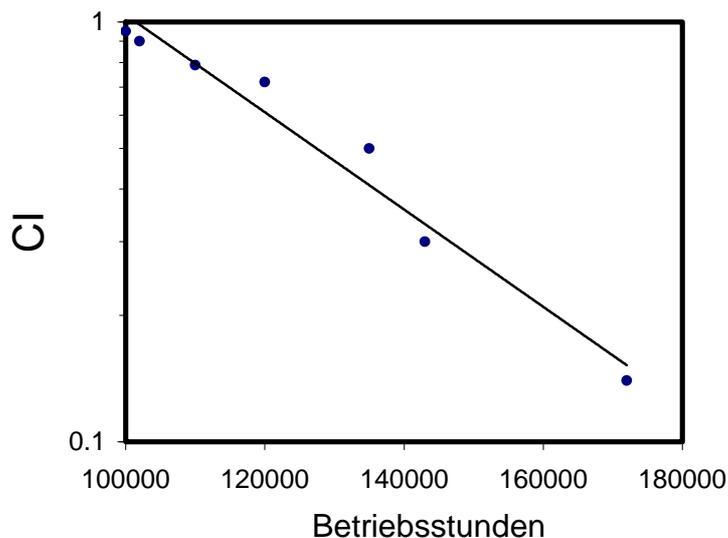
Da es wünschenswert sein kann, die Isolationseigenschaften mit möglichst einem Parameter zu beschreiben wurde der Leitungsindex CI eingeführt. Dieser hat folgende Eigenschaften:

- dimensionslos
- kontinuierlich und deutlich abnehmend infolge Alterung der Isolation (Lebensdauerprognose)

Der Leitungsindex CI ist dimensionslos und ist definiert als (2),

$$CI = \frac{I_{01} \tau_1^2}{I_{02} \tau_2^2} \quad (2)$$

Bild 3 zeigt den typischen Abfall von CI mit dem Alter (luftgekühlte Maschinen).



**Bild 3: Abhängigkeit des Leitungsindex CI von der Zeit**



Im allgemeinen sinkt der Lebensdauerindex exponentiell mit der Betriebszeit. Kritische Werte werden erreicht, wenn durch Abbau des Isoliermaterials [3] Werte unter 0,3 erreicht werden.

## Wechselspannungsprüfung

Bei einer Wechselspannungsprüfung werden:

- Verlustfaktor und Wicklungskapazität
- Teilentladungsmuster
- harmonischer Verluststrom HLQ (harmonic loss quantity) gemessen.

Der HLQ-Wert [1] ist eine Oberwelle des Verluststromes, die parallel zum Verlustfaktor aufgezeichnet wird. Der Verlauf des HLQ-Wertes über der Prüfspannung ist ein starkes Indiz für Alterung und Lebensdauerverbrauch.

Teilentladungsmuster [4] werden genutzt um lokalisierte Fehler zu erkennen. Teilentladungsmuster werden sowohl bei Stillstands als auch bei Betriebsmessungen durchgeführt.

## Prüfanlagen

Im allgemeinen werden Netzfrequenzprüfanlagen mit Parallelkompensation die genügend Blindleistung zur Speisung der Wicklungskapazität liefern genutzt. In Einzelfällen wurden Niederfrequenzprüfanlagen, die auch in der Kabelprüftechnik Verwendung finden, eingesetzt.

Teilentladungen werden mit Hilfe von Koppelkondensatoren ausgekoppelt und von digitalen Systemen weiter verarbeitet. Hierbei wird das sogenannte Teilentladungsmuster aufgezeichnet, das eine statistische Verteilung der Häufigkeit von TE-Impulsen in Funktion ihrer Amplitude und des Phasenwinkels ihres Auftretens darstellt [4].

Ein neues System befindet sich in der Entwicklungsphase, das jeden TE-Impuls mit einem Zeitstempel versieht und bis zu 15 Kanäle gleichzeitig verarbeiten kann, dabei wird die Zeit mit einer Präzision von 100ns gemessen. Das System ermöglicht unterbrechungsfreie, synchrone Aufzeichnungen bis zu 300 Tagen.

Verlustfaktor, Kapazität und harmonische Analyse werden mit einem System ohne Messbrücke mit Hilfe direkter Digitalisierung der Ströme erfasst.

## Messung der dielektrischen Verluste

Die dielektrischen Verluste einer Maschinenisolation beruhen auf verschiedenen physikalischen Prozessen:

- Orientierung und Bildung von Dipolen
- Zündung von Teilentladungen
- Bewegung von Ladungsträgern im Wechselfeld

Der individuelle Beitrag jedes einzelnen Verlustmechanismus hängt vom Isolationssystem und seiner Struktur und von Betriebsart und -zeit ab.

Die dipolaren Verluste sind praktisch unabhängig von der Spannung. Die Verluste, die von Entladungen herrühren, hängen von Teilentladungstyp (Pulshöhen und Häufigkeit) ab. Ein weiterer Einfluss sind Feldsteuerausrüstungen, Endenglimmschutz etc..

Die Verluste durch bewegliche Ladungsträger hängen vom Ladungsträgertyp, der Höhe des lokalen elektrischen Feldes und besonders von der Struktur der Imprägnierharze ab.

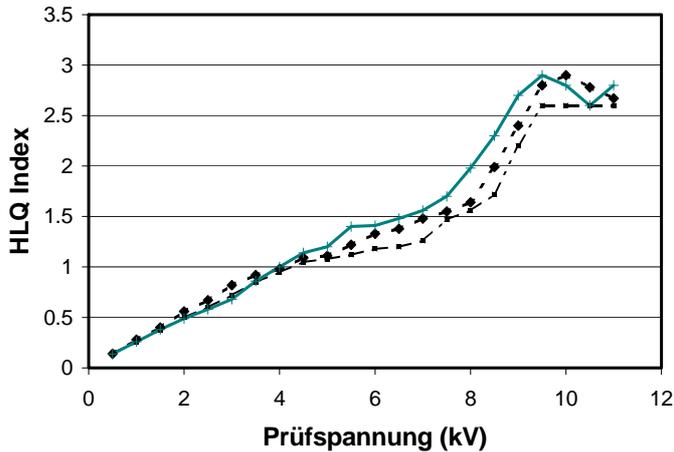
In einem hohen Wechselfeld bewegen sich schnelle Ionen besonders in depolymerisierten Zonen der Polymere, insbesondere bei starker Alterung der Isolation [5].

Der harmonische Anteil wird HLQ Wert genannt und wird mit Hilfe eines Digitalfilters mit einer Mittenfrequenz von einigen 100 Hertz extrahiert.

Im Falle wenig gealterter Maschinen steigt der HLQ-Wert praktisch linear mit der Spannung.

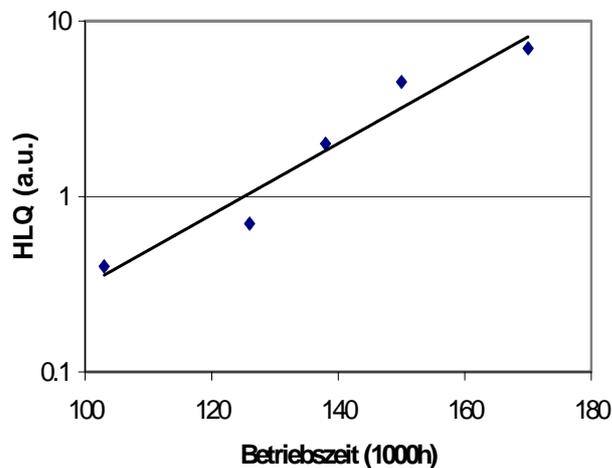
Im Falle gealterter Maschinen bildet der HLQ-Wert unterhalb der Nennspannung ein Maximum aus. Je geringer die Spannung dieses Maximum ist, je weiter ist die Isolation gealtert.

Bild 5 zeigt den Fall eines Generators in einem Pumpspeicherwerk (Alter 20 Jahre), bei dem ein Maximum deutlich ausgebildet ist.



**Bild 4:** HLQ Index in Funktion der Prüfspannung (13.8kV, 115MVA Generator)

Bild 5 zeigt die Änderung des charakteristischen HLQ mit der Betriebsdauer. HLQ steigt ständig an und zeigt damit eine kontinuierliche Alterung der Isolation an (Zunahme schneller Ionen).



**Bild 5:** HLQ in Funktion der Betriebszeit (gleiche Maschine wie Bild 4)

## Teilentladungsmuster

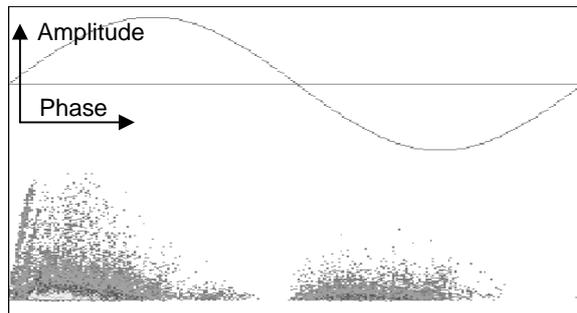
Aussehen und Charakteristika von Teilentladungsmuster sind typisch für spezifische Isolationsdefekte. Im Allgemeinen ist die visuelle Interpretation die wirkungsvollste. Weiterhin können diese Muster numerisch ausgewertet werden, indem Parameter wie mittlerer Entladungsstrom, mittlere Impulsladung etc. berechnet werden.

Teilentladungsmuster sind direktes Abbild der TE-Aktivität, die z.B. durch Abrasion von Isoliermaterial (Vibration, Nutentladung) oder durch Verschmutzung oder Beschädigung (Wickelkopf) hervorgerufen wird.

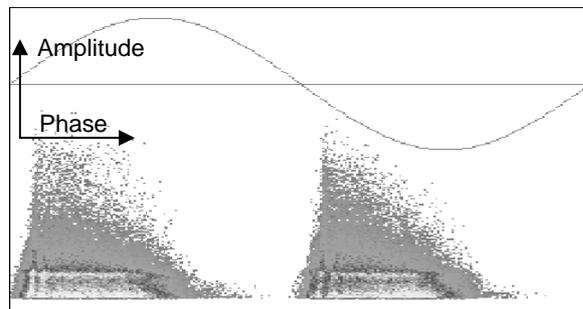
## Beispiele Teilentladungsmuster

### *Entladungen im Nutbereich*

Als Folge von Teilentladungen im Nutbereich, Nutentladungen, Entladungen in den Isolierwickeln durch Aufgehen, Loslösen der Hauptisolation vom Kupfer durch Temperaturwechsel ergeben sich in der Regel ‚dreieckige‘ Muster, deren höchste Steigung in der Nähe oder vor den Spannungsnulldurchgängen beobachtet wird. Bild 6 und 7 zeigen Teilentladungsmuster und typisches Schadensbild, eine losgelöste Hauptisolation mit Ablagerungen von TE-Nebenprodukten auf den Teilleitern.



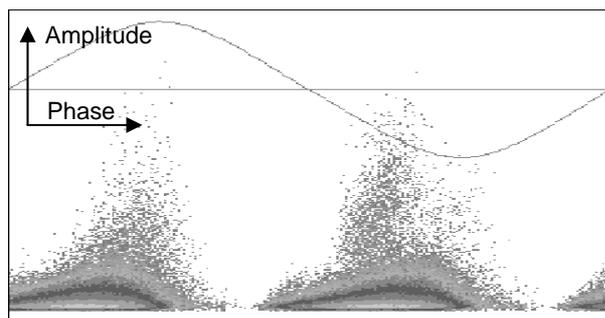
**Bild 6:** Teilentladungsmuster und Schadensbild



**Bild 7:** Auftrennen der Isolierbänder

### *Entladungen im Wickelkopf*

Beschädigungen und Verschmutzung der Feldsteuerbeschichtungen im Wickelkopf, sowie die Verwendung ungenügender Werkstoffe führt zu Oberflächenentladungen. Diese Entladungen erodieren die Isolationsoberflächen. Bild 8 zeigt ein typisches Teilentladungsmuster einer Wickelkopfentladung und das zugehörige Entladungsbild mit den weisslichen Ablagerungen der Entladungsnebenprodukte.



**Bild 8:** Teilentladungsmuster einer Wickelkopfentladung und Schadensbild

### Überlagerung von Wickelkopf- und Nutentladung

Während Hochspannungsprüfungen, besonders bei erhöhten Prüfspannungen und auch bei Betriebsmessungen (on-line) können Wickelkopf- und Nutentladungen gemeinsam Auftreten. Das Teilentladungsmuster ist im Gegensatz zu reinen TE-Pegelmessungen besonders geeignet, diese Überlagerung zu identifizieren.

In Bild 9 und 10 sind derartige Überlagerungen dargestellt (vergleiche mit Bild 7 und 8).

Die Messung von Bild 10 wurde mit einer Niederfrequenzanlage der Fa. Baur (Sulz, AU) realisiert. Niederfrequenzprüfanlagen erlauben einen geringeren Ladestrom. Dies führt zu Gewichtseinsparungen bei der Prüfanlage. Die Teilentladungsmessung liefert Niederfrequenz in den untersuchten Fällen durchaus vergleichbare Ergebnisse.

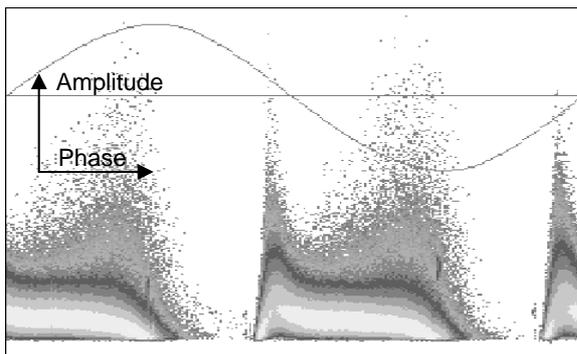


Bild 9: Überlagerung 50Hz

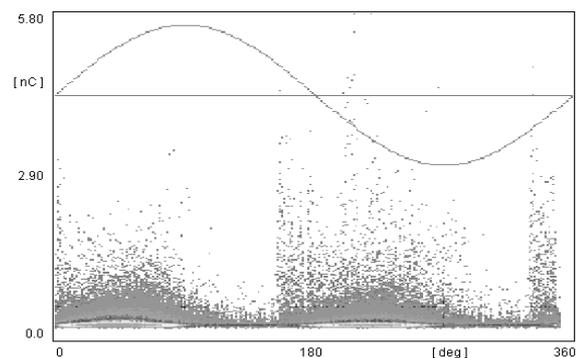


Bild 10: Überlagerung 0,1 Hz

### Ursachen für TE, Beispiel Endensteuerung

Wie bereits erwähnt, kann eine Entladung im Endsteuerungsbereich verschiedenen Ursachen haben.

- Einsatz von Materialien mit ungenügender Feldsteuerwirkung

Ein Material mit ausreichender Steuerwirkung führt zu einer Minimierung der lokalen Feldstärken. Dies erreicht man durch eine lineare Potentialverteilung aufgrund entsprechender Dimensionierung der ‚halbleitenden‘ Werkstoffe.

Ist die Potentialverteilung nichtlinear ist der Werkstoff weniger zur Feldsteuerung geeignet.

Bild 11 zeigt den Vergleich eines optimalen mit einem weniger geeigneten Feldsteuermaterial.

(Oberflächenpotentialmessung längs und quer zu Feldsteuerung)

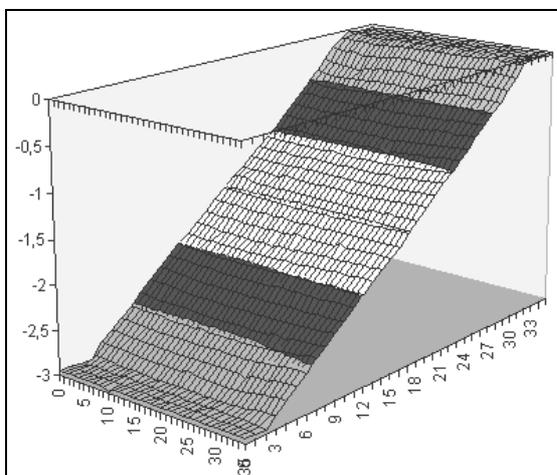
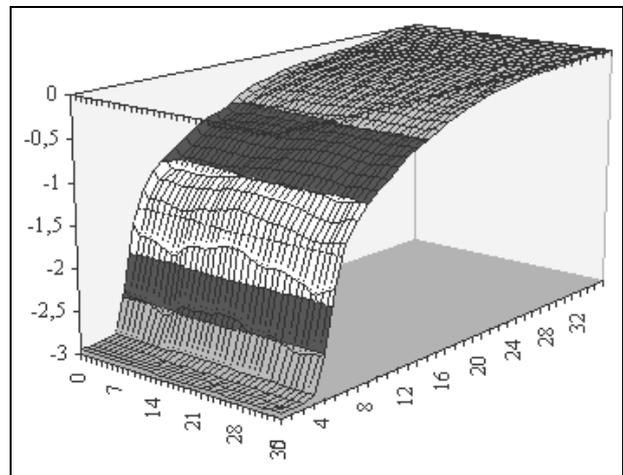


Bild 11: lineare Verteilung (Material A)  
(z-Achse: Oberflächenpotential)



nichtlineare Verteilung (Material B)

- lokale Entladungen, Fehlersuche

Zur Identifizierung und Lokalisierung von Entladungen im Wickelkopf eignen sich besonders Ultraschallsonden (Bild 12) oder Videoaufnahmen der Entladungen im UV-Bereich (Bild 13)

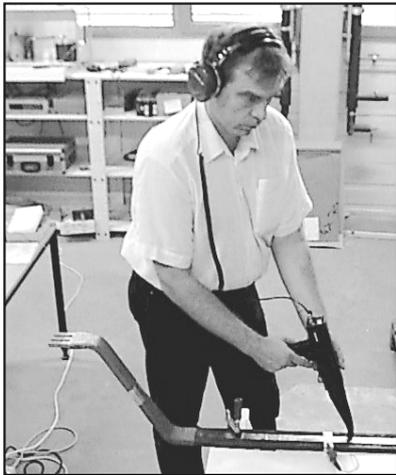


Bild 12: Ultraschallsonde

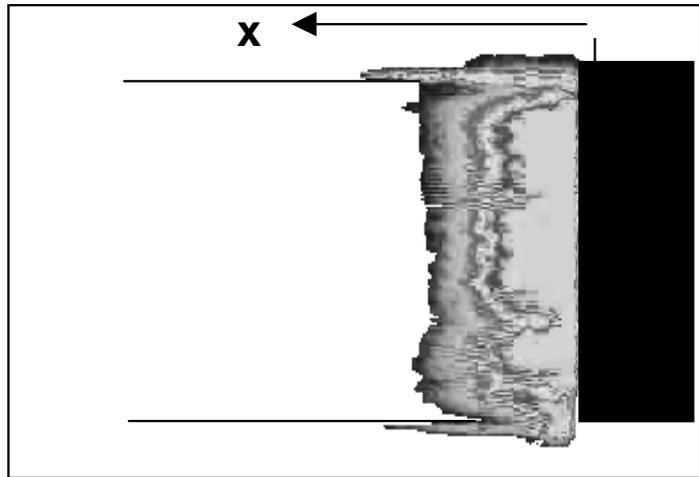


Bild 13: UV-Falschfarben der Endensteuerungs-TE

## Teilentladungsmessung im Betrieb

Voraussetzung für eine Teilentladungsmessung ist eine sogenannte Ankoppeleinrichtung. Diese Ankoppeleinrichtung wird in der Regel während eines Betriebsunterbruches fest installiert. Eine Ankoppeleinrichtung besteht aus einem Teilentladungssensor, Signalkabeln, und einer Anschlussbox die an einer leicht zugänglichen Stelle installiert wird. An dieser Anschlussbox können dann jederzeit TE-Messeinrichtungen angeschlossen werden.

Somit ist die Anschlussbox praktisch ein Diagnosestecker für die Ständerwicklung.

Das Teilentladungssignal ist ein Stromimpuls mit hochfrequenten Anteilen. Dieser Impuls kann grundsätzlich über diverse Techniken aufgenommen werden.

## Standardkoppler

Standardkoppler: Sensoren, die so dimensioniert sind, dass möglichst grosse Bereiche des Isolationssystems erfasst, und die Pulsamplituden kalibriert werden können. Standardkoppler erfordern einen speziellen Einbau:

- kapazitive Koppler, Koppelkondensatoren
  - induktive Koppler wie Rogowskispulen und Hochfrequenzstromwandler
- Beide Techniken sind grundsätzlich gleichwertig, die Auswahl erfolgt nach Kostengesichtspunkten und Einfachheit der Installation.  
In der Mehrzahl der Fälle werden Kondensatoren fest installiert.

Folgende Kondensatoren werden zu Messungen genutzt:

- fest installiert an den Hochspannungsklemmen
- nur für einmalige Messung provisorisch installiert und nach Messung wieder demontiert, Hochspannungsklemmen
- nur für einmalige Messungen provisorisch am Sternpunkt bei laufender Maschine angeklemmt

### Sonderfälle

- bereits vorhandene Kondensatoren, z.B. Schutz- und Löschkondensatoren der Generatorschalter, die durch kleine Modifikationen, wie Einbau von Hochfrequenzstromwandlern zur TE-Messung genutzt werden können.
- Streukapazitäten von Spannungs- und Stromwandlern (ebenfalls Einbau von Stromwandlern)

### Koppler mit lokalem Empfangsbereich

Diese Koppler empfangen praktisch nur die Teilentladungsaktivität an ihrem Einbauort, die gesamte Wicklung wird in der Regel nicht überwacht.

- Keil-Koppler – Antenne, die unter der Nutverkeilung angebracht wird, um bestimmte Gebiete ohne Störeinwirkung zu untersuchen.
- Anzapfung der Temperaturmessung (Thermoelement oder Pt100 wird durch HF-Stromwandler geführt), kann im Betrieb angeschlossen werden.

Die nächste Skizze zeigt grundsätzliche Möglichkeiten der Kopplerinstallation.

### Anschlussvarianten (abhängig von Maschinentyp und

#### Variante 1 - induktiv

- ◆ HF-Stromwandler
  - ◆ Rogowski-Spulen
- Maschinen mit Kabelanschluss  
Motoren, feste Installation*

#### Variante 2 - kapazitiv

- ◆ Koppelkondensatoren
  - ◆ Umbau bereits installierter Kondensatoren
- Standardfall, bevorzugt*

#### Variante 3 - kapazitiv

- ◆ Koppelkondensator
- Installation im Betrieb möglich,  
periodische Messung, falls  
schnelle Ergebnisse erforderlich,  
nur temporärer Anschluss*

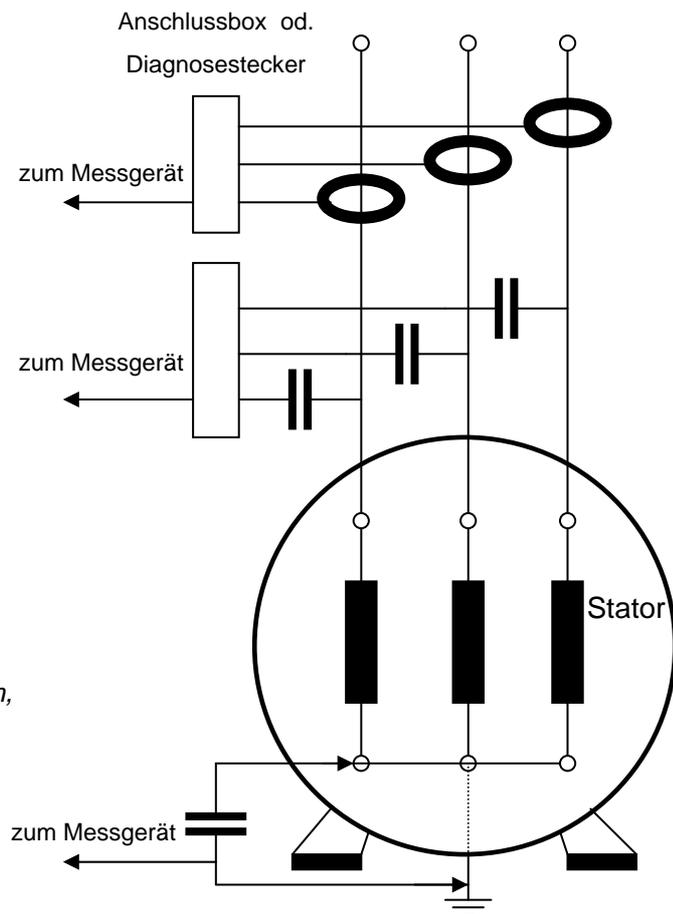
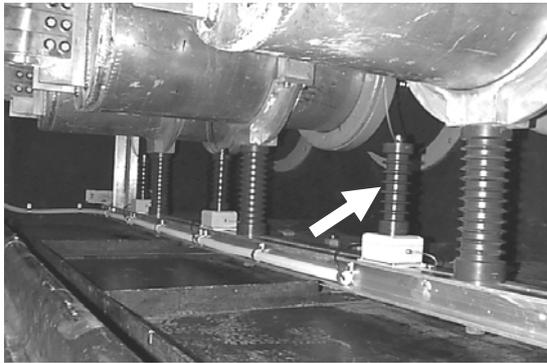


Bild 14: Blockschaltbild für Kopplermontage

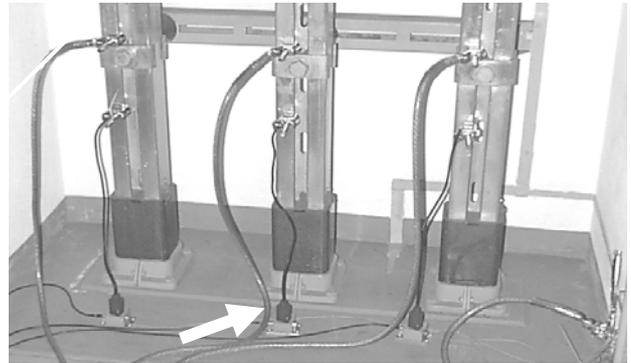
## Ausführungsbeispiele für Koppler

### Installation von kapazitiven Kopplern an der Sammelschiene

Bilder 15 und 16 zeigen typische fest (15) und temporär (16) installierte Koppelkondensatoren an jeder Phase.



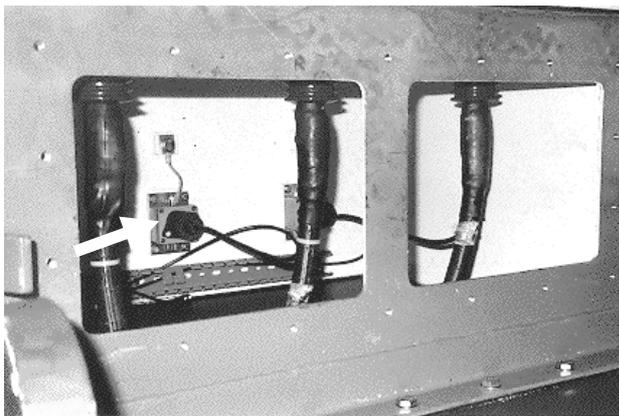
**Bild 15: Festinstallation**



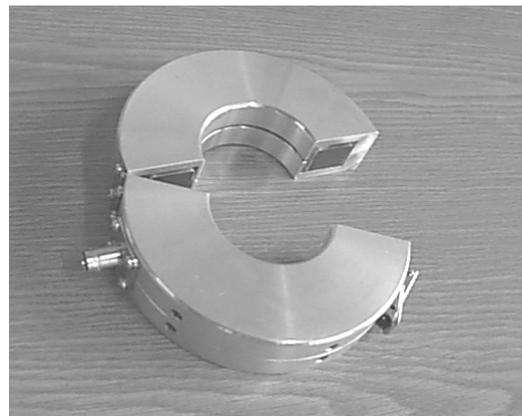
**Bild 16: temporäre Installation**

Die temporäre Installation von Kopplern an der Sammelschiene wird z.B. gewählt, wenn gleichzeitig der angeschlossene Maschinentransformator geprüft werden soll. Hierbei ist die Maschine im Inselbetrieb, die Spannung wird über die Erregung gestellt. Dies erlaubt eine gleichzeitig Messung von TE-Messung in Abhängigkeit der Spannung.

Koppelkondensatoren (Bild 17) werden heute vermehrt auch in Motoren mit strategischer Bedeutung installiert. Falls kein Zugang zum Hochspannungsanschluss möglich ist (Platzprobleme, Stillstandszeiten) eignen sich auch feste oder klappbare Hochfrequenzstromwandler (Bild 18) zur TE-Auskopplung.



**Bild 17: Kondensator im Motoranschlusskasten**



**Bild 18: HF-Klappwandler**

## Signalübertragung, elektromagnetische Störungen

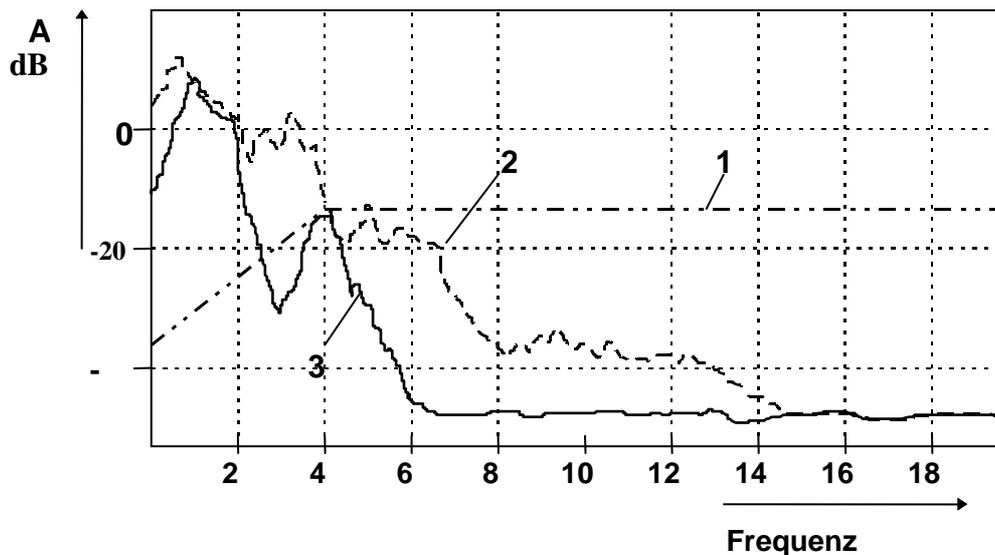
### Signalübertragung und charakteristischer Frequenzgang

Am Ort der Teilentladung hat der Teilentladungsimpuls typisch eine Bandbreite von mehreren 100 MHz. Bei der Übertragung des Teilentladungssignales von der Quelle, also der Fehlstelle bis zur Ankoppeleinheit wird das Signal gedämpft und deformiert.

Diese Signalübertragung wurde in der Vergangenheit untersucht und als Resultat ergibt sich:

der optimale Frequenzbereich in der die Teilentladungsimpulse erfasst werden sollen, damit ein möglichst grosser Teil der Wicklung erfasst wird. Im Betrieb der Maschine heisst das, alle Windungskomponenten in der Nähe des Hochspannungsanschlusses sollen erfasst werden, da in der Nähe des Sternpunktes die Spannung zu niedrig ist, um Teilentladungen zu erzeugen. Dieser Frequenzbereich liegt in der Mehrzahl der Fälle zwischen 2 und 20 MHz.

Das nächste Beispiel (Bild 19) zeigt den Signalfrequenzgang, gemessen an einem Koppelkondensator.



**Bild 19:** Frequenzgang der Teilentladungssignale

*Kurve 1: theoretischer Frequenzgang des eingesetzten Kopplers*

*Kurve 2: im Betrieb gemessenes Signalspektrum*

*Kurve 3: Übertragung eines schnellen Pulses vom Sternpunkt*

Es ist deutlich sichtbar, dass zwischen 2 und 20 MHz die geringste Signaländerung stattfindet, deshalb wird dieser Frequenzgang bevorzugt für Betriebsmessungen gewählt. Die Verwendung höherer Frequenzen ist praktisch nutzlos, da sie stark bedämpft sind.

Wird der Koppler an den Hochspannungsklemmen montiert so erhält man die beste Empfindlichkeit. Ein Koppler, der am Sternpunkt montiert wird empfängt stark gedämpfte Signale, d.h. die Verstärkung des Messsystems muss erhöht werden und der Einfluss evtl. vorhandener Störungen steigt. Dies ist der Hauptgrund, warum eine Sternpunktinstallation selten oder für Messungen mit temporär im Betrieb installierten Kopplern verwendet wird.

### Signaldämpfung: Koppelfaktoren $k_1$ und $k_2$

Für Standard-Frequenzgänge (Tabelle 2) wurden sogenannte Koppelfaktoren  $k_1$  und  $k_2$  definiert. Diese Koppelfaktoren geben für den jeweiligen Frequenzgang an, um welchen Faktor ein Impuls bei seiner Übertragung von der Sternpunkt- zur Hochspannungsseite gedämpft wird:

Koppelfaktor	Standard-Frequenzbereich	Typischer Bereich
$k_1$	100 – 800 kHz	$3 > k_1 < 200$
$k_2$	2 – 20 MHz	$2 > k_2 < 20$

**Tabelle 2:** Koppelfaktoren, Signaldämpfung vom Sternpunkt zum Phasenanschluss



Grundsätzlich ist  $k_1 > k_2$ , d.h. die Signalübertragung und Überwachung der Wicklung ist in der Regel schlechter bei niedrigen Frequenzen. Tendenziell ist die Signalübertragung in Turbomaschinen und Motoren besser als in Wasserkraftgeneratoren.

Die Signalübertragung wird weiterhin von Wickelkopfauslegung und Position der Stäbe beeinflusst (Antennenwirkung).

### **Nutzung der Dämpfungscharakteristik**

Bei Hochspannungsprüfungen oder TE-Diagnosen im Stillstand nutzt man die Signaldämpfung, um festzustellen, ob eine Maschine vorwiegend elektrisch oder thermomechanisch altert.

Zu diesem Zweck wird jeweils ein Koppelkondensator an HS- und Sternpunktseite angeschlossen. Ein Vergleich der Signale erlaubt eine entsprechende Beurteilung:

Im Betrieb wird der Sternpunkt nur thermomechanisch beansprucht, die HS-Seite jedoch thermomechanisch und elektrisch. Dieser Unterschied wird ggf. durch diese Messart sichtbar gemacht.

Ausserdem lassen sich damit Aussagen über den Sinn einer Sternpunktversion herleiten.

### **Einfluss von elektromagnetischen Störern, Störunterdrückung**

- Teilentladungssignale sind im allgemeinen sehr klein, d.h. sie können von elektromagnetischen Störern überlagert werden. Zu nennen sind hier:
  - Radio und Funk, Störer mit einem schmalen Frequenzbereich
  - Impulse mit breitem Frequenzbereich, z.B. von Teilentladungsquellen ausserhalb des Generators, Störimpulse die von der Erregung ausgesandt werden, Bürstenfeuer etc.
- Störer mit schmalen Frequenzbereich treten selten an rotierenden Maschinen auf und können durch entsprechende Filterung eliminiert werden.

Der Teilentladungspegel von Maschinen mit Defekten ist i.d.R. höher als der von anderen Defekten, die in der Nähe der Maschine auftreten.

Teilentladungen auf der Freileitungsseite werden z.B. durch den Maschinentransformator ausgefiltert, sind also am Maschinenkoppler nicht sichtbar.

Die in den meisten Fällen auftretende Störer sind die Erregung des Generators oder Thyristorsteller in einer Industrieumgebung!

Diese Störer können ebenso mit Hilfe des Teilentladungsmusters identifiziert werden. Im Falle eines Generators sind diese Störer am stärksten in der Nähe des Generators und nehmen an Intensität ab, je weiter man den Koppler von den Generatoren entfernt.

Eine Impulsrichtungserkennung ist also zu Störunterdrückung völlig ungeeignet, da damit auch die Teilentladungen eliminiert werden.

Es werden meist zwei verschiedene Verfahren zur Störunterdrückung verwendet:

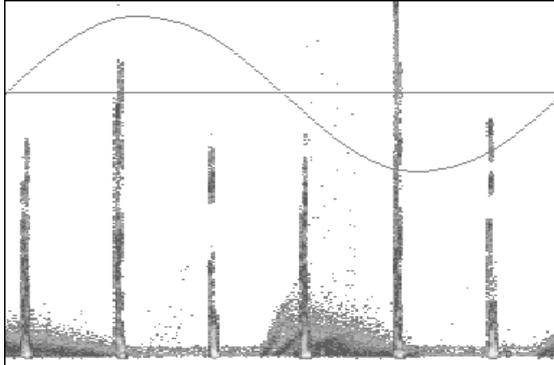
- Einsatz eines speziell auf die Bandbreite der TE-Impulse einer Maschine angepassten Frequenzbereichs
- Gating: Empfang der Störimpulse über einen zweiten Messkanal und blind Schalten des Messsystems für die Dauer des Störsignals

Mit Hilfe dieser beiden Verfahren ist es praktisch immer möglich saubere Teilentladungsmessungen im Betrieb elektrischer Maschinen durchzuführen.

Die Störsignale von Erreger und Thyristorsteller haben in der Regel ein Frequenzband unter 1 MHz, d.h. die Signalaufnahme im Bereich 2 bis 20 MHz erlaubt bereits eine effiziente Unterdrückung und nebenbei eine Erhöhung der Empfindlichkeit.

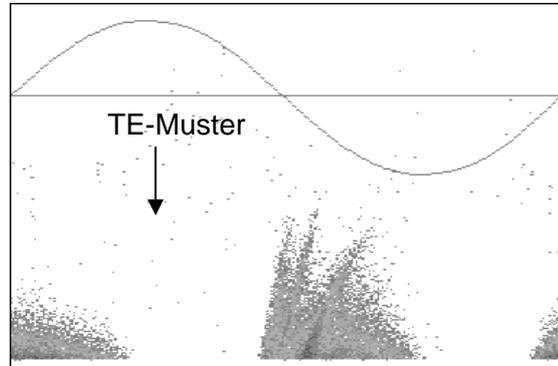
Ein Beispiel für eine effiziente Unterdrückung einer Erregerstörung ist im Folgenden dargestellt (Bild 20a, mit Störer, Bild 20b, ohne Störer).

Weiterhin erlaubt eine Analyse der Störer auch eine Beurteilung von z.B. Bürsten, Lagerisolation usw. (Analyse von elektromagnetischen Interferenzen, EMI-Analyse).



**Bild 20a: Betriebsmessung im Frequenzbereich 100 bis 800 kHz**

Die 6 vertikalen Linien entsprechen den Zündungen der Thyristoren des Erregers, durch ihr spezielles Muster können diese Störer leicht erkannt werden. Die dreieckförmigen Verteilungen im ersten und vierten Quadranten der Spannung entsprechen dem Teilentladungsmuster und die durchgehende Linie dem Rauschen oder schmalbandigen Störern



**Bild 20b: Betriebsmessung am gleichen Koppeler wie unter 1. aber mit breitbandigem Signalkonditionierer im Bereich von 2 bis 20 MHz.**

Das TE-Muster ist erheblich besser aufgelöst und klarer. Das Rauschband und die Thyristorpulse sind eliminiert.

## Wann ist eine Messung durchzuführen?

Die Teilentladungsmessung im Betrieb ist vollkommen zerstörungsfrei. Bei einer fest installierten Koppereinheit kann die Messung zu jeder Zeit ohne Betriebsunterbruch durchgeführt werden.

Es besteht die Möglichkeit verschiedene Messungen durchzuführen, je nach verwendeter Messtechnik:

- periodische Kontrollen
  1. Messung
  2. Messung, nach drei Monaten, erste Trendanalyse  
weitere Messungen in der Regel nach weiteren 6 – 9 Monaten, je nach Resultat öfter oder Vorschlag für Stillstandsmessung und kompletter Diagnose.  
Diese Messung wird mit mobiler Messtechnik durchgeführt
- periodische Fernmessung über Modem. Diese Messung benötigt eine fest installierte Messtechnik mit Modemanschluss
- Monitoring – Dauermessung mit Alarmprogrammierung  
Diese Messung benötigt eine fest installierte Messtechnik und Anschluss an Modem, Leittechnik oder Steuerpult. Daten werden periodisch gespeichert. Detaillierte Messung erfolgt bei Alarm und ggf. regelmässig für eine Trendanalyse.

## Zusammenfassung

Wir haben verschiedene Methoden zur Diagnose des Statorisolationssystems von elektrischen Maschinen beschrieben. Besonders wirkungsvoll sind dielektrische Untersuchungen im Stillstand wobei verschiedene Parameter, Leitungsindex CI oder harmonische Verluste HLQ sich monoton mit der Lebensdauer verändern.



Teilentladungsmuster eignen sich besonders zur Analyse von Isolationsdefekten und lassen sich im Gegensatz zu den dielektrischen Untersuchungen auch im Betrieb durchführen, Damit kann jederzeit und ohne Betriebsunterbruch eine Diagnose durchgeführt werden.

Trotzdem erfordert eine detaillierte Untersuchung des Maschinenzustandes weitere Techniken, wie die visuelle Inspektion, um eine sichere Grundlage für vorbeugende Massnahmen zu schaffen.

## Allgemeines

Ich danke besonders den Herren Weis und Goffaux vom Pumpspeicherwerk Vianden (Lux.) für Ihre Unterstützung.

## Literatur

- [1] Goffaux, R. "Evolution of dielectric properties of micaceous HV insulation during accelerated electrical aging, in French: Sur l'évolution des propriétés électriques des isolations ...", Rev. Gener. Electr. T87, no. 2, 1978, pp. 123
- [2] Pinto, C. "An Improved Method for Assessing the Insulation Condition of HV Stator Windings Using DC Methods", privater Schriftwechsel
- [3] L.A Dissado, J.C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peregrinus, IEE Materials and Devices Series 9, 1992.
- [4] Fruth, B. and J. Fuhr. "Partial Discharge Pattern Recognition - A Tool for Diagnosis and Monitoring of Aging", CIGRE, 1990, Paper 15/33-12
- [5] R. Goffaux, "The conduction index, an alternative evaluation possibility for the HV insulation quality of the stator winding of large machines. In French: L'indice de conduction, une autre possibilité d'évaluation de la qualité électrique de l'isolation...", Bull. Scient. AIM, 110<sup>e</sup> année, no. 4, 1, 1997

# Zustandsorientierte Instandhaltung von Kraftwerksgeneratoren

Carl-Ernst Stephan, Martin Hoof, Tom Bertheau  
ALSTOM (Schweiz) AG, Birr

## EINLEITUNG

Im Zuge der Liberalisierung der Energiemärkte und dem damit verbundenen allgemeinen Kostendruck, gewinnt der Einsatz moderner Diagnoseverfahren zunehmend an Bedeutung. Reduzierte Aufwendungen für Neuinvestitionen und den Unterhalt bestehender Anlagen, bei gleichzeitig notwendiger Gewährleistung einer möglichst hohen Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit, erfordern optimale Strategien zur zustandsorientierten Instandhaltung. Dies gilt insbesondere für Generatoren in Kraftwerken als Schlüsselkomponenten der elektrischen Energieerzeugung.

Die zustandsorientierte Instandhaltung grosser elektrischer Maschinen hat zum Ziel, die Nutzungsdauer bestehender Anlagen zu verlängern sowie die Zeitintervalle für Revisionen im Rahmen geplanter Maschinenstillstände zu optimieren. Dies erlaubt dem Betreiber bei hoher Betriebssicherheit die gesamten Lebensdauerkosten zu reduzieren und gleichzeitig eine optimale Reinvestitionsplanung durchzuführen.

Die zuverlässige Beurteilung von Diagnoseresultaten erfordert jedoch die Berücksichtigung zahlreicher Einflussfaktoren. Es existieren viele individuelle Konstruktionsmerkmale, Produktions- und Betriebsbedingungen, zahlreiche Isolationssysteme unterschiedlicher Hersteller sowie komplizierte Wechselwirkungen mehrerer Betriebsbeanspruchungen. Daher ist die Verfügbarkeit eines entsprechenden Expertenwissens für die Maschinendiagnostik von entscheidender Bedeutung.

## ALTERUNG VON GENERATOR-ISOLATIONSSYSTEMEN

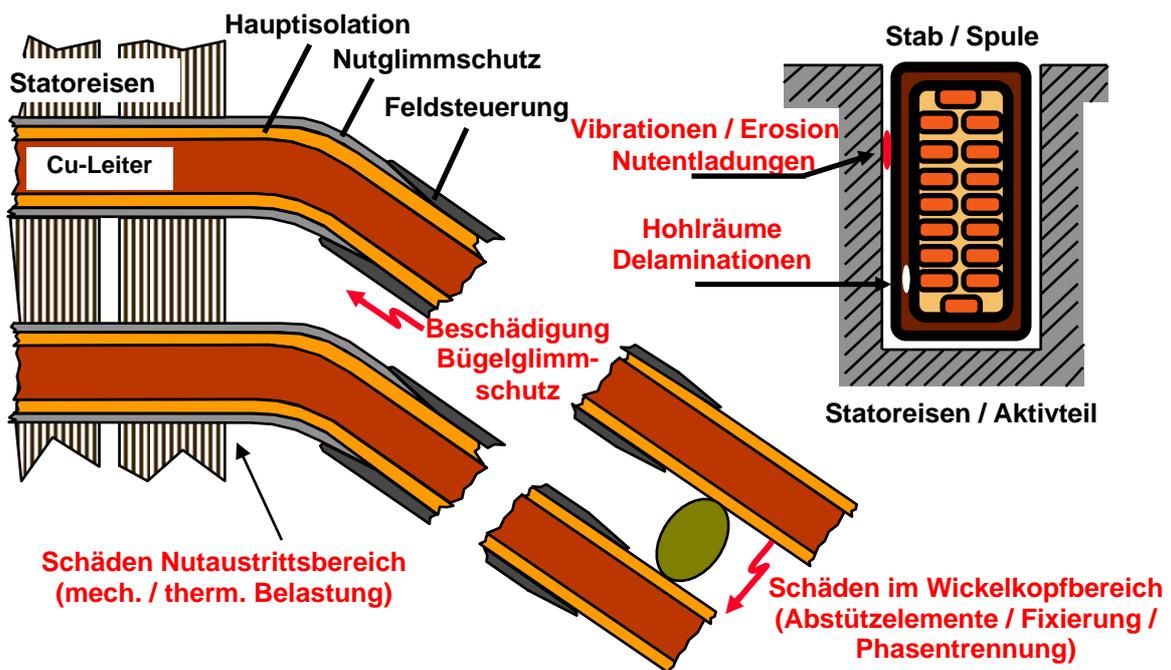
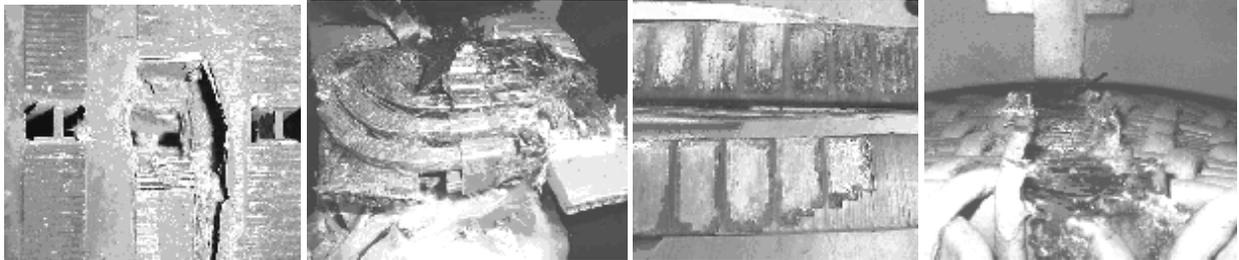


Bild 1: Wichtige Komponenten und typische Fehlerstellen von Stator-Isolationssystemen

Die Hochspannungsisolierung der Statorwicklung ist im Betrieb unterschiedlichen Belastungen (mechanisch / thermisch / elektrisch / Umwelteinflüsse) ausgesetzt. Diese leisten langfristig einen Beitrag zur allmählichen, meist irreversiblen Alterung des Isolationssystems und führen somit zur Verminderung der Zuverlässigkeit. Bild 1 zeigt schematisch wichtige Komponenten der Statorwicklung sowie einige typische Fehlerstellen. Moderne Maschinenisolationssysteme sind aufgrund des anorganischen Glimmers gegenüber einer rein elektrischen Alterung äusserst resistent. Die Hauptursachen für die Alterung und den Ausfall des Isolationssystems sind lokale mechanische sowie thermische Überbeanspruchungen, die schliesslich zum elektrischen Durchschlag führen können (Bild 2).



**Bild 2: Beispiele für Schäden des Statorisolationssystems grosser Generatoren (unterschiedliche Hersteller)**

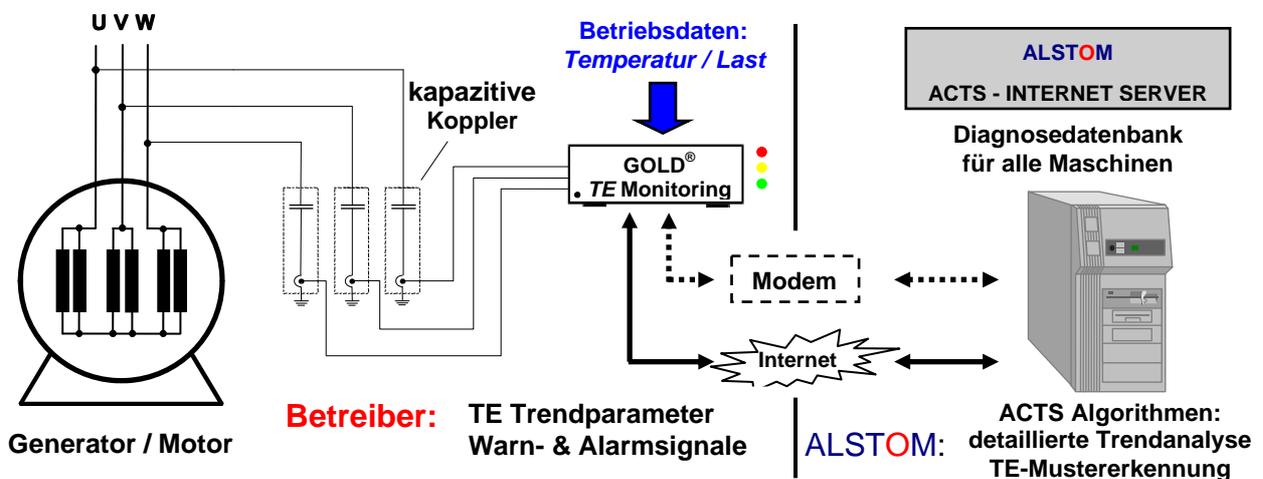
### VERFAHREN ZUR ISOLATIONS DIAGNOSE

Der Einsatz von Diagnose- und Monitoringverfahren erlaubt es, kritische Veränderungen im Isolationssystem frühzeitig zu erkennen, gezielt Korrekturmassnahmen einleiten zu können und damit die Nutzungsdauer einer Anlage zu verlängern. Dies führt insgesamt zu einer Kostenreduktion und damit zu einer Optimierung unter gesamtwirtschaftlichen Bedingungen.

Obwohl die weitaus grösste Zahl von Alterungsprozessen und Fehlerstellen auf mechanische und thermische Einflussfaktoren zurückzuführen sind, lassen sich Veränderungen im Isolationssystem durch Anwendung elektrischer bzw. dielektrischer Diagnoseverfahren gut detektieren. Dies kann zum Teil als permanentes oder periodisches on-line Monitoring während des Betriebes oder aber off-line während eines geplanten Maschinenstillstandes erfolgen.

Infolge des starken Trends von einer präventiven zur zustandsorientierten Instandhaltung haben on-line Monitoringverfahren enorm an Bedeutung gewonnen. Das aussagefähigste Verfahren ist hierbei die on-line Teilentladungsmessung (TE) mit detaillierter TE-Muster Bewertung und Trendanalyse [1,2,3,4,5].

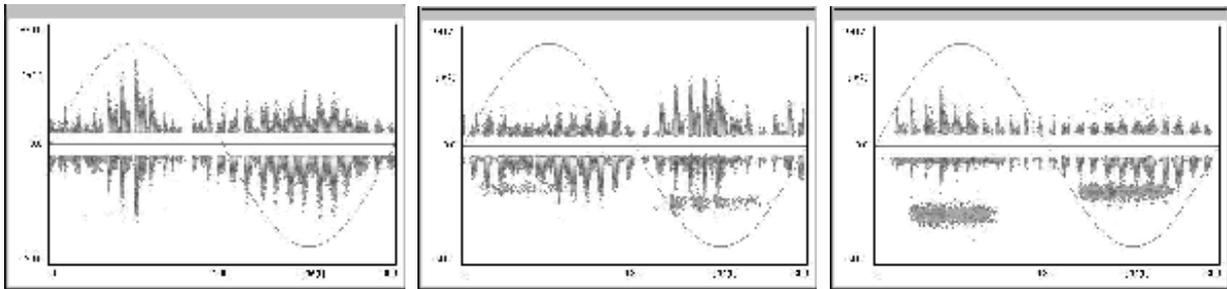
### ACTS: ASSESSED CONDITION TRENDING SYSTEM



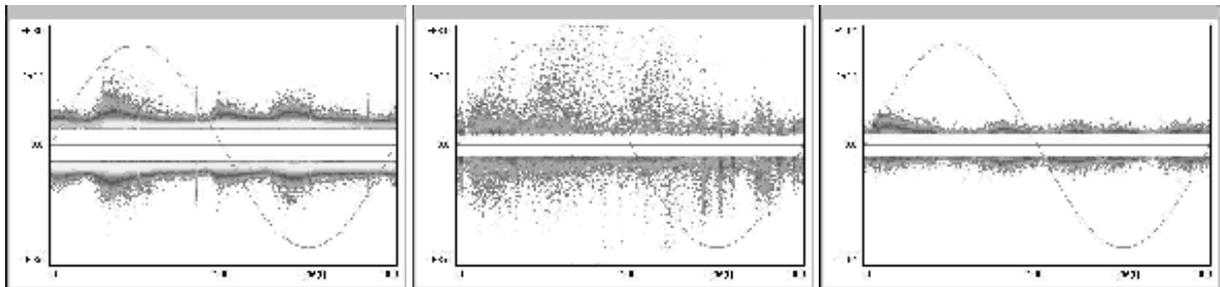
**Bild 3: Permanentes TE-Monitoring und Trendanalyse mittels Fernzugriff und zentraler Diagnosedatenbank**

Im Rahmen des ALSTOM **GOLD<sup>®</sup> Service** (Generator On-Line Diagnostics) wird ein Diagnosesystem eingesetzt, bei dem das im Kraftwerk installierte TE-Monitoring Gerät über eine Internet- oder Modemverbindung vollständig fernbedient werden kann und nach vorgegebenem Zeitplan regelmässig Messdaten an eine zentrale Datenbank übermittelt. Die Messdaten werden hier mittels **vergleichender TE-Muster-Analyse und Trendbewertung** zur Erfassung von Zustandsänderungen im Isolationssystem herangezogen.

Im Betrieb der Maschine wird das TE-Verhalten aller drei Phasen kontinuierlich überwacht, es werden vordefinierte Trendparameter aufgezeichnet, diese werden lokal durch Softwarealgorithmen bewertet und zur Steuerung einer Zustandsanzeige herangezogen. Gleichzeitig werden die periodisch übermittelten TE-Muster in einer **zentralen Diagnosedatenbank** auf Zustandsänderungen analysiert. Hierbei kommen moderne Algorithmen der Mustererkennung zum Einsatz, die gegebenenfalls eine Interaktion durch einen erfahrenen TE-Experten anfordern. Hiermit können weitere Aktionen schnell eingeleitet und, falls notwendig, vorbeugende Massnahmen zur Instandhaltung mit dem Betreiber abgestimmt werden.



**Bild 4:** on-line TE-Trendverhalten eines Turbogenerators 180 MVA / 13.8 kV / 60 Hz (Zeitraum: 2 Monate)



**Bild 5:** TE-Verhalten eines H<sub>2</sub> gekühlten Turbogenerators 433 MVA / 24 kV / 60 Hz (vor und nach Instandsetzung)

Die Bilder 4 und 5 zeigen zwei Beispiele für den erfolgreichen Einsatz des TE-Monitoring an grossen Turbogeneratoren. Im ersten Fall (Bild 4) zeigte die Trendanalyse des TE-Verhaltens neben unkritischen inneren Teilentladungen und ausgeprägten Störimpulsen (Erregungseinrichtungen) eine kontinuierliche Veränderung in typischen Bereichen des TE-Musters. Diese Entwicklung führte schliesslich zur Abschaltung der Maschine und Einleitung der notwendigen Korrekturmassnahmen.

Im zweiten Beispiel (Bild 5) wurde bei einem H<sub>2</sub> gekühlten Generator aufgrund des typischen TE-Verhaltens empfohlen, die Kühlgasaufbereitung zu überprüfen. Es wurde daraufhin ein defekter Trockner im Kühlgaskreislauf gefunden. Nach dessen Austausch und einer gewissen Trocknungszeit waren die kritische TE im Wickelkopfbereich der Statorwicklung vollständig verschwunden und damit das potentielle Risiko einer Kriechwegbildung und einem eventuellen Maschinenausfall eliminiert.

Da nicht alle Isolationfehler impulsförmige Teilentladungen verursachen [2], muss die TE-Diagnostik als integrierter Bestandteil in ein **umfassendes Diagnosekonzept** eingebunden sein. Dies umfasst die **Kombination von on- und off-line Verfahren** (Tabelle 1), mit jeweils unterschiedlichem Aussagegehalt, die im Rahmen der gewählten Diagnosestrategie zu variablen

Zeitpunkten abhängig vom Isolationszustand und dessen zeitlicher Entwicklung zum Einsatz kommen.

on-line Verfahren	off-line Verfahren
Teilentladungs-Monitoring Kühlgasanalyse (Spaltprodukte / Ozon) Temperaturmonitoring Vibrationsmonitoring	Visuelle Inspektion Teilentladungsmessung Verlustfaktor $\tan\delta(\omega, U)$ / Kapazität $C(\omega, U)$ Polarisations- / Depolarisationsstrom Isolationsstrom bei hoher DC-Spannung Glimmschutzkontaktprüfung Nutverkeilkontrolle

**Tabelle 1: on- und off-line Verfahren zur Zustandsbeurteilung des Isolationssystems elektrischer Maschinen**

Die meisten neben der TE-Messung eingesetzten off-line Verfahren zur Beurteilung des Isolationszustandes sind seit langem etabliert [6,7] und werden im Rahmen des ALSTOM **WIDIPRO®** Programms (Wicklungs-Diagnose-Programm) angewandt.

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer **zustandsorientierten Instandhaltung** erlaubt der Einsatz **kostengünstiger on-line Monitoring Verfahren** die Optimierung der Intervalle für zeit- und kostenintensivere off-line Untersuchungen. Im Gegensatz zur rein präventiven Instandhaltung, mit festen Diagnoseintervallen, lassen sich damit Stillstandszeiten sowie notwendige Revisionsmassnahmen optimal planen. Dies erhöht die Verfügbarkeit einer Anlage bei gleichzeitiger Kostenreduktion.

Die frühzeitige Erkennung von kritischen Veränderungen im Isolationssystem mit on-line Verfahren erfordert insbesondere eine **detaillierte Trendanalyse**, die heute durch zunehmende Integration von leistungsfähigen Methoden der Informations- und Datenverarbeitung erfolgt. Der Remote-Zugriff auf Monitoringsysteme inklusive automatisiertem Datentransfer in **zentrale Diagnosedatenbanken** für vergleichende Analysen sowie eine Trendbewertung mit modernen Mustererkennungsalgorithmen, gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung. Hiermit kann eine konsistente, schnelle und damit kostengünstige Diagnoseentscheidungen herbeigeführt werden.

Anhand der on-line Trendbeurteilung wird entschieden inwieweit entweder vorzeitig zusätzliche Massnahmen im Rahmen von off-line Untersuchungen notwendig sind, oder aber die Standardintervalle für off-line Untersuchungen und Maschinenrevisionen verlängert werden können. Zur detaillierten Zustandsbeurteilung sowie zur genauen Definition von Korrekturmassnahmen ist die Anwendung geeigneter **off-line Verfahren notwendig**. Die **visuelle Beurteilung der Wicklungsisolation** spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Auch bei off-line Untersuchungen gewinnt der Einsatz von computergestützten Diagnosesystemen zunehmend an Bedeutung. Hierbei wird die Beurteilung der Messresultate durch den Einsatz von sog. **Intelligent Diagnostic Agents** unterstützt, die als eine Art objektive Entscheidungshilfe dienen. Das bei ALSTOM Power zur Zeit entwickelte System basiert auf einer umfangreichen Diagnosedatenbank, in der die Diagnose- und Betriebsdaten von mehr als 2500 Maschinen über viele Jahre hinweg gespeichert sind. Hiermit können umfangreiche **vergleichende Datenanalysen sowie Trendbewertungen** durchgeführt werden. Dies erfolgt durch Anwendung von modernen Verfahren aus dem Bereich des „*Data Mining*“.

Trotz zunehmendem Einsatz von „intelligenten“ Diagnosesystemen wird auch in Zukunft die Verfügbarkeit von erfahrenen Diagnoseexperten von grösster Bedeutung sein. Deren **Erfahrung, Design- und System Know-how ist entscheidend** für eine erfolgreiche Diagnostik an grossen elektrischen Maschinen.



**Literatur:**

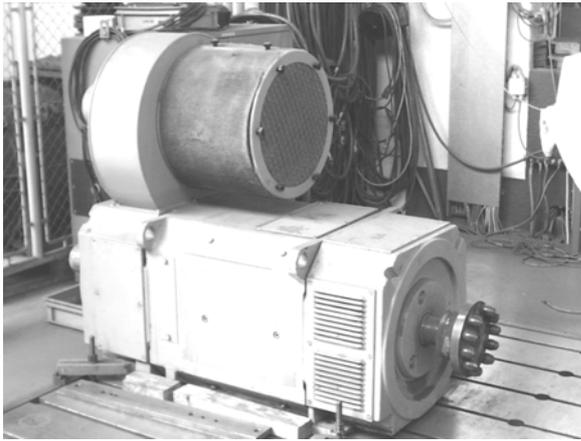
- [1] Hoof, M.; Laird, T.: Assessed Condition Trending System – A Tool for Generator On-Line Diagnostics. Electrical Insulation Conference 2001, Cincinnati, USA, (2001)
- [2] Hoof, M.; Lanz, S.: PD Diagnostics on Rotating Machines – Possibilities and Limitations. Electrical Insulation Conference 1999, Cincinnati, USA, (1999), 195-200
- [3] Bertheau, T.; Hoof, M.; Laird, T.: Permanent on-line Partial Discharge Monitoring as Strategic Concept to Condition Based Diagnosis and Maintenance. Electrical Insulation Conference 1999, Cincinnati, USA, (1999), 201-203
- [4] Bertheau, T.; Füglistner, T.; Lanz, S.: Advanced Partial Discharge Analysis Techniques on Generators and Motors. IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, (1998), 181-184
- [5] Laird, T.; Fiaux, J.; Bertheau, T.: Periodic on-line Partial Discharge Measurements on Air Cooled and Gas Cooled Generators of Similar Design. Electrical Insulation Conference, (1997), 101-105
- [6] Schuler, R.: Methods for Assessing the Winding Condition of Rotating Machines Applied Throughout Their Entire Service Life. CIGRE / IEE Japan Joint Colloquium, Yokohama, Japan, (1997)
- [7] Culbert, I.M.; Dhirani, H.; Stone, G.C.: Handbook to Assess the Insulation Condition of Large Rotating Machines. Power Plant Electrical Reference Series, Vol. 16, EPRI, USA, (1989)

# Instandhaltung von Antriebsmaschinen

Rolf Kleissler, Gebrüder Meier AG, Regensdorf

## Auswahl und Einsatz von Antriebsmaschinen

In der Industrie finden wir heutzutage hauptsächlich 2 Arten von Antriebsmaschinen:  
Die Asynchronmaschine und die Gleichstrommaschine.



**Gleichstrommaschine mit Fremdlüfter**



**Asynchronmaschine mit Kühler**

Die Auswahl dieser Maschinen erfolgt zum grössten Teil anhand folgender Fragen und Faktoren:

- Wie sind die äusseren Bedingungen in der Anlage wie z.B.:  
Sind Funken zulässig?  
Wie hoch ist die vorhandene Anschlussleistung?
- Wie sieht die Drehmoment/Drehzahlkurve der Antriebsmaschine aus? Wie hoch ist das Anzugsmoment?
- Ist eine stufenlose Drehzahlsteuerung notwendig oder genügt eine feste Drehzahl?
- Wie ist das Drehmomentverhalten bei Drehzahländerung?
- Wie ist die Wartungsfreundlichkeit der Maschine?

Vor allem der Punkt „Wartungsfreundlichkeit“ gewinnt bei den Betreibern bei der Auswahl der Maschinen immer mehr an Bedeutung, wobei die Wartungsfreundlichkeit der Maschine vor allem vom Aufbau der Maschine abhängt. Die Gleichstrommaschine mit ihrem Kohlebürstenantrieb während dem Betrieb verlangt einen deutlich höheren Wartungsaufwand wie die Asynchronmaschine.

## Wartungsmethoden

Wir unterscheiden zwischen folgenden Wartungsmethoden:

- Zustandsorientierte Wartung
- Zeitorientierte Wartung
- Schadensorientierte Wartung

Bei der zustandsorientierten Wartung wird die Maschine entweder in bestimmten Abständen oder sogar dauernd durch Messungen überwacht. Aufgrund der Messergebnisse werden dann die notwendigen Instandstellungsmassnahmen durchgeführt.

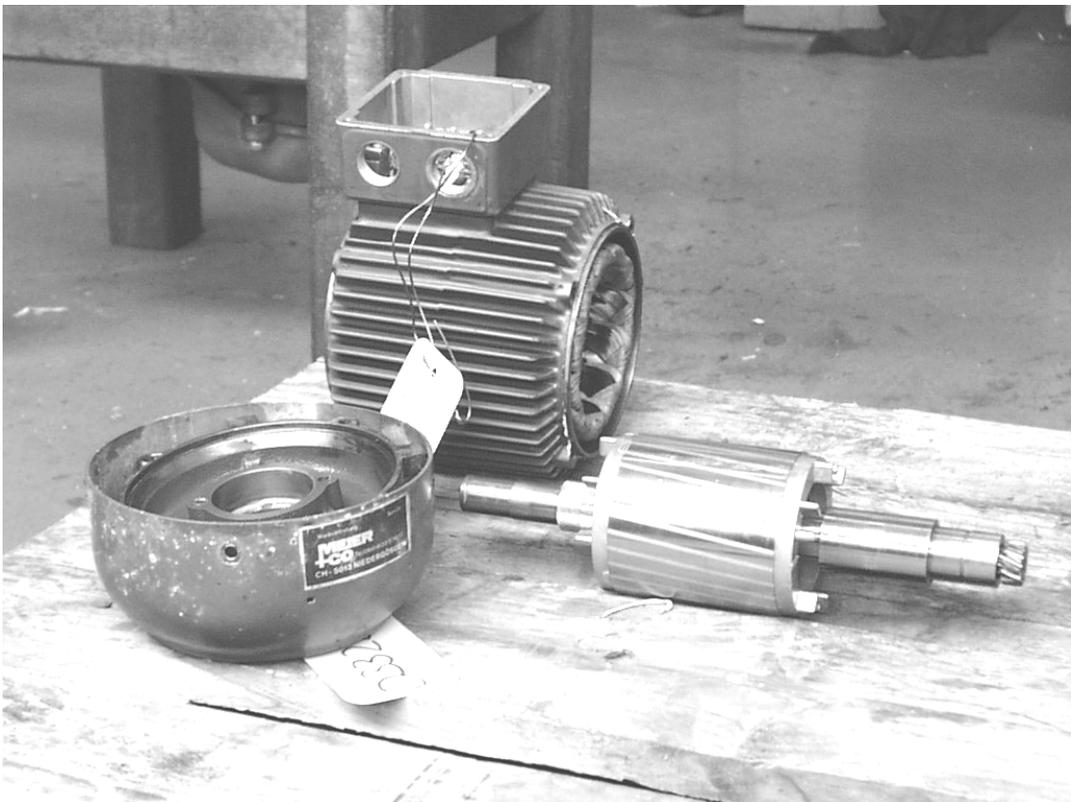
In der Praxis wird oft die zeitorientierte und schadensorientierte Wartung angewendet. Dafür gibt es verschiedene Gründe:

- Ersatzmaschinen sind auf der Anlage vorhanden
- Es existieren parallele Fertigungslinien
- Nachkauf ist in kurzer Zeit möglich

so dass ein zeitlicher Ausfall ohne Probleme gemeistert werden kann. Zu beachten ist allerdings, dass ein nicht geplanter Ausfall durch einen Schaden ca. 30% mehr Kosten verursacht als eine geplante Instandstellung (Erfahrungswert aus der Praxis).

Bei der zeitorientierten Wartung wird die Maschine in regelmässigen Abständen einer Revision unterzogen. Das Ziel der Revision ist durch gezielte auf Erfahrung basierende Instandstellungsmassnahmen die Lebensdauer der Maschinen zu verlängern. Diese Methode ist deshalb auch unter „vorbeugende Wartung“ bekannt.

Im Rahmen einer Revision wird die Maschine in alle Einzelteile zerlegt und spezifisch auf die Konstruktion abgestimmte Massnahmen wie Reinigung, Nachimprägnierung, Auswuchten, Lagerwechsel bis hin zur Neuwicklung ergriffen.



**In Einzelteile zerlegter Asynchronmotor**

Die Revisionen werden je nach Grösse der Maschine sowie Bedingungen vor Ort auf der Anlage selbst oder im Instandstellungswerk durchgeführt. Dabei hat sich in den letzten Jahren vor allem bei Grossmaschinen ein neuartiges Reinigungsverfahren durchgesetzt, die Reinigung mit CO<sub>2</sub>. Das Verfahren wurde von uns in den letzten Jahren mit sehr gutem Erfolg angewendet.



**Sichtbare Schmutzentfernung an einem Hydrogenerator**

### **Generelles**

- Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) ist ein nicht brennbares, geruchloses Naturgas. Wir finden dieses Gas in grossen Mengen in Vulkanen, Erdspalten, Quellen und beim pflanzlichen, tierischen und menschlichen Stoffwechsel.
- $\text{CO}_2$  fällt heute hauptsächlich als Nebenprodukt bei diversen chemischen Prozessen an und wird nach der Gewinnung in einem Tank gelagert. Kohlendioxid kann in drei verschiedenen Formen auftreten:
- gasförmig (für die Getränke- und Lebensmittelindustrie, beim Schweißen als Schutz)
- in flüssiger Form (im Lagerbehälter unter Druck als komprimiertes Gas)
- in fester Form (genannt Trockeneis, zum Kühlen, Strahlen etc.)

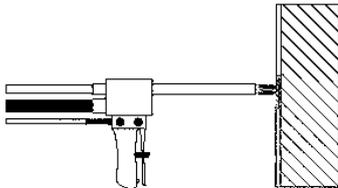
### **Das Reinigungsverfahren**

Die Pellets werden in der Strahl-Anlage mit komprimierter Luft auf eine Geschwindigkeit von ca. 300m/s beschleunigt. Die auf das Objekt schiessenden Pellets erzeugen einen punktuellen Thermoschock. Dadurch zieht sich der zu entfernende Schmutzbelag zusammen und löst sich von dem Grundmaterial. Durch die entsprechende kinetische Energie wird die Verunreinigung abgetragen. Das Pellet selbst sublimiert nach dem Aufprall sofort wieder und geht als Gas zurück zur Atmosphäre. Zurück bleibt nur der abgelöste Schmutz. Da die Pellets eine Härte von nur ca. 2 Mohs besitzen, findet keine abrasive Reinigung statt. Die Oberflächenqualität bleibt somit erhalten.

Schäden können durch das  $\text{CO}_2$  - Reinigungsverfahren bei richtiger Anwendung durch einen instruierten, gelernten Fachmitarbeiter und normal verfestigter Wicklung ( keine Isolationsschäden durch Alterung oder Glimmentladungen ) normalerweise nicht auftreten.

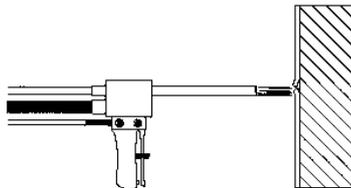
Es können jedoch bereits freiliegende, lose Isolationen oder Teile von losen Bandagen durch das CO<sub>2</sub> Verfahren ganz gelöst werden. (Ist auch bei allen anderen Reinigungsverfahren gleich).

Beschädigungen der Isolation durch interne Glimmentladungen, mechanische Schäden oder Alterungsschäden können durch das CO<sub>2</sub> Reinigungsverfahren nicht weiter verschlechtert werden. Diese Schäden können nur durch gezielte Instandsetzungsarbeiten (Neu- oder Teilwicklungsarbeiten) behoben werden.



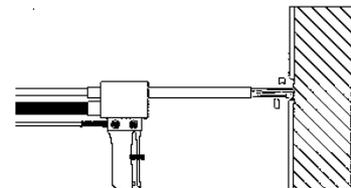
**Der Thermoschock**

Durch den plötzlichen, tiefen Temperaturschock auf der Oberfläche zieht sich die Schmutzschicht zusammen.



**Die Rissbildung**

Durch das Zusammenziehen der Verunreinigungen entstehen Risse und der Schmutz wird durch die Kälte spröde.



**Die Reinigung**

Die mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche auftretenden Trockeneispellets entfernen den gelösten Schmutz/Verunreinigungen.

## Was ist Trockeneis?

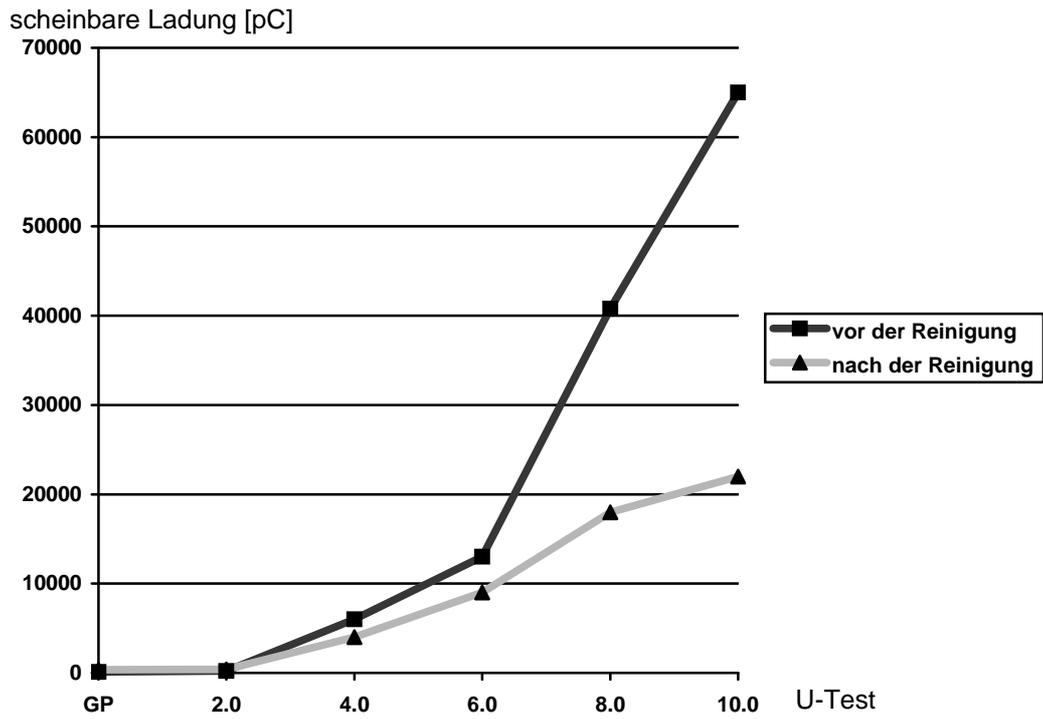
Trockeneis stellt man aus flüssiger Kohlensäure her. In einem Pelletizer wird die flüssige Kohlensäure unter atmosphärischem Druck entspannt. Bei diesem physikalischen Vorgang entsteht Trockeneisschnee. Dieser Schnee wird durch eine Extruderplatte in runde, harte Pellets (längliche Körner mit einem Durchmesser von 3 mm) gepresst.

Diese Pellets haben eine Temperatur von -79 °C.

## Vorteile der CO<sub>2</sub>-Reinigung durch gebrüder meier ag

- Oberfläche der zu reinigenden Objekte wird sehr sauber und bleibt trocken
- nachträgliche Behandlungen entfallen (ev. muss der Glimmschutz erneuert werden)
- keine Strahlmittelrückstände ( Entsorgung entfällt )
- keine organischen Rückstände in Spalten oder anderen unzugänglichen Orten
- Reinigung auch bei teildemontierten Maschinen möglich
- Verbesserung des Isolationswiderstandswertes und der Teilentladungswerte
- keine spezielle Herstellung des CO<sub>2</sub>. Da Abfallprodukt der chemischen Industrie ( z.B. Lonza )
- eigene Anlage inkl. Luftaufbereitung
- Druckregulierung ab Pistole ( beim Mitarbeiter am Objekt )
- ausgebildetes Personal ( Chefmonteur, Wicklungsspezialisten )
- Instandhaltungsfirma mit grosser Erfahrung und Know-how
- bereits mehrere Maschinen gereinigt

Durch Teilentladungsmessungen vor und nach der Reinigung wurden der Erfolg der Reinigung auch messbar dokumentiert (siehe Grafik). Sichtbar war der Reinigungserfolg auf jeden Fall. Die Kunden waren sehr beeindruckt.



Messbare Verbesserung an Maschine mit  $S_n = 7500 \text{ MVA}$ ,  $U_n = 8,6 \text{ kV}$ ,  $500 \text{ Umin}^{-1}$ ,  
gesamte Wicklung gegen Masse





## Teilnehmerverzeichnis

Amstutz Aschwanden	Armin Thomas	National Versicherung BKW FMB Energie AG	Basel Bern 25
Beer Bertoli Biesgen Blessing Bolliger Bräunlich Brantschen Brechna Brütsch	Andreas M. Wolfgang Gerhard Alain Reinhold Florian Habibo Rudolf	Patvag Kraftwerke AG Verzasca SA Kraftwerk Laufenburg AG Kraftwerk Laufenburg AG LEMKE DIAGNOSTICS AG Fachkommission für Hochspannungsfragen Grande-Dixence SA  Von Roll Isola	Ilanz Lugano Laufenburg Laufenburg Rheinfelden Zürich Sion Stäfa Breitenbach
Clausen Currit	Silvan Olivier	Gommerkraftwerke AG S.A. l'Energie de l'Ouest-Suisse	Ernen Sion
Egger	Brigitte	Fachkommission für Hochspannungsfragen	Zürich
Fasel Fessler Flück Fruth Fuhr	Nicolas Peter Heinz Bernhard Jitka	Schweizerische Bundesbahnen Elektrizitätswerk der Stadt Zürich Elektrizitätswerk der Stadt Bern PDTEch Power Engineering AG	Vernayaz Zürich Bern Stetten Spiez
Gaudenz	Jochen	Engadiner Kraftwerke AG	Zernez
Hobelsberger Hofstetter Holzer	Max Marold Beat	Alstom AG Officine Idroelettriche della Maggia SA Gommerkraftwerke AG	Baden Locarno Ernen
Isepponi	Bernhard	Alstom (Schweiz) AG	Baden
Jampen Joye	Ulrich Patrick	BKW FMB Energie AG BKW FMB Energie AG	Bern 25 Bern 25
Kessler Kleissler Krauss	Wolfgang Rolf Helmut	Micafil Isoliertechnik AG Gebr. Meier AG Eidgenössische Technische Hochschule Zürich	Zürich Regensdorf Zürich
Langer Losa	René Edy	Rätia Energie AG Officine Idroelettriche della Maggia SA	Küblis Locarno
Marculli Mark Minelli Müller Muheim	Ivan Bernhard Laurent Joachim Franz	Officine Idroelettriche della Maggia SA Alstom (Schweiz) AG Officine Idroelettriche della Maggia SA LEMKE DIAGNOSTICS AG Kraftwerk Wägital	Locarno Baden Locarno Wangen b. O. Siebnen
Neuhold	Stefan	ETH Zürich	Zürich
Oberguggenberger	Helmut	Österr. Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal Ges.m.b.H.	Wien



Petar Pfister Pronini	Fausto Stephan Roberto	ATEL Hydro Ticino SA Kraftwerk Birsfelden AG Azienda Elettrica Ticinese	Airolo Birsfelden Bellinzona
Reichert Richard Ritter Rossini	Konrad Yves Luigi Corrado	Kraftwerk Birsfelden AG Elektrizitätswerk der Stadt Zürich Azienda Elettrica Ticinese	Wettingen Birsfelden Zürich Bellinzona
Sarbach Schenk Seiler Sigg Steffen Stephan Storf Strehl Strittmatter Szpiro	Charly Alain Kurt Max Cäsar Carl-Ernst Günther Thomas Hubert Samuele	Kraftwerke Mattmark AG BKW FMB Energie AG Forces Motrices de Mauvoisin SA Schweizerische Bundesbahnen Gommerkraftwerke AG Alstom (Schweiz) AG Fachkommission für Hochspannungsfragen LEMKE DIAGNOSTICS GmbH Kraftwerk Laufenburg AG Officine Idroelettriche della Maggia SA	Stalden Bern 25 Sion Zollikofen Ernen Birr Zürich Volkersdorf Laufenburg Locarno
Walde Weber Weissenberg	Beat Stefan Werner	Elektrizitäts-Gesellschaft Laufenburg AG Nordostschweizerische Kraftwerke AG Brugg Kabel AG	Laufenburg Baden Brugg
Zimmermann Züger	Wolfgang O. Alois	Kraftwerk Laufenburg AG AG Kraftwerk Wägital	Laufenburg Siebnen

**Referentenadressen**

Amstutz	Armin	National Versicherung Steinengraben 41 4003 Basel	armin.amstutz@national.ch Tel: 061 275 24 06 Fax: 061 275 23 29
Bertheau	Tom	Alstom (Schweiz) AG, Insulation Competence Center (ICC), Abt. SGDH5 Zentralstrasse 40, 5242 Birr	tom.bertheau@power.alstom.com Tel: 056 56 466 67 09 Fax: 056 466 69 02
Bräunlich Dr.	Reinhold	Fachkommission für Hochspannungsfragen Voltastrasse 9 8044 Zürich	braeunlich@fkh.ch Tel: 01 253 62 62 Dir: 01 253 62 63 Fax: 01 253 62 60
Farr	Thomas	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	farr@eeh.ee.ethz.ch Tel: 01 632 27 77 Fax: 01 632 12 02
Fruth Dr.	Bernhard	PDTech Power Engineering AG Im Stetterfeld 1 5608 Stetten	info@pdtech.ch Tel: 056 496 62 80 Fax: 056 496 65 78
Hoof Dr.-Ing.	Martin	Alstom (Schweiz) AG, Insulation Competence Center (ICC), Abt. SGDH5 Zentralstrasse 40, 5242 Birr	martin.hoof@power.alstom.com Tel: 056 466 67 10 Fax: 056 466 69 02
Jampen	Ulrich	BKW FMB Energie AG Viktoriaplatz 2 3000 Bern 25	ulrich.jampen@bkw-fmb.ch Tel: 031 330 51 11 Dir: 031 33053 13 Fax: 031 330 58 58
Kleissler	Rolf	Gebr. Meier AG Althardstr. 190 8105 Regensdorf	gebrueder-meier@swissonline.ch Tel: 01870 93 93 Fax: 01 870 93 94
Reichert Prof. Dr.	Konrad	Schartenfelsstrasse 1b 5430 Wettingen	reichert@ee.ethz.ch Tel: 056 426 39 66
Stephan Dr.- Ing.	Carl-Ernst	Alstom (Schweiz) AG, Insulation Competence Center (ICC), Abt. SGDH5 Zentralstrasse 40, 5242 Birr	carl-ernst.stephan@power.alstom.com Tel: 056 466 61 35 Fax: 056 466 69 02
Vogelsang	Ruben	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich Physikstrasse 3 8092 Zürich	vogelsang@eeh.ee.ethz.ch Tel: 01 632 27 77 Dir: 01 632 09 21 Fax: 01 632 12 02