

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 81 (1990)

**Heft:** 19

**Artikel:** Vollautomatisierte Prüfeinrichtung zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von elektrischen Isolierungen

**Autor:** Hutter, Wilfried / Ruhe, Jörg / Schuler, Roland

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-903166>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Vollautomatisierte Prüfeinrichtung zur Ermittlung des Langzeitverhaltens von elektrischen Isolierungen

Wilfried Hutter, Jörg Ruhe und Roland Schuler

**Der Beurteilung der Qualität einer elektrischen Feststoffisolation und vor allem des Langzeitverhaltens kommt bei rotierenden elektrischen Maschinen eine grosse Bedeutung zu. Diese bestimmt massgeblich die Zuverlässigkeit und Lebensdauer einer Maschine. Aus diesem Grunde beschäftigen sich auch verschiedene IEC-Komitees mit diesem Thema. Im vorliegenden Beitrag wird eine vollautomatische Prüfeinrichtung beschrieben, die es erlaubt, solche Untersuchungen mittels EDV-Unterstützung effizient und zuverlässig durchzuführen.**

**Pour les machines électriques tournantes, l'appréciation de la qualité d'une isolation électrique en matière solide, surtout de son comportement à long terme, revêt une grande importance. Elle est déterminante pour la fiabilité et la longévité d'une machine. C'est pourquoi différents comités de la CEI planchent aussi sur ce sujet. L'article décrit un dispositif d'essai entièrement automatique qui permet de réaliser de tels tests de manière plus efficace et plus sûre grâce à un assistance informatisée.**

Die Betriebssicherheit und das Langzeitverhalten einer rotierenden Hochspannungsmaschine hängt massgeblich vom Zustand der Statorwicklung ab und wird damit in erster Linie von der Qualität des verwendeten Isoliersystems bestimmt. Diese wiederum ist, wie bei allen Materialien, im Laufe der Betriebszeit durch die gegebenen Betriebsbeanspruchungen einer starken Veränderung (Alterung) unterworfen [1].

Wegen dieser für die Lebensdauer entscheidenden Vorgänge stehen bei der Entwicklung von Isolierungen oder bei Systemänderungen primär die Langzeiteigenschaften im Vordergrund [2]. Um diese genau ermitteln zu können, werden bei ABB in grösserem Umfang Langzeituntersuchungen an Isoliermaterialien und Isolationsystemen im Labor durchgeführt. Dabei interessiert hauptsächlich die Lebenserwartung in Abhängigkeit von den Alterungsparametern Temperatur  $T$  und elektrische Spannung  $U$ . Um eine statistisch gesicherte Aussage zu erhalten, wird dabei eine grössere Anzahl Prüflinge bei genau definierten Alterungsbedingungen über eine lange Zeit bis zu ihrem Versagen beansprucht. In vorgegebenen Abständen werden zur Beurteilung der Eigenschaftsänderungen verschiedene Diagnosemessungen durchgeführt.

Die langjährigen Erfahrungen haben gezeigt, dass reproduzierbare, aussagekräftige Resultate nur erzielt werden können, wenn alle wesentlichen Parameter genau erfasst und in möglichst engen Grenzen gehalten werden. Dies führte dazu, dass die bisher bei ABB im Labor verwendeten Versuchseinrichtungen komplett überholt und automatisiert wurden. Erst dadurch wurde es möglich, die aufwendigen Dauerversuche mit minimalen Personalkosten computerkontrolliert ablaufen zu lassen und die Aussagefähigkeit

der Versuchsergebnisse wesentlich zu verbessern.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben die notwendigen Anlagen und vor allem die neue automatische Steuer- und Überwachungsanlage, die es prinzipiell ermöglicht, alle Arten von thermisch/elektrischen Alterungsprüfungen an Isolierwerkstoffen oder Modellen effizient und mit hoher Genauigkeit durchzuführen.

## Thermisch/elektrische Langzeitprüfungen

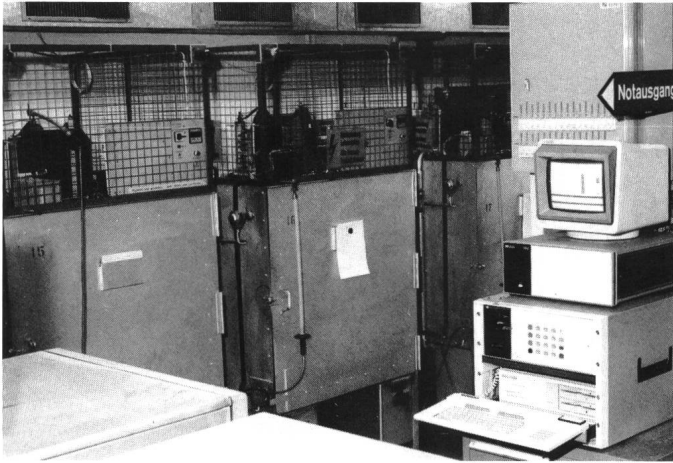
Die thermisch/elektrischen Langzeitprüfungen werden zweckmässigerweise in Umluftöfen durchgeführt, die mit einer speziellen Hochspannungsdurchführung versehen sind (Bild 1). Die Versuche werden bei verschiedenen Temperaturen und elektrischen Spannungen gleichzeitig betrieben, um die Versuchszeiten möglichst kurz zu halten. Wichtig ist dabei, dass die von IEC (Publikation 216 [3] und 727 [4]) geforderten Bedingungen, nämlich Spannung innerhalb des Bereichs der Sollspannung  $\pm 2\%$  und Temperatur innerhalb des Bereichs der Solltemperatur  $\pm 2$  Kelvin (bis  $180^\circ\text{C}$ , darüber  $\pm 3$  Kelvin), während der gesamten Versuchsdauer sicher eingehalten werden können. Ferner muss für jeden Prüfling genau bekannt sein, wie lange er welcher absoluten Temperatur und Spannung ausgesetzt war.

Um diese Forderungen sicher zu erfüllen, ist es unumgänglich, jedem Ofen eine eigene Spannungsregulierung einzubauen. Nur dadurch ist es möglich, die Netzspannung, die in Industrienetzen je nach Tageszeit um bis zu  $\pm 5\%$  schwankt, in den gegebenen Grenzen zu halten.

Die Solltemperatur innerhalb des Ofens auf  $\pm 2$  Kelvin konstant zu halten ist relativ leicht möglich. Zieht man jedoch in Betracht, dass sich die

### Adresse der Autoren

Wilfried Hutter, Jörg Ruhe und Roland Schuler,  
ABB Drives AG, Abteilung UME, 5242 Birr



**Bild 1**  
Umluftöfen mit  
Hochspannungsein-  
richtung für 0...20 kV

zur Verfügung, die unabhängig voneinander für verschiedenste Langzeituntersuchungen eingesetzt werden. Die Regelung, Überwachung und Steuerung erfolgt seit 1989 mittels einem eigens dafür entwickelten EDV-Leitsystem, das nachfolgend beschrieben wird.

## Prinzipieller Aufbau der automatischen Alterungsüberwachung

Ein zentraler Prozessrechner regelt und dokumentiert die Parameter aller Alterungsversuche und stellt die anfallenden Daten über ein Rechnernetzwerk den zuständigen Versuchsleitern zur Verfügung. Diese können von verschiedenen Stellen ausserhalb der Alterungslabors jederzeit abgerufen werden. Zusätzlich werden die Daten in einer Datenbank gesammelt und für spätere Auswertungen gesichert. Bild 2 zeigt das Prinzipschaltbild vom Netzaufbau, Bild 3 eine Teilansicht des Alterungslabors mit Datenerfassungssystem und Prozessrechner sowie Bild 4 einen mit Normprüflingen bestückten Ofen.

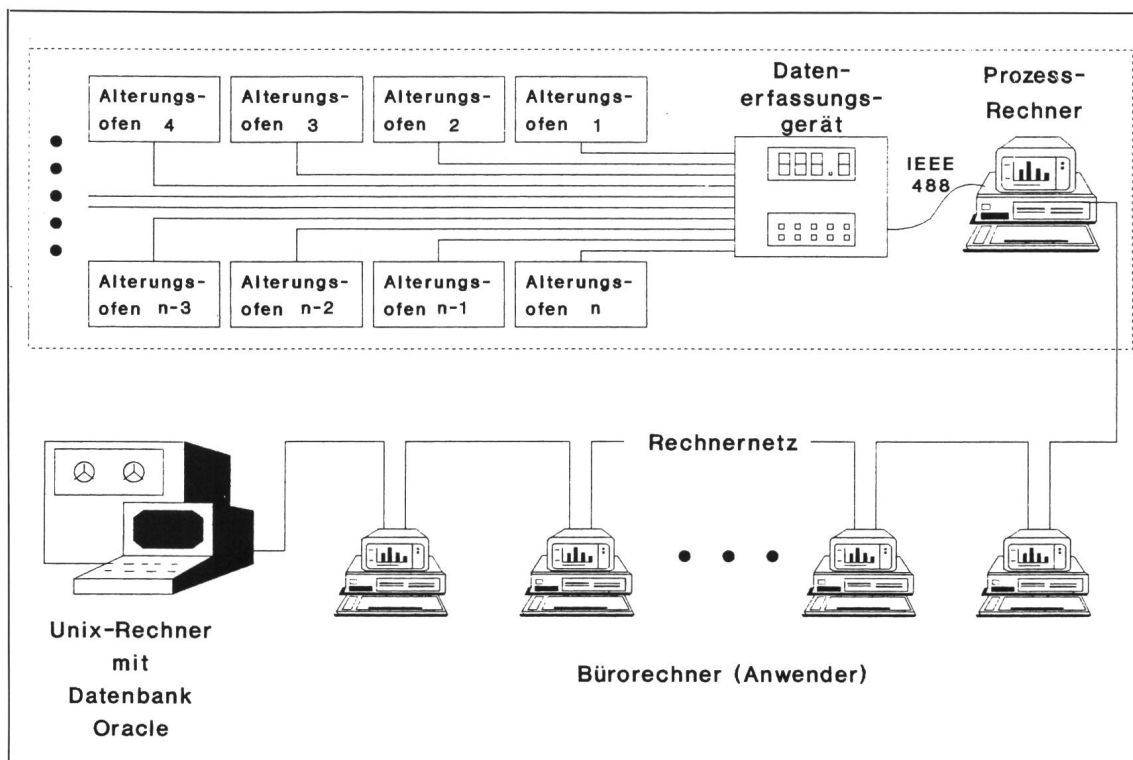
### Regelung der Alterungsparameter

- *Spannung*: Für thermisch-elektrische Alterungen ist jeder Ofen mit einer eigenen Hochspannungsversorgung bis 20 kV ausgerüstet. Der Pro-

Prüflinge bei kombinierter Beanspruchung über die im Ofen herrschende Lufttemperatur hinaus erwärmen können, ergeben sich erhebliche Probleme bei der Temperaturregulierung. Diese zusätzliche Erwärmung wird durch dielektrische Verluste in der zu prüfenden Isolierung hervorgerufen und ist stark von der Alterungsdauer und der Prüflingsqualität abhängig. Bei einer Prüflingsserie weist daher jeder Prüfling während der Versuche eine unterschiedliche Temperatur auf. Diese kann dabei um bis zu 20 Kelvin differieren. Konsequenterweise müsste daher eigentlich jeder Prüfling einzeln in einem separaten Ofen mit geregelter

Hochspannungsversorgung und mit auf Basis der Prüflingstemperatur geregelter Temperatur gealtert werden. Eine solche Lösung ist jedoch aus wirtschaftlichen Gründen nicht machbar. Stattdessen wird nun im hier beschriebenen neuen Verfahren für jede Probe ein sog. Belastungsdiagramm erstellt und bei der Auswertung berücksichtigt (siehe weiter unten).

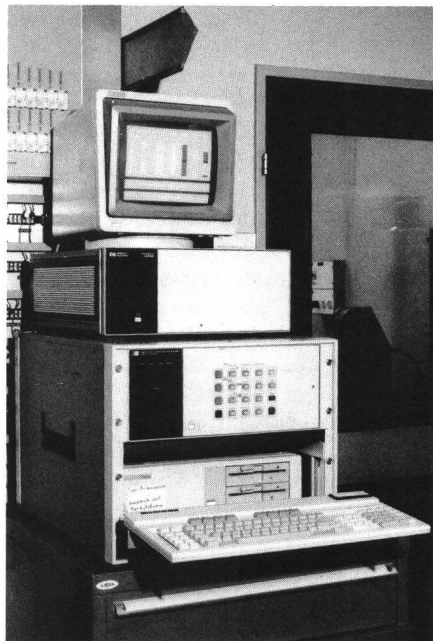
Die bei ABB verwendeten Alterungsöfen sind in der Regel so ausgerüstet, dass gleichzeitig 20 Prüflinge bei nur thermischer, 4 Prüflinge bei kombinierter elektrischer und thermischer Beanspruchung geprüft werden können. Gesamthaft stehen 30 Öfen



**Bild 2**  
Prinzipschaltbild der  
EDV-Anlage für das  
Alterungslabor

zessrechner misst die Spannung über einen ohmschen Spannungsteiler und reguliert diese mit Hilfe eines Regeltransformators. Die Spannung wird zudem mittels kV-Meter an jedem Ofen direkt angezeigt. Der relative Fehler der Spannungsmessung ist klei-

ner als 1%, bei Spannungen über 5 kV kleiner als 0,5%.  
 - **Temperatur:** Jeder Ofen ist mit mehreren Thermoelementen (Kupfer-Konstantan) ausgerüstet, die jeweils mit einem Messkanal des Datenerfassungsgerätes verbunden sind. Der Prozessrechner konvertiert die gemessenen Spannungen der Thermoelemente in die entsprechenden Temperaturen und regelt die Heizung des betreffenden Ofens. Dabei wird streng zwischen Luft- und Prüflingstemperaturen unterschieden. Die maximale Abweichung eines Temperaturmesswertes vom wahren Wert beträgt 0,5 Kelvin.



**Bild 3** Prozessrechner und Datenerfassungsgerät mit 148 Mess- und Schaltkanälen

## Software

### Allgemeines

Der Prozessrechner hat im wesentlichen folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Verwaltung aller Alterungsdaten
- Regelung der Alterungsparameter; dazu gehören das Zuschalten der Hochspannung, sobald die Mindesttemperatur überschritten wird, und das Einhalten der Vorgabewerte für Temperatur und Hochspannung
- Zeitrechnung für jeden einzelnen Prüfling; die Aktualisierung der Laufzeiten erfolgt nur dann, wenn die Alterungsparameter innerhalb der frei wählbaren Toleranzen liegen
- Dokumentation der Regeltemperaturen

### Programm des Prozessrechners

Das Programm kann 30 Öfen (thermisch oder thermisch-elektrisch) verwalten. Die Kenndaten für jeden einzelnen Ofen (Schalt- und Messkanäle usw.) sind nicht fest im Programm integriert; sie können aber alle jederzeit von einem Bürorechner aus installiert werden. Damit wird sichergestellt, dass Öfen in das System aufgenommen oder aus dem System entfernt werden können, ohne den Prozessrechner in seinen Regelungsaufgaben zu unterbrechen.

In jedem Ofen kann ein individuell wählbares *Alterungsprogramm* durchgeführt werden. Der Prozessrechner überwacht diese Alterung von ihrem ersten Start bis zum Abbruch des Versuches. In jedem Ofen kann er bis zu 20 *Prüflinge* unabhängig voneinander verwalten. Für jeden wird dabei eine eigene Zeitrechnung geführt.

Für einen Versuchsablauf lassen sich jeweils 4 Arten von *Standarddiagnosemessungen* vorgeben (Verlustfaktor-, Teilentladungsmessung usw.), die an jedem Prüfling durchzuführen sind. Maximal können dabei 10 *Messtermi-*



**Bild 4** Alterungsöfen, mit 20 Normprüflingen bestückt

Die Hochspannungsdurchführung ist oben im Bild erkennbar. Die Form der Prüflinge ist je nach Anwendung verschieden.

- Erstellung thermischer Belastungshistogramme (Bild 5)
- Ausdruck einer Ofenkarte beim Start einer Alterung
- Versuchsunterbrechung bei anfallenden Messungen mit Ausdruck eines Arbeitsauftrages für die durchzuführenden Messungen und Abspeichern aller Alterungsdaten bis zum jeweiligen Messdatum
- Wöchentlicher Ausdruck anfallender Arbeiten zu Planungszwecken während der folgenden 14 Tage.

ne vorprogrammiert werden. Eine komplette Aufstellung der Daten, die zum jeweiligen Messtermin gerade aktuell waren, wird stets abgespeichert.

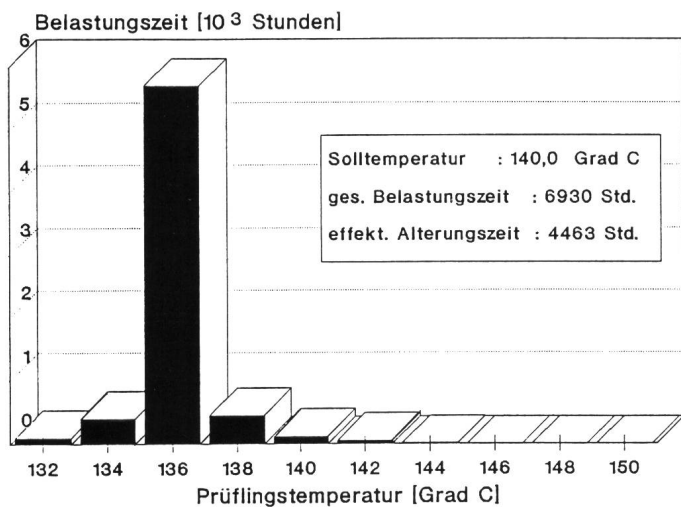
### Service-Programm der Bürorechner

Mit Hilfe des Service-Programms der Bürorechner können einerseits Alterungsdaten ausserhalb des Labors abgerufen und ausgewertet werden. Andererseits lassen sich damit die Vorgänge im Labor steuern, Öfen ein- und ausschalten, Alterungsanordnungen

### Sicherheit bei Fehlfunktionen

Eine Reihe von Sicherheitsmassnahmen (z.B. Schutzelemente gegen Überspannungen) sorgt beim Auftreten eventueller Fehler (z.B. Isolationsdurchschlag eines Prüflings) für die Datensicherheit. Hochspannungsseitige Kurzschlüsse, Defekte von Mess- oder Schaltkanälen, Ausfall des Rech-

Therm. Belastungshistogramm Prüfling A



**Bild 5**  
Typische thermische Belastungshistogramme für zwei Normprüflinge

Prüflinge wurden im selben Ofen gealtert. Solltemperatur (Zentralwert der Prüflingstemperaturen): 140 °C. Temperaturunterschiede ergaben sich durch unterschiedliche Verluste im Dielektrikum. Trotz gleicher tatsächlicher Belastungszeit ergeben sich bei der mathematischen Korrektur unterschiedliche «effektive Alterungszeiten» im Verhältnis 1:2, bezogen auf Solltemperatur.

keit der Reaktionszeit von der Temperatur beschreibt.

$$\ln(t) = a + b(1/T)$$

$t$  Reaktionszeit, d.h. die Zeit bis zum Eintreten eines bestimmten Endkriteriums

$a, b$  Stoffkonstanten

$T$  absolute Temperatur in Kelvin.

Sofern die für das zu untersuchende Material gültigen Stoffkonstanten nicht bekannt sind, können sie aus Versuchen mit unterschiedlichen Alterungstemperaturen bestimmt werden.

Der grosse Einfluss von Temperaturabweichungen auf die Alterung ist allgemein bekannt: Eine Erhöhung der Temperatur um 10 Kelvin kann eine Verdoppelung des Lebensdauerverbrauchs zur Folge haben. Zieht man weiter in Betracht, dass ein Prüfling durch seine eigenen dielektrischen Verluste durchgehend um 10 Kelvin über dem Zentralwert aller Prüflingstemperaturen liegen kann, so wird deutlich, wie wichtig eine Korrektur der Alterungsdauer bei Versuchszeiten von mehreren tausend Stunden ist.

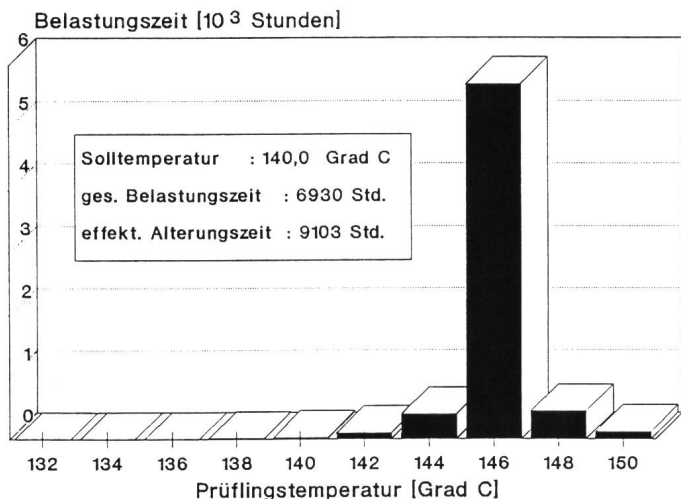
## Beispiel: Bestimmung einer Lebensdauerkurve

Bild 6 zeigt einen Vergleich der erzielten Resultate am Beispiel der Lebensdauerbestimmung (Bestimmung der Zeit bis zum Versagen der Isolierung) an einer Statorwicklungsisolierung bei zwei verschiedenen Temperaturen, durchgeführt nach bisheriger konventioneller und nach der im Bericht beschriebenen neuen Art.

Bei der konventionellen Versuchsführung und -auswertung (Bild 6, oben) ging man davon aus, dass alle Prüflinge während ihrer Lebensdauer der Solltemperatur von 140 °C oder 160 °C ausgesetzt waren. Wie vorgängig erläutert, traf dies in Wirklichkeit nicht zu, und daraus resultiert der grosse Streubereich der Versuchsergebnisse.

Bei der Auswertung gemäss Bild 6, unten, wurde für jeden Prüfling mit Hilfe des thermischen Belastungshistogramms (vgl. Bild 5) die effektive Alterungszeit, bezogen auf die Solltemperatur von 140 °C oder 160 °C, genau bestimmt. Dies führte zu einer erheblich kleineren Streuung, Regressionen werden genauer und Vergleiche zwischen unterschiedlichen Isolierungen werden statistisch erheblich aussagekräftiger. Voraussetzung hierfür ist jedoch die permanente Aufzeichnung

Therm. Belastungshistogramm Prüfling B



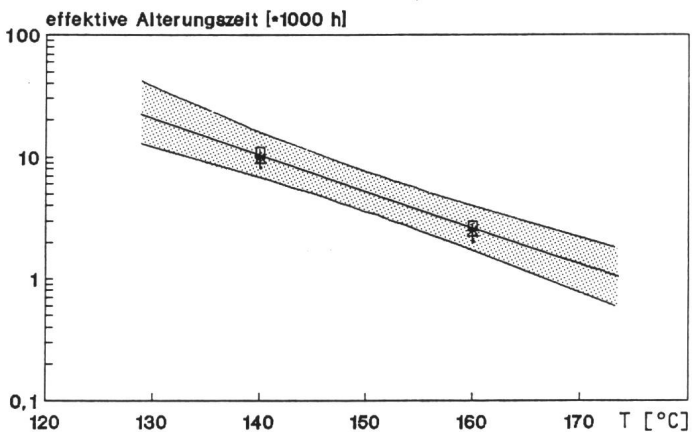
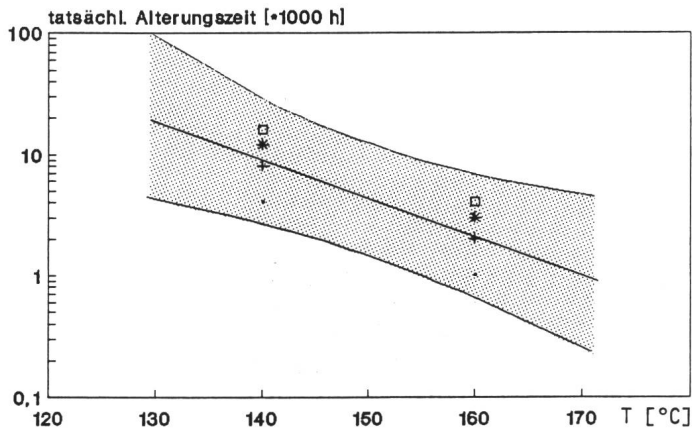
verändern und Messstermine einfügen oder stornieren.

### Auswertung der Daten aus einem Alterungsversuch

Durch die Automatisierung des Labors steht am Ende einer Alterungsuntersuchung eine lückenlose Aufzeichnung aller Daten für jeden einzelnen Prüfling zur Verfügung. Der gesamte Verlauf der Alterungsparameter wird mit Mittelwerten, Standardabweichungen und Minimum- und Maximum-Werten dokumentiert. Wurde ein Prüfling aus einem Ofen entnommen (z.B. aufgrund eines Defektes der Isolierung), so bleiben seine Daten erhalten und werden bis zur Weiterführung des Versuchs (nach Reparatur) nicht mehr verändert. Die intakten Prüflinge können damit ohne grosse Unterbrechung problemlos weiterbeansprucht werden. Ausserdem wird

eine chronologische Auflistung von besonderen Vorkommnissen im Verlauf einer Alterung erstellt und in der Regel für jeden Prüfling ein thermisches Belastungshistogramm angefertigt (Bild 5).

Dem thermischen Belastungshistogramm kommt grosse Bedeutung zu. Der Prozessrechner regelt den Zentralwert aller Prüflingstemperaturen, die aus erwähnten Gründen unterschiedliche Werte aufweisen können, auf die Solltemperatur. Mit Hilfe des thermischen Belastungshistogramms kann die tatsächliche Belastungszeit des Prüflings in eine äquivalente Alterungszeit bei Solltemperatur umgerechnet werden, die nachfolgend «effektive Alterungszeit» genannt wird. Die mathematische Korrektur der Alterungsdauer wird mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung durchgeführt, die in abgewandelter Form die Abhängig-



**Bild 6**  
Experimentell  
bestimmte  
Lebensdauerkurven  
einer Stator-  
Wicklungsisolierung

oben: konventionelle Versuchsdurchführung  
unten: neue automatisierte Versuchsdurchführung mit mathematischer Korrektur der Alterungsdauer nach Arrhenius

T Temperatur

Die Messpunkte entsprechen dem Ende der Lebensdauer (elektrischer Durchschlag) für einzelne Proben, welche unter einer Feldstärke von 5 kV/mm bei einer Solltemperatur von 140 °C oder 160 °C gealtert wurden.

schraffiert: 99%-Vertrauensbereich

und Abspeicherung jeder einzelnen Prüflingstemperatur während der gesamten Alterungsdauer. Für die Berechnung der effektiven Alterungszeit nach 10 000 Stunden tatsächlicher Alterung wurden rund 5 Millionen Temperaturmesswerte pro Prüfling verarbeitet.

### Schlussfolgerungen

Das heute zur Verfügung stehende voll automatisierte Alterungslabor bietet bei der Durchführung von Langzeituntersuchungen und Lebensdauerbestimmungen gegenüber konventionellen Methoden folgende Vorteile:

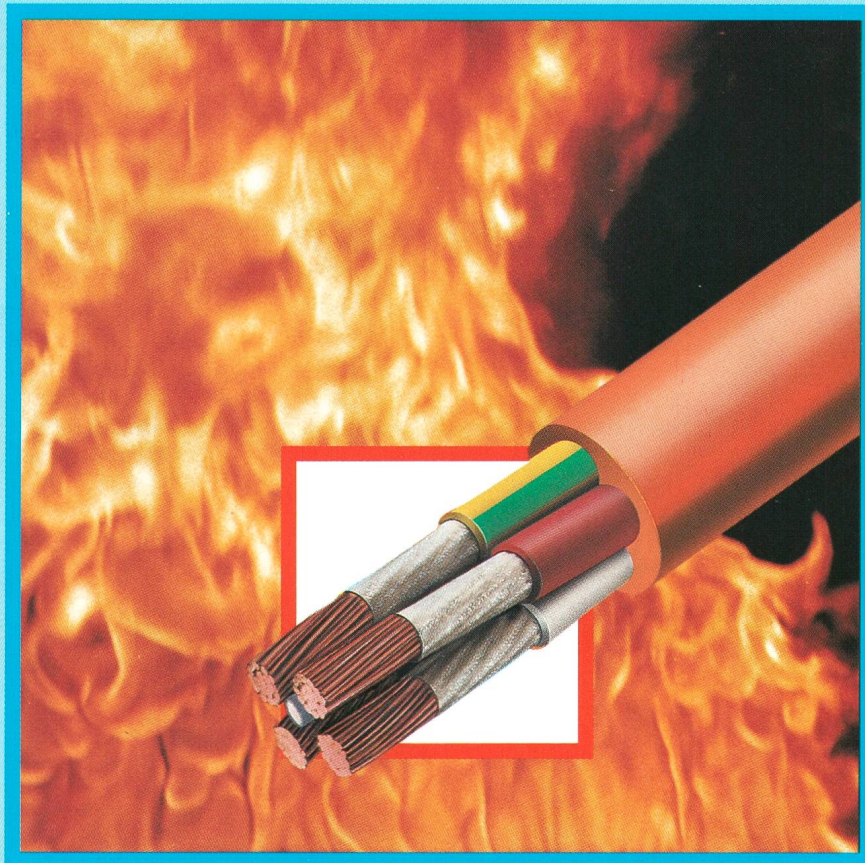
- präzise Daten über die gesamte Alterungsdauer für jeden einzelnen Prüfling wie auch die gesamte Prüferserie werden gespeichert; der genaue Verlauf der Untersuchungen ist jederzeit nachvollziehbar
- minimaler Aufwand bei der Auswertung einer grossen Zahl von Messdaten
- minimaler Betreuungsaufwand während der Dauerversuche
- geringe Streuungen der Alterungsergebnisse.

Die Folge ist, dass die Anzahl der Prüflinge reduziert werden kann und dass exaktere Grundlagendaten, die eine genauere Beurteilung der Alterungsmechanismen erlauben, zur Verfügung stehen.

Basierend darauf dürfte es zukünftig besser möglich sein, aus solchen Langzeituntersuchungen und den Resultaten von Diagnoseuntersuchungen [5] Restlebensdauerabschätzungen von im Betrieb stehenden Motor- und Generatorwicklungen zu machen.

### Literatur

- [1] G.Z. Lipták: Long-term performance of micaeous insulation. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, June 3...6, 1990, Toronto.
- [2] G. Lipták, R. Schuler und B. Wirsching: Dauerverhalten der Windungsisolierung von Hochspannungsmaschinen mit Ganzformspulen unter Berücksichtigung transients Spannungsbeanspruchungen. ETG-Fachberichte 16(1985), S. 58...62.
- [3] Guide pour la détermination des propriétés d'endurance thermique de matériaux isolants électriques. Publications de la CEI 216, parties 1, 2, 3, 4-1, 1980-1990.
- [4] Evaluation de l'endurance électrique des systèmes d'isolation électrique. Première partie: Considérations générales et procédures d'évaluation basées sur une distribution normale. Publication de la CEI 727-1, 1982.
- [5] R. Schuler und W. Hutter: Erfassung und Bewertung von Teilentladungen an Statorwicklungen von rotierenden Hochspannungsmaschinen. Bull. SEV/VSE 81(1990)3, S. 31...35.



**Im Brandfall während 3 Stunden  
voll funktionsfähig:  
RADOX TYP FR FEUERBESTÄNDIGE KABEL**

Feueralarmsysteme, Notbeleuchtungen, Ventilatoren, Aufzüge und Kommunikationssysteme haben besonders im Katastrophenfall lebenswichtige Funktionen zu erfüllen. Feuerbeständige RADOX-Kabel Typ FR, mit einer kombinierten Flammschicht, sind halogenfrei und funktionieren auch im Brandfall noch während vollen 3 Stunden absolut zuverlässig.

Verlangen Sie unsere Dokumentation über RADOX-Sicherheitskabel.



**HUBER+SUHNER AG**

**Geschäftsbereich Kabel**

CH-8330 Pfäffikon/ZH

☎ 01 952 22 11

CH-9100 Herisau

☎ 071 53 41 11

# **ERICO**<sup>®</sup>

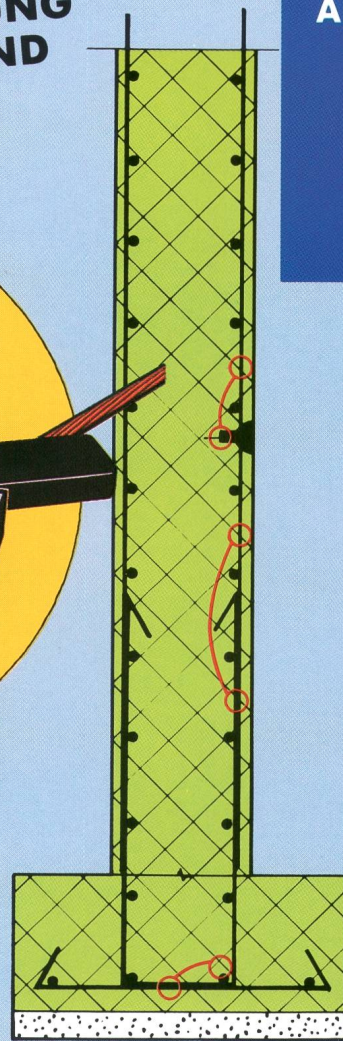
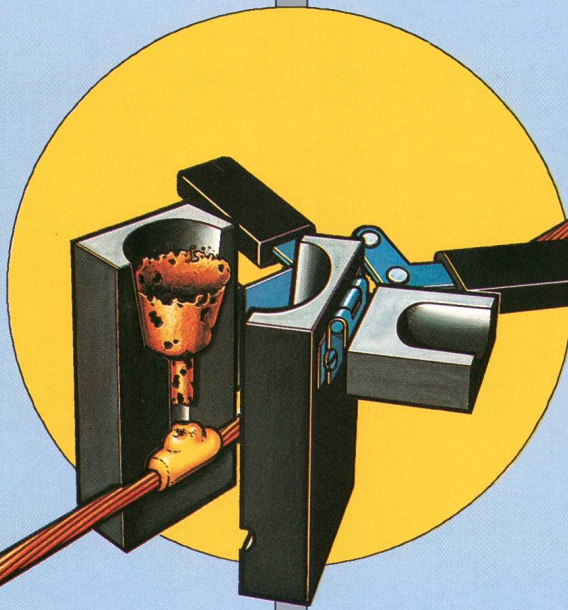
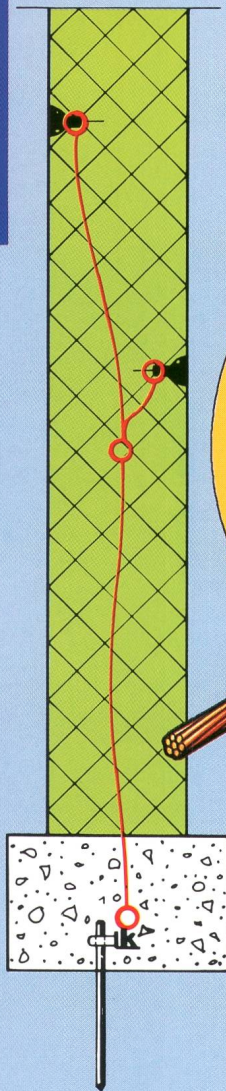
# **CADWELD**<sup>®</sup>

## **ERDUNGSKIT**

**BÄNDER  
ALS ERDER  
IM  
FUNDA-  
MENT.**

**INKL. NORMENBLÄT-  
TERN UND AUS-  
SCHREIBUNGSTEXTEN  
ZUR VEREINFACHUNG  
VON PLANUNG UND  
INSTALLATION.**

**FUNDA-  
MENT-  
ARMIERUNG  
ALS ERDER.**



- **MOLEKULARE VERBINDUNG + GLEICHBLEIBENDER WIDERSTAND**
- **KEINE OXYDATION IN DER VERBINDUNG MÖGLICH**
- **HÖHERE KURZSCHLUSSFESTIGKEIT ALS DIEJENIGE DES LEITERS**

- **ÄUSSERST GERINGER ARBEITSAUFWAND**
- **EINFACHSTE HANDHABUNG**
- **OHNE EINSCHRÄNKUNG ALTERUNGSBESTÄNDIG**

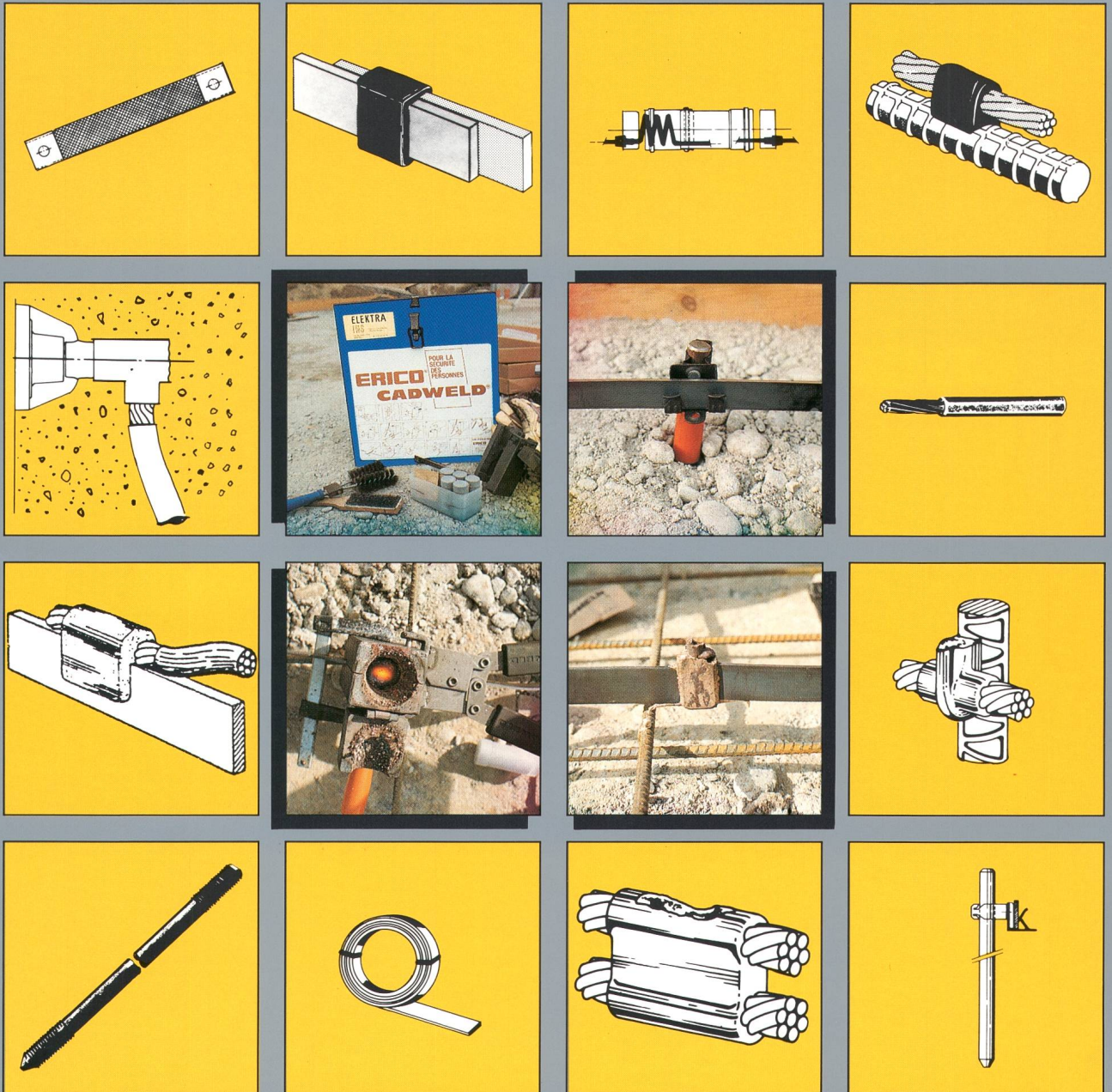




# ERICO<sup>®</sup>

# CADWELD<sup>®</sup>

## ERDUNGSKIT



# ERICO<sup>®</sup>

Erico Products AG, Pra Pury, 3280 Murten  
 Telefon 037/71 27 21, Fax 037/71 10 72

Bestellbon für

- Leitfaden
- Normenblätter + Ausschreibungstexte

Name: \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

Abteilung: \_\_\_\_\_

PLZ: \_\_\_\_\_ Ort: \_\_\_\_\_

Telefon: \_\_\_\_\_