Alterungsverhalten und Versagensgründe von Isolierstoffen und Isoliersystemen

Ernst Gockenbach

Leibniz Universität Hannover

Gliederung

- Einleitung
- Alterungsverhalten von Transformator-isoliersystemen
- Alterungsverhalten von Maschinen-isoliersystemen
- Zusammenfassung

Gliederung

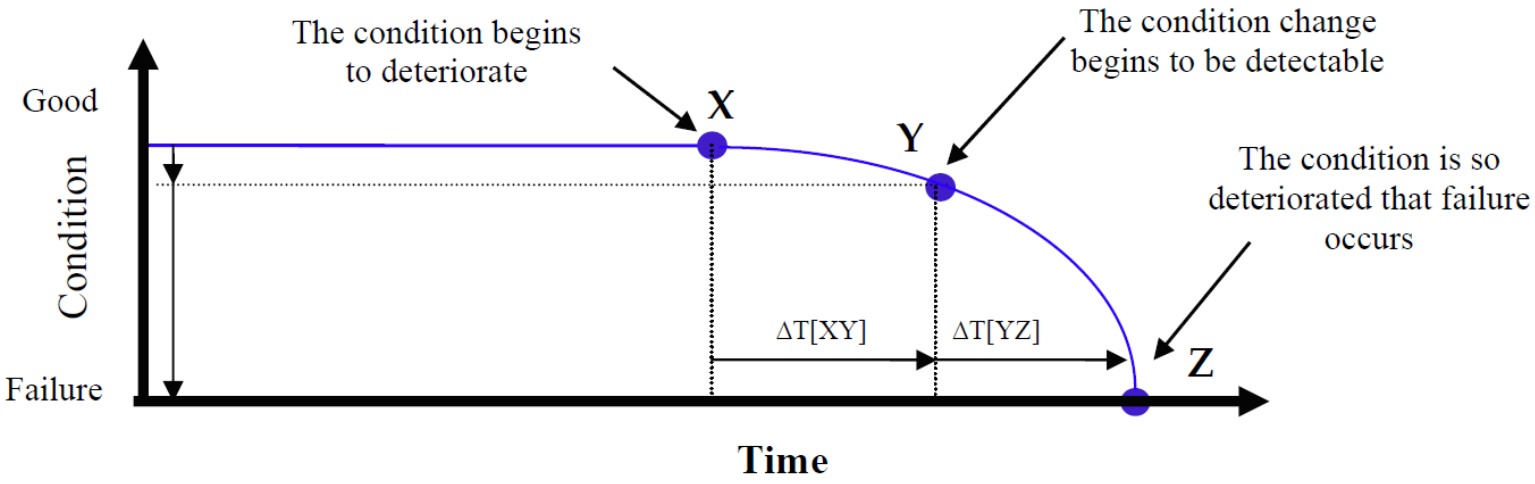
- **Einleitung**
- Alterungsverhalten von Transformator-isoliersystemen
- Alterungsverhalten von Maschinen-isoliersystemen
- Zusammenfassung

Einleitung

Alterung bedeutet allgemein

Änderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Stoffes nach längerem Gebrauch

Zeitlicher Verlauf der Alterung



CIGRE Broschüre
Guide for Transformer Maintenance
No. 445, 2011

Einleitung

Versagen wird allgemein in Verbindung mit Zuverlässigkeit verwendet und diese wird nach IEC 60050 (Intern. Electrotechnical Vocabulary) definiert als dependability

"the collective term used to describe the availability performance and its influencing factors : reliability performance, maintainability performance and maintenance support performance"

Einflussgrößen auf die Alterung der Isolierung

- Temperatur
- Elektrische Feldstärke
- Mechanische Beanspruchung
- Chemische Reaktionen
- Umweltbedingungen

Einleitung

Versagen im Hinblick auf Isolierung oder Isoliersysteme bedeutet

- **Verlust der Isoliereigenschaften durch Durchschlag, leitfähige Kanäle (Treeing), Teilentladungen**
- **Änderung der dielektrischen Eigenschaften wie Verlustfaktor tan δ, Permittivität ε, Resistivität ρ**

Im Weiteren werden keine mechanischen Auswirkungen wie z.B. defekter Nutkeil betrachtet

Einleitung

Versagensgründe

- lange Betriebszeit
- hohe Temperatur durch Überbeanspruchung, mangelhafte Kühlung, Sonneneinstrahlung, benachbarte Wärmequellen
- Durchschlag infolge hoher elektrischer Feldstärke oder Abnahme der elektrischen Festigkeit
- Abnahme mechanischer Eigenschaften
- chemische Reaktionen

Einleitung

Versagensgründe

- Zeit
- thermisch - Temperatur
- elektrisch - Feldstärke
- mechanisch - Kräfte
- chemisch – Oxidation

Für jedes Isoliersystem ist die Prioritätenliste der Versagensgründe unterschiedlich

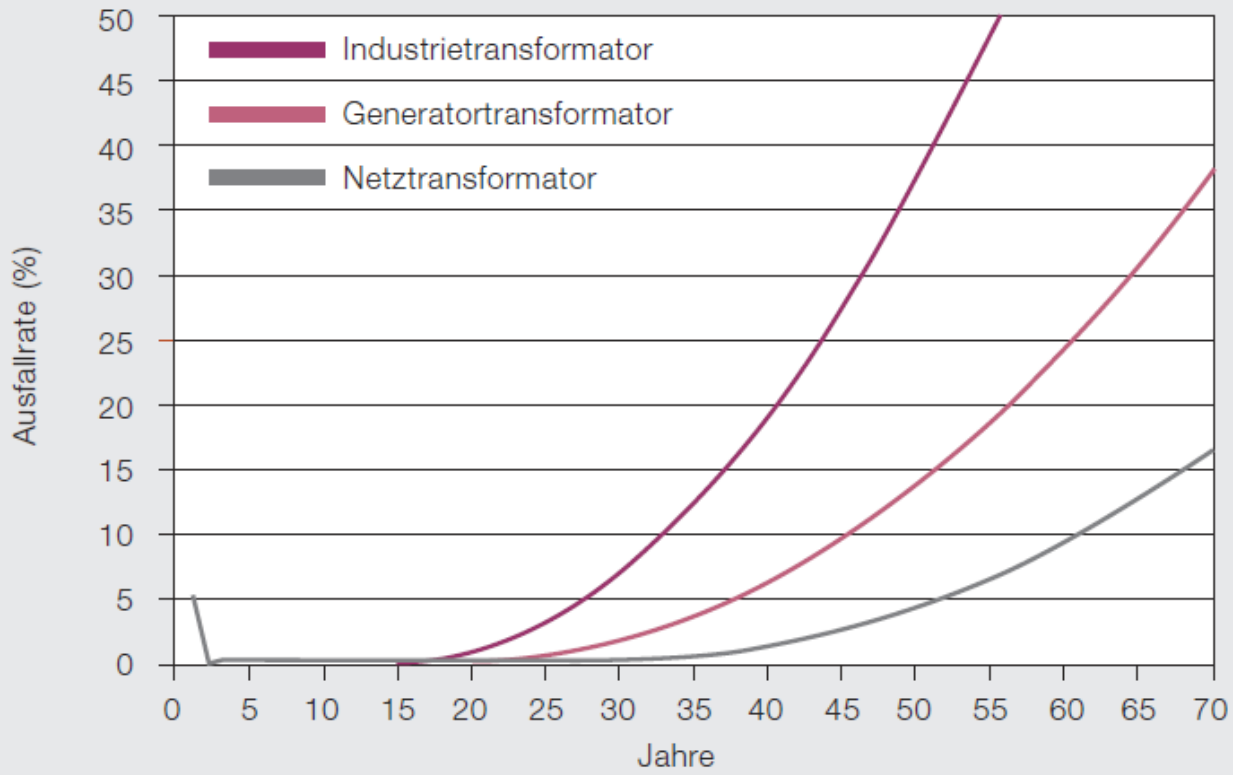
Gliederung

- Einleitung
- **Alterungsverhalten von Transformator-isoliersystemen**
- Alterungsverhalten von Maschinen-isoliersystemen
- Zusammenfassung

Transformatorisoliersystem

- Isoliersystem - feste und flüssige Komponenten
- unterschiedliche Wirkungen der verschiedenen Einflussgrößen
- unterschiedliche Auswirkungen der Alterung

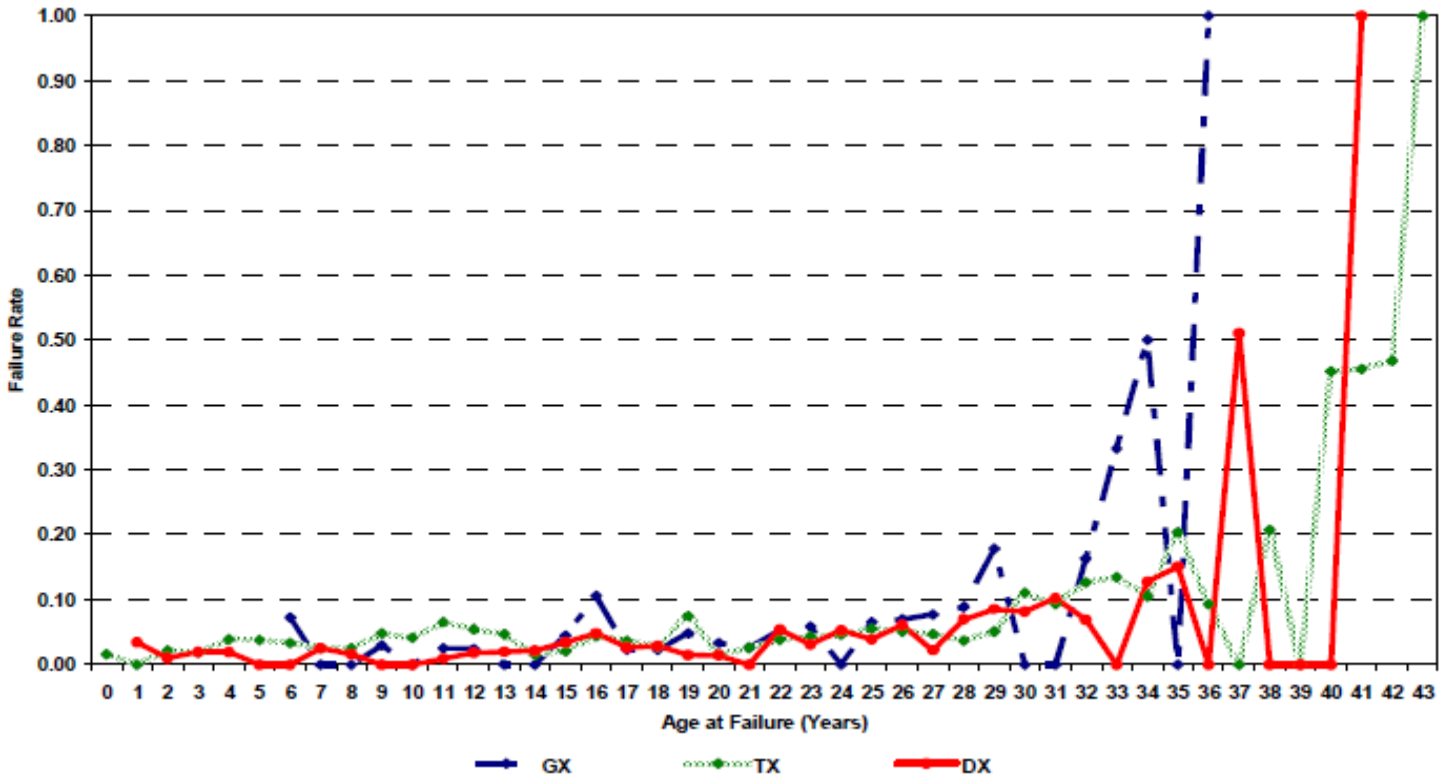
Ausfallrate Transformatoren



Quelle: CIGRE WG 12-05 (1983): „An international survey on failures in large power transformers“. ELECTRA 88: 21–48

CIGRE Broschüre
An international survey on failures in large power transformers
ELECTRA 88-1, 1983, pp. 21 -48

Ausfallrate Transformatoren



Gx Generatortransformator **Tx Netztransformator** **Dx Verteiltransformator**

Alterungsparameter

Die Alterung von Transformatoren kann durch folgende Beanspruchungen verursacht werden:

- **elektrische**
- **elektromagnetische**
- **dielektrische**
- **thermische**
- **mechanische**
- **chemische**

Dominierende Alterungsparameter

Dominierende Beanspruchungen für die Alterungsparameter von Transformatoren sind:

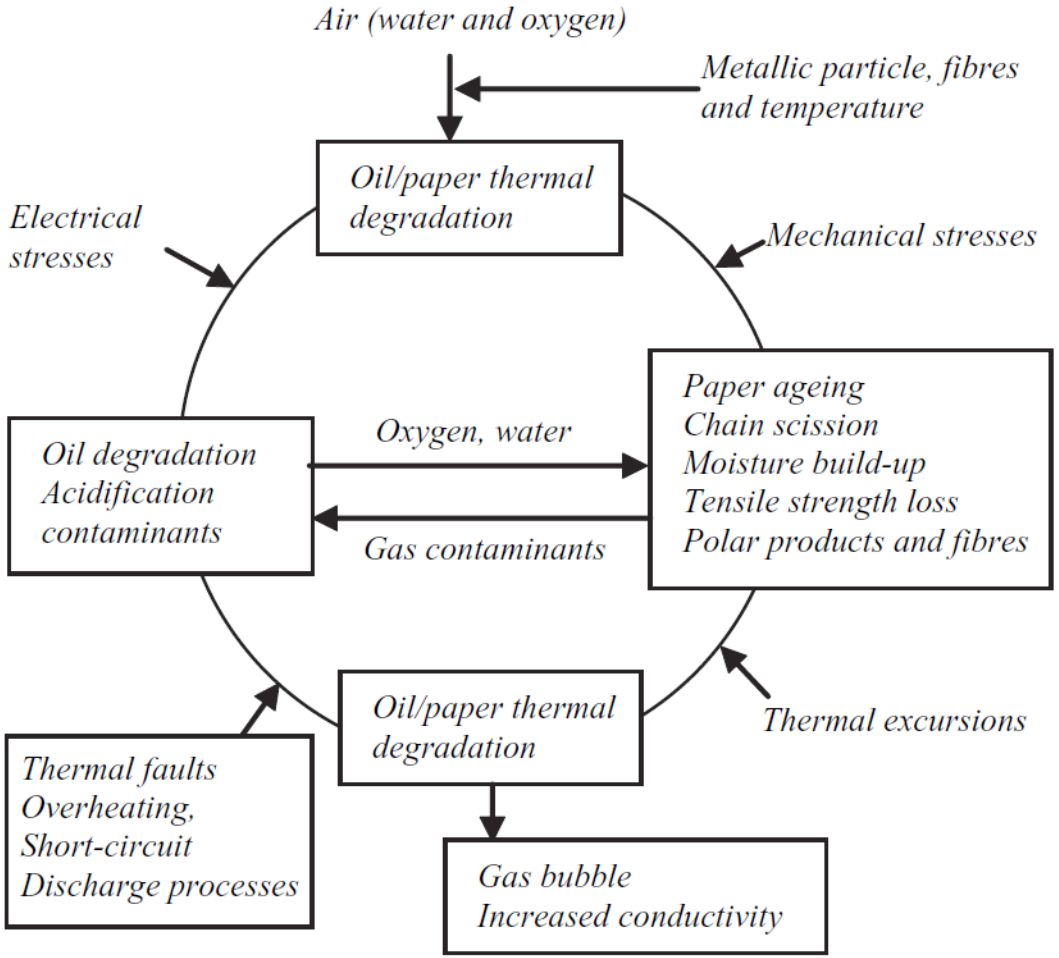
- elektrische
- elektromagnetische
- dielektrische
- thermische
- mechanische
- chemische

Alterungsprozesse

Lokale Überbeanspruchung der Isolierung führt zur Alterung der Zellulose und des Isolieröls in Form von

- **Säurebildung und Verunreinigungen im Öl**
- **Gas- und Schlammbildung**
- **Erhöhung des Wassergehalts**
- **Beschleunigung der Depolymerisation der Zellulose**

Beeinflussung Öl/Papier Isolierung



I. Fofana, H. Borsi, E. Gockenbach, M. Farzaneh
Aging of transformer insulating materials under selective conditions
Euro. Trans. Electr. Power 2007; 17:450–470, doi: 10.1002/etep.134

Alterung Isoliersystem

Elektrische Beanspruchung

Thermische Beanspruchung

Isoliersystem

Feststoffisolierung
$(C_6H_{10}O_5)_n$

Transformatoröl
C_nH_m

Abnahme des DP

C,
CO, CO_2
H_2O
Furfural
Feste Partikel

H_2
CH_4, C_2H_4
C_2H_6, C_2H_4,C_2H_2
CO, CO_2
Säuren
Harze

Minderung der Öleigenschaften

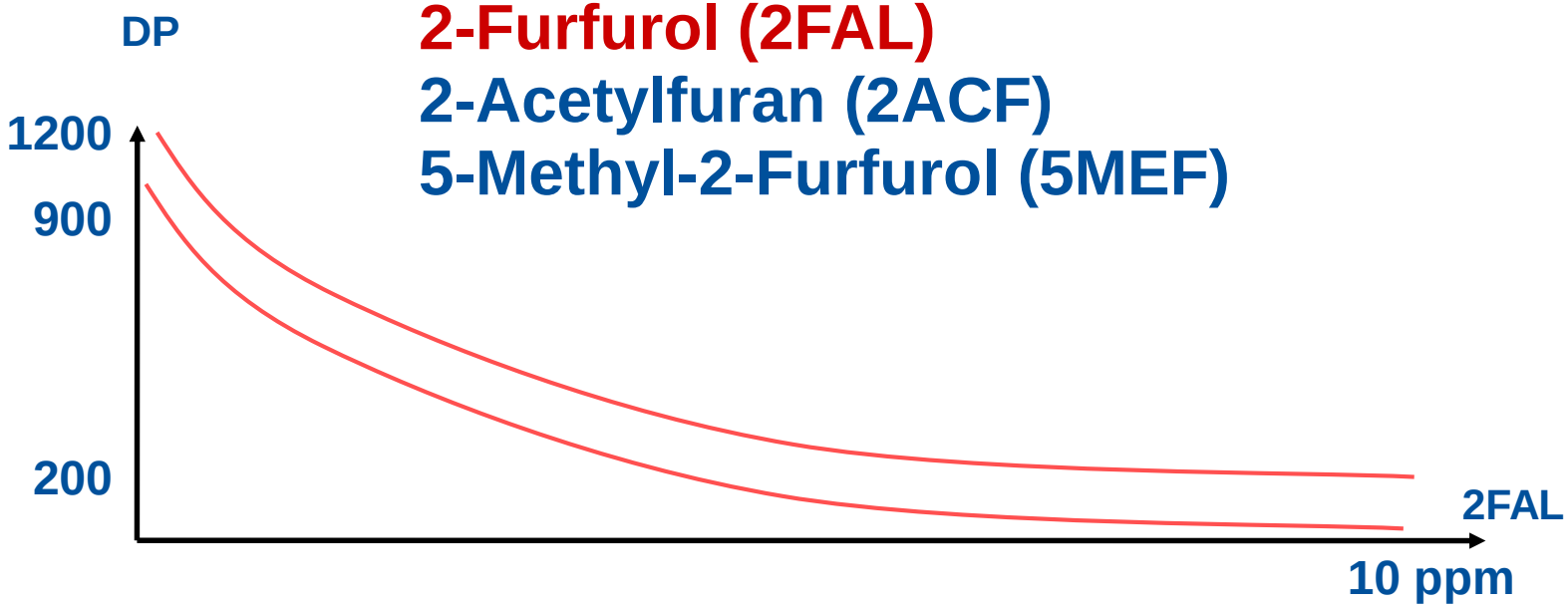
Dielektrische Beanspruchung

Bei Alterung der Zellulose brechen die Glukose-ringketten auf und bewirken eine Depolyme-risation und Bildung von

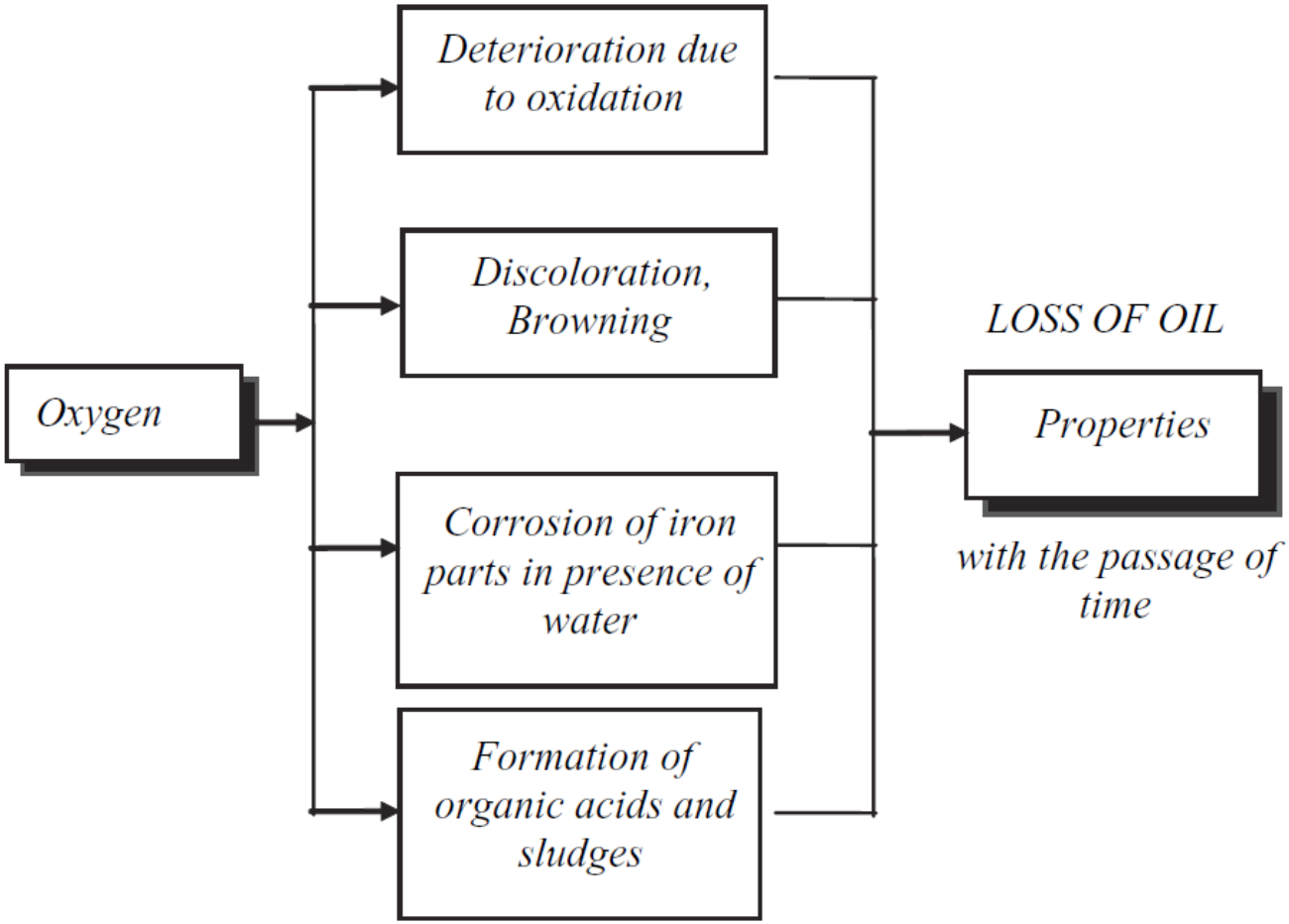
- **Wasser**
- **Gase (CO, CO2)**
- **Aldehyd Gruppen (Alkaline, 2FAL)**
- **Carboxyl Gruppen (organische Säuren)**

Furfurol als Depolymerisationsdetektor

5-Hydroxylmethyl-2-Furfurol (5HMF)
2-Furfurylalkohol (2FOL)
2-Furfurol (2FAL)
2-Acetylfuran (2ACF)
5-Methyl-2-Furfurol (5MEF)



Auswirkungen Sauerstoff in Mineralöl

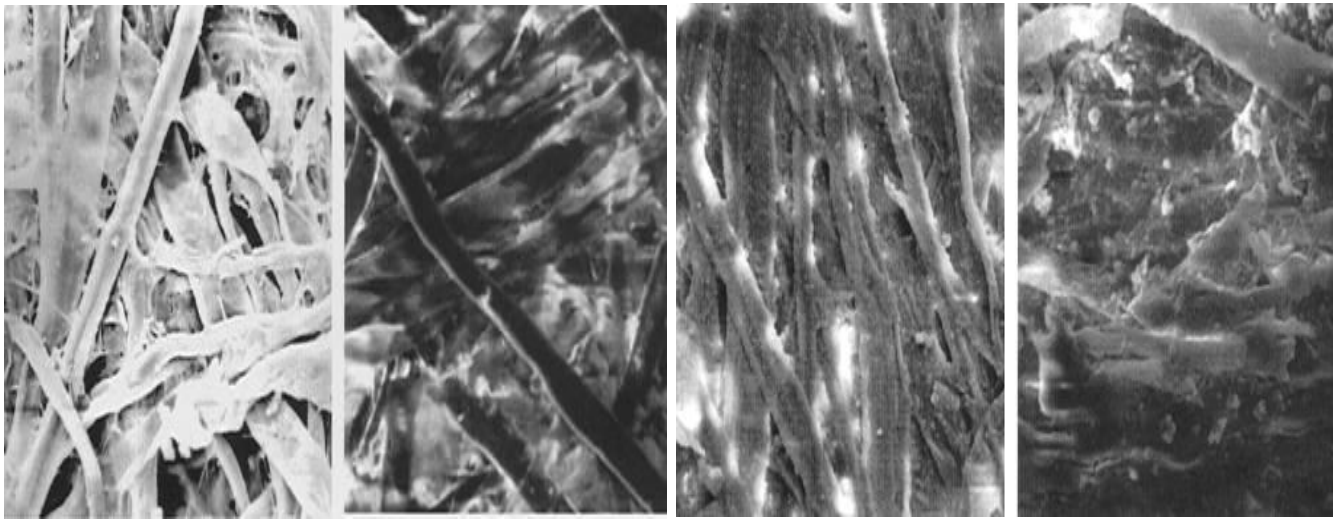


I. Fofana, H. Borsi, E. Gockenbach, M. Farzaneh
Aging of transformer insulating materials under selective conditions
Euro. Trans. Electr. Power 2007; 17:450–470, doi: 10.1002/etep.134

Alterung Papier

Einfluss von Sauerstoff

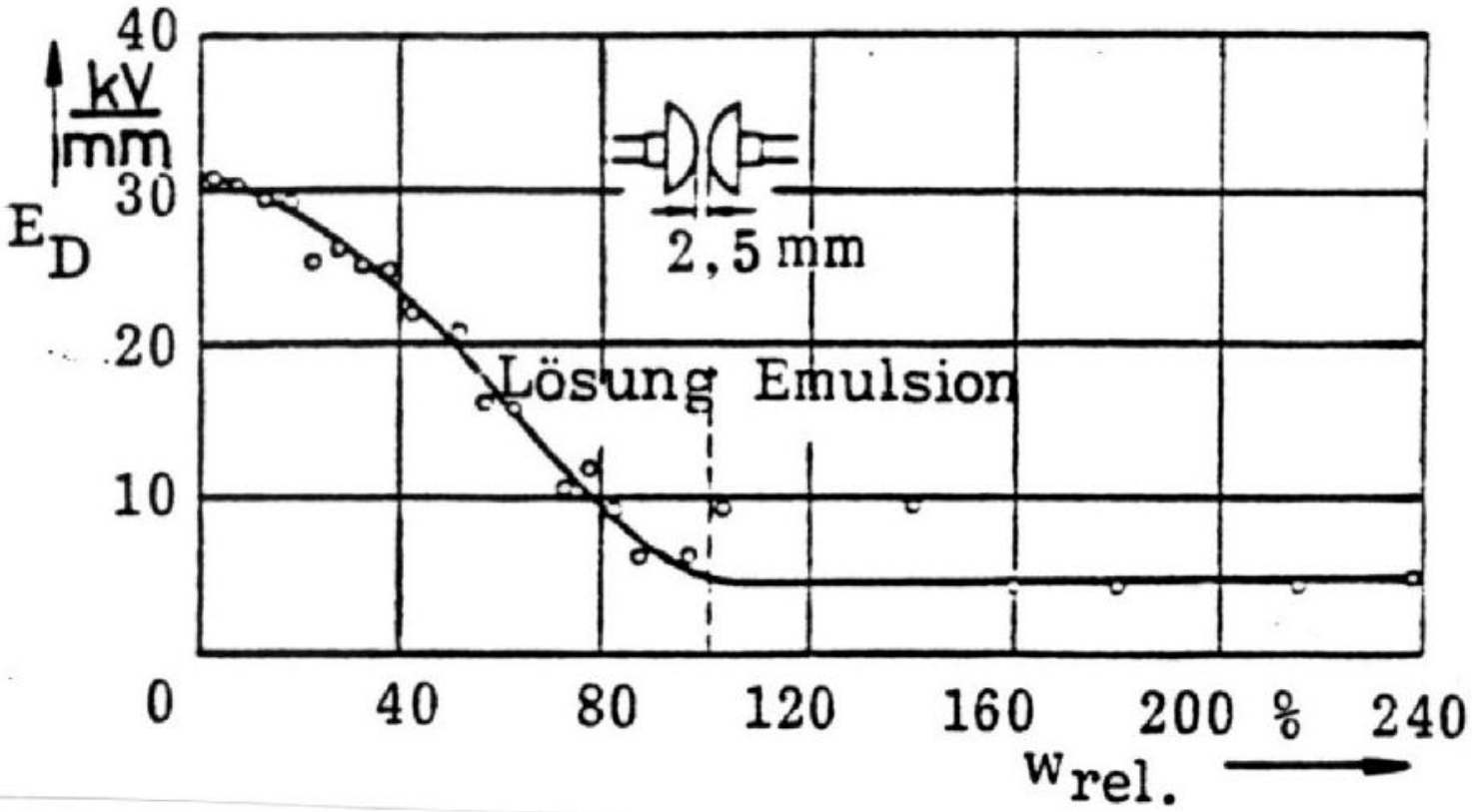
- **Oxidation**
- **Säurebildung**



0,05 **0,1** **0,2** **0,3**

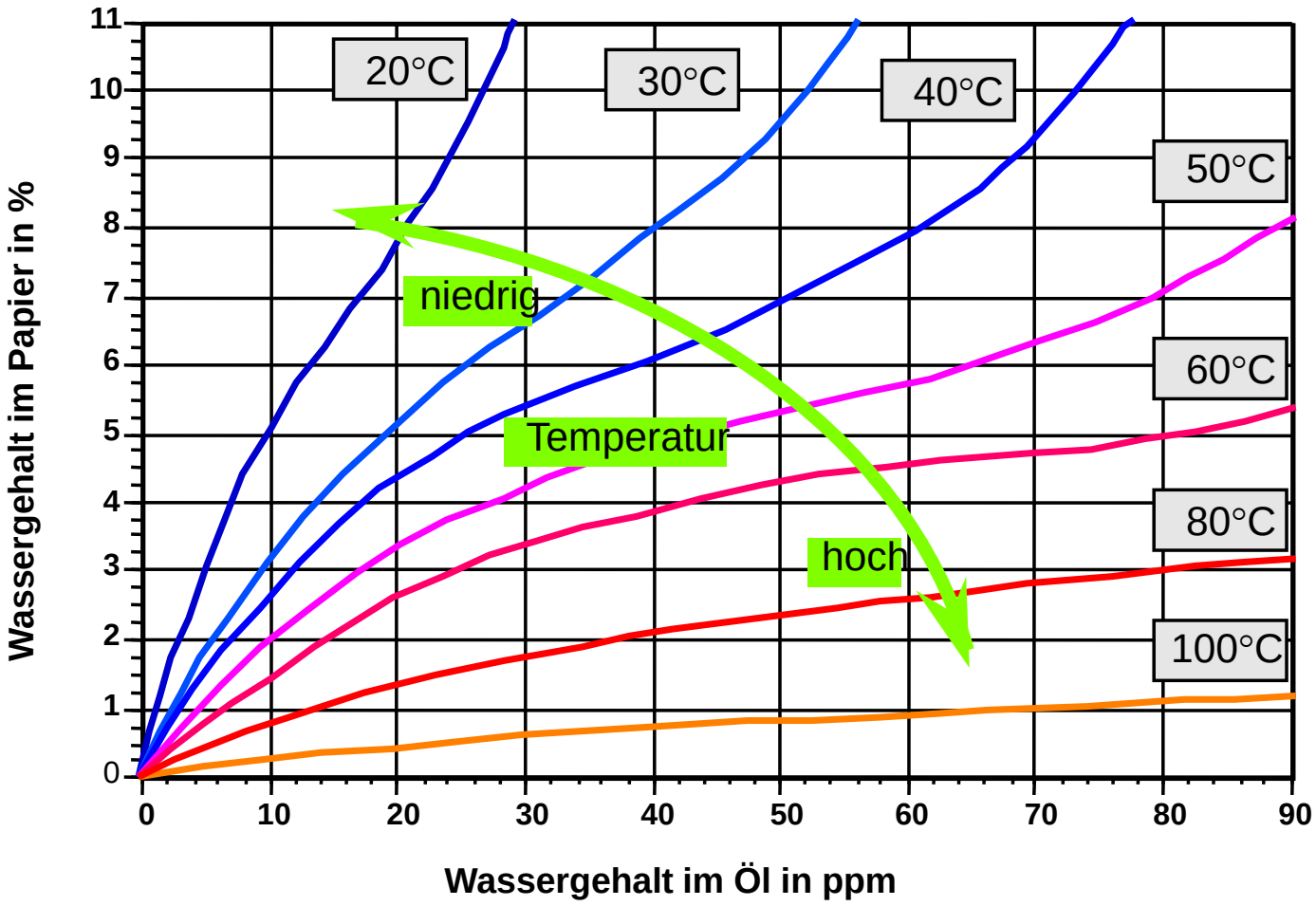
Mikrostruktur des Papiers bei Neutralisationszahl (mg/kg)

Durchschlagfeldstärke = f(Feuchte)



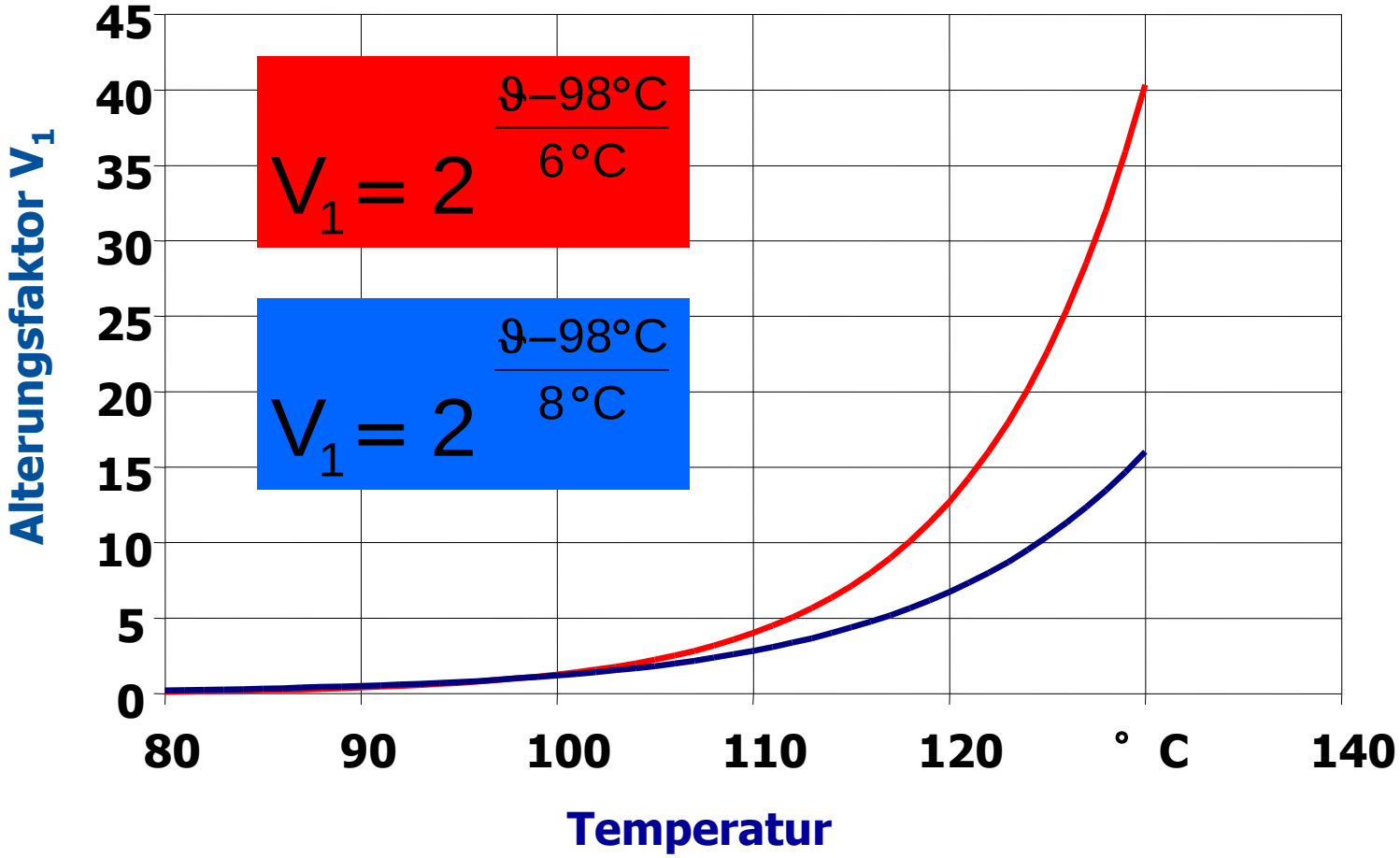
M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl
Hochspannungstechnik – Theoretische und praktische Grundlagen
Springer Verlag, ISBN 3-540-16014-0

Feuchteverteilung im Isoliersystem



T. V Oommen, "Moisture Equilibrium in Paper-Oil Systems", Electrical/Electronics Insul. Conf. Chicago, USA pp. 162-166, 1983.

Alterung Isoliersystem = f(Temperatur)



T. Dakin, Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomen, AIEE TRANSACTIONS , Vol. 67, 1948 pp. 113 - 122

Transformator Fehler

Gliederung

- Einleitung
- Alterungsverhalten von Transformator-isoliersystemen
- **Alterungsverhalten von Maschinen-isoliersystemen**
- Zusammenfassung

Alterungsparameter

Die Alterung von Maschinen kann durch folgende Beanspruchungen verursacht werden:

- elektrische
- elektromagnetische
- dielektrische
- thermische
- mechanische
- chemische

Dominierende Alterungsparameter

Dominierende Beanspruchungen für die Alterungsparameter von Maschinen sind:

- elektrische
- elektromagnetische
- dielektrische
- thermische
- mechanische
- chemische

Thermische und elektrische Beanspruchung

thermisch

- Thermische Beanspruchung innerhalb der Lebensdauer
- Überbeanspruchung
- Unzureichende Kühlung infolge verstopfter Kühlkanäle oder Fehler im Kühlungssystem

elektrisch

- Interne Teilentladungen in Hohlräumen und Delaminationen
- Nut- oder Oberflächenentladungen auf der hablbleitenden Schicht
- Wickelkopfentladungen infolge defekter Potentialsteuerung oder Verschmutzung

Mechanische und Umwelt Beanspruchung

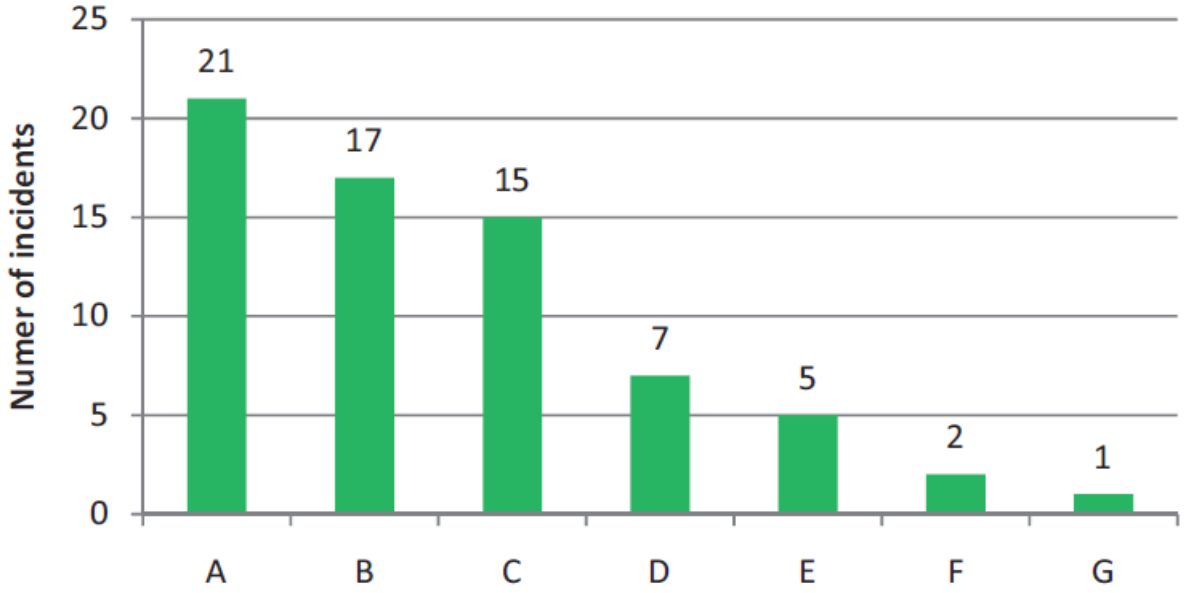
mechanisch

- Elektromagnetische Kräfte beim Kurzschluss
- Thermo-mechanische Kräfte infolge Ein-Aus Schaltungen innerhalb der Lebensdauer
- Unzureichende Kühlung infolge verstopfter Kühlkanäle

Umwelt

- Feuchte
- Verschmutzung
- Öl vor allem in Maschinen mit alter Isolierung
- Aggressive Gase und Dämpfe

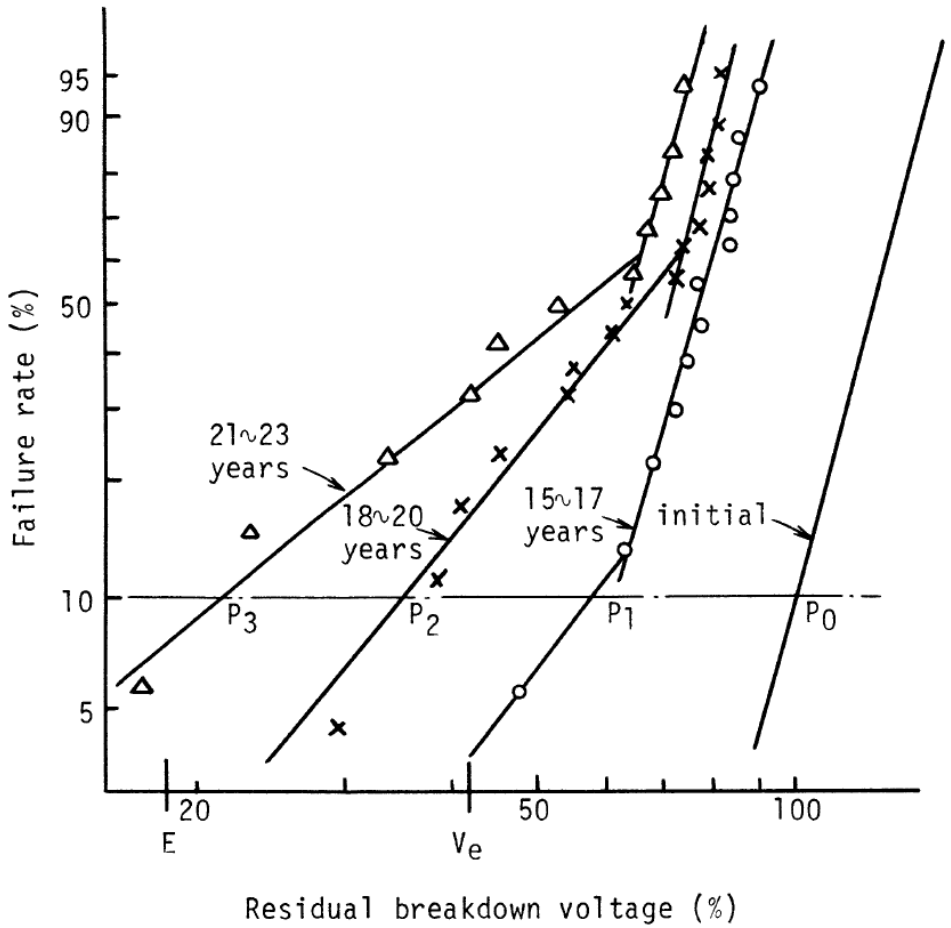
Ursache für Isolierungsausfall



A - Ageing
B - Contamination of winding
C - Internal partial discharges
D - Loosening of bars in the slot or in the overhangs
E - Thermal cycling or overloading
F - Defective corona protecction
G - Overvoltages

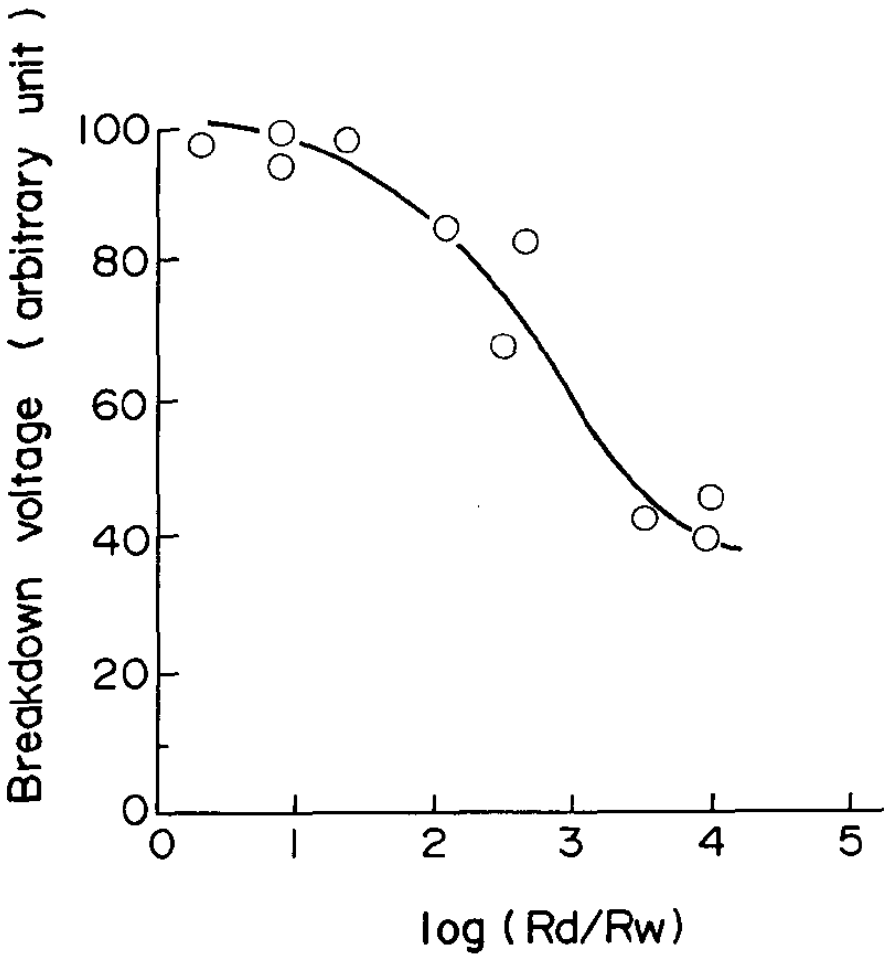
CIGRE Broschüre
SURVEY OF HYDROGENERATOR FAILURES
No. 392, 2009

Durchschlagspannung Motoren



T. Hakamada, ANALYSIS OF WEIBULL DISTRIBUTION
FOR ELECTRICAL BREAKDOWN VOLTAGE OF STATOR WINDINGS,
IEEE Transact. on Electrical Insulation Vol. EI-19 No.-2 April 1984, pp. 114 - 118

Durchschlag = f(Feuchte)

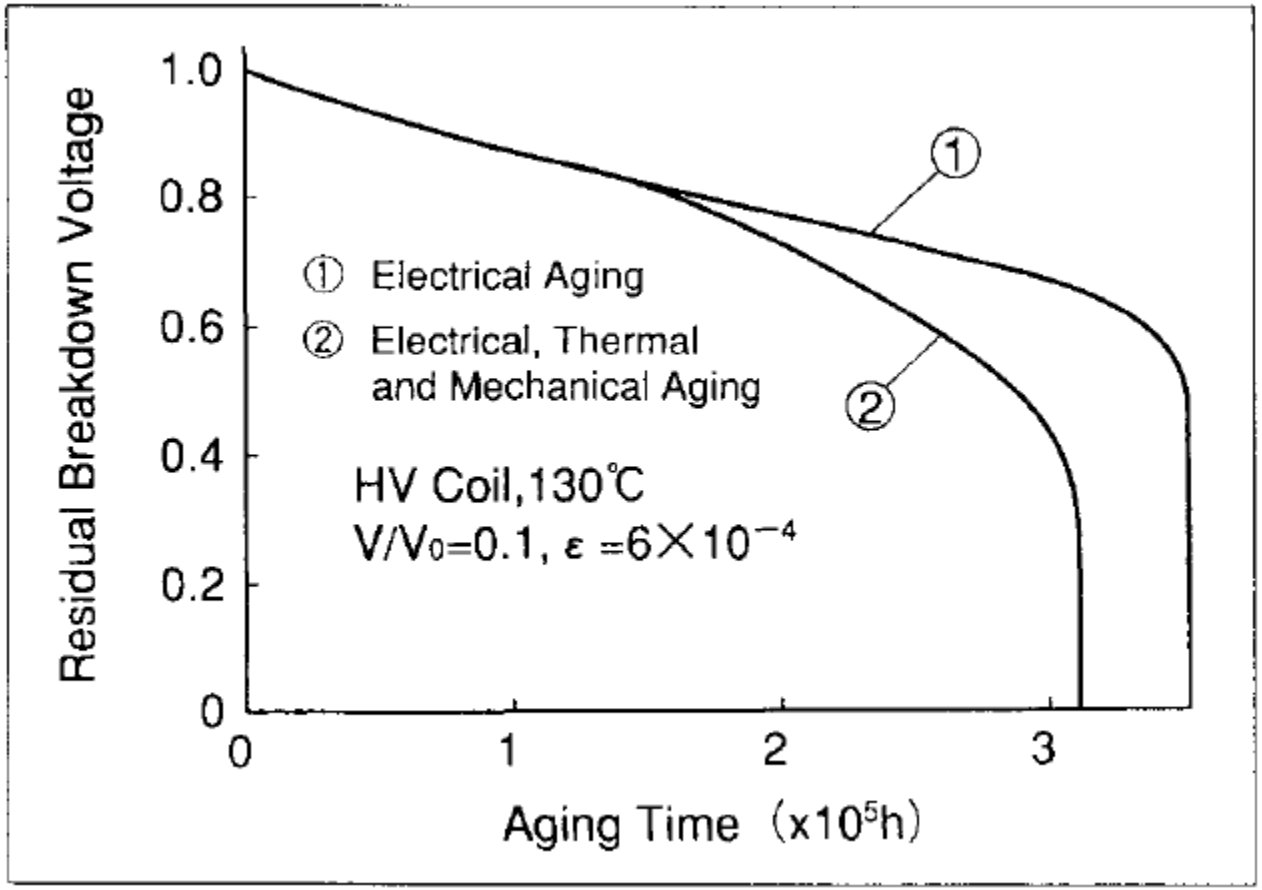


R_d = Widerstand trocken

R_w = Widerstand feucht

K. Kimura, T. Iwabuchi, K. Morooka, Y.Ishikawa, A Useful Index for Estimating Residual Life of Motor Insulation
IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 6 No.2 March/April 1990, pp. 29 - 35

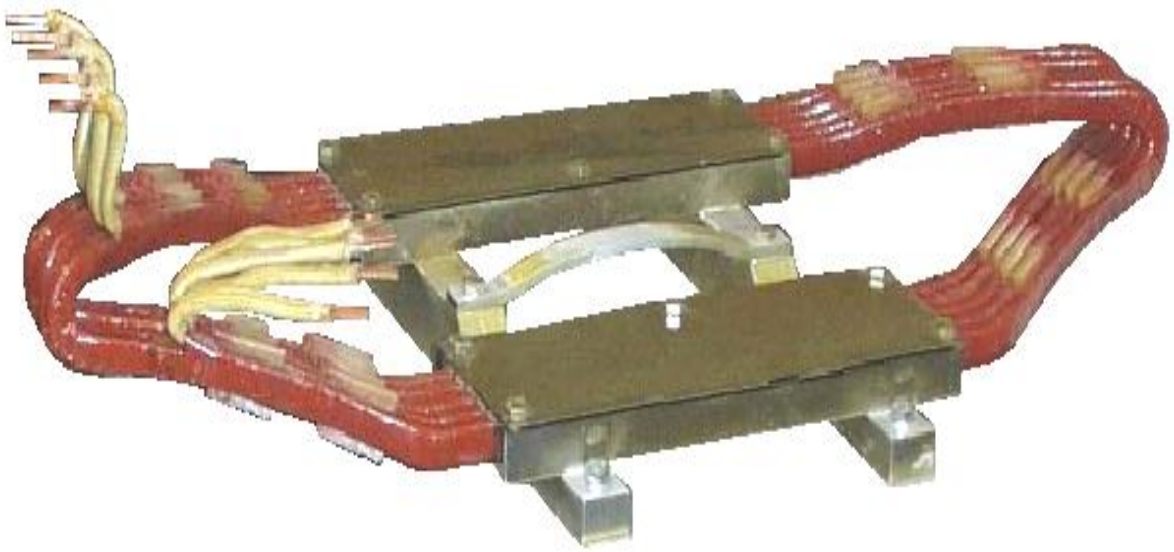
Durchschlagspannung = f(Alterung)



K. Kimura, Progress of Insulation Ageing and Diagnostics of High Voltage Rotating Machine Windings in Japan
IEEE Electrical Insulation Magazine Vol. 9 No.-3 May/June 1993, pp. 13 - 20

Alterungsmodell

- 5 Spule in je einer nachgebildeten Nut
- 6 Windungen pro Spule
- Imprägniert mit Epoxidharz (VPI Technologie)
- Nennspannung (Phase-Phase) U_{PP} = 3.3 kV
- Thermische Klasse F (155 ºC)



Alterungsverfahren

Mechanical stress
Vibration 60 Hz, 0.3 mm (1.5 g), 1 h

Environmental stress
Humidity exposure 95-100% rh, 48 h

Diagnose
- Insulation resistance (500 V, after 1 min)
- Dissipation factor (0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 U_{PP})
- Partial discharge (0.0, U_{pp} /√3, 1.0 U_{PP})

Diagnostic test voltage
- Alternating voltage 2 U_{PP}+2 kV, 50 Hz, 1 min
-Impulse voltage 0.65 × (4 U_{PP}+5 kV),
0.5/5.0 µs, 5 impulses

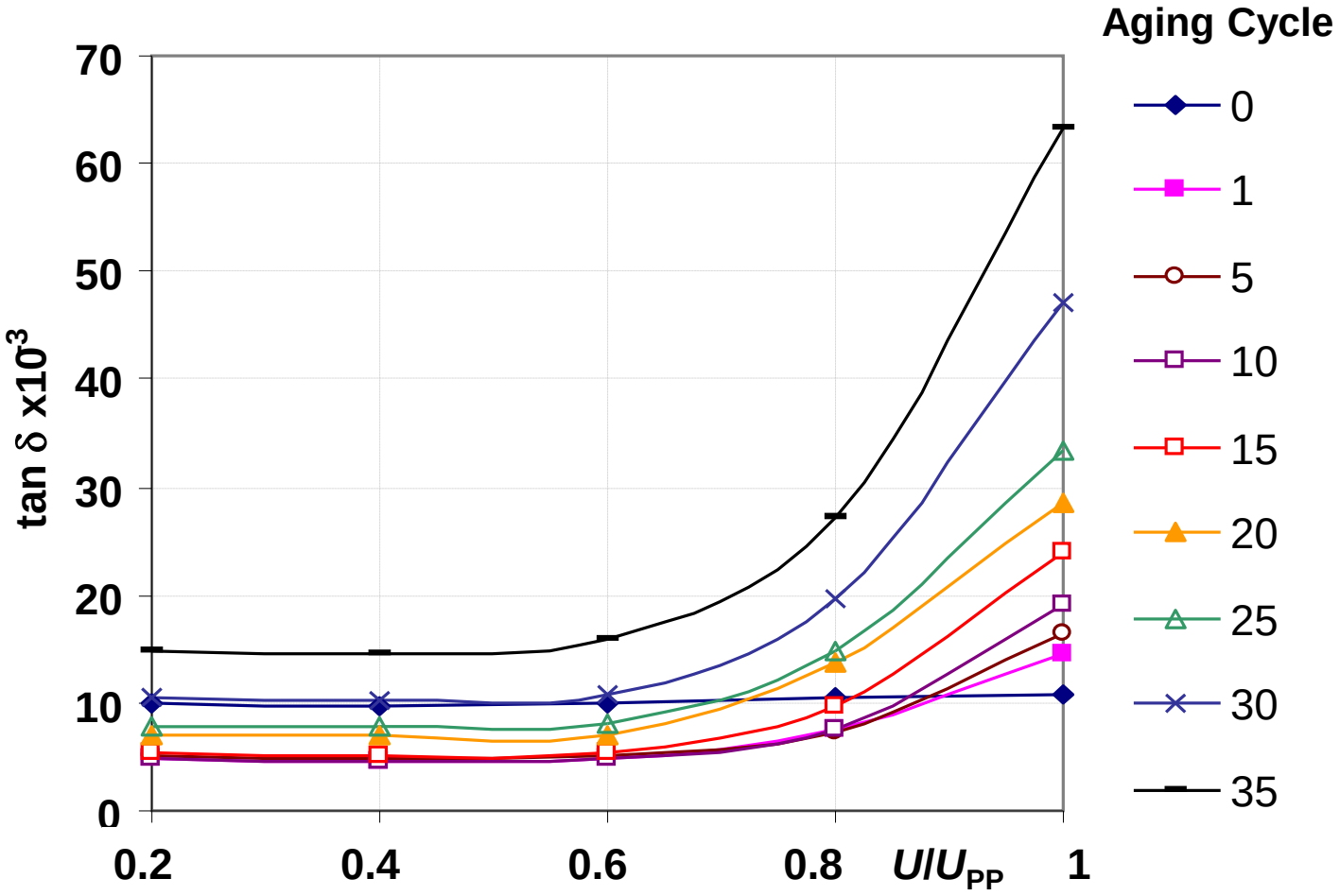
Thermal stress
In oven, 195 ºC, about 34 days
205 ºC, about 10 days
215 ºC, about 3 days

Durchschlagzeiten bei thermischer Alterung

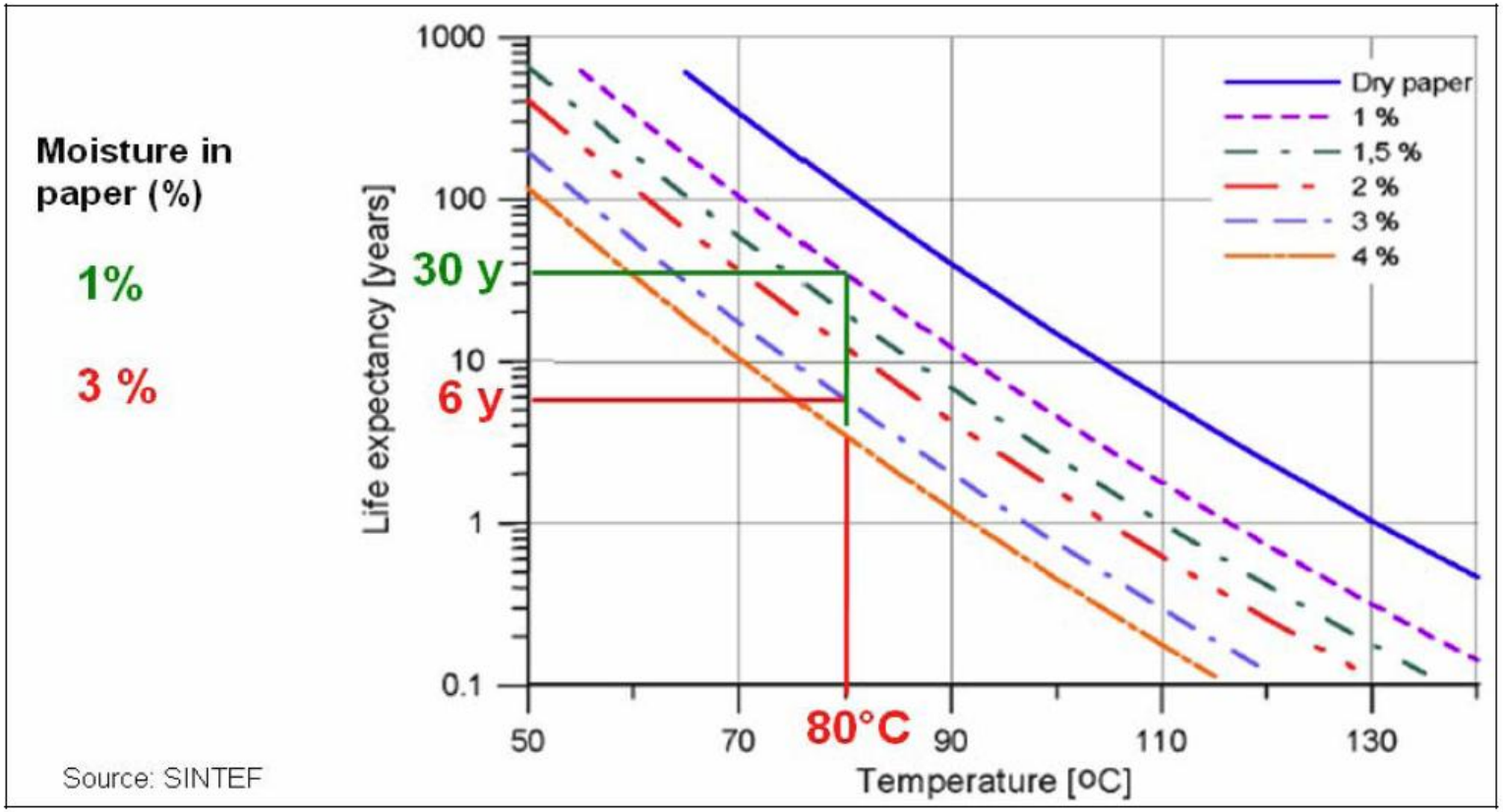
Zeiten bis zum Durchschlag einer Spule während einer thermischen Alterung mit 215 ºC

Spulen Nr.	Alterungszeit in h	Alterungszyklus
5	1342	19
3	1432	20
4	2074	28
2	2956	34
1	3090	35

Alterungsverhalten einer Wicklung



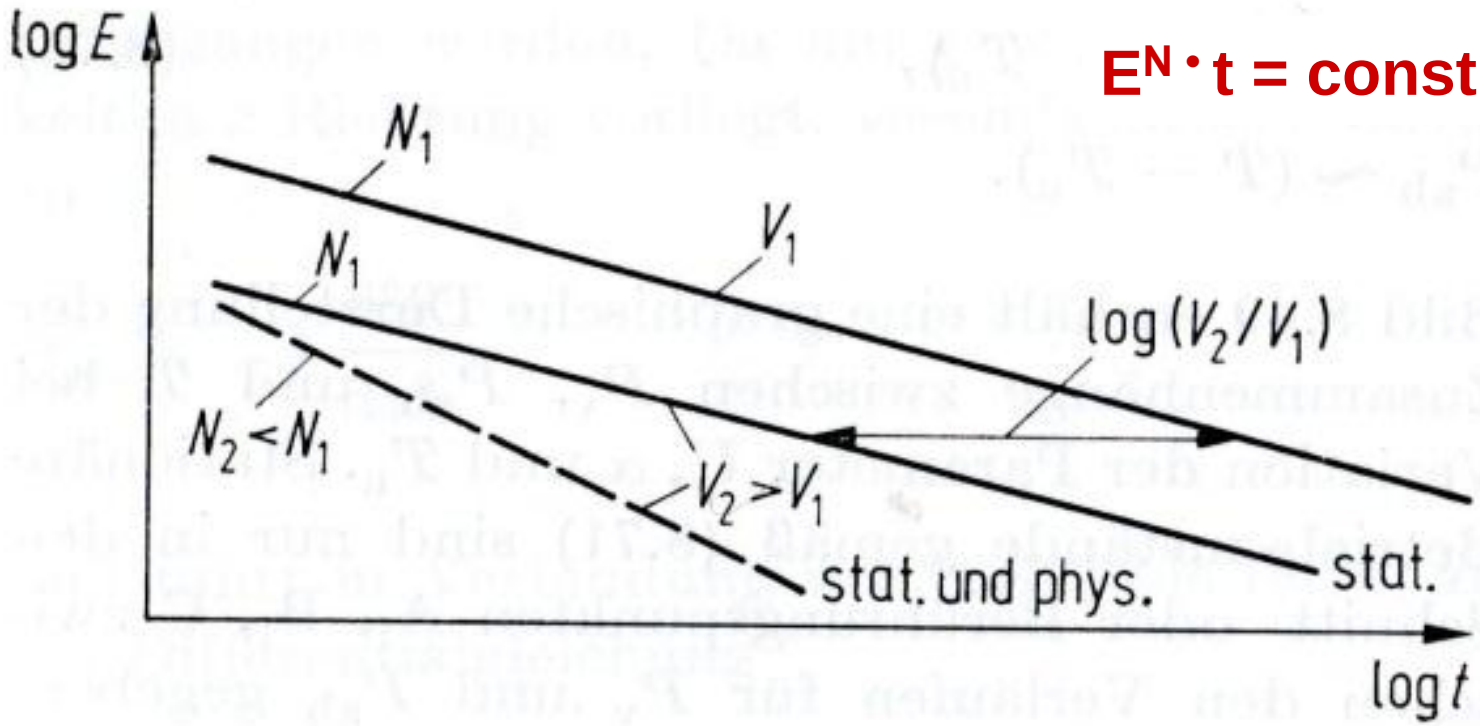
Lebensdauer = f (Temperatur, Feuchte)



CIGRE Broschüre
Guide for Transformer Maintenance
No. 445, 2011

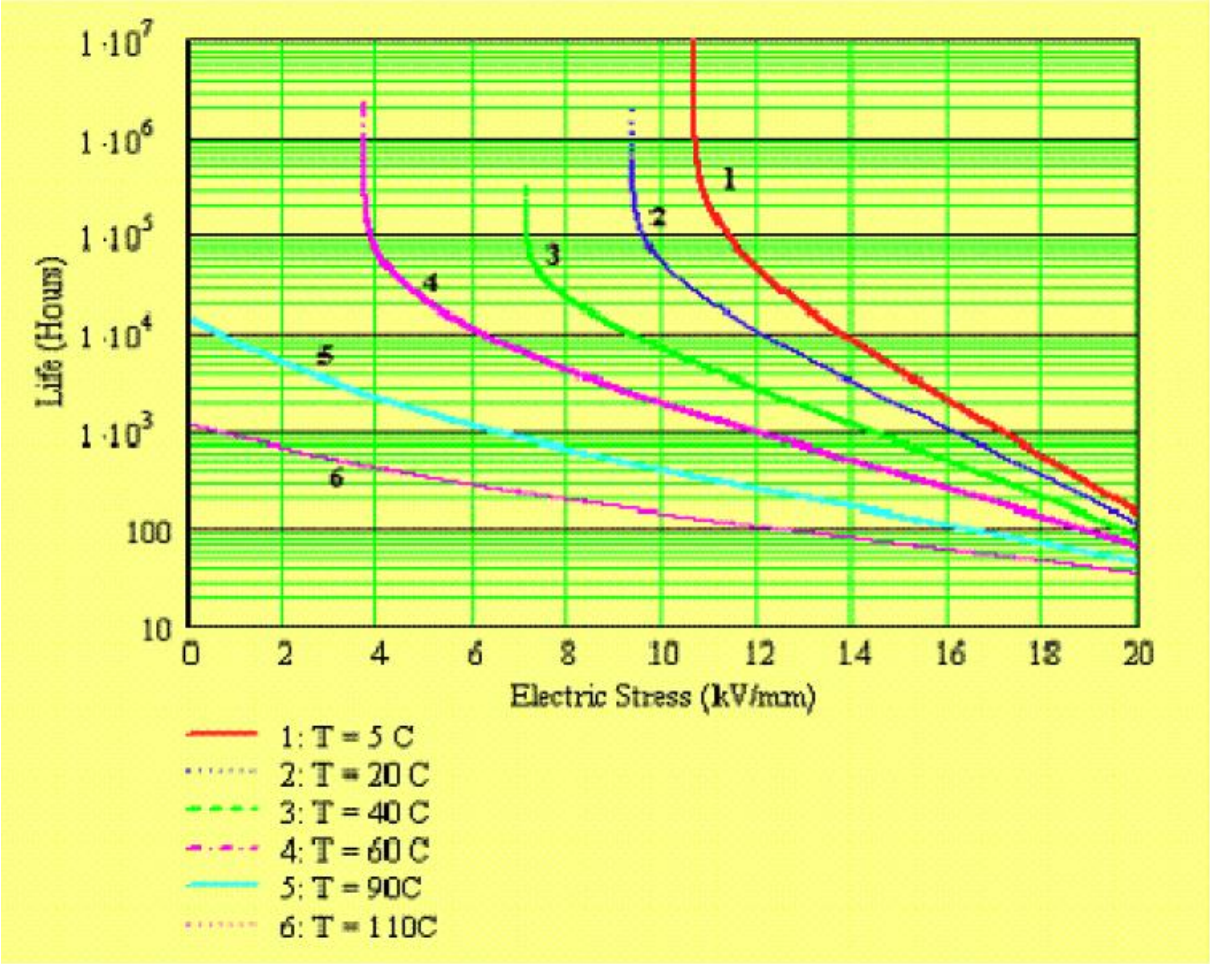
Durchschlagfeldstärke polymerer Isolierstoffe

$E^N \cdot t = const.$



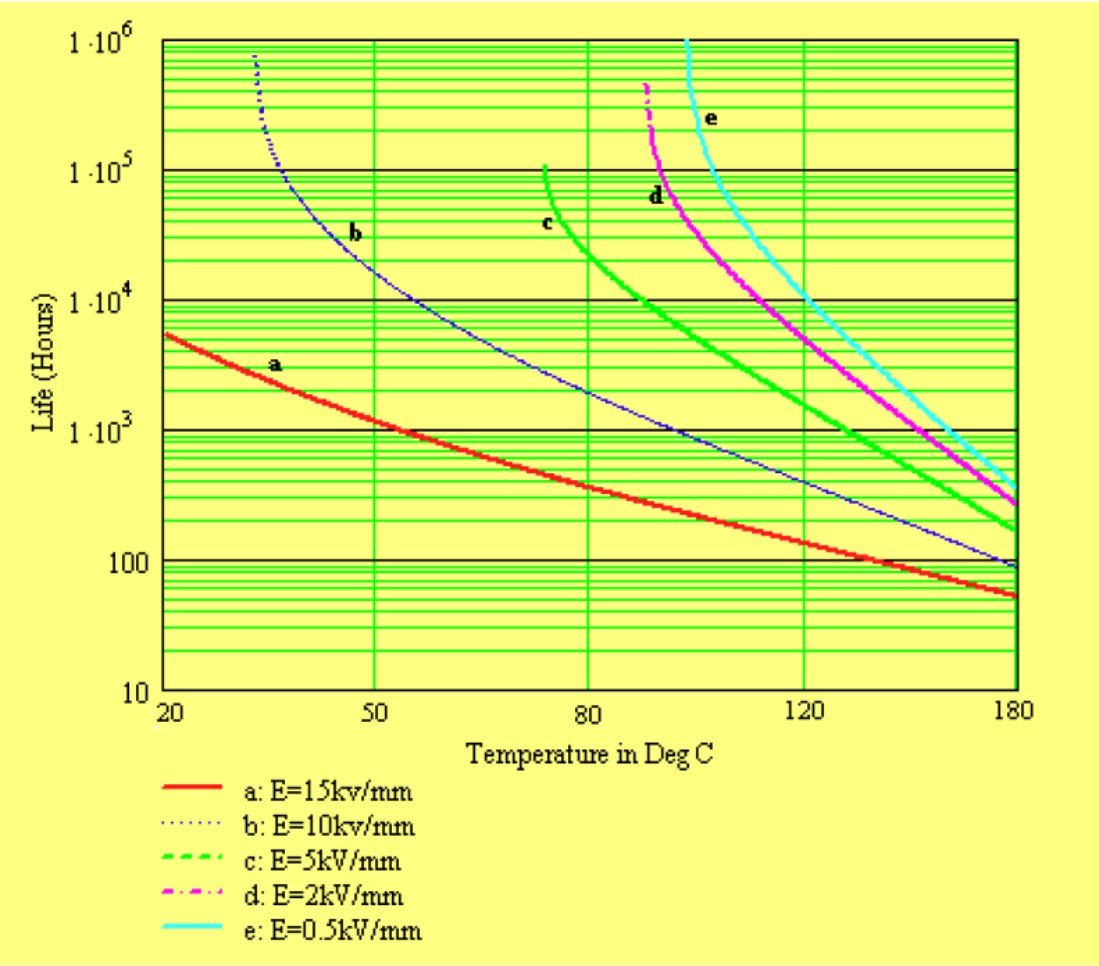
M. Beyer, W. Boeck, K. Möller, W. Zaengl
Hochspannungstechnik – Theoretische und praktische Grundlagen
Springer Verlag, ISBN 3-540-16014-0

Multi-Stress Modell



A Novel Approach for Prioritizing Maintenance of Underground Cables
PSERC Publication 06-40, 2006

Multi-Stress Modell



A Novel Approach for Prioritizing Maintenance of Underground Cables
PSERC Publication 06-40, 2006

Generator Fehler

CIGRE Broschüre
SURVEY OF HYDROGENERATOR FAILURES
Nr. 392, 2009

Gliederung

- Einleitung
- Alterungsverhalten von Transformator-isoliersystemen
- Alterungsverhalten von Maschinen-isoliersystemen
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- **Alterung ist nicht vermeidbar**
- **Alterungsprozesse laufen in der Regel exponentiell ab**

Alterungsfaktor $K = A\ e^{-B/T}$
mit A, B prozessabhängige Konstanten und
T = Temperatur

- **Lebensdauer der Isolierung nimmt somit exponentiell ab**

Lebensdauer $L = C\ e^{D/T}$
mit C, D prozessabhängige Konstanten

Zusammenfassung

- Alterungsprozesse können reduziert werden durch Minderung der verschiedenen Beanspruchungsfaktoren wie Temperatur oder elektrische Feldstärke
- Sehr viele Alterungsprozesse sind nicht reversibel

Teilentladungen (TE) sind keine Alterung, können aber eine Folge der Alterung sein

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit