

Transiente Belastungen durch Grenzflächen- und Materialpolarisation in HGÜ-Transformatoren

Andreas Küchler und Frank Hüllmandel, FHWS Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt, Schweinfurt
Jens Hoppe; Siemens AG, Nürnberg
Christoph Krause; Weidmann Transformerboard Systems AG, Rapperswil, Schweiz
Norbert Koch; HSP Hochspannungsgeräte Porz GmbH, Köln

Kurzfassung

Transformatoren für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) sind in der Prüfung und im Betrieb hohen transienten elektrischen Belastungen ausgesetzt, insbesondere in den Ölspalten und an den Grenzflächen, v.a. an den Durchführungsflächen. Mit einem klassischen Materialmodell aus Dielektrizitätszahl ϵ und Leitfähigkeit κ und mit einem darauf basierenden, räumlichen Netzwerkmodell werden die grundsätzlichen Zusammenhänge erläutert und Maßnahmen zur Beherrschung der transienten Belastungen abgeleitet. Hierfür müssen für alle gemeinsam verbauten Isolierstoffe die dielektrischen Materialeigenschaften an den Originalwerkstoffen und unter gleichartigen Bedingungen ermittelt werden. Entsprechende Messungen für unterschiedliche Temperaturen und Feldstärken zeigen, dass ein erweitertes Materialmodell auch eine Reihe weiterer Polarisationserscheinungen sowie veränderliche Ölleitfähigkeiten berücksichtigen muss. Simulationen mit Hilfe entsprechender Ersatzschaltbilder und funktionaler Zusammenhänge zeigen, dass zusätzliche transiente Polarisationsströme zu berücksichtigen sind, die v.a. die Belastung in den Ölspalten erhöhen und verlängern können.

1 Einführung

Wechselspannungen erzeugen üblicherweise vergleichsweise einfach zu überschauende Feldverhältnisse, die von Verschiebungsströmen und damit von den relativ gut bekannten Dielektrizitätszahlen bestimmt werden. *Gleichspannungen* führen zu schwierig einzuschätzenden Feldverteilungen:

Im *stationären Zustand* werden die Felder von Leitfähigkeiten bestimmt, die oft nicht genau bekannt sind, die sich um sehr viele Größenordnungen unterscheiden können und die sehr stark von verschiedenen Parametern abhängen können, wie z.B. von Temperatur, Feldstärke, Feuchtigkeitsgehalt, Materialzusammensetzung, Fertigungsprozess oder Verschmutzung.

Beim Zuschalten, Ändern oder Umpolen der Spannung werden die Feldverhältnisse noch komplexer: Durch diese Änderungen überlagern sich Verschiebungsströme und lösen *transiente Vorgänge* aus, die je nach Materialeigenschaften und geometrischem Isolationsaufbau mehr oder weniger schnell dem neuen stationären Endzustand zustreben.

Spezielle HGÜ-Prüfzyklen sollen diese Art von Isolationsbelastung nachstellen, **Bild 1**. Nachfolgend werden die dabei entstehenden transienten Belastungen in einem einfachen und in einem komplexen Isolationsystem betrachtet, **Bild 2 u. 3**. Berücksichtigung findet dabei sowohl die Grenzflächenpolarisation (Kap. 2) als auch die Polarisation der Materialien selbst (Kap. 3 u. 4).

2 Grenzflächenpolarisation

2.1 Transiente Belastungen

Einfache Materialmodelle, sog. *RC*-, bzw. ϵ/κ -Modelle aus Ersatzkapazität C (bzw. Dielektrizitätszahl ϵ) und Ersatzwiderstand R (bzw. Leitfähigkeit κ) erlauben die näherungsweise Berechnung transienter Vorgänge durch Netzwerksimulation (bzw. durch transiente Feldberechnung).

In einer **Schichtung aus zwei Materialien**, z.B. aus Öl und imprägniertem Transformerboard, verlaufen die Übergangsvorgänge näherungsweise exponentiell zwischen dem Ausgangszustand (z.B. einer kapazitiven Spannungsverteilung nach dem Zuschalten oder Umpolen) und dem Endzustand (z.B. einer resistiven Spannungsverteilung nach sehr langer Zeit), **Bild 2**. Grundsätzlich gilt, dass bei Spannungsänderungen

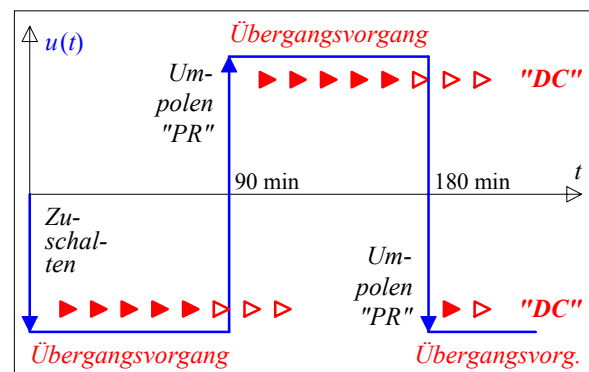


Bild 1 Typischer HGÜ-Prüfzyklus.

(Stoßspannung, Wechselspannung, Zuschalten oder Umpolen einer Gleichspannung) die Ölspalte mit niedriger Dielektrizitätszahl hoch beansprucht werden und dass im stationären Zustand die Belastung in das hochohmige Board verschoben wird. Im Gegensatz zu einer Wechselspannungsisolation werden bei Gleichspannung beide Isoliermaterialien hoch beansprucht. *Ausgangs- und Endzustände* müssen dabei nicht immer der kapazitiven bzw. resistiven Feldbeanspruchung entsprechen, weil die von vorausgehenden Belastungen verursachten Feldzustände zu überlagern

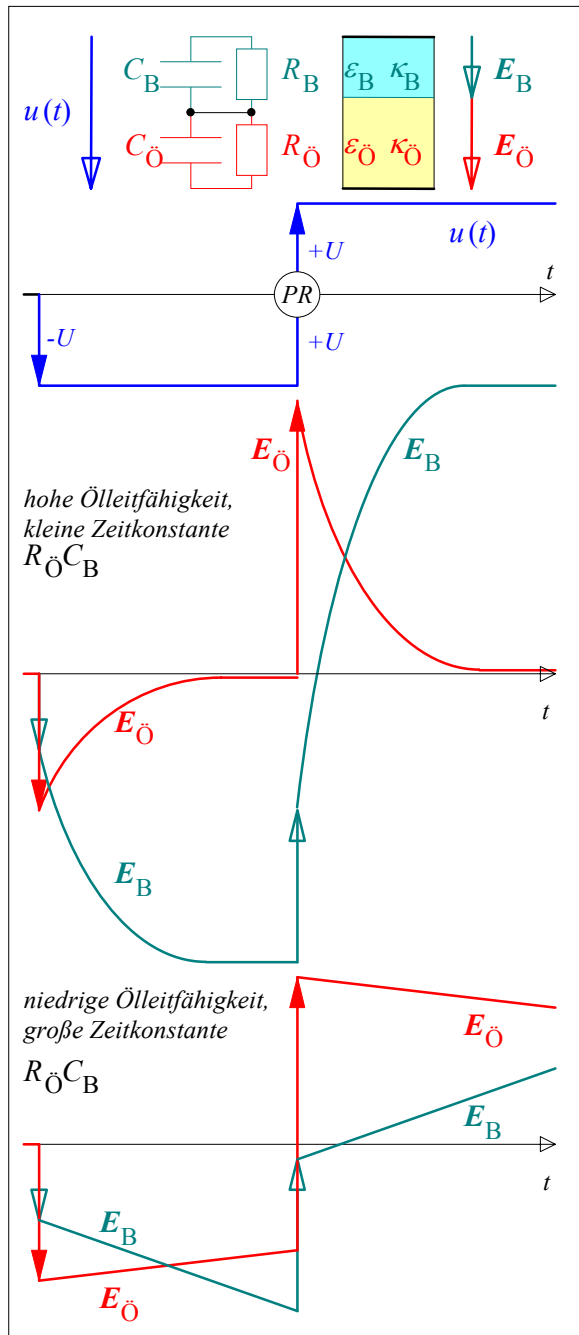


Bild 2 Grenzflächenpolarisation im Öl-Barrierensystem beim Zuschalten und Umpolen einer Gleichspannung für unterschiedliche Ölleitfähigkeiten.

sind. Eine niedrige Ölleitfähigkeit verursacht beispielsweise große Zeitkonstanten und langsam verlaufende Übergangsvorgänge, so dass vor dem Umpolen das Öl noch immer belastet ist und das Board noch immer eine reduzierte Belastung erfährt, Bild 2 (unten). Das dann bei der Umpolung überlagerte Verschiebungsfeld wird deshalb vor allem im Öl vom vorherigen Feldzustand teilweise kompensiert, so dass sich eine reduzierte Spitzenbelastung im Öl ergibt [1].

In einer **Schichtung aus drei Materialien**, z.B. aus Öl, Board und Kunststoff, verlaufen die Übergangsvorgänge in komplexerer Form. Ausgehend von der kapazitiven Feldverteilung, die alle drei Materialien entsprechend dem Kehrwert ihrer Dielektrizitätszahlen belastet, baut sich das Feld zunächst in der *leitfähigsten Schicht* (i.d.R. also im Öl) ab und die *weniger leitfähigen Schichten* (Board und Kunststoff) müssen eine zusätzliche Spannung übernehmen, sie erfahren eine zunehmende Belastung. Im weiteren Verlauf des Übergangsvorganges entlastet sich schließlich aber auch das Material mit der *mittleren Leitfähigkeit* (z.B. das Board), so dass die anstehende Gleichspannung schließlich weitgehend vom Material mit der *geringsten Leitfähigkeit* (z.B. also dem Kunststoff) zu isolieren ist. Für das Material mit der mittleren Leitfähigkeit ergibt sich aus der zunächst zunehmenden und dann wieder abnehmenden Belastung ein *transientes Spannungs* bzw. *Feldstärkemaximum*, das allein aus Anfangs- und Endzuständen nicht erkennbar ist [2].

2.2 Komplexe Isolationssysteme

In komplexen Isolationssystemen ergeben sich **räumliche und zeitliche Verschiebungen (Migrationen)** der Felder, die durch räumlich vernetzte Ersatzschaltbilder [3], Bild 3b), oder durch transiente numerische Feldberechnung [4] untersucht werden können. Ein praktisch wichtiges Beispiel ist das Zusammenwirken von **Durchführung und Barrierensystem** in einem HGÜ-Transformator, **Bild 3**. Für eine grundsätzliche Betrachtung wird das Barrierensystem in einer abgeschrägten Ersatzbarriere zusammengefasst, Bild 3a) u. c). Dominierende Ersatzelemente sind im Bild angedeutet. Das Öl wird als wesentlich leitfähiger angesehen als Durchführung und Barrieren.

Beim **Zuschalten einer Gleichspannung (1)** ergibt sich zunächst ein dielektrisches *Verschiebungsfeld* aufgrund der dominierenden Teilkapazitäten bzw. Dielektrizitätszahlen.

Daran schließt sich ein **Übergangsvorgang (2)** an, in dessen Verlauf die Barrieren- und Durchführungskapazitäten über die besser leitfähigen Ölspalte in radialer Richtung geladen werden. Im unteren Bereich der Isolation (U) verläuft die Aufladung wegen der kleineren Barrierenkapazitäten schneller als im oberen Bereich (O): Die dabei in die Durchführungsisolation gedrängten Potentiallinien müssen vor der Elektrode

(E) in das Barriersystem übertreten. Dadurch ergibt sich im unteren Bereich des Ölspaltes (U) eine *hohe tangentielle Belastung*, die die stationären Belastungen weit überschreiten kann [3].

Im **stationären Zustand (3)** wird die Feldstärke im

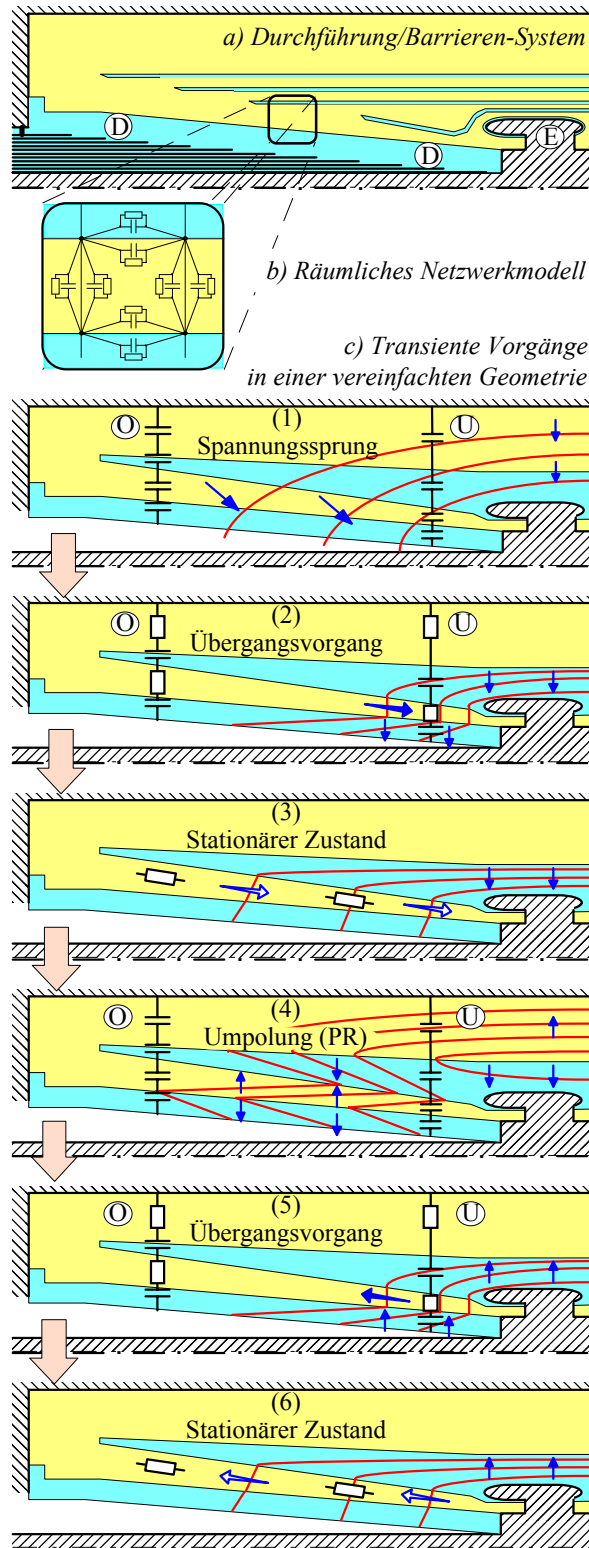


Bild 3 Transiente Feldverschiebungen (Migrationen) in der Umgebung einer Transformatordurchführung.

axialen Ölspalt von der Stromdichte bestimmt. Der *Ölspalt* wirkt somit zusammen mit seinen hochohmigen Begrenzungen als *äußeres feldsteuerndes Element*, das weitgehend unabhängig von der *inneren Potentialsteuerung* der Durchführung ist. Wann der stationäre Zustand erreicht wird, hängt von den Zeitkonstanten der Materialien (insbes. von der Ölleitfähigkeit) und von der Beanspruchungsdauer ab.

Bei der **Umpolung (4)** wird dem gegebenen Feldzustand ein dielektrisches Verschiebungsfeld überlagert, das dem *doppelten Spannungshub* $\Delta U = 2 U$ entspricht und vor allem die *Ölspalte extrem belastet*. Es ergibt sich ein charakteristischer zick-zack-förmiger Verlauf der Potentiallinien. In diesem Moment erfüllen die Barrieren eine festigkeitssteigernde Wirkung durch *Unterteilung extrem belasteter Ölspalte*.

Im anschließenden **Übergangsvorgang (5)** werden die radialen Kapazitäten der Barrieren und der Durchführungsdecklagenisolation (vgl. D in Bild 3 oben) *umgeladen*, Bild 4 (oben). Die mit einem räumlich vernetzten RC-Netzwerk für eine 500 kV-Durchführung berechneten Verläufe können qualitativ gemäß Kap. 2.1 interpretiert werden: D.h. die hohe Belastung der Ölspalte wird abgebaut und die feste Isolation übernimmt die Belastung in radialer Richtung. Allerdings muss auch hierbei das in die Durchführung gedrängte Feld vor der Elektrode in das Barriersystem treten und verursacht wie in Schritt (2) *hohe axiale transiente Beanspruchungen* über der Durchführung, die ein vielfaches der Ausgangs- und Endwerte betragen können und deshalb besonders gefährlich sind, Bild 4 (unten). Dieser Befund deckt sich mit HGÜ-Prüferfahrungen, wonach Teilentladungen oft kurz nach dem Umpolen beobachtet werden.

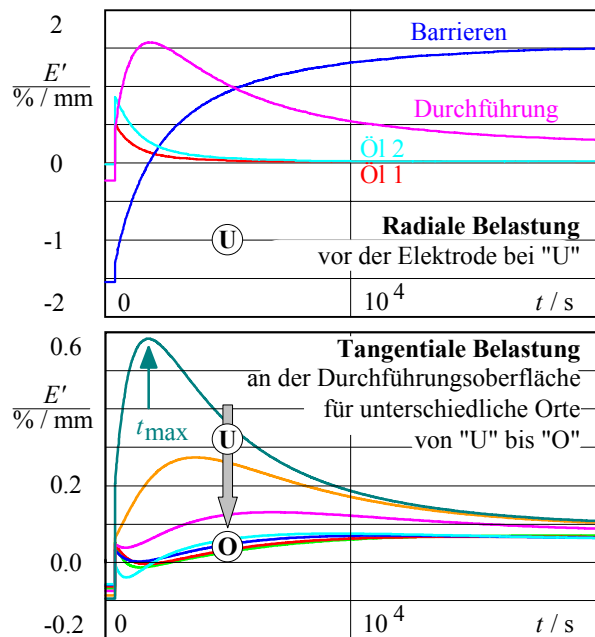


Bild 4 Transiente Belastungen eines Durchführungs-/ Barriersystems nach dem Umpolen.

Die **Beherrschung der beschriebenen Vorgänge** durch das Isolationssystem erfordert ein *aufeinander abgestimmtes Design aller Komponenten* sowie die Berücksichtigung der verschiedenen Beanspruchungsszenarien in der Prüfung und im Betrieb [3]. Wichtige Gesichtspunkte sind dabei

- die axiale Feldsteuerung durch eine gleichmäßige *Ölspaltgeometrie* im stationären Zustand,
- die radiale *Unterteilung der Ölspalte* durch Barrieren zur Festigkeitssteigerung unmittelbar nach dem Umpolen,
- ein ausgewogenes Verhältnis von Ölspaltweiten zu *Barrierendicken* für die Isolation bei zeitveränderlicher und bei konstanter Spannung sowie
- die Optimierung der *Geometrie* zur Begrenzung des transienten axialen Feldstärkemaximums.

Für *Designstudien* wird bisher empfohlen, Berechnungen mit verschiedenen denkbaren Leitfähigkeitsverhältnissen durchzuführen, um *kritischen Szenarien* zu ermitteln, da die wirklichen Leitfähigkeitswerte oft nicht oder nur sehr ungenau bestimmbar sind [5]. Noch immer handelt es sich hierbei um vereinfachte Betrachtungen mit einem einfachen RC-Materialmodell. Der Einfluss der Materialpolarisation wird deshalb in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

3 Dielektrische Systemantwort

Wegen der hohen Bedeutung der Materialkennwerte wurden die in der o.g. Isolation eingesetzten Werkstoffe gemeinsam und realitätsnah aufbereitet und in einem weiten Parameterbereich (T von -10° bis 90°C , E von 0,1 bis 30 kV/mm) bei gleichen Bedingungen in einer Schutzringanordnung unter Öl vermessen [6]. Zum Einsatz kam ein für dielektrische Diagnosen entwickelter PDC-Analyser mit stabilisierten internen und externen Spannungsquellen [7]. Damit wurden

Polarisations- und Depolarisationsströme als dielektrische Systemantworten aufgenommen und analysiert.

Feste Isolierstoffe zeigen näherungsweise lineares Verhalten, die Ströme werden jedoch über lange Zeit durch langsame *Polarisationsvorgänge* bestimmt, die man durch zusätzliche RC-Glieder mit entsprechenden Zeitkonstanten beschreiben kann, **Bild 5** (links). Die *Leitfähigkeit* bzw. der Gleichstromwiderstand R_∞ kann aus dem Endwert des Stromes geschätzt werden, der sich aus der Betragsdifferenz der übereinander gelegten Polarisations- u. Depolarisationsströme errechnet [6] (P- und D-Strom sind natürlich von entgegengesetzter Polarität und folgen zeitlich aufeinander.).

Da bei **Isolieröl** der Depolarisationsstrom vernachlässigbar ist, ist zu folgern, dass es auch keine ladungsspeichernden Polarisationsmechanismen besitzt, so dass die entsprechenden RC-Glieder entfallen, Bild 5 rechts. Die Eigenschaften des Öles werden also durch *Leitfähigkeit* bestimmt, die allerdings zeitabhängig und stark nichtlinear ist: Innerhalb einer *Transitzeit*

$$\tau = d/(k \cdot E) \quad (1)$$

werden die anfänglich vorhandenen Ionen durch die Feldstärke E über die Elektrodenabstand d transportiert, k ist die Beweglichkeit [8]. Es stellt sich ein neues Gleichgewicht I_{end} ein, dessen Wert nichtlinear mit der der Feldstärke zunimmt, **Bild 6** (rechts). Da diese Vorgänge *nicht* mit linearen Ersatzbildern beschrieben werden können, wurde ein **physikalisches Ölmodell** entwickelt: Darin wird angenommen, dass die ursprünglich vorhandene Ladung $Q(0)$ durch den Stromfluss vermindert wird. Die verbleibende Ladung

$$Q(t) = Q(0) - \int i(t) \cdot dt \quad (2)$$

dient der Berechnung des aktuellen Stromes

$$i(t) = \{Q(t) k / d\} \cdot E(t) + I_{\text{end}}(E_{\text{end}}) \quad (3)$$

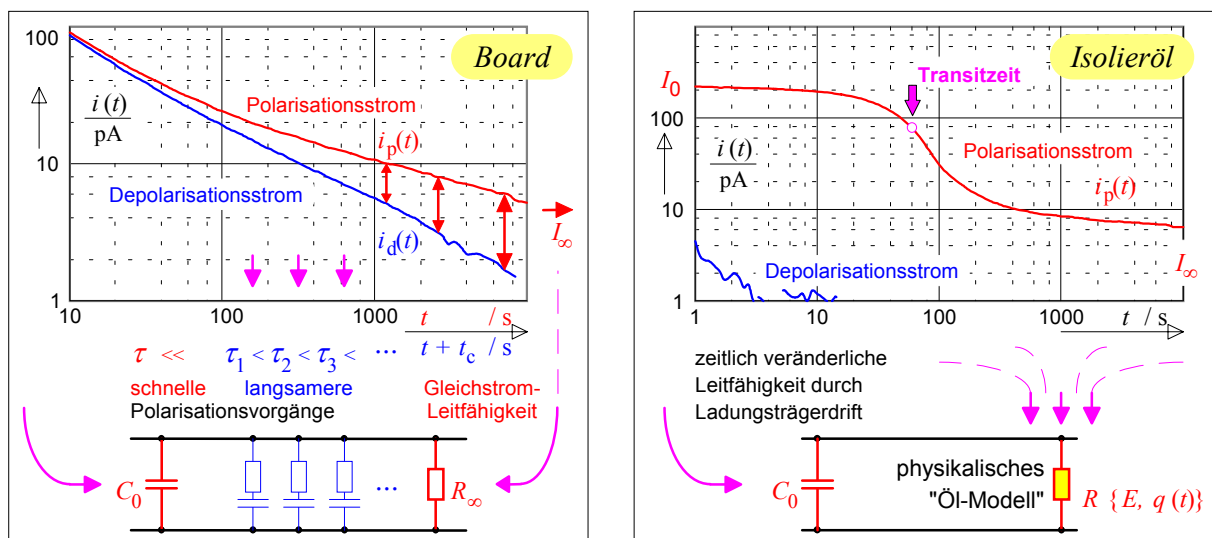


Bild 5 Polarisations- und Depolarisationsströme als dielektrische Systemantworten für feste und flüssige Medien mit linearer und nichtlinearer Modellbildung (jeweils links und rechts).

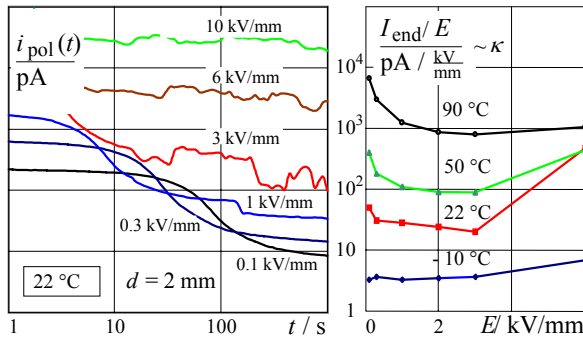


Bild 6 Nichtlineares Verhalten eines Isolieröles.

Die in Gl. (1) enthaltene Feldstärkeabhängigkeit der Transitzeit ist in Bild 6 (links) für die niedrigeren Feldstärken erkennbar, die Abstandsabhängigkeit wurde ebenfalls bestätigt [6]. Werden die Transitzeiten aus Bild 6 (links) bei 1 kV/mm auf große Ölstrecken übertragen, können sich Zeiten mit erhöhter Leitfähigkeit im Bereich von mehreren Minuten ergeben. Beim Umpolen ist wegen der vorherigen Dauerbeanspruchung so lange mit reduzierter Leitfähigkeit zu rechnen, bis die ansteigende Feldstärke im Öl wieder neue Leitfähigkeit generiert.

4 Materialpolarisation

4.1 Transiente Vorgänge

An einem geschichteten Isolationsmodell aus 2 x 1mm Board mit einem dazwischen liegenden Ölpalt von 2 mm wurden gemessene und simulierte Ströme verglichen, um die Qualität verschiedener Simulationsmodelle zu überprüfen [6], **Bild 7**. Einfache Materialmodelle aus jeweils einem R und C, die eine konstante Leitfähigkeit annehmen, ergeben im Anfangsbereich viel zu kleine Ströme, weil die Polarisationsstromanteile nicht berücksichtigt werden (a). Erst für lange Zeiten, wenn die Grenzflächenpolarisation dominiert, stimmen Messung und Simulation überein. Bessere Übereinstimmungen erhält man, indem die Materialien durch erweiterte lineare Netzwerke nach Bild 5 (links) beschrieben werden (b). Noch besser ist allerdings die Verwendung des Ölmodells nach Gl. (2) und (3), weil darin auch eventuelle Änderungen von Abstand oder Feldstärke berücksichtigt werden (c).

Das Verhalten der geschichteten Isolation kann mit der sog. „**Vier-Phasen-Theorie**“ beschrieben werden, **Bild 8**. In *Phase 1* werden die Kapazitäten C_B und C_O sehr schnell geladen. In *Phase 2* erfolgt eine weitere Nachladung von C_B über den Ölwiderstand, der zunächst noch von der Anfangsleitfähigkeit dominiert wird, die Ströme folgen der Ölkurve, Bild 5 (rechts). In *Phase 3* fließen Polarisationsströme, die den Elementen $R_j C_j$ zuzuordnen sind, die Ströme folgen der Board-Kurve, Bild 5 (links). In *Phase 4* ergibt sich der stationäre Strom aufgrund der Leitfähigkeiten.

4.2 Komplexe Isolationssysteme

Mit den in Kap. 4.1 diskutierten Simulationsmodellen wurden die Belastungen in einem **dreischichtigen Isolationssystem** aus Board (1 mm), Öl (2 mm) und einem Epoxidharzverbundwerkstoff (1 mm) simuliert, **Bild 9**. Als Belastungsprofil wurde das Zuschalten einer Gleichspannung mit einer mittleren Feldstärke von 1 kV/mm sowie das Umpolen nach 10.000 s gewählt. Die Materialmodelle wurden aus den in Kap. 3 beschriebenen Messungen abgeleitet.

Für das **klassische RC-** bzw. ϵ/κ -**Modell** ergibt sich nach dem Zuschalten die kapazitive Spannungsverteilung entsprechend der Dielektrizitätszahlen. Im transienten Übergangsvorgang wird das Öl ent- und die feste Isolation belastet. Die höchste Feldstärke ergibt sich unmittelbar beim Umpolen im Öl durch den doppelten Spannungshub, Bild 9 (links).

Simulationen mit den **erweiterten Materialmodellen** ergeben ähnliche Verhältnisse, Bild 9 (rechts). Nach dem Zuschalten der Spannung erfolgt die Entlastung des Ölspaltes jedoch verzögert, weil in den festen Materialien *höhere Polarisationsströme* fließen, die am Ölspalt Spannungsabfälle verursachen. Unmittelbar nach dem Umpolen wird dadurch die Belastung im Öl etwas reduziert, weil der Ausgangszustand vor dem Umpolen bei etwas negativeren Feldstärken lag.

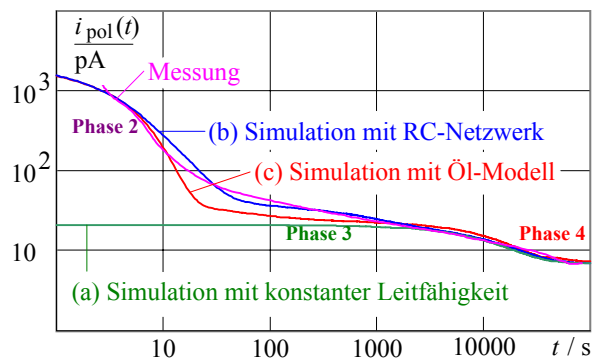


Bild 7 Vergleich gemessener und simulierter Polarisationsströme in einer geschichteten Isolation.

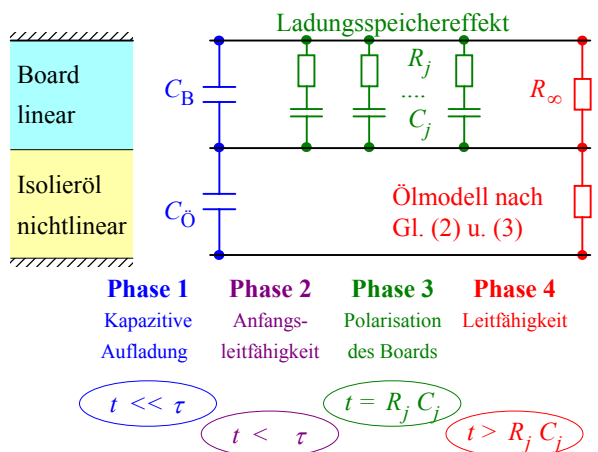


Bild 8 Vier-Phasen-Theorie für Polarisationsstrom.

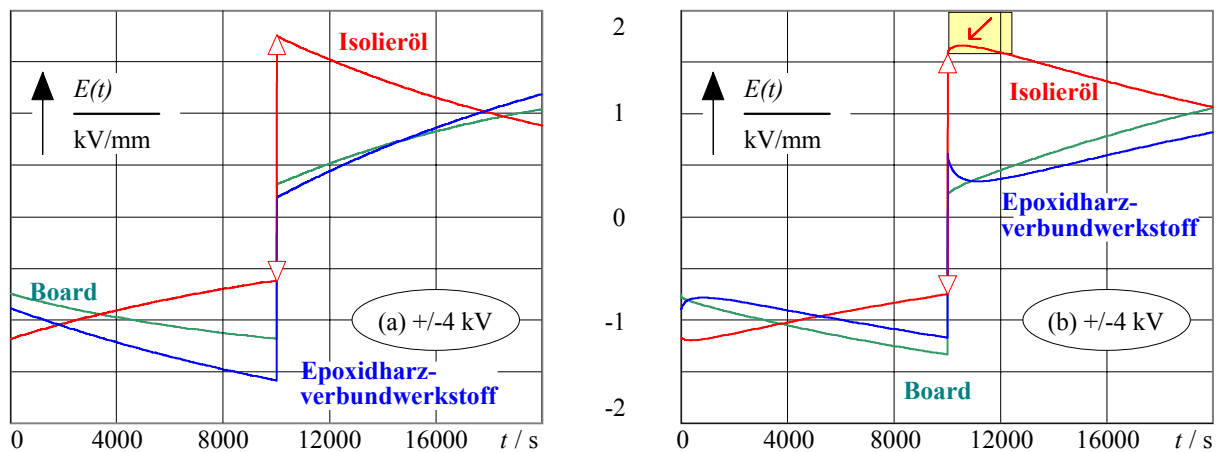


Bild 9 Simulation von transienten Belastungen in einem geschichteten Isolationssystem für das klassische RC-Modell (links) und für das erweiterte Simulationsmodell nach Bild 5.

Allerdings ergibt sich dann im anschließenden transienten Übergangsvorgang eine *bisher nicht bekannte Erhöhung und Verlängerung der Feldstärkebelastung im Öl*, Bild 9 (rechts), vgl. Pfeil. Sie ist darauf zurückzuführen, dass für die Polarisation der festen Isolation erhöhte Ströme auch über den Ölspalt fließen müssen und damit eine höhere Feldstärke im Öl hervorrufen. Im Bild des Netzwerkmodells nach Bild 5 bzw. 8 heißt dies, dass die Auf- bzw. Umladung der R_jC_j -Glieder, die für Polarisationsmechanismen stehen, *zusätzliche Ströme* und am Widerstand des Ölspaltes erhöhte Spannungsabfälle verursacht.

5 Schlussfolgerungen

Beim Zuschalten, Ändern oder Umpolen von Gleichspannungen können sich in HGÜ-Isolationssystemen Feldverschiebungen (Migrationen) und Belastungsspitzen ergeben, die aus den Anfangs- und Endwerten nicht erkennbar sind. Das Design muss deshalb einen ausgewogenen Kompromiss darstellen, um ganz **unterschiedliche Belastungsszenarien** bei Gleich-, Wechsel- und Umpolspannungen sowie in transienten Übergangszuständen zu beherrschen. Hierfür ist die Kenntnis des dielektrischen Verhaltens aller beteiligten Isolationmaterialien erforderlich, die unter vergleichbaren Bedingungen zu messen sind. Simulationen haben gezeigt, dass die **Grenzflächenpolarisation** aufgrund unterschiedlicher Leitfähigkeiten κ und unterschiedlicher Dielektrizitätszahlen ε als dominierender Prozess anzusehen ist. Eine genauere Betrachtung der **Materialpolarisation** und der nichtlinearen Öleigenschaften ergibt jedoch, dass die Belastungen der Ölspalte in den transienten Übergangsvorgängen

Danksagung:

Die Autoren danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung der Arbeiten (FKZ: aFuE 1701501).

etwas höher und länger andauernd sein können, als es das klassische RC- bzw. ε/κ -Modell erwarten lässt.

6 Referenzen

- [1] A. Küchler; *Hochspannungstechnik*; Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 2. Aufl. 2005
- [2] F. Hammer, A. Küchler; *Insulating Systems for HVDC Power Apparatus*; IEEE Transactions on Electrical Insulation; Vol. 27, No. 3, June 1992
- [3] A. Kuechler, M. Siller, C. Krause, H. Hoffmann, N. Koch, J. Hoppe, P. Heizing; *Transient Stress Management in HVDC Barrier-Oil Insulation Systems*; ISH 03 Int. Symp. on High Voltage Engineering, Delft, 2003
- [4] K.C. Wen, Y.B. Zhou, J. Fu, T. Jin; *A Calculation Method and some Features of Transient Field under Polarity Reversal Voltage in HVDC Insulation*; IEEE Transactions on Power Delivery, 1993
- [5] A. Lindroth; *The Relationship between Test and Service Stresses as a Function of Resistivity Ratio for HVDC Converter Transformers and Smoothing Reactors*; ELECTRA, 1994
- [6] A. Kuechler, F. Huellmandel, J. Hoppe, D. Jahnel, C. Krause, U. Piovan, N. Koch; *Impact of Dielectric Material Responses on the Performance of HVDC Power Transformer Insulations*; ISH 03 Int. Symp. on High Voltage Engineering, Delft, 2003
- [7] J.J. Alf, V. Der Houhanessian, W.S. Zaengl, A.J. Kachler; *A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis on Electric Power Apparatus*; IEEE Symp. on El. Insulation, Anaheim, USA, 2000
- [8] R. Tobazéon, J.C. Filippini, C. Marteau; *On the Measurement of the Conductivity of Highly Insulating Liquids*; IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insulation, Vol. 1 No. 6, Dec. 1994

Anschrift:

Prof. Dr.-Ing. A. Küchler, FHWS Schweinfurt, Hochspannungslabor, Ignaz-Schön-Str. 11, 97421 Schweinfurt, Tel. (09721) 940-840, Email: akuechler@fh-sw.de