

Peter Werle

Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen in Transformatoren mit innovativen Sensoren und adaptierten Verfahren der digitalen Signalverarbeitung



Cuvillier Verlag Göttingen





Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen in Transformatoren mit innovativen Sensoren und adaptierten Verfahren der digitalen Signalverarbeitung

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Peter Werle
geboren am 02. September 1968 in Hannover

2006



Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2006
Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2006
ISBN 3-86727-000-7

Referent: Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi
Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Borsi

Tag der Promotion: 13. Juli 2006

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2006
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2006
Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 3-86727-000-7



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energieversorgung und Hochspannungstechnik, Fachgebiet Hochspannungstechnik, Schering-Institut der Universität Hannover.

Mein aufrichtiger Dank gilt daher den Professoren des Schering-Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Hossein Borsi, die mir die Möglichkeit zur Promotion und damit zur fachlichen aber auch zur persönlichen Weiterentwicklung gegeben haben und dies in jeder Hinsicht großzügig förderten, unterstützten und durch ihre wertvollen Hinweise, Ratschläge und die umfangreichen Diskussionen diese Arbeit nachhaltig prägten.

Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Claudi vom Institut für Elektrische Energietechnik, Anlagen und Hochspannungstechnik der Universität Kassel, der als Korreferent dieser Arbeit besonderes Interesse entgegengebracht hat, und Herrn Prof. Dr. Karl R. Hofmann vom Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, Fachgebiet Bauelemente der Mikro- und Nanoelektronik der Universität Hannover für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Kollegen, meinen Studenten und studentischen Mitarbeitern, der Werkstatt und dem Sekretariat des Schering-Instituts bedanken, die wesentlich bei der Verwirklichung dieser Arbeit mitwirkten und immer zu einer angenehmen sowie durch Hilfsbereitschaft und Unterstützung geprägten Arbeitsatmosphäre beitrugen.

Für die Kooperation, die Anregungen sowie die Unterstützung aus dem industriellen Bereich gilt mein Dank den Firmen:

ABB AG, Division Energietechnik, Geschäftsbereich Transformatoren
AREVA, T & D, AREVA Schorch Transformatoren GmbH
E.ON Engineering GmbH
Siemens AG, Energieübertragung und -verteilung, Geschäftsgebiet Transformatoren
VA TECH ELIN Transformatoren GmbH & Co,

die vor allem bei der Realisierung der zum Gelingen der Arbeit notwendigen Messungen vor Ort hilfreich waren.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Eltern, die mir das Studium der Elektrotechnik ermöglichten, meiner Frau Sabine, nicht nur für das Korrekturlesen, sondern insbesondere auch für die unendliche Geduld und das Verständnis sowie den Rückhalt, der mir bei der Entstehung dieser Arbeit zuteil wurde, und natürlich meinen Kindern Philipp-Maximilian und Maya-Sophie, deren Ablenkungen beim Erstellen der schriftlichen Ausarbeitung stets willkommen waren, um die eigenen Prioritäten immer wieder zu überdenken.

Aufgrund der hervorragenden Zusammenarbeit und der außerordentlichen Erlebnisse wird mir die Zeit am Schering-Institut immer in besonderer Erinnerung bleiben, weshalb ich hoffe, dass die Kontakte zu den ehemaligen Kollegen und dem Schering-Institut auch zukünftig andauern werden.





Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen.....	VIII
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
Übersicht.....	1
Einleitung	2
1 Teilentladungsmessungen an Transformatoren.....	8
1.1 Theoretischer Hintergrund.....	8
1.1.1 Messtechnische Erfassung von Teilentladungen.....	13
1.2 Möglichkeiten zur Erkennung von Teilentladungen in Transformatoren.....	18
1.2.1 Elektrische Teilentladungsmessungen	20
1.2.1.1 Schmalbandige Messungen	20
1.2.1.2 Breitbandige Messungen	21
1.2.1.3 UHF-Methoden.....	22
1.2.2 Nichtelektrische Verfahren.....	23
1.2.2.1 Chemische Teilentladungsfeststellung	23
1.2.2.2 Akustische Teilentladungserfassung	24
1.2.2.3 Visuelle oder optische Teilentladungsbestimmung.....	25
1.2.3 Gegenüberstellung der Verfahren	26
1.3 Konzepte zur Teilentladungsüberwachung an Transformatoren	27
1.3.1 Gießharzisierte Trockentransformatoren	27
1.3.2 Flüssigkeits-feststoffisierte Transformatoren.....	29
2 Teilentladungen in gießharzisierten Trockentransformatoren.....	31
2.1 Konventionelle schmalbandige elektrische Teilentladungsmessungen.....	31
2.1.1 Messung an einem 400 kVA Gießharztransformator vor Ort.....	32
2.1.2 Messung an einem 2000 kVA Gießharztransformator vor Ort.....	39
2.1.3 Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen Teilentladungsmessung	42
2.2 Neues System zur Erfassung und Auswertung von Teilentladungen	44
2.2.1 Grundlegende Untersuchungen	45
2.2.1.1 Versuchsanordnung	45
2.2.1.2 Diskussion der Ergebnisse.....	46
2.2.2 Messungen im Prüffeld	51
2.2.2.1 Messungen an einer gießharzisierten Wicklung	51
2.2.2.2 Messungen an einem 400 kVA Gießharztransformator	58
2.2.3 Vor- und Nachteile des neuen Teilentladungsmesssystems.....	62
2.3 Überwachung von Teilentladungsfolgerscheinungen	63
2.3.1 Neues Überwachungssystem.....	65
2.3.1.1 Grundlegende Untersuchungen	66
2.3.1.2 Technische Realisierung.....	70
2.3.1.3 Vor- und Nachteile der vorgestellten Überwachungsmethode.....	72



3	Teilentladungen in flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren	74
3.1	Teilentladungsanalyse mit Methoden der Mustererkennung	74
3.1.1	Ausgewählte Verfahren der Mustererkennung	74
3.1.1.1	Clusteranalyse	76
3.1.1.2	Neuronale Netze	79
3.1.2	Fehlerortidentifikation mit Mustererkennungsverfahren	82
3.1.2.1	Versuchsanordnung	82
3.1.2.2	Analyse der Mustersignale	84
3.1.3	Beurteilung des Einsatzes von Mustererkennungsverfahren	86
3.2	Neues Verfahren zur Evaluierung von Teilentladungen	88
3.2.1	Versuchsanordnung fundamentaler Untersuchungen	89
3.2.1.1	Messtechnische Erfassung der Übertragungsfunktionen	91
3.2.2	Eignung des Verfahrens zur Fehlerlokalisierung	97
3.2.2.1	Einfluss der Frequenzbandbreite	101
3.2.2.2	Einsatz von neuronalen Netzen	107
3.2.2.3	Ortung durch Signalamplitudenvergleich	111
3.2.3	Eignung des Verfahrens zur Bestimmung der scheinbaren Ladung	118
3.2.4	Vor- und Nachteile des vorgestellten Verfahrens	121
4	Berechnung der Teilübertragungsfunktionen von Transformatorwicklungen	123
4.1	Hochfrequenzmodellierung von Transformatorwicklungen	124
4.1.1	Methoden der Optimierung	124
4.1.2	Modell mit diskreten Parametern	126
4.1.2.1	Eignung des Modells	128
4.1.3	Infinitesimalmodell	131
4.1.3.1	Eignung des Modells	133
4.1.4	Black-Box Modell	135
4.1.4.1	Eignung des Modells	138
4.2	Gegenüberstellung der Modellierungstechniken	140
5	Störsignalunterdrückung bei breitbandigen elektrischen Teilentladungsmessungen vor Ort	143
5.1	Möglichkeiten zur Minimierung der Störsignaleinkopplung	143
5.2	Unterdrückung von kontinuierlichen Störsignalen	145
5.2.1	Rauschsignalfilter	146
5.2.1.1	Grundlagen der Wavelet-Transformation	146
5.2.1.2	Wavelet-Filter	152
5.2.1.3	Eignung der Wavelet-Filtertechniken	154
5.2.2	Filterung von sinusförmigen Störsignalen	157
5.2.2.1	Direkter Frequenzsperrfilter im Frequenzbereich	159
5.2.2.2	Eignung der Frequenzsperrfiltertechniken	162
5.3	Unterdrückung impulsförmiger Störsignale	168
5.3.1	Impulsdetektionsverfahren	168
5.3.2	Ausblendung netzsynchroner Störimpulse	169
5.3.3	Unterdrückung stochastischer Störimpulse	170
5.3.3.1	Systemtheoretischer Ansatz zur Störimpulserkennung	171
5.4	Abschließende Betrachtungen zur Störsignalunterdrückung	172



6	Teilentladungserfassungs- und -analysesystem für Transformatoren im Betrieb ...	174
6.1	Aufbau und Struktur des entwickelten Systems	174
6.2	Einsatz des Systems vor Ort	177
6.2.1	Messungen an einem 40 MVA Transformator.....	177
6.2.2	Messungen an einem 90 MVA Maschinentransformator.....	182
6.2.3	Messungen an einem 520 MVA Maschinentransformator.....	185
6.3	Möglichkeiten und Grenzen des vorgestellten Systems	188
	Zusammenfassung	190
	Literaturverzeichnis	195
	Zitierte Normen, technische Regelwerke und Patente	217
	Lebenslauf	

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen und Formelzeichen

Allgemeine Abkürzungen

AKV	Ankopplungsvierpol
AM	Amplitudenmoduliert
Akku	Akkumulator
DF	Durchführung
DSO	Digitales Speicheroszilloskop
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GIL	Gasisolierte Leitung
GIS	Gasisolierte Schaltanlage
HF	Hochfrequenz
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
KLWL	Kunststofflichtwellenleiter
LWL	Lichtwellenleiter
NF	Niederfrequenz oder Netzfrequenz
NRSR	Stör- zu Referenzsignalenergieverhältnis (Noise to Reference Signal Ratio)
NSR	Stör- zu Nutzsinalenergieverhältnis (Noise to Signal Ratio)
PTC	Positiver Temperaturkoeffizient (Positive Temperature Coefficient)
SNR	Nutz- zu Störsignalenergieverhältnis (Signal to Noise Ratio)
SP	Sternpunkt
TE	Teilentladung
UHF	Ultrahochfrequenz (300 MHz – 3 GHz)
UV	Ultraviolette Strahlung
WS	Windungsschluss

Methoden und Funktionen

BPG	Backpropagation
bior	Biorthogonale Wavelets
CWT	Kontinuierliche Wavelet-Transformation (Continuous Wavelet Transform)
coif	Coiflet Wavelets
DFSF	Direkter Frequenzsperrfilter im Frequenzbereich
DWT	Diskrete Wavelet-Transformation
db	Daubechies Wavelets
FDS	Frequenzabhängigkeit des dielektrischen Verlustfaktors (Frequency Domain Spectroscopy)
FFT	Schnelle Fourier Transformation (Fast Fourier Transform)
FIR	Endliche Impulsantwort (Finite Impulse Response)
FRA	Frequenzgangbestimmung (Frequency Response Analysis)
FSF	Frequenzsperrfilter im Frequenzbereich
FWT	Schnelle Wavelet-Transformation (Fast Wavelet Transform)
FWTF	Schneller Wavelet-Transformationsfilter (Fast Wavelet Transform Filter)
IDWT	Inverse Diskrete Wavelet-Transformation
IIR	Unendliche Impulsantwort (Infinite Impulse Response)

IRA	Impulsantwort (Impulse Response Analysis)
KKK	Kosinus-Korrelationskoeffizient
MLBR	Skalierungsfaktorbestimmungsmethode (Multi Level Based Rescaling)
MRA	Mehrfachauflösung (Multi Resolution Analysis)
NKK	Normierter Korrelationskoeffizient
PDC	Polarisations-Depolarisationsstromanalyse (Polarisation Depolarisation Current)
PMK	Pearsons-Produkt-Momentkorrelation
QProp	Quick Propagation
RProp	Resilent Propagation
RVM	Analyse der Wiederkehrenden Spannung (Recovery Voltage Measurement)
SLBR	Skalierungsfaktorbestimmungsmethode (Single Level Based Rescaling)
SRA	Sprungantwort (Step Response Analysis)
SURE	Stein's Unbiased Risk Estimate
SuperSAB	Super Scaling Adaptive Backpropagation
sym	Symlet Wavelets

Formelzeichen

\mathcal{L}	Laplace-Transformation
α	Interclusterdistanzrekursionsparameter, Winkel, Exponent
β	Interclusterdistanzrekursionsparameter, Koeffizient
γ	Interclusterdistanzrekursionsparameter, Exponent
δ	Interclusterdistanzrekursionsparameter, Verlustwinkel, Parameter, Schwellwert
ε	Dielektrizitätszahl
λ	Exponent
ω	Kreisfrequenz, Koeffizient
φ	Phasenwinkel, Potenzial, Skalierungsfunktion
Φ	Lichtfluss, magnetischer Fluss
Ψ	Wavelet-Funktion
A	Fläche, Menge, Koeffizient
a	Koeffizient, Skalierungsfaktor
B	Koeffizient
b	Breite, Koeffizient, Translation
C	Kapazität
c	Cluster, Clusterumfang, Koeffizient
D	Index für Durchführung
d	Distanz, Koeffizient
E	Energie
e	Euklidische Zahl
F	Funkenstrecke
f	Frequenz, Funktion
f_g	Grenzfrequenz
G	Leitwert
g	Koeffizient



H	Komplexe Übertragungsfunktion
h	Höhe, Teilübertragungsfunktion, Filterkoeffizient
i	Stromverlauf, Index
j	Imaginäranteil, Index, Exponent
k	Konstante
L	Induktivität
l	Länge
M	Gegeninduktivität
m	Objektanzahl, Elementanzahl, Exponent
N	Anzahl
n	Anzahl, Merkmalsanzahl, Exponent
p	Exponent
q	Ladung
R	Widerstand
r	Radius
r_a	Außenradius
r_i	Innenradius
S	Index für Sternpunkt
s	Komplexe Zahl, Index
TF	Komplexe Übertragungsfunktion (Transfer Function)
t	Zeit
u	Spannungsverlauf
U	Spannung
U_L	Löschspannung
U_Z	Zündspannung
V	Vektorraum
W	Wavelet Transformation, Vektorraum
X	Signal im Bildbereich
x	Muster, Signal, Objekt, Parameter
y	Ausgangsfunktion
Z	Komplexe Impedanz

Kurzfassung

Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen in Transformatoren mit innovativen Sensoren und adaptierten Verfahren der digitalen Signalverarbeitung

Schlagworte: Transformatoren - Trockentransformatoren - Diagnoseverfahren - Teilentladungen - Übertragungsfunktionen - Monitoring

Transformatoren gehören zu den kostenintensivsten und relevantesten Komponenten in Energieübertragungs- und Verteilungssystemen, weshalb Methoden zur Zustandsdiagnose im Hinblick auf die zunehmende Altersstruktur der Transformatoren sowie die stattfindende Liberalisierung der Energiemärkte und den damit verbundenen Maßnahmen zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zunehmende Bedeutung erlangen. Ein empfindliches Verfahren zur Beurteilung des Isolierungszustandes von Hochspannungsgeräten stellt die Messung von Teilentladungen (TE) dar, weshalb in der vorliegenden Arbeit neue Methoden zur TE-Erfassung und Evaluierung vorgestellt werden, die jeweils speziell an die weltweit am häufigsten eingesetzten Transformator-kategorien, Trocken- und flüssigkeits-feststoffisolierte Transformatoren, angepasst wurden.

Für Trockentransformatoren mit einer Gießharzisolierung erfolgt basierend auf einer neu entwickelten Sensortechnik die Vorstellung eines Mehrstellenauskopplungssystems, welches durch einen Vergleich der quasi simultan aufgenommenen Signale eine im Gegensatz zu bislang verwendeten Techniken exaktere Ortung der TE-Quelle sowie eine präzisere Ladungsbestimmung erlaubt. Um zudem die durch TE-Aktivität initiierte Isolierstoffdegradation in einem frühzeitigen Stadium zu erkennen, bevor es zu einem schwerwiegenden Ausfall kommt, wurde ein online Schutzsystem realisiert, welches einen Kunststofflichtwellenleitersensor zur Fehlerstellendetektion verwendet und mittlerweile an mehr als 50 Gießharztransformatoren installiert ist und bereits einige Einheiten vor gravierenden Schäden bewahren konnte.

An flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren wurde ein neuartiges Konzept des TE-Monitorings entwickelt, das durch eine innovative Signalauskopplung kombiniert mit optischer Signalübertragung und einer Signalaufbereitung durch adaptive digitale Filter eine effiziente Unterdrückung von vor Ort auftretenden Störsignalen erlaubt, wobei kontinuierliche Störsignale durch Frequenzsperrfilter im Frequenzbereich sowie durch Wavelet-Filter unterdrückt werden, während stochastisch entstehende impulsförmige Störungen durch eine Ortung der TE-Quelle zu separieren sind. Das Ortungsprinzip beruht dabei auf der gleichzeitigen Messung der TE-Signale an Durchführung und Sternpunkt und deren Zurückberechnung an den Entstehungsort mittels der Teilübertragungsfunktionen der Transformatorwicklungen, wodurch der TE-Signalverlauf am Entstehungsort berücksichtigt werden kann, was eine genauere Ladungsbestimmung als mit anderen breitbandigen Verfahren ermöglicht. Dies wurde an Messungen von unterschiedlichen TE-Signalen an einem Verteiltransformator im Labor nachgewiesen, wobei durch den Einsatz des Verfahrens an verschiedenen Transformatoren im Betrieb die Eignung des Systems verifiziert und optimiert werden konnte, so dass inzwischen eine partielle markttechnische Umsetzung des Systems erfolgte.

Abstract

Detection and Evaluation of Partial Discharges on Transformers using Innovative Sensor Technologies and Enhanced Digital Signal Processing Tools

Key-words: Power transformers - dry-type transformers - diagnostics
partial discharges - transfer function - monitoring

Transformers belong to the most important and expensive components in energy transmission and supply systems wherefore condition assessment methods becomes increasingly essential in order to improve their reliability and profitability. Both is with regard to the fact that the mayor part of the transformers have reached or respectively exceeded their design age as well as due to the liberalisation of the energy supply market indispensable.

Partial discharge (PD) measurements represent an established method for assessing the insulation condition of high voltage apparatus, thus in this thesis new methods for the detection and evaluation of PD signals are introduced especially for the use on dry type and paper-liquid insulated power transformers.

For dry type transformers insulated by epoxy resin a multi-PD-decoupling system has been developed, which uses a new sensor technology in order to detect the PD signals on various points on a transformer coil, thus allowing a PD localisation and a more precise determination of the apparent charge of a PD pulse in comparison to conventional techniques. Furthermore an online protection system has been realised, which uses a fibre optic sensor for the recognition of defects inside the solid insulation initiated by PD activity, wherefore this system has been installed in the meantime on more than 50 dry type power transformers and could prevent some units from serious damages.

For paper-liquid insulated transformers a PD detection and analysing system is introduced, which allows an efficient suppression of noises as they appear during measurements on-site due to the use of an improved signal decoupling and optical signal transmission combined with self adjusting digital filters. Continuous noises are separated by frequency rejection filters in the frequency domain and wavelet-filters, while stochastically appearing noise pulses can be suppressed by an impulse localisation. Therefore the PD signals are measured simultaneously at the bushing and at the neutral and mapped to their origins using the sectional winding transfer functions of the transformer coils. This visualises the PD shape at their source, thus a more precise determination of the apparent charge than with any other method using a wideband PD evaluation is possible, which has been verified on a distribution transformer in the laboratory.

This system has been improved during various PD measurements on transformers in operation leading in the meanwhile to a partial commercialisation of the system.



Übersicht

In der vorliegenden Arbeit wird über die Erfassung und Evaluierung von Teilentladungen an Transformatoren im Netz und im Prüffeld berichtet, wobei innovative Sensortechniken sowie an die jeweiligen Gegebenheiten angepasste adaptive Verfahren der digitalen Signalverarbeitung eingesetzt werden, mit dem Ziel Teilentladungen (TE) von den bei Messungen vor Ort auftretenden Störsignalen zu separieren und eine Lokalisierung der TE-Quelle zu erreichen. Dabei werden Trocken- und flüssigkeits-feststoffisolierte Transformatoren getrennt betrachtet, um für jedes dieser komplexen Systeme möglichst optimal angepasste TE-Monitoring- und Diagnosemethoden zu entwickeln.

Nach einer kurzen Einführung in die Problemstellung, in welcher die Notwendigkeit von Methoden zur Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren durch eine TE-Bewertung erörtert wird, erfolgt zunächst eine Darlegung der Grundlagen der TE-Messtechnik unter besonderer Berücksichtigung der Möglichkeiten zur TE-Erfassung an Transformatoren, wobei aus einem Vergleich der diskutierten Methoden ein Konzept zur TE-Überwachung und Auswertung für die genannten Transformatorenarten erarbeitet wird.

In Kapitel 2 findet basierend auf Erfahrungen von TE-Messungen an Trockentransformatoren vor Ort die Vorstellung eines neuartigen TE-Erfassungs- und Evaluierungssystems statt, welches durch den Einsatz von quasi simultaner Mehrstellenauskopplung durch eine speziell entwickelte Sensortechnologie eine Ortung der TE-Quelle und eine gleichzeitige Ladungsbestimmung erlaubt. Ferner erfolgt aus den Beobachtungen der Feststoffisolierungsdegradation infolge von TE-Aktivität die Realisierung eines online Schutzsystems für Gießharztransformatoren und eine Beschreibung der Erfahrungen, die mit diesem Konzept erzielt wurden.

In den Kapiteln 3 bis 6 wird ein modernes TE-Monitoring-System für flüssigkeits-feststoffisolierte Transformatoren vorgestellt, wobei zunächst anhand von Messungen unterschiedlicher TE-Signale an einem Verteiltransformator im Labor ein neues Verfahren zur TE-Lokalisierung erprobt wird, welches durch gleichzeitige Auskopplung der TE-Signale an Durchführung und Sternpunkt und deren Korrelation mit den Teilübertragungsfunktionen der Transformatorwicklungen eine Lokalisierung ermöglicht, indem der TE-Signalverlauf am Entstehungsort nachgebildet wird.

Methoden zur Bestimmung der Teilübertragungsfunktionen sind Gegenstand des vierten Kapitels, in welchem verschiedene Modelle und Ansätze verifiziert werden, um ein geeignetes Verfahren zu ermitteln.

Daran anschließend werden Methoden zur Unterdrückung der bei vor Ort auftretenden Störsignale untersucht, wobei dargelegt wird, dass durch ein neu entwickeltes Messkonzept kombiniert mit optimierten digitalen Filtern eine den jeweiligen Bedingungen angepasste Störunterdrückung erfolgen kann, welche eine weitgehende Erhaltung der Nutzsignalimpulsformen gewährleistet.

Die Effizienz des Systems wird abschließend in Kapitel 6 durch TE-Messungen an Leistungstransformatoren vor Ort demonstriert, wobei eine detaillierte Analyse der erfassten Signale erfolgt, die eine Bewertung des vorgestellten Systems und Empfehlungen für den zukünftigen Einsatz ermöglicht.

Einleitung

Die Liberalisierung und Deregulierung der Energiemärkte, die zur Zeit in vielen Ländern weltweit erfolgt, zwingt die Betreiber elektrischer Energieanlagen, besondere Maßnahmen bezüglich einer Erhöhung der Wirtschaftlichkeit zu ergreifen. Als wesentliche Ziele sind hier neben der Lastoptimierung der Komponenten vor allem die Verlängerung der Restnutzungsdauer der Betriebsmittel zu nennen, um so eine Minimierung von Neuinvestitionen zu erreichen [Bor-02a, Cla-02]. Zudem wird eine bedarfsgerechte Instandhaltung angestrebt, damit der hiermit verbundene Aufwand sowie das dazu benötigte Personal reduziert werden können, was sich ebenfalls positiv auf die Kostenstruktur auswirkt. Gerade der letzt genannte Aspekt birgt jedoch weitreichende Konsequenzen und Gefahren, da eine Reduzierung der Instandhaltungsmaßnahmen kombiniert mit dem Aufschub von Erneuerungen zu vermehrten Störungen der Betriebsmittel sowie zu unerwarteten und kostenintensiven Netzausfällen führen kann [Fan-02]. Daher sind Strategien erforderlich für ein effektives, lebenslanges Management für besonders empfindliche, wertvolle oder relevante Einheiten im Energieübertragungs- und -verteilungsnetz, die eine bessere Planung und ein optimiertes Handeln bei kritischen Zuständen erlauben [Wer-06]. Die Realisierung solcher Strategien kann durch den Einsatz moderner Technik unterstützt werden, insbesondere durch automatisierte Überwachungssysteme, die umfangreiche Informationen über die kontrollierten Komponenten sammeln und aufbereiten, womit eine Diagnose des Zustands der betreffenden Einheiten ermöglicht wird [Por-96]. Mit diesem Wissen kann eine zustandsorientierte und -basierte Planung erfolgen, weshalb die Entwicklung von Monitoring-Systemen in den letzten Jahren besondere Bedeutung erlangte. Diese Zielrichtung wird auch zukünftig verfolgt werden, da innovative Sensoren und Diagnosetechniken in die Überwachungssysteme integriert werden, um eine möglichst ganzheitliche Bewertung der Komponenten zu erreichen [Kach-97, Kach-00].

Eine besondere Stellung nehmen in diesem Zusammenhang Transformatoren ein [Jes-96, Luc-00], aufgrund der exponierten Lage in den Energienetzen sowie der hohen Kosten pro Einheit. Ein wesentliches Ziel im Bereich der Forschung und Entwicklung ist es daher, Monitoring-Systeme für Leistungstransformatoren umfassend, effektiv, intelligent und wirtschaftlich zu gestalten, wobei eine modulare Struktur solcher Systeme eine Anpassung an verschiedene Randbedingungen, wie beispielsweise die Kategorie oder strategische Relevanz des Transformators, gewährleisten soll.

Für ein kosteneffizientes Monitoring ist zunächst die Transformatorart ausschlaggebend, wobei im Wesentlichen zwischen Trockentransformatoren und den flüssigkeitsfeststoffisolierten Transformatoren unterschieden wird [VDE-0532/101, TRGS-616].

Bei Trockentransformatoren finden als Isolierungsmaterialien vor allem Epoxidharzformstoffe Anwendung, wenngleich es auch neuere Entwicklungen gibt, die Kunststoffe wie Polyethylen verwenden, was jedoch bislang kaum zum Einsatz kam [Jak-00, Leij-00]. Gasisolierte Transformatoren gehören ebenfalls zur Kategorie der Trockentransformatoren, jedoch sind diese nur in Spezialbereichen, wie beispielsweise im Bergbau, anzutreffen, weshalb diese Transformatorart aufgrund des marginalen Anteils bezogen auf den weltweiten

Gesamtrockentransformatorenbestand im Folgenden nicht weiter berücksichtigt werden soll. Die in den weiteren Erwägungen betrachteten Trockentransformatoren weisen eine Gießharzisolierung auf, welche nicht nur als elektrische Isolation dient, sondern zudem der eingegossenen Wicklung eine mechanische Festigkeit verleiht, wobei die einzelnen Windungen gegeneinander typischerweise mit Lack isoliert sind, da sich Lackdraht einfach und kostengünstig als Ausgangsmaterial herstellen lässt. Diese Art der Gießharztransformatoren, welche den Großteil der heute im Betrieb befindlichen Trockentransformatoren ausmacht, wird im Allgemeinen für Spannungen bis zu 36 kV und Leistungen bis zu ca. 40 MVA gefertigt, so dass diese Komponenten hauptsächlich im Energieverteilungsnetz zu finden sind. Die Begrenzungen auf relativ geringe Spannungen und Leistungen sind insbesondere darauf zurückzuführen, dass nicht beliebig dicke Isolierschichten lunkerfrei hergestellt werden können und die Wärmeleitfähigkeit des Gießharzes begrenzt ist [Bey-86], was einen wirtschaftlichen Einsatz von Gießharztransformatoren für höhere Spannungen oder Leistungen nur bedingt zulässt.

Die wesentlichen Vorteile der Trockentransformatoren gegenüber den flüssigkeits-feststoff-isolierten Transformatoren liegen in der besseren Umweltverträglichkeit, so dass kaum Restriktionen bezüglich des Aufstellungsortes bestehen, sowie in der weitgehenden Wartungsfreiheit der Komponenten, weshalb diese an vielen Stellen im Energieverteilungsnetz bevorzugt werden. Insbesondere im Bereich der regenerativen Energien, wie beispielsweise in offshore Windanlagen, erlangen die Trockentransformatoren zunehmende Bedeutung [Pes-03], da oftmals eine uneingeschränkte ökologische Unbedenklichkeit gewährleistet sein muss, so dass der Anteil an Trockentransformatoren zukünftig tendenziell steigen wird, wenngleich dieser zur Zeit in der Bundesrepublik Deutschland nur wenige Prozent beträgt [VDEW-98].

Gießharztransformatoren, die nur in geschlossenen Räumen betrieben werden, da die Isolierung unter anderem keine ausreichende Langzeit-UV-Stabilität sowie keine hinreichende Wetterbeständigkeit aufweist [Huir-89], kommen des Weiteren bevorzugt in großen Gebäuden zum Einsatz sowie im Bereich der Notstromversorgung von versorgungssensiblen Einrichtungen, wie beispielsweise Krankenhäusern, wo eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gewährleistet sein muss. Relevant für solche Einsatzgebiete sind zusätzlich zu den genannten Vorteilen die im Vergleich zu ölgefüllten Transformatoren besseren Löschmöglichkeiten durch die geringere Brandlast im Falle eines durch eine Fehlfunktion des Transformators verursachten Brandes, wobei hier Kollateralschäden an Gebäudeteilen und Einrichtungen entstehen können, die ein Vielfaches vom Anschaffungspreis des Transformators ausmachen und daher unbedingt verhindert werden müssen [HAZ-99].

Die genannten Beispiele für die Einsatzmöglichkeiten der Trockentransformatoren machen deutlich, dass eine erhöhte Zuverlässigkeit dieser Komponenten gewährleistet sein muss, da auch kleinere Reparaturen relativ aufwendig und kostenintensiv werden können, wenn diese beispielsweise in offshore Windenergiesystemen auftreten. Die Folgen eines Ausfalls im Bereich medizinischer Versorgung können dagegen noch weitaus gravierender sein und müssen daher durch besondere Überwachung des Betriebszustandes der Transformatoren möglichst ausgeschlossen werden. Bislang werden die Gießharztransformatoren aus Gründen der Kostenersparnis nur mit einfachen Sicherheitssystemen ausgestattet, obwohl die

Ausfallquote im Vergleich zu flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren bei Spannungsebenen bis zu 30 kV mindestens doppelt so hoch ist [VDEW-98].

In der Regel wird bei Gießharztransformatoren lediglich die Temperatur der Unterspannungsseite überwacht, die im Normalbetrieb höher ist als auf der Oberspannungsseite wegen des höheren Stroms und den damit verbundenen erhöhten ohmschen Verlusten sowie der in Bezug auf die Wärmeabfuhr ungünstigeren Lage der Unterspannungswicklung zwischen Kern und Oberspannungswicklung.

Einrichtungen zur Überwachung der Oberspannungsseite werden bislang nicht verwendet, obwohl oftmals hier ein Fehler durch die hohen Spannungen entstehen kann, der zu einem Ausfall der Komponente führt. Vor allem Teilentladungen (TE), welche lokal begrenzte Durchschläge infolge von Feldstärkeüberhöhungen darstellen [Bey-86], können in so genannten nicht selbstheilenden Isoliermedien, wie Feststoffen, die Isolierung durch das Vorwachsen von kleinen Kanälen aufbrechen, wodurch die Teilentladungsaktivität zunächst weiter ansteigt, was weitere Zerstörungen der Isolierung verursacht, bis es schließlich zu einem Versagen des Isoliersystems kommt. Diese Kettenreaktion kann nicht wie in selbstheilenden, aus Flüssigkeiten oder Gasen bestehenden Isolierungen, dadurch unterbrochen werden, dass sich die Fehlerstellen wieder mit umgebendem Isoliermedium füllen und somit eine Zunahme der Spannungsfestigkeit erreicht wird, weshalb eine Messung der TE-Aktivität eine Aussage über den aktuellen Zustand der Isolierung ermöglichen soll. Dies ist unter anderem auch der Grund für die Teilentladungsprüfungen [VDE-0434, IEC-60270] der Trockentransformatoren nach der Herstellung, wobei keine Teilentladungen über einem in der Norm definierten Pegel von 20 pC auftreten dürfen [VDE-0532/6, IEC-60726/1], was jedoch nicht ausschließt, dass eine erhöhte TE-Aktivität im späteren Betrieb vorkommt, da diese durch thermisch-elektrische Wechselbeanspruchungen initiiert werden kann [Bey-91, Bor-93]. Somit erlaubt nur eine kontinuierliche Überwachung der TE-Aktivität oder deren Auswirkungen eine Erhöhung der Betriebssicherheit, da dabei die Möglichkeit besteht, rechtzeitig entsprechende Maßnahmen einzuleiten, deren Effizienz signifikant verbessert werden kann, wenn ergänzend Informationen über den Fehlerort oder die Fehlerart vorliegen. Derzeit sind jedoch noch keine Systeme zur kontinuierlichen TE-Überwachung bzw. zur präzisen TE-Diagnose und Analyse verfügbar, so dass weitere Innovationen unter Berücksichtigung der voraussichtlichen Zunahme an installierten Gießharztransformatoren sinnvoll erscheinen.

Flüssigkeits-feststoffisolierte Transformatoren, die als Isolierung um die einzelnen Wicklungen Papier verwenden, wobei der gesamte Aktivteil in ein flüssiges Isoliermedium, häufig Mineralöl oder eine entsprechende Ersatzflüssigkeit wie z. B. synthetische Ester [Dum-98], eingebettet ist, welches nicht nur zur Isolierung, sondern auch zur Wärmeabfuhr genutzt wird, können für weitaus höhere Spannungen und Leistungen ausgelegt werden. Im Bereich hoher Spannungsebenen zwischen 60 und 400 kV bei Leistungen bis etwa 1 GVA nähert sich jedoch ein Großteil der im Betrieb befindlichen Transformatoren dem Ende des Auslegungsalters von zirka 30 Jahren bzw. hat dieses bereits erreicht, was exemplarisch in Bild 1 anhand der Altersstruktur des Gesamtbestandes an Transformatoren eines deutschen Energieversorgungsunternehmens (EVU) ersichtlich wird [Sta-02].

Mit zunehmenden Alter steigt die Fehlerrate der Transformatoren drastisch an [Ben-01], wobei ergänzend auch eine Zunahme der Fehlerrate mit steigender Spannungsebene beobachtet werden kann [Bos-83]. Hier besteht zusätzlich die Problematik, dass sich im Falle eines irreparablen Ausfalls eine Neuanschaffung nicht

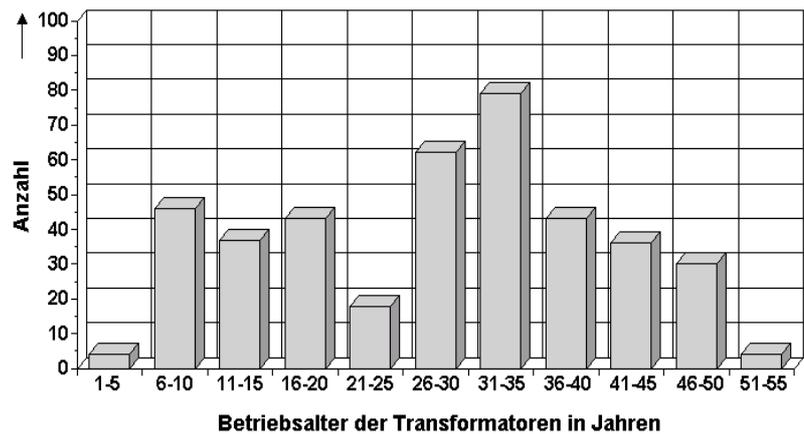


Bild 1: Alter der Transformatoren eines deutschen Energieversorgungsunternehmens [Sta-02]

nur kostenintensiv gestaltet, sondern zudem mit erheblichen Überbrückungszeiten gerechnet werden muss, da insbesondere Transformatoren höherer Spannungen und Leistungen nicht kurzfristig ersetzt werden können, so dass zusätzlich weitere Folgekosten, beispielsweise durch Produktionsausfall, entstehen können [Sei-02]. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit, das seit den zwanziger Jahren als Hauptschutzeinrichtung dienende Buchholz-Relais zur Akkumulation ungelöster Gase, welches eine Abschaltung des Transformators bei Überschreiten einer bestimmten durch Fehler im Transformator entstandenen Gasmenge oder eines unzulässigen Druckes bewirkt, um zusätzliche Kontrollmechanismen zu erweitern [Bor-98, Wer-99b]. Die erforderlichen Monitoring-Systeme müssen dabei vor allem an die Fehleranfälligkeit der einzelnen Komponenten der Transformatoren angepasst sein, um einen größtmöglichen Nutzen zu gewährleisten [Ten-02a, Bol-02a]. Ein Überblick über die Fehlerraten der einzelnen Transformatorbestandteile, welche zu einer Ausfallzeit von mehr als einem Tag führten [Bos-83], sowie der wesentlichsten aktuell eingesetzten Überwachungsmöglichkeiten sind Tabelle 1 zu entnehmen, aus der zu erkennen ist, dass mit zunehmender Fehleranfälligkeit einer Komponente auch umfassendere Überwachungsmaßnahmen angeboten werden, um verschiedenste Fehlerursachen zu erkennen bzw. durch die Summe der erfassten Parameter eine möglichst präzise Einschätzung zu erreichen [Ten-00].

Während die Systeme zur Überwachung von Kessel und Zusatzeinrichtungen, Durchführungen, sowie Stufenschaltern ausreichend erscheinen [Sun-02], sind zur Zustandsdiagnose von Wicklung, Isolierung und Kern zusätzlich offline Verfahren notwendig, also Methoden, die eine Abschaltung bzw. Trennung des Transformators vom Netz erfordern. Die während des Betriebs des Transformators online erfassten Größen wie Ströme, Spannungen, Temperatur und Heißpunkt [VDE-0532/102, IEC-60354] dienen vor allem zur Beurteilung der Lastverhältnisse und Alterungsprozesse [Ten-02b], während durch einen Vergleich der Transferfunktionen [Gock-99, Lei-96] oder transiente Öldruckmessungen [Pla-02a] mit so genannten Fingerprints, welche vorher aufgezeichnete Referenzwerte darstellen, eine Erkennung von Wicklungsanomalien erlauben. Die Bestimmung verschiedener Parameter des flüssigen Isoliermediums [Loh-04] sowie der sich im Buchholz-Relais sammelnden ungelösten Gase [Was-00] lässt nur bedingte Rückschlüsse auf den Isolierungszustand zu [Brä-02], was ebenfalls für die teilweise online realisierte Gas-in-Öl Analyse gilt [Mar-96,



Spa-99], weil die hierbei ermittelten Gasquotienten [VDE 0370/7, IEC-60599], welche mit verschiedenen Fehlerkriterien bewertet werden, wie beispielsweise dem MSS-Kriterium nach Müller, Schliesing und Soldner [Mül-74], nicht immer eindeutig sein müssen, da unterschiedliche Fehlerursachen ähnliche Gasquotienten ergeben können [Schr-94]. Als weiteres chemisches Verfahren ist die Furananalyse zu nennen, mit welcher der Depolymerisationsgrad des Papiers ermittelt werden kann, wobei dieser ein Maß für den Zustand und die Alterung des Isolierpapiers darstellt [Law-77, Mor-99]. Die Messung des Relaxationsstroms (PDC, Polarisation Depolarisation Current) [Hou-98, Lei-02], der Wiederkehrspannung (RVM, Recovery Voltage Measurement) [Pat-02, Urb-98] und des dielektrischen Verlustfaktors in Abhängigkeit der Frequenz (FDS, Frequency Domain Spectroscopy) [Gäf-98, Zae-03] kann aus verfahrenstechnischen Gründen nur offline durchgeführt werden und erlaubt eine Aussage über den Wassergehalt bzw. Alterung der Papierisolation, wobei diese vergleichsweise neuen Verfahren noch Gegenstand intensiver Forschungen sind [Bor-02b].

Tabelle 1: Fehlerraten einzelner Transformatorbestandteile mit dazugehörigen, möglichen Überwachungsmethoden bzw. kontrollierten Kenngrößen

Komponente	Fehlerrate	Überwachungsmethoden / kontrollierte Kenngrößen	
Kessel und Zusatzeinrichtungen	11 %	- Dichtigkeit - Pumpen und Lüfterzustände	online
Durchführung	14 %	- Überspannungen - Überströme - Öldruck - Durchführungskapazität	online
Wicklung, Isolierung und Kern	35 %	- Ströme, Spannungen - Temperaturen, Heißpunkt - Ölfeuchte - Gasmenge im Buchholz-Relais, Gasrate	online
		- Analyse der freien Gase - Gas-in-Öl Analyse - Transferfunktion - Teilentladungsmessung	i. d. R. offline
		- Furananalyse - Transiente Öldruckmessung - Relaxationsstrom (PDC) - Wiederkehrspannung (RVM) - Dielektrischer Verlustfaktor über der Frequenz (FDS)	offline
Stufenschalter	40 %	- Stufenschalterstellung - Anzahl der Schaltvorgänge - Schaltstromsumme - Abbrand der Schaltkontakte - Öltemperaturdifferenz zum Öl im Transformator-kessel - Leistungsaufnahme des Motorantriebs	online

Eine aussagekräftige Angabe über den aktuellen Zustand der Isolierung bzw. ein Indikator für einen zu erwartenden Ausfall des Transformators ist mit diesen Mitteln folglich nur eingeschränkt möglich, weshalb die Teilentladungsmessung als empfindliches Verfahren zur

Beurteilung des Isolierungszustandes unumgänglich ist. TE-Prüfungen werden deshalb auch bei flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren vor deren Auslieferung durchgeführt, wobei hier im Vergleich zu den Trockentransformatoren unter anderem auch wegen der Selbstheilungsfähigkeit der Papier-Flüssigkeitsisolierung ein wesentlich höherer TE-Pegel zulässig ist [VDE-0532/3, IEC-60076/3], wodurch aber eine erst später einsetzende TE-Aktivität infolge von Überbeanspruchungen oder zeitlicher Degradation der Isolierung nicht ausgeschlossen werden kann. Da es derzeit keine online TE-Messungen gibt, die eine gleichzeitige Aussage über die Größe der Teilentladungen sowie über den TE-Entstehungsort zulassen, kann keine kontinuierliche und umfassende TE-Diagnose erfolgen, welche jedoch dringend erforderlich für eine Gesamtbewertung des Isolationszustandes ist, weshalb auf diesem Gebiet weitere Entwicklungen notwendig sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, Verfahren zur optimierten Erfassung, Verarbeitung und Auswertung von Teilentladungen bzw. deren Auswirkungen zu entwickeln, die nicht nur eine Bestimmung der Teilentladungsgröße, sondern auch eine Abschätzung über deren Entstehungsort erlauben sollen. Dabei muss eine Anpassung an die Gegebenheiten bei Trockentransformatoren bzw. flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren erfolgen, wobei auch ökonomische Aspekte in Bezug auf die Realisierungskosten solcher Systeme im Vergleich zum Transformatoranschaffungspreis zu berücksichtigen sind. Ferner soll der Aspekt einer Integration in bestehende online Monitoring-Systeme beachtet werden, so dass eine automatische, kontinuierliche TE-Überwachung im Netzbetrieb erfolgen kann, wobei die Probleme, welche sich bei Messungen vor Ort ergeben, einbezogen werden sollen. Basierend auf Untersuchungen an Modellen im Labor sind daher zunächst geeignete Methoden zu entwickeln, die anschließend vor Ort überprüft werden müssen, um so weiterführende Assimilationen zu ermöglichen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen damit einen Beitrag zur Verbesserung der Zustandsdiagnose von Leistungstransformatoren leisten, was zu einer Erhöhung der Betriebszuverlässigkeit und Verbesserung der Wirtschaftlichkeit dieser Komponenten führt.

1 Teilentladungsmessungen an Transformatoren

In den folgenden Abschnitten sollen zunächst die zum weiteren Verständnis der Arbeit notwendigen Grundlagen über Teilentladungsphänomene erläutert werden, wobei basierend auf vereinfachten physikalischen Beschreibungen eine Herleitung der wesentlichsten, Teilentladungsvorgänge charakterisierenden Kenngrößen erfolgt. Darauf aufbauend werden verschiedene, dem Stand der Technik entsprechende Möglichkeiten zur TE-Erfassung und Auswertung vorgestellt und diskutiert, mit dem Ziel, die für die vorliegende Aufgabenstellung geeignet erscheinenden Verfahren zu ermitteln, wobei eine Auswahl der Methoden auch unter dem Gesichtspunkt der Anpassungsfähigkeit getrennt nach Trocken- und flüssigkeits-feststoffisolierten Transformatoren stattfindet.

1.1 Theoretischer Hintergrund

Unter dem Begriff Teilentladungen sind verschiedene phänomenologische Entladungserscheinungen zusammengefasst [Bey-86], wobei im Wesentlichen unterschieden wird zwischen:

- Entladungen an Spitzen oder Kanten in Gasen, so genannte Koronaentladungen,
- Entladungen in Hohlräumen innerhalb flüssiger oder fester Isolierstoffe und
- Entladungen an den Grenzschichten unterschiedlicher Isolierstoffe, so genannte Oberflächen- oder Gleitentladungen.

Treten derartige Entladungen im Inneren eines Gerätes oder einer Anlage auf, wird dies als innere Teilentladung bezeichnet, im Gegensatz zu äußeren Teilentladungen, die vor allem als Koronaentladungen an Hochspannungsfreileitungen Bedeutung erlangt haben, welche zu Verlusten und Funkstörungen führen.

Durch Teilentladungen, welche örtlich begrenzte, impulsförmige elektrische Entladungen darstellen, die infolge lokaler Überbeanspruchungen entstehen, wird die Isolationsstrecke zwischen zwei Elektroden nur teilweise überbrückt, so dass mit einem solchen Teildurchschlag kein vollständiges Versagen der Isolierung verbunden ist, wenngleich durch eine kontinuierliche, ortsfeste TE-Aktivität über einen längeren Zeitraum eine derartige Schädigung der Isolierung möglich ist, so dass es zu einem Durchschlag kommt [Por-96]. Die solche Teilentladungen initiiierenden Überbeanspruchungen können eine Folge von Inhomogenitäten oder Schwachstellen der Isolierung sein, welche lokale Feldstärkeüberhöhungen hervorrufen, die ursächlich für den Teildurchschlag sind.

Die hochfrequenten elektrischen Vorgänge, die mit inneren Teilentladungen verbunden sind, können anhand des von Gemant und Philippoff entwickelten Ersatzschaltbildes anschaulich beschrieben werden [Gem-32]. Ausgehend von der in Bild 1.1a gezeigten vereinfachten Darstellung einer Isolieranordnung als Kapazität bestehend aus einem flüssigen oder festen Isoliermedium, in dem eine gasgefüllte Fehlstelle vorhanden ist, kann basierend auf den das Dielektrikum beschreibenden Teilkapazitäten (Bild 1.1b) ein äquivalentes Ersatzschaltbild abgeleitet werden, welches in Bild 1.1c abgebildet ist. In diesem Ersatzschaltbild entspricht C_1 , der die Fehlstelle charakterisierende Hohlraumkapazität, während die Kondensatoren C_s

und C_p' die in Reihe bzw. parallel zur Fehlstelle liegenden resultierenden Kapazitäten des Dielektrikums repräsentieren. Die Funkenstrecke F entspricht im Prinzip einem spannungsgesteuerten, zunächst offenen Schalter, welcher bei Überschreiten eines definierten Spannungsbetrags kurzzeitig geschlossen wird, um den Durchschlag im Hohlraum zu imitieren, wobei der in Reihe zur Funkenstrecke abgebildete Widerstand R den Widerstand des Entladungskanals kennzeichnet und die Amplitude des Entladungsstroms begrenzt.

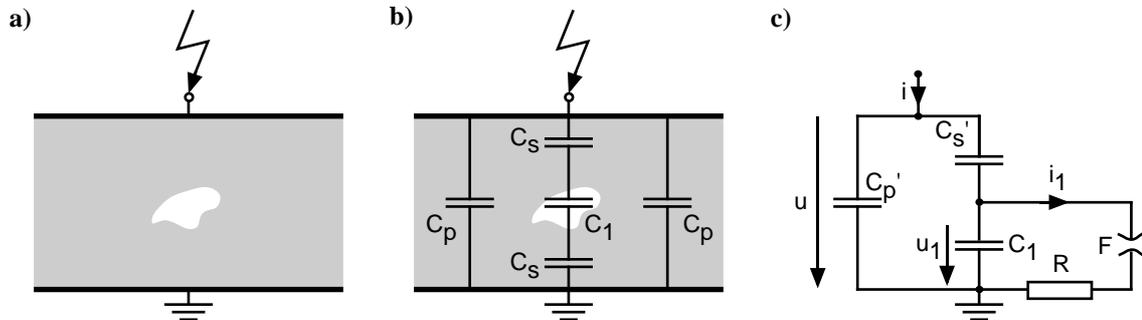


Bild 1.1: Modellierung einer Isolieranordnung mit Fehlstelle
a) Kondensator mit gasgefüllter Fehlstelle
b) Darstellung des Dielektrikums mit Teilkapazitäten
c) Kapazitives Ersatzschaltbild

Basierend auf einem solchen Ersatzschaltbild können die Spannungs- und Stromsignale an den einzelnen Bauelementen mit Hilfe von Analogschaltungssimulatoren wie beispielsweise PSpice [Duy-96, Orc-99, Tui-95] berechnet werden, so dass sich die in Bild 1.2 dargestellten Ergebnisse ergeben. In Bild 1.2a ist zunächst die an der Isolieranordnung anliegende Spannung $u(t)$ und die Spannung $u_1(t)$ gezeigt, die sich an der Hohlraumkapazität C_1 entsprechend dem Spannungsteiler mit den Kondensatoren C_s' und C_1 einstellt, sofern es nicht zu einem Durchschlag im Hohlraum kommt, so dass gilt:

$$u_1 = \frac{C_s'}{C_1 + C_s'} \cdot u. \quad (1.1)$$

Wird die Spannung nun erhöht, erfolgt eine der Gleichung 1.1 entsprechende Zunahme der Spannung u_1 , bis diese die Zündspannung U_Z überschreitet, so dass der Kondensator C_1 sich über den Widerstand R entlädt und die Spannung am Hohlraum auf den Wert der Löschspannung U_L absinkt [Kre-89]. Der Strom i_1 , der im Augenblick des Spannungszusammenbruchs fließt, ist in Bild 1.2c dargestellt und die im Hohlraum umgesetzte Ladung in Bild 1.2d, wobei die letzte Darstellung als Abszisse keine Zeitachse verwendet, sondern der Phasenwinkel φ benutzt wird, um ein so genanntes Phasenwinkel-Ladungs-Histogramm zu erstellen, welches bei der Beurteilung der TE-Art hilfreich sein kann, worauf noch näher eingegangen werden soll.

Unter der Voraussetzung, dass

$$C_p' \gg C_1 \gg C_s' \quad \text{mit } C_p' \approx \text{Gesamtkapazität } C \text{ der Isolieranordnung} \quad (1.2)$$

gilt, was bei den in der Regel kleinen Abmessungen des Hohlraums erfüllt ist, führt der durch i_1 hervorgerufene Spannungseinbruch Δu_1 an C_1 im Hohlraum zu einem charakteristischen

Ladungsumsatz Δq_1 der sich berechnen lässt zu:

$$\Delta q_1 = C_1 \cdot \Delta u_1 = i_1 \cdot \Delta t. \quad (1.3)$$

Diese Ladungsänderung kennzeichnet den so genannten wahren Teilentladungswert, welcher einer im Submikrosekundenbereich ablaufenden Verschiebung von elektrischer Ladung entspricht.

Da sich weder die Spannungsänderung Δu_1 noch der hochfrequente Strom i_1 an den Anschlussklemmen des Prüflings beobachten lassen, kann die Ladungsänderung Δq_1 nur über die durch eine Ladungsbilanz zu ermittelnde Spannungsänderung Δu am Prüfobjekt

$$\Delta u = \frac{C_s'}{C_p' + C_s'} \cdot \Delta u_1 \quad (1.4)$$

bestimmt werden zu:

$$\Delta q_1 = \frac{C_1 \cdot (C_p' + C_s')}{C_s'} \cdot \Delta u. \quad (1.5)$$

In dieser Gleichung sind jedoch die Größen C_1 und C_s' unbekannt, lediglich die Kapazität C_p' kann durch eine Messung ermittelt werden, da diese in etwa mit der Gesamtkapazität der Isolieranordnung entsprechend Gleichung 1.2 übereinstimmen muss. Zudem ist eine Erfassung der Spannungsänderung Δu schwierig, aufgrund des kleinen Verhältnisses von u zu Δu , da folgender Zusammenhang entsprechend den dargelegten Gleichungen 1.1, 1.2 und 1.4 gilt:

$$u \gg u_1 \gg \Delta u. \quad (1.6)$$

Die wahre Ladung lässt sich daher nicht ermitteln, so dass eine andere messbare Größe eingeführt werden muss, um die

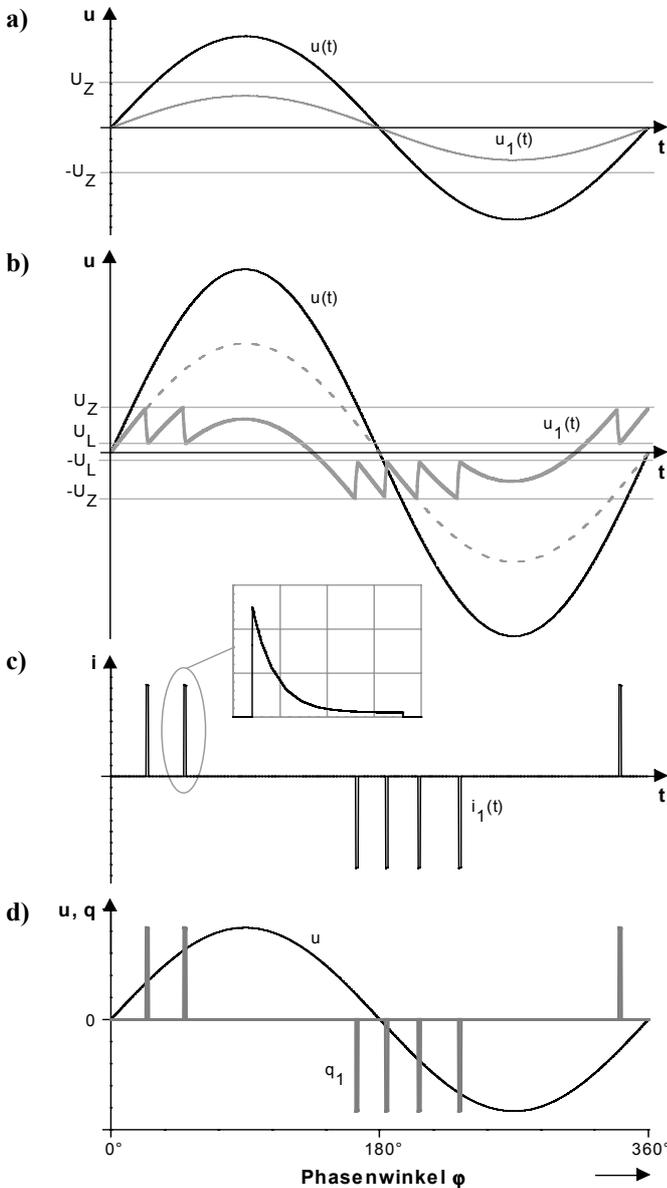


Bild 1.2: Spannungs-, Strom- und Ladungsverlauf bei inneren TE

- a) Spannungsverläufe ohne Teildurchschlag
- b) Spannungsverläufe mit Teildurchschlägen
- c) Stromverlauf bei Teildurchschlägen
- d) Phasenwinkel-Ladungs-Histogramm

Teilentladung bzw. deren Pegel zu beschreiben.

Da im Realfall das Prüfobjekt mit einer Spannungsquelle verbunden ist, welche den Spannungseinbruch Δu kurzfristig ausgleicht, wobei die Geschwindigkeit dieses hochfrequenten Ausgleichsvorgangs durch eine parallel zum Prüfling geschaltete Koppelkapazität C_k erhöht werden kann, kommt es, wie in Bild 1.3 gezeigt, zu einem messbaren Kreisstrom i_{TE} , dessen transportierte Ladung als scheinbare Ladung q bezeichnet wird. Der