

Diagnose von Leistungstransformatoren durch Rückkehrspannungs- und Teilentladungsmessungen – Neue Methoden zur Auswertung der Messdaten

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informatik
der Universität Siegen
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertationsschrift

von

Diplom-Ingenieur Johannes Menzel

- 1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Rainer Patsch
- 2. Gutachter: O. Univ.-Prof. Dr. techn. Dr. h.c. Michael Muhr

Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2009

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Abstract	VII
1 Einführung	1
2 Rückkehrspannungsmessungen	3
2.1 Zielsetzung	3
2.2 Prinzip	3
2.3 Aktueller Stand der Entwicklung	4
2.3.1 Polarisationspektrum	4
2.3.2 Rückkehrspannungsmessung mit konstanter Kurzschlusszeit	6
2.4 Modell für ein zwei-Komponenten-Isoliersystem	7
2.4.1 Isoliersystem von Öltransformatoren	8
2.4.2 Modell für Polarisation und Depolarisation	10
2.4.3 Grundlegende Betrachtungen	11
2.4.4 Elektrische Äquivalenz der Ersatzschaltbilder	15
2.4.5 Analytische Beschreibung des Systems	16
2.4.6 Ermittlung von Kurvenform-Parametern	20
2.4.7 Einfluss des Messwiderstandes auf die Zeitkonstanten	23
2.4.8 Einfluss einer Parallelkapazität auf die Zeitkonstanten	24
2.4.9 Parallelschaltung mehrerer Systeme	26
2.4.10 U_m im Polarisationspektrum	27
2.5 Neue Ansätze zur Auswertung von Messdaten	28
2.5.1 Ermittlung der Zeitkonstanten	28
2.5.2 Vergleich der Messkurve mit einem Fit	36
2.5.3 Darstellung der Zeitkonstanten über dem Kurvenverlauf	37

2.6	Messergebnisse	40
2.6.1	Messgeräte	40
2.6.2	Durchführung der Messungen	41
2.6.3	Auswertung der Messdaten	42
2.6.4	Einfluss von Wartung und Reparatur	43
2.6.5	Messungen an 630 kVA-Versorgungstransformatoren	45
2.6.6	Einfluss einer Parallelkapazität	48
2.6.7	Messungen an einem 100 MVA-Leistungstransformator	51
2.7	Einfluss der Temperatur auf die Rückkehrspannung	52
2.7.1	Thermisch aktivierte Leitprozesse	53
2.7.2	Bestätigung der Modellbildung	57
2.8	Vergleichende Simulationsrechnungen	58
2.9	Zusammenfassung	61
3	Teilentladungen in Isolierölen	65
3.1	Zielsetzung	65
3.2	Messverfahren	67
3.3	Auswertung von TE-Messdaten	69
3.3.1	Pulsfolgenanalyse (<i>Pulse Sequence Analysis</i> , PSA)	72
3.3.2	Pulsformanalyse (<i>Pulse Shape Analysis</i>)	74
3.3.3	Darstellung von Parametern und Parameterkombinationen	78
3.4	Messergebnisse	79
3.4.1	Verwendete Messanordnungen	80
3.4.2	Ergänzende Messungen	83
3.4.3	Ölproben	84
3.4.4	Durchführung der Teilentladungsmessungen	84
3.4.5	Auswertung anhand einfacher Parameter	85
3.4.6	Auswertung anhand der Kurvenformparameter	88
3.5	Zusammenfassung	115
4	Fazit und Ausblick	117
	Literaturverzeichnis	119

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit am Institut für *Werkstoffe der Elektrotechnik und Diagnostik (WED)* an der Universität Siegen im Zeitraum September 2003 bis Juli 2009.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Rainer Patsch, dem Leiter des Institutes WED, der meine Arbeit betreut hat und der ein guter, menschlicher Vorgesetzter war. Des weiteren möchte ich meinen ehemaligen Kollegen, Herrn Dipl.-Ing. Oleg Kouzmine und Herrn Dr.-Ing. Djamal Benzerouk, dem Laboringenieur des Instituts, Herrn Dipl.-Ing. Burkhard Meier, sowie unserer Sekretärin, Frau Waltraud Setzer, für die hervorragende Zusammenarbeit und eine schöne Zeit danken. Auch möchte ich den ehemaligen Mitarbeitern des Instituts danken, besonders Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Hoof für viele anregende Fachdiskussionen.

Mein Dank richtet sich auch an den Zweitgutachter, Herrn Prof. Dr. techn. Dr. h.c. Michael Muhr, an den Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. Mario Pacas, der bereits vor Jahren meine Studien- und Diplomarbeiten betreut hat und somit ein ständiger Begleiter war, sowie an die Prüfungskommission.

Außerdem danke ich den vielen Menschen, die auf vielfältige Weise direkt oder indirekt an der Entstehung dieser Arbeit beteiligt waren, für deren individuelle Nennung hier jedoch kein Platz ist: Den Professoren und aktuellen und ehemaligen wissenschaftlichen wie technischen Mitarbeitern der Nachbarinstitute, speziell der Institute für *Leistungselektronik und Elektrische Antriebe (LEA)*, *Elektrische Energieversorgung (EEV)* und *Theoretische Elektrotechnik und Photonik (ITP)*, die gute Gesprächs- und Diskussionspartner waren.

Besonderer Dank geht auch an Herrn Dieter Kamenka von der Firma sebaKMT für die umfangreiche Unterstützung im Rahmen dieser Arbeit und einer Reihe gemeinsamer Veröffentlichungen sowie Herrn Harald Jung und seinen Mitarbeitern vom Dezernat 5 (Betriebstechnik) der Universität Siegen für die Möglichkeiten, unbürokratisch Messungen an Transformatoren und Kabeln in der Energieversorgung der Universität Siegen durchführen zu können.

Abstract

Diagnosis of Power Transformers Using Return Voltage and Partial Discharge Measurements – New Methods for Measurement Data Evaluation

With the increase of required lifetime of power transformers, diagnostics become more and more important to monitor the condition of the insulation system. There are numerous methods existing for the analysis of different components or parts of the insulation and their electrical and chemical properties. The results of all these methods together should give a complete overview of the condition of the sample.

This thesis presents new approaches in measurement data evaluation for two diagnostic methods, the **Return Voltage Measurement (RVM)** – also known as Recovery Voltage Measurement – and the **Partial Discharge (PD) Measurement** in the insulating oil. The Return Voltage Measurement is an integral method that is influenced by both the solid and the liquid component of the insulation. In contrast to this, the PD Measurement in transformer oil basically reveals information about the condition of the liquid component.

Especially the **Return Voltage Measurement** is often criticized as not being suitable for transformer diagnostics due to a lack of useful evaluation methods. Most methods that have been known for many years – i.e. especially the Polarisation Spectrum as the most well-known one – do not take the physically relevant processes inside a multi-layer insulation into account and thus give insufficient or even wrong interpretation of the data.

The basic mechanism in oil-cellulose insulation systems is the **boundary polarization** which is the only polarization mechanism – maybe only except charge carrier trapping or space charge processes – that can produce time constants in the range of up to several hundreds of seconds. For the description of boundary polarization processes in a two-component system, the **Maxwell equivalent circuit** can be used. For this equivalent circuit it is possible to calculate all relevant parameters analytically, even with an additional resistance – e.g. the finite input resistance of the measuring equipment – and capacitance in parallel.

The goal of this work is to show that an evaluation of RVM data according to the Maxwell equivalent circuit may reveal additional information about the condition of the insulation – especially that of the cellulose component – that cannot be gained by interpretation based on the commonly used formal equivalent circuit.

For the analysis of the condition of the liquid component of the insulation – i.e. in this case the transformer oil – different methods exist that in many cases are relatively intricate and expensive. The simpler methods like e.g. the electric breakdown strength testing often do not reveal much information about the actual overall condition of the oil.

The present work compares the **partial discharge** behavior of transformer oils in different conditions and with different histories of ageing in order to find correlations to the presence of certain degradation products that do not necessarily directly affect the electrical strength of the oil – and that consequently cannot be detected by simple dielectric strength measurements, e.g. a breakdown test – but that may reveal information about the overall condition of the insulation system.

Usually those substances can only be detected e.g. by gas chromatography or similar procedures. The basic idea behind the experiments was to find at least a qualitative influence of these substances on partial discharge parameters. In some cases the results could be compared to the results of standard analyses like the Dissolved Gas Analysis. The influence of the concentration of water in the oil was evaluated as well.

The partial discharge measurements were performed using a low frequency wide-band band pass filter system as detector. For the evaluation of the partial discharge data, recently developed methods were applied that mainly analyze the shape of the signals generated by the partial discharge detector (**Pulse Shape Analysis**). The shape of these impulse responses is influenced by short-time sequences of partial discharge events in the range of a few microseconds.

The final goal of the experiments was to find methods that allow a quick (maybe even on-line) low-cost analysis that allows a relatively prompt reaction to critical states of the insulation system. The low cost aspect is particularly interesting for smaller and/or less important equipment, where other on-line monitoring methods would be too costly and consequently are usually not applied.

The intention is not to replace the standard methods like e.g. the DGA, but rather as a complementary pre-analysis that – in case of the detection of a critical condition – may lead to a warning and subsequently to a further analysis using standard methods.

Kapitel 1

Einführung

Zur Diagnose des Isoliersystems von Leistungstransformatoren kommt eine Vielzahl unterschiedlicher elektrischer und nicht-elektrischer Verfahren zum Einsatz [Wer99, War00, Sah03a, Kou06, Puk06, Sch08]. Jedes dieser Verfahren kann Aufschluss über eine oder mehrere bestimmte Komponenten des komplexen Systems „Transformatorisolierung“ geben. Ein einzelnes Verfahren, das eine Diagnose des Gesamtobjekts zulässt, ist aufgrund der Komplexität des Systems nicht verfügbar. Für eine Beurteilung des Gesamtsystems ist grundsätzlich eine Analyse mit mehreren unterschiedlichen Verfahren erforderlich¹.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden speziell zwei Verfahren untersucht:

- Rückkehrspannungsmessungen
- Teilentladungsmessungen in Transformatoröl

Die Rückkehrspannungsmessung als dielektrisches Diagnoseverfahren, bisher hauptsächlich aus der Kabeldiagnose bekannt, liefert ein integrales Abbild der dielektrischen Eigenschaften der gesamten Transformatorisolierung, während die Teilentladungsdiagnose des Isolieröls zunächst nur Rückschlüsse auf die Ölqualität zulässt, die aber in großem Maße den Zustand des Gesamtsystems widerspiegelt.

Beide Verfahren haben gemeinsam, dass die eigentliche Messtechnik mit vergleichsweise einfachen Mitteln aufzubauen ist. Speziell die Rückkehrspannungsmessung ist relativ störicher, während Teilentladungsmessungen oft unter Laborbedingungen durchgeführt werden. In den letzten Jahren hat allerdings auch die softwaregestützte Störunterdrückung erheblich an Bedeutung gewonnen, wobei durch spezielle Algorithmen Störsignale von Nutzsignalen getrennt werden können.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist in erster Linie die Vorstellung neuer Möglichkeiten zur Auswertung der genannten Verfahren unter Ausnutzung der dargelegten physikalischen Zusammenhänge. Dadurch ist es möglich, aus mit den herkömmlichen Messverfahren gewonnenen Daten zusätzliche Informationen zu erhalten.

Speziell im Fall der Rückkehrspannungsmessung, die unter der Bezeichnung *Recovery Voltage Method* bzw. *Polarisationsspektrum* seit längerem von vielen Autoren als für die Transformator diagnose ungeeignet dargestellt wird, ist eine eingehendere Betrachtung der physikalischen Hintergründe des Verfahrens sinnvoll, da die in der Literatur angezweifelte

¹Einen umfangreichen Überblick über Literatur zum Thema Transformator diagnose bietet [Sin08]

Messergebnisse in erster Linie auf eine Fehlinterpretation der Messdaten anhand einer ungeeigneten Modellbildung zurückzuführen sind.

Teilentladungsmessungen in Isolieröl mit geeigneten inhomogenen Elektrodenanordnungen sollen Rückschlüsse auf die Ölqualität, speziell zumindest qualitativ auf den Gehalt an kurzketigen Abbauprodukten, ermöglichen. Das Fernziel der Untersuchungen ist die Entwicklung einer Messanordnung zum Einbau in Transformatoren, mit der eine Online-Ölüberwachung durchgeführt werden kann. Zu diesem Zweck werden Parameter gesucht, die eine automatische Auswertung gestatten.

Die Arbeit präsentiert zunächst die Theorie und Modellvorstellungen, die den Verfahren zugrunde liegen. Die theoretischen Überlegungen werden anschließend anhand von realen Messergebnissen näher erörtert. Des weiteren werden Vergleiche mit Simulationen und Berechnungen vorgenommen.

Kapitel 2

Rückkehrspannungsmessungen an Transformatoren

2.1 Zielsetzung

Rückkehrspannungsmessungen sind als Diagnoseverfahren seit langem bekannt und kommen speziell bei der Untersuchung von Papier-Masse-isolierten Kabeln zum Einsatz. Für die Diagnose von Leistungstransformatoren wurden ebenfalls Ansätze geschaffen, die jedoch im Regelfall die physikalischen Vorgänge in der Isolierung bei der Auswertung der Messdaten nicht hinreichend berücksichtigen. Dies führt zu Fehldiagnosen und hat damit zu einer weitgehenden Ablehnung des Verfahrens an sich bei vielen Anwendern geführt.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es in erster Linie, die physikalischen Vorgänge, auf denen die Rückkehrspannung als Phänomen und ihre Messung als Diagnoseverfahren basieren, näher zu beleuchten und Ansätze für eine Auswertung zu liefern, die aus den gewonnenen Messdaten brauchbare Informationen zum Zustand der Isolierung gewinnen kann.

2.2 Prinzip

Die Messung der Rückkehrspannung¹ (engl. *Return Voltage* oder auch *Recovery Voltage*) ist seit langem als ein vergleichsweise einfach anzuwendendes, relativ störungsempfindliches dielektrisches Offline-Diagnoseverfahren bekannt. Das Hauptanwendungsgebiet deckt sich weitestgehend mit demjenigen anderer dielektrischer Diagnoseverfahren [Zae03b, Zae03a, Sah03b, Muh07], v.a. der später entwickelten Polarisations-Depolarisationsstrom-Analyse (*PDC, Polarisation/Depolarisation Current Analysis*, [Küc02, Lei02, Küc03]) und der *Frequency Domain Spectroscopy* [Lin07], denen im Prinzip die gleichen Effekte zugrunde liegen, nämlich die dielektrischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten der Isolierung.

Grundsätzlich sind zur Durchführung einer Rückkehrspannungsmessung eine Gleichspannungsquelle, eine ausreichend hochohmige Messanordnung (Elektrometer) sowie eine entsprechend spannungsfeste und ebenfalls hochohmige Schaltanordnung für die Polarisations-Depolarisations-Sequenz erforderlich.

¹in der Literatur vereinzelt auch etwas irreführend als Wiederkehrspannung bezeichnet

Die Messimpedanz (der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes) sollte, um die Messung selbst nicht zu beeinflussen, prinzipiell um Größenordnungen über dem zu erwartenden Isolationswiderstand des Prüflings liegen. Diese Forderung ist in praxi aber nicht immer realisierbar, da die Störanfälligkeit der Messung durch einen extrem hohen Messwiderstand erheblich steigt und die Isolationswiderstände intakter Hochspannungs-Isolierungen bereits in der Größenordnung einiger $10\text{ G}\Omega$ liegen. Praktikabler ist die Wahl eines geringeren, jedoch genau definierten Messwiderstandes, der in der Größenordnung einiger $\text{G}\Omega$ liegt. [Pat07b] zeigt jedoch, dass selbst Messungen mit Messwiderständen bis über $50\text{ G}\Omega$ im Feld möglich sind, ohne dass es zu Störungen kommt. Je nach Art des Prüflings kann es sinnvoll sein, aus unterschiedlichen Messwiderständen wählen zu können.

Der Messwiderstand hat allerdings, wie im Folgenden gezeigt, einen erheblichen Einfluss auf die Parameter der Rückkehrspannungskurve – wobei der Typ der Kurve jedoch erhalten bleibt – und muss bei der Auswertung der Daten berücksichtigt werden [Pat07a, Pat07b].

2.3 Aktueller Stand der Entwicklung

Der relativ geringe Grad der Anerkennung der Rückkehrspannungsmessung als sinnvolles Messverfahren für Transformatoren heutzutage ist hauptsächlich dadurch zu erklären, dass es bisher an Auswerteverfahren fehlt, die aus der Form der ermittelten Rückkehrspannungskurve aussagekräftige Parameter ableiten können.

Andere Verfahren wie die *Polarisations-Depolarisationsstrom- (PDC-) Analyse* und die *Frequency Domain Spectroscopy (FDS)*², die mittlerweile oftmals in Kombination angewendet werden [Koc08] – FDS für die höheren Frequenzbereiche und PDC im Sub-Hertz-Bereich – sind in letzter Zeit erheblich weiter entwickelt worden. Für beide Verfahren existieren kommerzielle Geräte und entsprechende Auswerte-Software (Expertensystem), die eine einfache Diagnose gestattet.

Ein weiteres dielektrisches Verfahren, welches v.a. in der Kabeldiagnose zum Einsatz kommt, ist die *Isotherme Relaxationsstrom- (IRC-) Analyse* [Hof99, Hof03]. Da dieses Verfahren sich auf polymerisierte Systeme beschränkt, wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

Aktuell existieren für die Rückkehrspannungsmessung und -Auswertung im Prinzip zwei unterschiedliche Verfahren, die sich sowohl in der Durchführung der Messungen als auch in der Auswertung der Daten grundlegend unterscheiden: Das auf einer Reihe von Messungen mit unterschiedlichen Lade- und Kurzschlusszeiten basierende Polarisationspektrum und ein weiteres Verfahren, das auf Messungen mit konstanter Lade- und Kurzschlusszeit aufbaut.

2.3.1 Polarisationspektrum

Das sogenannte *Polarisationsspektrum* [Tet92, Csé98, Urb98], das auf mehrfachen Rückkehrspannungsmessungen mit schrittweiser Erhöhung der Lade- und Kurzschlusszeiten t_p und t_d bei konstantem Verhältnis t_p/t_d basiert, stellt das einzige bisher bei Transformatoren in größerem Umfang eingesetzte Verfahren dar. Dieses Verfahren wurde jedoch bereits

²Das FDS-Verfahren stellt im Prinzip eine Verlustfaktormessung bei unterschiedlichen Frequenzen dar

ab Mitte der 1990er Jahre als für die Transformator diagnose – speziell zur Bestimmung des Feuchtegehaltes – ungeeignet kritisiert [Kac96, War00, Zae03a].

Aufgrund der damals gewählten Interpretation der Messdaten, der fehlenden Berücksichtigung des von Umgebungsbedingungen abhängigen Gleichgewichtszustandes des Wassergehaltes im Öl-/ Zellulose-System [Alt02, Höh04] sowie des Einflusses anderer Alterungsmechanismen auf die Messergebnisse erhält man mit dem genannten Verfahren i.d.R. zu hohe Feuchtigkeitswerte [Gub06, Zae03b, Zae03a].

Auch die CIGRÉ Task Force 15.01.09 erklärt die Rückkehrspannungsmessung – aufgrund der Erfahrungen mit dem Polarisationspektrum – in ihrem Bericht [Gub03] als für die Transformator diagnose ungeeignet³. [Che04] erklärt, dass auch bei Kabelmessungen kein einfacher Zusammenhang zwischen Rückkehrspannungsamplitude und Feuchte der Isolierung feststellbar ist.

Die Auswertung des Polarisationspektrums basiert auf einem formalen Ersatzschaltbild aus mehreren parallel geschalteten RC-Seriengliedern, die Zeitkonstanten unterschiedlicher Polarisationsvorgänge repräsentieren sollen (Beschreibung der grundlegenden mathematischen Zusammenhänge in [Jot99]). Durch die unterschiedlichen Lade- und Entladezeiten sollen die unterschiedlichen Zeitkonstanten separiert und eine sogenannte „dominante Zeitkonstanten“ bestimmt werden. Dieses Modell besitzt jedoch keinen direkten Bezug zur physikalischen Realität mit der Grenzflächenpolarisation als maßgeblichem Effekt, weshalb die Interpretation der Rückkehrspannungskurven zwar Zahlenwerte liefert, jedoch keine ausreichende physikalische Relevanz besitzt.

Generell wird die Grenzflächenpolarisation zwar als der für die Entstehung der Rückkehrspannung maßgebliche Prozess anerkannt, teilweise sogar mit einem Verweis auf Maxwell-Wagner-Prozesse [Gäf94, Urb98, Zae03b, Zae03a], jedoch wird nach wie vor für die Interpretation der Kurven das formale Ersatzschaltbild herangezogen.

Die Autoren von [Yao02, Sah03b] haben den Einfluss der einzelnen Komponenten und ihres Wassergehaltes auf die Rückkehrspannung – ebenfalls auf Basis des Polarisationspektrums, allerdings unter zusätzlicher Berücksichtigung der Anfangssteigung der einzelnen Kurven und dem Zeitpunkt des Maximums, das als „Central Time Constant“ bezeichnet wird – und auf Polarisations- und Depolarisationsstrom anhand umfangreicher Experimente sowohl an Modellen als auch an in Betrieb befindlichen Transformatoren untersucht, was allerdings gleichermaßen zu der Erkenntnis führte, dass Alterungs- und Feuchte-Einfluss auf die Rückkehrspannung nicht ohne weiteres separierbar sind.

In [Küc03] wird ebenfalls bemängelt, dass keine Methode existiert, um die Einflüsse der einzelnen Komponenten der Isolierung zu trennen. Durch die Auswertung nach dem Maxwell-Ersatzschaltbild ist aber im Prinzip genau dies möglich, da hier die Eigenschaften von Öl und Zellulose (durch die Bestimmung der Einzelzeitkonstanten) separierbar sind. [Gäf94] liefert bereits eine Modellbildung für den Einfluss der Grenzflächenpolarisation in mehrlagigen Isoliersystemen bei Rückkehrspannungsmessungen, wobei die Einflüsse der Einzelkomponenten analysiert werden.

Das Polarisationspektrum nutzt als einzigen Parameter der gemessenen Rückkehrspannungskurven die Amplitude des Maximums bzw. deren Abhängigkeit von der Ladezeit.

³Die Aussage ist allerdings vor dem Hintergrund der Tatsache zu betrachten, dass hinsichtlich der Interpretation von Rückkehrspannungsmessungen im Unterschied zu den anderen untersuchten Methoden in der Vergangenheit zu wenig weiterführende Forschung betrieben wurde und eine Separation der in Hinblick auf Feuchtigkeitsanalyse besonders wichtigen Eigenschaften der Zellulose nicht möglich ist

Das sogenannte *Voltage Response*-Verfahren [Ném99] wertet hingegen ausschließlich die Anfangssteigungen sowohl der Spannung bei der Depolarisation als auch bei der Rückkehrspannung aus, die mehr Informationen über die Komponenten der Isolierung enthalten. Das Verfahren kann als erster Schritt in Richtung der neueren Auswerteverfahren anhand des Maxwell-Ersatzschaltbildes angesehen werden.

Auch die Autoren von [Bol02] hatten bereits Ansätze zur Auswertung zusätzlicher Parameter wie Anfangssteigung und Zeitpunkt des Maximums gemacht, die jedoch ebenfalls von der CIGRÉ Task Force 15.01.09 [Gub03] nicht weiter berücksichtigt wurden.

Die in [Pat02d, Kou03, Pat06a] behandelten Methoden zur Auswertung der Rückkehrspannungskurven an Öl-Papier-isolierten Kabeln unter Annahme des Maxwell-Ersatzschaltbildes können demgegenüber als Grundlage für eine physikalisch nachvollziehbare Diagnose dienen. Dabei soll in erster Linie gezeigt werden, dass es möglich ist, die relevanten Informationen aus *einer einzigen* Rückkehrspannungsmessung zu erhalten. Aus Sicht der Autoren der zuletzt genannten Publikationen und der vorliegenden Arbeit ist die zeitaufwändige mehrfache Messung unnötig.

Auch das Auftreten eines Maximums für die Amplitude der Rückkehrspannung in Abhängigkeit der Polarisationszeit, das beim Polarisationspektrum zur Bestimmung der sogenannten „dominanten Zeitkonstante“ genutzt wird, ist auf Grundlage des Maxwell-Ersatzschaltbildes erklärbar (siehe Abschnitt 2.4.10 auf Seite 27).

2.3.2 Rückkehrspannungsmessung mit konstanter Kurzschlusszeit

Ein zweites, bislang hauptsächlich bei Kabeln eingesetztes Verfahren, das auf einzelnen Rückkehrspannungsmessungen mit fester Kurzschlusszeit basiert, wird in [Kam] beschrieben. Die von der Firma sebaKMT angebotenen Messgeräte der CD-Reihe arbeiten mit einer fest eingestellten Kurzschlusszeit $t_d = 2$ s. Die Polarisations- und Messzeit sind dabei frei wählbar. Es können je nach Messprogramm – also je nach Art des Prüflings – zwei oder vier Messungen mit unterschiedlichen Polarisationsspannungen durchgeführt werden, wobei die Zeiteinstellungen jeweils gleich sind.

Die genannten Geräte von sebaKMT sind in erster Linie für die Kabeldiagnose konzipiert. Zur Auswertung wird dabei u.a. die „Nichtlinearität“ bei der Messung mit unterschiedlichen Spannungen herangezogen, die speziell bei Kunststoff-isolierten Kabeln eine Aussage über den Zustand der Isolierung zulässt. Dazu wird der Quotient Q_a der Anfangssteigungen der Kurven gebildet, der bei linearem Verhalten dem Verhältnis der Polarisationsspannungen entspricht.

Prinzipiell könnte man für die Quotientenbildung auch z.B. das Maximum der Kurve nehmen, aber auch jeden beliebigen anderen Wert. Es existieren jedoch Messkurven, die im Rahmen der Messzeit kein Maximum aufweisen, so dass in solchen Fällen die Ermittlung von Q_a nicht möglich wäre. Da von der Mess-Software für die Anfangssteigung der Spannungswert nach 8 Sekunden Messzeit herangezogen wird, ist dieser Wert bei regulären Messungen immer verfügbar. Eine Weiterführung dieser Auswertung, bezogen auf Papier-Masse-isolierte Kabel beschreibt [Pat00]. Dabei werden jeweils die gesamten Kurvenverläufe für die beiden verwendeten Polarisationsspannungen in einem Korrelationsplot gegeneinander aufgetragen.

Zusätzlich ist für die Diagnose von Papier-Masse-Kabeln der in [Pat02d, Küc05, Kou10]

beschriebene p-Faktor implementiert, der als weitgehend geometrieunabhängige Diagnosegröße eine direkte Grobklassifizierung von Prüflingen erlaubt und der für die Diagnose von Papier-Masse-isolierten Kabeln empfohlen wird [Bei03, Bei06]. Die Berechnung des p-Faktors basiert auf der Erkenntnis, dass die Grenzflächen-Polarisation nach Maxwell-Wagner den relevanten Prozess bei geschichteten Dielektrika darstellt und dass eine enge geometrische Kopplung der Isolationskomponenten besteht. Darüber hinaus weist der p-Faktor eine nur geringe Temperaturabhängigkeit auf, was speziell bei Messungen zu unterschiedlichen Jahreszeiten bzw. in unterschiedlichen Betriebszuständen von Vorteil ist.

Der p-Faktor hat sich jedoch als für die Transformordiagnose ungeeignet herausgestellt. Er ist als sinnvoller Diagnoseparameter nur bei weitgehend homogenen Prüflingen, also v.a. bei Kabeln, einsetzbar. Dies liegt v.a. daran, dass bei Kabeln mit Öl- bzw. Massegetränkter Papierisolierung eine starke Kopplung zwischen den beiden Komponenten vorliegt – v.a. an mikroskopischen Grenzflächen in den ölgefüllten Poren des Papiers –, während bei Öltransformatoren Zellulose und Öl weitgehend getrennt voneinander vorliegen und die makroskopischen (äußeren) Grenzflächen dominieren, so dass hier das Maxwell-Modell genau genommen noch eher zutrifft als bei Kabeln. Der Ölanteil im Transformerboard und im Stützmaterial dürfte aufgrund der relativ hohen Materialdichte nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Einen Vergleich zwischen Messungen an Papier-Masse-isolierten Kabeln und Transformatoren auch in Hinblick auf eine Bestimmung des Feuchtegehaltes zieht [Pat04b]. Der Einfluss des in den Geräten verbauten, definierten Messwiderstandes auf die Messergebnisse, speziell auf den p-Faktor, wurden ebenfalls untersucht und beschrieben [Kou03, Pat07a, Pat07b].

Alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Rückkehrspannungsmessungen wurden mit den in [Kam] beschriebenen Geräten durchgeführt (s. Abschnitt 2.6.1). Die Auswertung der Messdaten erfolgte größtenteils mit MATLAB.

2.4 Modell für ein zwei-Komponenten-Isoliersystem

In der Literatur wird im Zusammenhang mit dielektrischer Diagnose fast durchgehend ein formales Ersatzschaltbild verwendet, mit dem zwar die an Prüflingen nach außen hin elektrisch messbaren Vorgänge formal beschrieben werden können, aus dessen Beschreibungsparametern jedoch keine Interpretation hinsichtlich der physikalischen Vorgänge innerhalb der Isolierung möglich ist.

Dieses Ersatzschaltbild – im Folgenden als *formales Ersatzschaltbild* bezeichnet – besteht aus einer Parallelschaltung eines oder mehrerer RC-Serienglieder sowie einer geometrischen Kapazität und einem Widerstand, der rein ohmsche Leitprozesse modelliert, die nicht zur Polarisation beitragen.

Insbesondere berücksichtigt das formale Ersatzschaltbild nicht die Reihenschaltung unterschiedlicher Dielektrika und die damit zusammenhängenden Mechanismen, die im Isoliersystem auftreten können. Es werden lediglich einzelne voneinander unabhängige atomare oder molekulare Polarisationsprozesse vorausgesetzt und diesen jeweils spezifische Zeitkonstanten zugeordnet. In Papier-Masse-isolierten Kabeln und Öltransformatoren ist jedoch die Grenzflächenpolarisation am Übergang vom Öl zum Zellulose-Anteil der dominierende

Prozess. In diesem Prozess steckt auch die Information über *beide* Komponenten, die bei einer Modellierung mit einem einfachen RC-Serienelement verloren geht.

Die Grenzflächenpolarisation ist aufgrund der Reihenschaltung der beteiligten Dielektrika mit dem Ersatzschaltbild nach Maxwell-Wagner modellierbar. Dieses Modell berücksichtigt die Komponenten – im konkreten Fall Öl und Zellulose – als separate Dielektrika mit ihren jeweiligen Parametern Permittivität und Leitfähigkeit und ist dementsprechend zur Auswertung von dielektrischen Messungen im Gegensatz zum formalen Ersatzschaltbild gut geeignet.

2.4.1 Isoliersystem von Öltransformatoren

Das Isoliersystem eines Öltransformators besteht aus Zellulose in Barrieren, Stützern und der Leiterisolierung sowie Öl als Tränkmittel und in den Ölkanälen. Dieser Aufbau lässt sich integral mit Hilfe des **Maxwell-Wagner-Ersatzschaltbildes** (im Folgenden kurz als **Maxwell-Ersatzschaltbild** bzw. **Maxwell-Modell** bezeichnet) für eine zwei-Komponenten-Isolierung modellieren.

Dabei werden die beiden, im realen System ineinandergreifenden Komponenten *Öl* und *Zellulose* als Reihenschaltung separater Dielektrika mit individuellen Werten für Permittivität und Leitfähigkeit (bzw. Isolationswiderstand) dargestellt. Als der entscheidende Effekt, der zur Entstehung einer Rückkehrspannung führt, wird hierbei die Grenzflächenpolarisation angenommen, was in einem derartigen Isoliersystem der physikalischen Realität Rechnung trägt.

Das Maxwell-Modell stellt die physikalischen Größen in Form von elektrotechnischen Komponenten – Kapazitäten bzw. Kondensatoren für die Permittivitäten und Widerständen für die Leitwerte – dar. Diese Darstellung besitzt gegenüber den physikalischen Zusammenhängen, die in der Literatur oftmals für die Beschreibung herangezogen werden [Jot99, Jun02] den Vorteil der besseren Übersichtlichkeit. Speziell bei Erweiterungen des Modells durch Zusatzkomponenten bleibt die Anschaulichkeit erhalten.

Das Maxwell-Modell kann in das herkömmliche elektrische Modell [Sah05] – das die unterschiedlichen Polarisationsvorgänge mittels parallel geschalteter RC-Glieder modelliert, ohne dabei auf die physikalischen Prozesse, insbesondere die Grenzflächenpolarisation, einzugehen – umgerechnet werden [Pat05] (s. Abschnitt 2.4.4 auf Seite 15). Die Umrechnung in der anderen Richtung (also vom formalen Ersatzschaltbild zum Maxwell-Modell) ist jedoch im allgemeinen nicht eindeutig, da der Verlauf der Rückkehrspannung im Maxwell-Ersatzschaltbild nicht von den Absolutwerten der Komponenten an sich, sondern nur vom Verhältnis der Zeitkonstanten $\tau_i = R_i C_i = \rho_i \varepsilon_0 \varepsilon_{r_i}$ abhängt.

Das Maxwell-Ersatzschaltbild für Zweikomponenten-Isoliersysteme ist seit langem bekannt und wurde schon früh zur Erklärung von Polarisationsvorgängen herangezogen [Bön38]. [Ném99] greift das Modell für die Interpretation von Rückkehrspannungsmessungen erneut auf.

Abb. 2.1 auf der nächsten Seite zeigt schematisch den Aufbau der Hauptisolierung eines Leistungstransformators [Kin82, Küc05, Gäf00, Gäf04], Abb. 2.2 ein entsprechendes elektrisches Ersatzschaltbild mit den für Polarisations- und Leitprozesse und damit für dielektrische Messungen relevanten Komponenten [Gun03, Gun04]. Die Permittivitäten der

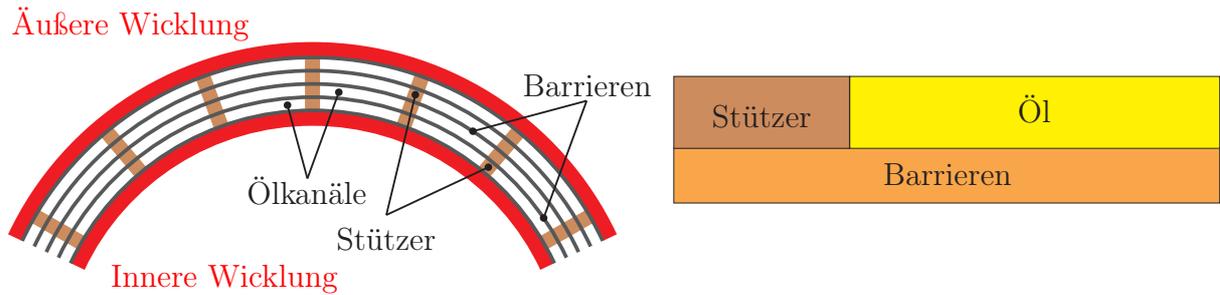


Abb. 2.1: Vereinfachtes Schema der Isolierung eines Leistungstransformators und Ersatzanordnung nach [Gäf98]

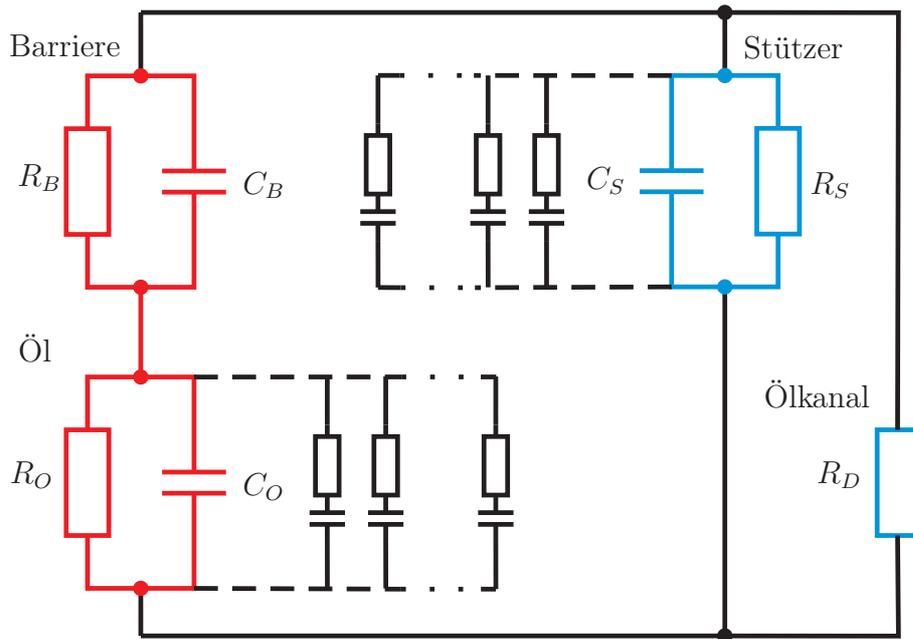


Abb. 2.2: Ersatzschaltbild einer Transformator-Hauptisolierung für eine Anordnung gemäß Abb. 2.1

Komponenten sind hierbei durch Kapazitäten modelliert. Für Berechnungen und Simulationen kann angenommen werden, dass $C_B > C_O$ ist, da die Permittivität der Zellulose deutlich größer ist als diejenige des Öls und aufgrund der Geometrie der Anordnung im Regelfall der Ölanteil überwiegt. Die Ölrecken müssen dabei den größten Teil des Spannungsabfalls bei Wechselspannungsbelastung aufnehmen [Küc05].

Der Grenzflächenanteil der Polarisierung in der Reihenschaltung aus Öl und Barrieren ist links durch das eigentliche Maxwell-Modell aus R_B , C_B , R_O und C_O gegeben. Die Stützer bzw. Distanzleisten werden als weitgehend homogen angenommen und dementsprechend als einfaches RC-Parallelglied modelliert. R_D modelliert die Ölrecken, die sich unter Umgehung der ineinandergreifenden Barrieren ergeben. Die Permittivität ist hier aufgrund der vergleichsweise langen Strecken vernachlässigbar, so dass nur die Leitfähigkeit relevant ist.

Die zusätzlichen RC-Serienglieder parallel zum Öl und den Stützern repräsentieren zusätzliche Polarisationsprozesse, die durch Alterungsprozesse bzw. Inhomogenitäten in der Isolierung auftreten können und die das dielektrische Verhalten der Gesamtisolierung und damit auch den Verlauf der Rückkehrspannung beeinflussen.

Wesentlich bestimmend für die Rückkehrspannung sind R_B , C_B , R_O und C_O . Die übrigen Elemente führen zu Effekten mit für die Rückkehrspannung geringerer Relevanz und können im Rahmen der Rückkehrspannungsuntersuchungen in den meisten Fällen vernachlässigt werden. Die genannten Zusatzpolarisationen können jedoch den Verlauf einer Messkurve erheblich beeinflussen, wie im Folgenden noch gezeigt wird.

2.4.2 Modell zur Beschreibung von Polarisations- und Depolarisationsvorgängen

Das Maxwell-Ersatzschaltbild stellt elektrisch ein einfaches System zweiter Ordnung dar und kann dementsprechend analytisch beschrieben werden. Die Verläufe sämtlicher Ströme und Spannungen in Abhängigkeit von den Parametern der Einzelkomponenten sind durch Lösen der Differenzialgleichung darstellbar.

Zunächst wird nur das grundlegende Modell aus den Komponenten R_i und C_i mit $i = 1$ für das Öl und $i = 2$ für den Zelluloseanteil betrachtet. In diesem Fall ist die Lösung des Problems trivial, da während des Messvorgangs keine Kopplung der Einzelkomponenten vorliegt und diese somit separat betrachtet werden können.

Im realen System (speziell in den verwendeten kommerziellen Messgeräten) existiert jedoch praktisch immer auch ein endlicher Parallelwiderstand R_P , bestehend aus dem Eingangswiderstand R_m des Messgerätes und einem eventuell im Isoliersystem vorhandenen Leckwiderstand R_g , der zu einer Kopplung der beiden Einzelsysteme führt. Zusätzlich kann noch eine Parallelkapazität C_P in Erscheinung treten, die sich z.B. aus Komponenten des Isoliersystems ergeben kann, die kein Maxwell-Verhalten zeigen (z.B. Kunststoff-Isolierungen, speziell bei Messungen an Papier-Masse-Kabeln mit Teilkabelstrecken in VPE-Ausführung).

Die analytische Beschreibung geht deshalb zunächst vom komplexesten Fall mit R_P und C_P aus, aus dem die vereinfachten Fälle abgeleitet werden können, indem man $C_P = 0$ und $R_P = \infty$ setzt.

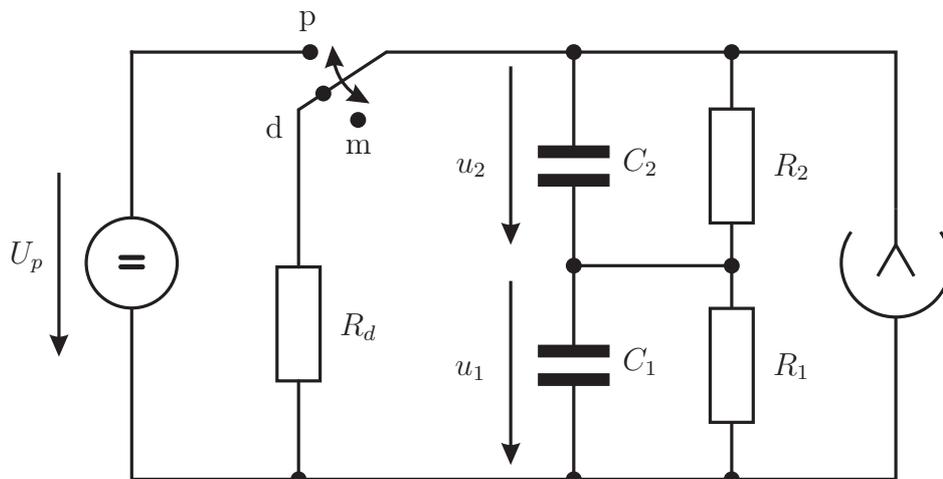


Abb. 2.3: Prinzip der Rückkehrspannungsmessung mit dem idealen Maxwell-Modell, p = Polarisation, d = Depolarisation (Kurzschluss), m = Messung

Abb. 2.3 zeigt schematisch die grundlegende Anordnung für die Rückkehrspannungsmessung unter Verwendung des Maxwell-Modells (R_i und C_i mit $i = (1, 2)$). Die Darstellung ist vereinfacht und berücksichtigt noch keine Zusatzkomponenten und -Effekte, wie sie im Folgenden noch beschrieben werden.

2.4.3 Grundlegende Betrachtungen zum Maxwell-Modell

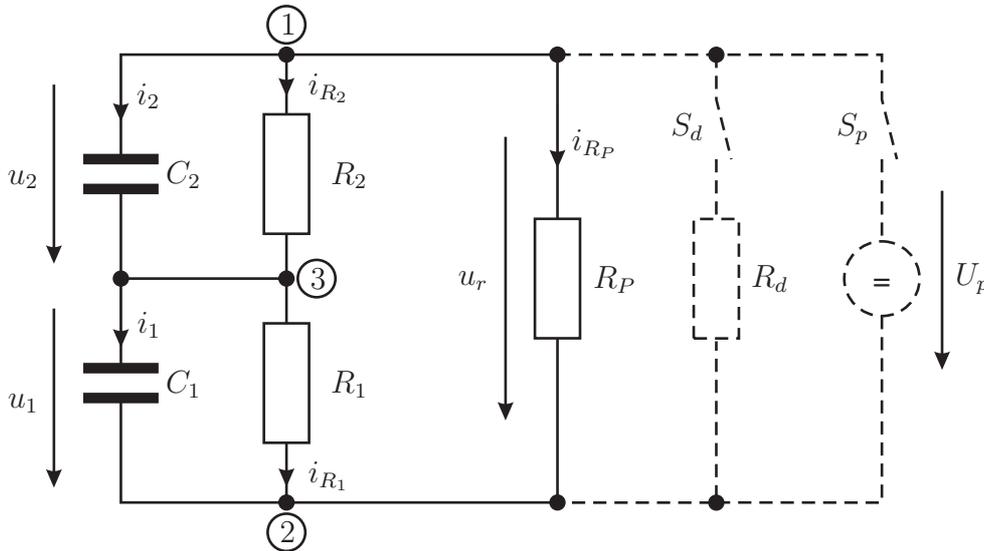


Abb. 2.4: Maxwell-Ersatzschaltbild für eine Öl-Zellulose-Isolierung mit Parallelwiderstand R_P

Bei der Polarisation wird die Anordnung nach 2.4 an den Punkten 1 und 2 an eine Gleichspannungsquelle U_p angeschlossen. Nach der Polarisationszeit t_p wird die Spannungsquelle abgetrennt und der Prüfling über einen Depolarisationswiderstand R_d (Kurzschlusswiderstand) kurzgeschlossen (wieder zwischen den Knoten 1 und 2; Knoten 3 ist messtechnisch nicht zugänglich).

Nach Aufheben des Kurzschlusses, dessen Dauer vom Messverfahren abhängt, beginnt die eigentliche Messung. In der Realität befindet sich ein endlicher Widerstand R_P parallel zur Anordnung, der sich aus Widerständen R_g von nicht polarisierbaren Teilen der Isolierung („geometrische“ Leitwerte) sowie einem eventuell vorhandenen nicht vernachlässigbaren Eingangswiderstand R_m des Messgerätes (Messimpedanz) zusammensetzt. Außerdem existiert je nach Aufbau der Messanordnung und Geometrie des Prüflings eine Zusatzkapazität C_P parallel zum für die Entstehung der Rückkehrspannung relevanten Teil des Dielektrikums.

Dieser Fall soll im Folgenden näher betrachtet werden, da eine mathematische Beschreibung für die Rückkehrspannungskurve abhängig von den Parametern der Komponenten R_1, R_2, C_1, C_2, R_P und C_P gesucht wird, wobei zunächst der einfachere Fall ohne eine Parallelkapazität C_P betrachtet wird.

Nur wenn R_P gegenüber R_1 und R_2 sehr groß und C_P Null und damit vernachlässigbar ist, gilt während der Messung tatsächlich die einfache Beschreibung des Verlaufs der Rückkehrspannung durch die Summe zweier Exponentialfunktionen mit den Einzelzeitkonstanten $\tau_1 = R_1 C_1$ und $\tau_2 = R_2 C_2$.

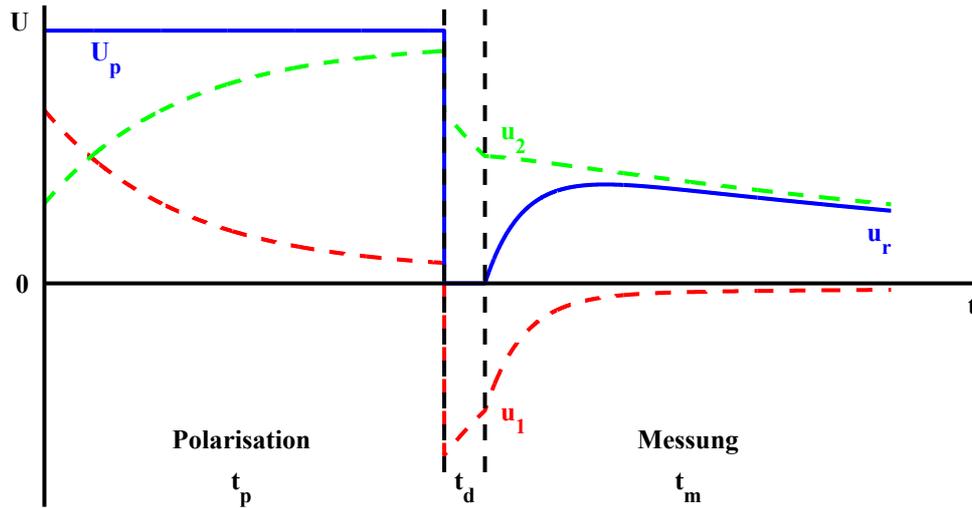


Abb. 2.5: Prinzipielle Verläufe der Spannungen bei einer Rückkehrspannungsmessung

Wie oben beschrieben, liegt während der Polarisation des Prüflings eine Gleichspannung U_p an der Anordnung an. Für die Spannungen an den beiden Kapazitäten ergibt sich während der Polarisation ein Übergang von kapazitiver Spannungsteilung zu ohmscher Teilung nach einer Exponentialfunktion mit einer Gesamtzeitkonstante τ , die auch bestimmend für den Kurzschlussfall ist:

$$\tau = (C_1 + C_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

Der erste Ausdruck zeigt, dass τ lediglich das Produkt aus der Parallelschaltung von C_1 und C_2 sowie derjenigen aus R_1 und R_2 darstellt. Daraus folgt für die Abhängigkeit von τ von der Leitfähigkeit von Öl und Zellulose, dass eine Änderung in der – im Regelfall deutlich geringeren – Leitfähigkeit der Zellulose kaum Einfluss auf die Zeitkonstante besitzt, eine Änderung in der Ölleitfähigkeit hingegen eher zu einer erheblichen Änderung führen kann.

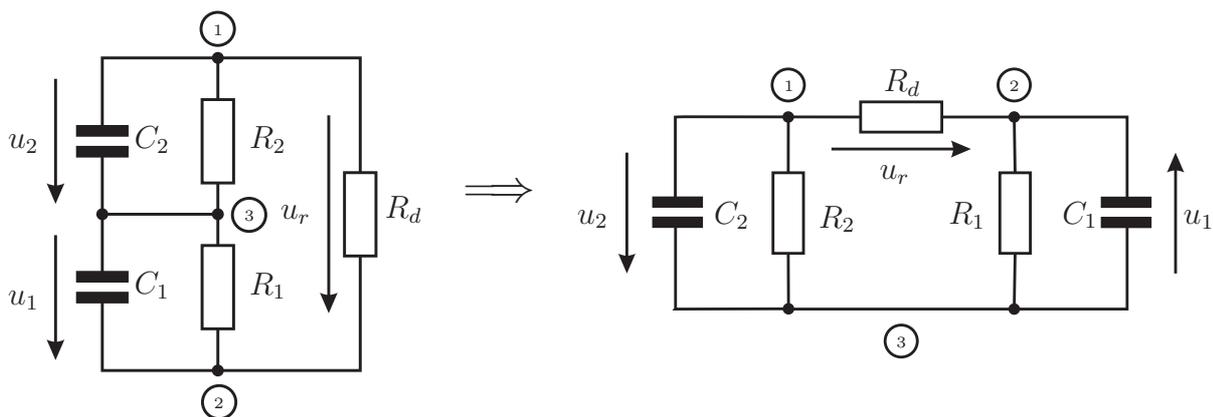


Abb. 2.6: Umzeichnung des Ersatzschaltbildes für den Kurzschlussfall, $R_d \ll R_1, R_2$

Ein Kurzschließen des Prüflings bedeutet, dass die Knoten 1 und 2 niederohmig (verglichen mit R_1 und R_2) miteinander verbunden werden, wie in Abb. 2.6 gezeigt. Dadurch liegen C_1 und C_2 parallel – unter Beibehaltung der Zählpfeile liegen sie entgegengesetzt parallel –, wodurch es zu einem Umladevorgang kommt. Die Ladung $Q = C_1 u_1(t_p) + C_2 u_2(t_p)$ verteilt

sich entsprechend der Größe der Kapazitäten auf C_1 und C_2 , so dass sich eine Spannung

$$U_{d0} = \frac{C_1 u_1(t_p) + C_2 u_2(t_p)}{C_1 + C_2} \quad (2.2)$$

an beiden Kapazitäten einstellt.

Da $R_d \ll R_1$ gilt – wobei i.d.R. $R_1/R_d > 10^5$ erfüllt ist – können die Zeiträume, in denen die Umladung stattfindet, vernachlässigt werden. Die Zeitkonstanten liegen gewöhnlich im Sub-Millisekunden-Bereich. Die Spannung an den beiden Teilkapazitäten verringert sich während des Kurzschlusses wiederum, ausgehend von U_{d0} , exponentiell mit der Zeitkonstante τ .

In der Realität ist der Kurzschlusswiderstand zwar nicht null, so dass ein geringer Spannungsabfall über R_d auftritt, der jedoch im Vergleich zu den Spannungen u_1 und u_2 vernachlässigbar klein ist. Bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten kommerziellen Messgeräten liegt der Kurzschlusswiderstand zwischen 100 Ω und einigen k Ω , während die Isolationswiderstände R_1 und R_2 i.d.R. im G Ω -Bereich liegen.

Die Spannung, die bei Aufheben des Kurzschlusses, also zu Beginn der eigentlichen Messung an C_1 und C_2 anliegt (an C_1 wegen Beibehaltung der Zählpfeilrichtung mit negativem Vorzeichen) wird als U_s bezeichnet. Für die meisten Betrachtungen ist der Verlauf der Größen vor der eigentlichen Messung nicht relevant, weshalb U_s i.d.R. die eigentliche Ausgangsgröße für weitere Berechnungen darstellt.

U_s kann mit den vorstehend erwähnten Zusammenhängen als Funktion von Polarisationsspannung U_p , Polarisationszeit t_p , Kurzschluss- oder Depolarisationszeit t_d , Gesamtzeitkonstante τ (im Folgenden auch als Systemzeitkonstante bezeichnet) sowie dem Verhältnis der Einzelzeitkonstanten $\lambda = \tau_2/\tau_1$ angegeben werden:

$$U_s = \frac{\lambda - 1}{1 + \lambda + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1}} U_p \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau}}\right) e^{-\frac{t_d}{\tau}} \quad (2.3)$$

Der nach Aufheben des Kurzschlusses ablaufende Vorgang ist nicht mehr trivial durch zwei unabhängige Exponentialfunktionen mit zwei Einzelzeitkonstanten beschreibbar, es sei denn, R_P ist derart groß, dass er als vernachlässigbar betrachtet werden kann, wodurch die beiden RC -Elemente nicht gekoppelt wären.

Im Falle $R_P \rightarrow \infty$ lassen sich die Verläufe der einzelnen Spannungen einfach angeben:

$$u_1(t) = -U_s e^{-\frac{t}{\tau_1}} \quad (2.4)$$

$$u_2(t) = U_s e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2.5)$$

$$u_r(t) = u_1(t) + u_2(t) = U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (2.6)$$

Für die bisher für die Diagnose verwendeten Kurvenformparameter lassen sich in Abhängigkeit von den Einzelzeitkonstanten τ_1 und τ_2 sowie deren Verhältnis $\lambda = \tau_2/\tau_1$ entsprechende Ausdrücke angeben:

$$U_m = U_s \left[\lambda \left(\frac{1}{1-\lambda} \right) - \lambda \left(\frac{\lambda}{1-\lambda} \right) \right] \quad (2.7)$$

$$t_m = \tau_1 \frac{\lambda}{\lambda - 1} \ln \lambda \quad (2.8)$$

$$s = \frac{U_s}{\tau_1} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \quad (2.9)$$

Ist R_P nicht groß gegenüber R_1 und R_2 , dann tritt eine Kopplung zwischen u_1 und u_2 auf. Der Verlauf der Rückkehrspannung bleibt jedoch als Summe zweier Exponentialfunktionen – allerdings mit $\tau'_1 \neq \tau_1$ und $\tau'_2 \neq \tau_2$ – beschreibbar, was aus der Äquivalenz der Ersatzschaltbilder nach Abb. 2.8 anschaulich hervorgeht.

Allgemein kann man annehmen, dass $\tau_1 \ll \tau_2$ gilt. Im ersten Moment nach Aufheben des Kurzschlusses, wenn die Spannungen an beiden Teilkapazitäten betragsmäßig noch annähernd gleich sind, ist auch der Einfluss der Kopplung über R_P noch unbedeutend, da der Spannungsabfall u_r praktisch null ist. In diesem Fall entlädt sich C_1 mit τ_1 und C_2 entsprechend mit τ_2 .

Die Spannung an C_1 nimmt jedoch wegen $\tau_1 \ll \tau_2$ wesentlich schneller ab, so dass bereits nach kurzer Zeit ein Spannungsabfall u_r an R_P entsteht, der zu einem zusätzlichen Strom von C_2 über R_P und R_1 führt. Dadurch entlädt sich C_2 schneller, während der über R_1 fließende Stromanteil von C_2 dort für einen zusätzlichen Spannungsabfall sorgt, der C_1 am entladen hindert.

Der Einfluss von R_P auf den Entladevorgang an C_2 tritt dann auf, wenn R_P in der selben Größenordnung oder kleiner ist als R_2 und deshalb signifikant zum Stromfluss beiträgt.

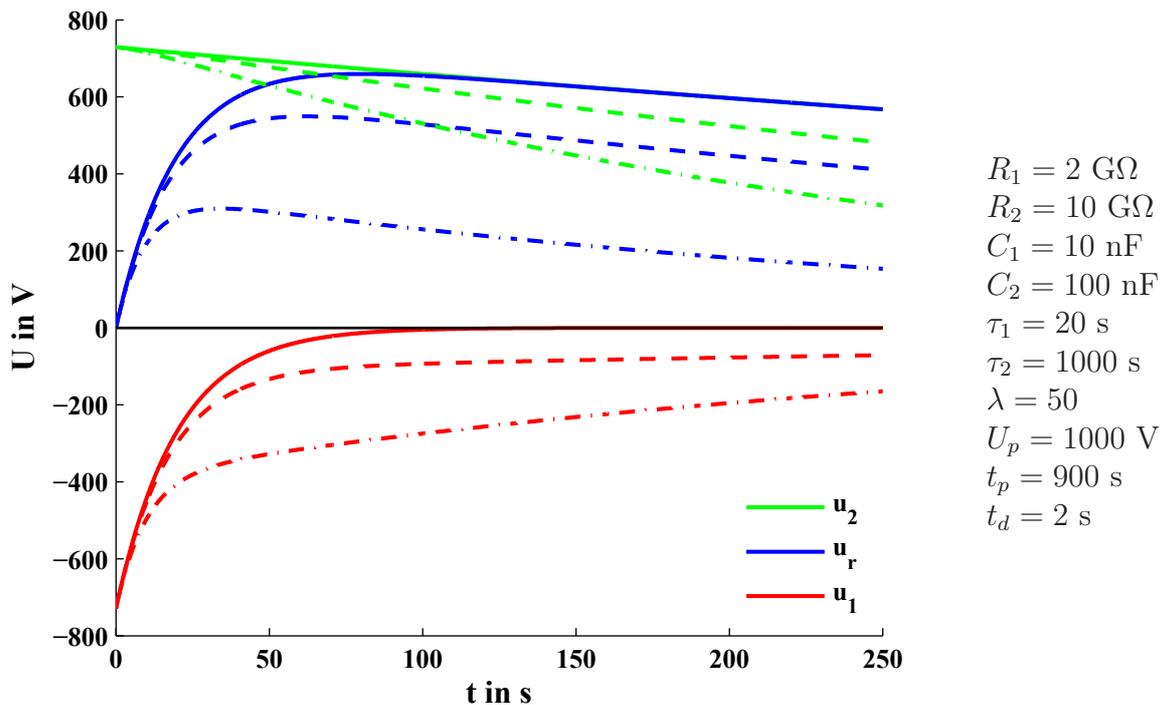


Abb. 2.7: Spannungsverläufe u_1 , u_2 und u_r für $R_P = \infty$ (—), $R_P = R_1 + R_2$ (--) und $R_P = R_1$ (-.-)

Abb. 2.7 zeigt zur Verdeutlichung Verläufe der Spannungen u_1 und u_2 an den beiden RC-Gliedern und die Rückkehrspannung u_r für unterschiedliche Parallelwiderstände R_P , wobei die Modellparameter R_i und C_i gleich bleiben. Der einfachste Fall mit $R_P = \infty$ zeigt ein vollständig entkoppeltes Entladeverhalten. C_1 entlädt sich mit $\tau_1 = R_1 C_1$ und C_2 mit $\tau_2 = R_2 C_2$. Zum Zeitpunkt des Maximums (im Beispiel bei $t_m \approx 80$ s) ist die Spannung u_1 so weit abgesunken, dass der Verlauf der Rückkehrspannungskurve mit demjenigen von u_2 praktisch identisch ist. Beide Einzelspannungen u_1 und u_2 sind in diesem Fall einfache Exponentialfunktionen.

Im Fall $R_P = R_1 + R_2 = 12 \text{ G}\Omega$ ist die Kopplung der beiden Teilsysteme bereits deutlich sichtbar. Der Anfangsbereich des Verlaufs von u_2 zeigt, dass es sich hier nicht mehr um eine einfache Exponentialfunktion handelt. Sobald sich C_1 nennenswert entladen hat, fließt aufgrund der Tatsache, dass die Reihenschaltung von R_P und R_1 in der selben Größenordnung liegt wie R_2 , ein nicht zu vernachlässigender Strom über R_P und R_1 , wodurch C_2 sich deutlich schneller entladen kann als im Fall mit $R_P = \infty$. Gleichzeitig führt der zusätzliche Strom über R_1 dazu, dass die Entladung von C_1 behindert wird. Der Verlauf von u_1 ist auch nach längerer Messzeit noch deutlich von Null verschieden und klingt kaum noch ab.

Wählt man schließlich $R_P = R_1$, dann fällt u_1 nach dem (vergleichsweise frühen) Maximum zunächst fast linear ab. In diesem Fall ist der Widerstand des Pfades $R_P + R_1$ sogar deutlich kleiner als R_2 , so dass sich der Entladevorgang von C_2 zu einem erheblichen Teil auf diesem Wege abspielt, sobald durch das zunächst schnellere Entladen von C_1 eine nennenswerte Potenzialdifferenz vorliegt.

In folgenden Abschnitten wird gezeigt, dass sich durch die Kopplung über Parallelelemente R_P und auch C_P am Typ der Rückkehrspannungskurve $u_r(t)$ nichts ändert. Trotz der komplexen Vorgänge bei den Einzelspannungen bleibt $u_r(t)$ eine Summe zweier Exponentialfunktionen. Das gilt auch für den vergleichsweise komplexeren Fall der Parallelkapazität C_P , die z.B. den Anteil der geometrischen Kapazität eines Prüfobjektes repräsentieren kann, die nicht an der Grenzflächenpolarisation beteiligt ist.

Eine solche Parallelkapazität tritt z.B. bei Mischkabelstrecken aus Papier- und Kunststoffisolierten Kabeln in Erscheinung, wobei letztere nicht nennenswert zu den messbaren Polarisationsprozessen beitragen. Zwar weisen auch Kunststoffkabel Rückkehrspannungen auf (speziell bei Water-Tree-Schädigung [Jun02]), jedoch sind die Amplituden gegenüber den bei der Grenzflächenpolarisation auftretenden vernachlässigbar.

2.4.4 Elektrische Äquivalenz der Ersatzschaltbilder

Wie in [Pat05] (basierend auf [Ale59]) beschrieben, sind das Maxwell-Ersatzschaltbild und das formale Ersatzschaltbild elektrisch äquivalent und es ist möglich, aus den Komponenten des Maxwell-Ersatzschaltbildes diejenigen des formalen Ersatzschaltbildes zu berechnen. Abb. 2.8 zeigt den Übergang zwischen den beiden Ersatzschaltbildern.

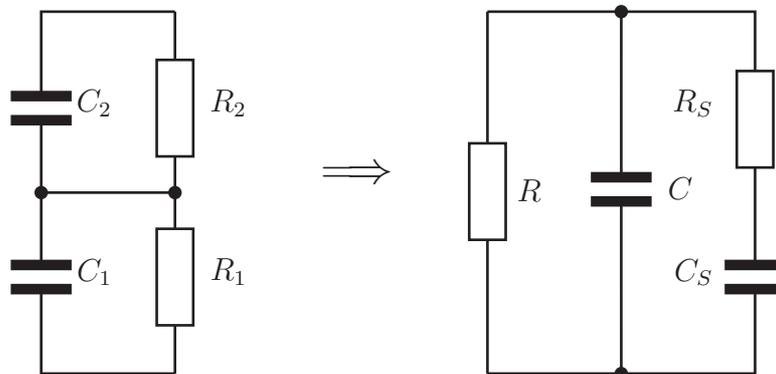


Abb. 2.8: Maxwell- und formales Ersatzschaltbild

Für die Zusammenhänge der Maxwell-Komponenten R_1 , C_1 , R_2 und C_2 mit denen des formalen Ersatzschaltbildes – R , C , R_S sowie C_S – gilt

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.10)$$

$$R = R_1 + R_2 \quad (2.11)$$

$$C_S = \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)} \quad (2.12)$$

$$= \frac{(\tau_2 - \tau_1)^2}{\tau_1 R_1 + \tau_2 R_2 + 2(\tau_1 R_2 + \tau_2 R_1) + R_1^2 C_2 + R_2^2 C_1} \quad (2.13)$$

$$R_S = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2} \quad (2.14)$$

$$= \frac{\tau_1^2 R_2 + \tau_2^2 R_1 + \tau_1 R_2^2 C_1 + \tau_2 R_1^2 C_2 + 2\tau_1 \tau_2 (R_1 + R_2)}{(\tau_2 - \tau_1)^2} \quad (2.15)$$

C ist die geometrische Kapazität der Anordnung, R der geometrische Widerstand. R_S und C_S hängen relativ komplex von den Größen des Maxwell-Modells ab. Die Gesamtzeitkonstante τ ergibt sich aus den Komponenten R_S und C_S zu

$$\tau = R_S C_S = \frac{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2} \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 (C_1 + C_2)} \quad (2.16)$$

$$= \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} = \frac{\tau_1 R_2 + \tau_2 R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.17)$$

Dieser Wert entspricht der Abklingzeitkonstante des Depolarisationsstromes im Kurzschlussfall.

Mit diesen Umrechnungen lassen sich die Komponenten des Maxwell-Modells in das formale Ersatzschaltbild übertragen. Der Umkehrschluss ist hingegen nicht eindeutig möglich. Die Möglichkeit der Umrechnung zeigt auch, dass es allein aufgrund der dielektrischen Antwort prinzipiell nicht möglich ist, eine Isolationskomponente mit Grenzflächenpolarisation (Maxwell-Verhalten) von anderen Polarisationsmechanismen zu unterscheiden. Lediglich der Aufbau der Isolierung mit darin enthaltenen Grenzflächen und die Größenordnung der an realen Objekten gemessenen Zeitkonstanten (10^1 bis mehrere 10^2 Sekunden) lassen auf Maxwell-Wagner-Prozesse schließen. Ionische und auch Dipol-Polarisationen erreichen keine derart langen Zeitkonstanten bei gleichzeitig relativ hohen Amplitudenwerten.

Die elektrische Äquivalenz der Ersatzschaltbilder nach Abb. 2.8 ist die Ursache für das in Abschnitt 2.4.3 erwähnte und 2.4.5 näher betrachtete Verhalten, dass weder ein Parallelwiderstand R_P noch eine Parallelkapazität C_P die Ordnung des Systems bzw. den Typ der Rückkehrspannungskurve beeinflussen. Solche Parallelelemente führen dann lediglich zu einer Änderung der Absolutwerte von R und C im formalen Ersatzschaltbild, führen aber dazu, dass die aus dem Kurvenverlauf berechenbaren Zeitkonstanten τ'_1 und τ'_2 nicht mehr mit den dielektrischen Zeitkonstanten $\tau_1 = R_1 C_1$ und $\tau_2 = R_2 C_2$ übereinstimmen (s. Abschnitt 2.4.7 und 2.4.8).

2.4.5 Analytische Beschreibung des Systems

Das in Abb. 2.9 dargestellte System ist offensichtlich dritter Ordnung. Da die Parallelkapazität C_P jedoch erst nach Aufheben des Kurzschlusses eine Rolle spielt und der Anfangs-

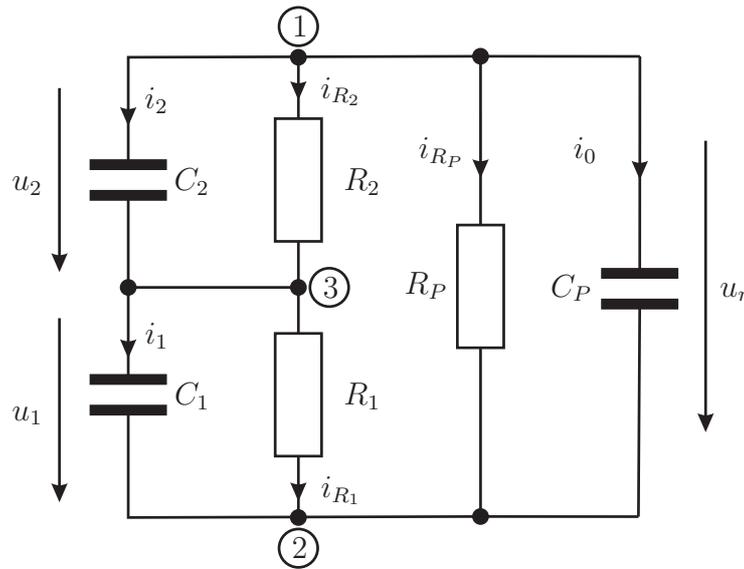


Abb. 2.9: Maxwell-Ersatzschaltbild mit Parallelwiderstand R_P und Parallelkapazität C_P

wert der Spannung u_r an C_P Null ist, reduziert sich das System auf zweite Ordnung. Dieser Zusammenhang ist leichter nachvollziehbar, wenn man das elektrisch äquivalente formale Ersatzschaltbild (s. Abschnitt 2.4.4) vor Augen hat, bei dem eine zusätzliche Kapazität additiv zur „geometrischen Kapazität“ beiträgt.

Es ergibt sich ein Gleichungssystem aus zwei Knotengleichungen und einer Masche:

$$-i_1 - i_{R_1} - i_{R_P} - i_{C_P} = 0 \quad (2.18)$$

$$i_2 + i_{R_2} + i_{R_P} + i_{C_P} = 0 \quad (2.19)$$

$$u_1 + u_2 - u_r = 0 \quad (2.20)$$

Einsetzen der Spannungen und Laplace-Transformation ergibt

$$C_1 (sU_1 + U_s) + \frac{U_1}{R_1} + C_P s (U_1 + U_2) + \frac{U_1 + U_2}{R_P} = 0 \quad (2.21)$$

$$C_2 (sU_2 - U_s) + \frac{U_2}{R_2} + C_P s (U_1 + U_2) + \frac{U_1 + U_2}{R_P} = 0 \quad (2.22)$$

Für die Spannungen ergeben sich im Frequenzbereich nach Auflösen des Gleichungssystems folgende Zusammenhänge:

$$U_1(s) = -U_s \frac{s + b_1}{s^2 + sv + w} \quad (2.23)$$

und

$$U_2(s) = U_s \frac{s + b_2}{s^2 + sv + w} \quad (2.24)$$

mit

$$b_1 = \frac{C_1 R_P + C_1 R_2 + C_2 R_2}{R_P R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))} \quad (2.25)$$

$$b_2 = \frac{C_1 R_1 + C_2 R_P + C_2 R_1}{R_P R_1 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))} \quad (2.26)$$

$$v = \frac{C_P R_P (R_1 + R_2) + C_1 R_1 (R_P + R_2) + C_2 R_2 (R_P + R_1)}{R_P R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))} \quad (2.27)$$

$$w = \frac{R_P + R_1 + R_2}{R_P R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))} \quad (2.28)$$

Die Gleichungen (2.23) und (2.24) sind einfach rücktransformierbar. Es sind lediglich noch die Nullstellen a_1 und a_2 des Nennerpolynoms zu bestimmen. Diese ergeben sich zu

$$a_1 = -\frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w} \quad (2.29)$$

$$a_2 = -\frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w} \quad (2.30)$$

Für diese Ausdrücke wurde keine Möglichkeit zu einer nennenswerten Vereinfachung gefunden, weshalb sie hier stehen gelassen werden.

Für die Teilspannungen erhält man so

$$U_1(s) = -U_s \frac{s + b_1}{(s - a_1)(s - a_2)} \quad (2.31)$$

$$U_2(s) = U_s \frac{s + b_2}{(s - a_1)(s - a_2)} \quad (2.32)$$

Durch die Rücktransformation dieser Ausdrücke ergibt sich

$$u_1(t) = \mathcal{L}^{-1}\{U_1(s)\} = -U_s \left[\frac{a_2 + b_1}{a_2 - a_1} e^{a_2 t} - \frac{a_1 + b_1}{a_2 - a_1} e^{a_1 t} \right] \quad (2.33)$$

$$= -U_s \frac{1}{a_2 - a_1} [(b_1 + a_2) e^{a_2 t} - (b_1 + a_1) e^{a_1 t}] \quad (2.34)$$

$$u_2(t) = \mathcal{L}^{-1}\{U_2(s)\} = U_s \left[\frac{a_2 + b_2}{a_2 - a_1} e^{a_2 t} - \frac{a_1 + b_2}{a_2 - a_1} e^{a_1 t} \right] \quad (2.35)$$

$$= U_s \frac{1}{a_2 - a_1} [(b_2 + a_2) e^{a_2 t} - (b_2 + a_1) e^{a_1 t}] \quad (2.36)$$

mit den Koeffizienten von oben. Wie in Abschnitt 2.4.3 bereits erwähnt, sind die Einzelspannungen keine einfachen Exponentialfunktionen mehr. Durch die Kopplung über die Parallelkomponenten ergeben sich neben anderen Zeitkonstanten auch für beide Teilsysteme Spannungsverläufe, die von *beiden* Zeitkonstanten abhängen.

Für die Rückkehrspannung $u_r(t)$ ergibt sich damit

$$u_r(t) = u_1(t) + u_2(t) = U_s \frac{1}{a_2 - a_1} [(b_2 - b_1) e^{a_2 t} - (b_2 - b_1) e^{a_1 t}] \quad (2.37)$$

$$= U_s \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} [e^{a_2 t} - e^{a_1 t}] \quad (2.38)$$

Die Faktoren a_1 und a_2 der Exponenten der Exponentialfunktionen stellen die Kehrwerte der Zeitkonstanten τ'_1 bzw. τ'_2 dar:

$$a_1 = -\frac{1}{\tau'_1} \Rightarrow \tau'_1 = \frac{1}{\frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}} \quad (2.39)$$

$$a_2 = -\frac{1}{\tau'_2} \Rightarrow \tau'_2 = \frac{1}{\frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}} \quad (2.40)$$

$$\Rightarrow a_2 - a_1 = -\frac{1}{\tau'_2} + \frac{1}{\tau'_1} = \frac{\tau'_2 - \tau'_1}{\tau'_1 \tau'_2} \quad (2.41)$$

Die „gestrichenen“ Größen (z.B. $\tau'_1, \tau'_2, \lambda'$) berücksichtigen im Unterschied zu den Größen des reinen Maxwell-Modells (τ_1, τ_2, λ) einen Parallelwiderstand R_P und/oder eine Parallelkapazität C_P . In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die „gestrichenen“ Zeitkonstanten τ'_1 und τ'_2 nicht mehr das physikalische Verhalten der mit ihnen verknüpften Isolierkomponenten beschreiben, sondern ein komplexeres System.

Setzt man die Zeitkonstanten ein, ergibt sich folgende Darstellung für die Einzelspannungen:

$$u_1(t) = -U_s \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} \left[\left(b_1 - \frac{1}{\tau'_2} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_2}} - \left(b_1 - \frac{1}{\tau'_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.42)$$

$$u_2(t) = U_s \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} \left[\left(b_2 - \frac{1}{\tau'_2} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_2}} - \left(b_2 - \frac{1}{\tau'_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.43)$$

Die Rückkehrspannung ergibt sich daraus zu

$$u_r(t) = u_1(t) + u_2(t) = U_s (b_2 - b_1) \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} \left[e^{-\frac{t}{\tau'_2}} - e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.44)$$

Der Ausdruck $(b_2 - b_1)$ in Gleichung (2.44) lässt sich in zwei Faktoren zerlegen:

$$b_2 - b_1 = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{1}{1 + C_P \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}} \quad (2.45)$$

Der erste Bruch ist nur von den Einzelzeitkonstanten des ursprünglichen Maxwell-Ersatzschaltbildes (also ohne R_P und C_P) abhängig. Der zweite Term ist nur dann verschieden von 1, wenn C_P nicht 0 ist. Der gesamte Faktor vor dem Exponential-Ausdruck in der Formel für $u_r(t)$ kann nun durch Zusammenfassung der einzelnen Faktoren umgeschrieben werden:

$$(b_2 - b_1) \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} = \overbrace{\frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1}}^{\alpha} \overbrace{\frac{1}{1 + C_P \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}}}^{\beta} \quad (2.46)$$

$$\Rightarrow \alpha = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} = \frac{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}}{\frac{1}{\tau'_1} - \frac{1}{\tau'_2}} \quad (2.47)$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{1}{1 + C_P \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}} \quad (2.48)$$

α ist der Quotient der Differenzen der Kehrwerte der Zeitkonstanten der beiden RC-Glieder des Maxwell-Ersatzschaltbildes und derjenigen der beiden Exponentialfunktionen der Rückkehrspannungskurve. Der Ausdruck wird 1, wenn $\tau'_i = \tau_i$ gilt, also wenn das Modell weder eine Parallelkapazität noch einen Parallelwiderstand enthält und die Zeitkonstanten der Exponentialfunktionen die (nicht gekoppelten) Einzelzeitkonstanten der RC-Glieder sind. β ist nur dann verschieden von 1, wenn eine nicht vernachlässigbare Parallelkapazität C_P vorhanden ist. Die Rückkehrspannung ergibt sich mit diesen Substitutionen zu

$$u_r(t) = \alpha \beta U_s \left[e^{-\frac{t}{\tau'_2}} - e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.49)$$

Eine wichtige Folgerung aus den gezeigten Zusammenhängen ist, dass der Typ der Rückkehrspannungskurve trotz der Parallelschaltung von R_P und/oder C_P unverändert eine

Summe zweier Exponentialfunktionen ist. Es ändern sich lediglich die Zeitkonstanten und es kommt ein Faktor hinzu, der sich je nach Kombination aus α und β zusammensetzt und der die Amplitude der Kurve entsprechend verringert.

Abbildung 2.10 auf der nächsten Seite zeigt die vier möglichen Kombinationen des Ersatzschaltbildes – vom „reinen“ Maxwell-Ersatzschaltbild ohne Parallelkomponenten bis zum komplexesten Fall mit R_P und C_P – mit ihren Parametern.

2.4.6 Ermittlung von Kurvenform-Parametern

Aus den oben ermittelten Gleichungen für den Verlauf der Rückkehrspannungskurve lassen sich prinzipiell die für die Analyse der Kurvenform benötigten Parameter U_m , t_m und s ermitteln. In allen Fällen wird die erste Ableitung von $u_r(t)$ benötigt. Diese ergibt sich zu

$$\dot{u}_r(t) = \alpha\beta U_s \left[-\frac{1}{\tau'_2} e^{-\frac{t}{\tau'_2}} + \frac{1}{\tau'_1} e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.50)$$

Um den **Zeitpunkt des Maximums** zu erhalten, muss Gleichung (2.50) zu null werden. Dies ist nur dann der Fall, wenn entweder der Term $\alpha\beta U_s$ zu null wird, was nur im Falle einer Gleichheit der Einzelzeitkonstanten zutreffen kann, oder wenn der Term in der eckigen Klammer, also die Differenz der beiden e-Funktionen mit ihren konstanten Faktoren zu Null wird. Ersteres würde allerdings dazu führen, dass keine Rückkehrspannung auftritt, also die Ableitung für alle Werte von t null ist, weshalb dieser Fall nicht näher betrachtet werden muss.

Im zweiten Fall ergibt sich für t_m

$$\frac{1}{\tau'_2} e^{-\frac{t}{\tau'_2}} = \frac{1}{\tau'_1} e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \quad (2.51)$$

$$\Rightarrow t = t_m = \frac{\tau'_1 \tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} \ln \left(\frac{\tau'_2}{\tau'_1} \right) \quad (2.52)$$

Mit $\lambda' = \tau'_2/\tau'_1$ ergibt sich

$$t_m = \tau'_1 \frac{\lambda'}{\lambda' - 1} \ln \lambda' \quad (2.53)$$

$$= \tau'_2 \frac{1}{\lambda' - 1} \ln \lambda' \quad (2.54)$$

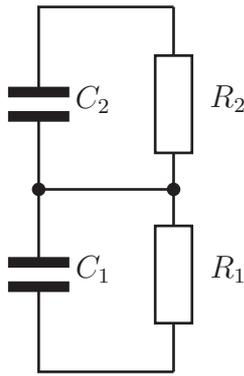
In realen Systemen ist τ'_2 im Regelfall um mindestens eine Größenordnung größer als τ'_1 , so dass λ' im Allgemeinen deutlich größer als 10 ist. In diesem Falle gilt $\lambda'/(\lambda' - 1) \approx 1$, so dass t_m nach Gl. (2.53) vor allem durch die kürzere Zeitkonstante τ'_1 beeinflusst wird. Gl. (2.53) ist dementsprechend anschaulicher und gegenüber Gl. (2.54) vorzuziehen.

Der **Maximalwert U_m der Rückkehrspannung** ergibt sich damit zu

$$U_m = u_r(t_m) = \alpha\beta U_s \left[e^{-\frac{\tau'_1}{\tau'_2 - \tau'_1} \ln \left(\frac{\tau'_2}{\tau'_1} \right)} - e^{-\frac{\tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1} \ln \left(\frac{\tau'_2}{\tau'_1} \right)} \right] \quad (2.55)$$

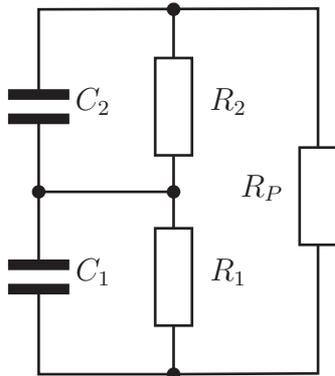
$$= \alpha\beta U_s \left[\left(\frac{\tau'_2}{\tau'_1} \right)^{-\frac{\tau'_1}{\tau'_2 - \tau'_1}} - \left(\frac{\tau'_2}{\tau'_1} \right)^{-\frac{\tau'_2}{\tau'_2 - \tau'_1}} \right] \quad (2.56)$$

$$= \alpha\beta U_s \left[\lambda'^{\left(\frac{1}{1-\lambda'} \right)} - \lambda'^{\left(\frac{\lambda'}{1-\lambda'} \right)} \right] \quad (2.57)$$



$$u_r(t) = U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right)$$

$$\tau_1 = R_1 C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2$$

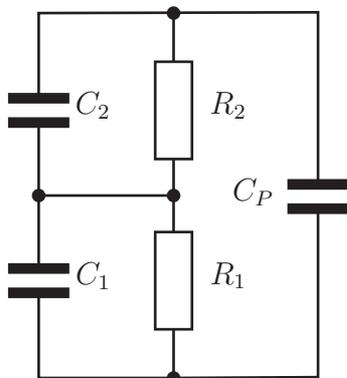


$$u_r(t) = \alpha U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2'}} - e^{-\frac{t}{\tau_1'}} \right)$$

$$\tau_1' = \frac{1}{\frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}, \quad \tau_2' = \frac{1}{\frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}$$

$$v = \frac{C_1 R_1 (R_P + R_2) + C_2 R_2 (R_P + R_1)}{R_P R_1 R_2 C_1 C_2}, \quad w = \frac{R_P + R_1 + R_2}{R_P R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$\alpha = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{\tau_1' \tau_2'}{\tau_2' - \tau_1'} = \frac{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}}{\frac{1}{\tau_1'} - \frac{1}{\tau_2'}}$$



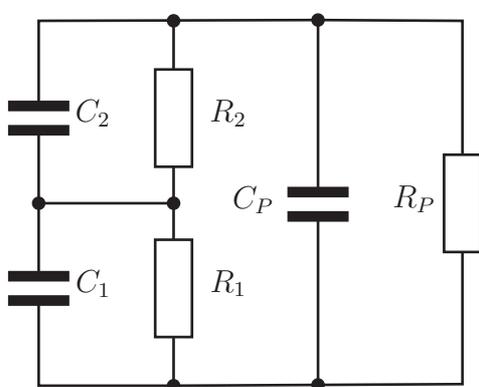
$$u_r(t) = \alpha \beta U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2'}} - e^{-\frac{t}{\tau_1'}} \right)$$

$$\tau_1' = \frac{1}{\frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}, \quad \tau_2' = \frac{1}{\frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}$$

$$v = \frac{C_P (R_1 + R_2) + C_1 R_1 + C_2 R_2}{R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))}$$

$$w = \frac{1}{R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))}$$

$$\alpha = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{\tau_1' \tau_2'}{\tau_2' - \tau_1'}, \quad \beta = \frac{1}{1 + C_P \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}}$$



$$u_r(t) = \alpha \beta U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2'}} - e^{-\frac{t}{\tau_1'}} \right)$$

$$\tau_1' = \frac{1}{\frac{v}{2} - \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}, \quad \tau_2' = \frac{1}{\frac{v}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{2}\right)^2 - w}}$$

$$v = \frac{C_P R_P (R_1 + R_2) + C_1 R_1 (R_P + R_2) + C_2 R_2 (R_P + R_1)}{R_P R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))}$$

$$w = \frac{R_P + R_1 + R_2}{R_P R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))}$$

$$\alpha = \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \frac{\tau_1' \tau_2'}{\tau_2' - \tau_1'}, \quad \beta = \frac{1}{1 + C_P \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}}$$

Abb. 2.10: Zusammenstellung der Ersatzschaltbilder und ihrer Parameter

Die **Anfangssteigung** s' der Rückkehrspannungskurve, die durch $\dot{u}_r(0)$ gegeben ist, lässt sich ebenfalls allgemein ermitteln und anschaulich als Funktion von R_i und C_i darstellen:

$$\dot{u}_r(t) = \alpha\beta U_s \left[-\frac{1}{\tau'_2} e^{-\frac{t}{\tau'_2}} + \frac{1}{\tau'_1} e^{-\frac{t}{\tau'_1}} \right] \quad (2.58)$$

$$\Rightarrow s' = \dot{u}_r(0) = \alpha\beta U_s \left[-\frac{1}{\tau'_2} + \frac{1}{\tau'_1} \right] \quad (2.59)$$

$$= \alpha\beta U_s \frac{\tau'_2 - \tau'_1}{\tau'_1 \tau'_2} \quad (2.60)$$

$$= \beta U_s \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \quad (2.61)$$

$$= U_s \frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{R_1 R_2 (C_1 C_2 + C_P (C_1 + C_2))} \quad (2.62)$$

Damit ist auch rechnerisch nachgewiesen, dass ein dem Maxwell-Ersatzschaltbild parallel geschalteter Widerstand R_P keinen Einfluss auf die Anfangssteigung $s' = \dot{u}_r(0)$ der Messkurve hat. Bei Betrachtung des Ersatzschaltbildes ist das auch anschaulich nachvollziehbar, da sich zu Beginn der Messung (also bei Aufheben des Kurzschlusses) ein Spannungsabfall über R_P erst allmählich einstellt und ein nennenswerter Strom erst dann fließen kann, wenn C_1 sich bereits ein wenig entladen hat. Erst dieser Querstrom verursacht die Kopplung der Entladevorgänge von C_1 und C_2 .

Im Ersatzschaltbild nur mit R_P (ohne C_P) gilt demnach, dass die Einzelspannungen u_1 und u_2 in den ersten Momenten nach Aufheben des Kurzschlusses entkoppelt sind und sich erst später durch die schnellere Entladung von C_1 ein Querstrom und damit eine Kopplung der beiden Teilsysteme (Dielektrika) einstellen kann.

Das führt dazu, dass sich beide Teilkapazitäten zunächst mit den Zeitkonstanten des reinen Maxwell-Ersatzschaltbildes entladen. Für die Faktoren vor den Exponentialfunktionen in Gl. (2.34) und (2.36) in Abschnitt 2.4.5 gilt in diesem Fall dementsprechend, dass sie den Einfluss von R_P auf die Zeitkonstanten τ'_1 und τ'_2 im Anfangsbereich exakt kompensieren.

Für die Summe der Einzelspannungen, die Rückkehrspannung u_r , resultiert aus diesen Faktoren der Koeffizient α (Gl. (2.47)), der anschaulich den Zusammenhang zwischen den Maxwell-Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 und den gestrichenen Werten darstellt.

Eine Parallelkapazität C_P hingegen, die bei Messbeginn keine Ladung enthält, beeinflusst die Kurve bereits im Anfangsbereich, da sie die Gesamtkapazität der Anordnung erhöht. Da der Strom durch eine Kapazität – also das Differenzial der Ladung – nach $i_C = \dot{q}_C = C\dot{u}_C$ vom Differenzial der Spannung abhängt, die vorhandene Gesamtladung jedoch durch C_1 und C_2 gegeben ist, ergibt sich eine Abflachung der Kurve und somit eine geringere Steigung.

Für das ursprüngliche Ersatzschaltbild ohne Parallelkondensator C_P fällt der Faktor β weg und Gleichung (2.61) geht über in

$$s = \frac{s'}{\beta} = U_s \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 \tau_2} \quad (2.63)$$

$$= \frac{U_s}{\tau_1} \frac{\lambda - 1}{\lambda} = \frac{U_s}{\tau_2} (\lambda - 1) \quad \text{mit} \quad \lambda = \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (2.64)$$

Gleichung (2.64) entspricht der für das ursprüngliche Ersatzschaltbild ohne Parallelkomponenten in bisherigen Veröffentlichungen angegebenen Darstellung für s .

Der **p-Faktor** für das vollständige Ersatzschaltbild ergibt sich aus den ermittelten Parametern zu

$$p = \frac{U_m}{s t_m} = \frac{\lambda'(\frac{1}{1-\lambda'}) - \lambda'(\frac{\lambda'}{1-\lambda'})}{\ln \lambda'} \quad (2.65)$$

Für die Diagnose ist es interessant, zu wissen, inwiefern eine Parallelkapazität C_P im Verhältnis zur Prüflingskapazität $C_M = (C_1 C_2)/(C_1 + C_2)$ die Anfangssteigung beeinflusst. Dazu bildet man den Quotienten aus den Steigungen s' für das Ersatzschaltbild mit C_P und s für das reine Maxwell-Ersatzschaltbild. Das führt zu

$$\frac{s'}{s} = \beta = \frac{1}{1 + \frac{C_P}{C_M}} = \frac{C_M}{C_P + C_M} \quad (2.66)$$

Da dieses sich durch Verteilung der verfügbaren Ladung auf eine um C_P größere Kapazität ergebende Verhältnis ausschließlich von der Gesamtkapazität des Prüflings C_M (reines Maxwell-Ersatzschaltbild) und der dazu parallel geschalteten Kapazität C_P abhängt und es demzufolge unerheblich ist, ob der Prüfling zusätzlich zu C_M bereits eine Parallelkapazität C'_M enthält oder nicht, ist es nicht möglich, durch experimentelles Parallelschalten unterschiedlicher bekannter Kapazitäten aufgrund der Änderung der Anfangssteigung s herauszufinden, wie groß die geometrische Kapazität des Prüflings bzw. das Verhältnis zwischen dieser und der Kapazität des reinen Maxwell-Anteils tatsächlich ist. Mit C'_M ergibt sich

$$\frac{s''}{s'} = \frac{C_M + C'_M}{C_P + C_M + C'_M} \quad (2.67)$$

C_M und C'_M sind additiv verknüpft, so dass dieser Term zu Gleichung (2.66) äquivalent ist. Eine Veränderung von C_P hat nur Einfluss auf den Nenner und lässt demzufolge keine Schlüsse auf das Verhältnis C'_M/C_M und damit auf die Kapazität C_M des reinen Maxwell-Anteils zu.

2.4.7 Einfluss des Messwiderstandes auf die Zeitkonstanten

Die Zeitkonstanten der Rückkehrspannungskurve werden durch einen parallel geschalteten Widerstand beeinflusst. Dieser Parallelwiderstand R_P besteht zumindest anteilig aus dem Innenwiderstand des Messgerätes, der im Regelfall bekannt ist. Für die Auswertung ist es interessant, zu wissen, wie groß dieser Einfluss tatsächlich ist bzw. wie stark er sich auf die einzelnen Zeitkonstanten auswirkt.

Ein Auflösen der Ausdrücke für τ'_1 und τ'_2 (Gl. (2.39) und (2.40)) nach R_P ist, wie vorstehend erwähnt, nicht möglich. Anhand der in Abschnitt 2.4.5 angegebenen Formeln können jedoch exemplarische Berechnungen für bestimmte Kombinationen von R_i und C_i durchgeführt werden.

Grundsätzlich setzt der Einfluss auf τ'_2 bereits bei deutlich höheren Werten von R_P ein als der Einfluss auf τ'_1 . Abb. 2.11 zeigt links für das in Abb. 2.7 gezeigte Beispiel den Verlauf der Einzelzeitkonstanten über dem Parallelwiderstand R_P . Offensichtlich führt ein R_P in der Größenordnung von R_2 dazu, dass τ'_2 sich gegenüber der entsprechenden Zeitkonstante des reinen Maxwell-Ersatzschaltbildes τ_2 ungefähr halbiert, bei kleinen Werten für R_P aber einem Grenzwert zustrebt. τ'_1 wird erst bei deutlich kleineren Werten von R_P signifikant beeinflusst, wird aber anscheinend beliebig klein.

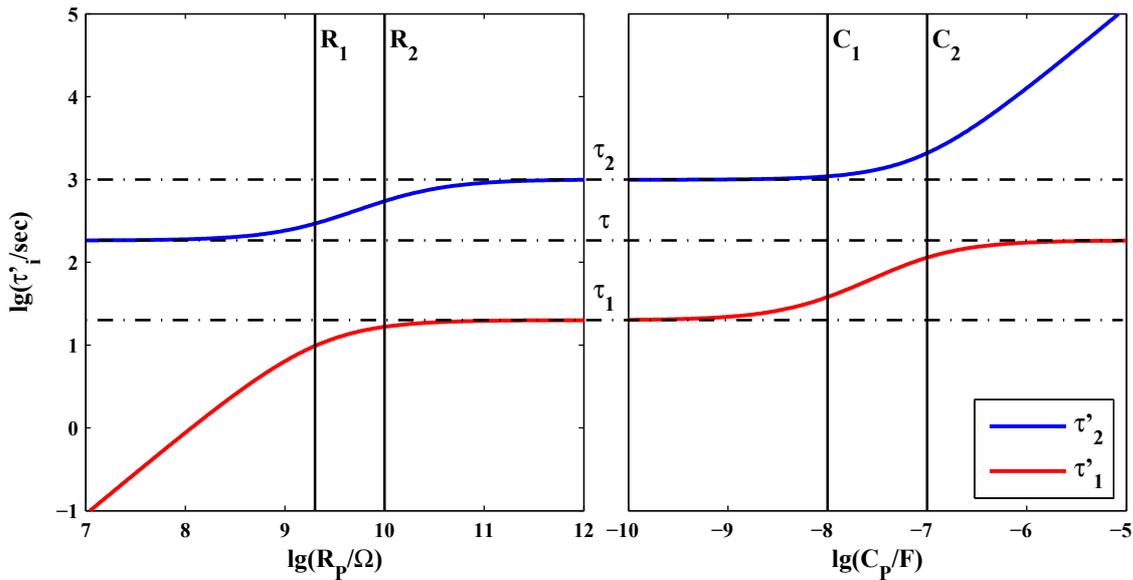


Abb. 2.11: Abhängigkeit der Zeitkonstanten τ'_1 und τ'_2 von R_P (links) und C_P für das Beispiel aus Abb. 2.7, in der Mitte der „ungestörte Fall“ mit $C_P \ll C_1$ bzw. $C_P \rightarrow 0$ und $R_P \gg R_2$ bzw. $R_P \rightarrow \infty$

Der untere Grenzwert, der sich für τ'_2 ergibt, entspricht der Systemzeitkonstante τ . Dies ist leicht nachzuvollziehen, wenn man sich vor Augen führt, dass ein immer kleiner werdender Parallelwiderstand bedeutet, dass sich das System dem Kurzschlussfall nähert, in dem sich effektiv die Parallelschaltung von C_1 und C_2 über diejenige aus R_1 und R_2 entlädt (mit τ nach Gl. (2.1)). Da der Widerstand aber gegenüber dem eigentlichen Kurzschlusswiderstand des Messgerätes immer noch vergleichsweise groß ist, entsteht nach wie vor eine Rückkehrspannung, die aufgrund des immer kleiner werdenden τ'_1 immer steiler ansteigt – was zu einem immer früheren, aber auch immer niedrigeren Maximum führt –, während die Zeitkonstante des Abfalls konstant bleibt.

2.4.8 Einfluss einer Parallelkapazität auf die Zeitkonstanten

Auch der Einfluss einer dem Maxwell-Modell parallel geschalteten Kapazität, die sich z.B. durch die geometrische Kapazität von nicht an der Grenzflächenpolarisation beteiligten Teilen der Isolierung bzw. – speziell im Falle von Kabeln – durch Teilkabelstrecken mit Kunststoffisolierung ergibt, auf die Zeitkonstanten ist für die Auswertung der Daten von Bedeutung. Abb. 2.11 rechts zeigt die Zusammenhänge wiederum für das vorstehende Beispiel.

Der Effekt von C_P ist offensichtlich (zumindest qualitativ) ein „Spiegelbild“ desjenigen von R_P . Beide Zeitkonstanten erhöhen sich mit größeren Kapazitätswerten erheblich, wobei in diesem Falle allerdings τ'_1 einem Grenzwert zustrebt und τ'_2 offenbar beliebig groß werden kann. Für $C_P \approx C_1$ ergibt sich ungefähr eine Verdoppelung von τ'_1 , mit $C_P \approx C_2$ wird $\tau'_1 > 5 \tau_1$. Im Falle von τ'_2 ergibt sich mit $C_P \approx C_1$ eine Erhöhung um etwa 12 %, mit $C_P \approx C_2$ ungefähr eine Verdoppelung.

Der obere Grenzwert für τ'_1 ist identisch mit dem unteren Grenzwert für τ'_2 unter Einfluss des Parallelwiderstandes (s. Abschnitt 2.4.7) und damit mit τ , was aus der Gegenüberstellung in Abb. 2.11 sehr anschaulich hervorgeht. Dieses Verhalten beruht darauf, dass

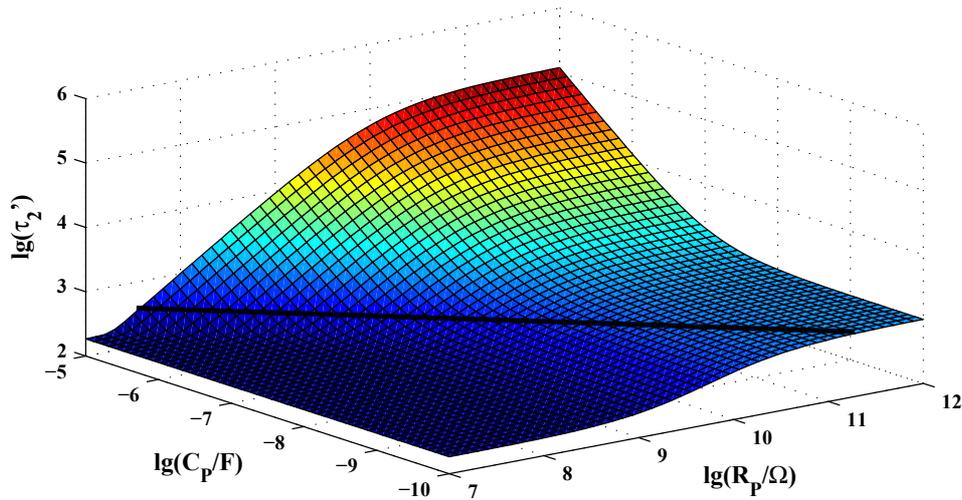


Abb. 2.12: Einfluss von R_P und C_P auf die Zeitkonstante τ_2'

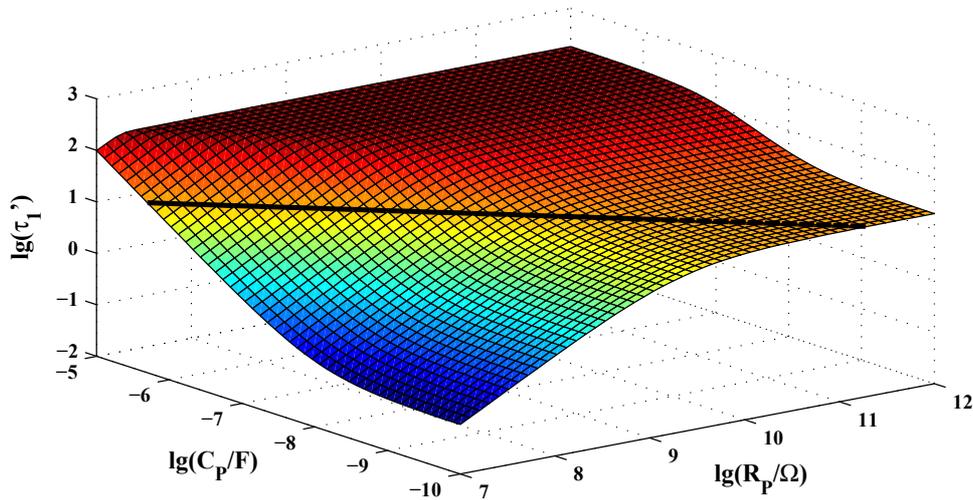


Abb. 2.13: Einfluss von R_P und C_P auf die Zeitkonstante τ_1'

eine sehr große Parallelkapazität für den Anfangsanstieg der Rückkehrspannungskurve praktisch einen Kurzschluss darstellt, wodurch sich der Umladevorgang mit der Systemzeitkonstante τ abspielt. Erst im weiteren Verlauf wächst der Einfluss von τ_2' und die Kurve fällt mit einer mit größer werdendem C_P wachsenden Zeitkonstante τ_2' ab.

Abb. 2.13 und 2.12 zeigen in dreidimensionaler Darstellung den Einfluss von Kombinationen aus R_P und C_P auf die Zeitkonstanten für das vorstehend verwendete Beispiel. Es ist erkennbar, dass für bestimmte Werte eine Kompensation eintritt, d.h. der Einfluss einer Parallelkapazität hebt denjenigen eines Parallelwiderstandes auf. Dies geht aus der Gegenläufigkeit der Effekte nach Abb. 2.11 hervor.

Die Werte, bei denen eine Kompensation eintritt, für die also gilt $\tau_i' = \tau_i$, liegen jeweils auf einer Geraden mit $R_P C_P = \tau_i$. Die Gerade ist in den Diagrammen eingezeichnet. Da die Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 trivialerweise nie gleich sind, tritt die Kompensation maximal für eine Zeitkonstante auf.

2.4.9 Parallelschaltung mehrerer Systeme

Besteht die zu betrachtende Isolieranordnung aus einer Parallelschaltung mehrerer unterschiedlicher Isoliersysteme (d.h. Systeme mit unterschiedlichen Zeitkonstanten), die nach dem Maxwell-Ersatzschaltbild modellierbar sind, dann steigt die Ordnung des Systems mit jedem zusätzlichen System um eins. Zwei parallel geschaltete Maxwell-Ersatzschaltbilder ergeben so ein Gesamtsystem dritter Ordnung.

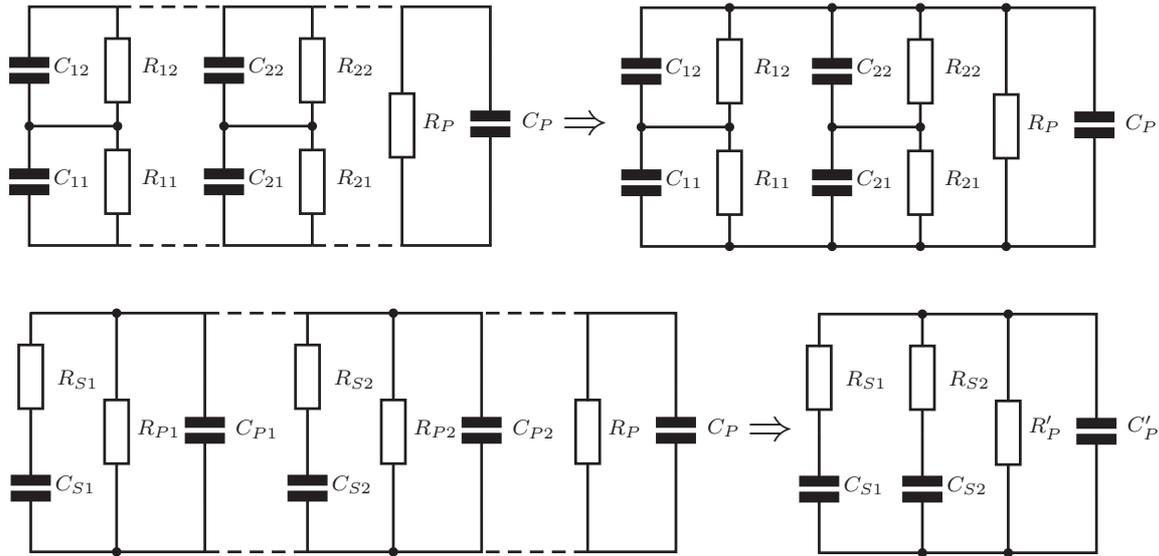


Abb. 2.14: Äquivalenz der Parallelschaltung mehrerer Systeme bei Modellierung nach dem Maxwell-Modell (oben) und die entsprechende Darstellung nach dem formalen Ersatzschaltbild (unten)

Dieses Verhalten wird offensichtlich, wenn man die elektrische Äquivalenz des Maxwell-Modells und des konventionellen Ersatzschaltbildes betrachtet ([Pat05] und Abschnitt 2.4.4). Danach ist jedes Maxwell-Ersatzschaltbild in eine Parallelschaltung aus einer Kapazität, einem Widerstand und einem RC-Serienglied umrechenbar. Die Parallelkapazität trägt, wie in Abschnitt 2.4.5 erwähnt, nichts zur Ordnung des Systems bei, sondern erhöht lediglich die geometrische Kapazität des Prüflings, so dass lediglich durch das RC-Element genau eine Exponentialfunktion hinzukommt. Die Widerstände können als Parallelschaltung ebenfalls jeweils zusammengefasst werden. Abb. 2.14 zeigt anschaulich die elektrische Äquivalenz der Ersatzschaltbilder bei der Parallelschaltung zweier Systeme.

Zusätzliche Polarisationsprozesse, deren Zeitkonstanten sich deutlich von denen des – durch das Maxwell-Modell nachgebildeten – überwiegenden Anteils der Grenzflächenpolarisation unterscheiden, führen also zu Rückkehrspannungskurven, die nicht durch eine Summe zweier Exponentialfunktionen beschreibbar sind. Dabei ist es – aufgrund der beschriebenen Äquivalenz – unerheblich, ob diese Polarisationsprozesse durch Grenzflächen- oder andere Polarisationsmechanismen hervorgerufen werden. Die Abweichung vom „idealen“ Maxwell-Verhalten kann zur Beurteilung von Isoliersystemen herangezogen werden, wie im Folgenden noch erläutert wird.

Es hat sich gezeigt, dass reale Objekte in vielen Fällen kein reines Maxwell-Verhalten aufweisen. Dies führt dazu, dass eine Interpretation von Messdaten durch das in den vorstehenden Abschnitten beschriebene Ersatzschaltbild meist nur eine Näherung liefert, die

aber für eine Diagnose ausreichen kann. Die Abweichung vom Idealverhalten kann, wie in den folgenden Abschnitten erläutert, zur Diagnose herangezogen werden, da Isoliersysteme ohne nennenswerten Alterung im Regelfall reines Maxwell-Verhalten aufweisen.

Die Vorgänge im Ersatzschaltbild mit Zusatzelementen zur Nachbildung o.g. Polarisationsprozesse sind nicht mehr mit vertretbarem Aufwand geschlossen darstellbar, zumal es keine einfache (additive) Überlagerung der einzelnen Komponenten gibt, sondern jedes Zusatzelement das gesamte System beeinflusst. Selbst die Darstellung des einfachen Maxwell-Ersatzschaltbildes mit Parallelkapazität und Messwiderstand ist schon relativ unübersichtlich.

[Jot99] beschreibt zwar für das formale Ersatzschaltbild Systeme mit bis zu zwei parallelen RC-Seriengliedern, was elektrisch gesehen äquivalent zu zwei parallelen Maxwell-Ersatzschaltbildern ist, jedoch sind auch die dort beschriebenen Ausdrücke bereits recht komplex. Durch die Umrechnung (s. Abschnitt 2.4.4) ergäben sich sehr unübersichtliche Zusammenhänge. Eine sinnvollere Methode zur Analyse des Einflusses solcher Zusatzkomponenten stellt eine numerische Simulation dar.

2.4.10 U_m im Polarisationspektrum

Das bereits erwähnte Verfahren des Polarisationspektrums basiert auf der Auswertung der Abhängigkeit der Amplitude U_m der Rückkehrspannung von der Polarisationszeit t_p bei konstantem Verhältnis t_p/t_d . Dabei ergibt sich bei einer ausreichenden Variation von t_p ein Maximum von U_m , wobei der entsprechende Wert von t_p als sogenannte „dominante Zeitkonstante“ des ausgeprägtesten Polarisationsprozesses interpretiert wird.

Es ergibt sich jedoch erwartungsgemäß (aufgrund der nachgewiesenen elektrischen Äquivalenz der Ersatzschaltbilder) auch bei der Interpretation anhand des Maxwell-Ersatzschaltbildes ein Maximum für U_m in Abhängigkeit von t_p bzw. t_d , wie für das formale Ersatzschaltbild nachgewiesen [Csé98].

Gleichung 2.57 auf Seite 20 zeigt, dass U_m bei gleichen Modellparametern ausschließlich von U_s , also der Spannung, die nach Aufheben des Kurzschlusses an C_1 und C_2 anliegt, abhängt. Da sich die Elemente R_i und C_i des Modells i.d.R. während einer Messreihe zur Bestimmung des Polarisationspektrums nicht ändern, gilt der Zusammenhang $U_m \sim U_s$.

U_s ist nach Gleichung 2.3 auf Seite 13 ebenfalls von den (konstanten) Elementen des Modells und von t_p sowie t_d abhängig. Fasst man in Gleichung (2.3) alle während der Messung konstanten Größen zu einer Konstanten K zusammen, dann erhält man

$$U_s = \frac{\lambda - 1}{1 + \lambda + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1}} U_p \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau}}\right) e^{-\frac{t_d}{\tau}} = K U_p \left(1 - e^{-\frac{t_p}{\tau}}\right) e^{-\frac{t_d}{\tau}} \quad (2.68)$$

U_p ist dabei ebenfalls konstant. Führt man zusätzlich ein konstantes Verhältnis $k_t = t_p/t_d = \text{const.}$ ein, dann erhält man

$$U_s = K U_p \left(1 - e^{-\frac{k_t t_d}{\tau}}\right) e^{-\frac{t_d}{\tau}} = K U_p \left(e^{-\frac{t_d}{\tau}} - e^{-(k_t+1)\frac{t_d}{\tau}}\right) \quad (2.69)$$

Der sich ergebende Ausdruck für U_s entspricht in der Form einer Rückkehrspannungskurve als Summe zweier Exponentialfunktionen, besitzt also ein definiertes Maximum. Dieses

lässt sich analog zu t_m bei der Rückkehrspannungskurve bestimmen. Die Ableitung von Gl. (2.69) ergibt sich zu

$$U'_s = K U_p \left(-\frac{1}{\tau} e^{-\frac{t_d}{\tau}} - \left(-\frac{k_t + 1}{\tau} \right) e^{-(k_t+1)\frac{t_d}{\tau}} \right) \quad (2.70)$$

$$= K U_p \left(\frac{k_t + 1}{\tau} e^{-(k_t+1)\frac{t_d}{\tau}} - \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t_d}{\tau}} \right) \quad (2.71)$$

Mit der Extremwertbedingung $U'_s = 0$ und unter Ausschluss der Trivialsösung erhält man analog zu t_m aus Gl. (2.53) allgemein für $t_{d, max}$, also den Wert von t_d , für den U_s und damit U_m maximal wird:

$$t_{d, max} = -\frac{\tau}{k_t} \ln \frac{1}{k_t + 1} \quad (2.72)$$

$t_{d, max}$ ist über k_t mit der Gesamtzeitkonstante τ verknüpft. Für den beim Polarisationspektrum verwendeten Wert $k_t = 2$ ergibt sich

$$t_{d, max} = \frac{1}{2} t_{p, max} = -\frac{\tau}{2} \ln \frac{1}{3} = 0,549 \tau \quad (2.73)$$

Damit entspräche die dem maximalen U_m entsprechende Polarisationszeit $t_{p, max}$ ungefähr dem 1,1-fachen der Systemzeitkonstante τ des Modells.

Das Resultat dieser Herleitung entspricht dem in [Csé98] erzielten, nur dass dort das formale Ersatzschaltbild die Grundlage bildet. Anhand der elektrischen Äquivalenz von Maxwell-Modell und formalem Ersatzschaltbild lässt sich auch nachvollziehen, dass die in [Csé98] erwähnte Ladezeitkonstante τ_p der Systemzeitkonstanten τ im Maxwell-Modell entspricht. Diese entspricht wiederum der Abklingzeitkonstante des Ladestromes.

2.5 Neue Ansätze zur Auswertung von Messdaten

Auf der Grundlage der in den vorstehenden Abschnitten erörterten Zusammenhänge ergeben sich neue Methoden zur Auswertung des Verlaufs von Rückkehrspannungskurven. Mit der Kenntnis des Einflusses unterschiedlicher Parameter auf die Messkurve ist es z.B. möglich, die Einzelzeitkonstanten des Maxwell-Anteils zumindest in guter Näherung zu bestimmen und damit auf den Zustand der beiden Einzelkomponenten der Öl-Zellulose-Isolierung zu schließen. Auch andere Effekte können auf dieser Basis beschrieben werden.

2.5.1 Ermittlung der Zeitkonstanten aus einer Messkurve

Aufgrund mathematischer Zusammenhänge ist es möglich, mit der Kenntnis einiger weniger Kurvenform-Parameter einer beliebigen Messdaten-Kurve nach dem Schema

$$u_r(t) = U_0 \left[e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] \quad (2.74)$$

die dazugehörigen Zeitkonstanten τ_1' und τ_2' zu ermitteln und somit eine mathematische Beschreibung für den Kurvenverlauf zu finden [Pat07a, Pat08a, Men08]. Gleichung (2.74) ist eine vereinfachte Form von Gleichung (2.49) auf S. 19, wobei $U_0 = \alpha\beta U_s$ gesetzt wird. Für Kurven dieses Typs gelten einige grundlegende Gesetzmäßigkeiten:

Abhängigkeit der Kurvenform von λ' : Durch eine doppelte Normierung der Messdaten-Kurve sowohl auf die Amplitude U_m als auch auf den Zeitpunkt t_m des Maximums ergibt sich ein Kurvenverlauf, der ausschließlich vom Verhältnis $\lambda' = \tau_2'/\tau_1'$ abhängt, wobei es unerheblich ist, ob es sich um die gestrichenen Größen handelt oder um die reinen Maxwell-Größen τ_1 , τ_2 und λ ⁴.

Rekonstruierbarkeit der Kurvenform: Die durch Normierung gewonnene Kurve ist eindeutig durch drei Punkte beschreibbar, von denen einer durch den Ursprung (0, 0) und ein weiterer durch den Punkt (1, 1), der aufgrund der doppelten Normierung allen Kurven gemeinsam ist, gegeben ist. Der dritte Punkt kann im Prinzip beliebig gewählt werden.

Bestimmbarkeit der Zeitkonstanten: Aus dem Zusammenhang

$$t_m = \tau_1 \frac{\lambda}{\lambda - 1} \ln \lambda$$

ergibt sich die Möglichkeit, anhand des ermittelten Wertes für λ die Zeitkonstante τ_1 zu bestimmen. Mit deren Kenntnis wiederum lässt sich τ_2 ermitteln.

Da es für die Bestimmung der Zeitkonstanten keine Rolle spielt, ob es sich um ein reines Maxwell-Ersatzschaltbild handelt oder um eines mit Parallelkomponenten R_P und/oder C_P , wird im Folgenden auf die gestrichenen Größen verzichtet, zumal keine direkte Möglichkeit existiert, das Vorhandensein von Parallelkomponenten aus einer Messkurve direkt abzuleiten.

Die Abhängigkeit der Form der doppelt normierten Kurve von λ drückt sich dergestalt aus, dass Kurven mit größerem λ im gesamten Verlauf (bis auf Ursprung und Maximum) höhere y-Werte besitzen als Kurven mit kleinerem λ (s. Abb. 2.15 auf der nächsten Seite). Da in der unmittelbaren Umgebung der beiden Fixpunkte die Abhängigkeit von λ weniger ausgeprägt ist, ist es sinnvoll, den dritten Stützpunkt aus einem Bereich zu wählen, in dem die Abhängigkeit besonders groß ist. Für die doppelt normierte Kurve gilt der Zusammenhang

$$u_{r, \text{norm}}(t/t_m) = \frac{u_r(t)}{U_m} = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{1-\lambda}} - \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}}} \left[\left(\lambda^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{t/t_m} - \left(\lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \right)^{t/t_m} \right] \quad (2.75)$$

mit λ als einziger Variable. Für einen beliebigen Punkt auf der Kurve an der Stelle t_f gilt dann:

$$u_{r, \text{norm}}(t_f/t_m) = \frac{1}{\lambda^{\frac{1}{1-\lambda}} - \lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}}} \left[\left(\lambda^{\frac{1}{1-\lambda}} \right)^{t_f/t_m} - \left(\lambda^{\frac{\lambda}{1-\lambda}} \right)^{t_f/t_m} \right] \quad (2.76)$$

Dieser Ausdruck ist relativ komplex und nicht mit vertretbarem Aufwand nach λ auflösbar. Dementsprechend muss die Suche nach dem Wert für λ in der Praxis numerisch – z.B. durch eine Intervallschachtelung – erfolgen.

Abb. 2.16 auf der nächsten Seite zeigt den Verlauf des Funktionswertes von Gleichung (2.76) für unterschiedliche Werte von $t_f/t_m < 1$ in Abhängigkeit von λ . Die Kurve für $t_f/t_m = 0,2$ (durchgezogene Linie) besitzt im relevanten Bereich die größte Steigung, so dass der Wert sich offensichtlich für eine Ermittlung von λ am besten eignet.

⁴Aus diesem Grund wird im Folgenden auf die Verwendung der gestrichenen Größen verzichtet

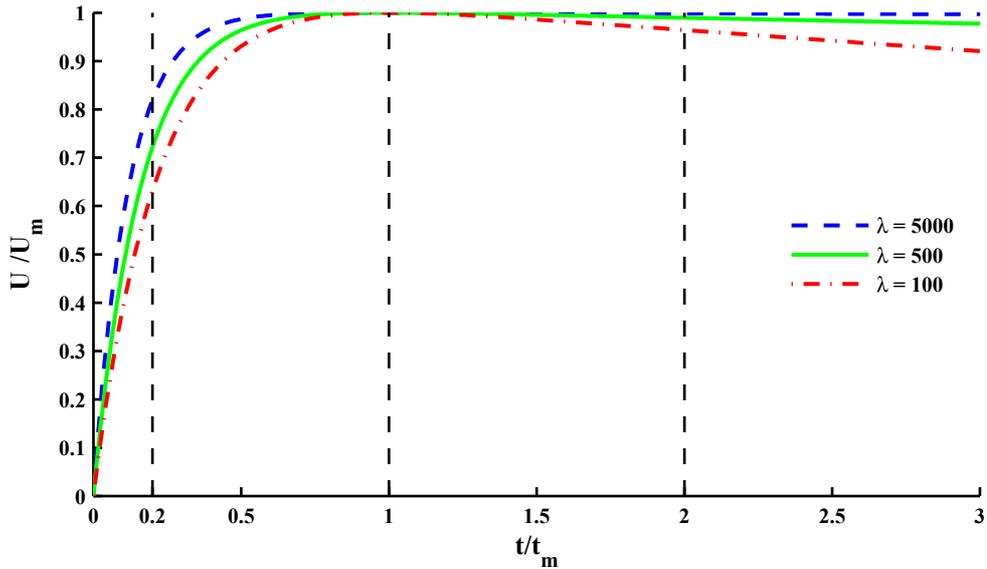


Abb. 2.15: Verläufe doppelt normierter Funktionen mit unterschiedlichen Werten für λ bzw. λ'

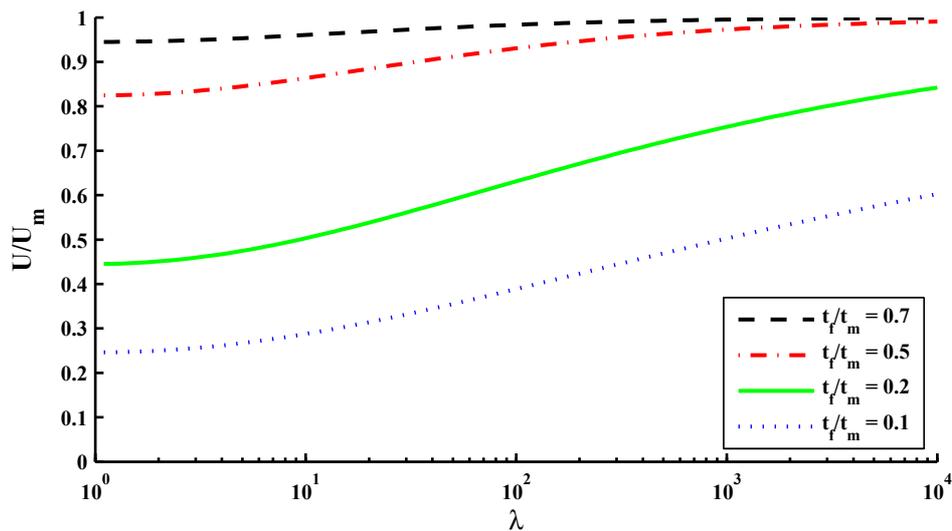


Abb. 2.16: Abhängigkeit des Wertes aus Gl. (2.76) von λ bzw. λ' für unterschiedliche $t_f < t_m$

Wie die nachfolgenden Abschnitte zeigen werden, ist eine alleinige Approximierung mit $t_f < t_m$ jedoch bei realen Messungen im Regelfall nicht sinnvoll, da gerade in diesem Bereich durch Alterungsprozesse bedingte Störeffekte eine Rolle spielen und der Kurvenverlauf nicht repräsentativ für die zugrunde liegende Grenzflächenpolarisation ist.

2.5.1.1 p-Faktor bei Transformatoren

Der p-Faktor ist eine Größe, die für die Auswertung von Rückkehrspannungsmessungen an papierisolierten Kabeln seit längerem erfolgreich zum Einsatz kommt [Pat02b]. Der

p-Faktor ist definiert als

$$p = \frac{U_m}{s t_m} = \frac{\lambda^{(\frac{1}{1-\lambda})} - \lambda^{(\frac{\lambda}{1-\lambda})}}{\ln \lambda} \quad (2.77)$$

Die analytische Herleitung ist in Abschnitt 2.4.6 beschrieben. Der p-Faktor ist eine dimensionslose Zahl, deren Wert aufgrund der ausschließlichen Abhängigkeit vom Verhältnis $\lambda = \tau_2/\tau_1$ nicht von der Geometrie des Prüflings abhängt. Dies gilt allerdings nur bei angenähert reinem Maxwell-Verhalten. Durch die Abhängigkeit nur vom Verhältnis der Zeitkonstanten ergibt sich auch eine im Vergleich zu anderen Parametern relativ geringe Temperaturunabhängigkeit [Pat02c], was sich speziell bei Messungen an Kabeln zu unterschiedlichen Jahreszeiten positiv auf die Vergleichbarkeit der Messwerte auswirkt.

Messungen an Papier-Masse-Kabeln haben gezeigt, dass der p-Faktor eine gute Diagnosegröße für den Zustand der Isolierung darstellt, was sich speziell aus der engen Kopplung der beiden Isolationskomponenten Zellulose und Öl/Tränkmasse ableitet. Bei Transformatoren liegen die beiden Komponenten weitgehend getrennt vor. Dadurch reagiert das Gesamtsystem anders auf Alterung, was dazu führt, dass der p-Faktor in diesem Fall nicht als Diagnosegröße geeignet ist.

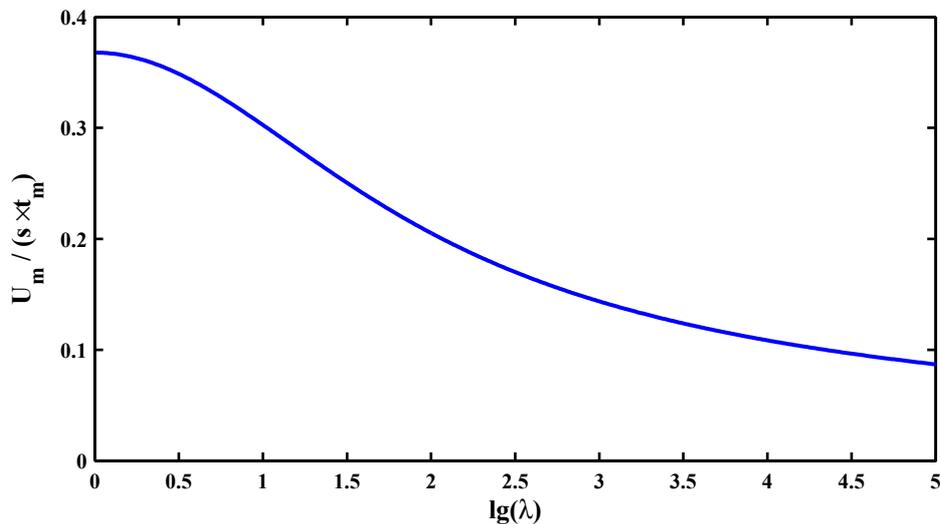


Abb. 2.17: Zusammenhang zwischen $U_m/(s t_m)$ und λ

Die Ausnutzung des Zusammenhangs des Verhältnisses $U_m/(s t_m)$ mit λ (s. Abschnitt 2.4.6) kann jedoch prinzipiell alternativ zur vorstehend beschriebenen Methode zur Bestimmung der Zeitkonstanten genutzt werden [Pat06c]. Dazu wird zunächst aus den Standardparametern U_m , t_m und s das Verhältnis gebildet, aus dem λ ableitbar ist. Abb. 2.17 zeigt den Bezug zwischen $U_m/(s t_m)$ und λ nach Gl. 2.77. Anschließend können aus dem ermittelten λ mit dem normierten Maximum wie vorstehend beschrieben die Zeitkonstanten errechnet werden. Dieses Verfahren ist bisher hauptsächlich bei Messungen an Kabeln zum Einsatz gekommen und führte zu gut vergleichbaren Resultaten.

Vorteil dieses Vorgehens ist die Möglichkeit, die Kurve anhand lediglich dreier Parameter beschreiben zu können. Nachteilig wirkt sich aus, dass in diese Rechnung die Anfangssteigung s eingeht, die nicht immer zuverlässig bestimmbar ist. Für zu kleine Werte von s ergeben sich für das rechnerisch ermittelte Verhältnis $U_m/(s t_m)$ Werte, die größer sind als der durch den theoretischen Zusammenhang mit λ (s. Gl. (2.77)) gegebene Grenzwert von 0,3679. Im Folgenden kommt diese Variante der Berechnung der τ_i allerdings noch

zu Vergleichszwecken zum Einsatz, da sie das Anfangsverhalten einer eventuell gestörten Kurve beschreibt und Fälle, in denen der Ausdruck $U_m/(s t_m)$ tatsächlich größer als 0,3679 ist, eher die Ausnahme bilden.

Prinzipiell ist es natürlich möglich, alternativ die Zeitkonstanten nach den in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Methoden im Anfangsbereich der Kurve zu ermitteln. Allerdings besteht in dem Fall durch die messpunktweise Berechnung und der Nähe zum Ursprung (0, 0) eine je nach Qualität der Messkurve teils erhebliche Streuung der Werte, so dass die Methode mit den Standard-Parametern u.U. vorzuziehen ist, zumal die Anfangssteigung s durch einen Fit über eine größere Anzahl von Messpunkten gewonnen wird und so eine geringere Streuung aufweist als die nicht gefitteten einzelnen Messpunkte.

2.5.1.2 Erkenntnisse bei der Auswertung realer Messdatensätze

Die Auswertung einiger Messdatensätze anhand der vorstehend beschriebenen Vorgehensweise zeigte, dass Messkurven sich durch die bei einem Fit für $t_f < t_m$ resultierenden Verläufe oft nur in der näheren Umgebung des Fitpunktes anfitten lassen. Im Bereich $t > t_m$ werden die Abweichungen schnell größer. Bei den meisten Auswertungen zeigte sich, dass das für $t_f < t_m$ berechnete λ und damit auch das dazugehörige τ_2 jeweils deutlich größer ist als aus dem Endverlauf – also für $t_f > t_m$ – ermittelte Werte.

Besonders für den Fall, dass die Ermittlung von λ mit Hilfe der Anfangssteigung s erfolgte, ergaben sich in vielen Fällen Werte für λ , die zu τ_2 -Werten führten, die erheblich höher liegen als dies aus dem Endverlauf der Kurve hervorgeht. Bei den meisten untersuchten Messkurven wird λ umso kleiner, je mehr der dritte Stützpunkt sich dem Maximum t_m nähert bzw. über dieses hinausgeht (wobei der Bereich in unmittelbarer Umgebung des Maximums aufgrund des flachen Verlaufs der Kurven keine brauchbare Differenzierung liefert). Der Grund dafür ist, dass an realen Objekten gemessene Rückkehrspannungskurven im Anfangsbereich in der Regel „zu steil“ sind, was sich besonders auf dort ermittelte Werte von τ_2 auswirkt.

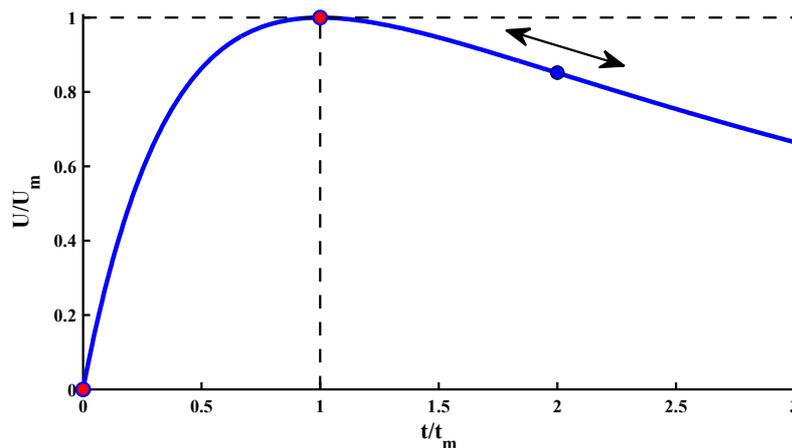


Abb. 2.18: Variation des Stützpunktes für die Berechnung der Zeitkonstanten

Schon in früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass Rückkehrspannungskurven im Anfangsbereich oft ein Verhalten zeigen, das sich nicht durch ein einfaches Maxwell-Ersatzschaltbild zweiter Ordnung modellieren lässt. Besonders zusätzliche Polarisationsprozesse aufgrund von Alterungseffekten in der Isolierung mit Zeitkonstanten im Sekun-

denbereich beeinflussen hier die Kurvenform. Auch alterungsbedingte Änderungen in Teilbereichen der Isolierung – z.B. eine lokale Erhöhung der Leitfähigkeit der Zellulose – führen zu diesen Effekten. Die Abweichungen von der einfachen Maxwell-Form sind für diagnostische Zwecke nutzbar. Die Einflüsse zusätzlicher Polarisationsprozesse mit von der reinen Grenzflächenpolarisation abweichenden Zeitkonstanten wird im Folgenden diskutiert.

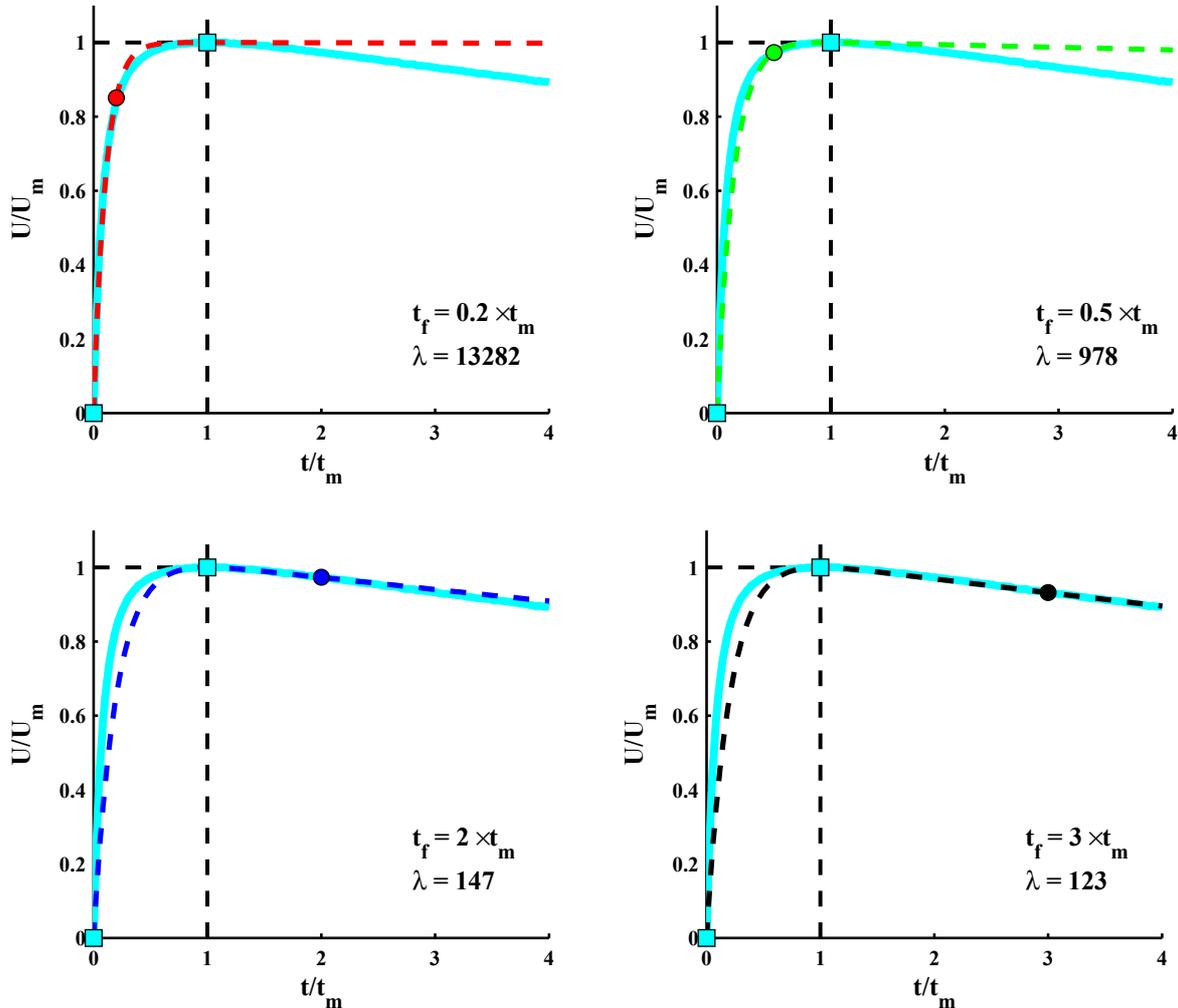


Abb. 2.19: Ermittlung der Zeitkonstanten durch Fit an unterschiedlichen Punkten einer Messkurve für unterschiedliche Stützpunkte t_f , die Fitkurven sind jeweils gestrichelt dargestellt

Abb. 2.19 zeigt eine Reihe von Fits an unterschiedlichen Stellen einer Beispiel-Messkurve. Bei der gezeigten Messkurve, die besonders auffällige Abweichungen im Anfangsverlauf zeigt, erhält man speziell im Bereich vor dem Maximum erhebliche Unterschiede bei den Fitkurven. Das Verhältnis λ der Einzelzeitkonstanten ändert sich in dem Bereich um mehrere Größenordnungen (von über 13000 bei $0,2 t_m$ bis 123 bei $3 t_m$).

Diese Annahmen und Überlegungen führten dazu, dass als dritter Stützpunkt ein Punkt hinter dem Maximum, also mit $t_f > t_m$, gewählt wurde. Betrachtet man analog zu Abb. 2.16 die Änderung der Amplitudenwerte in diesem Bereich (s. Abb. 2.20), dann erkennt man, dass die Änderung in Abhängigkeit von λ zwar bei größeren t_f/t_m insgesamt größer wird, jedoch bei sehr großen λ stark abflacht. Im üblicherweise relevanten Bereich ($10^1 \leq$

$\lambda \leq 10^3$) ist die Änderung jedoch ausreichend ausgeprägt, um eine Approximation mit brauchbarer Auflösung durchzuführen.

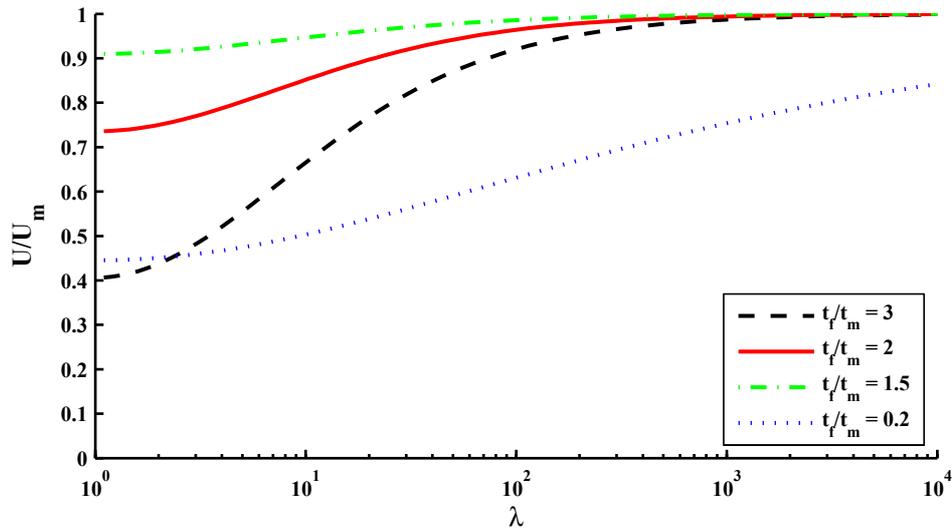


Abb. 2.20: Abhängigkeit des Wertes aus Gl. (2.76) von λ' für unterschiedliche $t_f > t_m$, zum Vergleich die Kurve für $t_f/t_m = 0, 2$

Für die Standard-Auswertung wurde der Punkt $t_f = 2 t_m$ gewählt, der bei einer idealen Maxwell-Kurve auch den Wendepunkt der Kurve darstellt. Bei den meisten Messdatensätzen ist dieser Punkt vorhanden, es existieren aber auch in seltenen Fällen Messungen mit sehr spätem Maximum, insbesondere bei Messungen mit Parallelkondensatoren (s. Abschnitt 2.6.6).

Im Regelfall, wenn eine Approximation mit $t_f = 2 t_m$ möglich ist, zeigt sich eine recht gute Annäherung im Bereich um das Maximum herum, jedoch kann insbesondere der Langzeitverlauf der Fitkurve nach wie vor vom Verlauf der Messkurve abweichen. Der Grund für dieses Verhalten liegt, wie im Folgenden erläutert, in der Wirkung der zusätzlichen Polarisationsprozesse, die zu einem Verlauf der Kurve führen, der nicht mehr durch eine Summe zweier Exponentialfunktionen beschreibbar ist.

Es ist daher anzumerken, dass die Berechnung einer Fitkurve im Falle eines solchen „gestörten“ Systems zwar den Einfluss der zusätzlichen Prozesse sichtbar machen kann, jedoch zunächst nur qualitativ. Jegliche Elemente mit Polarisationsverhalten, die dem ursprünglichen reinen Maxwell-Modell hinzugefügt werden, führen zu einer Erhöhung der Ordnung des Systems und damit zu einer Veränderung des *gesamten* Kurvenverlaufs, d.h. jede Zeitkonstante des Gesamtsystems hängt von *allen* Komponenten des Modells ab.

2.5.1.3 Einfluss zusätzlicher Polarisationsprozesse

Um die bisher gemachten Annahmen über den Einfluss zusätzlicher Polarisationsprozesse zu verifizieren, wurde das ursprüngliche Modell erweitert, wobei das Ersatzschaltbild nach Abb. 2.2 auf Seite 9 als Basis diente. Zunächst wurde ein RC-Serienglied mit im Vergleich zu τ_1 des Maxwell-Ersatzschaltbildes kleiner Zeitkonstante $\tau_Z = R_Z C_Z$ parallel zum Maxwell-Ersatzschaltbild geschaltet (parallel zu C_S in Abb. 2.2). Dies entspräche im Modell einem Bereich der Isolierung, dessen Parameter sich von denen der übrigen

Isolierung unterscheiden, z.B. bedingt durch eine lokale Änderung der Leitfähigkeit einer Isolierkomponente.

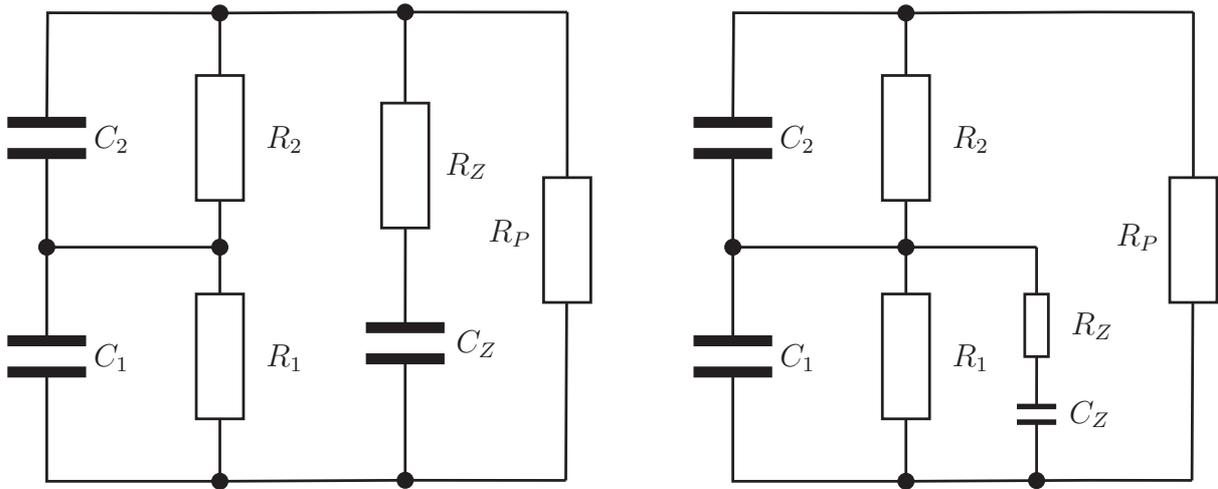


Abb. 2.21: Erweiterte Ersatzschaltbilder mit zusätzlichem RC-Serienglied R_Z und C_Z , links parallel zum gesamten Maxwell-ESB, rechts parallel zu C_1

Nimmt man dagegen an, dass die Polarisationsprozesse mit kurzen Zeitkonstanten hauptsächlich im Öl stattfinden, ist es für die physikalisch relevante Modellierung sinnvoller, das RC-Element nur der Öl-Komponente des Ersatzschaltbildes (R_1 und C_1) parallelzuschalten. Das grundsätzliche Verhalten, das sich daraus für die Rückkehrspannung ergibt, entspricht demjenigen des im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Modells (RC-Element parallel zum gesamten ESB). Es wurden theoretische Überlegungen dahingehend diskutiert, dass sich in dem an sich nicht dauerhaft polarisierbaren Öl Ladungsträger an den Grenzflächen festsetzen, die sich mit Zeitkonstanten im Sekundenbereich abbauen. Prozesse dieser Art wurden in [Lie08] modelliert.

Die zugrundeliegenden Vorgänge sind unterschiedlich: Ist das RC-Glied dem gesamten Maxwell-Ersatzschaltbild parallelgeschaltet (s. Abb. 2.21 links), dann ergibt sich ein Verlauf, der einer Parallelschaltung zweier Maxwell-Ersatzschaltbilder entspricht, wobei durch die – verglichen mit τ_1 des ursprünglichen Ersatzschaltbildes – kleine Zeitkonstante des Zusatzelements der Anfangsanstieg der Gesamtkurve steiler wird. Dabei entlädt sich der Zusatzkondensator C_Z über den vorgeschalteten Widerstand R_Z auf die Reihenschaltung aus C_1 und C_2 , solange die Gesamtspannung an ihnen noch kleiner ist als die Spannung an C_Z .

Im weiteren Verlauf der Kurve wirkt das Zusatzelement (C_Z , R_Z) dann wie eine zusätzliche Kapazität, d.h. es stützt die Rückkehrspannung und sorgt so dafür, dass der Endverlauf der Kurve flacher wird als das beim Maxwell-Modell (mit oder ohne C_P) der Fall wäre. Das Maximum der Kurve selbst wird i.d.R. kleiner und zu größeren t_m verschoben.

Im anderen Fall (Abb. 2.21 rechts) wirkt sich das Zusatzelement unmittelbar auf τ_1' aus. Die Spannung an C_1 beträgt nach dem Kurzschluss $-U_s$, während die Spannung auf dem Zusatzkondensator C_Z durchaus noch die entgegengesetzte Polarität aufweisen kann. Das führt dann nach Aufheben des Kurzschlusses zu einer zunächst schnelleren Entladung von C_1 und damit zu einer scheinbaren Verkleinerung von τ_1 .

Des weiteren zeigt sich, dass mit diesem Modell auch das bei der Auswertung von Messdatensätzen beobachtete Phänomen auftritt, dass das durch den Fit ermittelte τ_2 speziell für

kleine t_f grundsätzlich größer ist als das des zugrunde liegenden reinen Maxwell-Modells.

Nimmt man als dritten Stützpunkt z.B. $2 t_m$, dann ergibt sich im Regelfall eine deutlich bessere Approximation für den abfallenden Teil der Kurve (also für τ_2). Allerdings ist dabei zu beachten, dass sich die Zusatzprozesse auf den gesamten Kurvenverlauf auswirken und dementsprechend die berechneten Zeitkonstanten keine Materialkonstanten der Isolierstoffe mehr darstellen, was allerdings auch schon für den Fall mit Parallelwiderstand R_P und/oder Parallelkapazität C_P der Fall ist.

Der Einfluss dieser Polarisationsvorgänge ließe sich – sofern ihre Zeitkonstanten deutlich kleiner sind als die der dominierenden Grenzflächenpolarisation – praktisch durch eine Verlängerung der Kurzschlusszeit deutlich reduzieren, was dann allerdings auch zu einer Verringerung der Amplitude der eigentlichen Rückkehrspannungskurve führt. Diese Möglichkeit zur Separierung von Prozessen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten wird z.B. beim sogenannten Polarisationspektrum (siehe 2.3.1) ausgenutzt, wo die Kurzschlusszeit stufenweise erhöht wird, wobei die Messdaten allerdings, wie schon vorstehend beschrieben, nur rein formal, d.h. ohne Berücksichtigung der physikalischen Vorgänge, ausgewertet werden. Weiterhin ist auch auf diese Weise keine echte Separierung möglich, da die Zusatzelemente nach dem Modellverständnis das gesamte System beeinflussen.

Um den Einfluss der zusätzlichen Polarisationsprozesse im Modell anschaulich darzustellen, wurden auf der Basis der in Abb. 2.21 gezeigten erweiterten Ersatzschaltbilder Simulationen durchgeführt. Die Resultate dieser Simulationen und ein Vergleich mit Ergebnissen von Messungen an realen Objekten auf Basis der vorgestellten Auswertemethoden sind Gegenstand von Abschnitt 2.8.

2.5.2 Vergleich der Messkurve mit einem Fit

Ermittelt man die Einzelzeitkonstanten des Maxwell-Ersatzschaltbildes, dann kann man aus diesen auch eine entsprechende „ideale“ Rückkehrspannungskurve ableiten [Pat08b]. Ist diese aus an beliebiger Stelle des Verlaufs der Messkurve ermittelten Zeitkonstanten berechnete Kurve identisch mit der Original-Messkurve, dann kann im Regelfall davon ausgegangen werden, dass das System sich nach dem Maxwell-Modell verhält, wobei es allerdings Ausnahmen gibt (s. Abschnitt 2.6.6). Das Maxwell-Ersatzschaltbild modelliert lediglich zwei Zeitkonstanten, so dass das Vorhandensein weiterer Zeitkonstanten, die sich von denen des Maxwell-Modells unterscheiden, im realen Objekt zu einer Abweichung der Kurvenverläufe führt.

Abb. 2.22 zeigt links die Messkurve, einen Fit bei $2 t_m$ und die Differenz der beiden Kurven für einen Transformator, dessen Isoliersystem sich offensichtlich wie ein reines Maxwell-Ersatzschaltbild verhält. Messkurve und Fit sind über den gesamten dargestellten Zeitraum praktisch deckungsgleich. Der in Abb. 2.22 rechts gezeigte Verlauf hingegen zeigt eine starke Abweichung zwischen Messkurve und Fit im Anfangsbereich. Hier ist ein erheblicher Einfluss von zusätzlichen Polarisationsprozessen zu beobachten.

Grundsätzlich verhält sich das Maxwell-Ersatzschaltbild nach außen hin elektrisch identisch wie das konventionelle Ersatzschaltbild, so dass es beim Auftreten zusätzlicher Zeitkonstanten nicht möglich ist, zu entscheiden, ob ein weiterer Grenzflächenpolarisationsprozess vorliegt (Maxwell-Ersatzschaltbild) oder andere Polarisationsarten (RC-Serienelement).

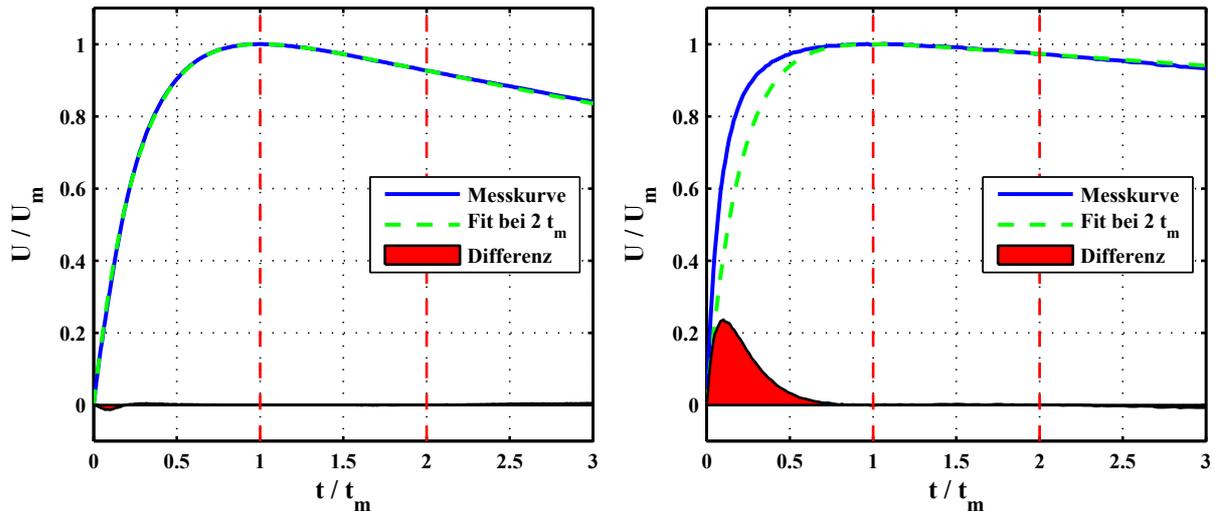


Abb. 2.22: Messkurve mit Fit bei $t = 2 t_m$ und Differenz der Kurven für einen Prüfling mit praktisch reinem Maxwell-Verhalten (links) und einen mit ausgeprägter Kurzzeitpolarisation

2.5.3 Darstellung der Zeitkonstanten über dem Kurvenverlauf

Mit den in Abschnitt 2.5.1 dargestellten Zusammenhängen ist es nicht nur möglich, die Zeitkonstanten durch einen Fit an einer einzigen Stelle der normierten Kurve zu ermitteln, sondern für Stützpunkte entlang des gesamten Kurvenverlaufs (s. auch Abb. 2.19). Jeder Messpunkt ergibt dann ein τ_1 - τ_2 -Paar. Durch Auftragen der ermittelten Werte für τ_1 und τ_2 über der Messzeit kann man die Änderung der Werte in Abhängigkeit von der Wahl des dritten Stützpunktes visualisieren. Im Falle eines reinen Maxwell-Verhaltens des Prüflings sind beide Zeitkonstanten über den gesamten Kurvenverlauf konstant, man erhält zwei Geraden parallel zur Zeitachse. Im Falle von Abweichungen gegenüber dem Maxwell-Ersatzschaltbild weichen die Verläufe von der Geraden ab.

Bei der Darstellung ist zu beachten, dass im Bereich um den Scheitelwert der Rückkehrspannungskurve grundsätzlich mehr oder weniger starke Abweichungen auftreten, da in diesem Bereich die Amplitudenwerte der Kurve nicht ausreichend stark differenzieren, so dass eine Ermittlung der Zeitkonstanten sehr ungenau bzw. – im Falle des Scheitelwertes selbst – unmöglich wird. Für die Darstellung von Messdaten wird deshalb der Bereich $0,8 t_m < t < 1,2 t_m$ ausgeblendet. Die Zeitkonstanten werden sinnvollerweise logarithmisch dargestellt, da sich τ_1 und τ_2 im Regelfall um mehr als eine Größenordnung unterscheiden und auch – wie in Abb. 2.19 gezeigt – Änderungen von mehreren Größenordnungen in Abhängigkeit vom gewählten Zeitpunkt t_f auftreten können.

Abbildung 2.23 zeigt exemplarisch die Verläufe von τ_1 und τ_2 für die Prüflinge, die bereits in Abb. 2.22 vorgestellt wurden. Der Prüfling, der bereits in der Darstellung mit der angefitteten Kurve praktisch keine Abweichungen zeigte, verhält sich auch hier erwartungsgemäß nahezu ideal. Es ergeben sich für jeden Punkt der Messkurve die selben Werte für die Einzelzeitkonstanten.

Der Prüfling mit den starken Abweichungen im Anfangsbereich der Messkurve zeigt hier ein völlig anderes Verhalten. Im Anfangsbereich, der im Vergleich zu der bei $2 t_m$ angefitteten Kurve (s. Abb. 2.22 rechts) erheblich steiler ist, erhält man zu hohe Werte für τ_2 , während für τ_1 geringfügig zu kleine Werte ermittelt werden. Im weiteren Verlauf der Kurve nach

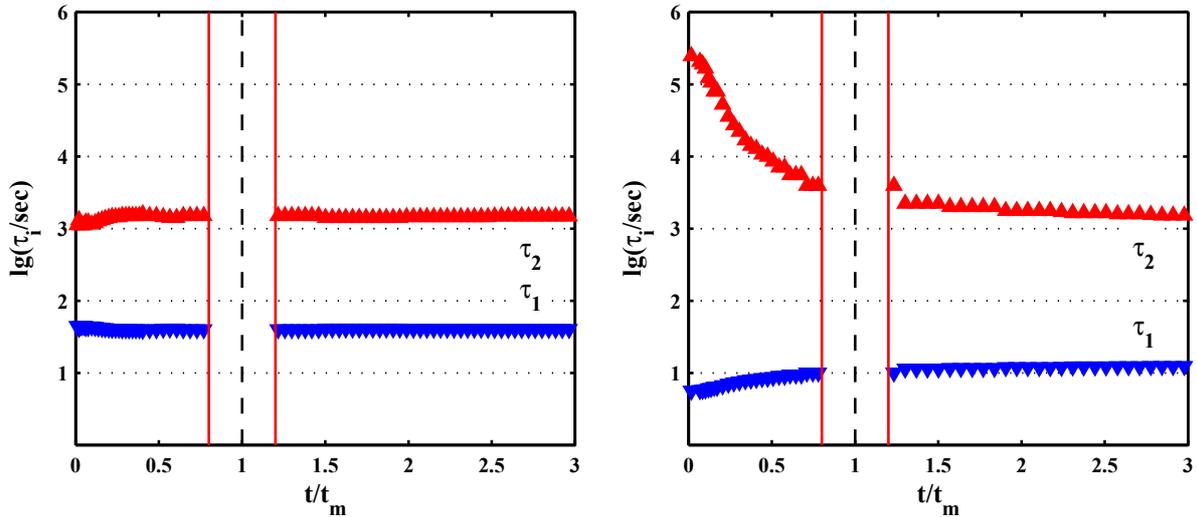


Abb. 2.23: Einzelzeitkonstanten über dem Verlauf der Messkurve für einen Prüfling mit praktisch reinem Maxwell-Verhalten (links) und einen mit Kurzzeitpolarisation, Datensätze wie in Abb. 2.22

dem Maximum nähern sich die Verläufe konstanten Endwerten an.

Die bereits bei anderen Darstellungen beobachteten Abweichungen der Kurvenform vom idealen Maxwell-Verhalten speziell im Bereich des Anfangsanstiegs der Messkurve spiegeln sich sehr gut in dieser Darstellung wider. Ein steilerer Anfangsanstieg, möglicherweise verursacht durch zusätzliche Polarisationsprozesse mit Zeitkonstanten in der Größenordnung $\tau_p \ll \tau_1$, führt in der $\tau_i(t)$ -Darstellung zu einem höheren τ_2 und einem kleineren τ_1 im Anfangsbereich. Im Endverlauf der Kurve ergibt sich i.d.R. ein weitgehend konstanter Verlauf.

In seltenen Fällen wurde beobachtet, dass im Endverlauf die Werte für τ_2 wieder leicht ansteigen und diejenigen für τ_1 entsprechend abfallen. Dieser Effekt ist dadurch erklärbar, dass Polarisationsvorgänge mit extrem langen Zeitkonstanten der Rückkehrspannung unterlagert sind, die zu einer Art „Nachladeeffekt“ führen. Das drückt sich dann dadurch aus, dass die Rückkehrspannung bei langen Messzeiten nicht asymptotisch gegen 0 läuft, sondern gegen einen praktisch konstanten Wert $\neq 0$, der erst nach sehr langer Zeit weiter abfällt. Dadurch reduziert sich die Steigung des Abfalls der Kurve gegenüber einer reinen Maxwell-Kurve und λ steigt scheinbar an.

Auf der anderen Seite verursachen Polarisationsprozesse mit Zeitkonstanten in der Größenordnung von τ_1 Verläufe, die erst deutlich nach dem Maximum der Rückkehrspannungskurve konstanten Werten zustreben. In der in Abschnitt 2.5.2 vorgestellten Differenzbildung zwischen Messkurve und Fit an einem bestimmten Punkt führen solche Polarisierungen zu einer negativen Differenz für Zeiten hinter dem Fitpunkt. Bei den vorstehend genannten Polarisierungen mit im Vergleich zu τ_1 sehr großen Zeitkonstanten hingegen steigt die Differenz nach dem Stützpunkt wieder an.

Für beide Fälle kann man aufgrund der beobachteten Zusammenhänge annehmen, dass das Zeitkonstanten-Paar, das sich für das kleinste λ ergibt – in der beschriebenen Darstellung sind das das kleinste τ_2 und das korrespondierende größte τ_1 – den Zeitkonstanten der das Grundverhalten bestimmenden Grenzflächenpolarisation am nächsten kommt. Für Zusatzpolarisationsprozesse mit im Vergleich zu τ_1 kurzen Zeitkonstanten ist dieser Punkt

im konstanten Endverlauf der Kurve zu suchen, bei solchen mit langen Zeitkonstanten eher im Anfangsbereich.

Ein ausschließliches Auftreten von Langzeiteffekten wurde in der Realität nicht in nennenswertem Maße beobachtet. Meist treten dann auch Kurzzeit-Effekte auf, so dass sich für λ ein (i.d.R. globales) Minimum im Kurvenverlauf ergibt. In der Zeitkonstanten-Darstellung drückt sich das dadurch aus, dass der Verlauf von τ_2 an der Stelle ein Minimum und derjenige von τ_1 entsprechend ein Maximum aufweist.

Diese Effekte zeigen einerseits ein Problem mit der grundsätzlichen physikalischen Interpretierbarkeit auf, da von einer Abweichung vom Maxwell-Verhalten grundsätzlich beide Einzelzeitkonstanten betroffen sind. Dies ist das Resultat der integralen Betrachtung des gesamten Isoliersystems mit allen Polarisationsvorgängen, wobei eine Änderung an einem kleinen Teil des Systems zu einer Änderung im Verhalten des Gesamtsystems führt.

Insbesondere die Tatsache, dass die Kurzzeitprozesse das Maximum der Messkurve gegenüber der reinen Maxwell-Kurve unter Umständen erheblich in der Amplitude anheben und auch deutlich zu früheren Zeitpunkten verschieben können, wirkt sich auf die Ergebnisse aus. Andererseits ist es über diese Darstellung im Prinzip zumindest näherungsweise möglich, die Zeitkonstanten des reinen Maxwell-Anteils zu separieren und den Einfluss der Zusatzpolarisationen detaillierter zu analysieren, als das mit bisherigen Verfahren der Fall war.

Eine Vereinfachung der beschriebenen Darstellung, die u.U. auch als einfacher Diagnoseparameter nutzbar ist, ergibt sich durch einen direkten Vergleich der Zeitkonstanten aus unterschiedlichen Bereichen der Messkurve. Dazu kann z.B. neben den standardmäßig bei $t = 2 t_m$ ermittelten Werten das Zeitkonstantenpaar, das sich aus den Standard-Kurvenformparametern ergibt (s. Abschnitt 2.5.1.1) und welches das Anfangsverhalten der Kurve widerspiegelt, als Vergleich herangezogen werden.

2.5.3.1 Separierung von Zusatzpolarisationen

Polarisationseffekte, die zusätzlich zur durch das Maxwell-Modell beschriebenen Grenzflächenpolarisation auftreten, beeinflussen den Verlauf der Rückkehrspannungskurve auf komplexe Art und Weise. Jeder einzelne Prozess erhöht die Ordnung des Systems um 1, d.h. es kommt eine zusätzliche Exponentialfunktion hinzu, was sich im formalen Ersatzschaltbild durch ein zusätzliches RC-Serienglied ausdrückt. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um Grenzflächenpolarisationen handelt, die mit dem Maxwell-Modell beschreibbar sind, oder ob es sich um andere Mechanismen handelt (s. Abschnitt 2.4.4).

Da alle Polarisationsmechanismen miteinander gekoppelt sind, sind auch alle resultierenden Exponentialfunktionen in komplexer Weise von *allen* Komponenten des Ersatzschaltbildes abhängig. Eine Parallelschaltung von einem zusätzlichen Polarisationsprozess in Form eines RC- oder Maxwell-Elements zum Maxwell-Ersatzschaltbild führt zu einem System dritter Ordnung mit drei Zeitkonstanten, die jeweils von allen Komponenten des Modells abhängen. Es existiert keine additive Überlagerung, was eine echte Separierung der einzelnen Prozesse anhand einer Rückkehrspannungskurve praktisch unmöglich macht. Es besteht jedoch die Möglichkeit, eine näherungsweise Bestimmung der Parameter durchzuführen, die in den meisten Fällen für eine aussagekräftige Diagnose ausreicht.

Polarisationsprozesse mit einem relativ niederohmigen Verhalten und nicht vernachlässigbarer Kapazität verhalten sich im Endverlauf der Kurve ähnlich einer Parallelkapazität

C_P , d.h. sie erhöhen beide Zeitkonstanten τ'_1 und τ'_2 (s. Abschnitt 2.4.8). Allerdings dürfte in den meisten Fällen in der Praxis dieser Effekt vernachlässigbar sein, da die Kapazität eventuell vorhandener Zusatzprozesse im Regelfall nicht größer ist, als die des reinen Maxwell-Anteils, wodurch sich der Einfluss auf den Endverlauf der Kurve in Grenzen hält.

2.5.3.2 Möglichkeiten zur Gewinnung zusätzlicher Informationen

Wie schon in Abschnitt 2.4.10 angedeutet, ist es im Prinzip möglich, durch eine Erfassung des Ladestromes bei der Polarisation die Systemzeitkonstante τ zu ermitteln. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Messgeräte erfassen zwar den (Gesamt-) Ladestrom, jedoch geschieht dies über den Current-Monitor-Ausgang des Hochspannungsnetzteils, wodurch die Auflösung für eine sinnvolle Auswertung zu gering ist. Einzig bei Prüflingen mit sehr großer Kapazität ist eine hinreichende Auflösung möglich. Für die Ermittlung von τ ist allerdings das Langzeitverhalten des Ladestromes auszuwerten, da im Anfangsbereich wie auch bei der Rückkehrspannung eventuell vorhandene Zusatzpolarisationseffekte den Verlauf beeinflussen. Im Prinzip müsste eine detaillierte Auswertung des Verlaufs wie bei der PDC-Analyse durchgeführt werden.

Der Ladestrom ermöglicht bei ausreichend langen Polarisationszeiten auch eine Bestimmung des Isolationswiderstandes des Prüflings. Das setzt jedoch voraus, dass die Polarisationszeit t_p deutlich größer als die Systemzeitkonstante τ ist, da nur nach weitgehendem Abklingen des durch die Kapazität hervorgerufenen Verschiebungsstromes der (statische) Leitungsstrom getrennt erfassbar ist.

2.6 Messergebnisse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Rückkehrspannungs-Messungen an Transformatoren durchgeführt sowie von Kooperations-Partnern zur Verfügung gestellte Messdaten analysiert, um die Modellvorstellungen an realen Objekten zu überprüfen und die Auswerteverfahren zu verbessern. Messungen an Papier-Masse-isolierten Kabeln wurden ebenfalls durchgeführt und zu Vergleichszwecken herangezogen, da ein Großteil der Entwicklung der Auswerteverfahren auf Kabelmessungen basiert.

2.6.1 Messgeräte

Die selbst durchgeführten Messungen wurden mit zwei dreikanaligen Messgeräten der Firma sebaKMT vorgenommen:

- CD21 (experimenteller Prototyp) mit drei unterschiedlichen Messwiderständen (10 G Ω an Kanal 1, 5 G Ω an Kanal 2 und 2 G Ω an Kanal 3); dieses Gerät wurde später modifiziert und mit zuschaltbaren Messkapazitäten ausgestattet
- CD31, kommerzielles Gerät mit für alle drei Kanäle gleichen, zwischen 2 und 12 G Ω umschaltbaren Messwiderständen

Beide Geräte verfügen über ein Hochspannungsnetzteil, das bis zu 40 kV bei maximal 1,5 mA liefert. Die Steuer- und Auswerte-Software ermöglicht unterschiedliche Messprogramme, je nach Art des Prüflings [Kam]. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgenommenen Messungen wurden ausschließlich mit dem PILC-Kabel-Messprogramm mit zwei unterschiedlichen Polarisationsspannungen durchgeführt.

Die Rückkehrspannung wird für die ersten 10 Sekunden mit 2 Samples pro Sekunde abgetastet, also mit einem Intervall von 0,5 s zwischen zwei Werten. Im weiteren Verlauf wird das Intervall zunächst auf 1 s erhöht (bis zu einer Messzeit von 60 s). Anschließend wird alle 2 s ein Wert erfasst, ab 600 s nur noch alle 5 s. Ab einer Messdauer von 1200 s erfolgt die Messung nur noch im 20 s-Takt, was bei den in diesem Zeitbereich noch zu erwartenden Änderungen völlig ausreicht.

Zusätzlich zur Rückkehrspannungsmessung wurden in einigen Fällen noch Kapazitäten und Isolationswiderstände ermittelt. Zur Kapazitätsmessung kam ein am Institut WED konstruiertes Gerät zum Einsatz, das eine netzfrequente Wechselspannung von 65 V auf das Messobjekt gibt und den resultierenden Strom misst. Da die Isolationswiderstände im Vergleich zur Reaktanz $X_C = 1/(\omega C)$ als vernachlässigbar groß angenommen werden können und damit der ohmsche Anteil des fließenden Stroms sehr klein ist, darf davon ausgegangen werden, dass der gemessene Strom praktisch ausschließlich durch X_C gegeben ist.

Die Konstruktion eines eigenen Gerätes für die Kapazitätsmessung erfolgte aufgrund der Erfahrungen mit handelsüblichen Geräten, die mit Spannungen im Bereich einiger Volt arbeiten und als dementsprechend gegenüber Störungen anfällig einzustufen sind. Vergleichende Messungen zeigten durchweg speziell bei Kapazitäten im nF-Bereich deutlich präzisere Resultate als mit den kommerziellen Geräten.

Bei allen selbst durchgeführten Messungen wurden Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit am Messort und, wo möglich, auch die Temperatur des Prüfobjektes, erfasst. Datensätze, die von Dritten zur Verfügung gestellt wurden, enthielten allerdings in einzelnen Fällen keine Information über die Umgebungsparameter.

2.6.2 Durchführung der Messungen

Für eine Isolationsüberwachung (Condition Monitoring) ist der relevante Teil der Isolierung derjenige, der im Betrieb den höchsten Feldbelastungen ausgesetzt ist. Bei Transformatoren mit einer Niederspannungswicklung als Unterspannungswicklung (US) ist das die Isolierung zwischen Oberspannungs- (OS-) und Unterspannungswicklung sowie dem (geerdeten) Kern und Kessel. Die Isolierung der US gegenüber dem Kern kann hier vernachlässigt werden. Bei Transformatoren, die ausschließlich Hochspannungswicklungen enthalten, kann in Einzelfällen auch die Isolierung US — Kern / Kessel interessieren. Jedoch ist auch hier der am stärksten beanspruchte Teil die Isolierung OS — US.

Aus diesem Grund wurde die Messung der Rückkehrspannung im Regelfall zwischen OS und US durchgeführt, wobei US mit dem geerdeten Kern / Kessel verbunden war. In Einzelfällen wurde von diesem Prinzip abgewichen, z.B. dann, wenn elektrische Verbindungen nicht ohne Weiteres auftrennbar oder nicht alle Anschlüsse für die Messung zugänglich waren.

Ein Nachteil der Rückkehrspannungsmessung gegenüber Messverfahren, die Ströme messen

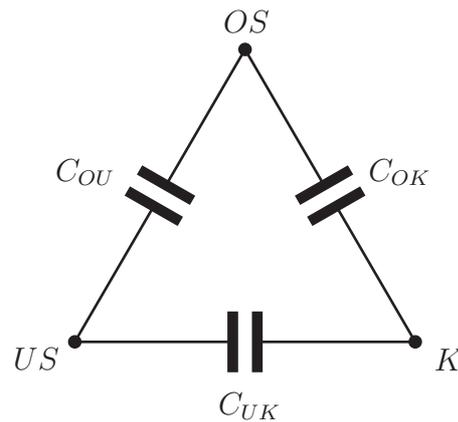


Abb. 2.24: Stark vereinfachtes kapazitives Ersatzschaltbild für einen Zweiwicklungstransformator

(also z.B. PDC), ist die nicht so ausgeprägte Selektivität durch die Erfassung der gesamten Isolierung. Die einzelnen Isolierstrecken in einer Transformatorisolierung sind, jeweils als einfache Kapazität modelliert, in Abb. 2.24 dargestellt.

Bei der Polarisierung der Strecke OS—US wird immer auch die Reihenschaltung der Strecken OS—K und K—US mit polarisiert. Durch die Verbindung der Unterspannungswicklung mit dem geerdeten Kessel wird C_{UK} kurzgeschlossen, so dass nur noch eine Parallelkonfiguration von C_{OU} und C_{OK} vorliegt. Zur Erfassung für den Betrieb wichtiger Alterungs- bzw. Schädigungsprozesse ist dies allerdings der relevante Teil der Isolierung, so dass hierdurch kein echter Nachteil gegeben ist.

Zur Verbindung des Messgerätes mit dem Prüfling kommen hochspannungsseitig spezielle geschirmte und ausreichend spannungsfeste Messleitungen zum Einsatz, die mit Hochspannungssteckverbindern konfektioniert sind, die eine ausreichende Kriechstrecke zwischen der eigentlichen Messleitung und dem Schirm gewährleisten.

2.6.3 Auswertung der Messdaten

Die zur Durchführung der Rückkehrspannungsmessungen verwendeten Messgeräte übermitteln die Daten direkt über eine EIA-232-Schnittstelle an einen PC. Die PC-Software visualisiert die Daten in Form der Messkurven sowie einiger Eckparameter, z.B. dem sogenannten Q-Faktor, einem Kennwert für die Nichtlinearität bei unterschiedlichen Polarisierungsspannungen, der sich als Quotient der Amplitudenwerte der Messkurven bei $t = 8s$ ergibt. Des weiteren können die Daten als ASCII-Datei gespeichert werden. In der Datei sind die Messwerte für die Rückkehrspannung für jeden Kanal und jede Polarisierungsspannung in einer Tabelle abgelegt. Zusätzlich ist der Verlauf des Ladestromes gespeichert sowie ein Kopf mit allen Parametern wie Polarisierungsspannungen, Zeiteinstellungen, Datum und Benutzerinformationen. Die für die Basis-Auswertung genutzten Parameter Amplitude U_m , Zeitpunkt des Maximums t_m und Anfangssteigung s werden automatisch errechnet und in einer separaten Tabelle am Anfang des Datensatzes abgelegt.

Die mit den Messgeräten verwendete Software berechnet die Anfangssteigung s aus dem Spannungswert nach 8 Sekunden. Besonders bei Messkurven mit einem frühen Maximum

führt das zu unbrauchbaren Werten⁵. Für die Auswertung der Messdaten im Rahmen der vorliegenden Arbeit kam deshalb ein spezielles MATLAB-Skript zum Einsatz, das alle benötigten Werte durch Fits präzise ermittelt.

Das Skript konvertiert jeden Datensatz in eine Reihe von Workspace-Variablen. Die Spannungsverläufe werden für jeden Kanal und jede Spannung einzeln jeweils mit den dazugehörigen Zeitwerten als zweispaltige Matrix abgelegt, zusätzlich jeweils noch einmal in doppelt normierter Form für die Ermittlung der Zeitkonstanten nach Abschnitt 2.5.1.

Die Bestimmung von U_m und t_m erfolgt durch einen Fit mit einem Polynom vierter Ordnung. Dazu wird zunächst die Zeitachse der Messkurve logarithmiert, wodurch sich um das Maximum herum ein parabelähnlicher Verlauf ergibt, der sich besser durch ein entsprechendes Polynom annähern lässt. Der Fit berücksichtigt nur den Teil der Kurve, der oberhalb von 90 % des Maximalwertes liegt.

Die Ermittlung der Anfangssteigung s geschieht ebenfalls durch einen Fit. In diesem Fall kommt ein Parabelfit dritter Ordnung – auf Grundlage der Messwerte vom Beginn der Messung bis zum Erreichen von 25 % des Maximalwertes – zum Einsatz. Die Anfangssteigung ist dann der lineare Term der errechneten Fitkurve.

Die ermittelten Parameter werden ebenfalls für jeden Kanal und jede Polarisationsspannung separat in Variablen abgelegt, jeweils einmal als Originalwert und einmal logarithmiert. Zur weiteren Verarbeitung werden auch die Zusatzinformationen aus dem Kopf des Datensatzes in entsprechenden Variablen abgelegt, so dass sie für Umrechnungen und automatische Datenbeschriftungen bei grafischen Darstellungen verfügbar sind.

2.6.4 Einfluss von Wartung und Reparatur

Die aussagefähigste Methode, den Einfluss von Alterungsprozessen und Feuchtigkeit auf die Rückkehrspannung zu ermitteln ist die Durchführung von Messungen an gealterten Objekten vor einem Instandhaltungs-Eingriff – z.B. Öltrocknung bzw. Öltausch bei einem Transformator oder Reparaturen – und erneute Messungen danach. Da unterschiedliche Schädigungen unterschiedliche Parameter beeinflussen, ist es möglich, anhand einer detaillierteren Auswertung zusätzliche Informationen zu gewinnen.

Den Einfluss einer Öltrocknung bei einem 250 MVA-Leistungstransformator zeigt Abb. 2.25 anhand der in den Abschnitten 2.5.2 und 2.5.3 vorgestellten Darstellungen. Die Temperatur des Prüfobjektes bei der Messung war in beiden Fällen praktisch gleich (19,6 °C bzw. 20,0 °C), so dass thermische Effekte hier keine Rolle spielen.

Der deutlichste Einfluss der Trocknung ist im Bereich vor dem Maximum erkennbar. Der Zeitpunkt t_m des Maximums selbst verdoppelt sich nahezu von 60 s vor der Trocknung (Abb. 2.25) auf 110 s danach (Abb. 2.26), während die Amplitude U_m des Maximums um ca. 14 % von 644 auf 564 V sinkt. Die Differenz zwischen Messkurve und Fit bei $2 t_m$ reduziert sich durch die Öltrocknung deutlich.

Auch die Darstellung der Einzelzeitkonstanten τ_1 und τ_2 zeigt eine erhebliche Änderung im Anfangsbereich, was auf einen deutlich flacheren Anfangsverlauf der Kurve nach der

⁵Das Nachfolgemodell des verwendeten Systems interpoliert die Anfangssteigung mit einem Polynom zweiter Ordnung.

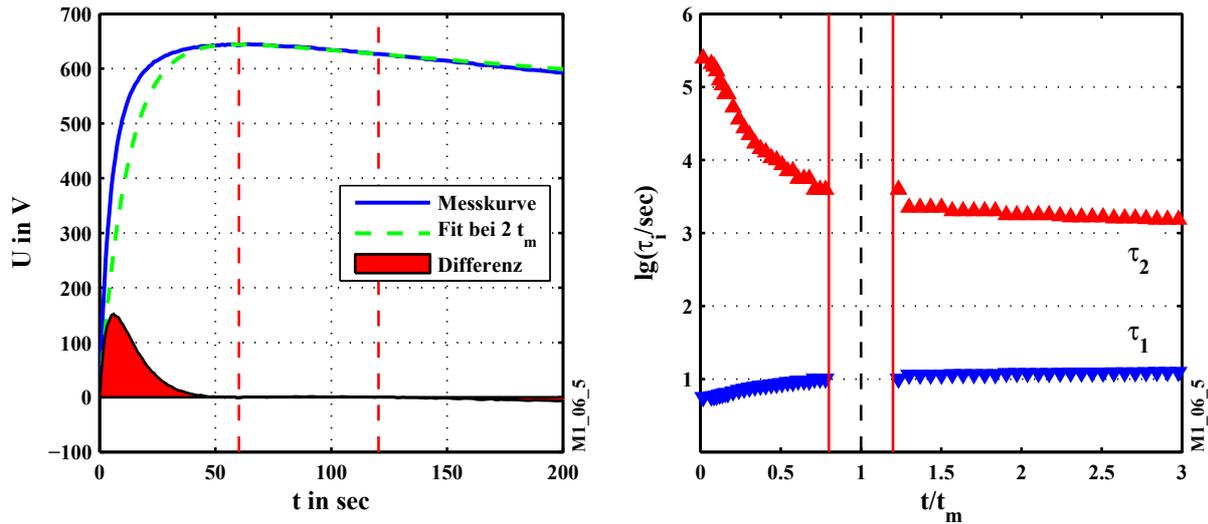


Abb. 2.25: Messkurve mit Fit bei $t = 2 t_m$ und Differenz der Kurven für einen 250 MVA-Transformator vor der Öltrocknung, rechts Einzelzeitkonstanten über dem Verlauf der Messkurve

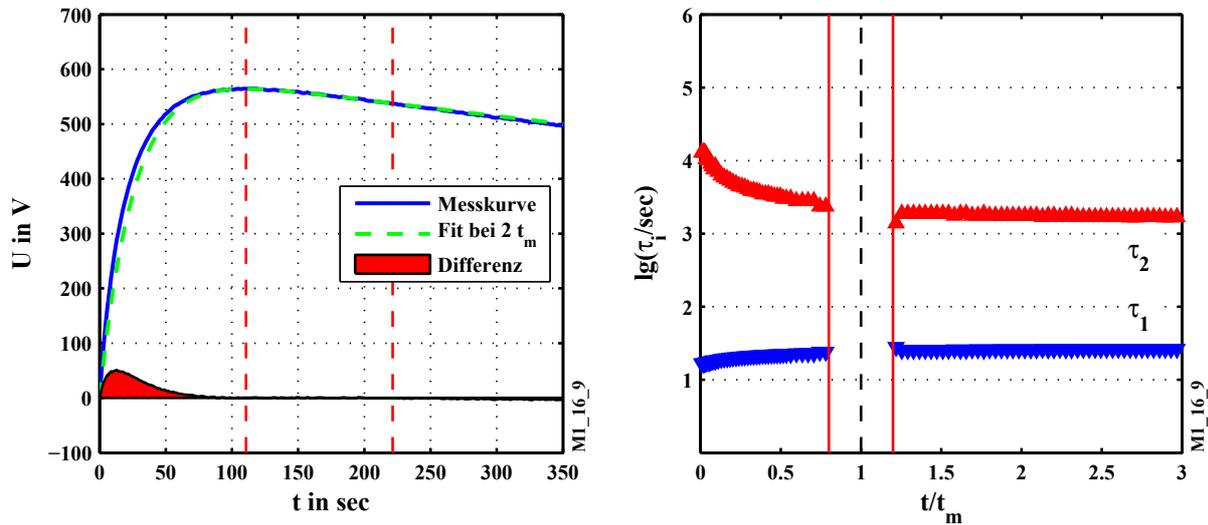


Abb. 2.26: Messkurve mit Fit bei $t = 2 t_m$ und Differenz der Kurven für einen 250 MVA-Transformator nach der Öltrocknung, rechts Einzelzeitkonstanten über dem Verlauf der Messkurve

Öltrocknung schließen lässt, der nicht nur auf die Erhöhung von t_m und die gleichzeitige geringfügige Verringerung von U_m zurückführbar ist.

Der Endverlauf der Zeitkonstanten in Abb. 2.26 zeigt auch, dass die Öltrocknung – bedingt durch die im Vergleich zu Zellulose geringe Löslichkeit für Wasser im Öl – praktisch keinen Einfluss auf den Zustand der Zellulose hat. Die entsprechende Zeitkonstante τ_2 unterscheidet sich im Endverlauf praktisch nicht vom Wert vor der Trocknung, während τ_1 sich verdoppelt hat, was auf einen erheblichen Rückgang der Ölleitfähigkeit schließen lässt.

Vor der Öltrocknung (Abb. 2.25) zeigt der Vergleich mit dem Fit bei $2 t_m$ deutlich, dass die Fitkurve im Endverlauf (für $t > 2 t_m$) wieder von der Messkurve abweicht. Die Differenz wird hier negativ, was bedeutet, dass die Messkurve „zu tief“ liegt, dass also die

Zusatzpolarisation noch nicht abgeklungen ist. Auch in der Zeitkonstantendarstellung ist der Effekt gut erkennbar, da sich im betrachteten Zeitraum noch keine konstanten Werte einstellen. Nach der Öltrocknung (Abb. 2.26) ist der Effekt deutlich weniger ausgeprägt, was allerdings mit durch das deutlich spätere Maximum bedingt ist.

2.6.5 Messungen an 630 kVA-Versorgungstransformatoren

Eine Reihe von Messungen konnte an 630 kVA-Versorgungstransformatoren (10 kV/0,4 kV) im Netz der Universität Siegen durchgeführt werden. Insgesamt vier Transformatoren standen zur Verfügung:

int. Bez.	Bauform	Beschreibung
Tr3	hermetisch	Bj. 2006, vor Inbetriebnahme
Tr4	offen	Bj. unbekannt, ausgemustert
Tr5	offen	Bj. 1975, wird im Wechsel mit Tr6 betrieben
Tr6	offen	Bj. 1975, wird im Wechsel mit Tr5 betrieben

Alle 4 Transformatoren besitzen dieselben Leistungsmerkmale. Alle Prüflinge bis auf den neuen Tr3 besitzen eine offene Bauform mit Ausgleichsgefäß. Tr4 wurde nach dem Ausbau (Austausch gegen Tr3) gemessen und war vorher im Dauerbetrieb. Der Grund für den Austausch war Rost am Kessel. Nach Aussage des Verantwortlichen befand Tr4 sich elektrisch gesehen in einem guten Zustand. Tr5 und Tr6 befinden sich in der selben Station und werden alternierend betrieben. Sie sind vom selben Typ und besitzen aufeinander folgende Seriennummern. Die Umschaltung zwischen Tr5 und Tr6 wird ungefähr im jährlichen Wechsel durchgeführt.

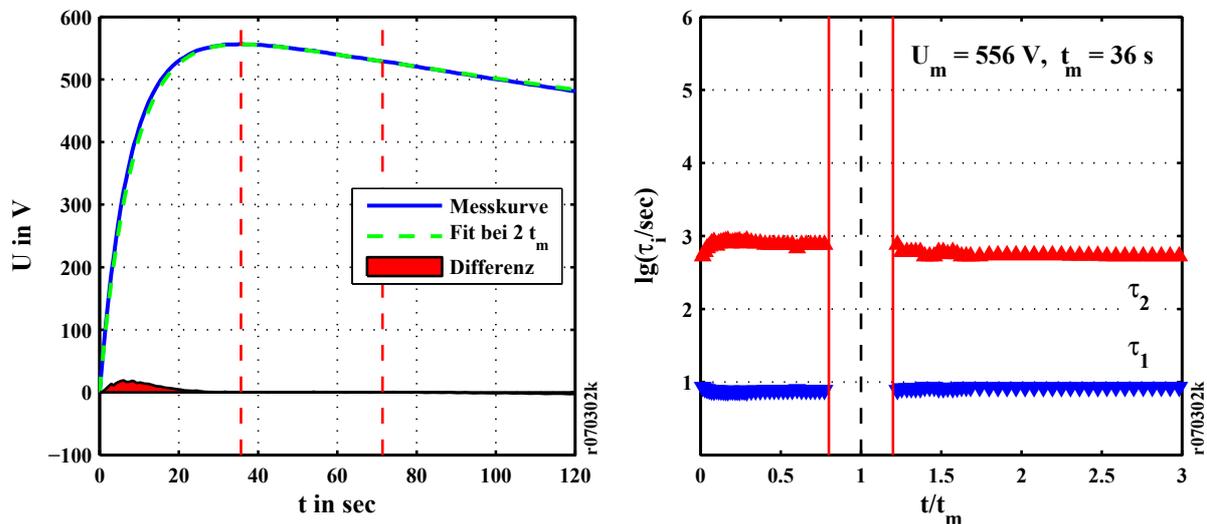


Abb. 2.27: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen neuen 630 kVA-Transformator (Tr3), $U_p = 1 \text{ kV}$

Der fabrikneue Tr3, der als einziger der vier untersuchten Transformatoren in Hermetik-Ausführung konstruiert ist, zeigt bei der Auswertung der Rückkehrspannung zunächst erwartungsgemäß praktisch reines Maxwell-Verhalten, d.h. es sind keine Zusatzpolarisationen anhand der Kurvenform nachweisbar (s. Abb. 2.27). Allerdings ist das Maximum der Rückkehrspannungskurve mit $t_m = 36 \text{ s}$ vergleichsweise früh. Entsprechend ergibt sich

auch für τ_1 ein für einen neuen Transformator sehr niedriger Wert von nur knapp 10 s. Auf dieses für einen neuen Transformator ungewöhnliche Verhalten wird in Abschnitt 2.6.6 näher eingegangen.

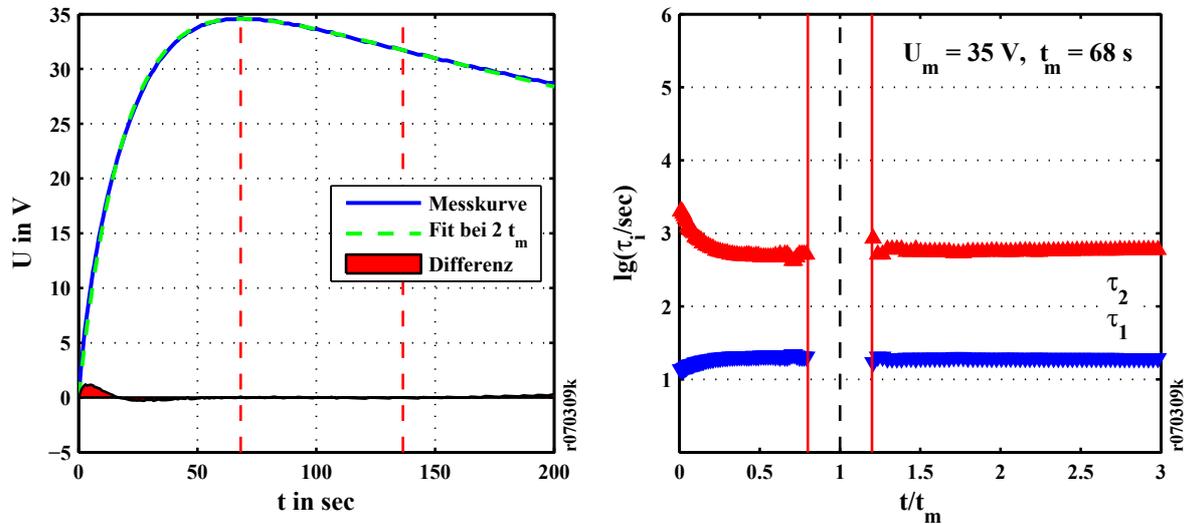


Abb. 2.28: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen betriebsgealterten 630 kVA-Transformator (Tr4), $U_p = 1$ kV

Der durch Tr3 ersetzte Tr4 (Abb. 2.28) zeigt trotz seines Alters ein späteres Maximum, das allerdings bei gleicher Polarisationsspannung in der Amplitude deutlich geringer ausfällt als bei Tr3.

Außerdem ist bei Tr4 ein prägnantes Kurzzeitverhalten sichtbar, das auf einen Prozess mit Zeitkonstanten deutlich kleiner als τ_1 schließen lässt. In diesem Falle ist die Abweichung der Fitkurve von der Messkurve im Anfangsbereich wie bei Tr3 recht klein, unterscheidet sich jedoch deutlich im Verlauf.

Das beobachtete Verhalten von Tr4 bestätigt die Aussage des Anlagenbetreibers, dass der Transformator zumindest elektrisch keine erheblichen Alterungserscheinungen zeigt.

Ein Vergleich der gemessenen Kapazitäten zwischen den Wicklungen untereinander sowie dem Kessel zeigte, dass die Werte bei Tr3 bis auf die Kapazität zwischen OS-Wicklung und Kessel deutlich höher sind als bei Tr4, was vermutlich an der deutlich kompakteren Bauweise des Hermetiktrafos mit den sich dadurch ergebenden geringeren Isolierabständen liegt.

Für die Kapazitätsbestimmung wurde nach dem in Abb. 2.24 auf Seite 42 dargestellten Ersatzschaltbild jeweils zwischen zwei Anschlüssen gemessen, während jeweils eine der Teilkapazitäten kurzgeschlossen war. Dadurch wurde bei jeder der drei Messungen eine Parallelschaltung zweier Kapazitäten gemessen. Aus den ermittelten Werten können die Einzelkapazitäten berechnet werden:

Kapazität	Tr3 (neu)	Tr4 (alt)
C_{OU} in nF	4,98	2,97
C_{OK} in nF	1,06	1,10
C_{UK} in nF	5,78	3,62

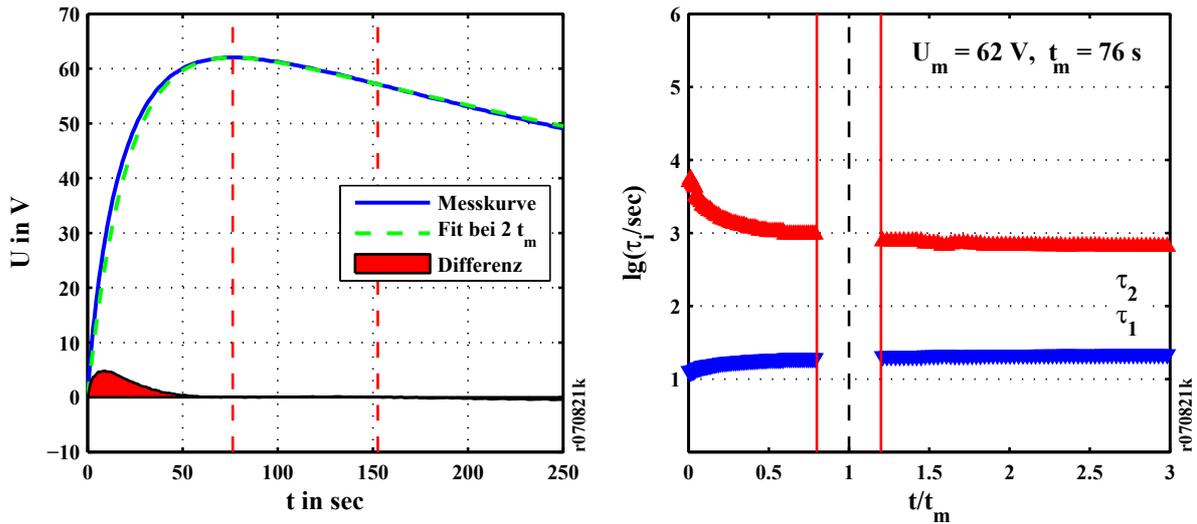


Abb. 2.29: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen betriebsgealterten 630 kVA-Transformator (Tr5), $U_p = 1$ kV, $R_m = 12$ G Ω

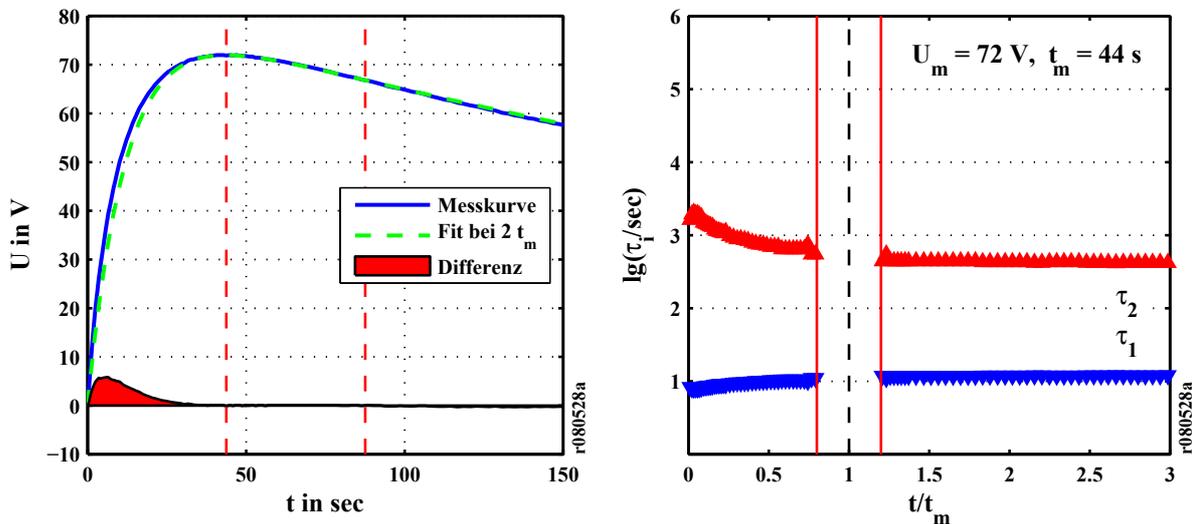


Abb. 2.30: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen betriebsgealterten 630 kVA-Transformator (Tr6), $U_p = 1$ kV, $R_m = 10$ G Ω

Die Transformatoren Tr5 und Tr6, die zeitgleich angeschafft wurden und die in der Station im regelmäßigen (ungefähr jährlichen) Wechsel betrieben werden, zeigen ähnliche elektrische Eigenschaften. Die Abweichungen der in Abb. 2.29 und 2.30 dargestellten Verläufe, speziell bei den Absolutwerten der Zeitkonstanten, die bei Tr6 generell niedriger sind, kann teilweise durch die unterschiedlichen Umgebungsbedingungen erklärt werden. Bei den Messungen an Tr5 herrschte eine Umgebungstemperatur von 17 °C, während es bei Tr6 um 23 °C waren (s. Abschnitt 2.7).

Die Tatsache, dass aufgrund eines Defektes an einem der Messgeräte Tr6 mit $R_m = 10$ G Ω anstelle der sonst verwendeten 12 G Ω gemessen werden musste, spielt in diesem Fall keine Rolle, da der Effekt des um knapp 20 % kleineren Messwiderstandes in diesem Zusammenhang als vernachlässigbar einzustufen ist.

Die Kapazitäten von Tr5 und Tr6 liegen jeweils deutlich höher als die an Tr3 und Tr4 gemessenen Werte, was aufgrund der Tatsache, dass es sich bei allen 4 Prüflingen um Trans-

formatoren der selben Leistungsklasse handelt, unerwartet ist. Da im Fall von Tr5 und Tr6 der Mittelpunkt der Unterspannungswicklung fest geerdet ist und eine Auftrennung im Rahmen der Messung nicht möglich war, stehen hier nur die Werte der Gesamtkapazität $C_{O(UK)}$ zur Verfügung. Diese betragen in beiden Fällen ca. 12,5 nF. Wenn man annimmt, dass zumindest die Aufteilung der Kapazitäten C_{OU} und C_{OK} in der selben Größenordnung liegt wie bei Tr3 und Tr4, dann hieße das, dass ca. 10-20 % der Gesamtkapazität auf C_{OK} entfallen. Das ergäbe für die Kapazität der Hauptisolierung $C_{OU} \approx 10$ nF.

2.6.6 Einfluss einer Parallelkapazität

Bei Rückkehrspannungsmessungen an Kabeln und Transformatoren im Feld tritt häufig der Fall auf, dass neben der zu untersuchenden Zellulose-Öl-Isolierung andere Isolierkomponenten vorliegen, die nicht nennenswert zur Rückkehrspannung beitragen, sondern in erster Linie als parallel geschaltete Kapazität wirken. Bei Kabeln tritt dies v.a. dann auf, wenn bei einem Papier-Masse-Kabel Teilstrecken durch VPE-Kabel ersetzt wurden. Die Amplitude der Rückkehrspannung ist selbst bei Water-Tree-geschädigten kunststoffisolierten Kabeln bei gleicher Ladespannung i.d.R. deutlich geringer, als bei Kabeln mit Papier-Masse-Isolierung, so dass dieser Anteil praktisch vernachlässigbar ist.

Um den Einfluss einer reinen, dem Prüfling parallel geschalteten Kapazität zu ermitteln, wurde eines der am Institut vorhandenen Messgeräte entsprechend modifiziert und mit zuschaltbaren Kondensatoren ausgestattet. Es kamen Folienkondensatoren zum Einsatz, die jeweils zu Beginn der eigentlichen Messung (also nach der Polarisierung und der Depolarisierung) parallel zum Prüfobjekt geschaltet wurden. Da die Kondensatoren auf diese Weise nur mit der Rückkehrspannung belastet wurden, nicht aber mit der wesentlich höheren Polarisierungsspannung, konnten Standard-Bauteile mit einer Spannungsfestigkeit von 1 bis 2 kV verwendet werden.

Das Zuschalten der Kondensatoren geschah über Hochspannungs-Reed-Relais, die für eine ausreichende Trennung bei Nichtbenutzung und während Polarisierung und Kurzschluss sorgten. Ein externes Steuergerät mit separater Spannungsversorgung ermöglichte das Zu- und Abschalten der Kondensatoren für jeden Messkanal. Die Kapazität der Messkondensatoren betrug 220 nF, was dem 10- bis 20-fachen der üblichen Prüflingskapazitäten entspricht.

Die Messungen mit aktivierter Messkapazität wurden an den in Abschnitt 2.6.5 beschriebenen Prüflingen Tr3 - Tr6 durchgeführt. Wie schon im genannten Abschnitt beschrieben ergaben Messungen an Tr3 relativ kleine Werte speziell für τ_1 , so dass besonders in diesem Falle von einer Messung mit Parallelkapazität neue Erkenntnisse erwartet wurden.

Abb. 2.31 zeigt den Kurvenfit und die Zeitkonstanten für eine Messung an Tr3 mit Zusatzkapazität $C_P = 220$ nF (analog Abb. 2.27). Da durch die Zusatzkapazität die Zeitkonstanten erheblich vergrößert werden (s. Abschnitt 2.4.8) und damit auch t_m erheblich zunimmt, ist hier im Rahmen der Messzeit eine Darstellung nur bis ca. $1,6 t_m$ möglich.

Auffallend ist die extrem prägnante Abweichung vom Maxwell-Verhalten im Anfangsbereich, die im völligen Gegensatz zum augenscheinlich fast ungestörten Fall ohne C_P in Abb. 2.27 steht. Diese zunächst nicht ohne weiteres nachvollziehbare Verhalten ist allerdings erklärbar, wenn man davon ausgeht, dass möglicherweise zwei separate Polarisierungsvorgänge vorliegen, deren Zeitkonstanten fast gleich sind, die jedoch unterschiedliche

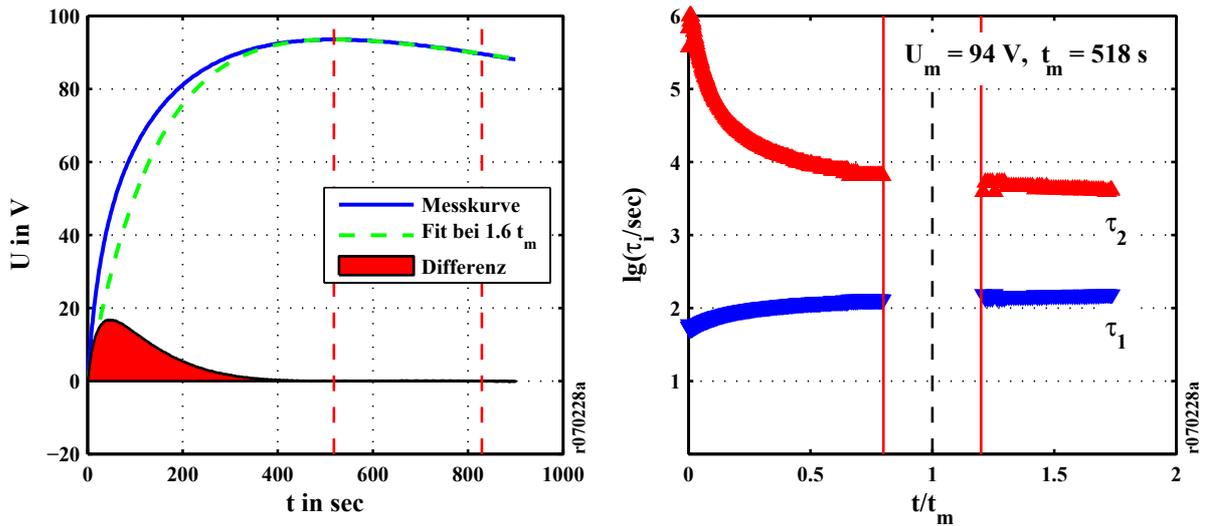
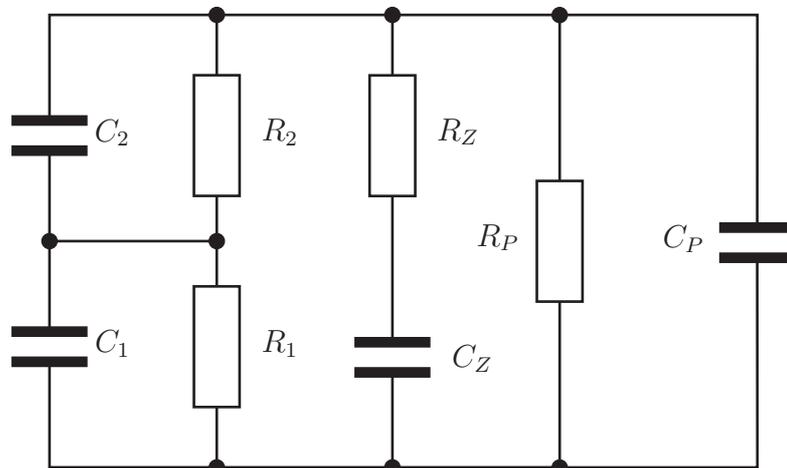


Abb. 2.31: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen neuen 630 kVA-Transformator (Tr3) mit Zusatzkapazität $C_P = 220 \text{ nF}$

Leitwerte bzw. Permittivitäten besitzen. Das führt im Falle mit einer vernachlässigbaren Parallelkapazität dazu, dass sich beide Prozesse mit fast identischem Zeitverhalten entladen.

Schaltet man jedoch eine im Vergleich zur Prüflingskapazität sehr große Zusatzkapazität parallel, dann kann sich der vergleichsweise „niederohmige“ Prozess – der bei gleichen Zeitkonstanten eine dementsprechend höhere Kapazität besitzt – schnell entladen, während ein eher hochohmiger Prozess nicht so stark beschleunigt werden kann.



Simulationsparameter:

$R_1 = 3 \text{ G}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ G}\Omega$, $C_1 = 10 \text{ nF}$, $C_2 = 100 \text{ nF}$, $R_P = 12 \text{ G}\Omega$, $R_Z = 2 \text{ G}\Omega$, $C_Z = 15 \text{ nF}$

Abb. 2.32: Modell für die Simulation des Verhaltens von Tr3 mit Zusatzpolarisation $\tau_Z = R_Z C_Z = \tau_1$

Zur Verifizierung dieser Annahmen wurde eine Simulation durchgeführt, bei der dem Maxwell-Modell ein RC-Serienglied parallel geschaltet wurde, dessen Zeitkonstante τ_Z der Zeitkonstante τ_1 im Maxwell-Modell entspricht. Abb. 2.32 zeigt das für die Simulation herangezogene Ersatzschaltbild. Die Simulation wurde jeweils mit $C_P = 0$ und mit

$C_P = 220$ nF durchgeführt. Durch eine Variation der Parameter ergab sich ein Verhalten, das dem bei Tr3 beobachteten sehr nah kommt.

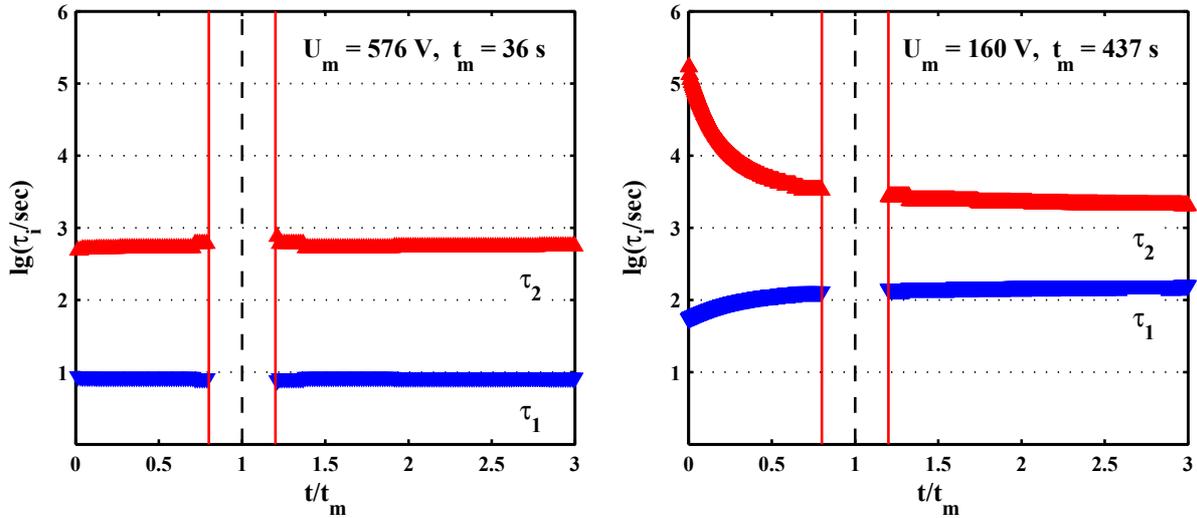


Abb. 2.33: Zeitkonstanten einer Simulation des Verhaltens des neuen 630 kVA-Transformators Tr3 ohne Zusatzkapazität (links, vgl. Abb. 2.27) und mit Zusatzkapazität $C_P = 220$ nF (vgl. Abb. 2.31)

Abb. 2.33 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit der Standard-Auswertung. Die Simulation wurde analog zur Messung mit $U_p = 1$ kV durchgeführt. Im Vergleich zum Originalverhalten zeigen sich zwar bei der Simulation mit $C_P = 220$ nF deutliche Abweichungen, v.a. bei τ_2 und U_m , jedoch ist das Gesamtverhalten gut nachgebildet. Eine völlige Übereinstimmung kann mit dem verwendeten Modell offenbar nicht erreicht werden, da zusätzlich vermutlich noch Prozesse eine Rolle spielen, die den Kurvenverlauf im Detail beeinflussen, die aber für das prinzipielle Gesamtverhalten unerheblich sind.

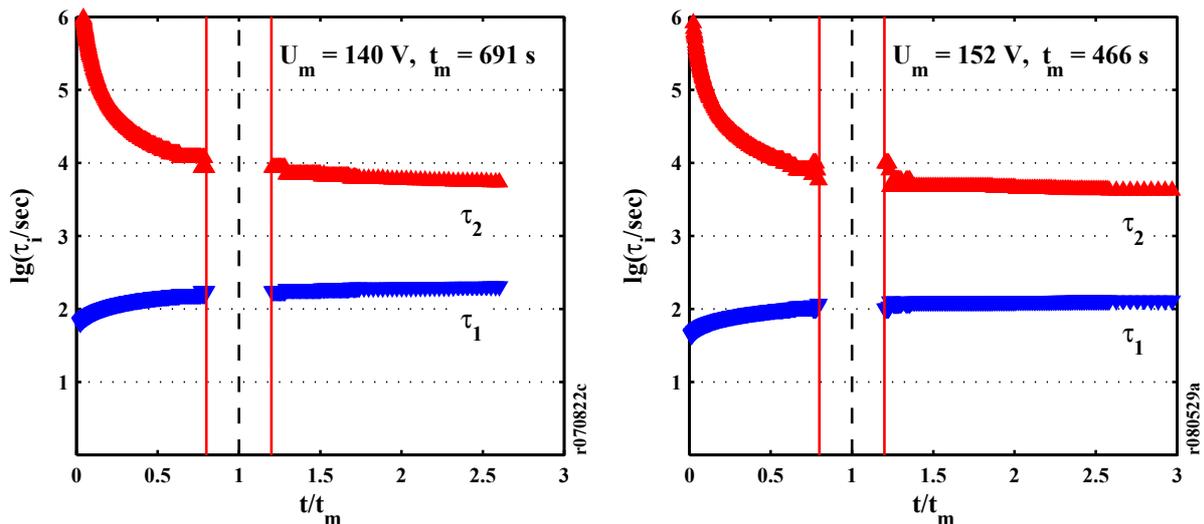


Abb. 2.34: Zeitkonstanten für die 630 kVA-Transformatoren Tr5 und Tr6 mit Zusatzkapazität $C_P = 220$ nF (vgl. Abb. 2.29 und 2.30)

Ein Vergleich mit Messungen mit Parallelkapazität an anderen Objekten bestätigt die Annahme, dass eine solche Zusatzkapazität in den vorgestellten Darstellungen eine Hervorhebung von Kurzzeitpolarisationsprozessen im System bewirkt. Abb. 2.34 zeigt als Beispiele

die entsprechenden Werte für Tr5 und Tr6 analog zu Abb. 2.29 bzw. 2.30. Auch hier ist die charakteristische Anhebung des Endverlaufs deutlich erkennbar. Die bei den Messungen ohne Zusatzkapazität bereits vorhandenen Kurzzeitprozesse, die die Anfangsverläufe der Zeitkonstanten beeinflussen, sind hier deutlich ausgeprägter.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist, dass sich in beiden dargestellten Fällen der Zeitpunkt t_m des Maximums um ungefähr einen Faktor 10 erhöht (von 76 auf 691 s bei Tr5 und von 44 auf 466 s bei Tr6), das Verhältnis der Werte also ungefähr gleich bleibt.

Rückkehrspannungsmessungen mit Zusatzkapazitäten sind demnach offenbar geeignet, um eventuell vorhandene Störprozesse, die bei einer Standard-Messung nicht sichtbar sind, die jedoch das System beeinflussen, aufzuspüren. Die physikalischen Vorgänge, speziell die quantitativen Auswirkungen der Zusatzkomponenten, sind allerdings teilweise noch nicht geklärt, so dass an dieser Stelle noch experimentelle wie theoretische Untersuchungen erforderlich sind.

2.6.7 Messungen an einem 100 MVA-Leistungstransformator

An einem wegen eines nicht näher spezifizierten Fehlers ausgemusterten 100 MVA-Umspanner 220 kV/110 kV/10 kV (interne Bezeichnung Tr51) wurden ebenfalls Rückkehrspannungsmessungen durchgeführt. Alle Messungen wurden mit dem CD31 mit einem Messwiderstand von 12 G Ω durchgeführt.

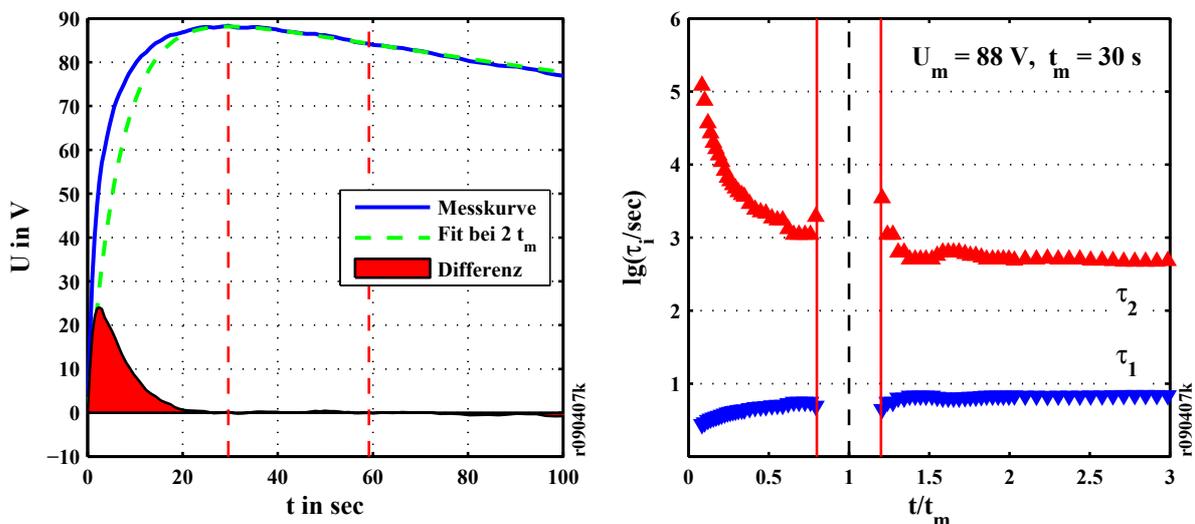


Abb. 2.35: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen ausgemusterten 100 MVA-Transformator (Tr51), 220 kV-Wicklung (OS) gegen 110 kV (MS), MS und Kessel geerdet, $U_p = 1 \text{ kV}$

Abb. 2.35 zeigt die Daten aus einer Messung, bei der die Prüfspannung an die OS-Wicklung (220 kV) angeschlossen, während die MS-Wicklung (110 kV) mit dem Kessel und damit mit Erde verbunden war. Die Darstellungen zeigen sehr prägnante Kurzzeitprozesse, selbst im Verhältnis zum an sich schon kleinen τ_1 , das mit einer vom Betreiber ermittelten hohen Ölleitfähigkeit korreliert. Eine Wiederholungsmessung zeigte eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Eine Messung, bei der die OS- mit der MS-Wicklung verbunden und US-Wicklung und Kessel geerdet wurden, ergab ein noch geringeres τ_1 als bei der vorstehend genannten Kon-

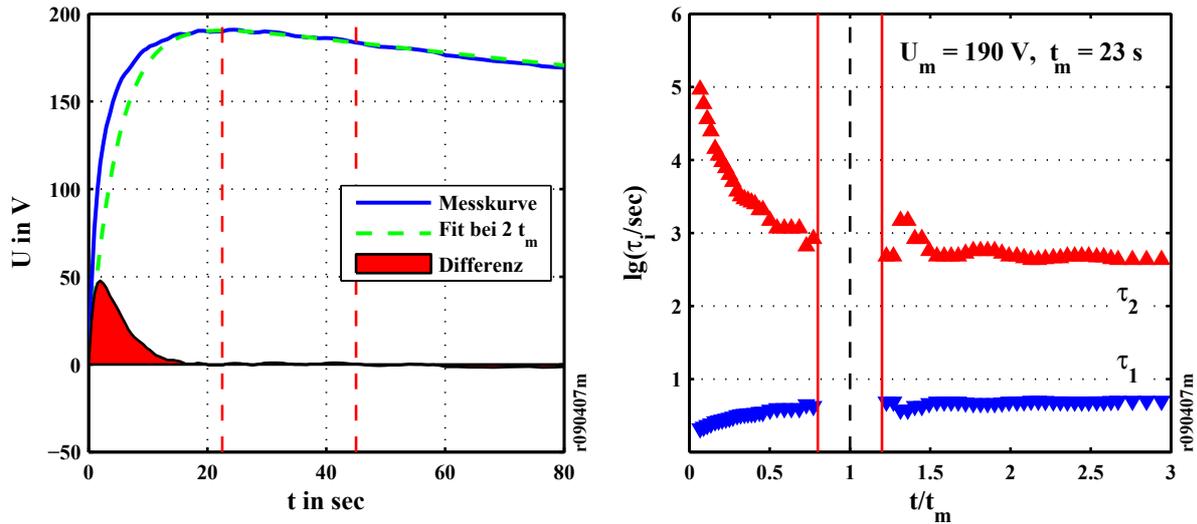


Abb. 2.36: Kurvenfit und Zeitkonstanten für einen ausgemusterten 100 MVA-Transformator (Tr51), 220 kV-Wicklung (OS) mit 110 kV (MS) verbunden, US (10 kV) und Kessel geerdet, $U_p = 2$ kV

figuration, während τ_2 etwa gleich geblieben ist. Die Messungen sind allerdings teilweise stark gestört, da für die Verbindung von OS und MS keine entsprechend geschirmte Leitung zur Verfügung stand und direkt über dem Prüfobjekt eine 220 kV-Sammelschiene verlief.

Abb. 2.36 zeigt die Ergebnisse einer Messung mit $U_p = 2$ kV. Die Amplitude der Differenz zwischen Messkurve und bei $2 t_m$ durchgeführtem Fit ist bei beiden Messungen prozentual (bezogen auf die Amplitude U_m der Gesamtkurve) ungefähr gleich.

2.7 Einfluss der Temperatur auf die Rückkehrspannung

Um den Einfluss der Temperatur auf die Rückkehrspannung bei Transformatoren zu untersuchen, wurden zwei von der Bauform her ähnliche 50 kVA-Öltransformatoren im Labor mit zyklischen Temperaturverläufen beaufschlagt [Pat09, Men09]. Die Transformatoren wurden zu diesem Zweck separat mit Styropor-Kästen thermisch isoliert und von außen durch jeweils einen modifizierten kommerziellen Ölradiator beheizt (Aufbau s. Abb. 2.37). Zur Überwachung der Temperatur waren jeweils an Boden und Deckel des Kessels gegenüber der Umgebungsluft thermisch isolierte Temperaturfühler angebracht.

Bei den Transformatoren, die für diese Versuchsreihe zum Einsatz kamen, handelt es sich um zwei 50 kVA-Öltransformatoren (10 kV/0,4 kV) in offener Bauform. Der intern als **Tr1** (Bj. 1959) bezeichnete Transformator befand sich insgesamt in einem deutlich besseren Zustand als **Tr2** (Bj. 1954), dessen Öl sich auch bei Teilentladungsmessungen als stark gealtert herausstellte (s.a. Abschnitt 3.4 auf Seite 79). Tr1 kam in der Vergangenheit am Institut zur dreiphasigen Dauerbelastung von Kabeln zum Einsatz und wurde so zumindest spannungsmäßig beansprucht, während Tr2 mehr als 10 Jahre nicht mehr unter Spannung gewesen war.

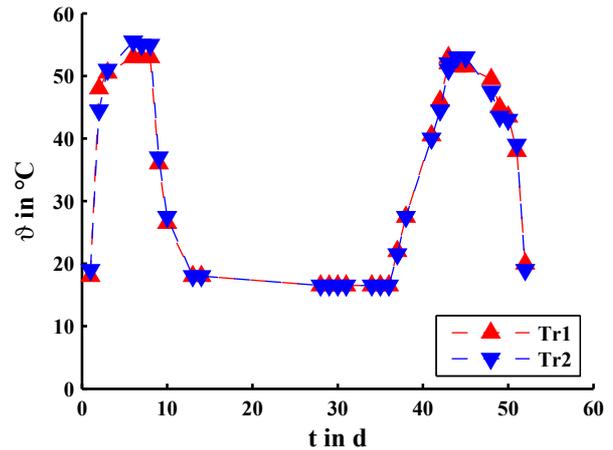


Abb. 2.37: Links: Laboraufbau zur Untersuchung der Temperaturabhängigkeit an Tr1 und Tr2, Abdeckung der Isolierboxen entfernt; rechts: Verlauf der Temperatur der Transformatoren während der Untersuchungen

2.7.1 Thermisch aktivierte Leitprozesse

Leitprozesse in Isolatoren sind, wie auch bei Halbleitern, hauptsächlich von der Konzentration der verfügbaren Ladungsträger abhängig. Die Beweglichkeit der Ladungsträger weist demgegenüber nur eine geringe Temperaturabhängigkeit auf. Für den spezifischen Leitwert bzw. dessen Änderung in Abhängigkeit von der Temperatur bei thermisch aktivierten Prozessen gilt allgemein der Zusammenhang [Bey86, Dak06]

$$\sigma \sim e^{-\frac{W_a}{kT}} \quad (2.78)$$

Die Ladungsträgerkonzentration ist bei rein thermischer Anregung proportional zur Leitfähigkeit. Setzt man die Leitfähigkeit des Öls mit der Zeitkonstante τ_1 und damit mit t_m in Beziehung (s.a. Gl. (2.53) auf S. 20), dann liegt die Vermutung nahe, dass t_m sich ebenfalls nach Gl. (2.78) verhält.

Abb. 2.38 zeigt anschaulich den vorhergesagten Zusammenhang. Die in dieser und allen folgenden Abbildungen verwendeten Daten stammen aus den beiden durchgeführten Temperaturzyklen, wobei die Messungen jeweils mit $U_p = 1$ kV und $U_p = 2$ kV durchgeführt wurden. Die Werte für U_m und s aus den 1 kV-Messungen wurden mit 2 multipliziert, wobei durch die Lage der skalierten Werte erkennbar ist, dass die Polarisationsspannung erwartungsgemäß keinen Einfluss auf die Parameter hat.

Es ist gut erkennbar, dass sich der natürliche Logarithmus von t_m proportional zur inversen Temperatur verhält, also $\ln t_m \sim 1/T$ gilt. Aufgrund des Zusammenhangs von t_m und τ_1 für große λ ist zu erwarten, dass sich für die Zeitkonstante des Öls ein vergleichbarer Zusammenhang ergibt, was Abb. 2.39 links bestätigt. Die Zeitkonstante des Zelluloseanteils τ_2 zeigt in Abb. 2.39 rechts ein ähnliches Verhalten, da auch hier die Leitprozesse durch die Aktivierungsenergie bestimmt sind.

Auch ist offensichtlich bei Tr1 der äquivalente Widerstand R_2 bei niedrigen Temperaturen so groß, dass der Messwiderstand von 12 G Ω eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. Das führt zu einem Abflachen des Verlaufs von τ_2 bei niedrigen Temperaturen, was mit

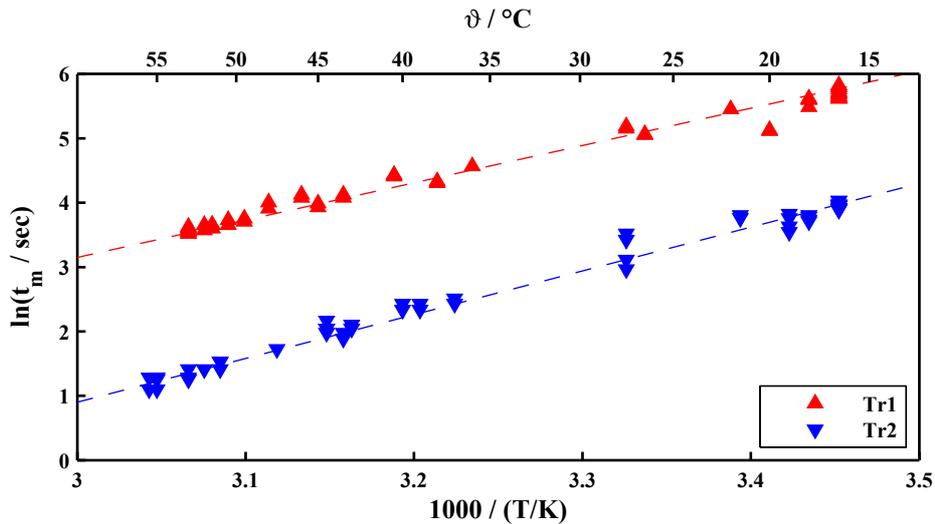


Abb. 2.38: Verlauf des Zeitpunktes t_m des Maximums über der Temperatur für 50 kVA-Transformatoren Tr1 und Tr2

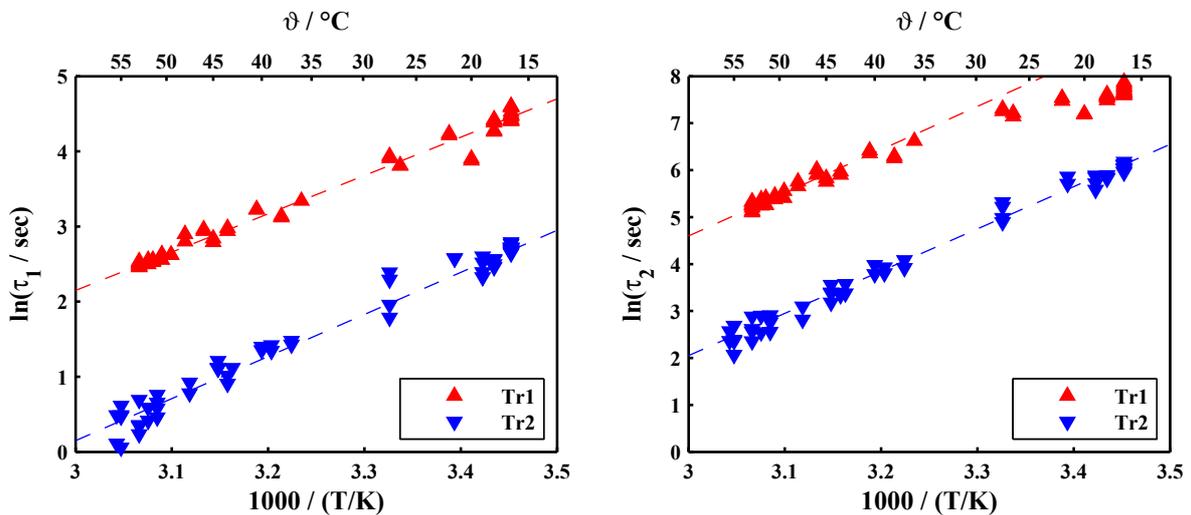


Abb. 2.39: Verlauf der Zeitkonstanten τ_1 des Ölanteils und τ_2 der Zellulose über der Temperatur für die 50 kVA-Transformatoren Tr1 und Tr2, Werte ermittelt bei $2 t_m$

dem in Abschnitt 2.4.7 gezeigten Zusammenhang einhergeht. Bei Tr2 ist der Isolationswiderstand offenbar über den gesamten betrachteten Temperaturbereich derart gering, dass der Einfluss von R_P auf τ_2 vernachlässigbar klein ist.

Nimmt man Gl. (2.78) als Grundlage, dann ist es möglich, aufgrund des Temperaturverlaufes der Messgrößen einen Näherungswert für die Aktivierungsenergie der Ladungsträger für den jeweils relevanten Prozess zu bestimmen. Die Gleichung kann umgestellt werden zu

$$\sigma \sim e^{-\frac{W_a}{kT}} \Rightarrow \ln \sigma \sim -\frac{W_a}{k} \frac{1}{T} \quad (2.79)$$

Trägt man den natürlichen Logarithmus der spezifischen Leitfähigkeit σ über der inversen Temperatur $1/T$ auf, dann ergibt sich eine allgemeine Geradengleichung, bei der der Faktor $-W_a/k$ die Steigung darstellt. Die Steigung der Geraden ist in den dargestellten

Fällen leicht zu ermitteln. Aus den Darstellungen für τ_1 kann die Aktivierungsenergie für Ladungsträger im Öl ermittelt werden, aus τ_2 diejenige in der Zellulose.

Die in den gezeigten Fällen positive Steigung der Verläufe über der inversen absoluten Temperatur rührt daher, dass sich die dargestellten Größen proportional dem elektrischen Widerstand verhalten, also invers proportional der Leitfähigkeit, für die wiederum der in Gl. (2.78) gezeigte Zusammenhang gilt. Für die Zeitkonstanten der Isolierkomponenten gilt

$$\tau_i = \rho_i \varepsilon_0 \varepsilon_{ri} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ri}}{\sigma_i} \quad (2.80)$$

Für die dargestellten Daten ergeben sich folgende Werte für die Aktivierungsenergie W_a :

Parameter	Tr1		Tr2	
	$W_a/k \cdot 10^{-3} K^{-1}$	W_a/eV	$W_a/k \cdot 10^{-3} K^{-1}$	W_a/eV
t_m	5,8	0,5	6,8	0,58
τ_1	5,1	0,44	5,6	0,48
τ_2	9,2	0,79	9	0,78
U_m/s	5,0	0,43	4,6	0,39

Offensichtlich liegen die aus t_m , τ_1 und U_m/s ermittelten Werte in der selben Größenordnung, während der Wert für τ_2 deutlich höher ist. Die ermittelten Werte zeigen deutlich die erwarteten Unterschiede der Aktivierungsenergien von Zellulose und Öl.

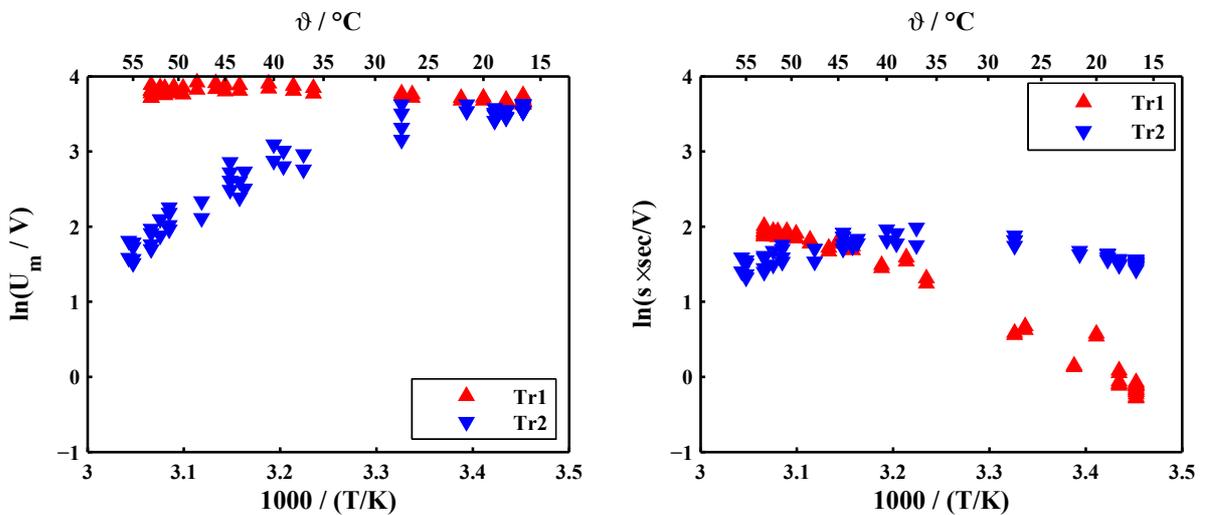


Abb. 2.40: Verlauf der Scheitelspannungen U_m und der Anfangssteigungen s über der Temperatur für die 50 kVA-Transformatoren Tr1 und Tr2

Die Parameter U_m und s (Abb. 2.40) alleine zeigen kein Verhalten, das auf einen thermisch aktivierten Leitungsprozess hindeutet. Nur ihre Kombination lässt ein solches Verhalten erkennen, was zeigt, dass die beiden Parameter physikalisch miteinander verknüpft sein müssen.

Die für t_m ermittelte Aktivierungsenergie ist geringfügig höher als die Werte für U_m/s und τ_1 , was darauf hindeutet, dass τ_2 auf diesen Parameter einen nicht vernachlässigbaren Einfluss hat. Die offensichtliche Abweichung im Falle von U_m/s bei Tr2 ist durch Zusatzpolarisationen erklärbar, die speziell bei Tr2 erheblichen Einfluss haben und zusätzlich zu

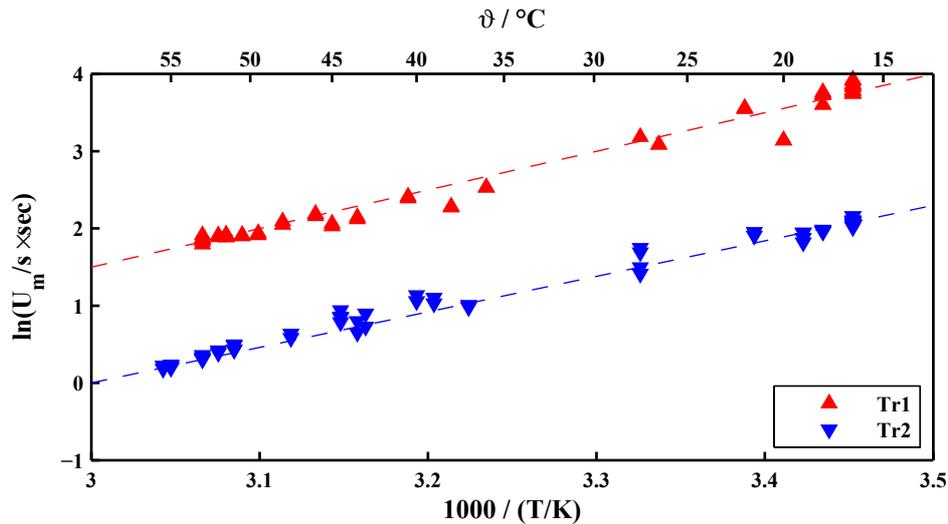


Abb. 2.41: Verlauf des Verhältnisses U_m/s der Scheitelspannungen U_m und der Anfangssteigungen s über der Temperatur für die 50 kVA-Transformatoren Tr1 und Tr2

den an sich schon sehr frühen Maxima der Kurven zu einer Erhöhung der Anfangssteigung s führen. Speziell bei Kurven mit frühen Maxima ist eine zuverlässige Bestimmung von s nur schwer möglich.

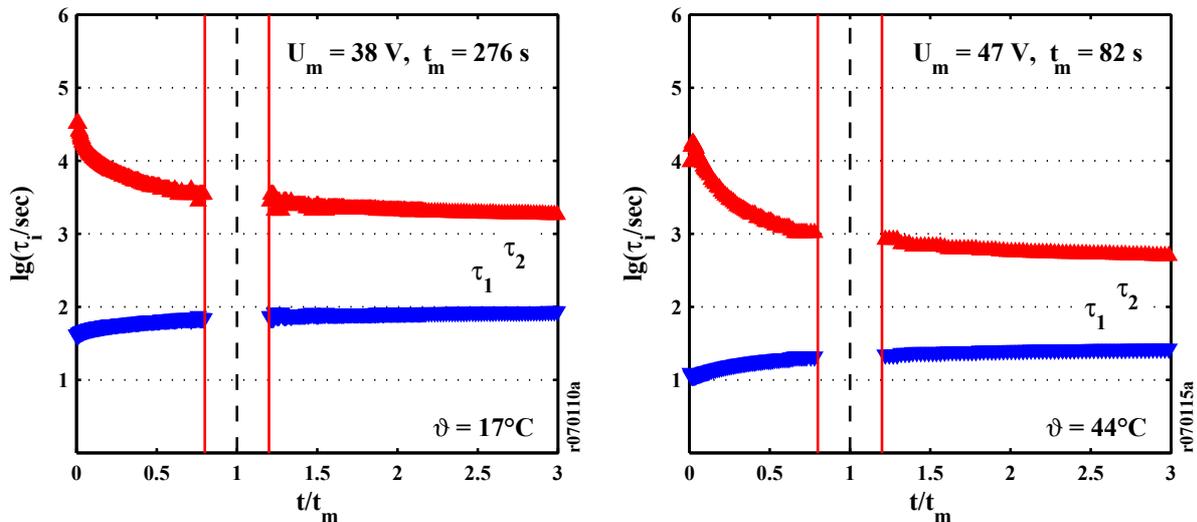


Abb. 2.42: Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 über dem Kurvenverlauf für Tr1 bei 17 °C und bei 44 °C

Die Abbildungen 2.42 und 2.43 zeigen für beide Transformatoren die Einzelzeitkonstanten τ_1 und τ_2 über dem Verlauf der Rückkehrspannungskurve bei zwei unterschiedlichen Temperaturen. Wie nach den bisher gemachten Erkenntnissen zu erwarten, sind in beiden Fällen die Zeitkonstanten jeweils im Gesamtverlauf bei der höheren Temperatur kleiner. Während U_m bei Tr1 bei knapp über 40 °C sogar 20 % über dem Wert bei 17 °C liegt, geht es bei Tr2 auf ungefähr die Hälfte zurück. t_m reduziert sich in beiden Fällen deutlich mit steigender Temperatur, bei Tr2 sogar auf ein Fünftel des Wertes bei 17 °C. Bei Tr1 geht t_m um 70 % zurück.

Bei Tr2 zeigt sich bei erhöhter Temperatur (Abb. 2.43 rechts) ein Verlauf, der einem rei-

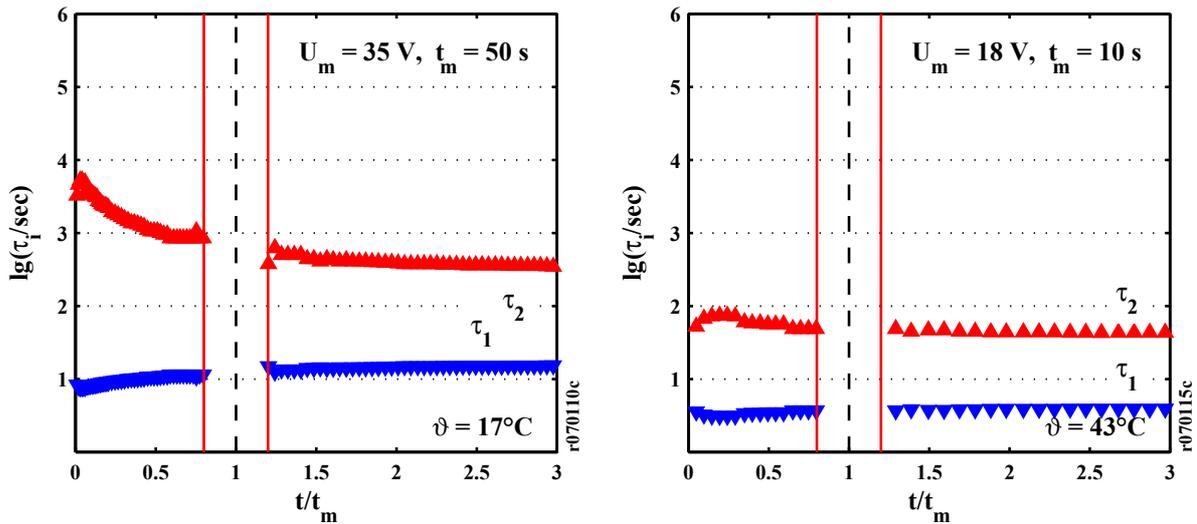


Abb. 2.43: Zeitkonstanten τ_1 und τ_2 über dem Kurvenverlauf für Tr2 bei 17 °C und bei 43 °C

nen Maxwell-Verhalten ähnelt. Dies liegt allerdings daran, dass das Maximum der Kurve derart früh auftritt ($t_m = 10$ s), dass die Grenzflächenpolarisation, die im Normalfall die Kurvenform weitgehend bestimmt, in den Zeitbereich der Kurzzeitpolarisationsprozesse gelangt und dementsprechend aufgrund der Überlagerung keine Unterschiede mehr feststellbar sind. Außerdem ist anzunehmen, dass auch die Zusatzpolarisationen einem erheblichen Temperatureinfluss unterworfen sind, so dass sie möglicherweise im betrachteten Temperaturbereich gar nicht mehr merklich in Erscheinung treten.

2.7.2 Bestätigung der Modellbildung

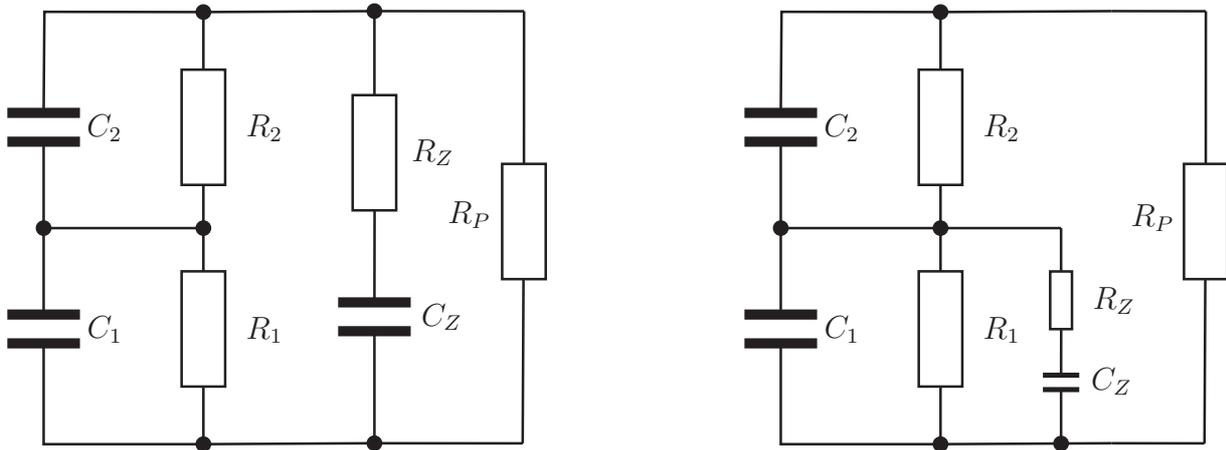
Das gezeigte Verhalten bekräftigt, wie schon in [Pat09] beschrieben, die Annahme, dass die Grenzflächenpolarisation der maßgebliche physikalische Effekt bei der Rückkehrspannung ist und dass das für die Interpretation verwendete Maxwell-Ersatzschaltbild der richtige Ansatz ist. Auch nach [Gäf98, Gäf00] wurden bei Messungen an realen Objekten Effekte gefunden, die mit den vorstehend genannten korrelieren, wobei für den Zellulose-Anteil eine Aktivierungsenergie von 0,9 eV angegeben wird. [Lin07] gibt Werte um 0,5 eV an. In den vorliegenden Experimenten ergaben sich Werte um 0,8 eV.

Aus den beschriebenen Zusammenhängen ergibt sich auch die vergleichsweise geringe Temperaturabhängigkeit des p-Faktors bei Kabeln. Dieser hängt ausschließlich vom Verhältnis λ der Einzelzeitkonstanten ab. Da die Permittivitäten ε_{r_i} praktisch keine Temperaturabhängigkeit aufweisen, entspricht die Temperaturabhängigkeit der Zeitkonstanten weitgehend derjenigen der spezifischen Leitwerte σ_i bzw. Widerstände ρ_i .

Dadurch ist ausschließlich der Unterschied der Aktivierungsenergien – genau genommen das Verhältnis der e^{W_a} – für die Temperaturabhängigkeit des p-Faktors maßgeblich. Da die Aktivierungsenergien sich im Regelfall um nicht mehr als einen Faktor 2 unterscheiden, ergibt sich eine im Vergleich zu den Absolutwerten der Zeitkonstanten relativ geringe Temperaturdrift.

2.8 Vergleichende Simulationsrechnungen

Wie bereits in Abschnitt 2.6.6 an einem Beispiel gezeigt, lassen sich die für die Rückkehrspannung relevanten Prozesse anhand eines erweiterten Maxwell-Ersatzschaltbildes zumindest in guter Näherung nachbilden, wobei allerdings zumindest im genannten Beispiel die physikalischen Zusammenhänge, die zum aufgezeigten ungewöhnlichen Verhalten führen, noch weitgehend ungeklärt sind.



Simulationsparameter:

$$R_1 = 2 \text{ G}\Omega, R_2 = 10 \text{ G}\Omega, C_1 = 10 \text{ nF}, C_2 = 100 \text{ nF}, R_P = \infty \text{ oder } 12 \text{ G}\Omega$$

Abb. 2.44: Ersatzschaltbilder mit Zusatzpolarisation, links mit Zusatzelement parallel zum Gesamtsystem, rechts parallel zum Ölanteil

Zur Verifizierung der Modellbildung wurden einige Ansätze durchgerechnet und die sich ergebenden Simulationsdaten mit Hilfe der für die Messdaten verwendeten Analyseverfahren untersucht. Die Simulationen wurden allgemein auf die in Abb. 2.21 gezeigten erweiterten Maxwell-Modelle mit jeweils einem zusätzlichen Polarisationsprozess – alternativ parallel zum Gesamtsystem oder zum Ölanteil, s.a. Abschnitt 2.5.1.3 – beschränkt, was für die angestrebte näherungsweise Nachbildung realer Messungen ausreichend ist.

Abb. 2.44 zeigt die beiden Ausgangs-Ersatzschaltbilder mit den verwendeten Simulationsparametern. Diese entsprechen denjenigen aus dem Beispiel in Abb. 2.7 auf Seite 14. Es wurden Simulationen mit unterschiedlichen τ_Z und C_Z sowie mit $R_P = \infty$ und $R_P = 12 \text{ G}\Omega$ durchgeführt. Abb. 2.45 zeigt die Verläufe von simulierten Rückkehrspannungskurven jeweils im direkten Vergleich mit der zugrunde liegenden reinen Maxwell-Kurve (d.h. der Kurve, die sich mit $C_Z = 0$ ergäbe). Die Zeitkonstante τ_Z des Zusatzelements entspricht hier 10 Sekunden, also $\tau_1/2$. C_Z ist 2,5 nF (in den beiden oberen Darstellungen) bzw. 5 nF (unten).

Der direkte Vergleich zeigt weitgehend die erwarteten Abweichungen vom reinen Maxwell-Ersatzschaltbild. Die Anfangsverläufe der Kurven sind steiler, was daran liegt, dass τ_Z deutlich kleiner ist als das ansonsten diesen Bereich bestimmende τ_1 . Die Maxima der Kurven werden zu späteren Zeiten verschoben und die Amplituden geringfügig kleiner. Dieses Verhalten ist bei der größeren Kapazität C_Z ausgeprägter, da C_Z sich im weiteren Verlauf der Kurve wie eine – allerdings im Vergleich zu den Betrachtungen in Abschnitt 2.6.6 relativ kleine – Parallelkapazität verhält.

Ist das Zusatzelement dem gesamten Maxwell-System parallel geschaltet, dann ergibt sich

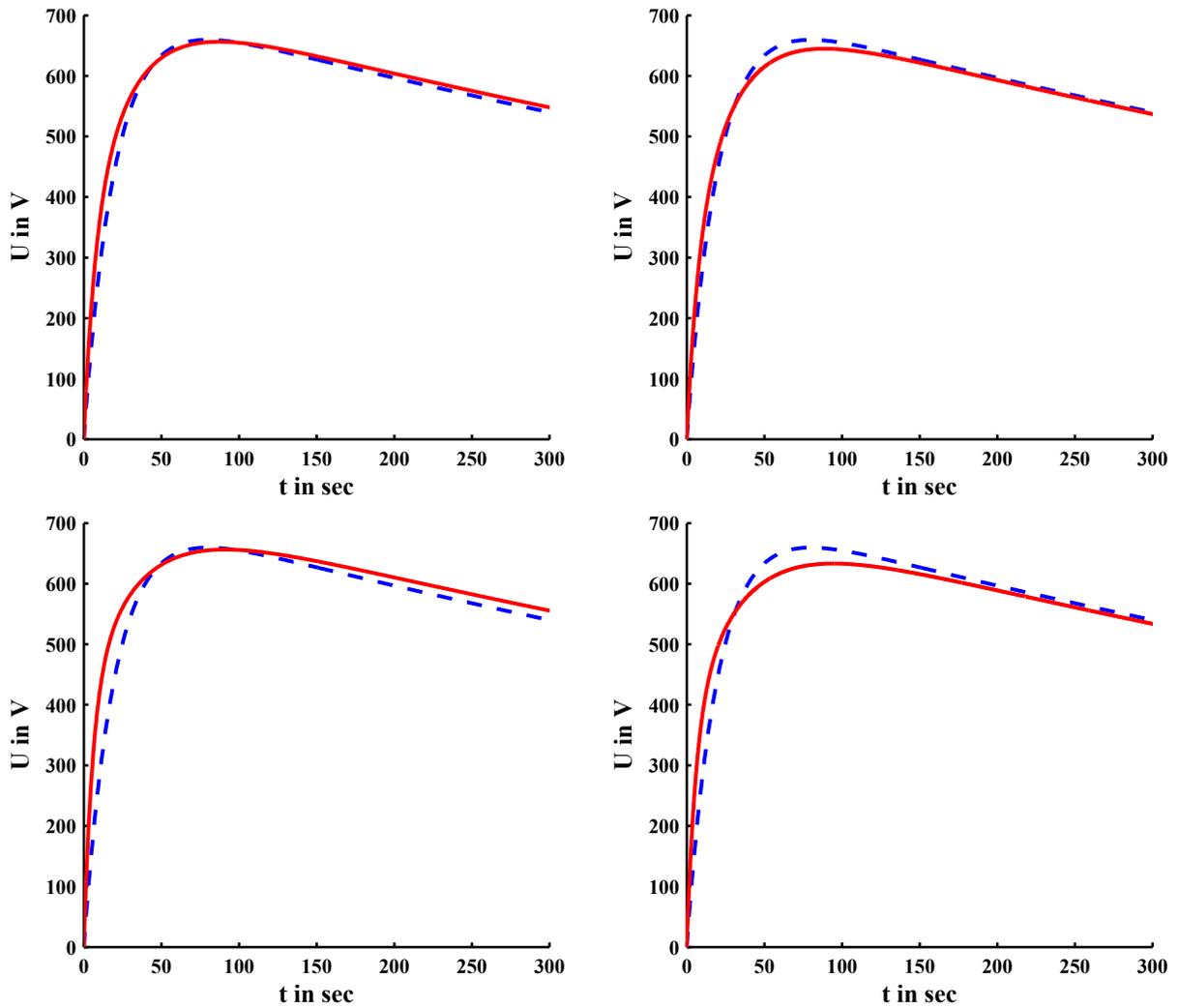


Abb. 2.45: Kurvenverläufe von Simulationen anhand der Ersatzschaltbilder mit Zusatzpolarisation, links mit Zusatzelement parallel zum Gesamtsystem, rechts parallel zum Ölanteil, $\tau_Z = \tau_1/2$, $R_P = \infty$, oben mit $C_Z = 2,5$ nF, unten mit $C_Z = 5$ nF, gestrichelt jeweils die reine Maxwell-Kurve ohne Zusatzpolarisation

eine stärkere Auswirkung auf die Anfangssteigung, während die Änderungen im Bereich des Maximums, besonders die Reduzierung der Amplitude, bei der anderen Variante ausgeprägter sind. In gewissem Umfang ist dies auch in den Darstellungen der Zeitkonstanten über der Messzeit sichtbar. Abb. 2.46 zeigt zunächst die Verläufe des zugrunde liegenden reinen Maxwell-Ersatzschaltbildes ohne Parallelwiderstand (links) und mit $R_P = 12$ G Ω .

Abb. 2.47 zeigt die entsprechenden Verläufe für die Kurven aus Abb. 2.45. Es ist deutlich sichtbar, zu welcher starken Abweichungen der Zeitkonstanten im Anfangsverlauf die auf den ersten Blick relativ geringen Abweichungen der Messkurven führen. Die oberen Darstellungen mit $C_Z = 2,5$ nF entsprechen Verläufen, die ähnlich auch bei Messungen an realen Objekten beobachtet wurden, während die unten dargestellten eher bei Transformatoren mit bekannt starker Alterung vorkommen. Generell scheint eine Modellierung der Zusatzpolarisationen mit im Vergleich zu C_1 eher kleiner Kapazität näher an der Realität zu sein.

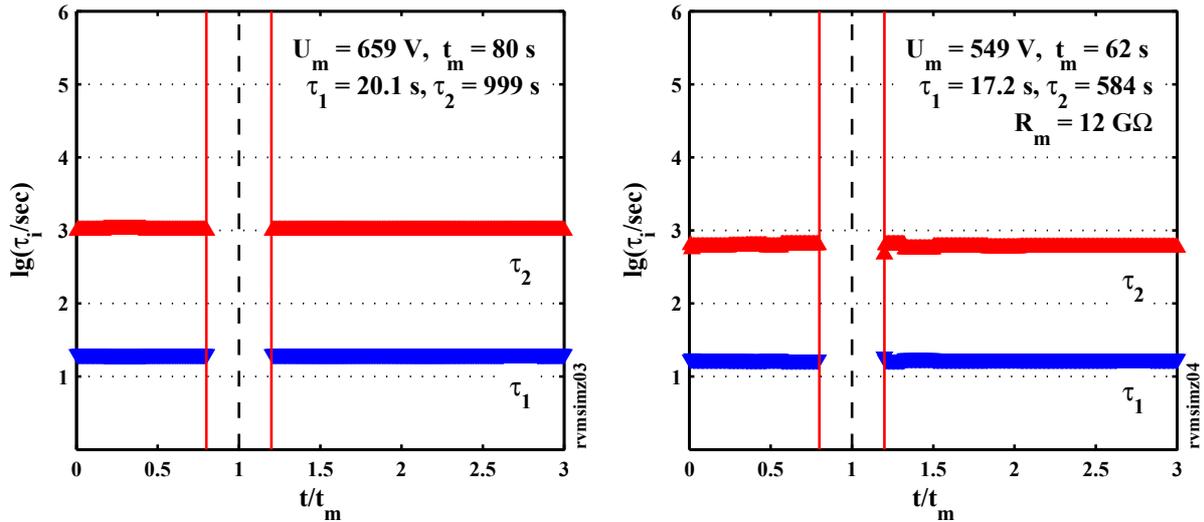


Abb. 2.46: Simulation der Ersatzschaltbilder ohne Zusatzpolarisation, $R_m = \infty$ (links) und $R_m = 12 \text{ G}\Omega$

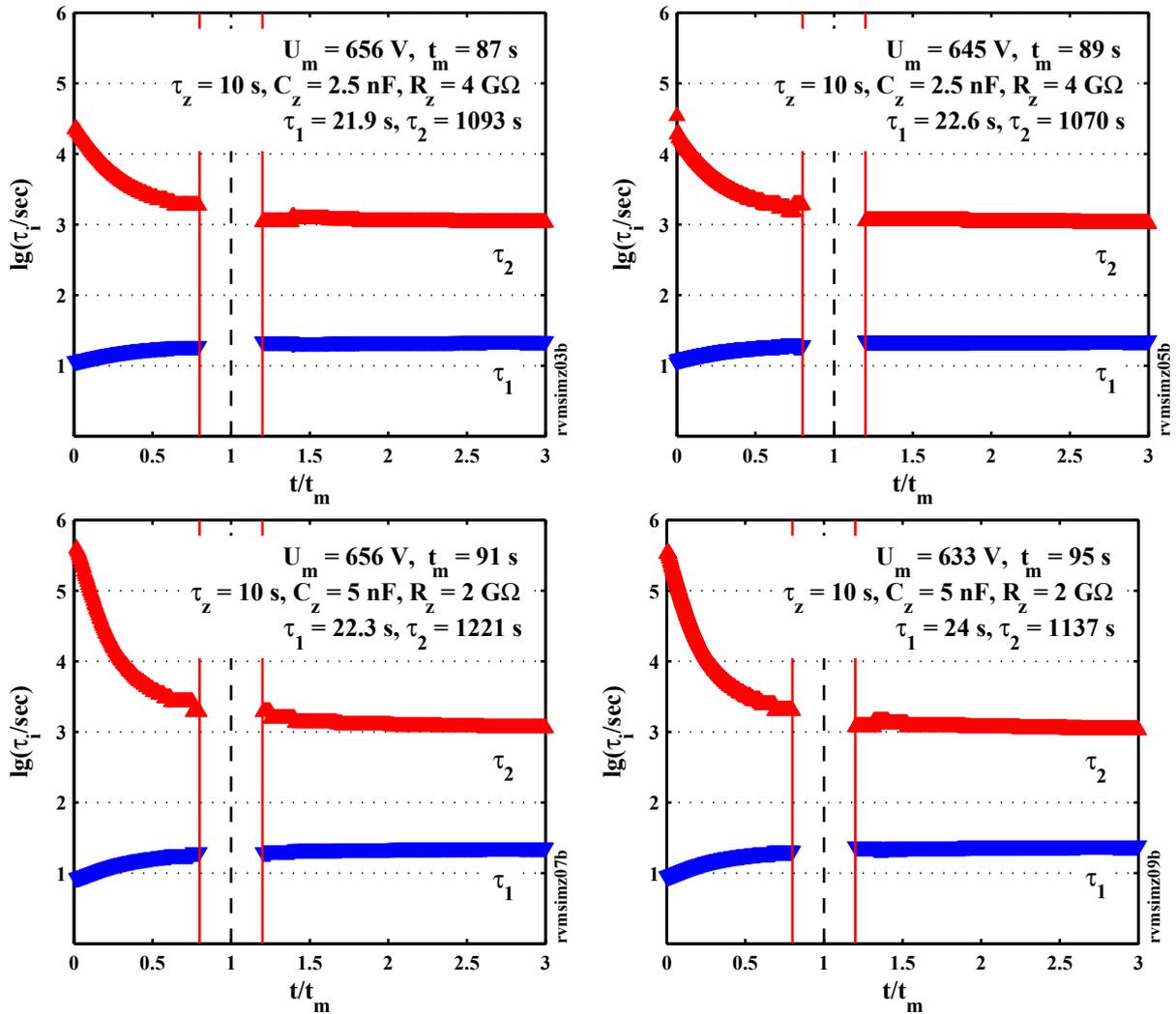


Abb. 2.47: Simulation der Ersatzschaltbilder mit Zusatzpolarisation, links mit Zusatzelement parallel zum Gesamtsystem, rechts parallel zum Ölteil (entspricht ionischen Aufladungen an den Grenzflächen der Ölkänäle), $R_m = \infty$

Die in den Abbildungen angegebenen Einzelzeitkonstanten sind jeweils die bei $2 t_m$ berechneten. Es zeigt sich, dass die Abweichungen im Endverlauf sich auch bei der größeren Kapazität noch einigermaßen in Grenzen halten, so dass die aus der Kurvenform ermittelten Zeitkonstanten immer noch relativ nah an denen des zugrunde liegenden reinen Maxwell-Modells liegen. Für die Auswertung bedeutet dies, dass der Zustand der durch das Maxwell-Modell nachgebildeten Komponenten der Isolierung auch bei Störungen durch Zusatzeffekte mit den vorgestellten Methoden zur Bestimmung der Zeitkonstanten noch in guter bis sehr guter Näherung ermittelbar ist.

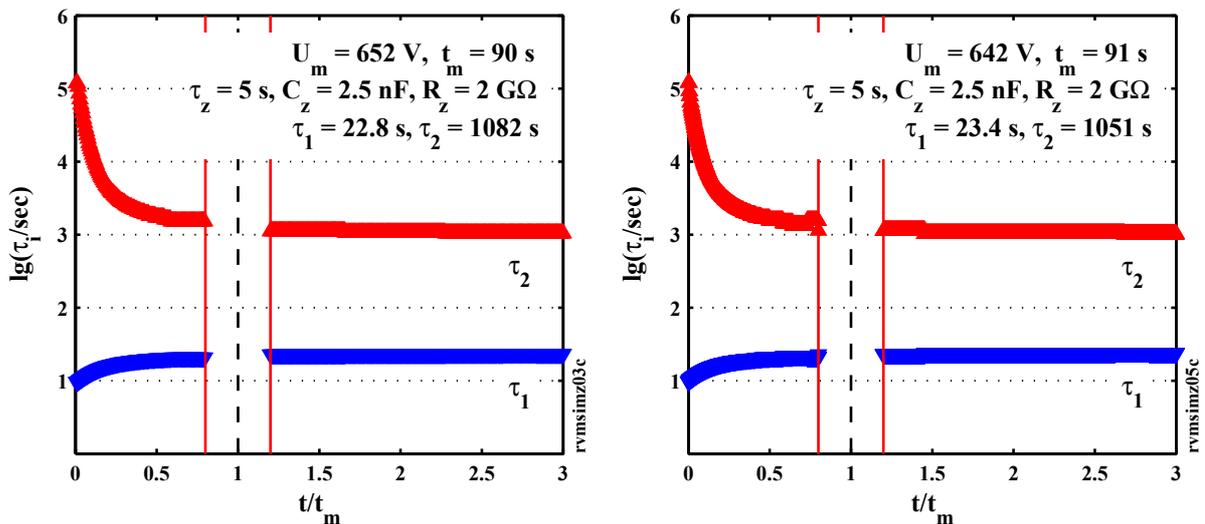


Abb. 2.48: Simulation der Ersatzschaltbilder mit Zusatzpolarisation, links mit Zusatzelement parallel zum Gesamtsystem, rechts parallel zum Ölanteil (entspricht ionischen Aufladungen an den Grenzflächen der Ölkanäle), $R_m = \infty$

Wird die Zeitkonstante des Zusatzelements noch kleiner, dann reduziert sich – bei gleichbleibendem C_Z , also folglich bei kleinerem R_Z – der Einfluss auf den Endverlauf der Kurve deutlich. Abb. 2.48 zeigt die Verläufe für $C_Z = 2,5$ nF und $\tau_Z = \tau_1/4 = 5$ s. Die sich bei $2 t_m$ ergebenden Werte für τ_2 liegen nur noch unwesentlich über denen des reinen Maxwell-Modells. τ_1 zeigt hier hingegen noch um 10–15 % zu hohe Werte, was aber für die Diagnose kaum relevant ist.

Grundsätzlich werden die Werte für τ_2 bei abnehmendem R_Z – also abnehmendem τ_Z bei gleichbleibendem C_Z – kleiner, was darauf zurückzuführen ist, dass das bei der Bestimmung von τ_i aus λ maßgebliche t_m zu späteren Zeitpunkten hin verschoben wird.

Das Hinzufügen eines endlichen Parallelwiderstandes R_P (bzw. eines Messwiderstandes R_m) führt erwartungsgemäß zu insgesamt deutlich kleineren Werten für τ_2 (s. Abb. 2.46 rechts und 2.49). Die Änderung der Zeitkonstanten τ_i in Abhängigkeit von R_Z entspricht aber derjenigen im Modell mit $R_p = \infty$.

2.9 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass eine detaillierte Analyse der Form einer Rückkehrspannungskurve viele Informationen preisgibt, die zur Zustandsbeurteilung von Betriebsmitteln nutzbar sind. Speziell der Zustand des festen Anteils einer Zweikomponenten-Isolierung ist durch

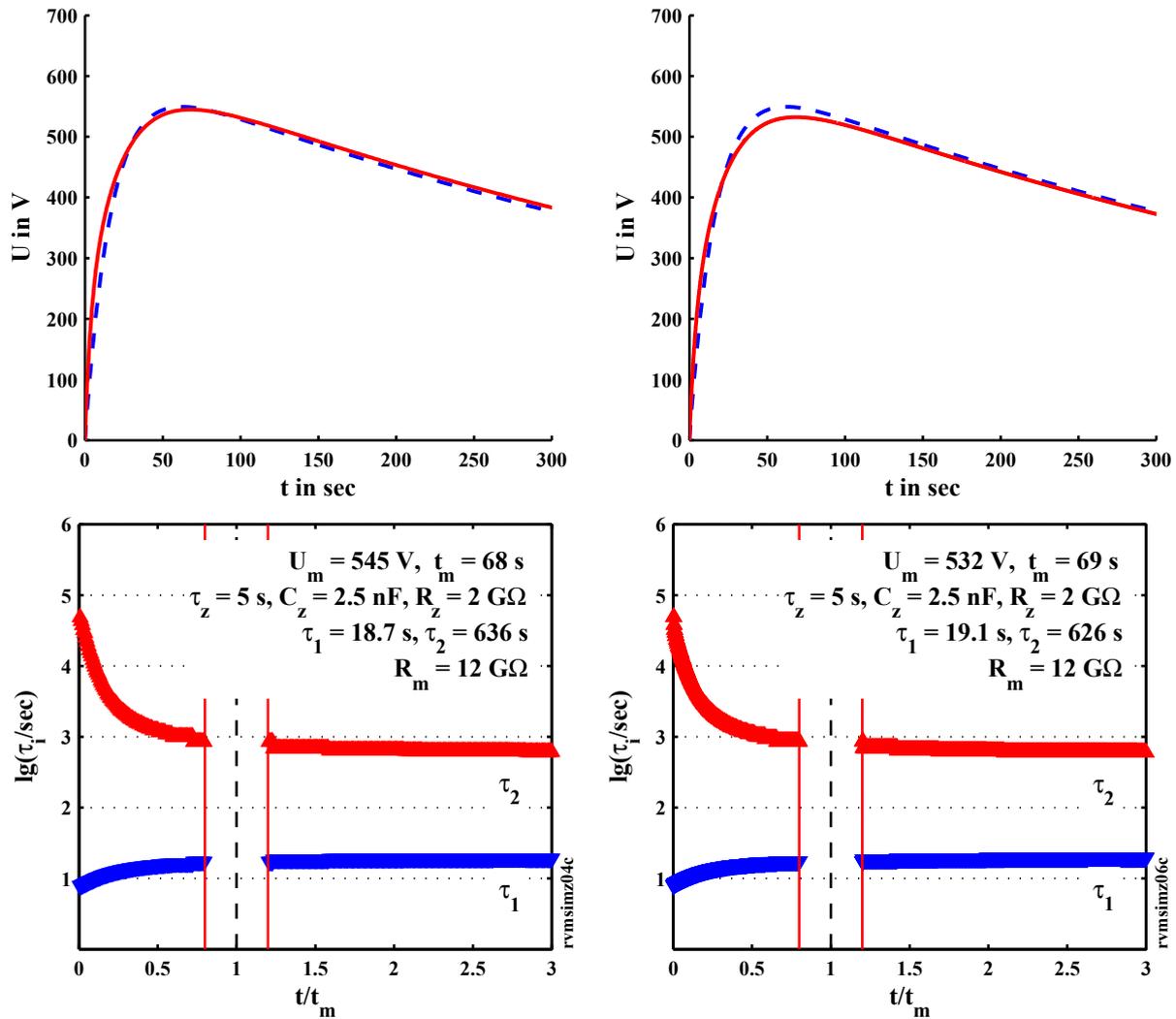


Abb. 2.49: Simulation der Ersatzschaltbilder mit Zusatzpolarisation, links mit Zusatzelement parallel zum Gesamtsystem, rechts parallel zum Ölanteil, $R_m = 12$ G Ω

die vorgestellten Auswerteverfahren besser beurteilbar als mit herkömmlichen Diagnoseverfahren.

Eine Interpretation von Rückkehrspannungskurven auf Basis des physikalisch relevanten Maxwell-Ersatzschaltbildes unter Ausnutzung aller zur Verfügung stehenden Daten kann zwar nach wie vor nur ein integrales Abbild des Zustandes der Isolierung zeichnen, welches jedoch unter Umständen sehr aussagekräftig sein kann.

Die analytische Beschreibung der Vorgänge im Ersatzschaltbild zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die Zeitkonstanten der das Grundverhalten bestimmenden Grenzflächenpolarisation von denjenigen zusätzlich stattfindender Polarisationsprozesse zu trennen, wobei allerdings zu beachten ist, dass die so ermittelten Zeitkonstanten nicht den physikalischen Zeitkonstanten der Komponenten der Isolierung entsprechen, sobald zum ursprünglichen Modell parallel geschaltete Leitwerte und/oder Kapazitäten hinzukommen, die die Teilsysteme koppeln. Jedoch beinhalten auch diese rechnerischen Zeitkonstanten die physikalischen Verhältnisse im betrachteten Isoliersystem, so dass bei einer angemessenen Auswertung praktisch alle zur Zustandsbeurteilung erforderlichen Daten ermittelt werden können.

Zusätzlich zur Grenzflächenpolarisation stattfindende Polarisationsprozesse, die v.a. durch

Alterung entstehen können, führen zu einem deutlich komplexeren Verhalten, das nicht mehr mit vertretbarem Aufwand analytisch darstellbar ist. Eine Darstellung wäre zwar prinzipiell möglich, jedoch sind die sich ergebenden Zusammenhänge nicht mehr anschaulich. In solchen Fällen ist es sinnvoller, eine Analyse auf der Grundlage von numerischen Berechnungen bzw. Simulationen durchzuführen.

Die höhere Komplexität von Systemen höherer Ordnung drückt sich v.a. darin aus, dass nicht nur für jeden Polarisationsmechanismus eine Zeitkonstante hinzukommt, sondern die Gesamtheit des Systems verändert wird, so dass eine echte Separierung der einzelnen physikalischen Vorgänge erschwert wird. Jede einzelne Zeitkonstante im System wird von allen Komponenten des entsprechenden Modells beeinflusst.

Aufgrund dieser vielfältigen Einflüsse ist es wichtig, dass für die Auswertung nicht nur ein einzelner Punkt oder einige wenige Parameter der Messkurve herangezogen werden, sondern dass eine Betrachtung des gesamten verfügbaren Kurvenverlaufs stattfindet. Der Einfluss alterungsinduzierter Zusatzprozesse nimmt im Verlauf der Messung ab, so dass davon ausgegangen werden kann, dass der Endverlauf der Kurve am ehesten die zugrunde liegende Grenzflächenpolarisation widerspiegelt. Das unterschiedliche Verhalten von Abschnitten der Messkurve kann so zu einer detaillierteren Analyse des Gesamtzustandes herangezogen werden.

Es ist dementsprechend möglich, aus dem Verlauf einer Rückkehrspannungskurve durch Analysemethoden auf Grundlage des Maxwell-Modells für die Grenzflächenpolarisation eine gute Beurteilung des Gesamtzustandes der Isolierung von Leistungstransformatoren durchzuführen. Grundsätzlich sind Näherungswerte für die dielektrischen Zeitkonstanten der Komponenten – und damit für Permittivität und spezifischen Leitwert – sowie die daraus abgeleiteten Parameter bestimmbar. Diese Werte sind zwar durch eventuell vorhandene Zusatzkomponenten beeinflusst, jedoch ist der Einfluss in den meisten Fällen vernachlässigbar, v.a. dann, wenn zur Auswertung der gesamte Kurvenverlauf herangezogen wird.

Für eine schnelle Diagnose genügt es im Regelfall, neben einer näherungsweisen Information über die Maxwell-Zeitkonstanten bzw. deren Verhältnis einen Anhaltspunkt für das Ausmaß der Zusatzeffekte mit kleinen Zeitkonstanten zu erhalten. Diese Informationen können aus den vorgestellten Darstellungen einfach ermittelt werden und stellen die für eine Alterung der Isolierung relevanten Parameter dar. Simulationen zeigen, dass die durch zusätzliche Polarisationsprozesse hervorgerufenen Änderungen der Kurvenverläufe sich im Regelfall so weit in Grenzen halten, dass das grundsätzliche Verhalten des Systems noch ermittelt werden kann.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass alle Parameter der Rückkehrspannung – wie auch diejenigen bei anderen dielektrischen Messverfahren – einer starken Temperaturabhängigkeit unterworfen sind. Es ist dementsprechend für eine brauchbare Auswertung wichtig, die Temperatur des Prüfobjektes zu protokollieren, um Messungen bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen vergleichen zu können.

Kapitel 3

Teilentladungen in Isolierölen

Die Erfassung von Teilentladungen spielt in der Betriebsmitteldiagnostik eine große Rolle. Sie wird oft eingesetzt, um Isoliersysteme auf Inhomogenitäten zu überprüfen bzw. um schadhafte Stellen innerhalb einer Isolierung zu ermitteln bzw. zu lokalisieren. Dabei werden im Regelfall komplette Betriebsmittel – z.B. Kabel, Motoren/Generatoren oder Transformatoren, aber auch ganze Schaltanlagen – untersucht, teilweise auch im Betrieb (Online-TE-Diagnose). Zu Forschungszwecken werden jedoch auch Messungen an Modellen bzw. repräsentativen Proben durchgeführt.

Das Teilentladungsverhalten einer elektrischen Komponente kann unter Umständen sehr aufschlussreich hinsichtlich des Zustandes der Isolierung sein. Moderne Auswerteverfahren berücksichtigen vielerlei Parameter und können oft nicht nur das Vorhandensein von Fehlstellen ermitteln, sondern auch die Art und in einigen Fällen sogar den Ort des Fehlers.

Die Messung von Teilentladungen an Proben von Isolierstoffen aus in Betrieb befindlichen Betriebsmitteln ist in der Praxis bisher eher unüblich, da es sich in den meisten Anwendungsfällen um Feststoffisolierungen handelt, bei denen eine Probenahme nicht möglich ist. Teilentladungen in flüssigen Isolierstoffen wurden bislang – ähnlich wie in gasförmigen Isolierstoffen – als wenig aussagekräftig für den Zustand des Isoliermediums angesehen.

Bei gasförmigen Isolierstoffen können Koronaentladungen beispielsweise zur akustischen Lokalisierung von Inhomogenitäten genutzt werden. Da sich in Gasen und Flüssigkeiten jedoch z.B. keine Raumladungen mit nennenswerten Lebensdauern bilden können, bringen bei Feststoffisolierungen übliche Auswertungen, die über eine Erfassung der TE-Intensität bzw. -Häufigkeit hinaus gehen, keine nennenswerten Zusatzinformationen.

An Isolierölen aus Transformatoren durchgeführte Messungen lassen jedoch darauf schließen, dass zumindest bei flüssigen Isolierstoffen mit einer hinreichend inhomogenen Elektrodenanordnung eine Differenzierung in Details des Teilentladungsverhaltens von Proben unterschiedlichen Zustandes durchaus möglich ist. Anhand der Messergebnisse konnte auf bestimmte physikalische Vorgänge geschlossen werden, deren Ausprägung vom Gehalt an flüchtigen Bestandteilen in der untersuchten Probe abhängt.

3.1 Zielsetzung

Zur Analyse des Zustandes von Isolierölen kommen standardmäßig unterschiedliche Verfahren zum Einsatz, die jeweils spezifische Eigenschaften des Öls bestimmen und die

dementsprechend entweder Aussagen über den Zustand bzw. die Qualität des Öls selbst oder über bestimmte Vorgänge im Gesamtsystem Aufschluss geben. Die Verfahren lassen sich grundsätzlich in zwei Klassen aufteilen (im Folgenden einige der wichtigsten Verfahren):

1. Elektrische Verfahren:

- Messung der Durchschlagspannung: Die Durchschlagspannung wird mit einer genormten Elektrodenanordnung bestimmt, Verfahren nach VDE 0370 Teil 5 [VDE96], wo auch Grenzwerte festgelegt sind
- Messung von Permittivität, Verlustfaktor und Gleichstromwiderstand, Verfahren und Elektrodenanordnungen sind in VDE 0380 Teil 2 [VDE05] festgelegt

2. Chemische Verfahren:

- Bestimmung des Feuchtegehaltes, z.B. durch Karl-Fischer-Titration
- DGA (Dissolved Gas Analysis, Gas-in-Öl-Analyse): Nachweis im Öl gelöster, flüchtiger Abbauprodukte, v.a. kurzkettiger Kohlenwasserstoffe, Sauerstoff, Wasserstoff, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid
- Bestimmung zusätzlicher Abbauprodukte wie Furan, Schwefel usw., deren Anwesenheit zusätzliche Informationen auch über den Zustand des Gesamtsystems – also auch der Zellulose – liefern kann

Den genannten elektrischen Messverfahren ist gemein, dass sie zwar einfach (auch von nicht speziell ausgebildetem Personal) durchführbar sind, jedoch nur eine sehr pauschale Aussage über den Zustand der Isolierflüssigkeit bzw. nur über bestimmte Eigenschaften zulassen. Die chemischen Verfahren sind hingegen im Regelfall aufwändig und teuer und können meist nicht vor Ort durchgeführt werden, sondern nur in speziellen Laboratorien. Im Prinzip ist für diese Verfahren die Entnahme einer Ölprobe erforderlich.

Grundsätzlich unterscheiden sich die genannten Verfahren auch in ihrer Aussage. Die elektrischen Verfahren und die Analyse des Wassergehaltes sprechen in erster Linie auf den Zustand des Öls an sich an – v.a. auf seine Leitfähigkeit und elektrische Festigkeit, die wiederum von Wassergehalt, Oxidation bzw. Verseifung und von (speziell polaren) Abbauprodukten, falls diese in größeren Mengen vorliegen, abhängen – während die chemischen Methoden, speziell die DGA, Hinweise auch auf geringere Konzentrationen von Schlüsselsubstanzen liefern, die charakteristisch für bestimmte Fehler im Transformator sind, die aber nicht zwingend das Öl direkt betreffen bzw. dessen elektrische Festigkeit nennenswert beeinflussen.

Es ist wünschenswert, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem das im Transformator befindliche Öl quasi kontinuierlich überwacht werden kann (Online Monitoring) und das im günstigsten Fall eine automatische Diagnose durch Auswertung von Messdaten durchführen kann, die möglichst alle interessierenden Bereiche abdeckt, also sowohl die elektrische Festigkeit des Öls überwacht als auch bestimmte Fehler erkennt, die Schlüsselsubstanzen produzieren, die nicht zwangsläufig direkt zu einer nennenswerten Verschlechterung der elektrischen Eigenschaften des Öls führen. Es wurden zwar Verfahren zu einer Online-Gasanalyse vorgestellt (z.B. [Rui98]) und mittlerweile sind auch entsprechende Geräte zur Online-DGA verfügbar [ABB08, Sie09], die aber sehr teuer und dementsprechend nur bei großen, für den Netzbetrieb essentiell wichtigen Transformatoren sinnvoll einsetzbar sind.

Teilentladungsmessungen spielen bei der Transformator diagnose bisher hauptsächlich eine Rolle bei der Überwachung des gesamten Betriebsmittels, indem beispielsweise die Impulse akustisch erfasst bzw. durch die Anbringung mehrerer Sensoren sogar räumlich geortet werden, um kritische Stellen in der Isolierung ausfindig machen zu können.

Teilentladungsmessungen zur Bestimmung von Zustand, Art bzw. Verhalten des Isolieröls wurden zwar experimentell untersucht [Maz92, Deb99], jedoch bisher ohne umsetzbares Ergebnis. Die Messungen sind mit einigen Schwierigkeiten verbunden, besonders in Hinblick auf die Entwicklung einer geeigneten Elektrodenanordnung, die reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Die grundlegende Zielsetzung hinter der Durchführung der Teilentladungsmessungen in Isolierölen im Rahmen der vorliegenden Arbeit waren

1. Die Suche nach Lösungen für die aus der Literatur bekannten Probleme
2. Das Finden von aussagekräftigen Parametern, die eine möglichst automatisierbare Schnell diagnose ermöglichen
3. Die Entwicklung einer Messvorrichtung, die eventuell im Ölkreislauf eines in Betrieb befindlichen Transformators eingebaut werden kann, um eine Online-Überwachung durchzuführen

Der zweite Punkt stellte hierbei den Schwerpunkt dar und wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Der dritte Punkt war eher als langfristiger Ausblick gedacht. Zur Realisierung eines solchen Sensors wären zusätzliche Untersuchungen erforderlich, z.B. hinsichtlich der Beeinträchtigung der Ölqualität im Prüfobjekt durch die zum Zwecke der Diagnose herbeigeführten Teilentladungen. Allerdings sollte sich bei einigen hundert Teilentladungen vergleichsweise geringer Energie pro Tag auch auf lange Sicht keine nennenswerte Beeinflussung der Ölqualität ergeben, zumal die Messung nicht kontinuierlich erfolgen soll. Durch Alterungsprozesse bedingte Änderungen der Ölqualität besitzen vergleichsweise lange Zeitkonstanten, so dass Messungen ein bis wenige Male pro Tag völlig ausreichen.

Den Hintergrund für die Untersuchungen stellten Überlegungen zu den physikalischen Vorgängen in einem gealterten, mit Abbauprodukten angereicherten Isolieröl dar. Das Phänomen der Bildung von Gasblasen durch eine Teilentladung und die Zündung von Folgeentladungen in kurzen Zeitabständen im Innern dieser gasgefüllten Hohlräume wurde bereits in der Literatur beschrieben [Pom05, Pom06]. Als Arbeitsansatz wird ein Zusammenhang mit der Konzentration kurzzeitiger, flüchtiger Abbauprodukte erwartet, da diese bevorzugt verdampfen bzw. bereits als Mikroblasen vorliegen.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Versuch unternommen, Teilentladungsmessungen basierend auf dem beschriebenen Verhalten auszuwerten und so Informationen über den Grad der Alterung und/oder über die enthaltene Feuchtigkeit zu erhalten. Es werden einige Möglichkeiten zur Darstellung der Messdaten vorgestellt und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft diskutiert.

3.2 Messverfahren

Abb. 3.1 zeigt den Aufbau des für die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen verwendeten TE-Mess- und Erfassungssystems. Das System besteht aus

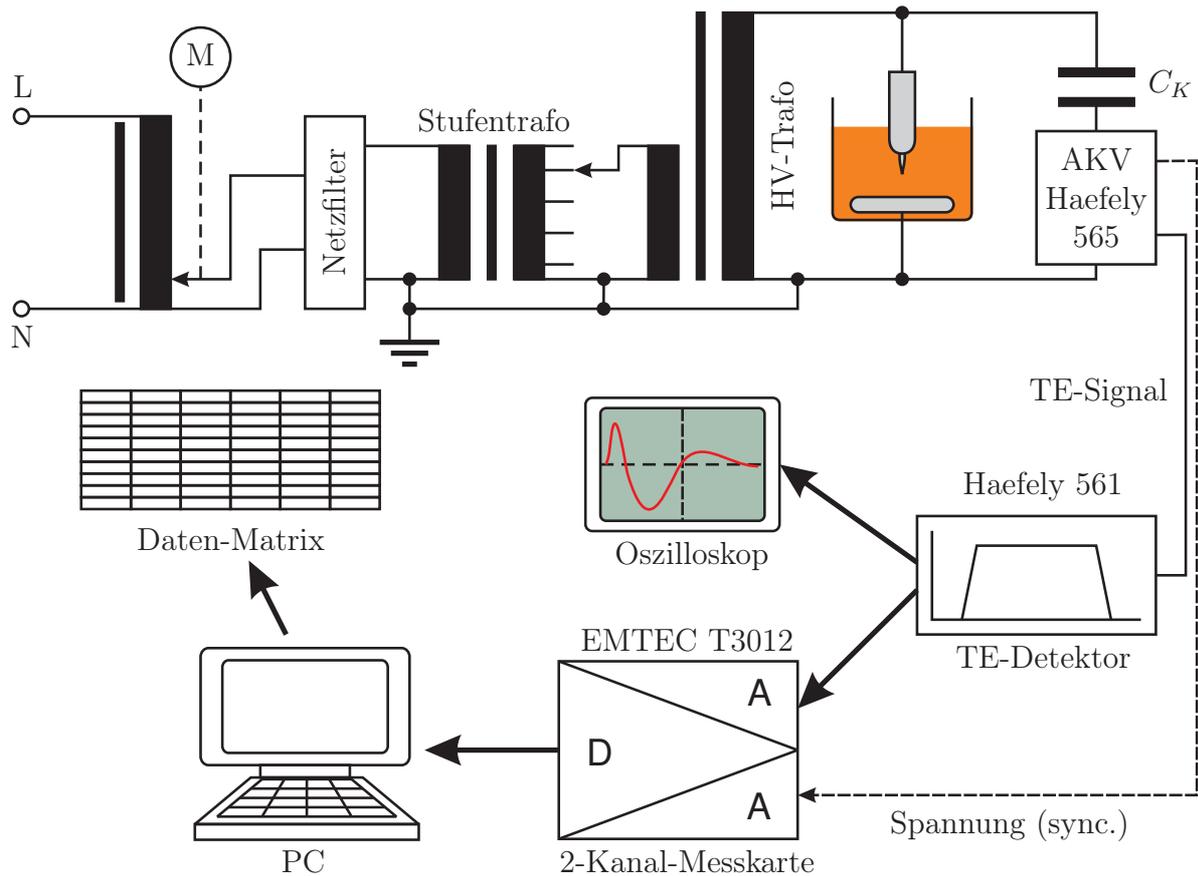


Abb. 3.1: Teilentladungs-Messsystem mit Spannungsversorgung, Messkreis und Messwerterfassungssystem

- Spannungsversorgung, die sich aufteilt in
 1. Hochfahreinrichtung aus einem Spar-Stelltransformator, der über einen Schrittmotor gesteuert wird
 2. Netzfilter
 3. Stufentransformator zur Einstellung des Maximalwertes für die Prüfspannung
 4. Hochspannungs-Prüftransformator 100 kV / 220 V, 10 kVA
- Messkreis mit Prüfling, Koppelkondensator und Ankopplungsvierpol
- Teilentladungsdetektor
- Anzeigegerät (Oszilloskop) zur direkten Visualisierung der Ereignisse
- Analog-Digital-Wandlerkarte, die simultan TE-Signal und Spannung am Prüfling digitalisiert
- Auswertung der digitalisierten Daten

Die Messung von Teilentladungen in Isolierflüssigkeiten wird im Regelfall mit einer geeigneten, ausreichend inhomogenen Elektrodenanordnung durchgeführt. Für die im Rahmen

der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen kamen Messzellen mit einer Spitze-Platte-Konfiguration zum Einsatz (s. Abschnitt 3.4.1). Als Spitzenelektrode wurden handelsübliche Nähnadeln aus Edelstahl (Schaftdurchmesser 0,7 mm, Spitzenform mittels Mikroskop selektiert) verwendet. Der Elektrodenabstand ist sinnvollerweise derart zu wählen, dass sich ein größtmöglicher Abstand zwischen Teilentladungs-Einsatz- und Durchschlagspannung ergibt, wobei gleichzeitig die anzulegende Prüfspannung, die ja über der TE-Einsatzspannung liegen muss, nicht zu hoch sein sollte.

Das für die Untersuchungen verwendete Teilentladungsmesssystem Haefely 561 wurde für die Messungen im begrenzt breitbandigen Modus betrieben mit Grenzfrequenzen von 40 und 400 kHz. Diese Methode erlaubt einerseits die Digitalisierung der TE-Ereignisse mit einer relativ geringen Samplingrate von 5 MS/s, andererseits aber auch noch die Erfassung der Impulspolarität, die bei schmalbandigen Systemen verloren geht. Als Ankopplungsvierpol kam ein Haefely 565 zum Einsatz, die Kalibrierung bzw. Normalisierung wurde mit einem TE-Kalibrator Haefely 451 durchgeführt.

Der verwendete Koppelkondensator besitzt eine Kapazität von $C_K = 250$ pF. Der Ankopplungsvierpol war im Koppelkreis angeschlossen, um ihn weitgehend vor Überlastung bei Durchschlägen des Prüflings zu schützen. Da die Stromrichtung im Koppelzweig in Bezug auf den Prüflingszweig umgekehrt ist, müssen alle gemessenen Amplitudenwerte für die Auswertung mit -1 multipliziert werden.

Die Aufnahme der Messdaten erfolgt über eine zweikanalige 12-Bit-A/D-Wandler-Karte (EMTEC T3012), die jedes getriggerte TE-Signal und synchron die Prüfspannung mit je 256 Punkten bei einer Abtastrate von 5 MS/s (also mit einer zeitlichen Auflösung von 200 ns) aufzeichnet. In dieser Konfiguration ist das Messfenster $51 \mu\text{s}$ breit bei einer Auflösung von 200 ns. Ein Messdatensatz besteht im Regelfall aus maximal 4096 TE-Ereignissen.

3.3 Auswertung von TE-Messdaten

Nach der Messung wird der Original-Messdatensatz, der jeweils die komplette Impulsform der TE-Ereignisse sowie den Verlauf der Prüfspannung enthält, auf eine Parametermatrix reduziert. Die Parameterliste, die ursprünglich keine Kurvenformparameter des erfassten TE-Signals enthielt, sondern nur die drei Parameter Amplitude I^1 , die aktuelle Spannung U und den Triggerzeitpunkt t (absolut, also bezogen auf den Beginn der Messung) [Hoo97], wurde im Laufe der Jahre zunächst durch die Amplitude des zweiten Maximums und die Zeitpunkte der beiden ersten Maxima bezogen auf den Triggerzeitpunkt auf sechs Werte pro Ereignis erweitert.

In einem weiteren Schritt kamen drei Zeitwerte hinzu, wobei der erste Wert den linear extrapolierten Anfang des eigentlichen TE-Signals vor dem Triggerzeitpunkt darstellte, während die beiden anderen die Zeitpunkte der ersten beiden Nulldurchgänge repräsentieren, jeweils bezogen auf den Triggerzeitpunkt [Ben08]. Für die Auswertung dieser nun neunspaltigen Parametermatrix wurde im Rahmen der vorgenannten Arbeit am Institut WED der Universität Siegen eine Software entwickelt, die eine flexible und gleichzeitig schnelle und übersichtliche Auswertung der Messdaten erlaubt.

¹Das Symbol I steht für die „Intensität“ der Entladung und soll primär darauf hinweisen, dass es sich bei den angegebenen Werten *nicht* um Ladungen handelt, sondern um Äquivalenzwerte, auch wenn sie in der Einheit pC angegeben werden

Der Grund für die Einführung des extrapolierten Beginns des eigentlichen Signals lag darin, dass der Amplitudenwert zum Triggerzeitpunkt nicht Null ist, sondern dem Wert der Triggerschwelle entspricht. Dies führt dazu, dass bei Signalen mit kleineren Amplituden die Zeitpunkte der Maxima und Nulldurchgänge scheinbar zu kleineren Werten hin verschoben werden, da diese Zeitwerte grundsätzlich auf den Triggerzeitpunkt bezogen angegeben werden. Ein Signal, dessen erstes Maximum einen Amplitudenwert besitzt, der nur geringfügig über der Triggerschwelle liegt, erhält so einen sehr geringen Zeitwert. Die Extrapolation sollte vergleichbare Nullpunkte für alle Signale schaffen, was speziell bei Messungen mit sehr großer Bandbreite der Impulsamplituden sinnvoll ist. Alternativ zu einer echten grafischen Extrapolation ist auch eine einfache Anpassung anhand des Verhältnisses der Amplitude des ersten Maximums zur Triggerschwelle möglich.

Bei Messungen in Isolierölen treten im Regelfall weniger große Unterschiede bei den Amplituden auf. Außerdem sind die Signalamplituden im Regelfall deutlich höher als die Triggerschwelle, so dass der beschriebene Effekt meist vernachlässigbar ist. Auch ist die bislang angewandte Methode zur Ermittlung der Nullpunkte nicht sehr zuverlässig, so dass sich nur in bestimmten Fällen eine deutliche Verbesserung der Auswertung ergab. Der extrapolierte Nullpunkt wurde dementsprechend bei der Weiterentwicklung des Auswerteverfahrens nicht mehr berücksichtigt und aus der Parameterliste gestrichen.

Die Parameterliste wurde schließlich noch durch Hinzunahme von Amplitude und Zeitpunkt des dritten Maximums sowie vom Zeitpunkt des Nulldurchgangs nach dem dritten Maximum erweitert. Letztendlich kamen noch die Flächen unter den drei Maxima (also jeweils zwischen den Nulldurchgängen) hinzu, wodurch aktuell standardmäßig 14 Parameter zur Auswertung verfügbar sind:

- I_1, I_2, I_3 : Amplituden der ersten drei Peaks
- t_1, t_2, t_3 : Zeitpunkte der Peaks bezogen auf den Triggerzeitpunkt
- t_4, t_5, t_6 : Zeitpunkte der Nulldurchgänge nach den Peaks
- A_1, A_2, A_3 : Flächen unter den Peaks (zwischen je zwei Nulldurchgängen)
- U : Momentanwert der Prüfspannung zum Triggerzeitpunkt
- t : Zeitpunkt des TE-Ereignisses (Triggerereignis) bezogen auf den Beginn der Messung

Diese Parameter gestatten eine detaillierte Differenzierung von TE-Ereignissen, speziell anhand ihrer Kurvenform. Abb. 3.2 zeigt die Kurvenformparameter anhand eines Beispielsignals.

Die Konvertierung der Originalmessdaten von der A/D-Wandler-Karte, die in einem proprietären Binärformat gespeichert werden, in eine zur allgemeinen Weiterverarbeitung geeignete ASCII-Matrix geschieht mit einem MATLAB-Skript. Frühere Versionen dieses Skripts, die noch auf die sechs- bzw. neunspaltige Matrix zugeschnitten waren, führten lediglich eine sehr einfache Auswertung durch. Als Amplituden der beiden ersten Maxima wurden der jeweils höchste positive und negative Wert des gesamten Kurvenverlaufs übernommen, wobei das zuerst aufgetretene den Index 1 erhielt, was bei verzerrten Signalen oder mehreren TE in einem $51 \mu\text{s}$ -Messfenster oft zu Problemen bei der Auswertung führte.

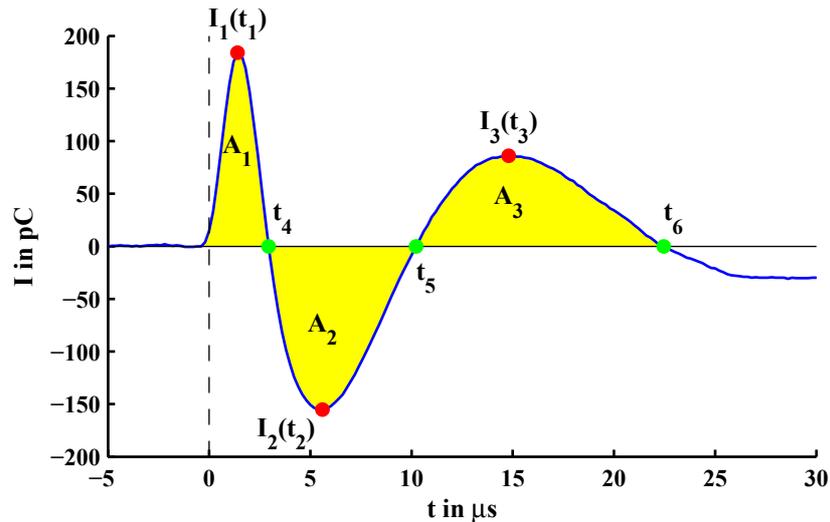


Abb. 3.2: Parameter für die Auswertung der Kurvenform von Teilentladungssignalen

Die aktuelle Version des Konvertierungsskripts führt eine vollständige Analyse der Kurve bis zum dritten Nulldurchgang durch, wodurch alle Werte korrekt ermittelt werden. Nachteilig ist dabei nur, dass eventuell auftretende TE-Ereignisse im selben Messfenster jetzt gar nicht mehr berücksichtigt werden, was vormals wenigstens noch durch die Abweichungen der Zeitwerte ansatzweise möglich war. Allerdings liegen bei Teilentladungen in Öl die Zeitabstände zwischen einzelnen TE-Ereignissen erfahrungsgemäß entweder im einstelligen μs -Bereich (Bursts) oder aber mindestens in der Größenordnung der Periodendauer der Prüfspannung, so dass die Wahrscheinlichkeit für getrennt erfassbare Ereignisse in einem Messfenster ohnehin sehr gering ist.

Nachteilig am verwendeten System ist das Fehlen einer Erfassung der Nulldurchgänge der Prüfspannung. Die Messkarte erfasst lediglich eine absolute Zeit bezogen auf den Beginn der Messung, also auf das erste aufgetretene Trigger-Ereignis. Vom Triggerzeitpunkt an werden dann beide Kanäle mit der eingestellten Punktzahl abgetastet. Möchte man die Phasenlage der TE-Ereignisse auswerten, so ist dies nicht ohne weiteres möglich.

Das ursprünglich verwendete Messsystem [Hoo97] besaß einen Periodenzähler, der als Triggerzeitpunkt t jeweils die Periodennummer und den Zeitwert bezogen auf die aktuelle Periode ablegte, so dass eine präzise Ermittlung der Phasenlage möglich war. Diese Möglichkeit bietet das im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete System nicht, was auch dadurch bedingt sein dürfte, dass es ursprünglich nicht für Teilentladungsmessungen vorgesehen ist.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Phasenlage ohne Periodenzähler bzw. Nulldurchgangserfassung ist eine Interpolation des Spannungsverlaufes und damit eine Rekonstruktion der Kurvenform einschließlich der Nulldurchgänge. Bei längeren Messungen können sich jedoch systematische Abweichungen der berechneten Phasenlagen durch Schwankungen der Netzfrequenz ergeben, wodurch sich eine entsprechende Verschiebung der Nulldurchgänge gegenüber der erfassten Systemzeit ergibt. Eine abschnittsweise Analyse der Messdaten durch Aufteilung des Datensatzes in Bereiche mit einigermaßen konstanter Netzfrequenz kann hier Abhilfe schaffen. Für eine Rekonstruktion ist jedoch eine gewisse Anzahl an Messpunkten pro Periode erforderlich, die bei Messungen in Isolierölen praktisch nie gegeben ist.

Eine präzise Erfassung der Nulldurchgänge der Prüfspannung durch die Einführung ei-

nes periodenbezogenen Zeitstempels, wie es bei der Erstversion nach [Hoo97] realisiert war – bestehend aus Periodennummer und Zeitpunkt ab Periodenbeginn – ist für die Zukunft wünschenswert. Ein am Institut WED entwickeltes Low-Cost-TE-Erfassungssystem [Ber03] sollte diese Erfassung implementieren. Jedoch ist dieses System bislang nur als eingeschränkt funktionsfähiger Prototyp verfügbar. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit lag auf der Entwicklung neuer Auswerteverfahren, speziell auf Basis der Signalform, weshalb eine Weiterentwicklung des genannten Systems nicht erfolgte.

Die Nulldurchgänge der TE-Signale werden interpoliert, so dass speziell bei Darstellungen der Flächen keine nennenswerten Digitalisierungsartefakte auftreten, was ansonsten besonders bei A_1 aufgrund der großen Steilheiten der Verläufe zu nennenswerten Abweichungen führt. Eine Interpolation der Maxima wurde nicht implementiert, da deren Bestimmung unkritischer ist als die der Lage der Nulldurchgänge. Die Bestimmung der Flächen A_1 - A_3 erfolgt im gleichen Arbeitsgang wie die Ermittlung der anderen Parameter durch Aufaddieren der Amplitudenwerte und abschließende Multiplikation mit dem Zeitinkrement.

Da die Daten von der Messkarte als Spannungswerte erfasst werden, muss zur Auswertung der Messdaten der Kalibrierungs- bzw. Normalisierungswert (i.d.R. in pC/V) bekannt sein. Die Amplitudenwerte liegen zwar im Original auch nur in Form von Spannungen vor, jedoch wird für die Darstellung die Umrechnung in die in der Literatur üblicherweise angegebene Ladung durchgeführt, da diese anschaulicher ist. Die angegebenen Werte haben zwar physikalisch keinen direkten Bezug zur Gesamtladung, speziell bei durch Folgeentladungen verzerrten Ereignissen, jedoch erhält man durch die Normalisierung mit bekannter Ladung vergleichbare Amplitudenwerte, auch bei unterschiedlichen Verstärkungs-Einstellungen am TE-Detektor.

Die Kalibrierung wird im Regelfall durchgeführt, indem man mit einer vorgegebenen Ladung die Feineinstellung der Verstärkung des TE-Detektors derart abgleicht, dass sich für die Amplitude des Ausgangssignals ein bestimmter Wert ergibt. Dieser Wert sollte möglichst für alle Messungen gleich sein, damit sich ohne eine Änderung der Triggerschwellen der Messkarte die gleiche Auflösung für alle zu vergleichenden Messungen ergibt.

3.3.1 Pulsfolgenanalyse (*Pulse Sequence Analysis, PSA*)

Die Pulsfolgenanalyse [Hoo97, Pat02a, Pat03b, Pat03c, Ben04, Ben06, Ben07] ist ein Auswerteverfahren für Teilentladungsdaten unter Berücksichtigung von Korrelationen aufeinander folgender TE-Ereignisse. Dabei werden anstelle der üblicherweise verwendeten absoluten Parameter wie Phasenlage und Momentanspannung zum Zeitpunkt des Auftretens relative Größen herangezogen. Diese ergeben sich durch Differenzbildung zwischen den Werten für aufeinanderfolgende Ereignisse.

Die Pulsfolgenanalyse zeigt deutlich den Einfluss von Raumladungen auf, die sich durch die Spannungsbelastung oder als Folge von Teilentladungen bilden und die die lokalen Feldverhältnisse an der Fehlerstelle beeinflussen. Sind die Zeitkonstanten des Raumladungsabbaus ausreichend lang, dann werden nachfolgende Teilentladungen an der selben Fehlerstelle durch die Restladungen beeinflusst, was je nach Prozess zu einer verzögerten oder (bei zwischenzeitlichem Polaritätswechsel des äußeren Feldes) verfrühten Zündung der jeweils nächsten Entladung an der Fehlerstelle führen kann.

Diese durch Raumladungen bedingten Effekte können dazu führen, dass die TE-Ereignisse von einer Periode der extern anliegenden Spannung zur nächsten in der Phasenlage ver-

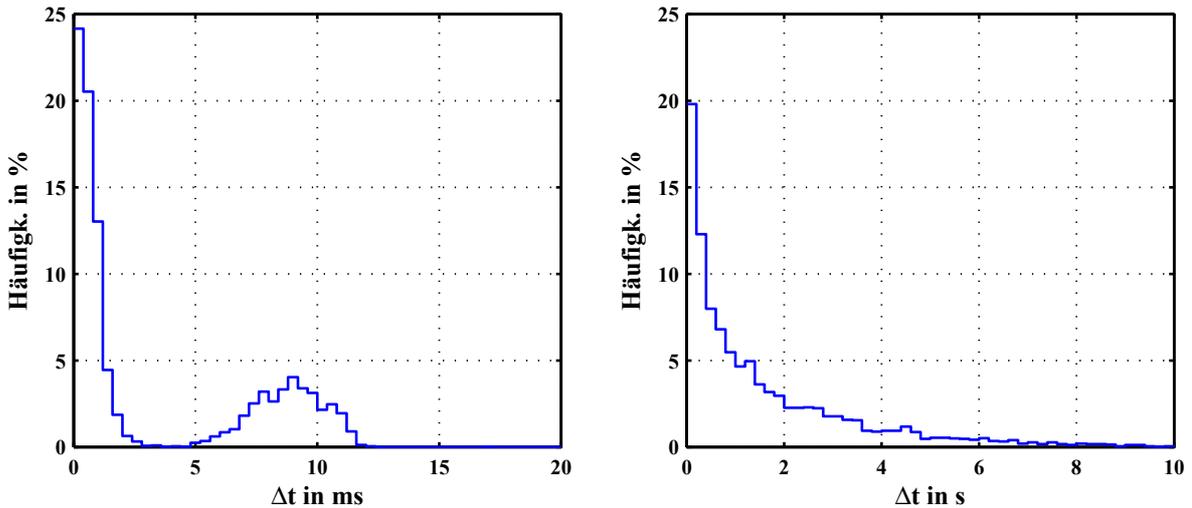


Abb. 3.3: Verteilung der Zeitabstände Δt aufeinander folgender TE am Beispiel einer Feststoffisolierung (Lackdraht-Wicklung, links) und eines Transformator-Öls, jeweils 50 Klassen

schoben werden. In den klassischen $\Phi - Q$ ($-n$)-Darstellungen von Phasenlage und Ladung (bzw. Amplitude des TE-Signals) führt das zu einer breiten, statistisch anmutenden Verteilung der Phasenlagen, während eine Darstellung der Zeit-*Abstände* oder der Spannungs-*Differenzen* oft eine sehr geringe Streuung aufweist und sehr definierte Gruppen zeigt.

Durch die Auswertung ist es in gewissem Maße möglich, mehrere gleichzeitig aktive Fehlstellen zu separieren, indem man die Tatsache ausnutzt, dass TE-Ereignisse von unterschiedlichen Fehlstellen keine Korrelation untereinander zeigen. Mit Hilfe von Korrelations-Diagrammen lassen sich Gruppen von Ereignissen bestimmten Fehlstellen und auch bestimmten Fehlstellentypen zuordnen [Hoo97, Ber03]. Für unterschiedliche Fehlstellenarten in Feststoffisolierungen wurden Fingerprints beschrieben, die eine schnelle Identifizierung z.B. von Hohlraum- und Oberflächen-Entladungen sowie Electrical Treeing in unterschiedlichen Stadien ermöglichen [Hoo97].

In flüssigen Isolierstoffen können sich i.d.R. keine ortsfesten Raumladungen mit ausreichend langen Zeitkonstanten bilden. Teilentladungen treten hier im Regelfall statistisch auf [Maz92, Deb99], wobei für die Entstehung einer Teilentladung das Vorhandensein eines Startelektrons entscheidend ist, welches wiederum durch äußere Einflüsse gegeben ist. Deshalb ist die Pulsfolgenanalyse in diesem Fall meist nicht sinnvoll anwendbar. Auch die Zeitabstände zwischen aufeinanderfolgenden TE sind bei Messungen in Ölen oft vergleichsweise groß und liegen nicht mehr in der Größenordnung der Periodendauer der Prüfspannung, wie es in Feststoffisolierungen oft der Fall ist.

Abb. 3.3 zeigt eine Gegenüberstellung der Verteilungen der Zeitabstände Δt aufeinander folgender TE-Ereignisse anhand zweier typischer Beispiele (man beachte die unterschiedliche Skalierung der Δt -Achsen!). Bei einer Feststoffisolierung (linkes Diagramm, Lackdrahtwicklung einer rotierenden Maschine mit Zwickelraumentladungen, s. auch [Ben08]) existieren definierte Abstände im Bereich der Periodendauer der Prüfspannung und darunter, in diesem Fall eine Gruppe um 9 ms und eine andere bei Werten kleiner als 2 ms.

Das Öl hingegen zeigt eine stochastische Verteilung (näherungsweise exponentieller Abfall

der Häufigkeiten) bis hin zu sehr langen Zeiten in der Größenordnung einiger Sekunden. Es ist naheliegend, dass im Falle des Öls nur eine Aussage über die mittlere Impulsrate möglich ist, nicht jedoch über Sequenzen mit gegenseitiger Beeinflussung der Ereignisse untereinander. In einigen Ölproben wurden allerdings unter bestimmten Randbedingungen in gewissem Maße TE-Sequenzen mit Zeitabständen im Millisekunden-Bereich gefunden. Bei Proben mit vergleichsweise hohem Wassergehalt treten TE ebenfalls mit Zeitabständen in der Größenordnung der Periodendauer der Netzspannung auf (s. Abschnitt 3.4.6.7).

3.3.2 Pulsformanalyse (*Pulse Shape Analysis*)

Die Pulsformanalyse [Pat02b, Ber03, Pat03a, Ben05, Ben08] betrachtet die Form des Signals, das der TE-Detektor ausgibt. Im Falle der für die vorliegende Arbeit verwendeten begrenzt breitbandigen Messanordnung formt ein Bandpassfilter mit einem Frequenzbereich von 40–400 kHz das Signal. Die Form des Signals hängt von unterschiedlichen Parametern ab, die u.a. durch das verwendete Messsystem gegeben sind [Kön93]. Zusätzlich können in räumlich ausgedehnten Prüfobjekten z.B. Reflexionen und Kopplungen, bei sehr ausgedehnten Objekten auch Laufzeiten, zu unterschiedlichen Impulsformen führen.

Für die Pulsformanalyse kommen die in der Parametermatrix aus Abschnitt 3.3 abgelegten Kurvenformparameter zum Einsatz. Bestimmte Parameter und ihre Kombinationen wie z.B. das Verhältnis I_2/I_1 der Amplituden der beiden ersten Maxima oder ihre Zeitabstände $t_2 - t_1$ sind schon länger als aussagekräftig bekannt [Pat04a, Pat06b]. Darauf aufbauend wurden weitere Parameter und Parameterkombinationen gesucht, die eine Differenzierung von Ölen mit unterschiedlichen Eigenschaften ermöglichen [Pat08c].

Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Optimierung der Beschreibung der Kurvenform von TE-Signalen mit möglichst wenigen aussagekräftigen Parametern. Dadurch soll die Möglichkeit gegeben werden, auch bei Messungen an Objekten, bei denen die Puls-Sequenz-Analyse als Hilfsmittel ausscheidet, eine möglichst detaillierte Zustandsbewertung des Isoliermediums zu erhalten.

In Isolierflüssigkeiten führen nach verschiedenen Untersuchungen durch die Teilentladungen selbst gebildete Gasblasen im Öl zu Folgeentladungen mit Abständen von bis zu einigen Mikrosekunden [Pom05, Pom06]. Diese Folgeereignisse sind mit einem Messsystem mit entsprechend hoher Bandbreite als Einzelereignisse direkt nachweisbar. Mit dem für die vorliegenden Untersuchungen verwendeten begrenzt breitbandigen System mit einer oberen Grenzfrequenz von 400 kHz treten aufgrund der Folgeentladungen Überlagerungen von mehreren Impulsantworten auf, die sich als Verzerrung der Systemantwort gegenüber derjenigen eines echten Einzelereignisses auswirken.

Abb. 3.4 und 3.5 zeigen eine Auswahl von in Transformatorölen gemessenen Signalverläufen, die mit unterschiedlichen Elektrodenabständen ermittelt wurden. Die Länge der Zeitachse beträgt jeweils $t = 30 \mu\text{s}$. Das Signal oben links in Abb. 3.4 wurde zum Vergleich durch einen Kalibrierimpuls erzeugt.

Es ist erkennbar, dass bei größerem Elektrodenabstand stärkere Verzerrungen auftreten, offenbar verursacht durch mehrere Folgeentladungen, die auch mehr als $5 \mu\text{s}$ nach dem ursprünglichen Impuls, also im Bereich des ersten Nulldurchgangs des Gesamtsignals und danach, auftreten können. Die Ursache dafür liegt vermutlich in der größeren Impulsenergie bei größerem Elektrodenabstand (und damit höherer Spannung), so dass die sich bildenden Gasblasen größer werden. Durch das Auftreten der Folgeentladungen in einem Bereich, in

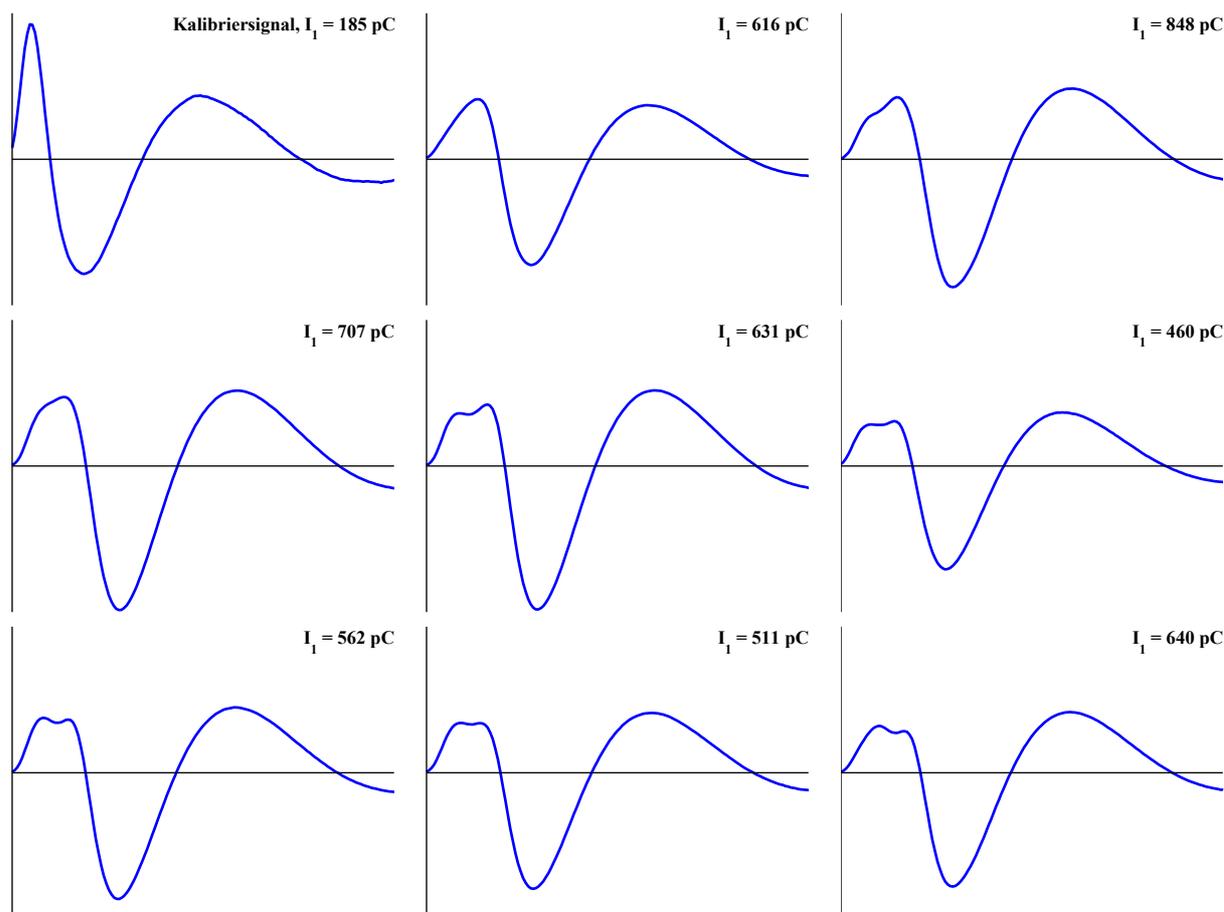


Abb. 3.4: Beispiele für in Ölen mit einem Elektrodenabstand von 10 mm gefundene Impulsformen, Abszisse jeweils 0 bis $30 \mu\text{s}$

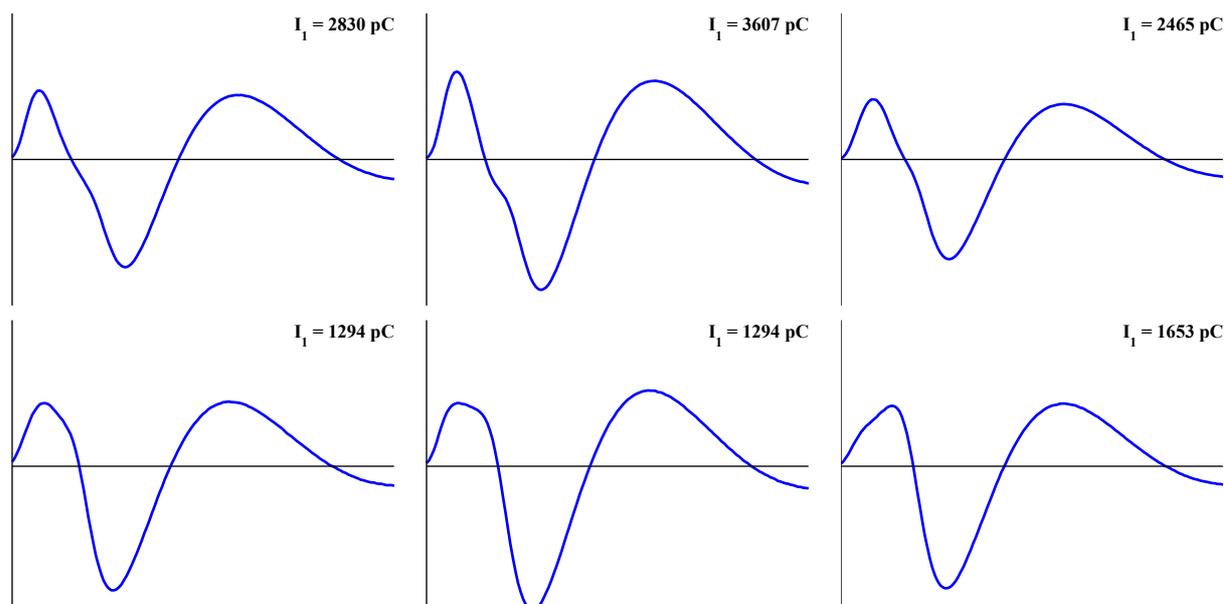


Abb. 3.5: Beispiele für in Ölen mit einem Elektrodenabstand von 15 mm gefundene Impulsformen, Abszisse jeweils 0 bis $30 \mu\text{s}$

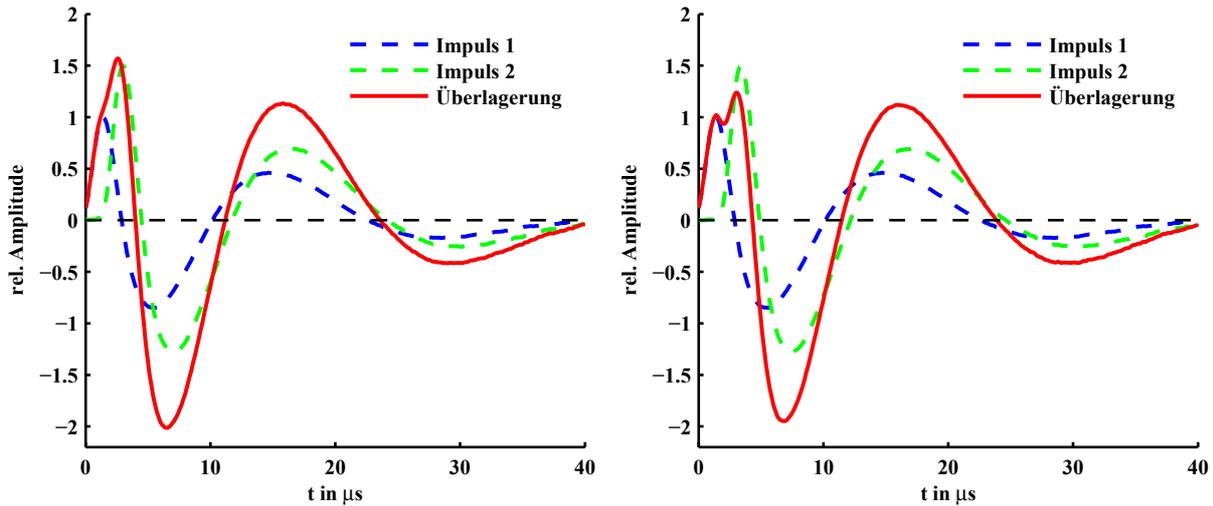


Abb. 3.6: Überlagerung von TE-Impulsen durch den Bandpassfilter, Zeitabstand der Einzelimpulse $1,6 \mu\text{s}$ (links) und $2 \mu\text{s}$, das Amplitudenverhältnis zweiter Impuls zu erstem beträgt $1,5$

dem das Ursprungssignal eine relativ große Steigung aufweist, sind die Verzerrungen bei Betrachtung des Signalverlaufes oft nicht so offensichtlich wie bei kleineren Elektrodenabständen, jedoch schlägt sich die Änderung in den Kurvenformparametern nieder, wie später noch gezeigt wird.

Grundsätzlich kann der Bandpass des TE-Detektors als ein im Aussteuerbereich lineares System angesehen werden, für das das Überlagerungsprinzip gilt. Das bedeutet, dass das Ausgangssignal die Summe der Systemantworten aller Eingangssignale darstellt. Treten z.B. TE-Ereignisse in zeitlichen Abständen auf, die geringer sind als die Abklingzeit der Impulsantwort, dann kommt es zu einer additiven Überlagerung ihrer Impulsantworten.

Abb. 3.6 links zeigt eine Überlagerung zweier TE-Ereignisse, von denen das zweite $1,6 \mu\text{s}$ nach dem ersten auftritt und die $1,5$ -fache Amplitude des ersten besitzt. Als Ausgangsimpuls wurde die Impulsantwort eines Kalibriersignals verwendet, das keine Verzerrungen durch Mehrfachereignisse aufweist. Das Ergebnis entspricht einer Impulsform, die bei Messungen in Isolierölen sehr häufig beobachtet wird.

Im Unterschied zum Originalsignal, bei dem das Verhältnis $|I_2/I_1|$ ziemlich genau $0,8$ beträgt, ist dieses bei der Überlagerung bereits deutlich größer als 1 . Verschiebt man den Folgeimpuls zu späteren Zeiten (hier $2 \mu\text{s}$), dann ergibt sich der in Abb. 3.6 rechts gezeigte Verlauf. Im Bereich des ersten Maximums fällt eine Einsattelung auf, die dadurch entsteht, dass der Folgeimpuls hier erst deutlich nach dem Maximum des ersten Impulses auftritt. In diesem Beispiel, das ebenfalls bei realen Messungen speziell in stärker gealterten Ölen recht häufig beobachtet wird (s. Abb. 3.4 und 3.5), ist nicht nur I_2 betragsmäßig deutlich größer als I_1 , auch I_3 kommt in die Größenordnung von I_1 .

Es ist auch gut erkennbar, dass sich durch die Überlagerung der erste Nulldurchgang des Signals deutlich nach hinten verschiebt, was zu einer Vergrößerung des Parameters t_4 führt. Dieses Phänomen kann zur Selektierung herangezogen werden und erlaubt je nach Messdaten eine grobe Klassifizierung.

Abb. 3.7 zeigt weitere Beispiele für unterschiedliche Impulsformen. Ähnliche Signale wurden bei realen Messungen gefunden und wurden hier jeweils durch Überlagerung zweier

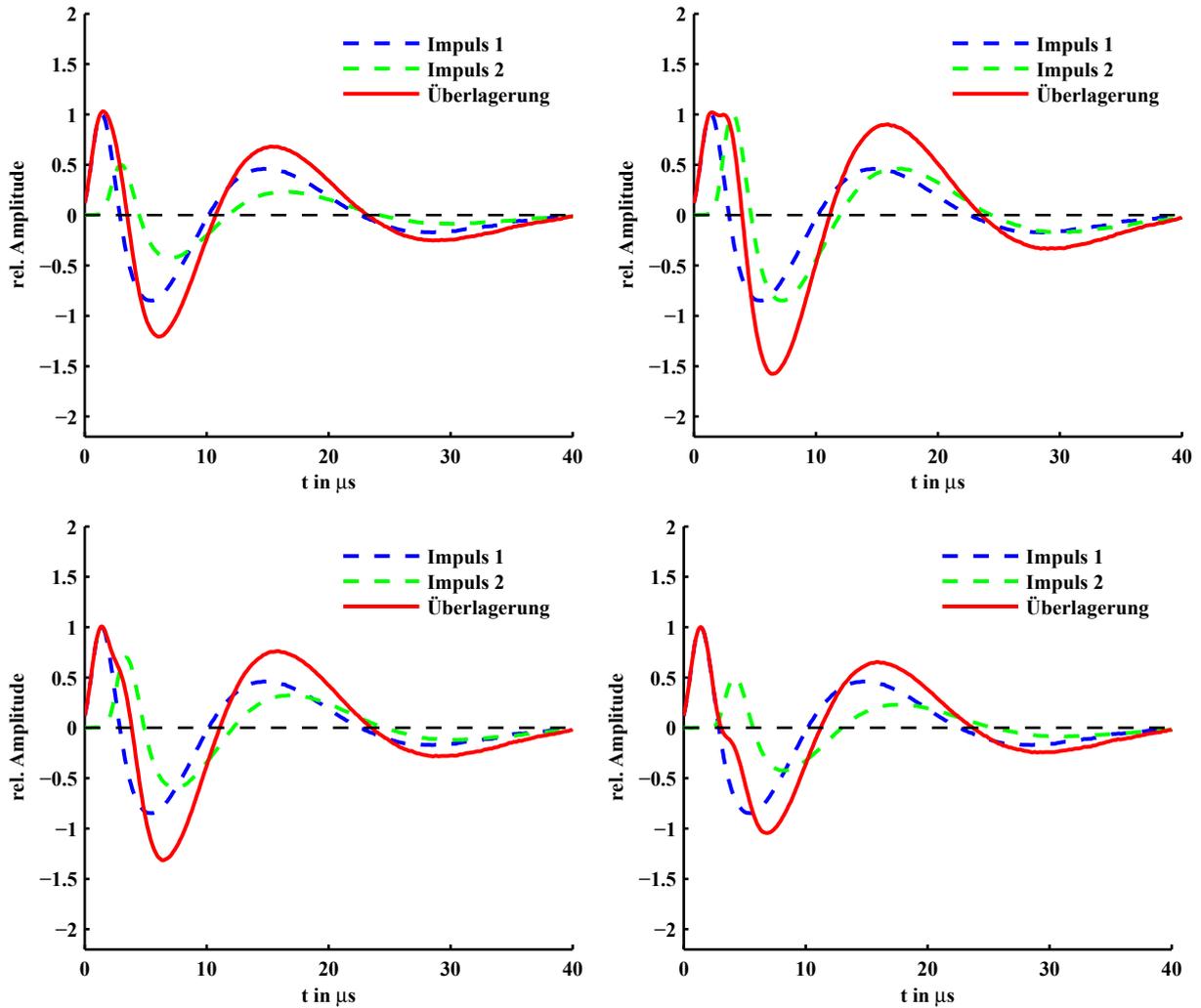


Abb. 3.7: Weitere Beispiele für Rekonstruktionen von bei Messungen aufgetretenen Überlagerungseffekten mit unterschiedlichen Zeitverschiebungen und Amplitudenverhältnissen

unverzerrter Impulse rekonstruiert. Bei Formen, die sich mit großen Zeitverzögerungen ergeben, also solche mit relativ späten Folgeentladungen, besitzt der Folgeimpuls offensichtlich eine kleinere Amplitude als bei den Beispielen in Abb. 3.6. Impulse mit größeren Amplituden würden bei derartigen Zeitabständen zu Einsattelungen führen, die jedoch in realen Messdatensätzen nicht beobachtet wurden.

Dieses Verhalten, auf das in Abschnitt 2.4.6 noch näher eingegangen wird, deutet darauf hin, dass die Amplituden von Folgeentladungen mit steigender Zeitverzögerung kleiner werden. Offenbar spielt hier eine – möglicherweise statistisch variierende – Zündverzugszeit eine Rolle. Die Amplitude der Folgeentladungen hängt vermutlich vom Zustand der durch die erste Entladung gebildete Gasblase zum Zeitpunkt der Zündung zusammen.

Die in Abb. 3.6 und 3.7 gezeigten „Rekonstruktionen“ basieren jeweils auf nur einer Folgeentladung, deren Amplitude in der gleichen Größenordnung liegt wie die des initialen Ereignisses. In der Realität treten möglicherweise Sequenzen von mehreren Folgeereignissen auf, worauf auch die Untersuchungen in [Pom05, Pom06] hindeuten. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen ergaben jedoch keine Hinweise darauf,

dass Verzerrungen durch zusätzliche, kleinere Ereignisse zu weiteren nennenswerten Verzerrungen der Signalform führen, was unter anderem durch die Verwendung eines anderen Elektrodenabstandes und einer geringeren Prüfspannung als der in der Literatur angegebenen bedingt ist.

Mehrere kleinere Folgeentladungen können jedoch durchaus zu Änderungen der Signalform führen, die nicht direkt als Verzerrungen erkennbar sind. Diese schlagen sich dann in Details des Kurvenverlaufs nieder, die z.B. zu kleineren Veränderungen im Amplitudenverhältnis führen können, was speziell für Folgeentladungen, die im Bereich vor dem ersten Maximum auftreten, zutrifft.

Es ist festzustellen, dass offenbar das Amplitudenverhältnis zwischen Initial- und Folgeentladung von der Elektrodengeometrie abhängt. Sind bei den bei einem Elektrodenabstand von $d = 10$ mm gemessenen Verläufen die Folgeentladungen – zumindest nach der vorstehenden „Modellierung“ – im Regelfall größer als die Initialimpulse, so ergeben sich speziell für die Signalformen mit relativ späten Folgeentladungen, die praktisch ausschließlich bei $d = 15$ mm beobachtet wurden, andere Verhältnisse. Insgesamt sind die Amplituden der Signale bei größerem Elektrodenabstand erheblich größer (s. Abb. 3.4 und 3.5).

Grundsätzlich sind die vorgestellten Auswertungen nicht nur auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen an Isolierölen anwendbar, sondern selbstverständlich auch für Messdaten von anderen Prüflingen. Auch bei Feststoffisolierungen treten Verzerrungen der Kurvenform auf [Ber03, Ben08], die zwar auf anderen physikalischen Gegebenheiten beruhen, die jedoch ebenfalls anhand der betrachteten Kurvenformparameter analysierbar sind.

3.3.3 Darstellung von Parametern und Parameterkombinationen

Einzelne Parameter der Messdatensätze können u.U. bereits eine grobe Klassifizierung einer Probe gestatten. Meist sind jedoch Auftragungen mehrerer Parameter gegeneinander bzw. die Bildung von Parameterkombinationen – Verhältnisse oder Differenzen – wesentlich aussagekräftiger.

Streudiagramme: Klassische Streudiagramme (Scatter Plots) sind einfach zu erstellen und zur Visualisierung von Daten, die in Punktform vorliegen, ideal geeignet, wenn es bei der Darstellung nicht auf die Reihenfolge der Ereignisse ankommt.

Insbesondere zur Visualisierung von Korrelationen unterschiedlicher Parameter oder aufeinander folgender TE-Ereignisse sind Streudiagramme hervorragend geeignet. Werden, entgegen dem üblichen Verfahren, jeweils Parameter aufeinander folgender Ereignisse n und $n+1$ gegeneinander aufgetragen, so treten bestehende Korrelationen – verursacht durch die Beeinflussung eines Ereignisses durch das vorangegangene Ereignis – in solchen Diagrammen sehr ausgeprägt auf. Nicht korrelierte Parameter bzw. Ereignisse führen zu zufälligen Verteilungen.

Histogramme: Für eine Analyse der Häufigkeit des Auftretens einzelner Parameter bzw. Parameterkombinationen sind Histogramme eine sinnvolle Möglichkeit. Dazu wird der Parametersatz in Klassen fester Breite aufgeteilt, in denen die Anzahl der Ereignisse abgelegt wird, deren Zahlenwerte innerhalb der Klassengrenzen liegen.

Bei einer solchen Darstellung kommt es bei ungünstiger Wahl der Klassenbreiten zu Aliasing-Effekten, speziell bei Werten, die stark diskretisiert sind. Die Wahl der

Klassenbreite ist dementsprechend der Art und dem Wertebereich der darzustellenden Größe anzupassen. Eine Vergleichbarkeit von Histogrammdarstellungen ist trivialerweise grundsätzlich nur bei gleicher Klassenbreite gegeben.

Bei Histogrammdarstellungen von Werten, die eine gewisse Diskretisierung aufweisen, kommt es häufig vor, dass sich durch die Wechselwirkung aus fester Klassenbreite und den Digitalisierungsintervallen eine kammartige Verteilung ergibt. In diesen Fällen ist die Klassenbreite an die Diskretisierung anzupassen.

Eine weitere Möglichkeit zur Verbesserung der Darstellung stellt ein „Aufweichen der Klassengrenzen“ dar. Dies kann z.B. geschehen, indem man jedem Ausgangswert eine Zufallszahl im Wertebereich (\pm halbe Klassenbreite) hinzuaddiert. Da die Werte dadurch lediglich statistisch auf jeweils aneinander grenzende Klassen verteilt werden, hat diese Vorgehensweise einer „Entdigitalisierung“ bzw. „Entdiskretisierung“ bei einer ausreichenden Anzahl von Werten keinen negativen Einfluss auf die Aussage der Darstellung, die statistischen Abweichungen bleiben gering. Dadurch werden die erwähnten Artefakte (Diskretisierungsfehler) vermieden.

Konturdiagramme / 3D-Darstellungen: Streudiagramme stoßen bei der Darstellung großer Datenmengen an Grenzen, da ab einer gewissen Dichte der dargestellten Punkte jegliche Information über die Dichte der Punkte (Anzahl in einem bestimmten Bereich) verloren geht. Prinzipiell ist es zwar möglich, z.B. durch (evtl. statistische, also zufällige) Reduktion der Datenmenge die Übersichtlichkeit zu erhöhen. Dies ist jedoch auch nur ein Behelf, der unter Umständen auch zu Informationsverlust führen kann. Da bei TE-Messdatensätzen die darzustellende Informationsmenge im Regelfall groß bis sehr groß ist, kann es sinnvoll sein, der klassischen Streudiagrammdarstellung eine dritte Dimension hinzuzufügen, in der die Dichte der Ereignisse dargestellt werden kann.

„Echte“ 3D-Darstellungen haben allerdings oft den Nachteil, dass sie durch die Projektion in eine Fläche schwer lesbar sind. Als Alternative im konkreten Fall der Darstellung der Ereignisdichte bieten sich Konturdiagramme an, bei denen die dritte Dimension in der einfachsten Form in Form von „Höhenlinien“ dargestellt wird. Diese Darstellung kann durch Füllen der Flächen innerhalb der Höhenlinien mit einer Farb- bzw. Graustufenskala noch anschaulicher gemacht werden.

Um aus der punktuellen Darstellung eine sinnvolle Kontur zu erstellen, ist es meist erforderlich, die Häufigkeitsmatrix (gewissermaßen ein Histogramm in der Ebene) zu glätten. Dazu kann eine einfache oder (bei geringeren Datenmengen meist sinnvoll) mehrfache Interpolation herangezogen werden. Außerdem ist es in vielen Fällen sinnvoll, eine Normierung auf die Gesamtzahl der TE-Ereignisse durchzuführen, um die Vergleichbarkeit von Datensätzen mit unterschiedlichen Datenmengen zu verbessern.

Sollen Darstellungen bestimmter gleicher Parameter von mehreren Datensätzen verglichen werden, dann sollten die Diagramme generell gleich skaliert sein, damit die Verhältnisse direkt sichtbar sind und keine falschen Eindrücke entstehen.

3.4 Messergebnisse

Zur Untersuchung standen Ölproben unterschiedlicher Herkunft zur Verfügung. Zu einigen Proben existierten zusätzlich Daten von chemischen Analysen. Auch wurden Proben

von am Institut WED vorhandenen Transformatoren untersucht, an denen auch Rückkehrspannungsmessungen durchgeführt wurden (s. Abschnitt 2.7 auf Seite 52).

3.4.1 Verwendete Messanordnungen

Für die Messung von Teilentladungen in Öl wurden Versuche mit unterschiedlichen Messanordnungen durchgeführt, wobei die verwendeten Nadeln jeweils vom gleichen Typ waren. Das Schema der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Elektrodenanordnung ist in Abb. 3.8 dargestellt. Wichtige Parameter sind neben Spitzenradius und Spitzenform der Nadel der Elektrodenabstand d und der Abstand d_s der Nadelspitze zum Ende des Nadelhalters, die die Inhomogenität der Anordnung mitbestimmen. Auch der Durchmesser d_h der Nadelhalterung spielt eine Rolle, besonders dann, wenn d_s in der selben Größenordnung liegt.

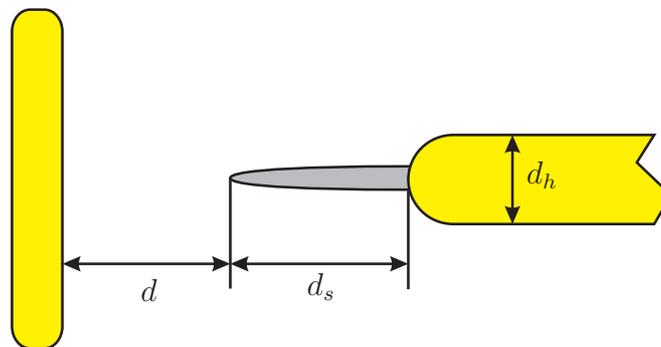


Abb. 3.8: Allgemeine Elektrodenanordnung für Teilentladungsmessungen in Isolierflüssigkeiten mit Nadel- und Plattenelektrode und Nadelhalterung

Der Durchmesser d_h der Nadelhalterung darf bei dieser Anordnung nicht zu klein sein und die Nadelhalterung muss mit in das zu prüfende Öl eintauchen, da sich bei den verwendeten Prüfspannungen ansonsten Teilentladungen oder, speziell im Falle von Messzellen, bei denen beide Prüfspannungsanschlüsse durch die Öffnung des Behälters herausgeführt sind, Durchschläge im Luftraum über dem Flüssigkeitsspiegel bilden können. Andererseits ist es sinnvoll, die Nadel möglichst weit aus der Halterung herausragen zu lassen, worauf im Folgenden noch näher eingegangen wird. Abb. 3.9 zeigt die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Messanordnungen, die im Folgenden beschrieben werden.

3.4.1.1 Messzelle MZ I

Die anfangs verwendete Anordnung (MZ I) bestand aus einer Teflon-Halterung mit einer eingesetzten Messing-Erdelektrode und einem Nadelhalter aus Messing mit verstellbarem Abstand zur Platte. Die Anordnung war zum Einsatz in einem handelsüblichen 1 l-Becherglas (niedrige Form) vorgesehen. Diese Variante hatte den Nachteil, dass der Anschluss der Platte (Erdanschluss) an der Seitenwand des Becherglases nach oben geführt werden musste, was den Bereich der Prüfspannung und damit des Elektrodenabstandes für störungsfreie Messungen einschränkte. Außerdem ist für eine Messung mit dieser Anordnung eine recht große Menge Öl erforderlich (mindestens 500 ml). Der Vorteil der MZ I ist die leichte Reinigung bzw. der einfache und schnelle Wechsel der Ölproben. Der



Abb. 3.9: Messzellen MZ I, II und III (von links)

Abstand d_s zwischen Nadelspitze und Ende der Nadelhalterung beträgt bei MZ I 12 mm, was dem Durchmesser der Halterung selbst entspricht.

3.4.1.2 Messzelle MZ II

Die Tatsache, dass von einigen der zur Verfügung stehenden Ölproben nur geringe Mengen vorhanden waren, führte zur Konstruktion einer zweiten Elektrodenhalterung (MZ II). Bei MZ II ist die Prüfstrecke im Gegensatz zu MZ I horizontal angeordnet. Wie MZ I ist auch sie für den Einsatz in Bechergläsern vorgesehen, allerdings für die Größe 250 ml (niedrige Form). Dadurch genügt eine Ölmenge von weniger als 200 ml für eine Messung. Die Erdplatte ist bei MZ II quadratisch mit verrundeten Ecken und Kanten ausgeführt. Der Nadelhalter ist in eine ebenfalls quadratische Teflonplatte eingesetzt, die mit vier Kunststoff-Gewindestangen auf einem Abstand von 30 mm gehalten wird. Die Spannungszuführung für die beiden Elektroden ist in Form angelöteter 10 mm-Messingstäbe ausgeführt, die jeweils oben aus dem Becher herausragen.

Auf die Anschlussstäbe wurden Adapter für das im Labor verwendete Hochspannungs-Verbindungssystem aus handelsüblichem Sanitär-Kupferrohr gesetzt, wobei der gesamte Aufbau selbstverständlich mit ausreichend verrundeten Kanten ausgeführt ist. Bei MZ II ergab sich durch den horizontalen Einbau als signifikanter Nachteil die Begrenzung des nutzbaren Elektrodenabstandes durch den Durchmesser des Bechers. Nadel-Platten-Abstände über 15 mm sind mit MZ II nicht sinnvoll realisierbar. Im Falle von MZ II ist d_s von d abhängig, da $d + d_s = const.$ gilt. Für den Einsatz von MZ II mit $d = 15$ mm wurde der Nadelhalter nachträglich gekürzt, da ansonsten d_s zu klein geworden wäre.

3.4.1.3 Messzelle MZ III

Die beschriebenen Nachteile von MZ I und II führten letzten Endes zur Konstruktion einer universell einsetzbaren Messzelle mit vertikaler Messstrecke und direktem Erdanschluss an der Unterseite. Die Zelle MZ III besteht aus einer Messing-Grundplatte mit eingedrehter Nut, in die ein Plexiglaszylinder eingepasst ist. Der Zylinder ist an der Unterseite mit

einer ölbeständigen Dichtung versehen, die in einer in der Hauptnut liegenden, schmaleren Nut zu liegen kommt, und wird über einen Konterring aus PVC mit drei Kunststoff-Gewindestangen verspannt.

Der Nadelhalter ist als 14 mm-Messing-Rundstange ausgeführt und in einem in den Konterring passgenau einsetzbaren Deckel in der Höhe verschiebbar und arretierbar eingesteckt. Diese Konstruktion erlaubt einen sehr flexiblen Einstellbereich für den Elektrodenabstand bei gleichzeitig geringer Füllmenge. Nachteil ist die aufwändigere Reinigung, da das Gefäß fester Bestandteil der Anordnung ist.

Es bestanden Planungen, die Messzelle zu erweitern, um Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchführen zu können. Die Grundplatte der MZ III ist konstruktiv für den Einbau einer Wasserheizung vorgesehen. Dazu kann in die Unterseite der Platte ein Heizmäander eingefräst werden, der dann durch einen Thermostat extern mit heißem Wasser durchströmt wird. Die Messung der Öltemperatur erfolgt dann mit einem in der Hochspannungselektrode (Nadelhalterung) eingebauten Temperaturfühler inklusive einer batteriegespeisten Elektronik, die die Temperaturwerte digitalisiert und potenzialfrei über Lichtwellenleiter zum Messplatz führt.

3.4.1.4 Elektrodenabstand

Der Abstand der auf Hochspannungspotenzial befindlichen Spitze der Nadelelektrode zur geerdeten Plattenelektrode ist sehr kritisch für die Messung. Der Elektrodenabstand ist ein Maß für die Inhomogenität des sich bei Spannungsbelastung bildenden elektrischen Feldes im Elektrodenzwischenraum und damit für den Abstand zwischen TE-Einsatz- und Durchschlagspannung. Für eine sinnvolle Messung sollte der Abstand der beiden Spannungswerte möglichst groß sein, damit eine stabile TE-Aktivität mit brauchbaren Impulsraten ohne Risiko des Durchschlages bei geringfügigen Spannungsschwankungen zustande kommt.

Der Ausnutzungsfaktor η wird in der Nadel-Platte-Anordnung mit steigendem Elektrodenabstand kleiner, jedoch steigt die TE-Einsatzspannung und damit der Minimalwert für die Prüfspannung gleichermaßen an. Um Randeffekte zu vermeiden, sollte der Elektrodenabstand auch nicht zu groß gewählt werden, da der Durchmesser der Messzelle ebenfalls analog vergrößert werden müsste. Ein großer Elektrodenabstand führt also zu einer großen Messzelle und damit auch zu einem großen erforderlichen Füllvolumen. Auch die Form der Spitze der verwendeten Nadeln hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die TE-Einsatzspannung.

Durch die verrundete Form des Nadelhalters ergibt sich zusätzlich eine gewisse Homogenisierung des Feldes. Um diese klein zu halten, sollte die Nadel möglichst weit aus dem Halter herausragen, also der Abstand Nadelspitze–Ende des Nadelhalters sollte möglichst groß sein. Bei Anordnungen mit einem festen Abstand zwischen Nadelhalter und Platte wie MZ II ist dies nicht ohne weiteres einzuhalten, wenn man zu größeren Abständen übergeht. Bei der Verwendung von MZ III ist eine Einstellung hingegen problemlos möglich.

Die Autoren von [Pom05, Pom06] haben mit einem Elektrodenabstand von 30 mm und Prüfspannungen von z.T. deutlich über 30 kV gearbeitet. Die anfangs im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Messzellen, speziell MZ II, waren jedoch für einen derart großen Abstand nicht geeignet, so dass zunächst mit kleineren Werten experimentiert wurde.

Die Prüfspannungen (Effektivwerte) lagen in den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Messungen bei ca. 14 kV bei 10 mm Nadel-Platte-Abstand und bei um 20 kV bei 15 mm Elektrodenabstand. Die TE-Einsatzspannungen lagen je nach Ölprobe mehr oder weniger deutlich darunter, die Durchschlagspannung oft nur knapp darüber. Besonders bei Messungen mit $d = 10$ mm kam es öfteren vor, dass bei der üblichen Prüfspannung keine oder nur wenige TE auftraten, eine geringfügige Erhöhung der Prüfspannung – z.B. aufgrund der fehlenden Stabilisierung durch Schwankungen der Netzspannung – jedoch bereits zum Durchschlag führte.

Je nach Qualität der Ölprobe traten teilweise Impulsraten in der Größenordnung von lediglich 0,1 Impulsen pro Sekunde oder darunter auf und Messungen waren dementsprechend teilweise recht langwierig, da für eine brauchbare Auswertung eine größere Anzahl von TE-Ereignissen erforderlich ist. Im Rahmen dieser Arbeit ausgewertete Datensätze enthielten im Regelfall mindestens 1000 TE-Ereignisse.

3.4.2 Ergänzende Messungen

Ergänzend zu den Befunden der Teilentladungsmessungen standen von einigen der untersuchten Ölproben zusätzliche Messdaten zur Verfügung. Von einer Reihe von Ölproben lagen Daten einer chemischen Analyse (DGA) vor. Außerdem wurde, sofern die verfügbare Ölmenge ausreichte, die Prüfung auf Durchschlagfestigkeit nach VDE 0370 Teil 5 [VDE96] durchgeführt. Für eine Prüfung mit dem vorhandenen Ölprüfgerät OPG-75S (Hersteller HCK) ist jedoch eine recht große Ölmenge erforderlich (mindestens ca. 500 ml), so dass mit einigen Proben keine entsprechende Messung durchgeführt werden konnte.

Die Durchschlagprüfung wurde mit DIN-Elektroden – Kugelkalotten mit $r = 25$ mm und einem Elektrodenabstand $d = 2,5$ mm, $\Delta U/\Delta t = 0,5$ kV/s – durchgeführt. Das Prüfgerät OPG-75S erlaubt Prüfspannungen bis 75 kV. Die Werte der Durchschlagspannung sind allerdings für einen Vergleich mit Teilentladungsmessungen nur sehr bedingt brauchbar, da Öle mit keiner oder nur geringfügiger Alterung im Regelfall durchweg sehr hohe Werte besitzen, während bei stark gealterten bzw. verunreinigten Ölen eine erhebliche Streuung der Werte auftritt, die eine Bewertung erschwert.



Abb. 3.10: Aufbau zur Messung des Verlustfaktors und der Kapazität von Isolierflüssigkeiten nach DIN/EN 60156 (VDE 0380 Teil 2), rechts die Messelektrodenanordnung

Des Weiteren wurde eine zu VDE 0380 Teil 2 [VDE05] konforme Anordnung zur Bestimmung des Verlustfaktors $\tan \delta$ konstruiert, die aus zwei konzentrischen Ringelektroden

besteht (s. Abb. 3.10). Es wurden Messungen mit dieser Anordnung mit einem Verlustfaktormessgerät (QuadTech 7400) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen erbrachten jedoch keine für das Teilentladungsverhalten relevanten Erkenntnisse.

Da der Verlustfaktor in erster Linie durch die Leitfähigkeit des Öls beeinflusst wird, die wiederum von unterschiedlichen Faktoren abhängen kann, sind diese Werte eher von untergeordneter Bedeutung für eine aussagekräftige Diagnose. Außerdem ist für die Messung wie auch bei der Messung der Durchschlagspannung eine relativ große Ölmenge erforderlich, die von den meisten Proben nicht verfügbar war.

3.4.3 Ölproben

Es standen eine Reihe von Ölproben unterschiedlicher Herkunft und Vorgeschichte zur Verfügung. Problematisch ist allgemein, dass nur von wenigen der untersuchten Proben Daten aus Standard-Analysen (speziell DGA, Durchschlagspannung, Verlustfaktor, Wassergehalt) vorlagen und auch zumindest im Falle der chemischen Analysen generell keine Möglichkeiten bestanden, diese selbst durchzuführen (s. Abschnitt 3.4.2).

Für die Auswertung wurden einerseits Ölproben herangezogen, die entweder ungebraucht waren, so dass deren Zustand weitgehend bekannt war, und andererseits solche, die sichtbar gealtert waren (deutlich dunklere Farbe als bei neuem Öl), so dass davon auszugehen war, dass diese erheblich Abweichungen vom durch neue Öle repräsentierten Idealverhalten aufwiesen. In erster Linie ging es jedoch darum, überhaupt Unterschiede im TE-Verhalten unterschiedlicher Proben zu finden und Parameter zu ermitteln, die diese Unterschiede beschreiben und eine Separierung unterschiedlicher Effekte ermöglichen.

Für eine Reihe Ölproben, die von einem Industriepartner zur Verfügung gestellt wurde, standen auch Daten der Standard-Ölanalysen zur Verfügung. In diesem Fall konnten Vergleiche unterschiedlicher TE-Parameter mit konkreten Eigenschaften der Öle gezogen werden, was auch darüber hinaus gewisse Korrelationen zu den anderen untersuchten Proben erlaubte.

3.4.4 Durchführung der Teilentladungsmessungen

Zur Durchführung einer TE-Messung wurde zunächst mit einem TE-Kalibrator eine Kalibrierung (bzw. Normalisierung) durchgeführt. Diese wurde jeweils den zu erwartenden Impulsamplituden angepasst. Da die Messkarte einen Eingangsbereich von ± 5 V besitzt, musste gewährleistet sein, dass auch die höchsten Impulse diese Grenzen nicht überschritten.

Da derartige Messelektronik gewöhnlich sehr empfindlich auf Überschreitung der angegebenen Parameter reagiert, waren die Eingänge zusätzlich mit Schutzvorrichtungen in Form von Begrenzern – bestehend aus je zwei antiseriell geschalteten Z-Dioden mit $U_Z = 4,7$ V und einem Widerstand zur Strombegrenzung – vor Überspannung geschützt. Diese Begrenzer sorgen dafür, dass Signale mit Amplituden von mehr als ca. 5 V abgeschnitten werden und so nicht mehr auswertbar sind. Diese Eingangs-Schutzbeschaltung ist erforderlich, da z.B. bei Durchschlägen sehr große Spannungsimpulse auftreten können, die ansonsten die Messkarte zerstören würden.

Testmessungen ergaben für einen Elektrodenabstand von 10 mm Impulsamplituden von im Regelfall unter 1000 pC, so dass in diesem Fall eine Normalisierung mit 100 pC auf 100 mV (1000 pC/V) einen sinnvollen Messbereich mit ausreichender Auflösung ergab. Bei Messungen mit einem Elektrodenabstand von 15 mm waren die TE grundsätzlich deutlich höher. Es kamen Amplituden bis über 3000 pC vor, im Falle von I_2 sogar bis 5000 pC. Deshalb wurde für diesen Fall eine Kalibrierung mit 100 pC auf 40 mV durchgeführt, also 2500 pC/V.

Die Triggerschwelle der Messkarte war bei allen Messungen auf -41/+36 mV eingestellt, was zu einer Empfindlichkeit von ca. 40 pC bei $d = 10$ mm und ca. 100 pC bei $d = 15$ mm führte. Geringere Schwellwerte hätten unter Umständen zu Störungen der Messwert-erfassung durch Einstreuungen geführt.

Die Prüfspannung wurde für gewöhnlich mit einer speziellen Vorrichtung rampenförmig von Null an erhöht (s. Abschnitt 3.2). Eine Hochfahrgeschwindigkeit von ca. 2,5 kV/min erwies sich als praktikabel und kam demzufolge bei praktisch allen durchgeführten Messungen zum Einsatz.

Ein großer Vorteil des rampenförmigen Erhöhens der Prüfspannung ist die Möglichkeit zur Ermittlung der TE-Einsatzspannung. Außerdem kann man sich – besonders bei Versuchen mit einer bisher nicht erprobten Elektrodenanordnung oder einem neuen Prüfling – vorsichtig in einen Bereich hineintasten, in dem man eine stabile TE-Aktivität erhält, ohne einen Durchschlag zu riskieren. Ein einfaches schlagartiges Aufschalten einer vor-eingestellten Prüfspannung auf den Prüfling kann unter Umständen zu einem sofortigen Durchschlag führen.

Die Ermittlung einer sinnvollen Prüfspannung für eine gegebene Elektrodenanordnung erfolgte jeweils durch rampenförmiges Hochfahren der Prüfspannung bis zum TE-Einsatz. Im Anschluss wurde die Spannung langsam stufenweise erhöht, bis es zum Durchschlag kam. Als Prüfspannung für die Messungen wurde dann jeweils ein Wert gewählt, bei dem in den meisten Ölen eine sinnvolle Impulsrate auftritt, der aber auch einen ausreichenden Abstand zur ermittelten Durchschlagspannung besitzt.

Für die Auswertung wurde der Teil der Messung mit der Spannungsrampe im Regelfall nicht berücksichtigt, da die Werte in dem Bereich bei geringeren Spannungen zustande kommen und dementsprechend meist deutlich kleinere Amplituden aufweisen.

Grundsätzlich wurde bei den Untersuchungen regelmäßig ein Wechsel der Nadel vorgenommen, um den Einfluss mikroskopischer Veränderungen der Form der Nadelspitze durch die TE-Aktivität zu minimieren. Vergleichsmessungen belegen, dass nach ca. 20 Messungen mit einer Nadel noch kein nennenswerter Einfluss auf das TE-Verhalten existiert, was zu einem Austauschzyklus von 15-20 Messungen führte. Nach einem Durchschlag erfolgte in jedem Fall ein Wechsel, da sich gezeigt hatte, dass Durchschläge die Form der Nadelspitze unter Umständen derart verändern können, dass bei folgenden Messungen nur noch eine geringe oder gar keine TE-Aktivität mehr auftritt, letzteres speziell bei Messungen mit kleinem Elektrodenabstand.

3.4.5 Auswertung anhand einfacher Parameter

Eine erste Grobklassifizierung kann man durch den Vergleich von einfachen Parametern wie der TE-Einsatzspannung, der Impulsrate oder den Standard-Parametern, die auch für

die Puls-Sequenz-Analyse genutzt werden, durchführen. Allerdings hängen sowohl die TE-Einsatzspannung als auch die Impulsrate erfahrungsgemäß von mikroskopischen Details der Form der Nadelspitze ab, die einerseits nie bei allen Nadeln exakt gleich ist und die sich andererseits auch während einer oder mehrerer Messungen ändern kann, beispielsweise durch Abnutzung/Erosion aufgrund anhaltender TE-Aktivität. Außerdem kann die Form der Nadelhalterung das TE-Verhalten beeinflussen, v.a. dann, wenn die Nadelspitze nur wenig aus der verrundeten Halterung herausragt, was zu einem geringeren Inhomogenitätsfaktor bzw. einem höheren Ausnutzungsfaktor führt (s. Abschnitt 3.4.1.4).

Da ein Wechsel der Nadel und das damit verbundene Neueinstellen des Elektrodenabstandes recht aufwändig ist, wurde hauptsächlich nach Parametern gesucht, die nicht durch minimale Details in der Elektrodenanordnung beeinflusst werden. Auch eine der Zielsetzungen der Untersuchungen, die Möglichkeit eines Einsatzes des Verfahrens zu einer Online-Überwachung mit Hilfe einer Elektrodenanordnung im Innern des Transformators zu entwickeln, bei der ein Wechsel der Nadel ungleich aufwändiger ist, macht es erforderlich, sich auf Parameter zu konzentrieren, bei denen der Einfluss von Details der Elektrodengeometrie nur gering ist.

3.4.5.1 Impulsrate

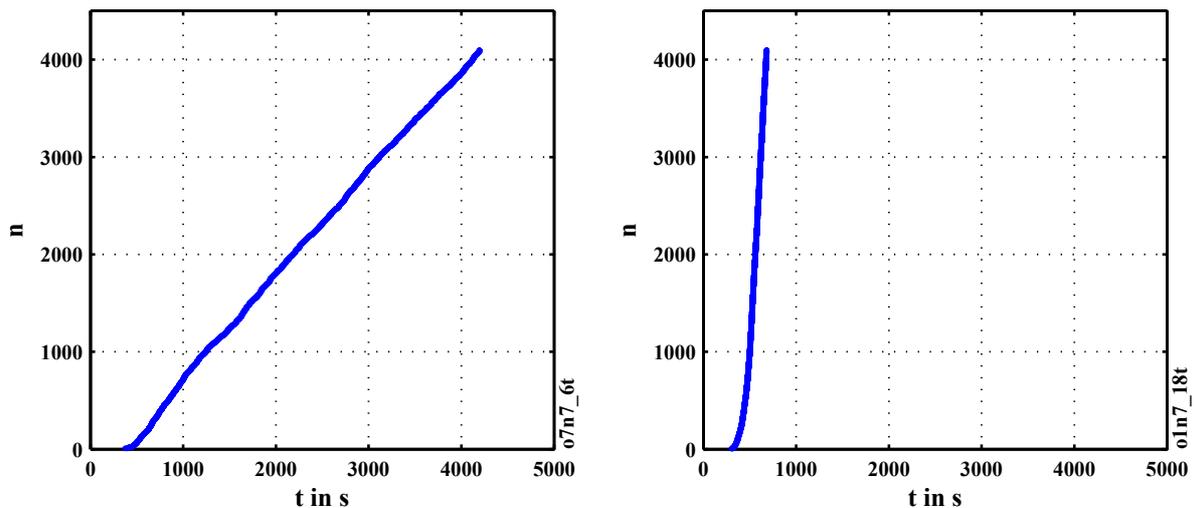


Abb. 3.11: Impulsnummer n über Messzeit t für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), Prüfspannungsrampe bis 500 Sekunden, anschließend konstante Spannung (20 kV_{eff}), Messung mit MZ I, $d = 15 \text{ mm}$

Eine gewisse Aussage im direkten Vergleich ist zwar auch anhand der Impulsrate möglich, allerdings nur bei einer Gegenüberstellung von Messungen, die mit der selben Nadel in unmittelbarer Folge durchgeführt wurden, wie in Abb. 3.11 beispielhaft gezeigt. Die Impulsraten unterscheiden sich hier um einen Faktor von ungefähr 10. Der zunächst flachere Anstieg der Kurve ist bedingt durch die Prüfspannungsrampe zu Beginn der Messung. Bei dem neuen Öl treten während des Hochfahrvorgangs nur wenige TE auf, während beim gealterten Öl ein erheblicher Anteil (ca. 1000) der insgesamt knapp über 4000 Ereignisse in den Bereich der Rampe fällt. Die TE-Einsatzspannung – und damit der Zeitpunkt des Einsatzes bei gleicher Prüfspannungsrampe – liegt jedoch in der gleichen Größenordnung.

Das in Abb. 3.11 links dargestellte Beispiel für ein neues Öl besitzt in diesem Fall bereits eine recht hohe Impulsrate. Messungen am selben Öl mit einer anderen Nadel bzw. mit der gleichen Nadel nach ca. 20 weiteren Messungen ergaben deutlich geringere Raten, wobei sich andere Parameter – speziell die Kurvenformparameter – nicht wesentlich ändern [Pat06b].

Allgemein fällt besonders bei lediglich geringfügig gealterten Ölen auf, dass die Impulsrate während einer Messung erheblich schwanken kann. In solchen Fällen kann es vorkommen, dass nach einer vergleichsweise langen Pause, die sich bis in den Minutenbereich erstrecken kann, eine TE-Sequenz mit kurzen Zeitabständen folgt. Dabei können durchaus auch Zeitabstände in der Größenordnung von einer Sekunde oder darunter vorkommen.

3.4.5.2 TE-Einsetzspannung

Auch die TE-Einsetzspannung hängt von vielerlei Bedingungen ab. Zunächst ist zu definieren, ob man als Einsetzspannung diejenige Spannung bezeichnet, bei der beim Hochfahr-Vorgang erstmalig detektierbare Teilentladungen auftreten, oder diejenige, bei der eine bestimmte Impulsrate bzw. Amplitude erreicht wird. In vielen Fällen treten während der rampenförmigen Erhöhung der Prüfspannung bereits bei relativ niedrigen Spannungen sporadisch Teilentladungen mit zunächst geringen Amplituden auf. Da davon auszugehen ist, dass es bereits vorher Ereignisse gibt, die jedoch unter der Nachweisschwelle liegen, ist in dem Fall immer die zusätzliche Angabe der Triggerschwelle erforderlich.

Unabhängig von der konkreten Definition besteht kein allgemeiner Zusammenhang zwischen der Höhe der TE-Einsetzspannung und dem Zustand des Öls, auch wenn tendenziell Öle, die stärkere Verunreinigungen durch Abbauprodukte enthalten, zu früherem TE-Einsatz neigen. Es existiert auch keine allgemeine Korrelation zur elektrischen Festigkeit des Öls im homogenen Feld (Durchschlagspannung nach VDE 0370 Teil 5). Weiterhin spielt auch hier die Geometrie der Elektrodenanordnung eine erhebliche Rolle.

3.4.5.3 TE-Amplitude und Spannung

Eine der ersten Auswertungen zur Charakterisierung von Teilentladungen in Öl bestand darin, die Amplitude des Signals (die identisch ist mit der Amplitude I_1 des ersten Maximums des Signalverlaufs) über der Momentanspannung zum Zeitpunkt des Auftretens aufzutragen [Pat06b]. Die Aussagekraft dieser einfachen Auswertung beruht darauf, dass die Impulsamplitude eine gewisse Spannungsabhängigkeit aufweist, wobei bei geringeren Spannungen im Regelfall auch kleinere Amplituden auftreten. Bei gealterten Ölen wurde festgestellt, dass gegenüber einem neuen Öl oft eine deutlich stärkere Streuung der I_1 -Werte auftritt.

Abb. 3.12 zeigt die $I_1(U)$ -Konturdiagramme für die beiden Ölproben O7 (neu) und O1 (gealtert), jeweils mit Messzelle MZ I und $d = 15$ mm gemessen. Es ist ein deutlicher Unterschied, besonders bei höheren Momentanspannungen, erkennbar. Das gealterte Öl zeigt auch bei höheren Spannungswerten Impulse mit kleinen Amplituden, während diese beim neuen Öl weitgehend fehlen. Auch treten bei O7 geringfügig höhere maximale Amplituden auf als das bei O1 der Fall ist. Messungen an anderen Proben ergaben ein ähnliches Verhalten, jedoch sind die Unterschiede zwischen unterschiedlich gealterten Ölen unterschiedlich ausgeprägt. Für die in Abb. 3.12 markierten Gruppen ergeben sich interessante

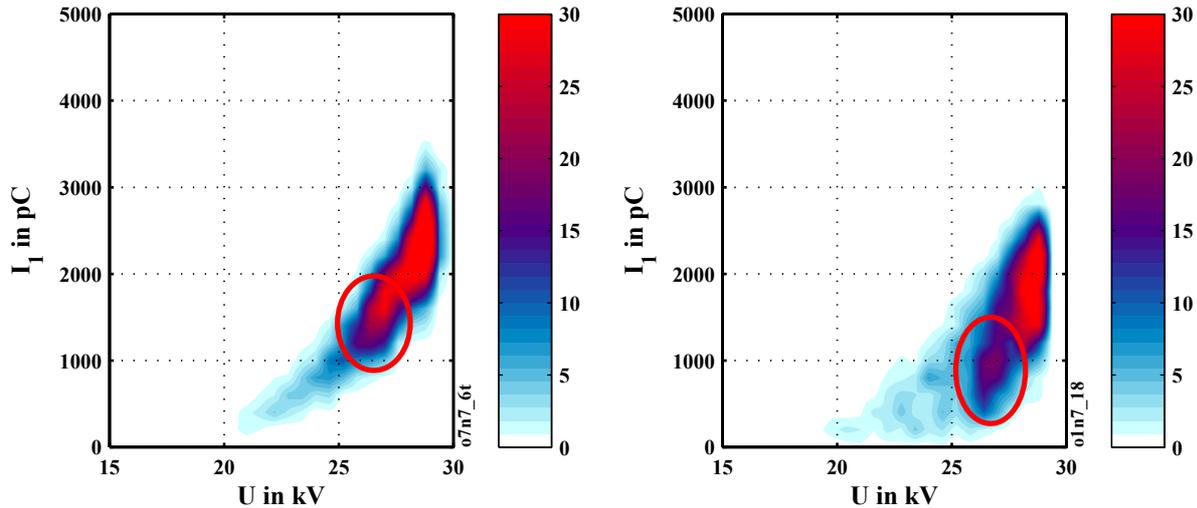


Abb. 3.12: Impulsamplitude I_1 über Momentanspannung U für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), je 25 Klassen in x- und y-Richtung, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

Zusammenhänge in Bezug auf die im Folgenden diskutierten Kurvenformen (s. Abschnitt 3.4.6.1).

3.4.6 Auswertung anhand der Kurvenformparameter

Eine aussagekräftige Analyse des Teilentladungsverhaltens von Isolierölen ist, wie vorstehend bereits angedeutet, in erster Linie durch Auswertung der Form der Impulsantwort des Teilentladungsdetektors (Bandpass-Filter) möglich, da diese durch die beschriebenen Folgeentladungen mit Zeitabständen im Mikrosekunden-Bereich beeinflusst wird. Die grundlegenden Zusammenhänge wurden in Abschnitt 3.3.2 erläutert.

3.4.6.1 Amplituden der Maxima

Analog zur Darstellung der Amplituden I_1 der ersten Maxima in Abb. 3.12 besteht die Möglichkeit, die Amplituden I_2 der jeweils zweiten Maxima über den Momentanwerten der Prüfspannung aufzutragen. Diese Darstellung zeigt Abb. 3.13, wobei zur Verbesserung der Anschaulichkeit die negativen Amplitudenwerte I_2 mit -1 multipliziert sind. Es ergibt sich bei beiden Proben eine stärkere Streuung als bei der I_1 -Darstellung. Auffallend sind die jeweils korrelierenden Gruppen kleinerer I_1 bzw. I_2 , die offenbar unverzerrte Ereignisse repräsentieren und die sich deutlich von den übrigen Werten abheben. Besonders im Fall von O1 ist die Abgrenzung dieser Gruppe mit I_1 -Werten um 1000 pC und den korrelierenden I_2 -Werten bei knapp unter 1000 pC, jeweils bei Spannungen um 26–27 kV, auffallend.

Auch die Amplituden der Maxima der Impulsantwort bzw. deren Verteilung ermöglichen Aussagen zum Zustand des untersuchten Öls. Wie vorstehend bereits erwähnt ist im Idealfall, also ohne Verzerrungen der Signalform durch Folgeentladungen, der Betrag der Amplitude I_2 des zweiten Maximums ziemlich genau 80% der Amplitude I_1 des ersten Maximums. Bei verzerrten Signalen wird I_2 im Verhältnis zu I_1 größer, so dass die entsprechende Verteilung zu deutlich höheren Amplituden hin verschoben ist. Treten aus-

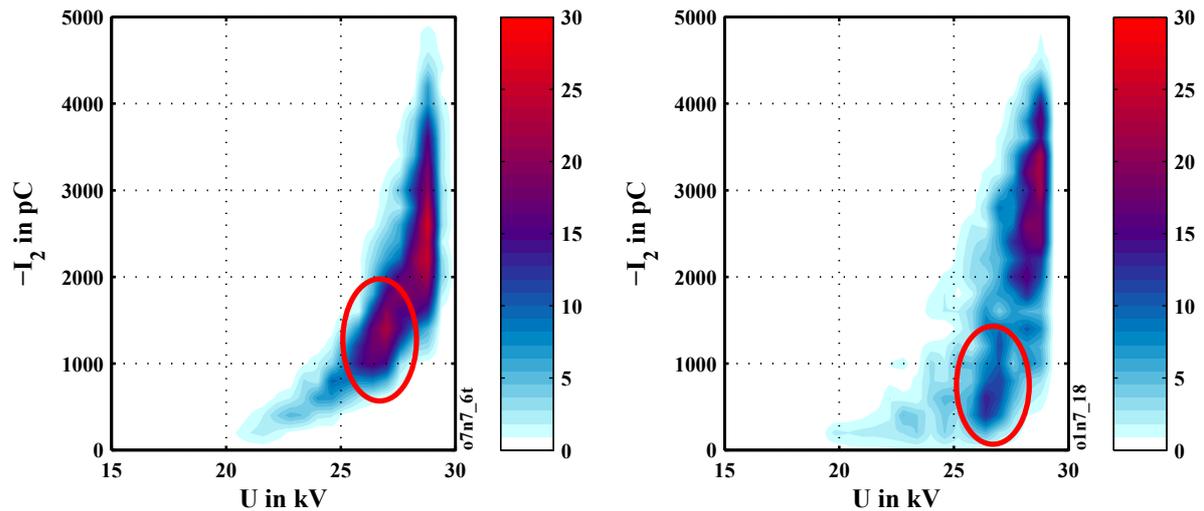


Abb. 3.13: Amplitude $-I_2$ des zweiten Maximums über Momentanspannung U für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), je 25 Klassen in x- und y-Richtung, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

schließlich unverzerrte Signale auf, dann liegt der Schwerpunkt der Verteilung von I_2 bei deutlich kleineren Werten als derjenigen von I_1 .

Abb. 3.14 zeigt die Verteilung der Amplituden I_1 und I_2 der ersten beiden Maxima des Signals für die gleichen Datensätze wie in Abb. 3.11, wobei der Bereich der Prüfspannungsrampe jeweils entfernt wurde und die I_2 -Werte mit -1 multipliziert wurden. Es ist deutlich ein Unterschied zu sehen, der sich besonders bei den Werten für I_2 bemerkbar macht. Das gealterte Öl O1 zeigt viele TE mit $I_2 > I_1$, was auf Verzerrungen durch Folgeentladungen zurückzuführen ist.

Noch deutlicher ist dies bei zwei weiteren Ölproben, ebenfalls ein neues (O3) und ein stark betriebsgealtertes (OB), deren Histogramme in Abb. 3.15 zu sehen sind. Hier ergibt sich bei OB (rechts) eine deutliche Häufung großer I_2 , die bei den neuen Ölen nicht sichtbar ist. OB stammt aus dem in Abschnitt 2.7 vorgestellten 50 kVA-Transformator Tr2.

3.4.6.2 Zeitpunkte der Maxima und Nulldurchgänge

Durch die durch Folgeentladungen verursachten Verzerrungen der Kurvenform ergeben sich Verschiebungen der Zeitpunkte der Maxima und Nulldurchgänge der Signale (s. Abb. 3.16). Einige der Zeitwerte zeigen deutlich unterschiedliche Werte, während andere kaum beeinflusst werden. Die Angabe der Zeitpunkte erfolgt grundsätzlich auf den Triggerzeitpunkt bezogen. Wie schon in Abschnitt 3.3 erwähnt, spielt die Abweichung der Zeitwerte aufgrund der Triggerschwelle wegen des großen Unterschiedes zwischen dieser und den üblicherweise auftretenden Signalamplituden bei den durchgeführten Messungen keine nennenswerte Rolle.

Durch die auftretenden Verzerrungen wird im Regelfall speziell der Bereich vor dem ersten Nulldurchgang stark verändert, besonders dann, wenn die Folgeentladungen mit Zeitabständen in der Größenordnung weniger Mikrosekunden, also im Bereich um das erste Maximum der Initial-Entladung, auftreten. Unter anderem wird dadurch oft der Zeitpunkt t_4 des ersten Nulldurchgangs des Signals erheblich zu größeren Zeiten hin verschoben.

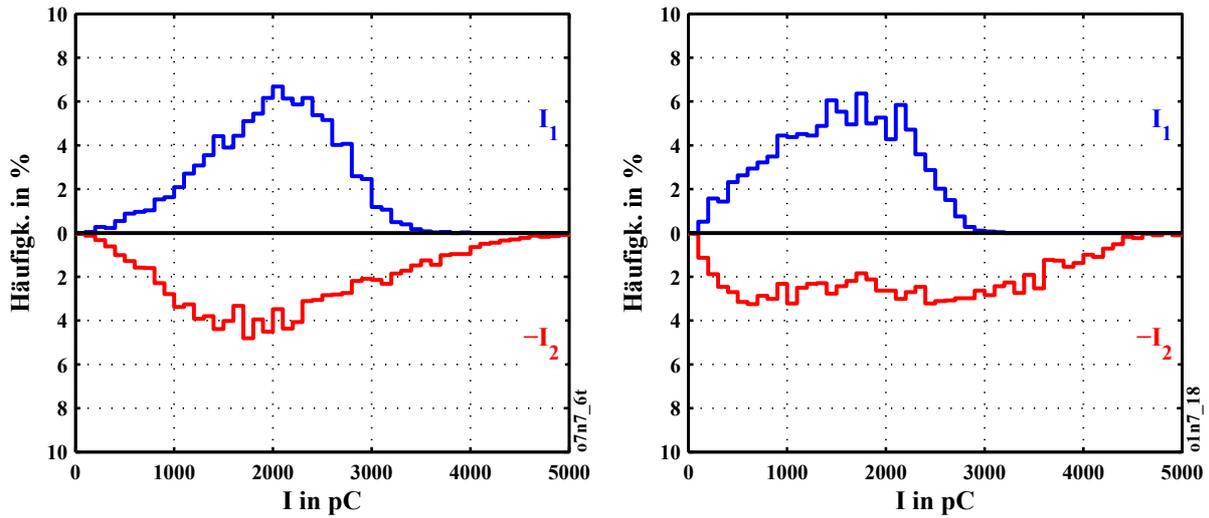


Abb. 3.14: Histogramme für I_1 und $-I_2$ für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

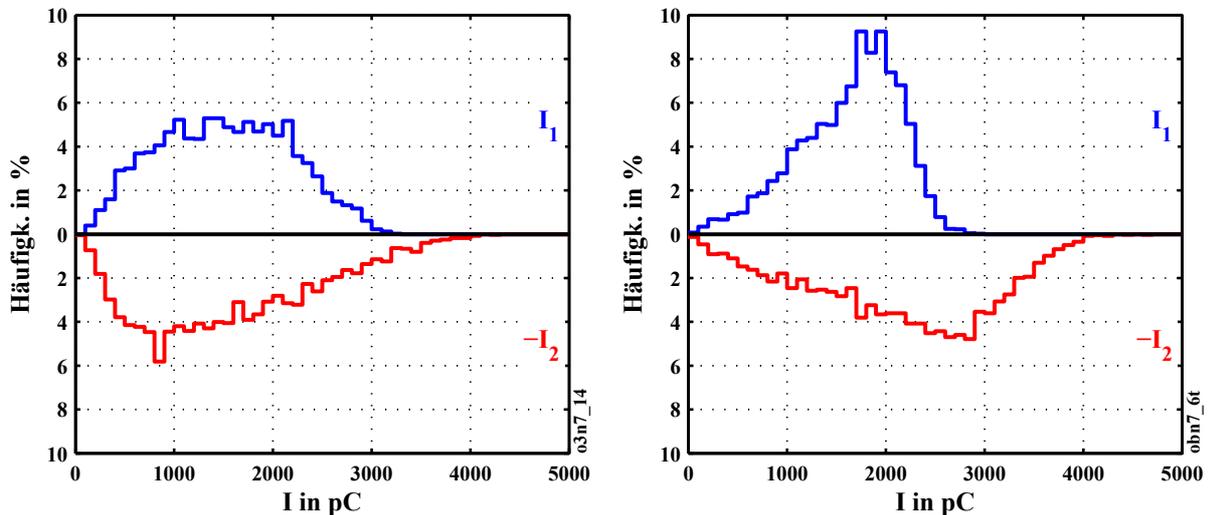


Abb. 3.15: Histogramme für die Amplituden I_1 und $-I_2$ für ein neues (O3) und ein betriebsgealtertes Öl (OB), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

Diesen Zusammenhang kann man gut in Histogrammform visualisieren. Abb. 3.17 zeigt die Darstellung für die Öle aus Abb. 3.11. Es ist deutlich erkennbar, dass im Falle von O7 offensichtlich eine Impulsform mit t_4 -Werten um $3,7 \mu\text{s}$ dominiert, während bei dem gealterten O1 eine weitere, deutlich abgegrenzte mit t_4 um $5 \mu\text{s}$ hinzukommt, die hier bereits etwa die Hälfte aller erfassten Ereignisse einschließt. Diese zweite Gruppe repräsentiert offenbar die durch Folgentladungen verzerrten Ereignisse, die beim neuen Öl O7 kaum vorhanden sind.

Abb. 3.18 zeigt die Darstellungen für die Proben O3 und OB, die in Abb. 3.15 bereits vorgestellt wurden. Für das neue Öl O3 ergibt sich eine Verteilung analog zu O7, während beim stark gealterten Öl OB im Vergleich zu O1 bereits die Impulse mit $t_4 > 4$ klar dominieren und offensichtlich nur noch wenige unverzerrte Ereignisse vorhanden sind.

Analog zu Abb. 3.17 ist es auch möglich, die „Breite“ des zweiten und dritten Peaks – also jeweils die Differenz der das Maximum einschließenden Nulldurchgangs-Zeiten $t_5 - t_4$ bzw.

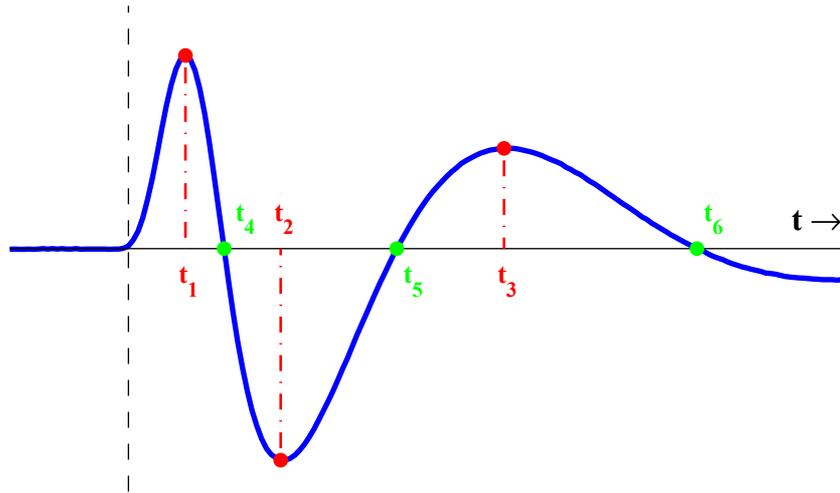


Abb. 3.16: Zeitpunkte der Maxima und Nulldurchgänge im Kurvenverlauf

$t_6 - t_5$ – aufzutragen. Der Einfluss der Verzerrungen auf diese Werte ist im Allgemeinen vergleichsweise klein. Dies ändert sich jedoch, wenn Folgeentladungen relativ spät – also im Bereich des ersten Nulldurchgangs – auftreten, was besonders bei Messungen mit größerem Elektrodenabstand ($d = 15 \text{ mm}$) beobachtet wurde.

Abb. 3.19 zeigt drei Beispiele aus einem Datensatz, die in der Amplitude I_1 des ersten Maximums ähnlich sind, sich jedoch in der Verzerrung durch Folgeentladungen deutlich unterscheiden. Das erste Beispiel zeigt einen Verlauf, der nur eine relativ geringfügige Abweichung vom Idealverlauf zeigt. Es sind bis auf das Amplitudenverhältnis $|I_2|/I_1$, welches hier 1,1 beträgt, keine augenfälligen Verzerrungen erkennbar.

Das mittlere Beispiel, das vom Typ her dem Verlauf in Abb. 3.7 links oben entspricht, zeigt ein Signal, das durch eine Folgeentladung kurz nach dem ersten Maximum verzerrt ist. Gegenüber der oberen Grafik ist deutlich die Verschiebung des Zeitpunktes t_4 des ersten Nulldurchganges zu höheren Werten erkennbar. Das erste Maximum ist deutlich „runder“ und breiter und das Amplitudenverhältnis $|I_2|/I_1$ beträgt 1,76, was bereits eine starke Abweichung von der Idealform mit $|I_2|/I_1 = 0,8$ darstellt.

Im dritten Beispiel schließlich, welches ungefähr dem in Abb. 3.7 rechts unten dargestellten Verlauf entspricht, tritt eine Folgeentladung erst im Bereich des ersten Nulldurchgangs auf. Das führt einerseits dazu, dass der Zeitpunkt t_4 des ersten Nulldurchganges gegenüber dem unverzerrten Fall nur wenig verschoben ist ($t_4 = 4,53 \mu\text{s}$ gegenüber $4,02 \mu\text{s}$ beim ersten Beispiel und $5,31 \mu\text{s}$ beim zweiten). Dadurch wird dieser Impuls bei der Auswertung nur des ersten Nulldurchganges nicht als „verzerrt“ detektiert. Andererseits verschiebt sich durch die späte Folgeentladung der Zeitpunkt t_5 des *zweiten* Nulldurchganges bezogen auf t_4 deutlich nach hinten, die Differenz $t_5 - t_4$ wird größer.

Eine wichtige Erkenntnis ist, dass t_5 selbst sich bei verzerrten Impulsen kaum verändert, wohl aber das Verhältnis von t_4 und t_5 , was zur Detektion von Signalen mit späten Folgeentladungen nutzbar ist, da diese bei der Betrachtung nur von t_4 unter Umständen nicht als „verzerrt“ erkannt werden. Auch die Symmetrie der Maxima kann als Parameter herangezogen werden, wobei offenbar diejenige des zweiten Maximums speziell empfindlich für späte Folgeentladungen reagiert. Eine Darstellung des Quotienten t_1/t_4 , der die zeitliche Lage des ersten Maximums in Bezug auf diejenige des ersten Nulldurchgangs darstellt,

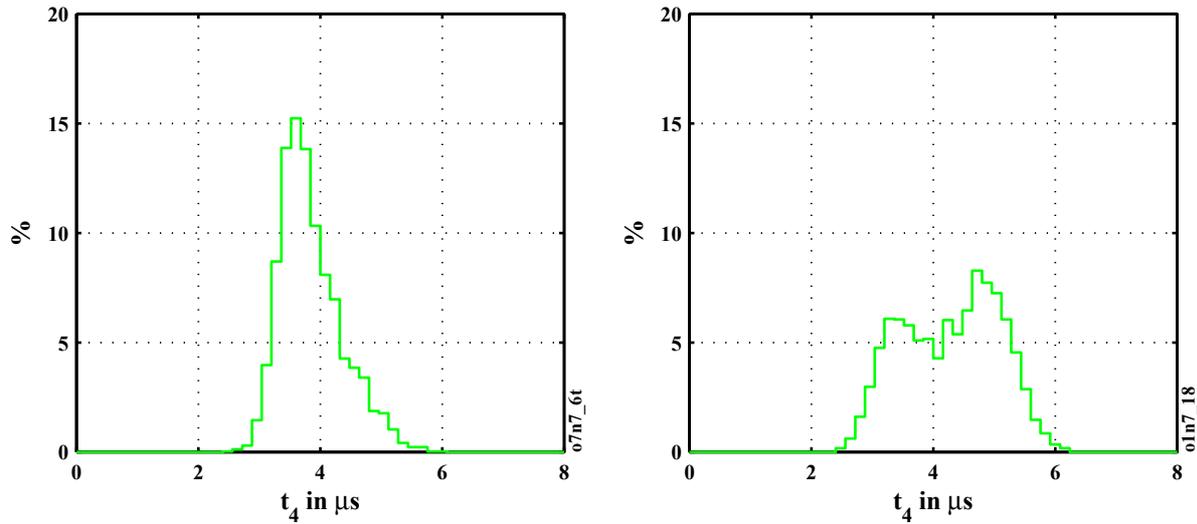


Abb. 3.17: Histogramme für den Zeitpunkt t_4 des ersten Nulldurchgangs für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), 50 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

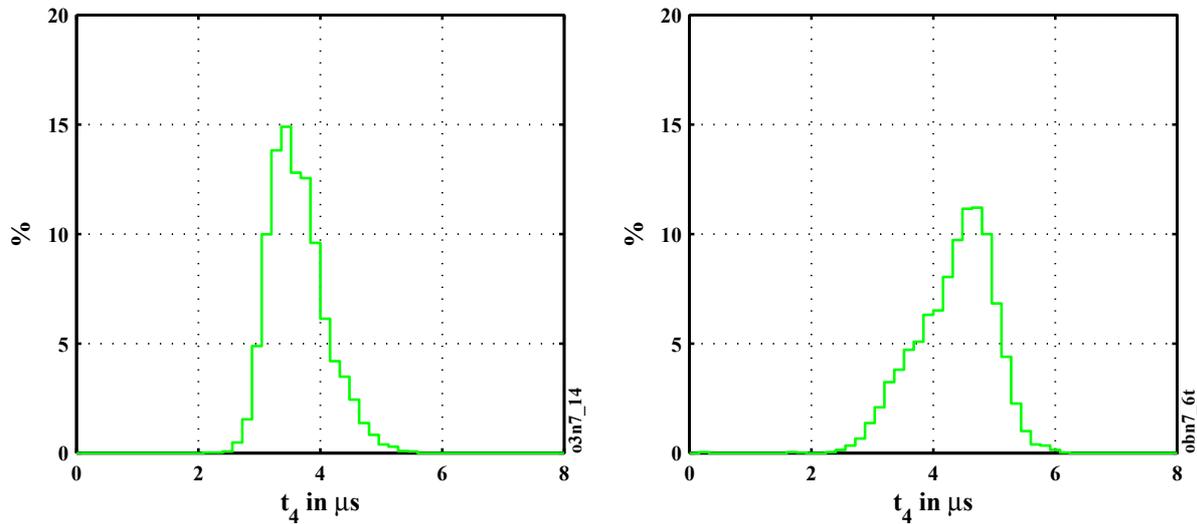


Abb. 3.18: Histogramme für den Zeitpunkt t_4 des ersten Nulldurchgangs für ein neues (O3) und ein stark betriebsgealtertes Öl (OB), 50 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

zeigt Abb. 3.20. Es ergibt sich keine deutliche Differenzierung zwischen dem neuen Öl (O3) und dem stark gealterten OB. Bei OB ist zwar die Verteilung deutlich breiter, wobei mehr Ereignisse im Bereich $t_1/t_4 < 0,5$ liegen, jedoch stellt dies in Anbetracht des erheblichen Unterschiedes der Ölproben kein Charakteristikum dar.

Abb. 3.21 zeigt das Verhältnis $(t_5 - t_4)/(t_2 - t_4)$ – also die „Breite“ des zweiten Maximums dividiert durch den Zeitpunkt seines Scheitelwertes bezogen auf den ersten Nulldurchgang – in Histogrammdarstellung für O3 und OB (O7 und O1 verhalten sich analog). Wie anhand der Beispiele in Abb. 3.19 und auch 3.6 und 3.7 in Abschnitt 3.3.2 ersichtlich ist, liegen bei Ereignissen ohne nennenswerte Folgeentladungen die Werte bei ungefähr $1/3$, während bei Ereignissen mit späten Folgeentladungen deutlich höhere Werte auftreten (z.B. 0,49 für das dritte Beispiel aus Abb. 3.19 gegenüber 0,33 beim ersten und 0,37 beim

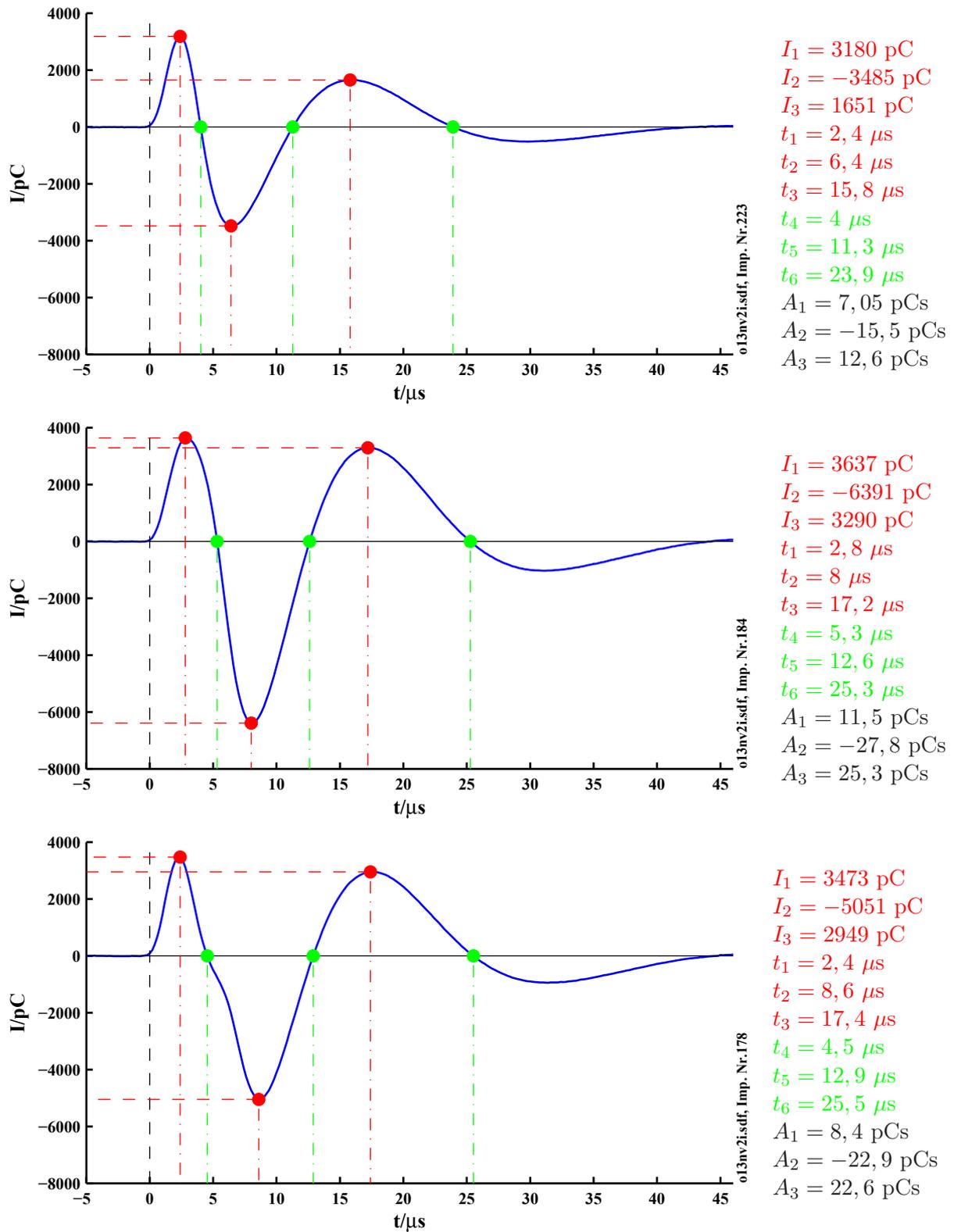


Abb. 3.19: Beispiele für TE-Signale mit unterschiedlichen Verzerrungen, jeweils mit den Kurvenformparametern: Nur geringfügig verzerrt (oben), Folgentladung kurz nach dem ersten Maximum (Mitte) und Folgentladung im Bereich des ersten Nulldurchgangs (unten), Messung mit MZ III, $d = 15 \text{ mm}$

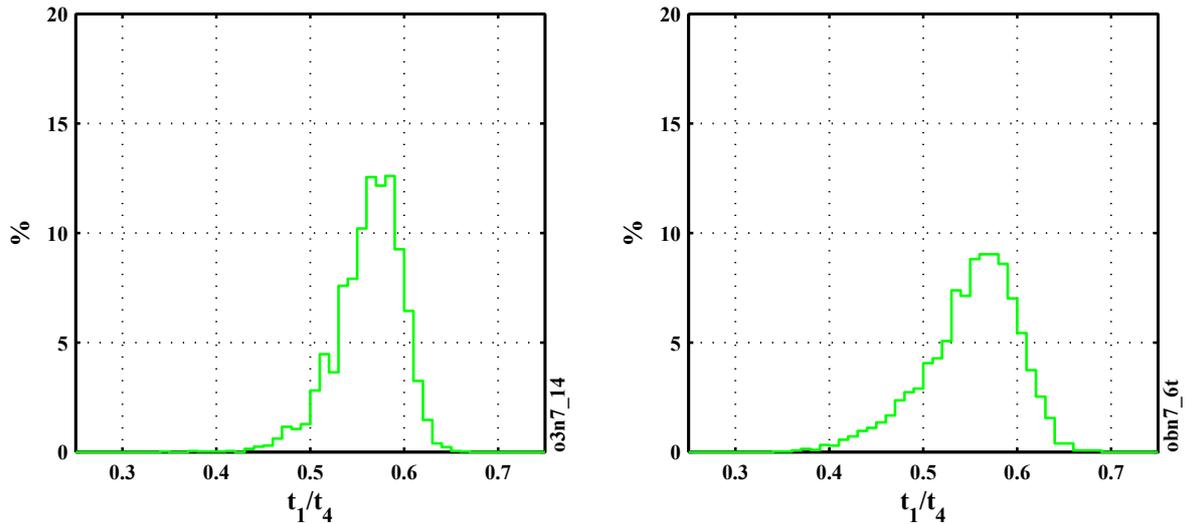


Abb. 3.20: Histogramme für das Verhältnis t_1/t_4 als Maß für die Lage des Zeitpunktes des ersten Maximums bezogen auf den ersten Nulldurchgang für ein neues (O3) und ein stark betriebsgealtertes Öl (OB), 50 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

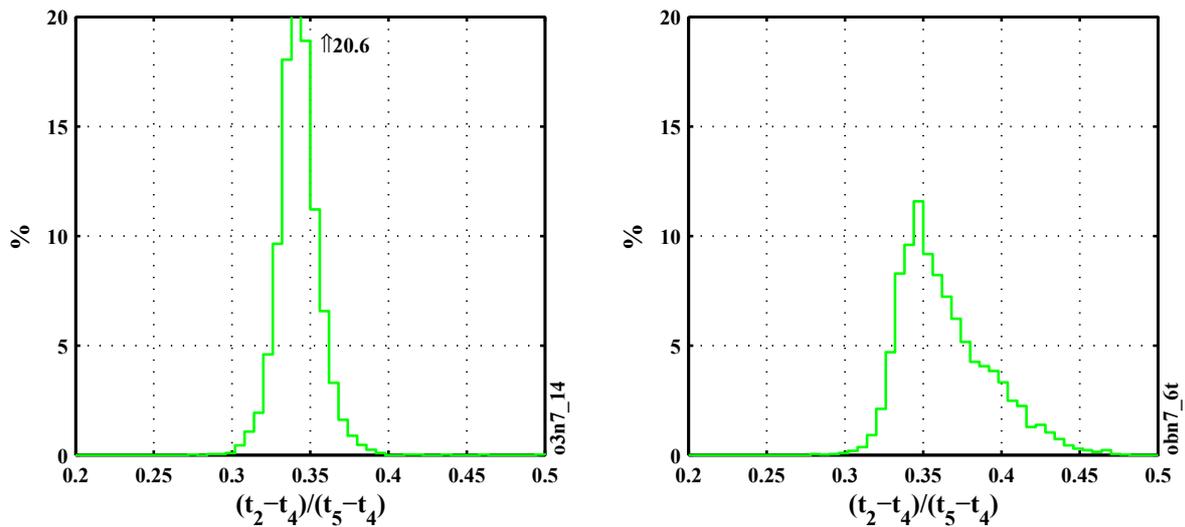


Abb. 3.21: Histogramme für das Verhältnis $(t_2 - t_4)/(t_5 - t_4)$ als Maß für die Symmetrie des zweiten Maximums für ein neues (O3) und ein stark betriebsgealtertes Öl (OB), 50 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

zweiten). Der Datensatz von OB enthält nachweislich eine nicht vernachlässigbare Anzahl von Impulsen mit späten Folgeentladungen.

Abb. 3.22 stellt zum Vergleich die entsprechenden Darstellungen für das dritte Maximum dar, dessen Symmetrie über $(t_3 - t_5)/(t_6 - t_5)$ definiert ist. Erwartungsgemäß zeigt sich hier keinerlei Differenzierung.

Für den Zeitpunkt des dritten Nulldurchgangs t_6 gilt wie auch für t_5 , dass dieser sich bei Impulsen, die Folgeentladungen im Bereich vor dem zweiten Maximum aufweisen, praktisch nicht ändert. Lediglich gegenüber Signalen ohne Verzerrungen sind t_5 und t_6 zu höheren Werten hin verschoben, wobei die Differenz $t_6 - t_5$, also die „Breite“ des dritten Maximums, in praktisch allen Fällen weitgehend konstant ist.

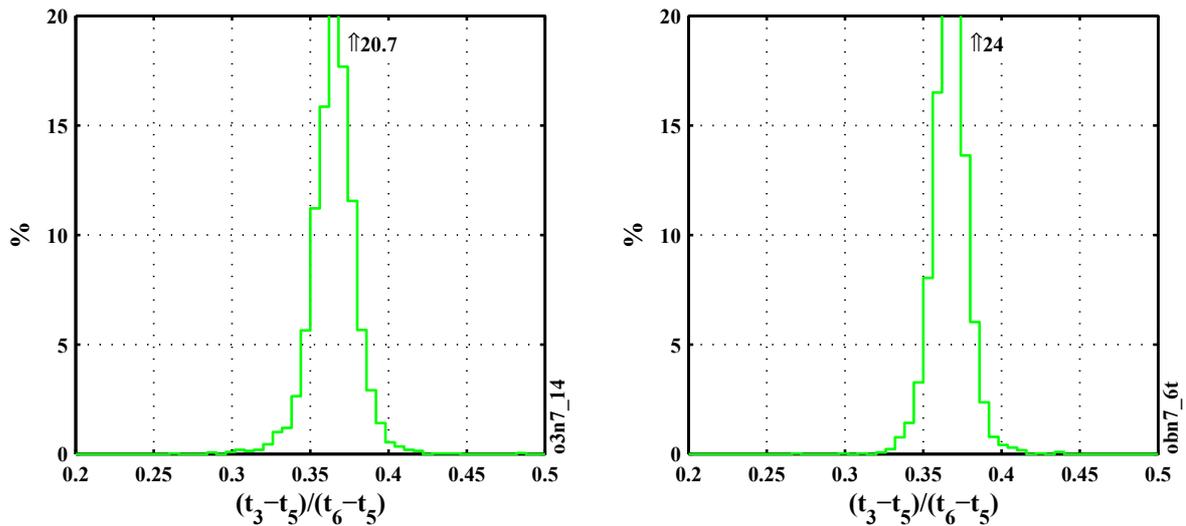


Abb. 3.22: Histogramme für das Verhältnis $(t_3 - t_5)/(t_6 - t_5)$ als Maß für die Symmetrie des dritten Maximums für ein neues (O3) und ein stark betriebsgealtertes Öl (OB), 50 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

Eine bereits in früheren Veröffentlichungen und Arbeiten [Ber03, Ben08] vorgestellte Auswertung bezieht sich auf die Zeitpunkte t_1 und t_2 der Maxima I_1 bzw. I_2 . Diese Zeitwerte ändern sich bei Auftreten von Folgeentladungen relativ stark, speziell t_1 zeigt eine deutliche Differenzierung bei Ereignissen im Bereich des ersten Maximums des Initial-Impulses. Besonders deutlich wird dies, wenn durch Folgeentladungen Einsattelungen und damit lokale Maxima im Bereich des ersten Maximums entstehen. Durch geringfügige zeitliche Abweichungen kann dann entweder der erste oder der zweite Peak höher sein und damit t_1 früher bzw. später. Dieses Verhalten führt in manchen Fällen in Histogrammdarstellungen von t_1 zu zwei separierbaren Gruppen im Bereich weniger Mikrosekunden.

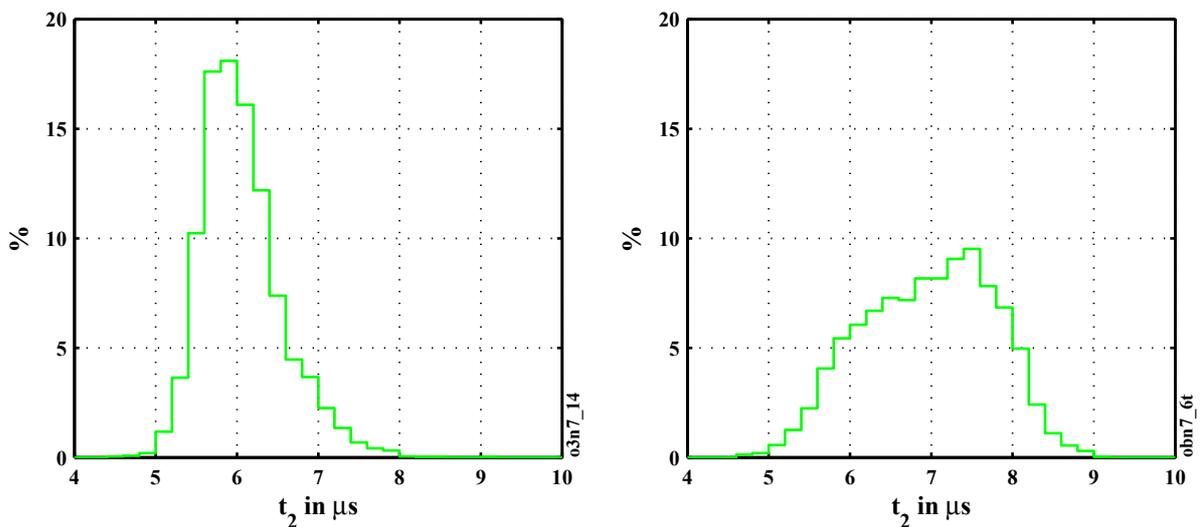


Abb. 3.23: Histogramme für den Zeitpunkt t_2 des zweiten Maximums für ein neues (O3, links) und ein stark betriebsgealtertes Öl (OB), 30 Klassen, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm

In den Beispielen aus Abb. 3.19 ergibt sich eine Differenzierung besonders im Falle des Zeitpunktes t_2 , der in beiden Fällen mit Folgeentladungen zu höheren Werten hin ver-

schoben ist. Da im dritten Beispiel die Folgeentladung zwar nach dem ersten Maximum auftritt (das damit auch nicht beeinflusst wird), jedoch vor dem zweiten, wird t_2 erheblich größer als im ungestörten Fall und sogar größer als im mittleren Beispiel. Speziell t_2 scheint demnach ein geeigneter Parameter zur allgemeinen Erkennung folgeentladungsbedingter Verzerrungen zu sein.

Abb. 3.23 zeigt zum Vergleich die entsprechenden Darstellungen für die Öle O3 und OB. Liegt der Schwerpunkt der Verteilung beim neuen Öl O3 noch bei um $6 \mu\text{s}$, so verschiebt sich dieser beim stark gealterten Öl OB deutlich nach hinten. Die meisten Impulse besitzen in diesem Fall t_2 um $7,5 \mu\text{s}$.

3.4.6.3 Verhältnisse der Amplituden der Maxima

Als besonders aussagekräftig haben sich Kombinationen einiger Kurvenformparameter erwiesen. Amplitudenverhältnisse und bestimmte Korrelations-Darstellungen besitzen gegenüber den Absolutwerten nicht zuletzt den großen Vorteil, dass sie unabhängig von einer eventuell ungenauen oder fehlerhaften Kalibrierung bzw. Normalisierung sind. Die Kalibrierung beeinflusst allerdings ausschließlich die Amplitudenwerte, so dass bei den Zeitwerten keine Abhängigkeit besteht.

Insbesondere das Verhältnis der Amplituden der beiden ersten Maxima, I_1 und I_2 , wurde schon früh als Maß für eine „Verzerrung“ der Impulsform gegenüber dem ungestörten Idealfall erkannt. Bei der verwendeten Messeinrichtung liegt im Normalfall, also bei einer Impulsantwort auf ein einzelnes TE-Ereignis ohne direkte Folgeentladungen im Abstand weniger μs , der Betrag des Verhältnisses $|I_2/I_1|$ ziemlich genau bei 0,8. Aufgrund der gegenüber bisherigen Arbeiten erweiterten Parametermatrix standen aber auch weitere Parameter zur Verfügung, die in die Auswertung einbezogen werden konnten.

Wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben, führt eine Überlagerung von Impulsantworten, die im Abstand weniger μs ausgelöst werden, zu einer Vergrößerung von I_2 gegenüber I_1 . Dieses Verhalten kann man nachweisen, indem man I_2 und I_1 in Korrelation zueinander betrachtet, z.B. durch ein Diagramm, in dem I_2 über I_1 aufgetragen wird. Abb. 3.24 zeigt die entsprechenden Konturdarstellungen für das neue Öl O7 und das stark gealterte Öl O1, die bereits vorstehend als Beispiele dienten.

Der Unterschied der Darstellungen ist augenfällig. Das neue Öl weist wesentlich weniger Streuung der Werte für betragsmäßig kleinere I auf. In diesem Bereich gruppieren sich die Datenpunkte bei beiden Proben weitgehend um eine Gerade mit $-I_2/I_1 = 0,8$ herum, von der die Werte für das gealterte Öl mit wachsenden Amplituden jedoch schnell signifikant abweichen, was beim neuen Öl erst bei größeren Amplituden auftritt. Durch die relativ grobe Quantisierung sind in der gezeigten Darstellung trotz der Interpolation der Häufigkeitsmatrix die einzelnen Klassen noch deutlich erkennbar. Andererseits werden in der Konturdarstellung Bereiche, in denen nur sehr vereinzelte Ereignisse vorliegen, weitgehend unterdrückt.

Abb. 3.25 zeigt zum Vergleich die Darstellungen für O3 und OB. Im Falle von OB zeigt sich noch deutlicher als bei O1 die Verlagerung der Häufung zu verzerrten Ereignissen, wobei eine starke Streuung auftritt. Dieses Verhalten korreliert mit der Verteilung der Zeitpunkte der ersten Nulldurchgänge in Abb. 3.18.

Die Abweichung von der Geraden mit der Steigung 0,8 ergibt sich durch TE-Ereignisse, die durch Folgeentladungen verzerrt sind. Werte, die sich auf der Geraden oder in ihrer

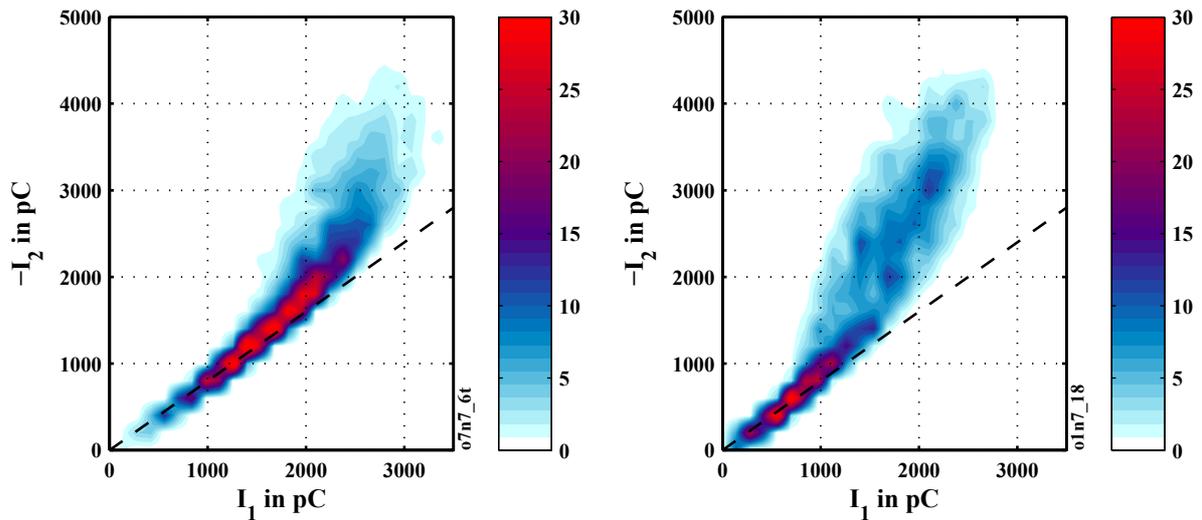


Abb. 3.24: Impulsamplituden $-I_2$ über I_1 für ein neues (O7, Shell Diala D) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, Konturdarstellung mit je 25 Klassen in x- und y-Richtung, Gerade für Steigung 0,8

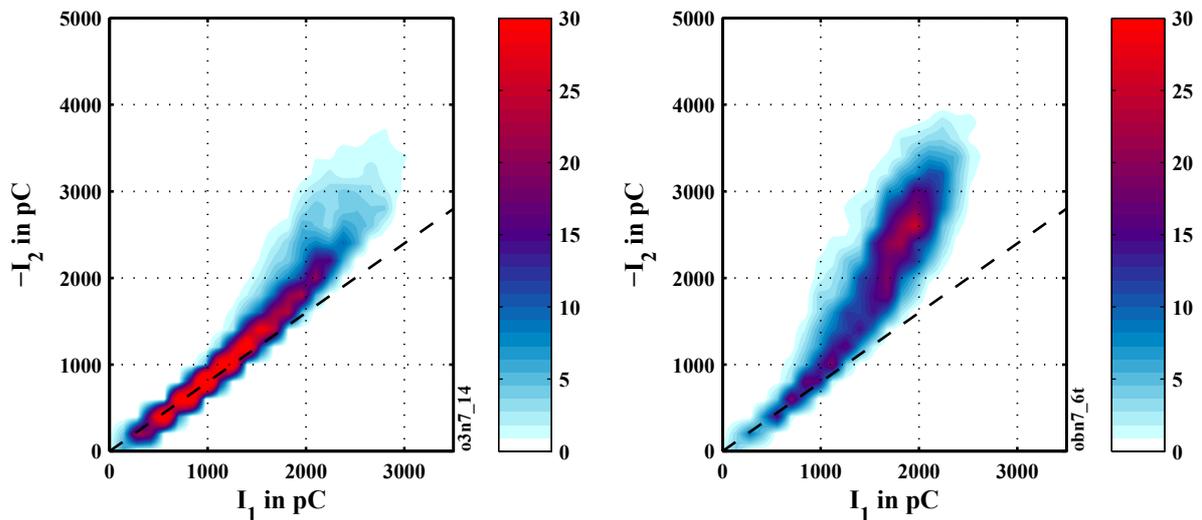


Abb. 3.25: Impulsamplituden $-I_2$ über I_1 für ein neues (O3, Shell Diala D) und ein betriebsgealtertes Öl (OB), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, Konturdarstellung mit je 25 Klassen in x- und y-Richtung

unmittelbaren Nähe befinden, entsprechen der „Idealform“ des ungestörten Signals. Dieser Zusammenhang macht es sinnvoll, anstelle einer Korrelation von I_1 und I_2 direkt den Quotienten I_2/I_1 der Amplituden aufzutragen, der ja für ungestörte TE unabhängig von der Signalamplitude sein sollte. Als unabhängige Größe für die Darstellung bietet sich die Amplitude des ersten Maximums an, die ja im Normalfall ein Maß für die Intensität des Signals ist.

Eine weitere Darstellung, die diesen Zusammenhang besser berücksichtigt, ergibt sich, wenn man den Betrag $|I_2/I_1|$ bildet, da dann alle Werte positiv werden, was allerdings nur sinnvoll ist, wenn, wie im Fall von Isolierölen, alle Teilentladungen die gleiche Polarität besitzen. Allgemein wählt man für die Darstellung i.d.R. nicht $|I_2/I_1|$, sondern $|I_2|/I_1$, da hierbei die Polarität der Signale erhalten bleibt, was für Untersuchungen an den meisten

Isolierungen erforderlich ist. Allerdings treten in Isolierölen Teilentladungen im Regelfall nur in der positiven Halbwelle, d.h. bei positiver Spannung an der Nadelelektrode auf.

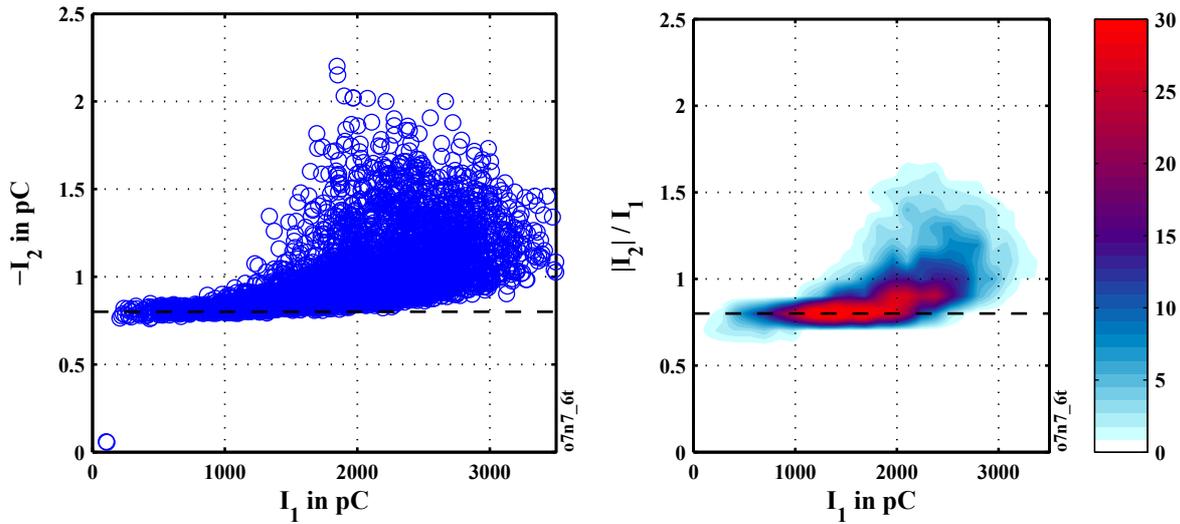


Abb. 3.26: Verhältnis $|I_2|/I_1$ der Impulsamplituden über I_1 für ein neues Öl (O7, Shell Diala D), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, Streudiagramm und entsprechende Konturdarstellung mit je 25 Klassen in x- und y-Richtung

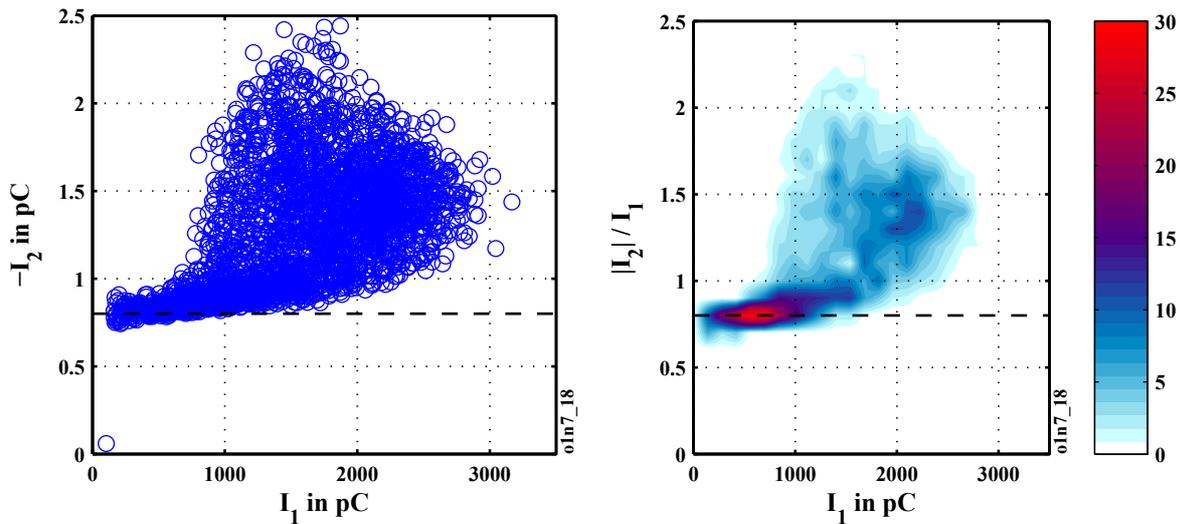


Abb. 3.27: Verhältnis $|I_2|/I_1$ der Impulsamplituden über I_1 für ein stark betriebsgealtertes Öl (O1), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, Streudiagramm und entsprechende Konturdarstellung mit je 25 Klassen in x- und y-Richtung

Die Abbildungen 3.26 und 3.27 zeigen die Streudiagramme von $|I_2|/I_1$ über I_1 für die beiden Öle O1 und O7 aus den vorstehenden Abbildungen, sowie die entsprechenden Kontur-Plots. Wie schon vorstehend angedeutet zeigen die Streudiagramme bei diesen Datenmengen praktisch keine erkennbare Differenzierung von Häufungen, während die Konturdiagramme die Verteilung der Einzelereignisse deutlich machen.

Für die Darstellung der Konturdiagramme wurden die Häufigkeiten auf eine Gesamtzahl von 1000 TE-Ereignissen normiert, um eine Vergleichbarkeit bei gleicher Skalierung zu erreichen. Die sich ergebenden Zahlenwerte für die Häufigkeiten können dadurch im Prinzip als Promille-Werte aufgefasst werden, wobei allerdings durch Festlegung einer oberen

Grenze (hier 30, also 3 %) im Regelfall einige Werte abgeschnitten sind. Durch die zur Glättung der Konturen vorgenommene zweifache Interpolation der Häufigkeitsmatrix handelt es sich aber sowieso eher um eine qualitative bzw. tendenzielle Darstellung als um eine quantitative Aussage, was zur Visualisierung aber völlig ausreicht.

Die Diagramme zeigen, dass die auftretenden TE-Ereignisse bei dem neuen Öl im Durchschnitt etwas höhere Amplituden aufweisen. Der deutlichste Unterschied besteht jedoch in der Verteilung der Werte in Bezug auf das Verhältnis der Amplituden I_1 und I_2 . Während beim neuen Öl der bei weitem größte Teil der $|I_2|/I_1$ -Werte kleiner als 1 ist – die meisten Datenpunkte gruppieren sich um den Idealwert von ca. 0,8 – existiert beim gealterten Öl eine recht breit gestreute, aber noch definiert erkennbare Gruppe bei I_1 um 2000 pC und $|I_2|/I_1$ um 1,5.

Diese Verteilung zeigt, dass im gealterten Öl bereits bei TE mit generell kleineren Amplituden Folgeentladungen auftreten, die zu einer Veränderung der Kurvenform und damit des Amplitudenverhältnisses $|I_2|/I_1$ führen. In diesem Fall sind praktisch alle TE mit Amplituden $I_1 > 400\text{pC}$ so stark gestört, dass $|I_2|/I_1 > 1$ wird. Beim neuen Öl sind selbst größere Impulse im Regelfall kaum verzerrt.

Abb. 3.28 zeigt die $|I_2|/I_1$ für die Ölproben O3 (neu) und OB (stark gealtert, s. auch Abb. 3.25). Das neue O3 verhält sich auch in dieser Darstellung ähnlich wie O7. Im Falle des betriebsgealterten Öls OB unterscheidet das hier nicht dargestellte Streudiagramm sich praktisch nicht von dem für O1 in Abb. 3.27. Aus dem Konturdiagramm geht jedoch ein deutlicher Unterschied in der Verteilung hervor. In diesem Fall liegt der Schwerpunkt eindeutig im Bereich $|I_2|/I_1 > 1$. Wurde bei O1 (Abb. 3.27) noch eine größere Konzentration von Impulsen mit $I_1 < 1000$ pC und $|I_2|/I_1$ zwischen 0,8 und 1 gefunden, so enthält diese Gruppe hier nur noch vergleichsweise wenige Ereignisse.

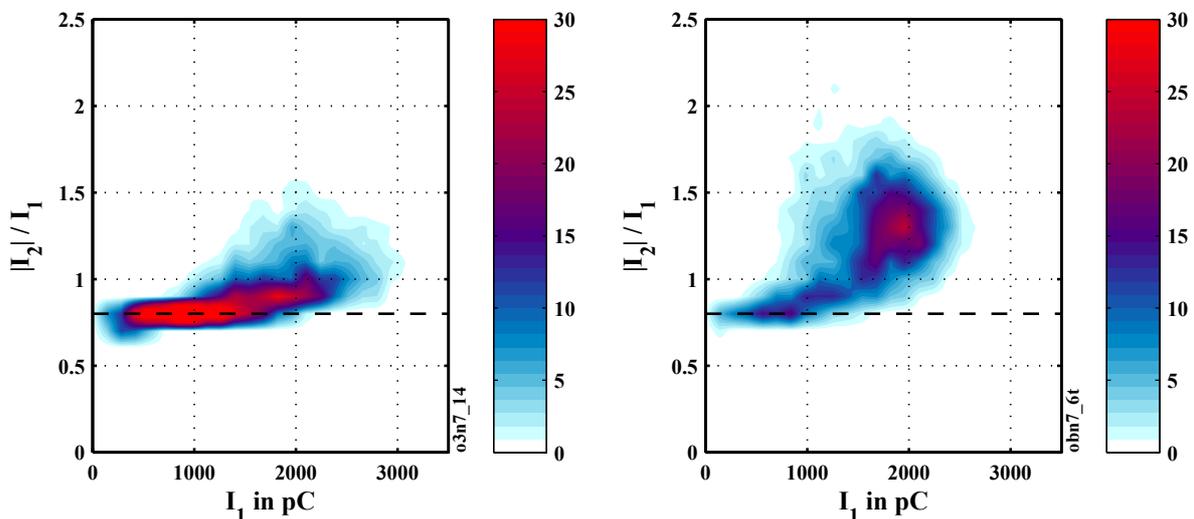


Abb. 3.28: $|I_2|/I_1$ über I_1 für ein neues (O3) und ein stark gealtertes Öl (OB), analog Abb. 3.25, Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, je 25 Klassen in x- und y-Richtung

Eine weitere Möglichkeit, diesen Zusammenhang anschaulich darzustellen, ist die Darstellung von $|I_2|/I_1$ in Histogrammform. Dabei kann man eine willkürliche Grenze zwischen „normalen“ und „gestörten“ Ereignissen (also solchen mit direkten Folgeentladungen) ziehen, z.B. beim Wert $|I_2|/I_1 = 1$. Bildet man nun das Verhältnis der Anzahl der Impulse mit $|I_2|/I_1 > 1$ zur Gesamtzahl der Ereignisse im Datensatz, dann kann man diesen als Zahlenwert m angeben, der als einfache Kenngröße nutzbar ist.

Ein kleiner Wert für m bedeutet, dass keine oder nur wenige TE mit $|I_2|/I_1 > 1$ vorliegen, was auf ein neues oder nicht nennenswert gealtertes Öl deutet. Ein großes m hingegen deutet auf eine hohe Konzentration an (flüchtigen) Abbauprodukten im Öl hin, die zur Bildung von Gasblasen durch Teilentladungen führen, in denen dann wiederum Folgeentladungen zünden können (s. [Pom05]).

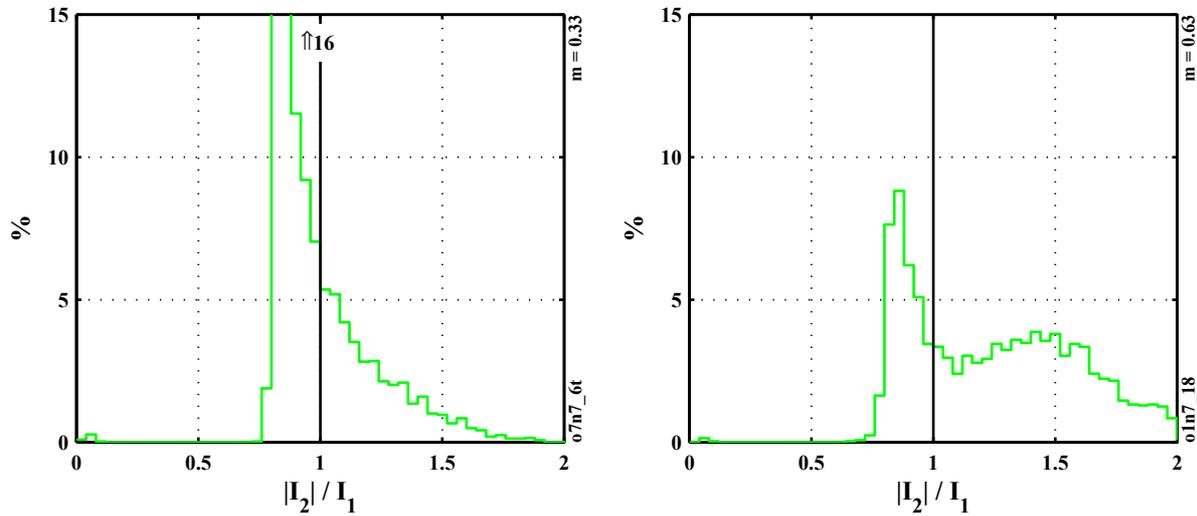


Abb. 3.29: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für ein neues Öl (O7) und ein betriebsgealtertes (O1), Datensätze wie in Abb. 3.26 und 3.27, 50 Klassen

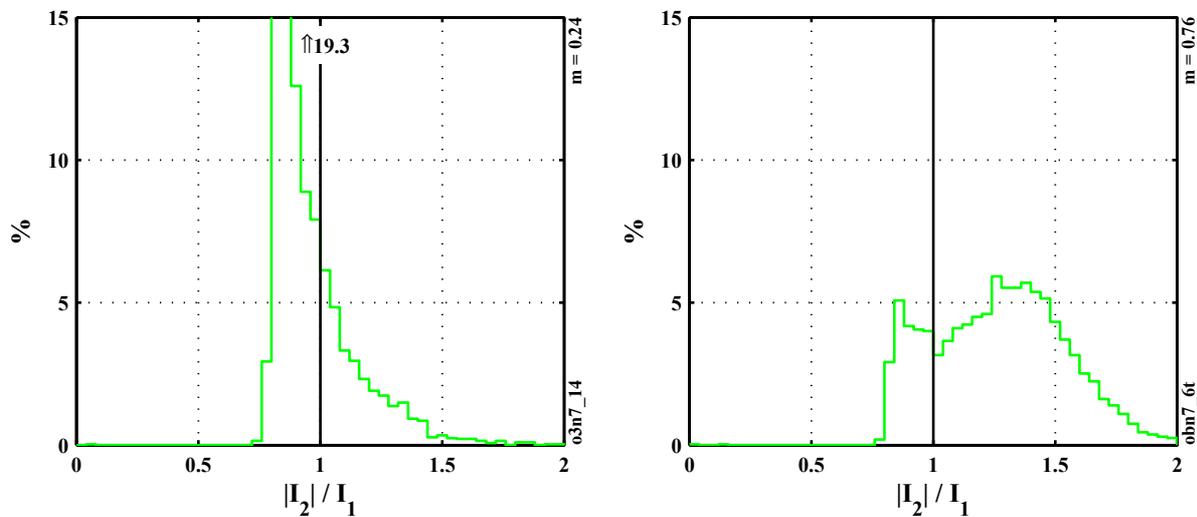


Abb. 3.30: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für ein neues Öl (O3) und für eine stark gealterte Ölprobe (OB, s. Abb. 3.28), 50 Klassen

Abb. 3.29 zeigt die Histogrammdarstellungen für die beiden vorstehend vorgestellten Datensätze mit der Angabe der ermittelten Werte für m . Der sich für O7 ergebende Wert $m = 0,33$ ist erheblich kleiner als der Wert für O1, der sich zu 0,63 ergibt. Letzteres bedeutet, dass mehr als die Hälfte der Impulse durch Folgeentladungen so stark verzerrt sind, dass die Amplitude des zweiten Maximums I_2 betragsmäßig größer wird als die des ersten Maximums I_1 .

Die Probe OB (Abb. 3.28) zeigt in der Histogrammdarstellung in Abb. 3.30 erwartungsgemäß eine noch stärkere Verschiebung zu verzerrten Impulsen als O1. m liegt hier bei 0,76.

Speziell im Vergleich mit einem weiteren neuen Öl (O3, wie O7 ein Shell Diala), dessen Wert $m = 0,24$ noch unter demjenigen von O7 liegt, werden die Unterschiede deutlich.

Weiterhin ist in den Histogrammen deutlich erkennbar, dass die Verteilung der Werte kein kontinuierliches Verhalten zeigt. Vielmehr ist die Gruppe um $|I_2|/I_1 \approx 0,8$ stets recht scharf definiert und fällt zu höheren Werten annähernd exponentiell ab. Eine zweite, stärker gestreute, aber dennoch deutlich abgesetzte Gruppe bildet sich um $|I_2|/I_1 \approx 1,5$, die bei gealterten Proben immer mehr ins Gewicht fällt und bei neuen Ölen praktisch nicht vorhanden ist.

Die Differenzierung und damit die Aussagekraft der Darstellung von $|I_2|/I_1$ ist offenbar umso eher gegeben, je energiereicher – also in der Amplitude höher – die TE-Ereignisse sind. Messungen, die bei kleineren Elektrodenabständen durchgeführt wurden – z.B. bei $d = 10$ mm – besitzen keine so charakteristische Aussagekraft. Aufgrund der geringeren Inhomogenität der Anordnung bei kleinerem Elektrodenabstand ist im Regelfall trotz der ebenfalls geringeren Prüfspannung die Feldstärke an der Nadelspitze im Allgemeinen kleiner. Das führt zu einer geringeren Ladungsverschiebung und damit zu TE mit kleinerer Amplitude.

Abb. 3.31 zeigt zwei Beispiele für Messungen mit $d = 10$ mm an O7 (neu, entspricht Abb. 3.26) und O1 (gealtert, entspricht Abb. 3.27). Die signifikanten Unterschiede, die bei den Messungen mit $d = 15$ mm auftreten, sind hier deutlich weniger ausgeprägt. Auch beim gealterten Öl ist die Anzahl der Impulse mit $|I_2|/I_1 > 1$ relativ klein. Allerdings ist eine deutliche Differenzierung dahingehend zu beobachten, dass beim neuen Öl O7 nur sehr wenige kleine Impulse mit $I_1 < 200$ pC auftreten, während diese bei O1 einen Großteil der Gesamtzahl ausmachen. Zudem tritt die charakteristische Auffächerung bei O1 bereits bei relativ kleinen I_1 -Werten um 200 pC in Erscheinung, während im Falle von O7 erst bei deutlich höheren Werten über 300 pC verzerrte Ereignisse auftreten.

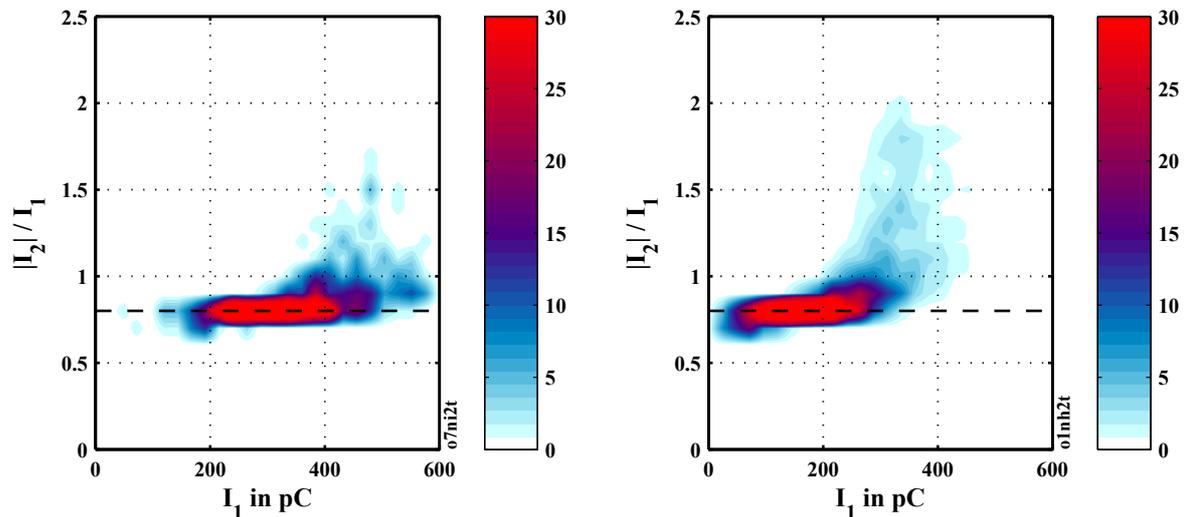


Abb. 3.31: $|I_2|/I_1$ über I_1 für ein neues (O7) und ein betriebsgealtertes Öl (O1), Messung mit MZ II, $d = 10$ mm, je 25 Klassen in x- und y-Richtung

In der Histogrammdarstellung in Abb. 3.32 ergibt sich zwar ebenfalls eine recht deutliche Differenzierung mit $m = 0,05$ für das neue und $m = 0,2$ für das betriebsgealterte Öl. Für die Öle O3 und OB ergeben sich die Werte 0 bzw. 0,33, immer auf zwei Nachkommastellen gerundet. Der Unterschied fällt allerdings nicht so deutlich aus wie bei den Messungen

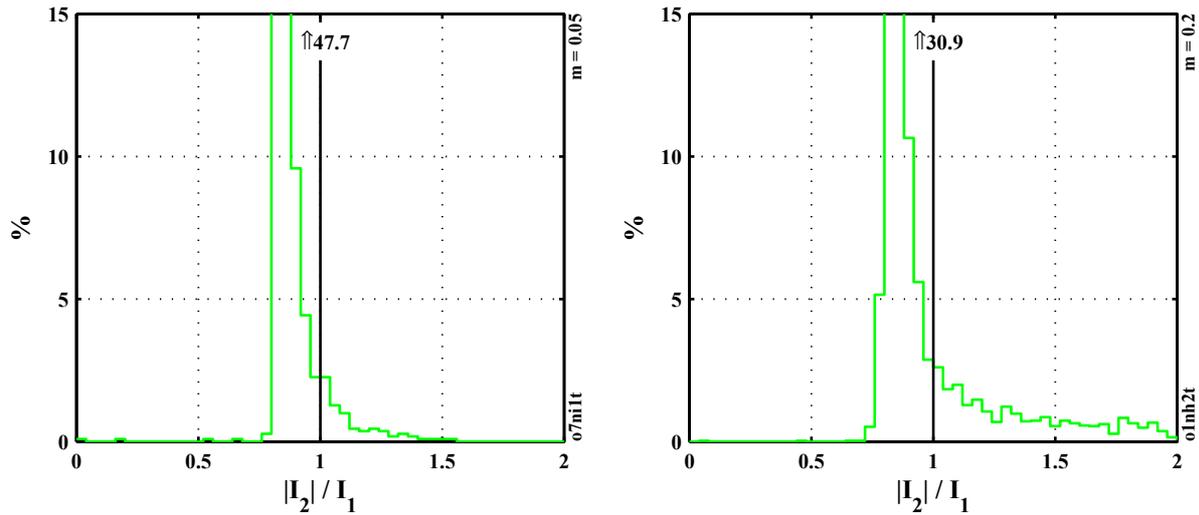


Abb. 3.32: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für ein neues Öl (O7) und ein betriebsgealtertes (O1), Datensätze wie in Abb. 3.29, Messung mit MZ II, $d = 10$ mm, 50 Klassen

mit $d = 15$ mm. Besonders beim Vergleich von Ölproben, die nur eine geringe Alterung aufweisen, ist die Differenzierung schwieriger, da es nur noch sehr wenige Impulse mit $|I_2|/I_1 > 1$ gibt und dementsprechend die Werte für m nur noch unwesentlich größer als 0 sind.

Die Aussagekraft der Messungen und der Auswertung hängt demzufolge generell vom Elektrodenabstand ab, wobei ein größerer Abstand zu einer besseren „gut–schlecht“-Differenzierung führt. Eine etwas deutlichere Differenzierung ergäbe sich zumindest in diesem Fall durch die Wahl einer anderen (kleineren) Grenze für das Kriterium „verzerrt – unverzerrt“.

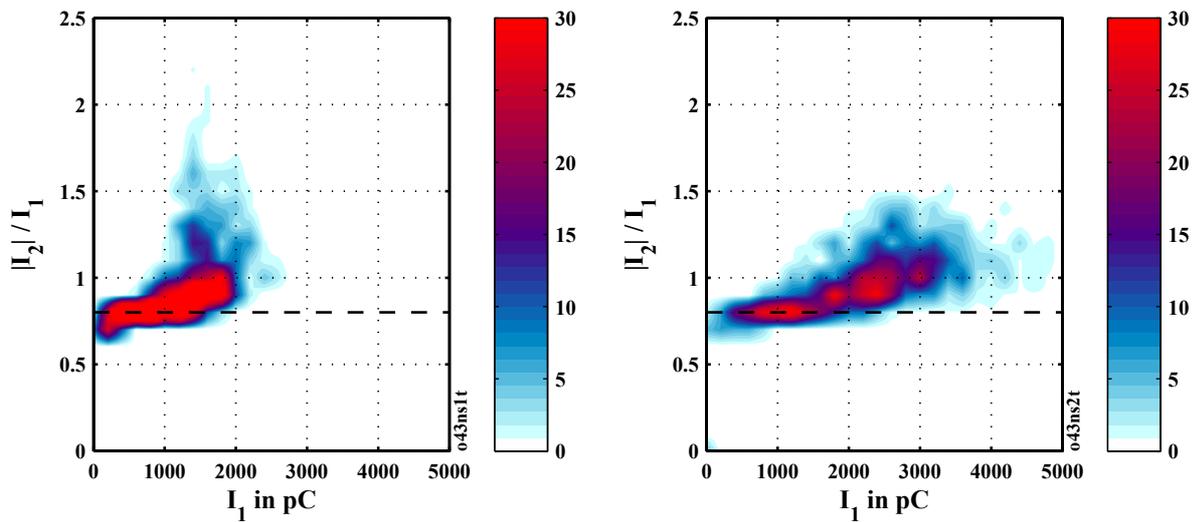


Abb. 3.33: $|I_2|/I_1$ über I_1 für eine leicht gealterte Ölprobe (O43), Messung mit MZ III, $d = 15$ mm, $d_s = 8,5$ mm (links) und $d_s = 20$ mm, je 25 Klassen in x- und y-Richtung

Neben dem Abstand der Elektroden zueinander ist es für das TE-Verhalten von großer Bedeutung, wie inhomogen die Anordnung ist. Die verrundete Form des Nadelhalters führt

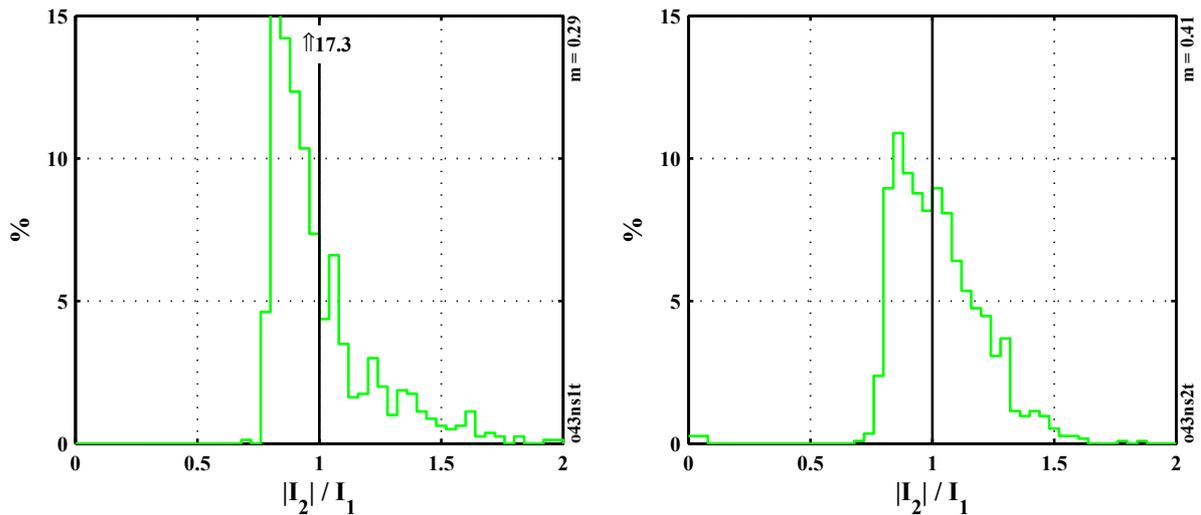


Abb. 3.34: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für eine kaum gealterte Ölprobe (O43), Messung mit MZ III, $d = 15$ mm, $d_s = 8,5$ mm (links) und $d_s = 20$ mm, 50 Klassen

zu einer u.U. erheblichen Homogenisierung des Feldes im Bereich der Nadelspitze, wenn die Nadel nicht weit genug aus dem Nadelhalter herausragt (s. Abschnitt 3.4.1.4).

Abb. 3.33 zeigt als Beispiel den Unterschied zwischen zwei Messungen mit der selben Nadel, jedoch mit unterschiedlichen Abständen d_s (d_s ist die aus der Nadelhalterung herausragende Länge der Nadel, also der Abstand zwischen der Nadelspitze und dem Ende der Nadelhalterung). Die Nadelhalterung der verwendeten Messzelle MZ III besitzt einen Durchmesser von 14 mm. Der Unterschied in der Verteilung der Ereignisse ist sehr deutlich. Neben generell deutlich höheren Amplituden bei größerem d_s ergibt sich auch eine breitere Verteilung der I_1 -Werte. Abb. 3.34 zeigt die entsprechenden $|I_2|/I_1$ -Histogramme. Für $d_s = 20$ mm ergibt sich ein deutlich höherer Wert für m als mit $d_s = 8,5$ mm.

3.4.6.4 Flächen unter der Kurve

Verzerrungen der Impulsantworten des TE-Detektors wirken sich nicht nur auf die Amplituden der Maxima und die Nulldurchgänge aus, sondern auf den gesamten Verlauf der Kurve, so dass durch eine Auswertung der Flächen unter den Maxima eventuell zusätzliche Informationen gewonnen werden können. Bei unverzerrten Impulsen sind die Flächen A_1 , A_2 und A_3 unter den Maxima I_1 , I_2 und I_3 proportional zu den Amplituden. Bei durch Folgeentladungen verzerrten Signalen ist diese Proportionalität nicht mehr gegeben, zumal es auch vorkommen kann (speziell im Falle von A_1 und I_1), dass zusätzliche lokale Maxima auftreten.

Durch die Überlagerung von Folgeentladungen im Bereich um das erste Maximum wird grundsätzlich der Zeitpunkt des ersten Nulldurchgangs t_4 zu größeren Werten hin verschoben, was an sich schon zu einer überproportionalen Vergrößerung der Fläche führt. Zusätzlich wird allein durch die Änderung des Verhältnisses I_2/I_1 das Verhältnis A_2/A_1 der Flächen unter den Maxima verändert. Für $|A_2|/A_1$ beträgt der Wert bei unverzerrten Ereignissen ungefähr 2,17.

Abb. 3.35 zeigt das Verhältnis $|A_2|/A_1$ der Flächen unter den beiden ersten Maxima für O3 und OB. Ähnlich wie bei der Darstellung von $|I_2|/I_1$ (Abb. 3.30) ergibt sich für das

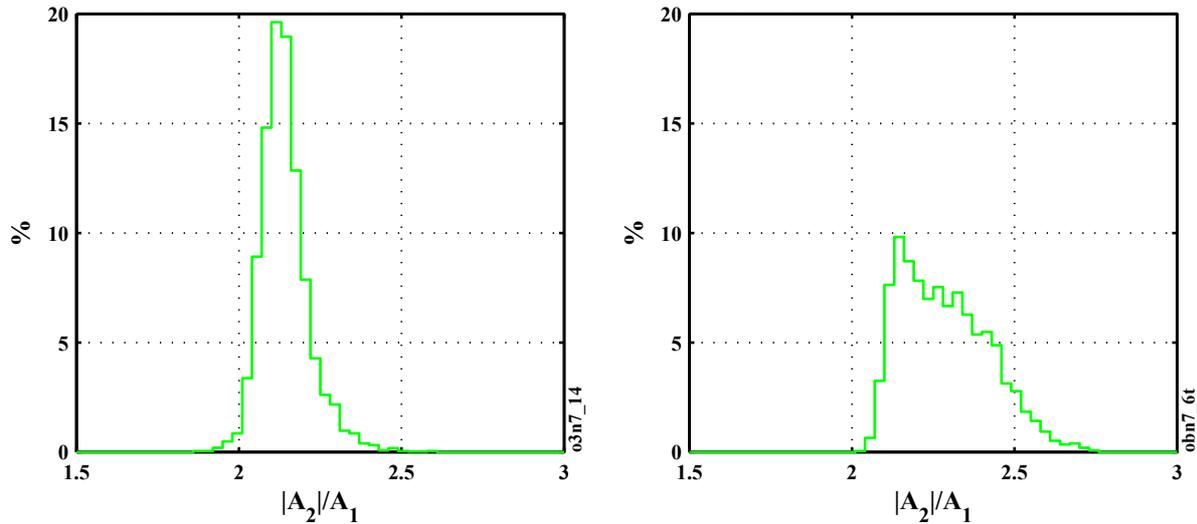


Abb. 3.35: $|A_2|/A_1$ -Histogramme für ein neues Öl (O3) und ein betriebsgealtertes (OB), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, 50 Klassen

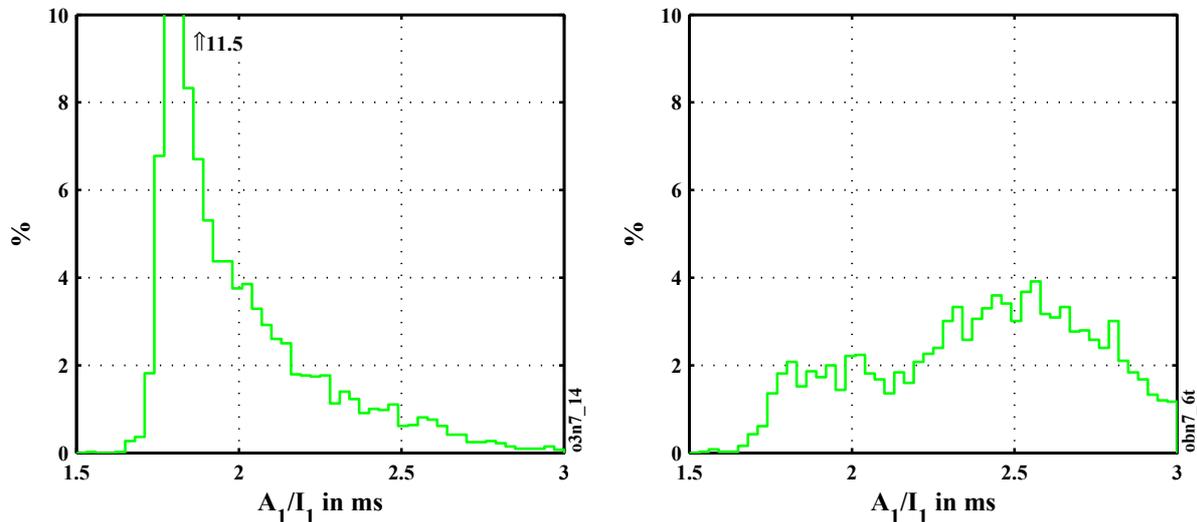


Abb. 3.36: A_1/I_1 -Histogramme für ein neues Öl (O3) und ein betriebsgealtertes (OB), Messung mit MZ I, $d = 15$ mm, 50 Klassen

gealterte Öl ein deutlich größerer Anteil von Ereignissen mit größeren Werten.

Bildet man den Quotienten der Fläche A_1 unter dem ersten Maximum und der Amplitude I_1 des ersten Maximums, dann erhält man Aufschluss speziell über den Grad der Verzerrungen im Bereich des ersten Maximums. Für Kalibriersignale ergibt sich ein Wert von ungefähr 1,75 ms (die Einheit ms resultiert aus der Skalierung der Flächenwerte A_i auf pCms zum Erhalt handhabbarer Zahlenwerte), während für Impulse mit Folgeentladungen – vor allem, wenn diese lokale Maxima aufweisen, siehe auch Abb. 3.4 auf Seite 75 – dieser Wert deutlich größer wird. Abb. 3.36 zeigt die resultierenden Werte für die Proben O3 und OB.

Bei einem Elektrodenabstand von 10 mm ergeben sich für die gleichen Ölproben die in Abb. 3.37 gezeigten Verteilungen. Die Differenzierung ist in diesem Fall zwar weniger ausgeprägt als bei $d = 15$ mm, aber immer noch gut erkennbar. Dies ist dadurch bedingt, dass bei kleineren Elektrodenabständen Folgeentladungen tendenziell früher auftreten, wodurch

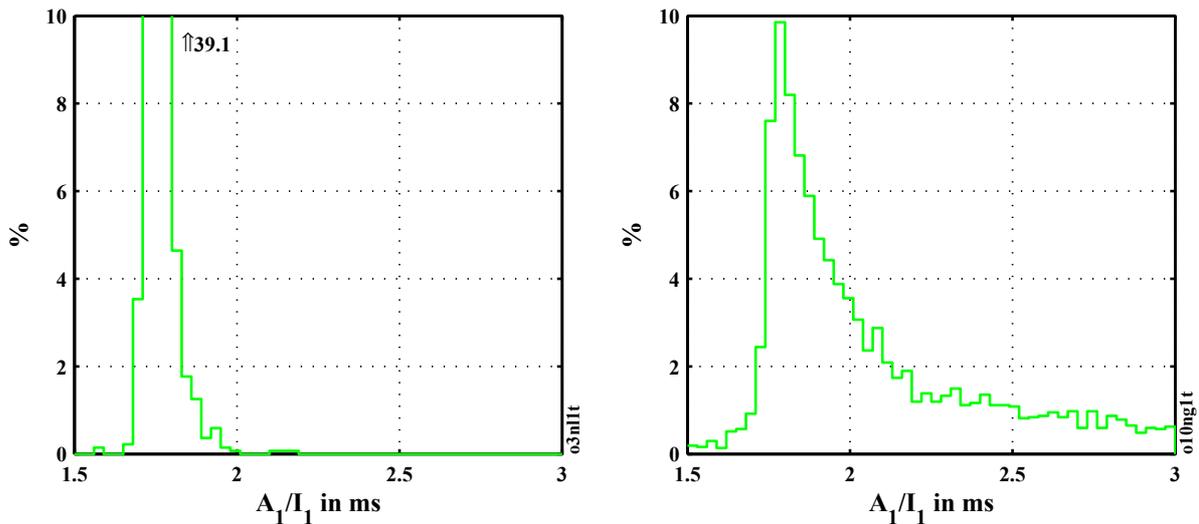


Abb. 3.37: A_1/I_1 -Histogramme für ein neues Öl (O3) und ein betriebsgealtertes (O10, identisch mit OB), Messung mit MZ II, $d = 10$ mm, 50 Klassen

besonders der Bereich um das erste Maximum erheblich verzerrt wird. Die auftretenden Einsattelungen führen zu einer erheblichen Vergrößerung der A_1/I_1 -Werte. Der Anteil verzerrter Impulse ist allerdings bei kleinem Elektrodenabstand generell kleiner, was zu dem auch beim gealterten Öl dominanten Peak bei Werten um 1,75 ms führt.

3.4.6.5 Komplexere Auswertungen

Einen weiteren, auf den ersten Blick vergleichsweise komplexen Ansatz stellt ein Vergleich der normierten Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden für die beiden ersten Maxima dar [Pat08c]. Hierzu werden für I_1 und I_2 die Summenhäufigkeiten gebildet, wobei prinzipbedingt auf eine identische Skalierung und Klasseneinteilung zu achten ist. Die I_1 -Werte werden vorher angeglichen, indem sie mit 0,8 multipliziert werden.

Dies resultiert aus dem „Idealverhältnis“ von 1 : 0,8 für nicht durch Folgeentladungen verzerrte Impulse (s. Abschnitt 3.4.6.1 und 3.4.6.3), so dass sich für solche identische Verteilungen ergeben sollten. Anschließend bildet man die Differenz der beiden sich ergebenden Verläufe, sinnvollerweise, indem man die Summenhäufigkeit von I_2 von derjenigen von 0,8 I_1 subtrahiert. Das Integral der sich ergebenden Differenzfläche wird mit A_C bezeichnet, die Einheit der Fläche ist pC.

Abb. 3.38 zeigt Beispiele für diese Darstellung anhand der bereits vorgestellten Datensätze für O7 und O3 (neu) sowie O1 und OB (gealtert), gemessen mit MZ I und $d = 15$ mm. Der Unterschied der Flächen ist deutlich erkennbar. Bei den gealterten Ölen sind die Differenzflächen jeweils wesentlich größer.

Auffallend ist, dass die beiden gealterten Öle im Beispiel fast die gleiche Fläche besitzen ($A_C = 841$ pC für O1 und $A_C = 843$ pC für OB), wobei die Formen der Flächen sich deutlich unterscheiden. Im Falle von OB ist der Verlauf der Einhüllenden steiler und besitzt ein höheres Maximum als das bei O1 der Fall ist. Für O7 und O3 ergeben sich mit $A_C = 492$ pC bzw. 320 pC deutlich geringere Werte.

Bei allen Datensätzen lässt sich beobachten, dass bei sehr kleinen TE-Amplituden I_1 die Verläufe praktisch deckungsgleich sind, was darauf zurückzuführen ist, dass kleine TE keine

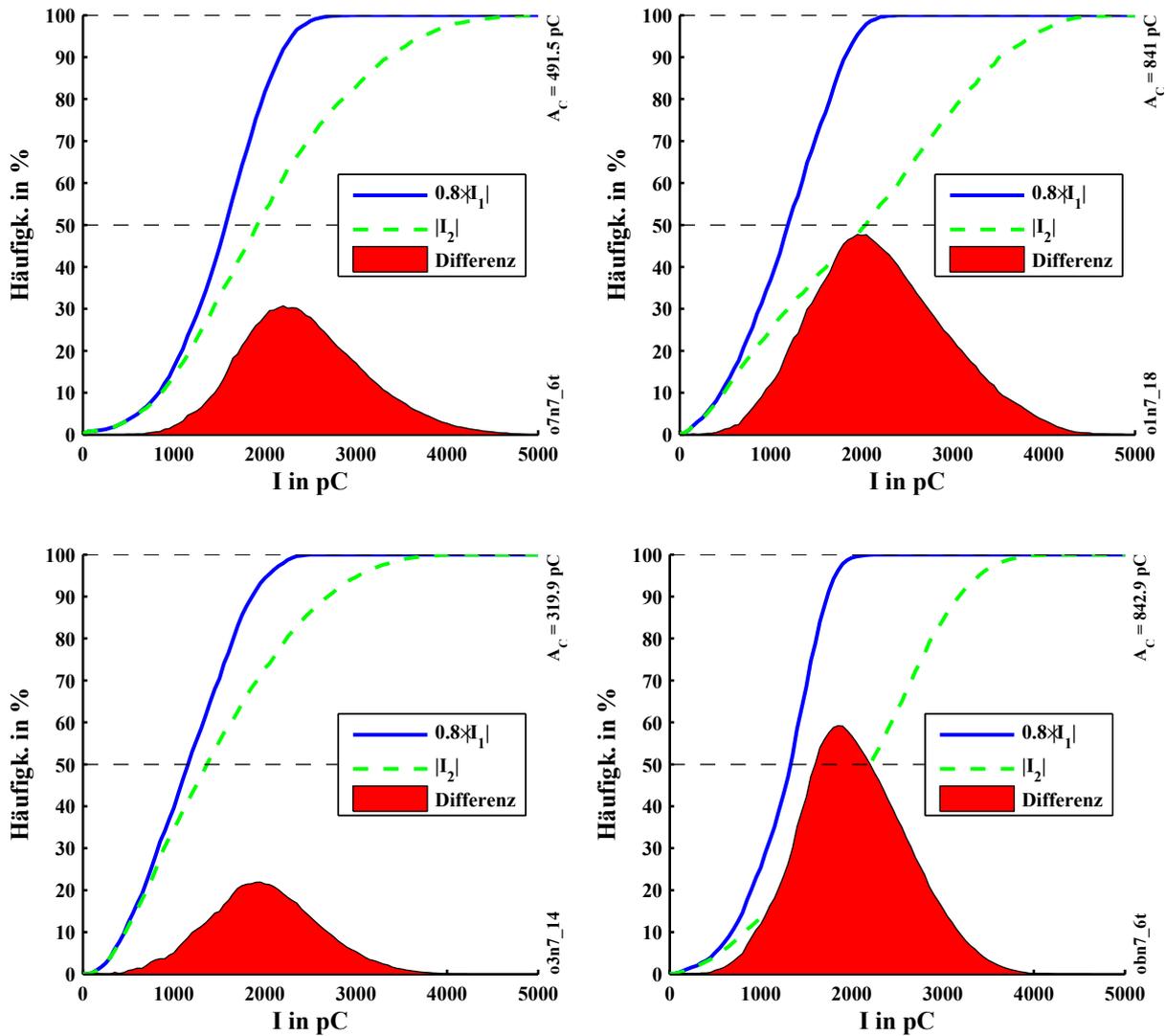


Abb. 3.38: Vergleich der normierten Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden $0,8 \cdot I_1$ und I_2 für O7 und O3 (links, neu) und O1 sowie OB (rechts, gealtert), Datensätze wie vorstehend

nennenswerten Verzerrungen durch Folgentladungen aufweisen. Die Fläche als Zahlenwert kann bereits als Diagnoseparameter genutzt werden, wobei eine detailliertere Analyse der Form der Fläche möglicherweise noch weitere Informationen liefern kann. Letztlich ergibt sich die Form jedoch aus der Abweichung der $|I_2|/I_1$ von der 0,8-Linie und ist dementsprechend auch aus der entsprechenden Darstellung aus Abschnitt 3.4.6.3 ableitbar.

Auch im Falle der Flächen A_C gilt, dass ein größerer Elektrodenabstand eine bessere Differenzierung zwischen unterschiedlich gealterten Ölproben liefert. Bei Messungen mit $d = 10$ mm sind die Flächen an sich um eine bis zwei Größenordnungen kleiner, was unter anderem daran liegt, dass die I -Achse, über die ja zur Bestimmung der Fläche integriert wird, aufgrund der erheblich kleineren Amplitudenwerte anders skaliert werden muss, um eine sinnvolle Auflösung zu erreichen, und andererseits am vorstehend schon erwähnten geringeren Anteil an verzerrten Impulsen.

Wie schon im Falle anderer Parameter wird hier ebenfalls deutlich, dass mit unterschiedlichen Elektrodengeometrien unterschiedliche Phänomene bestimmend sind.

3.4.6.6 Vergleich von TE-Parametern mit Daten aus Standard-Analysen

Für eine Reihe von Ölproben lagen Daten der chemischen und elektrischen Standard-Analysen (DGA, Durchschlagprüfung, Verlustfaktor usw.) vor, so dass in diesen Fällen z.B. ein Vergleich zwischen Parametern von Teilentladungsmessungen und dem Gehalt an bestimmten Abbauprodukten möglich war. Eine Korrelation zwischen dem Gehalt an kurzkettigen Kohlenwasserstoffen und der in Abschnitt 3.4.6.5 vorgestellten Differenz der Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden wurde bereits in [Pat08c] präsentiert.

Da ein Zusammenhang zwischen der Konzentration bestimmter Abbauprodukte und dem Teilentladungsverhalten vermutet wird, ist ein Vergleich von Teilentladungs-Parametern mit den Ergebnissen der DGA sinnvoll. Fraglich ist, welche Abbauprodukte einen nennenswerten Einfluss z.B. auf die Intensität von Folgeentladungen haben und wie sich dieser Einfluss in den Kurvenformparametern niederschlägt. Da sich die Folgeentladungen, die zu Verzerrungen des TE-Signals am Ausgang des Detektors führen, nach physikalischem Verständnis in Gasblasen bilden, die wiederum von der jeweils ersten Entladung in einer Sequenz verursacht wird, liegt es nahe, den Gehalt an flüchtigen Bestandteilen des Öls, also v.a. von kurzkettigen Kohlenwasserstoffen, näher zu betrachten, da diese durch ihre leichtere Verdampfung zu einer verstärkten Bildung von Gasblasen führen können.

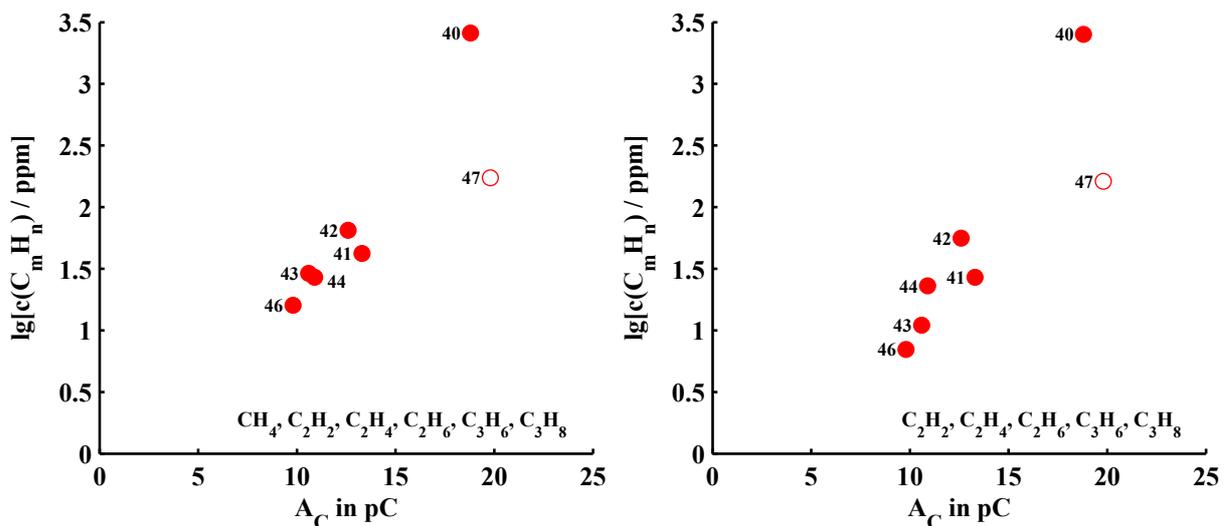


Abb. 3.39: Konzentration kurzkettiger Kohlenwasserstoffe über Differenzfläche A_C der Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden (gemessen mit MZ II, $d = 10$ mm) für 7 Ölproben, links alle $C_m H_n$, rechts ohne Methan (CH_4)

Abb. 3.39 zeigt den Zusammenhang zwischen der Konzentration kurzkettiger Kohlenwasserstoffe (Summe der Konzentrationen von $CH_4, C_2H_2, C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6$ und C_3H_8) und der in Abschnitt 3.4.6.5 vorgestellten Differenzfläche A_C der Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden $0,8 I_1$ und I_2 für eine Reihe von Ölproben (O40–O47), die bis auf O47 aus Transformatoren der Leistungsklasse zwischen 2 und 6 MVA mit einer Oberspannung von 30 kV und Unterspannungen von 500 V bis 1,2 kV stammen. O47 stammt aus einem 110 kV/6,3 kV-Umspanner mit einer Leistung von 16 MVA. Es ist eine deutliche Tendenz erkennbar, dass bei größeren Werten von A_C auch die Konzentration der gelösten $C_m H_n$ größer ist.

In Abb. 3.39 rechts wurde der Gehalt von Methan (CH_4) unberücksichtigt gelassen, was zumindest bei den Proben O41–O46 zu einer etwas anderen Verteilung führt. Speziell O46

und O43 enthalten relativ viel Methan. Sie werden dementsprechend in der Darstellung deutlich nach unten geschoben.

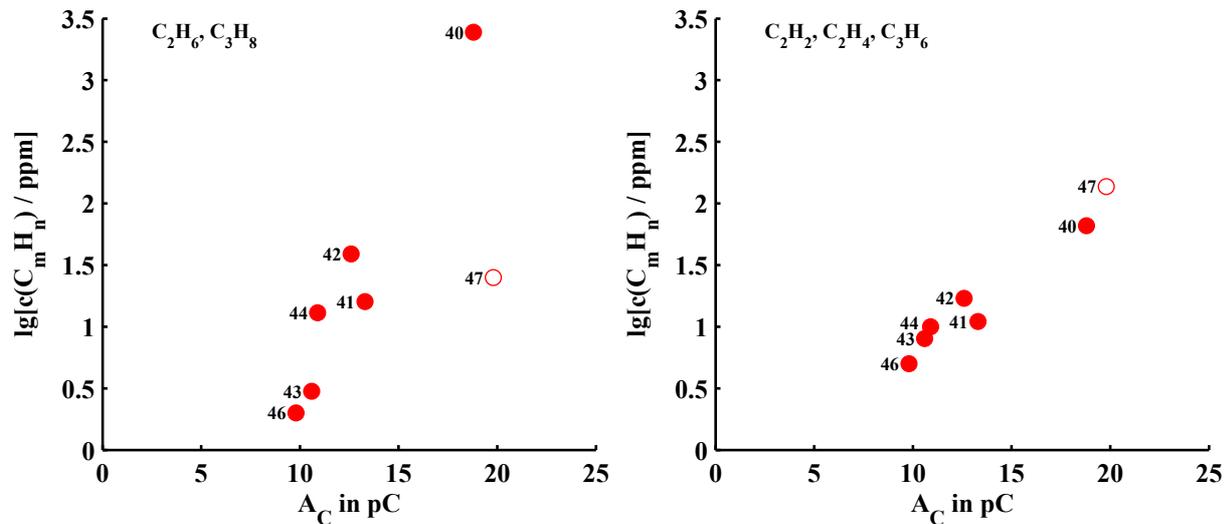


Abb. 3.40: Konzentration kurzkettiger Kohlenwasserstoffe über Differenzfläche A_C der Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden (gemessen mit MZ II, $d = 10 \text{ mm}$) für 7 Ölproben, links die gesättigten Kohlenwasserstoffe (C_2H_6 und C_3H_8), rechts die ungesättigten

Teilt man die Darstellung in gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe auf, dann ergibt sich die Darstellung in Abb. 3.40. Es ergibt sich offensichtlich eine recht gute Korrelation, wenn nur die ungesättigten Kohlenwasserstoffe – in diesem Fall C_2H_2 (Ethin), C_2H_4 (Ethen) und C_3H_6 (Propen) – betrachtet werden, die charakteristisch für elektrische Alterung durch Prozesse mit höheren Temperaturen sind [Gib95, Küc05]. Zur Konzentration des ebenfalls für diese Prozesse charakteristischen Wasserstoffes, der neben Ethin ein Schlüsselgas für Lichtbogen- bzw. Funkenentladungen ist, ergibt sich hingegen kein erkennbarer Zusammenhang.

O47 fügt sich hier zwar gut in das Schema ein, jedoch ist in diesem Fall hinzuzufügen, dass die Probe laut Protokoll einen extrem hohen Gehalt an C_2H_2 besitzt, während die Konzentrationen anderer Kohlenwasserstoffe, speziell der gesättigten, im Vergleich eher gering sind. Auch stammt diese Ölprobe aus einem Transformator einer wesentlich höheren Leistungsklasse.

Die Durchschlagspannungen zeigen in diesem Zusammenhang keine Korrelation zu Teilentladungsparametern. Die Werte für alle untersuchten Ölproben liegen zwischen 70 und 75 kV (gemessen mit der DIN-Anordnung nach VDE 0370 Teil 5), lediglich O47 zeigt mit 63,9 kV einen etwas geringeren Wert. Beim Vergleich der Verlustfaktoren ergibt sich zwar eine gewisse Korrelation, jedoch fällt in diesem Fall O42 aus dem Rahmen (s. Abb. 3.41). Für O47 liegt in diesem Fall kein Wert vor.

Abb. 3.42 zeigt die Färbungen der untersuchten Ölproben. In den Prüfprotokollen der Standard-Analyse sind für O41, O42, O43, O44, O46 und O47 die Farbzahlen 2, 1,5, 2, 1,5, 2 bzw. 6,5 angegeben. Im Falle von O40 fehlt die Angabe, sie dürfte nach dem Erscheinungsbild zu urteilen jedoch bei 1,5 bis 2 liegen. Die Klassifizierung anhand der Verfärbung bestätigt das abweichende Verhalten der Probe O47, bei der offensichtlich andere Alterungsprozesse bzw. Abbauprodukte eine Rolle spielen.

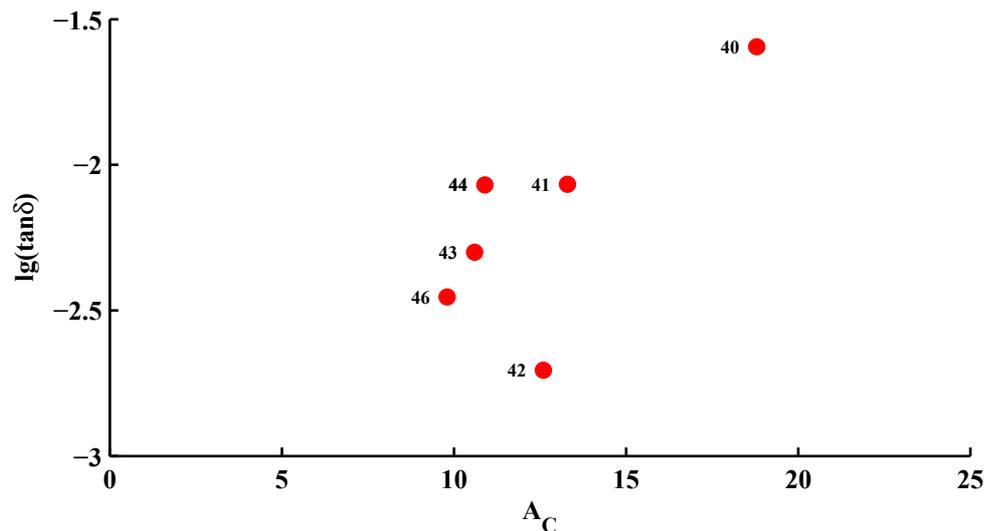


Abb. 3.41: Verlustfaktor $\tan\delta$ (logarithmisch, ermittelt nach VDE 0380 Teil 2) über Differenzfläche A_C der Summenhäufigkeiten der Impulsamplituden (gemessen mit MZ II, $d = 10$ mm) für 6 der 7 untersuchten Ölproben

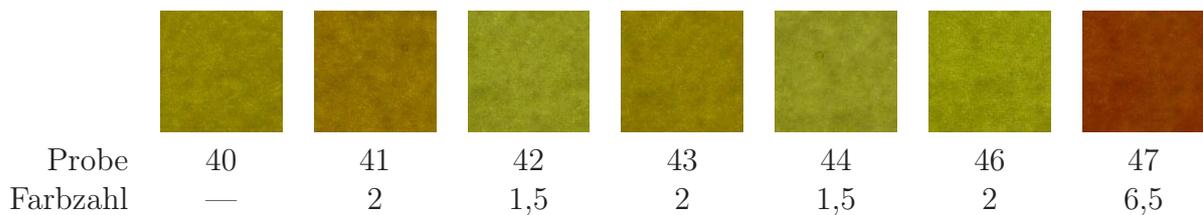


Abb. 3.42: Farbliches Erscheinungsbild der 7 untersuchten Ölproben mit Farbzahl lt. Analyseprotokoll

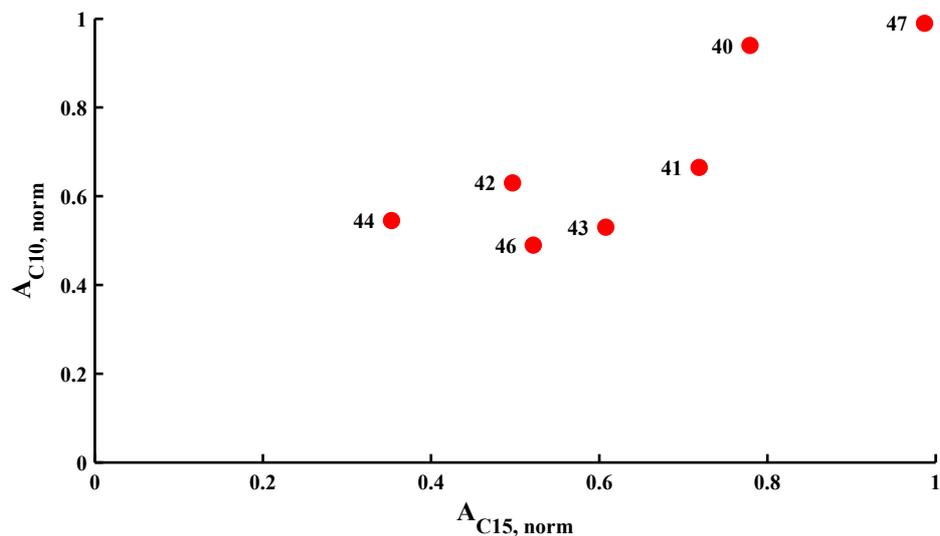


Abb. 3.43: Vergleich der A_C bei $d = 15$ mm (Abszisse) und $d = 10$ mm (Ordinate) für die 7 Ölproben

Ab. 3.43 zeigt einen Vergleich der A_C -Werte bei den beiden unterschiedlichen Elektrodenabständen. Dabei sind die Werte für $d = 10$ mm auf 20 pC normiert, diejenigen für $d = 15$ mm auf 1000 pC. Es ist erkennbar, dass zwar tendenziell eine Korrelation vorliegt,

jedoch bei einigen Proben Differenzen auftreten. Dabei besteht ein Zusammenhang zum Auftreten später Folgeentladungen dahingehend, dass die normierten Werte für $d = 10$ mm größer als diejenigen für $d = 15$ mm sind, wenn nur vergleichsweise wenige späte Folgeentladungen auftreten. Dieser Zusammenhang ergibt sich bei Betrachtung der Quotienten $|I_2|/I_1$ der Amplituden der Maxima und der Zeitpunkte der zweiten Maxima t_2 .

Dieses Verhalten führt dazu, dass für die mit dem größeren Elektrodenabstand ermittelten Werte keine so gute Korrelation zwischen A_C und dem Gehalt an kurzkettingen Kohlenwasserstoffen erkennbar ist. In diesen Fällen müssen für die Auswertung zusätzliche Parameter berücksichtigt werden, die auch auf Ereignisse mit Folgeentladungen im Bereich des ersten Nulldurchgangs oder danach reagieren, z.B. der Zeitpunkt t_2 des zweiten Maximums.

3.4.6.7 Einfluss des Wassergehaltes

Durchschlagfestigkeit im homogenen Feld und Verlustfaktor sind vom Wassergehalt des Öls abhängig. Die elektrischen Eigenschaften werden dabei besonders verschlechtert, wenn der Wassergehalt so groß ist, dass die Löslichkeit überschritten wird und eine Emulsion vorliegt. Dies kommt besonders dann vor, wenn ein Transformator erheblichen Lastwechseln und damit Änderungen der Temperatur ausgesetzt ist.

Bei einer bestimmten Temperatur stellt sich nach hinreichend langer Zeit ein Gleichgewichtszustand der Wassergehalte in Zellulose und Öl ein. Da der Übergang von Wasser zwischen Öl und Zellulose nur an den Grenzflächen zwischen den beiden Komponenten stattfindet, ist je nach vorheriger Belastungsdauer beim Abkühlen ein längerer Zeitraum erforderlich, um wieder ein Gleichgewicht zu erreichen. Sinkt die Temperatur zu schnell, so wird die Löslichkeit von Wasser im Öl überschritten, es kommt zu einem Ausfall flüssigen Wassers und damit zur Bildung einer Emulsion.

Eine solche Emulsion führt zu einer erheblichen Reduktion der elektrischen Festigkeit und zu einer Erhöhung des Verlustfaktors. Dementsprechend ist auch ein Einfluss auf das Teilentladungsverhalten zu erwarten. Eine Versuchsreihe sollte Aufschluss über diesen Einfluss geben. Ausgangsbasis bildete eine Probe eines ungebrauchten Öls (Shell Diala D, ursprünglich identisch mit O7). Das Öl war zwar prinzipiell neu, es war jedoch über einen Zeitraum von ca. 2 Jahren mit Luftzutritt offen im Labor aufbewahrt worden und wies bereits eine leicht dunklere Färbung (ein helles Orange) auf als im Ursprungszustand (hellgelb).

Das Öl wurde im Vakuumofen für 6 Stunden bei 60 °C und 150 hPa entgast, um einen definierten Ausgangszustand zu schaffen. Aus dem entgasten Öl wurden zwei Vergleichsproben angefertigt, eine bei Raumtemperatur annähernd wassergesättigte sowie eine bei Raumtemperatur übersättigte, um den Einfluss ausschließlich gelösten Wassers und denjenigen von emulgierten Tröpfchen analysieren zu können.

Da die Sättigungskonzentration von Wasser in handelsüblichen Transformatorölen bei Raumtemperatur in der Größenordnung von lediglich 30 – 50 ppm liegt (was ungefähr einem Tropfen Wasser auf einen halben Liter Öl entspricht), wurde von der gesättigten Probe kein grundsätzlich anderes Verhalten erwartet als von der Ausgangsprobe.

Die Wasseranreicherung erfolgte durch das Einbringen einiger Tropfen Wasser in das Öl und anschließendes Lagern bei 50 °C für 10 Stunden. Beim anschließenden Abkühlen wurde darauf geachtet, dass keine Trübung auftritt, die bereits auf eine Übersättigung und

damit auf die Bildung einer Emulsion hingewiesen hätte. Das Öl wurde schließlich vom überschüssigen Wasser abgegossen. Um eine übersättigte Probe zu erhalten, wurde mehr Wasser zugegeben und die Lagerung bei etwas höherer Temperatur (ca. 60 °C) für ungefähr 100 Stunden durchgeführt. Die Teilentladungsmessungen wurden mit Messzelle MZ III mit $d = 15$ mm und $d_s = 20$ mm durchgeführt.

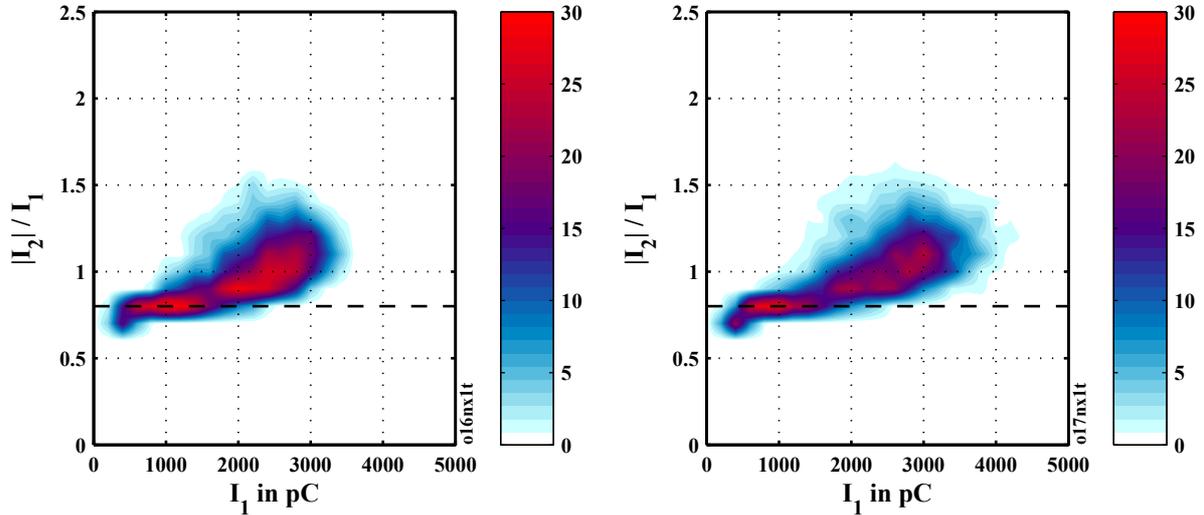


Abb. 3.44: $|I_2|/I_1$ über I_1 für das entgaste (links) und das mit wenig Wasser versetzte Öl

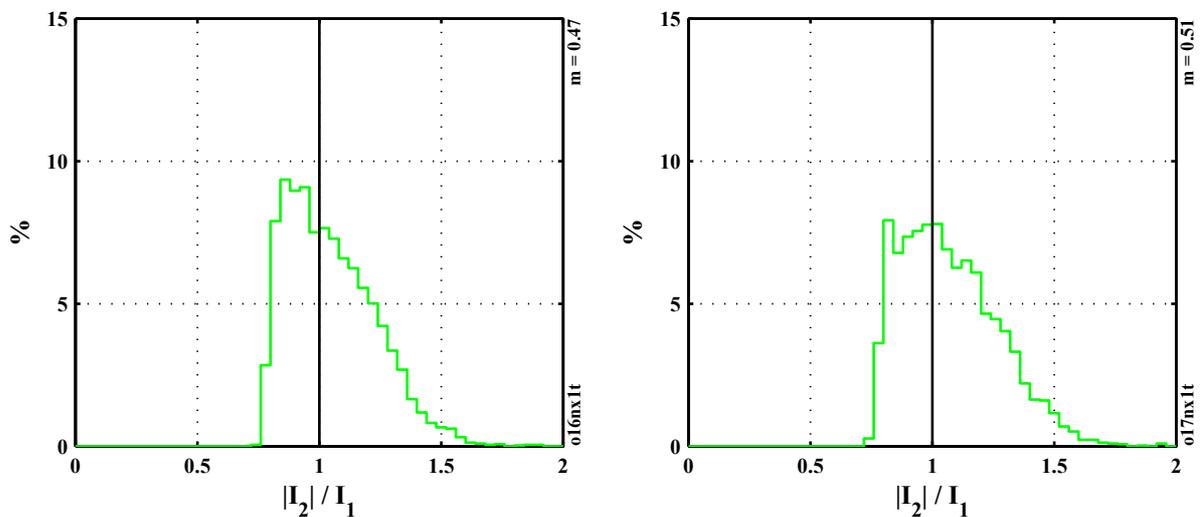


Abb. 3.45: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für das entgaste (links) und das mit wenig Wasser versetzte Öl

Wie erwartet zeigt die nicht übersättigte Probe (Wasser vollständig im Öl gelöst) kaum Unterschiede zum ursprünglichen, entgasten Öl. In der $|I_2|/I_1$ -Histogrammdarstellung ergibt sich zwar eine geringfügige Zunahme von m – also dem Anteil der Impulse mit $|I_2|/I_1 > 1$ bezogen auf die Gesamtzahl – von 0,47 auf 0,51, was jedoch nicht als wesentliche Änderung anzusehen ist. Die Amplituden der größten auftretenden Impulse vergrößern sich ebenfalls geringfügig. Abb. 3.44 zeigt die entsprechenden Konturdarstellungen, Abb. 3.45 die $|I_2|/I_1$ -Histogramme. Die mittlere Impulsrate liegt sowohl bei der entgasten als auch bei der mit Wasser versetzten Probe bei etwas unter 1 Impuls pro Sekunde.

Die Probe, die über mehrere Tage mit Wasser versetzt bei erhöhter Temperatur gelagert war, wurde unmittelbar nach der Entnahme aus dem Ofen im warmen Zustand (Öltemperatur 50 °C) in die Messzelle gegeben. Da die Messzelle nicht beheizbar ist (s. auch Abschnitt 3.4.1.3), kühlte die Probe aufgrund der großflächigen Messing-Grundplatte sowie der Hochspannungselektrode relativ schnell ab. Während des Abkühlvorganges wurden TE-Messungen durchgeführt. Zwischen den einzelnen Messungen wurde immer wieder die Öltemperatur gemessen, wobei sich herausstellte, dass sich in der Messzelle ein erheblicher Temperaturgradient einstellte. Das Öl am Boden der Zelle kühlte deutlich schneller ab als dasjenige im oberen Bereich. Der in Zusammenhang mit den Messdaten angegebene Wert ist jeweils der in der Nähe der Nadelspitze gemessene.

Die in der Abkühlungsphase des Öls durchgeführten Messungen wiesen untereinander praktisch keine Unterschiede auf. Im Vergleich zu den an den beiden ursprünglichen Proben durchgeführten Messungen ergaben sich jedoch durchweg außerordentlich hohe Impulsraten von bis über 40 Ereignissen pro Sekunde, was für die Zeitabstände Werte in der Größenordnung der Periodendauer der Netzspannung bedeutet. Die Impulsrate ist unabhängig von der Öltemperatur. Auch nach praktisch vollständiger Abkühlung auf ca. 25 °C dauert die Erfassung von 4096 TE nur ca. 90–100 Sekunden. Eine optisch wahrnehmbare Trübung der Probe trat hierbei nicht auf, obwohl der Wassergehalt nach der Behandlung mit großer Wahrscheinlichkeit im Bereich über der Sättigungskonzentration bei Raumtemperatur gelegen haben dürfte. Eine Trübung wäre wahrscheinlich erst bei deutlich größeren Wasserkonzentrationen und damit höheren Temperaturdifferenzen zu erwarten.

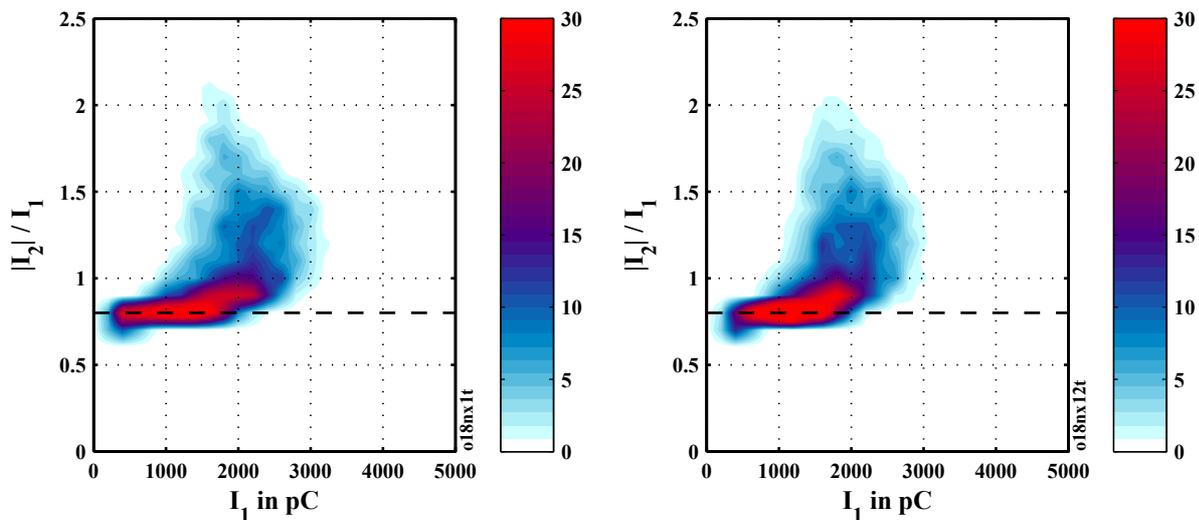


Abb. 3.46: $|I_2|/I_1$ über I_1 für das stark wasserhaltige Öl O18 bei 50 °C (links) und nach Abkühlung bei 25,6 °C

Abb. 3.46 zeigt die Konturdarstellungen für $|I_2|/I_1$ über I_1 bei 50 °C und nach Abkühlung auf 25,6 °C. Die Diagramme unterscheiden sich kaum. Auffallend ist hingegen, dass die Impulsamplituden deutlich kleiner ausfallen als bei den Messungen vor Wasserzusatz. Die Histogrammdarstellungen in Abb. 3.47 zeigen erstaunlicherweise einen etwas geringeren Wert für m als bei der Ölprobe vor der Wasserbehandlung. m repräsentiert jedoch nur den zahlenmäßigen Anteil verzerrter Impulse am gesamten Datensatz, trifft jedoch keine Aussage über den Grad der Verzerrung einzelner Ereignisse. Die Werte von $|I_2|/I_1$ sind jedoch bei der Probe mit dem höheren Wassergehalt größer (einzelne Werte gehen über 2 hinaus, während bei der Ausgangsprobe kaum Werte über 1,5 auftraten). Hier könnte eventuell eine Gewichtung der Auswertung hilfreich sein.

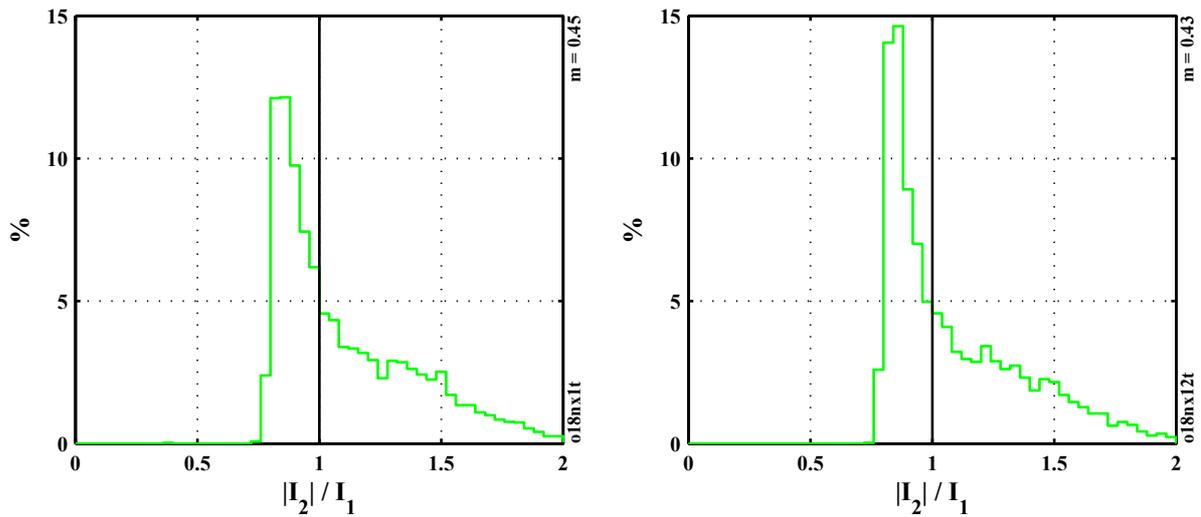


Abb. 3.47: $|I_2|/I_1$ -Histogramme für das stark wasserhaltige Öl O18 bei 50 °C (links) und nach Abkühlung bei 25,6 °C, 50 Klassen

Die Zeitpunkte t_2 der zweiten Maxima (Abb. 3.48) zeigen beim entgastem Öl eine relativ breite Verteilung um 6 μs herum. Bei der mit viel Wasser versetzten Probe zeigen sich anteilig deutlich mehr Impulse mit größeren t_2 , während der Peak bei 6 μs sich geringfügig zu kleineren Werten hin verschiebt.

Eine 24 Stunden später nach vollständiger Abkühlung auf Raumtemperatur (24,3 °C) durchgeführte Messung zeigt kaum Unterschiede zu den vorherigen Messungen. Abb. 3.49 zeigt die entsprechenden Darstellungen bezüglich $|I_2|/I_1$. m ist größer geworden (0,52 gegenüber 0,43), das übrige Verhalten hat sich nicht nennenswert geändert. Auch die Impulsrate ist unverändert sehr hoch im Vergleich mit an anderen Ölen durchgeführten Messungen. Optische Veränderungen an der Ölprobe sind nach wie vor nicht feststellbar.

Im Falle von Zeitabständen in der Größenordnung der Periodendauer der Prüfspannung können die Mittel der Puls-Sequenz-Analyse (s. Abschnitt 3.3.1), die im Normalfall bei Ölen nicht sinnvoll anwendbar sind, aufschlussreiche Informationen liefern. Abb. 3.50 zeigt die Zeitabstände Δt zwischen aufeinander folgenden Teilentladungen sowie die Zeitabstände $\Delta_2 t$ zum jeweils übernächsten Ereignis für die stark wasserhaltige Probe O18 nach Abkühlung auf 25,6 °C. Meist tritt ein Ereignis pro Periode auf, in seltenen Fällen auch mehr, wobei die Entladungen vorzugsweise bei Spannungen in der Nähe des Scheitelwertes der Prüfspannung stattfinden. Eine Betrachtung der Zeitabstände $\Delta_2 t$ zum jeweils übernächsten Ereignis zeigt, dass maximal zwei TE pro Periode auftreten. Der Anteil im Bereich weniger Millisekunden im Δt -Histogramm verschwindet in der $\Delta_2 t$ -Darstellung völlig. Auch dieses Verhalten ist temperaturunabhängig.

Die durchgeführten Auswertungen zeigen, dass der Wassergehalt einen erheblichen Einfluss auf das Teilentladungsverhalten von Isolierölen haben kann, wenn höhere Konzentrationen vorliegen. Geringe Konzentrationen im Bereich deutlich unter der Sättigungskonzentration spielen offenbar kaum eine Rolle, während sich bei höheren Wasseranteilen das Verhalten grundlegend ändern kann. Dies ist auch beim vorgeschlagenen Einbau einer Messzelle in in Betrieb befindliche Transformatoren zu beachten, da dort durchaus sehr unterschiedliche Wasserkonzentrationen herrschen. Eine Temperaturabhängigkeit des Einflusses von Wasser konnte hingegen nicht festgestellt werden.

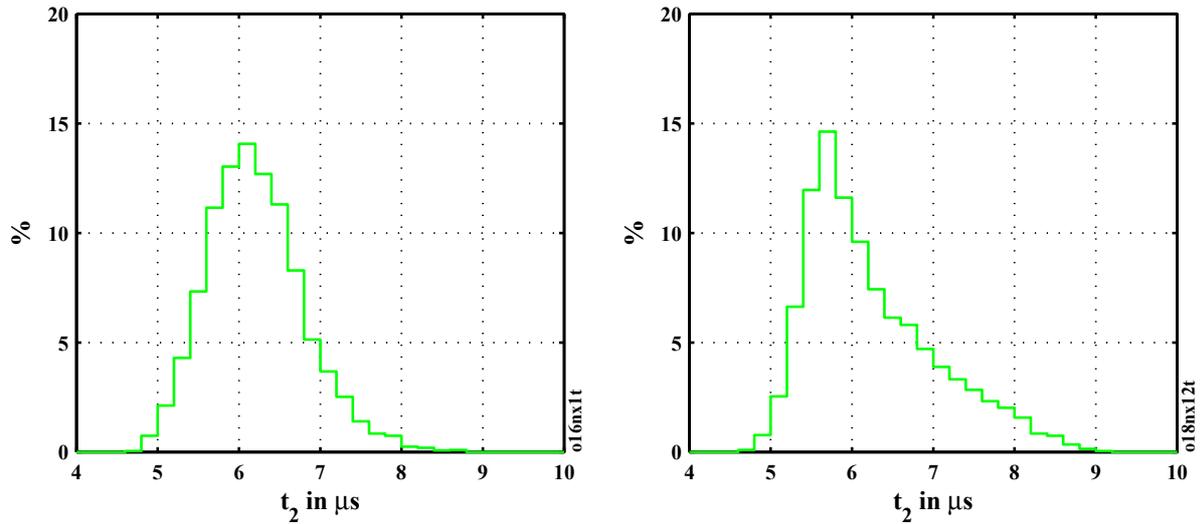


Abb. 3.48: t_2 -Histogramme für das entgaste Öl (O16, links) und das stark wasserhaltige (O18) nach Abkühlung bei $25,6\text{ }^\circ\text{C}$, 30 Klassen

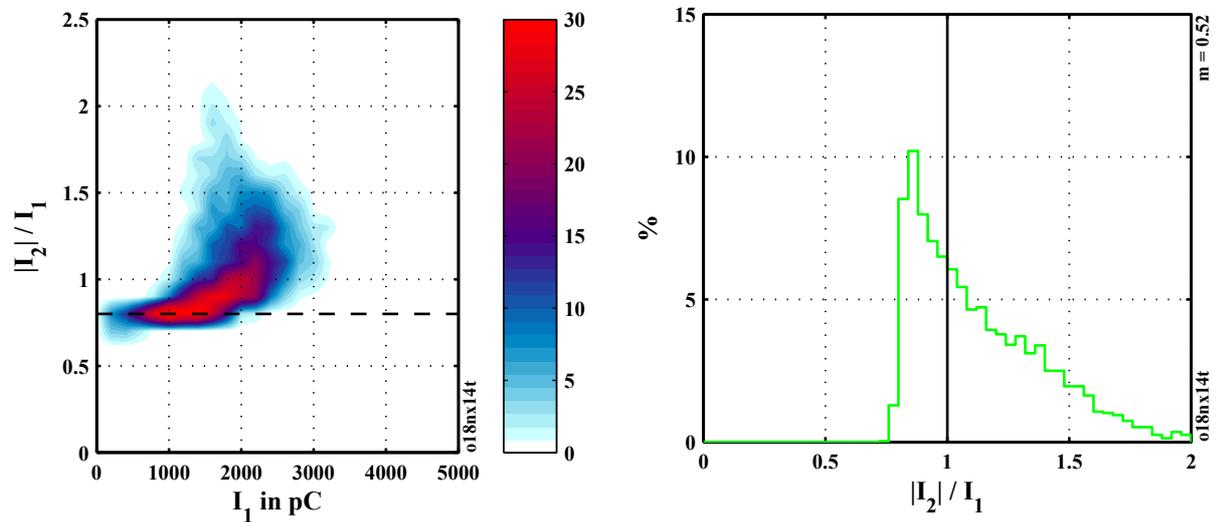


Abb. 3.49: Konturplot von $|I_2|/I_1$ über I_1 und $|I_2|/I_1$ -Histogramm für die stark wasserhaltige Ölprobe O18 nach Abkühlung (nach 24 h, $\vartheta_O = 24,3\text{ }^\circ\text{C}$)

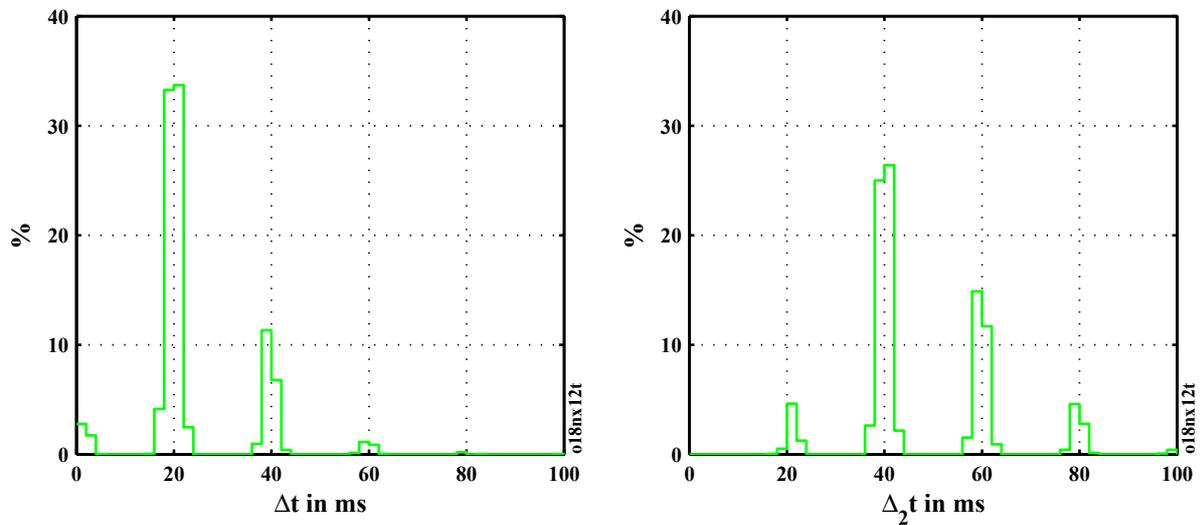


Abb. 3.50: Histogramme für die Zeitabstände Δt zwischen aufeinander folgenden Entladungen und für die Zeitabstände Δt_2 zum jeweils übernächsten Ereignis für die stark wasserhaltige Ölprobe O18 nach Abkühlung ($\vartheta_O = 25,6\text{ }^\circ\text{C}$)

3.5 Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass durch Teilentladungsmessungen mit einer Nadel-Platte-Elektrodenkonfiguration und einem begrenzt breitbandigen Detektor Rückschlüsse auf die Qualität bzw. den Grad der Alterung von Isolierölen gezogen werden können. Dabei ist in erster Linie die Pulsformenanalyse (Pulse Shape Analysis) für die Auswertung der Messdaten von Bedeutung.

Aufgrund der Bildung von Gasblasen im Öl infolge einer initialen Entladung können in Zeitabständen im Mikrosekunden-Bereich Folgeentladungen auftreten. Diese führen im Bandpassfilter zu Impulsformen, die sich deutlich von Einzelentladungen unterscheiden. Durch die Wahl geeigneter Kurvenformparameter und deren Kombinationen für die Analyse der Daten ist es möglich, eine gute Differenzierung zu erreichen.

Die Bildung der Gasblasen und damit der Folgeentladungen ist primär von der Qualität der Ölprobe – also z.B. ihrem Gehalt an kurzkettigen, leichtflüchtigen Abbauprodukten – abhängig, sowie auch von der Geometrie der Elektrodenanordnung. Bei kleineren Elektrodenabständen sind die auftretenden Entladungen häufig nicht ausreichend energiereich, um nennenswerte Gasblasen und damit Folgeentladungen zu erzeugen. In diesem Fall ist der Anteil unverzerrter Signale grundsätzlich relativ hoch. Eine Vergrößerung des Elektrodenabstandes führt zu energiereicheren Entladungen und folglich zu größeren und stärker veränderten Impulsformen. Hierdurch ergibt sich eine deutlich stärkere Differenzierung bei der Auswertung der Kurvenform.

Weiterhin unterscheiden sich die Zeitabstände zwischen der Initialentladung und den Folgeereignissen in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand. Dies führt dazu, dass bei Messungen an Ölproben mit unterschiedlichen Elektrodenabständen unterschiedliche Kurvenformen vorherrschen. Bei den mit $d = 10$ mm durchgeführten Messungen ergaben sich bei Verzerrungen hauptsächlich relativ frühe Folgeentladungen im Bereich um das erste Maximum, die in vielen Fällen zu Einsattelungen und lokalen Maxima führen. Dadurch werden Parameter wie die Verhältnisse der Amplituden der ersten beiden Maxima und der Flächen unter ihnen stark beeinflusst.

Bei größerem Abstand (z.B. $d = 15$ mm) treten hingegen mehr späte Folgeentladungen auf, besonders im Bereich um den ersten Nulldurchgang, die einerseits weniger Einfluss auf das Verhältnis der Amplituden und Flächen besitzen, die andererseits jedoch über die Zeitpunkte von Maxima und Nulldurchgängen deutlich charakterisierbar sind. Je nach Elektrodengeometrie bzw. Feldinhomogenität sind demzufolge unterschiedliche Parameter unterschiedlich aussagefähig.

Die Signalformen, die bei den vorstehend beschriebenen Untersuchungen beobachtet wurden, deuten im Allgemeinen darauf hin, dass jeweils nur eine einzige nennenswerte Folgeentladung auftritt. Die Sequenzen (Bursts) aus mehrfachen Folgeentladungen, die in der Literatur beschrieben werden, treten vermutlich erst bei Elektrodenabständen auf, die weit über die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten 10 bzw. 15 mm hinausgehen. Eine relativ starke Abhängigkeit des Verhaltens von der Inhomogenität der Anordnung wurde ja bereits beim Vergleich der mit unterschiedlichen Abständen ermittelten Daten gefunden.

Der Abstand der Nadelspitze zum verrundeten Ende der Nadelhalterung bei ansonsten gleichem effektivem Elektrodenabstand und damit die Inhomogenität der Elektrodenanordnung spielt eine entscheidende Rolle für das Teilentladungsverhalten. Bei einem kleinen

Abstand – also wenn die Nadel nur wenig aus der Halterung herausragt – sind generell bei gleichem Nadel-Platte-Abstand die Amplituden der auftretenden Ereignisse kleiner. Außerdem ergeben sich bei gleicher Prüfspannung geringere Impulsraten. Der Abstand von TE-Einsatzspannung zu Durchschlagspannung wird ebenfalls beeinflusst.

In vielen Fällen lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den untersuchten Teilentladungs-Parametern und der Konzentration bestimmter Abbauprodukte im Öl erkennen. Es besteht dann ein integraler Zusammenhang zwischen der Gesamtmenge gelöster Abbauprodukte und dem Auftreten von Folgeentladungen. Eine generelle Tendenz neuer Öle, die keine Abbauprodukte enthalten, deutlich weniger durch Folgeentladungen verzerrte Teilentladungen zu zeigen, lässt sich ebenfalls allgemein feststellen.

Auch die Impulsraten weisen bei ansonsten identischer Elektrodengeometrie und Prüfspannung im Regelfall deutliche Unterschiede auf. Eine Differenzierung unterschiedlich stark gealterter Proben ist anhand der Impulsrate jedoch nicht möglich, da diese unter anderem von Details der Elektrodenform abhängt. Auch der Wassergehalt der Probe spielt eine erhebliche Rolle für die Impulsrate, allerdings erst bei vergleichsweise hohen Konzentrationen im Bereich der Sättigungskonzentration.

Grundsätzlich ist es aufgrund der nicht immer sehr präzisen Kalibrierung bzw. Normalisierung von Vorteil, Parameter für die Auswertung heranzuziehen, die nicht von Absolutwerten der Signalamplituden abhängen, also z.B. die Verhältnisse der Amplituden der Maxima oder der Flächen unter ihnen. Allerdings sind die Signalamplituden selbst auch durchaus Parameter mit einiger Aussagekraft, speziell bei der Frage, ab welchen Amplituden verstärkt Folgeentladungen und damit verzerrte Signalformen auftreten.

Kapitel 4

Fazit und Ausblick

Es wurden zwei unterschiedliche Verfahren zur **Diagnose von Öltransformatoren** untersucht, von denen eines eine integrale Analyse des Isoliersystems über dessen **dielektrische Eigenschaften** durchführt, während das zweite nur das Teilentladungsverhalten des Transformatoröls untersucht, in welchem allerdings auch Degradationsprodukte gelöst sind, die die Eigenschaften des Gesamtsystems beeinflussen. Beiden Verfahren ist gemein, dass sie für die Transformator diagnose in der Form bisher nicht zum Einsatz kamen, wenn man von der Rückkehrspannungsmessung nach dem *Recovery Voltage*-Verfahren bzw. *Polarisationsspektrum* absieht, das auf einem anderen Messablauf und anderen Auswertungskriterien basiert. Das Teilentladungsverhalten von Isolierölen in stark inhomogenen Feldern wurde zwar bereits untersucht, allerdings lediglich in Hinblick auf das grundlegende Verhalten von Isolierflüssigkeiten.

Es wurden jeweils die grundlegenden physikalischen Vorgänge erörtert und ihre Relevanz für die Auswertung der Messdaten diskutiert. Im Falle der Rückkehrspannung zeigte sich, dass – im Gegensatz zur vorherrschenden Lehrmeinung – das Verhalten ungealterter Transformatoren fast ausschließlich durch die **Grenzflächenpolarisation** des Systems Zellulose-Öl bestimmt ist. Damit sind die Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Isolierkomponenten und dem Verlauf der Rückkehrspannungskurve vergleichsweise leicht nachvollziehbar, da es nur eine kleine Anzahl Parameter gibt. Bei Teilentladungen in Öl sind die Zusammenhänge deutlich komplexer. Der Einfluss von Abbauprodukten im Öl auf das Entladungsverhalten wurde nur integral untersucht, wobei sich deutliche Diagnose-Hinweise ergaben.

Das hauptsächliche Problem bei der **Rückkehrspannungsmessung** ist die Separierung der einzelnen Effekte anhand der Form der gemessenen Kurven. Allgemein ist eine Trennung des Grundverhaltens geschichteter Dielektrika gemäß dem Maxwell-Modell von Zusatzeffekten, die dazu führen, dass die Kurve sich nicht mehr rein nach dem Maxwell-Modell verhält, jedoch zumindest näherungsweise möglich, was für eine aussagefähige Diagnose im Regelfall völlig ausreicht. Ungealterte Isoliersysteme verhalten sich üblicherweise nahezu rein nach dem Maxwell-Modell, so dass nennenswerte Abweichungen zu Diagnosezwecken herangezogen werden können.

Ein anschauliches Verfahren zur Auswertung der Messkurven ist die Darstellung der anhand des Maxwell-Modells errechneten Zeitkonstanten für über den Kurvenverlauf verteilte Messpunkte und deren Vergleich. Anhand dieser Darstellung ist es möglich, Abweichungen gegenüber dem idealen reinen Maxwell-Verhalten auf einen Blick zu erkennen. Auch wenn

die so ermittelten Zeitkonstanten im Regelfall – also wenn kein reines Maxwell-Verhalten vorliegt – keine physikalische Relevanz besitzen, so enthalten sie dennoch die Systemparameter und dementsprechend Informationen über den Alterungszustand der Isolierung.

Simulationsrechnungen mit durch Zusatzpolarisationen gestörten Systemen zeigen, dass sich Abweichungen größeren Ausmaßes vom Maxwell-Verhalten nur in Ausnahmefällen ergeben. Größere Abweichungen sind vor allem dann zu erwarten, wenn sich im System Kapazitäten befinden, die nicht zur Grenzflächenpolarisation und damit zur Rückkehrspannung beitragen und die deutlich größer sind als die Kapazität des durch das Maxwell-Ersatzschaltbild modellierten Grenzflächen-Anteils.

Weiterhin beeinflussen parallele Leitwerte die Kurvenform unter Umständen erheblich. Diese Leitwerte ergeben sich z.B. durch einen Messwiderstand, der gegenüber dem Isolationswiderstand des Systems nicht vernachlässigbar groß ist. Dieser Einfluss ist besonders groß bei Systemen, die einen hohen Isolationswiderstand besitzen, also speziell bei wenig gealterten Isolierungen. Allerdings kommt es auch bei diesen kaum zu echten Fehldiagnosen, da der Einfluss des Messwiderstandes gut abschätzbar ist und bei der Auswertung berücksichtigt werden kann. Bei Öl-Zellulose-Isolierungen tritt ein nennenswerter Effekt im Regelfall nur bei geometrisch kleinen Objekten auf – v.a. bei kurzen Kabelstrecken – die neben einer relativ kleinen Kapazität einen vergleichsweise hohen Isolationswiderstand aufweisen.

Bei der Auswertung von **Teilentladungsmessungen in Transformatorölen** zeigten sich signifikante Differenzierungen zwischen neuen und gealterten Ölen. In vielen Fällen konnten direkte Korrelationen zwischen Teilentladungsparametern und dem Gehalt an bestimmten kurzkettingen Abbauprodukten im Öl gefunden werden. An dieser Stelle müssten in Zukunft allerdings noch detailliertere Untersuchungen durchgeführt werden, speziell auch im Hinblick auf den Einfluss von Feuchtigkeit, die auch die Parameter Durchschlagspannung und Verlustfaktor beeinflusst.

Grundsätzlich führt eine hohe Ölfeuchte zu deutlich höheren Impulsraten und geringeren absoluten Impulsamplituden als dies bei trockenen Ölen – auch bei solchen mit hohem Gehalt von kurzkettingen Kohlenwasserstoffen – der Fall ist. Feuchtigkeit besitzt, verglichen mit anderen Abbauprodukten, sowohl einen deutlich geringeren Einfluss auf die Häufigkeit des Auftretens von direkten Folgeimpulsen als auch auf deren Intensität, was zu einer geringeren Ausprägung der Verzerrungen der Impulsform führt.

Es wurde eine Vielzahl von Parametern und deren Kombinationen und Korrelationen untersucht, wobei die Suche nach solchen Parametern im Vordergrund stand, die eine einfache Charakterisierung des Diagnoseergebnisses ermöglichen, eventuell durch eine weitgehend automatisierte Auswertung. In diesen Bereich fallen besonders Parameter, die sich als einfache Zahlenwerte ausdrücken lassen, die also nicht die Betrachtung einer grafischen Darstellung erfordern.

Grundsätzlich ist es mit den vorgestellten Methoden möglich, diagnostische Aussagen zum Alterungszustand von Leistungstransformatoren zu treffen. Besonders im Hinblick auf das Verständnis der Prozesse, die zur Entstehung der Rückkehrspannung führen, konnten erhebliche Fortschritte erzielt werden. Auch die Annahmen hinsichtlich der physikalischen Effekte, die das Teilentladungsverhalten von Isolierölen bestimmen, konnten weitgehend belegt werden.

Literaturverzeichnis

- [ABB08] ABB AG, Division Energietechnik-Produkte, Halle: *ABB OnlineDGA – Online-System zur Analyse von gelösten Gasen*, 2008. Produktflyer
- [Ale59] B. A. ALEKSEEV: *Eine neue Methode zum Nachweis von Feuchtigkeit in Transformator-Wicklungen (in russischer Sprache)*. *Elektrichestvo No. 2*, S. 58–63, 1959
- [Alt02] I. ALTMANN: *TLC (Temperature Loading Curve) – The operational limits of a power transformer related to water content in the cellulose*. *Firmenveröffentlichung ARS Altmann Systems*, 2002
- [Bei03] MICHAEL BEIGERT: *Dielektrische Diagnoseverfahren im Zeitbereich*. *IWK'03, Ilmenau*, 2003
- [Bei06] MICHAEL BEIGERT: *Dielectric Diagnostics in Time Domain*. *CMD'06*, 2006
- [Ben04] DJAMAL BENZEROUK, RAINER PATSCH und JOHANNES MENZEL: *Partial Discharge Analysis - a Comparison of Different Parameters used*. *APTADM'04, Wrocław, Poland*, S. 46–50, 2004
- [Ben05] DJAMAL BENZEROUK, RAINER PATSCH und JOHANNES MENZEL: *Identifizierung von TE-Quellen auf Basis der Kurvenformanalyse*. *ETG-Fachbericht 99, Fachtagung „Grenzflächen in Elektrischen Isoliersystemen“*, Hanau, S. 235–239, 2005
- [Ben06] DJAMAL BENZEROUK, JOHANNES MENZEL und RAINER PATSCH: *The Role of Accumulated Charges in Partial Discharge Processes*. *CSC'06, Tours, France*, 2006
- [Ben07] DJAMAL BENZEROUK, JOHANNES MENZEL und RAINER PATSCH: *The Role of Accumulated Charges in Partial Discharge Processes*. *ICSD'07, Winchester, UK*, S. 552–555, 2007
- [Ben08] DJAMAL BENZEROUK: *Pulse Sequence Analysis and Pulse Shape Analysis – Methods to Analyze Partial Discharge Processes*. Dissertation, Universität Siegen, 2008
- [Ber03] FARHAD BERTON: *Entwicklung und Anwendung eines DSP-gesteuerten TE-Meßgerätes zur Teilentladungsdagnostik von Isolationssystemen*. Dissertation, Universität Siegen, 2003
- [Bey86] MANFRED BEYER, WOLFRAM BOECK, KLAUS MÖLLER und WALTER ZAENGL: *Hochspannungstechnik*. Springer Verlag, 1986. ISBN 3-540-16014-0

- [Bol02] J. P. VAN BOLHUIS, E. GULSKI und J. J. SMIT: *Interpretation of RVM Measurements, Beyond the Polarisation Spectrum. ISEI'02, Boston, MA, USA*, S. 179–182, 2002
- [Bön38] P. BÖNING: *Bemerkenswerte Zusammenhänge zwischen den anomalen Strömen, dem Verlustfaktor, der scheinbaren Kapazität und der Rückspannung bei Isolierstoffen. Zeitschrift für technische Physik*, 8: S. 241–247, 1938
- [Che04] SUDHAKAR CHERUKUPALLI, VERN BUCHHOLZ, MARTIN COLWELL, JEAN-PIERRE CRINE und ROBERT J. KEEFFE: *Condition Assessment of Distribution PILC Cables from Electrical, Chemical and Dielectric Measurements. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 20, No. 4: S. 6–12, 2004
- [Csé98] GUSZTÁV CSÉPES, ISTVÁN HÁAMOS, ROGER BROOKS und VOLKER KARIUS: *Practical Foundations of the RVM (Recovery Voltage Method for Oil/Paper Insulation Diagnosis). CEIDP'98, Atlanta, GA, USA*, S. 345–355, 1998
- [Dak06] T. W. DAKIN: *Conduction and Polarization Mechanisms and Trends in Dielectrics. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 22(5): S. 11–28, 2006
- [Deb99] H. DEBRUYNE und O. LESAIN: *On the Significance of PD Measurements in Liquids. ISH'99, London, UK*, 1999
- [Gäf94] UNO GÄFVERT und ERLING ILDSTAD: *Modelling Return Voltage Measurements of Multi-Layer Insulation Systems. ICPADM'94, Brisbane, QLD, Australia*, S. 123–126, 1994
- [Gäf98] U. GÄFVERT, G. FRIMPONG und J. FUHR: *Modelling of Dielectric Measurements on Power Transformers. CIGRÉ Session*, 1998. Paper 15-103
- [Gäf00] UNO GÄFVERT, LARS ADEEN, MATZ TAPPER, PARVIZ GHASEMI und BENGT JÖNSSON: *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers. ICPADM'00, Xi'an, China*, S. 825–830, 2000
- [Gäf04] U. GÄFVERT: *Dielectric Response Analysis of Real Insulation Systems. ICSD'04, Toulouse, France*, S. 1–10, 2004
- [Gib95] JEAN-PIERRE GIBEAULT und JOSEPH K. KIRKUP: *Early Detection and Continuous Monitoring of Dissolved Key Fault Gases in Transformers and Shunt Reactors. EEIC'95, Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, Rosemont, IL, USA*, S. 285–293, 1995
- [Gub03] S. M. GUBANSKI, P. BOSS, G. CSÉPES, V. DER HOUGHANESSIAN, J. FILIPPINI, P. GUINIC, U. GÄFVERT, V. KARIUS, J. LAPWORTH, G. URBANI, P. WERELIUS und W. ZAENGL: *Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(3): S. 12–18, 2003. Bericht CIGRÉ Task Force 15.01.09
- [Gub06] S. M. GUBANSKI, J. BLENNOW, L. KARLSSON, K. FESER, S. TENBOHLEN, C. NEUMANN, H. MOSCICKA-GRZESIAK, A. FILIPOWSKI und L. TATARSKI: *Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation for Safety Assurance of*

- Power Transmission Systems, REDIATool – a European Research Project. CI-GRÉ Session, 2006*
- [Gun03] GUNTMAR GUNKEL: *Determination of Moisture Content in Oil Paper Insulation Systems of Power Transformers using Frequency Domain Spectroscopy. IWK'03, Ilmenau, 2003*
- [Gun04] GUNTMAR GUNKEL: *Bestimmung des Feuchtegehaltes in der Feststoffisolation von Transformatoren mit Öl-Papier-Isolationssystem. DIDEE-Trafo-Symposium '04, Regensburg, 2004*
- [Hof99] R. HOFMANN, H.-G. KRANZ und D. STEINBRINK: *IRC-Analysis: Destruction-free Dielectric Diagnosis of Mechanical and Service-Aged Polymeric Insulation. ISH '99, London, UK, 4: S. 253–256, 1999*
- [Hof03] R. HOFMANN und H.-G. KRANZ: *Isothermal Relaxation Current Analysis: Destruction-free Dielectric Diagnosis on Epoxy-Insulated Apparatus. ACEID-ICMEP'03, Chongqing, China, S. 40–44, 2003*
- [Höh04] I. HÖHLEIN und U. THIESS: *Wassergehaltsbestimmung in Transformatoren – Möglichkeiten und Anwendungsgrenzen von Feuchteverteilungskurven. DIDEE-Trafo-Symposium '04, Regensburg, 2004*
- [Hoo97] MARTIN HOOFF: *Impulsfolgen-Analyse: Ein neues Verfahren der Teilentladungsdiagnostik. Dissertation, Universität Siegen, 1997*
- [Jot99] P. R. S. JOTA, S. M. ISLAM und F. G. JOTA: *Modeling the Polarization Spectrum in Composite Oil/Paper Insulation Systems. IEEE Transactions on Electrical Dielectrics and Electrical Insulation, 6(2): S. 145–151, 1999*
- [Jun02] JOCHEN JUNG: *Verfahren zur Selektivitätssteigerung beim Nachweis von water trees in polymerisierten Mittelspannungskabeln. Dissertation, Universität Siegen, 2002*
- [Kac96] ADOLF J. KACHLER, REINHART BAEHR, WALTER S. ZAENGL, BERND BREITENBAUCH und ULRICH SUNDERMANN: *Kritische Anmerkungen zur Feuchtigkeitsbestimmung von Transformatoren mit der Recovery-Voltage-Methode. Elektrizitätswirtschaft, 19: S. 1238–1245, 1996*
- [Kam] DIETER KAMENKA: *Kabeldiagnose nach dem Verfahren der Wiederkehrspannungsmessung. Hagenuk KMT. (Handbuch)*
- [Kin82] DIETER KIND und HERMANN KÄRNER: *Hochspannungs-Isoliertechnik. Friedr. Vieweg & Sohn, 1982. ISBN 3-528-03812-8*
- [Koc08] MAIK KOCH und STEFAN TENBOHLEN: *Der Einfluss von Alterung und Materialeigenschaften auf dielektrische Messungen an Öl-Papier-Isolierungen. ETG-Fachbericht 112, Fachtagung 'Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen', Würzburg, S. 145–150, 2008*
- [Kön93] DIETER KÖNIG und Y. NARAYANA RAO (Hrsg.): *Partial Discharges in Electrical Power Apparatus, Kap. 2: Fundamentals of Partial Discharge Measuring Techniques, S. 39–60. VDE-Verlag, 1993. ISBN 3-8007-1760-3*

- [Kou03] OLEG KOUZMINE und RAINER PATSCH: *Zustandsdiagnostik von Mittelspannungskabeln mit Rückkehrspannungsmessungen. IWK'03, Ilmenau, 2003*
- [Kou06] O. KOUZMINE, H. LOHMEYER und P. WERLE: *Instandhaltungsstrategien aus Sicht eines Transformatorherstellers. Energy Support Forum, 2006*
- [Kou10] OLEG KOUZMINE: *Neue Verfahren zur Auswertung von Rückkehrspannungsmessungen, 2010. Dissertation, Universität Siegen, noch nicht veröffentlicht*
- [Küc02] ANDREAS KÜCHLER, BERND BREITENBAUCH, THOMAS LEIBFRIED und WALTER S. ZAENGL: *Dielektrische Isolationsdiagnose durch Polarisations- und Depolarisationsstrommessungen. Sonderveröff. anl. Emeritierung Prof. Schwab, IEH, Uni Karlsruhe, S. 22–28, 2002*
- [Küc03] ANDREAS KÜCHLER, THOMAS LEIBFRIED, BERND BREITENBAUCH, JEAN JACQUES ALFF, VAHE DER HOUHANESSIAN und WALTER S. ZAENGL: *Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis. IWK'03, Ilmenau, 2003*
- [Küc05] ANDREAS KÜCHLER: *Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologie – Anwendungen. Springer/VDI, 2005. ISBN 3-540-21411-9*
- [Lei02] T. LEIBFRIED und A. J. KACHLER: *Insulation Diagnostics on Power Transformers using the Polarisation and Depolarisation Current (PDC) Analysis. ISEI'02, Boston, MA, USA, S. 170–173, 2002*
- [Lie08] MARCUS LIEBSCHNER, ANDREAS KÜCHLER, CHRISTOPH KRAUSE, BERNHARD HEINRICH und FRANK BERGER: *Einfluss von Grenzflächen auf das dielektrische Verhalten von HGÜ-Isoliersystemen. ETG-Fachbericht 112, Fachtagung 'Grenzflächen in elektrischen Isoliersystemen', Würzburg, S. 129–135, 2008*
- [Lin07] D. LINHJELL, L. LUNDGAARD und U. GÄFVERT: *Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Ageing. IEEE Trans. Electr. Insul., 14, No. 1: S. 156–169, 2007*
- [Maz92] C. MAZZETTI, M. POMPILI und E. O. FORSTER: *A Study of Partial Discharge Measurements in Dielectric Liquids. IEEE Trans. Electr. Insul., 27: S. 445–450, 1992*
- [Men08] JOHANNES MENZEL und RAINER PATSCH: *Rückkehrspannungsmessungen an Transformatoren – zum Einfluss der Grenzflächenpolarisation. ETG-Fachbericht 112, Fachtagung 'Grenzflächen in Elektrischen Isoliersystemen', Würzburg, S. 157–162, 2008*
- [Men09] JOHANNES MENZEL, RAINER PATSCH und DIETER KAMENKA: *Measurement of the Dielectric Properties of Paper-Oil Cables and the Cellulose-Oil Insulation System of Transformers. ICPADM'09, Harbin, China, 2009*
- [Muh07] MICHAEL MUHR: *Grundlagen der dielektrischen Messverfahren und Diagnostik. TLM'07 Transformer Life Management, Hannover, 2007*
- [Ném99] E. NÉMETH: *Measuring Voltage Response: a Non-Destructive Diagnostic Test Method of HV Insulation. IEE Proc.-Sci. Meas. Technol., 146(5): S. 249–252, 1999*

- [Pat00] RAINER PATSCH, JOCHEN JUNG und OLEG KOUZMINE: *The Interpretation of Return Voltage Curves of Paper-Oil Cables*. CEIDP'00, Victoria, BC, Canada, S. 39–42, 2000
- [Pat02a] RAINER PATSCH und FARHAD BERTON: *Pulse Sequence Analysis – a Diagnostic Tool Based on the Physics Behind Partial Discharges*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35: S. 25–32, 2002
- [Pat02b] RAINER PATSCH, FARHAD BERTON und DJAMAL BENZEROUK: *PD Source Identification and Characterization on the Basis of Pulse Shape Analysis*. CEIDP'02, Cancún, Mexico, S. 728–732, 2002
- [Pat02c] RAINER PATSCH und OLEG KOUZMINE: *The Influence of Climatic Conditions on the Diagnostic Results of Return Voltage Measurements*. ISEI'02, Boston, MA, USA, S. 191–194, 2002
- [Pat02d] RAINER PATSCH und OLEG KOUZMINE: *p-Factor, a Meaningful Parameter for the Evaluation of Return Voltage Measurements*. CEIDP'02, Cancún, Mexico, S. 906–909, 2002
- [Pat03a] RAINER PATSCH und DJAMAL BENZEROUK: *Analysis of Partial Discharges in Stator Windings*. CEIDP'03, Albuquerque, NM, USA, S. 641–644, 2003
- [Pat03b] RAINER PATSCH, DJAMAL BENZEROUK und FARHAD BERTON: *Time Differences Between Partial Discharge Events – What Do They Tell Us?* NORD-IS'03, Tampere, Finland, S. 135–142, 2003
- [Pat03c] RAINER PATSCH, FARHAD BERTON und DJAMAL BENZEROUK: *Partial Discharge Analysis – the Benefit of the Evaluation of the Parameter Time Difference*. ACEID-ICMEP'03, Chongqing, China, S. 363–365, 2003
- [Pat04a] RAINER PATSCH und DJAMAL BENZEROUK: *Characterization of Partial Discharge Processes - what Parameters work best?* ICSD'04, Toulouse, France, S. 636–639, 2004
- [Pat04b] RAINER PATSCH und OLEG KOUZMINE: *Rückkehrspannungsmessungen zur Charakterisierung des Zustandes von Öl-Papier-Isolierungen*. DIDEE-Trafo-Symposium '04, Regensburg, 2004
- [Pat05] RAINER PATSCH und OLEG KOUZMINE: *Return Voltage Measurements – a good Tool for the Diagnosis of Paper-Oil Insulations*. PowerTech'05, St. Peterburg, Russia, 2005
- [Pat06a] RAINER PATSCH, OLEG KOUZMINE und JOHANNES MENZEL: *Zur Kurvenformanalyse von Rückkehrspannungskurven von Öl-Papier-Kabeln*. ETG-Fachbericht 104, Fachtagung 'Diagnostik Elektrischer Betriebsmittel', Kassel, S. 87–92, 2006
- [Pat06b] RAINER PATSCH, JOHANNES MENZEL und DJAMAL BENZEROUK: *Use of the Pulse Sequence Analysis to Monitor the Condition of Oil*. CEIDP'06, Kansas City, MO, USA, S. 660–663, 2006
- [Pat06c] RAINER PATSCH, JOHANNES MENZEL und OLEG KOUZMINE: *Return Voltage Measurement – a Good Method to Monitor the Dielectric Properties of Composite Insulations*. DISEE'06, Caštá Píla, Slovakia, S. 7–13, 2006

- [Pat07a] RAINER PATSCH, DIETER KAMENKA und JOHANNES MENZEL: *Return Voltage Measurements – Diagnostic Interpretations on the Basis of the Dielectric Time Constants*. APTADM'07, Wrocław, Poland, 2007
- [Pat07b] RAINER PATSCH, DIETER KAMENKA und JOHANNES MENZEL: *Return Voltage Measurements - How to Overcome the Length Dependence of the Diagnostic Results*. NORD-IS'07, Kongens Lyngby, Danmark, S. 181–184, 2007
- [Pat08a] RAINER PATSCH, DIETER KAMENKA und JOHANNES MENZEL: *Return Voltage Measurements – Diagnostic Interpretations on the Basis of the Dielectric Time Constants*. DIDEE-Trafo-Symposium '08, Regensburg, 2008
- [Pat08b] RAINER PATSCH und JOHANNES MENZEL: *Ageing and Degradation of Power Transformers – How to Interpret Return Voltage Measurements*. ISEIM'08, Yokkaichi, Japan, 2008
- [Pat08c] RAINER PATSCH und JOHANNES MENZEL: *Pulse Shape Analysis of PD Signals – an Efficient Tool to Monitor the Condition of Oils*. ACED'08, Bandung, Indonesia, S. 17–20, 2008
- [Pat09] RAINER PATSCH und JOHANNES MENZEL: *Temperature Dependence of the Dielectric Properties of the Insulation System of Power Transformers*. EIC'09, Montréal, QC, Canada, 2009
- [Pom05] M. POMPILI, C. MAZZETTI und R. BARTNIKAS: *Partial Discharge Pulse Sequence Patterns and Cavity Development Times in Transformer Oils under AC Conditions*. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 12: S. 395–403, 2005
- [Pom06] M. POMPILI und C. MAZZETTI: *PD pulse burst characteristics of transformer oils*. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 21: S. 689–698, 2006
- [Puk06] G. J. PUKEL, H. M. MUHR und W. LICK: *Transformer diagnostics: Common used and new methods*. CMD'06, S. 91–94, 2006
- [Rui98] LIAO RUIJIN, SUN CAIXIN, CHEN WEIGEN und WANG CAISHENG: *On-Line Detection of Gases Dissolved in Transformer Oil and the Faults Diagnosis*. ISEIM'98, Toyohashi, Japan, S. 771–774, 1998
- [Sah03a] TAPAN K. SAHA: *Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers*. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(5): S. 903–917, 2003
- [Sah03b] TAPAN K. SAHA und ZHENG TONG YAO: *Experience With Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service-Aged Transformers*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(1): S. 128–135, 2003
- [Sah05] TAPAN K. SAHA, PRITHWIRAJ PURKAIT und FRANK MÜLLER: *Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements*. *IEEE Trans. Power Deliv.*, 20: S. 149–157, 2005
- [Sch08] R. SCHWARZ und M. MUHR: *Diagnostic Methods for Transformers*. CMD'08, S. 974–977, 2008

- [Sie09] Siemens AG: *Siemens GASGuard – Online Dissolved Gas Analysis Sensor*, 2009. Produktflyer
- [Sin08] JASHANDEEP SINGH, YOG RAJ SOOD und RAJ KUMAR JARIAL: *Condition Monitoring of Power Transformers – Bibliography Survey. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 24(3): S. 11–25, 2008
- [Tet92] Tettex Instruments AG: *Polarisation Spectrum Analysis for Diagnosis of Insulation Systems*, 1992
- [Urb98] GIUSEPPE M. URBANI und ROGER S. BROOKS: *Using the Recovery Voltage Method to Evaluate Aging in Oil-Paper Insulation. ICSD'98, Västerås, Sweden*, S. 93–97, 1998
- [VDE96] *VDE 0370 Teil 5 (DIN EN 60156): Isolierflüssigkeiten – Bestimmung der Durchschlagsspannung bei Netzfrequenz, Prüfverfahren*, 1996
- [VDE05] *VDE 0380 Teil 2 (DIN EN 60247): Isolierflüssigkeiten – Messung der Permittivitätszahl, des dielektrischen Verlustfaktors ($\tan \delta$) und des spezifischen Gleichstromwiderstandes*, 2005
- [War00] BARRY H. WARD und STAN LINDGEN: *A Survey of Developments in Insulation Monitoring of Power Transformers. ISEI'00, Anaheim, CA, USA*, S. 141–147, 2000
- [Wer99] P. WERLE, V. WASSERBERG, H. BORSI und E. GOCKENBACH: *Kombinierte Verfahren zur Zustandserkennung der Isolierung von Leistungstransformatoren. ETG-Fachbericht 79, ETG-Tage '99, München*, S. 361–370, 1999
- [Yao02] Z. T. YAO und T. K. SAHA: *Separation of Ageing and Moisture Impacts on Transformer Insulation Degradation by Polarisation Measurements. CIGRÉ Session*, 2002
- [Zae03a] WALTER S. ZAENGL: *Applications of Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(6): S. 9–22, 2003
- [Zae03b] WALTER S. ZAENGL: *Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations. IEEE Electrical Insulation Magazine*, 19(5): S. 5–19, 2003