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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 74 (1983)

Heft: 3

Artikel: Transiente Vorgänge in Hochspannungskondensatoren bei sehr schnellen Spannungsbeanspruchungen

Autor: Zwicky, M. / Zaengl, W. / Knoth, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904757

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

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

Transiente Vorgänge in Hochspannungskondensatoren bei sehr schnellen Spannungsbeanspruchungen

M. Zwicky, W. Zaengl, W. Knoth

Werden Kondensatoren in Hochspannungsschaltungen eingesetzt, in denen durch schnelle Schaltvorgänge und induktionsarmen Aufbau auch extrem schnelle Spannungsänderungen an den Kondensatorklemmen erzwungen werden, so werden auch innerhalb der Kondensatoren Wanderwellenvorgänge angeregt, wenn die Kondensatoren wie üblich aus einer Serieschaltung von Einzelkondensatoren bzw. Kondensatorwickeln aufgebaut sind.

Im vorliegenden Beitrag werden am Beispiel von Wickelkondensatoren derartige Wanderwellenvorgänge experimentell und theoretisch untersucht. Das angewandte Messverfahren ist auch zur Bestimmung der für die Vorgänge wirksamen elektrischen Daten eines Kondensators (Laufzeit, Dämpfung) geeignet. Massnahmen zur Vermeidung von kurzzeitigen Überbeanspruchungen der Kondensatorwickel, die durch die Wanderwellenvorgänge hervorgerufen werden, werden diskutiert.

Lorsque des condensateurs sont branchés dans des circuits à haute tension où des couplages rapides et une faible inductance produisent des variations extrêmement rapides de leur tension aux bornes, des ondes à front raide se propagent également à l'intérieur s'il s'agit d'un couplage usuel en série de condensateurs ou d'éléments de condensateurs. En prenant comme exemple des condensateurs bobinés, ces phénomènes d'ondes à front raide ont été examinés expérimentalement et en théorie, selon un procédé de mesure qui convient également à la détermination des caractéristiques électriques d'un condensateur (temps de propagation, affaiblissement), qui interviennent dans ces phénomènes. L'auteur traite des dispositions à prendre pour éviter les brèves surcharges des éléments de condensateurs dues à ces phénomènes d'ondes à front raide.

Adressen der Autoren

Dipl. Ing. *M. Zwicky* und Prof. Dr. *W. Zaengl*, Institut für elektrische Energieübertragung und Hochspannungstechnik, ETH Zentrum, 8092 Zürich.

Dipl. Ing. *W. Knoth*, Abt. AT/E, Micafil AG, Badenerstrasse 780, 8048 Zürich.

1. Einleitung

Hochspannungskondensatoren sind in der Regel aus einer Serie- oder Serie-Parallelschaltung von Einzelkondensatoren aufgebaut, wobei die Einzelkondensatoren überwiegend aus Flach- oder Rundwickeln mit imprägnierten Papieren oder Kunststoff-Folien, bzw. Kombinationen davon, bestehen. Werden solche Kondensatoren in Hochspannungsschaltungen eingesetzt, in denen, ausgelöst durch schnelle Schalthandlungen, an den Kondensatorklemmen sehr schnelle Spannungsänderungen auftreten, so kann aus dem zeitlichen Verlauf dieser Spannungsbeanspruchung nicht unmittelbar auf die Spannungsänderung am Einzelwickel geschlossen werden, da die «innere» Spannungsbeanspruchung der Wickel durch Ausgleichsvorgänge bestimmt wird, die sowohl im Einzelwickel stattfinden als auch wegen Reflexionserscheinungen vom äusseren Netzwerk der Schaltung abhängen.

Obwohl das Auftreten derartiger Ausgleichsvorgänge in Hochspannungskondensatoren vor allem aus der theoretischen Behandlung kapazitiver Spannungsteiler [1], die heute in der Bauart sog. gedämpft kapazitiver Spannungsteiler grosse Anwendung finden [2], grundsätzlich bekannt ist, fehlen vor allem gezielte experimentelle Untersuchungen, welche die Hersteller und auch Anwender mit diesem Problemkreis vertraut machen.

Aktueller Anlass für die Untersuchungen ist der zunehmende Einsatz von Hochspannungskondensatoren in SF_6-isolierten Schaltanlagen oder auch anderen Hochspannungs-Prüfkreisen wie z. B. NEMP-Kreisen, die unter Verwendung von SF_6 oder sonstigen hochisolierenden Gasen aufgebaut sind, um sehr kompakte Abmessungen und damit auch sehr hochfrequente Entladekreise zu erzielen. Durchschlagsvorgänge in derartigen Anlagen, die entweder mit Hilfe schnellschaltender Funkenstrecken absichtlich oder durch Isolationsfehler [3] hervorgerufen werden, führen dann zu extrem schnellen Spannungsänderungen, die nach den bekannten Funkengesetzen [4] im Zeitbereich von ns ablaufen. So unterliegen beispielsweise Ankopplungskondensatoren für Teilentladungs-Messgeräte, wie sie in Prüfkreisen von Komponenten für SF_6-isolierte Schaltanlagen Einsatz finden, oder auch Steuerkondensatoren, die zur Steuerung der Spannungsverteilung bei Leistungsschaltern in SF_6-Anlagen dienen, extremen Spannungsbeanspruchungen, vor allem wenn bei der Spannungsprüfung in der Anlage Durchschläge auftreten.

Die Kondensatoren sind dabei in der Regel mehr oder weniger koaxial eingebaut, d. h., der imprägnierte und in einem Isoliergehäuse eingebaute Kondensatorstapel wird vom geerdeten metallischen Druckrohr der SF_6-Anlagenkomponente umgeben. Dadurch besitzen die Kondensatorwickel eine relativ starke und gleichmässige kapazitive Kopplung mit dem Erdpotential.

Die nachfolgend dargestellten experimentellen Untersuchungen gehen zwar von derartigen Anwendungen aus; die theoretische Simulation lässt aber erkennen, inwieweit die Besonderheiten einer räumlichen Anordnung des Kondensators die transienten Vorgänge im Kondensator selbst beeinflussen könnten.

2. Messtechnik

Das Ziel der Messungen bestand vor allem darin, die grundlegenden Vorgänge sichtbar zu machen und allein theoretisch schwer erfassbare Daten für eine Simulation und Berechnung der Vorgänge zu bestimmen.

Um den experimentellen Aufwand in Grenzen zu halten, wurde davon abgesehen, einen entsprechend grossen, imprägnierten und mit Isoliermantel

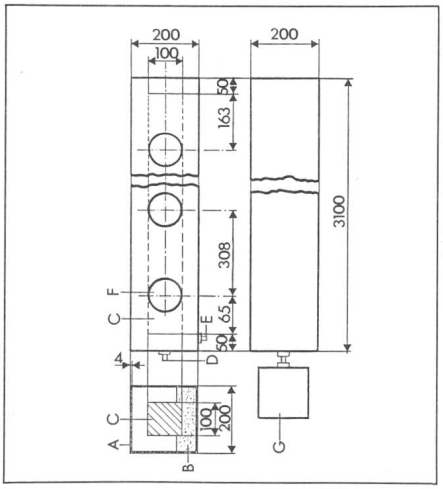


Fig. 1 Skizze des Versuchsaufbaus

A PVC-Rohr, Wandstärke 4 mm, aussen mit Cu-Blech (Dicke 0,3 mm) beklebt
B Gefräste Novopan-Schiene
C Kondensator
D Anschlussbuchse für den Schrittgenerator
E Anschlussbuchse für externe Triggerung des Oszillographen
F Öffnungen für den Einsatz der Feldmess-Sonde bzw. zum Einbringen der Spannungs-Messsonde
G Schrittgenerator

sowie Armaturen versehenen Hochspannungskondensator, der koaxial in einem SF_6-Tank eingebaut ist, für die Messungen einzusetzen. Die praktisch verwendete Anordnung sowie die angewandte Messtechnik waren aber so, dass auch bei technisch vollständigen Anordnungen gleichartige Untersuchungen durchführbar wären. So entstand der in Figur 1 skizzierte Versuchsaufbau: Zehn nicht imprägnierte, jedoch in üblicher Weise gepresste Kondensatorstapel, bestehend aus je 17 Flachwickeln mit Papier-Film-Dielektrikum, wurden in ein etwa 3 m langes PVC-Rohr quadratischen Querschnitts zentrisch eingebaut. Bei einer Kapazität von etwa 390 nF je Wickel resultiert damit eine gesamte Serienkapazität von etwa 2,3 nF. Das Isolierrohr wurde aussen mit Cu-Blech beklebt und beidseitig mit Metalldeckel abgeschlossen; es bildet somit einen metallischen Tank mit guter elektrischer Leitfähigkeit. Abgesehen vom Papier-Film-Dielektrikum der Kondensatorwickel bestand die sonstige Isolation aus atmosphärischer Luft.

Die Abmessungen und der Aufbau eines einzelnen Kondensatorstapels sind Figur 2a zu entnehmen. Die Stapel wurden so in das PVC-Rohr, Figur 1, eingebracht, dass die Anschlussfahnen der Wickel den Öffnungen F des Rohrs gegenüberstanden. Jeder Flachwickel enthielt zwei Teilkapazitäten,

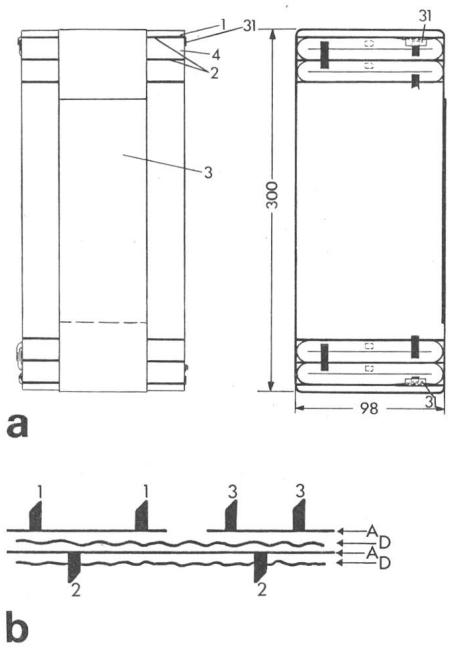


Fig. 2 Untersuchte Kondensatorstapel

a Abmessungen und Aufbau
1 Pressplatte
2 Isolation
3 Bandage
4 Wickel
31 Kupferbandverbindung
b Prinzipieller Aufbau eines Wickels (Abwicklung)
A: Aluminium 1, 2, 3 Anschlussfahnen
D: Dielektrikum

wie aus der in Figur 2b dargestellten Abwicklung eines Einzelwickels ersichtlich ist. Jeder Wickelbelag ist demnach mit zwei Anschlussfahnen ausgerüstet, die paarweise an der Wikkelstirn verlötet sind. Die Fahnen 1–1 stellen jeweils die Verbindungen zu den Fahnen 3–3 des nächsten Wickels her, an den Stapelenden erfolgt der Anschluss zum nächsten Stapel über die Verbindung 31 (Fig. 2a). Abgesehen von der festen Verschaltung der Flachwickel innerhalb eines Kondensatorstapels konnten die Verbindungen der Einzelstapel untereinander sowie am Anfang und Ende der gesamten Kondensatorkette frei gewählt werden.

Dieser mangels Imprägnierung isolationsmässig schwache Aufbau war möglich, da schnelle Spannungsänderungen auch mit Niederspannungsquellen erzeugt werden können und Hochspannungskondensatoren lineare Schaltelemente darstellen, d. h. dass das Einschwingverhalten nicht von der Amplitude der angelegten Spannung abhängt. Weiterhin sollte nachgeprüft werden können, ob eine direkte Spannungsmessung an den Einzelwickeln, deren Kontaktfahnen bei dem gewählten Aufbau unmittelbar zugänglich sind, nicht auch durch eine indirekte Methode ersetzt werden kann. So wurde bei der direkten Methode die Spannung zwischen dem geerdeten Rohr und dem Einzelwickel mit Hilfe einer hochohmigen, breitbandigen Oszillographensonde (Tektronix P 6201) durch die in Figur 1 erkennbaren Öffnungen im Rohr abgegriffen. Die kleinen Abmessungen von Sonde und Abstand Wickel-Erdpotential gewährleisten dabei eine sehr breitbandige Messung. Da eine derartige Messtechnik bei in Isoliermäntel eingebauten und mit Öl imprägnierten Kondensatoren nicht möglich wäre, wurde auch eine absolut rückwirkungsfreie Messmethode angewandt. Diese besteht darin, dass man den zeitlichen Verlauf der lokal am geerdeten Rohr auftretenden Feldstärke misst, die bei dem vorliegenden kleinen Abstand zwischen Rohrwand und Kondensatorwickel auch bei sehr hohen Frequenzen noch direkt proportional zur lokalen Spannung am Wickel ist. Diese im Prinzip sehr alte [5] und in neuerer Zeit oftmals *Meek* und *Collins* [6] zugeschriebene, auch als «probe measurement» bezeichnete Feldstärke-Messmethode ist gut bekannt. Die in Figur 3 dargestellten Feldmesssonden wurden in die kreisrunden Öffnungen (Fig. 1), welche über die Länge des Rohres verteilt waren, eingesetzt. Die sich zwischen dem Kondensatorstapel und der aktiven Sondenplatte C ergebende Kapazität C_1 betrug etwa 1,5 pF. Die Integrationskapazität C_2 zwischen der aktiven Sondenplatte und dem geerdeten Sondengehäuse konnte durch eine Variation der Dicke des Teflonrings D eingestellt werden. C_2 wurde so gewählt, dass sich ein Kapazitätsverhältnis C_2/C_1 von etwa 100

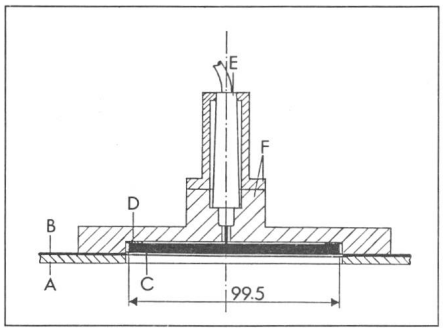


Fig. 3 Feldmess-Sonde

A Rohrwand PVC (s. Fig. 1)
B Kupferblech 0,3 mm
C Sondenplatte aus Kupfer
D Teflonring
E Tektronix P 6201 Probe
F Sondengehäuse

ergab, somit also die Spannung an C_2 etwa um den Faktor 100 gegenüber dem Potential am Kondensatorwickel reduziert war. Figur 3 zeigt vor allem auch den direkten Einbau der Spannungssonde Tektronix P 6201 in das Feldsondengehäuse. Diese Sonde stellt einen breitbandigen Impedanzwandler (Verstärkung = 1) dar; dessen Eingangskapazität C_p ist sehr klein (~3pF) und besitzt einen ausreichend hohen Eingangswiderstand (R_p = 100 kΩ).

Auch wenn eine derartige Sondenmessung vom Prinzip her eine Feldstärkemessung darstellt, kann sie bekanntlich auch einer Spannungsmessung durch kapazitive Spannungsteilung gleichgesetzt werden. Im vorliegenden Fall wird die hochspannungsseitige Elektrode der Kapazität C_1 allerdings von einem Teil des Kondensatorstapels gebildet, wodurch die das Feld erregenden Folien eng benachbarter Stapel vor allem im transienten Zustand unterschiedliche Potentiale besitzen. Bei der mit der Sonde gemessenen Spannung handelt es sich somit um einen Mittelwert einer Spannung, den einige benachbarte Wickel der Längenausdehnung von etwa 10 cm (= Durchmesser der Sonden) annehmen. Die späteren Messergebnisse beweisen, dass bei der vorliegenden endlichen Wellengeschwindigkeit dadurch praktisch kein Fehler entsteht.

Das elektrische Ersatzschaltbild dieser Feldmessanordnung ist einschliesslich der effektiv wirksamen elektrischen Daten in Figur 4 dargestellt. Im Zusammenwirken mit den für alle Messungen verwendeten Oszillographen Tektronix 7104 mit Verstärker-Einschub 7A29 wird eine obere Frequenzgrenze von 660 MHz erreicht. Die untere Grenzfrequenz liegt bei etwa 10 kHz; sie ergibt sich aus der durch das Produkt R_p ($C_1 + C_2 + C_p$) bedingten Entladezeitkonstanten von etwa 14 µs. Da auch für die eingangs genannte direkte Spannungsmessung derselbe Oszillograph mit Verstärkereinschub und Oszillographensonde verwendet wurde, waren in beiden Fällen die Bandbreiten der Messsysteme praktisch gleich und ausreichend für die vorliegende Aufgabe.

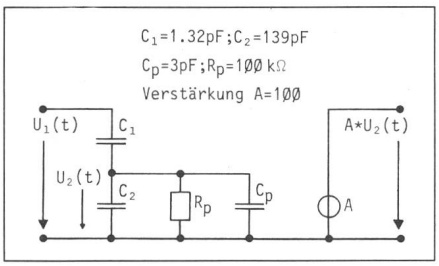


Fig. 4 Ersatzschaltung der Feldmess-Sonde nach Figur 3

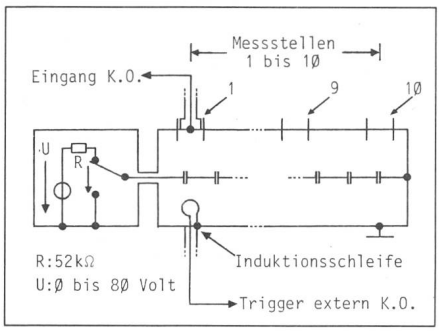


Fig. 5 Prinzipschema zur Spannungserzeugung, Oszillographentriggerung und Lage der Messstellen

Zur Bestimmung des Wellenwiderstandes des vom Hochspannungskondensator gebildeten Netzwerkes wurden auch Ströme gemessen. Hierfür stand eine Strommesssonde (Tektronix Typ P 6302) mit einer Bandbreite von 50 MHz zur Verfügung. Diese wesentlich geringere Bandbreite war aber für den Verwendungszweck ebenfalls noch ausreichend.

Die transienten Vorgänge im Versuchsobjekt wurden durch einen Schrittspannungs-Generator (Tektronix 109 B) angeregt, dessen räumliche Anordnung der Figur 1 zu entnehmen ist. Mit diesem Generator wurden die Kondensatorstapel auf maximal etwa 80 V aufgeladen und über das interne Hg-Relais direkt entladen; ein Hg-Relais ist bekanntlich in der Lage, den Schaltvorgang im Zeitbereich <1 ns vorzunehmen. Dieses Anregungsprinzip ist der Figur 5 zu entnehmen, in der auch die Methode zur Oszillographentriggerung dargestellt ist. Um bei einem Einstrahl-KO auch mehrere, zeitlich gegeneinander verschobene Vorgänge auf einem einzigen Bild zur Darstellung bringen zu können, wurde der KO extern über eine kleine Induktionsschleife (Antenne) getriggert, welche in unmittelbarer Nähe des ersten Kondensatorwickels angebracht war.

3. Messresultate

Bevor auf die rechnerische Simulation der Vorgänge eingegangen wird, soll eine kleine Auswahl an Mess-Oszillogrammen die Ausgleichsvorgänge aufzeigen.

Die in Figur 6 und 7 dargestellten Beispiele betreffen den konzentrisch eingebauten Kondensatorstapel ohne Bedämpfungsmassnahmen. Die unterschiedlichen Oszillogramme der Figur 6 geben den zeitlichen Verlauf der Feldstärken an den Messstellen 1 («hochspannungsseitiger» Eingang des Kondensators), 3, 5, 7 und 10 (nahe erdseitigem Ende des Stapels) wieder. Bei der Interpretation der Oszillogramme, die mit der Feldsonde gewonnen wurden, ist zu beachten, dass die Messgrössen im Sinne eines

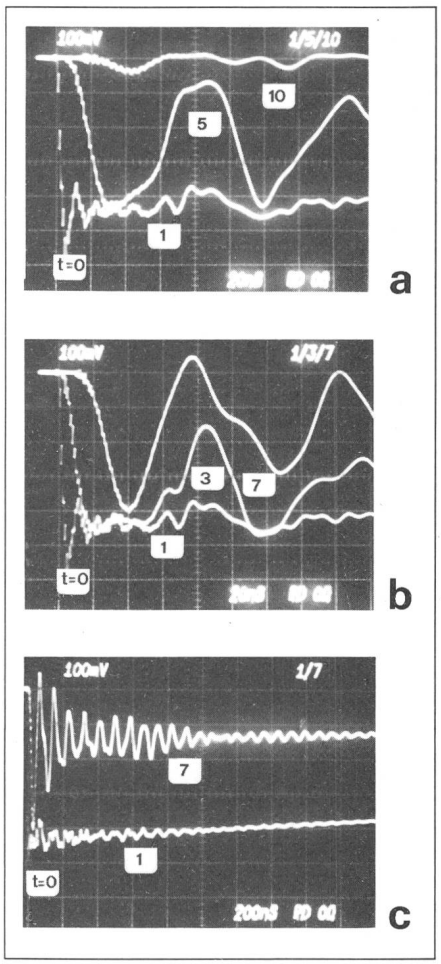


Fig. 6 Zeitlicher Verlauf der Feldstärke an verschiedenen Messstellen

Kondensator einseitig auf Erdpotential (Messung mit Feldsonde)

a Messstellen 1, 5, 10 Zeitmassstab: 20 ns/div.
b Messstellen 1, 3, 7 Zeitmassstab: 20 ns/div.
c Messstellen 1, 7 Zeitmassstab: 200 ns/div.

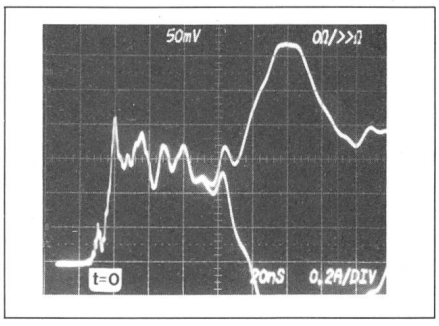


Fig. 7 Stromverlauf am Eingang des Kondensators bei kurzgeschlossenem (obere Kurve) bzw. offenem Ende (untere Kurve)

Zeitmassstab: 20 ns/div.
Strommassstab: 0,2 A/div.

Einschaltvorganges erscheinen, obwohl der aufgeladene Kondensator zum Zeitpunkt $t = 0$ am Eingang kurzgeschlossen wurde. Ursache dafür ist das Messsystem (Fig. 3), welches eine untere Grenzfrequenz, also Bandpasscharakter, besitzt und die Gleichspannungskomponente nicht erfassen kann. Dadurch wird auch die Dachschräge beim Übergang in den stationären Zustand, die vor allem aus den Langzeitvorgängen (Fig. 6c) sichtbar wird, verursacht.

Aus den zeitlich stark aufgelösten Vorgängen (Fig. 6 a/b) erkennt man deutlich, dass die Vorgänge um so später einsetzen, je weiter die Messstelle vom Eingang entfernt liegt. Die ausgeprägten Schwingungen, die aber nach etwa 1 µs abklingen, verursachen kurzzeitig sehr hohe Potentialdifferenzen auch an nahe beieinander liegenden Messstellen. Stationäre Potentialdifferenzen, wie diese der Serienschaltung der Wickel entsprechen, stellen sich nach Figur 6c erst nach etwa 1 µs ein.

Als Ursache für diese Schwingungen kann man leicht Wanderwellenvorgänge mit Reflexionserscheinungen an den Stapelenden vermuten. Daher ist eine Messung des zeitlichen Stromverlaufs von grosser Bedeutung. Figur 7 zeigt den gemessenen Strom am Eingang des Kondensators. Einmal war das Ende des Kondensators offen, das andere Mal geerdet. Dieser Stromverlauf ist innerhalb der ersten 60 ns völlig unabhängig von der Schaltung des Kondensatorendes, weist während weiteren etwa 20 ns zunehmende Abweichungen auf, um ab etwa 80 ns einem total anderen Zeitverlauf zu gehorchen. Aus dem erstgenannten Zeitbereich lässt sich mit guter Genauigkeit der Wellenwiderstand R_w der Kondensatorstapel als Quotient aus der Amplitude des Spannungsschrittes U_H (der Kondensator war auf 75 V geladen) und der mittleren Amplitude des registrierten Stromes I_H (etwa 0,6 A nach Fig. 7) berechnen

$$R_w = U_H / I_H \approx 125\,\Omega.$$

Weniger eindeutig wird die Ermittlung der Laufzeit τ der Wanderwelle, da der nach etwa 60 ns entweder ansteigende (Ende geerdet) oder abfallende (Ende offen) Strom zwei Unstetigkeiten zeigt. Solche Unstetigkeiten sind nach der doppelten Laufzeit 2τ zu erwarten. Mit der Gesamtlänge l des Kondensators wird die Wellengeschwindigkeit $v = l/\tau$ offensichtlich von der Art der betrachteten Unstetigkeit abhängig. Es kann zunächst nur vermutet werden, dass die erste Unstetigkeit auf Wellenmodes beruht, die durch parasitäre Kopplungen (z. B. kapazitive Kopplung der Kondensatorwickel untereinander) entstehen. Die zweite Unstetigkeit hingegen (bei etwa 80 ns) ist mit einer langsameren Welle verknüpft, welche die grössere Energie der Wanderwellenvorgänge transportiert. Ob diese Vorstellung richtig ist, kann nur die Simulation der Vorgänge beweisen (s. Abschnitt 4.2).

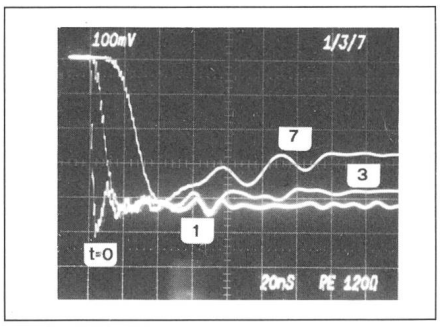


Fig. 8 Zeitlicher Verlauf der Feldstärke an den Messstellen 1, 3 und 7

Kondensator einseitig über $R = 125\ \Omega$ mit Erde verbunden (Messung mit Feldsonde). Zeitmassstab: 20 ns/div.

Um Reflexionen am Kondensatorende zu vermeiden, kann der Kondensator mit seinem Wellenwiderstand R_w abgeschlossen werden. Das Ergebnis einer derartigen Massnahme zeigt Figur 8, wobei ein direkter Vergleich mit Figur 6b möglich ist. Der am erdseitigen Ende des Kondensators angebrachte Widerstand $R_E = R_w = 125\ \Omega$ war praktisch rein ohmisch. Dem Oszillogramm ist zu entnehmen, dass nun der Spannungsschritt mit Wellengeschwindigkeit der Kondensatorsäule entlang läuft. Die Front der hinlaufenden Welle wird, wie auch in Figur 6, durch Dämpfungserscheinungen leicht abgeflacht. Die Maximalamplitude wird aber nur wenig reduziert; sie tritt auch noch an R_E (hier nicht gezeigt) auf, wird dort aber praktisch nicht mehr reflektiert, wie man bei einem Vergleich der Vorgänge an der Messstelle 7 erkennen kann. Die stationären Potentialwerte stellen sich jedoch erst nach längerer Zeit ein, die der Figur 8 nicht mehr entnehmbar ist.

Eine Unterdrückung der Wanderwellen-Schwingungen durch einen konzentrierten Widerstand dieser Art wäre bei Hochspannungskondensatoren kaum möglich, da dieser Widerstand kurzzeitig eine zu hohe Spannung übernehmen müsste. Man kann die Schwingungen aber auch dadurch unterdrücken, dass man geeignet dimensionierte Widerstände homogen verteilt in die Kondensatorkette einbringt, wie dies bei gedämpft-kapazitiven Spannungsteilern der Fall ist [2]. Um Schwingungen zu vermeiden, muss der Gesamtwert der eingebrachten Widerstände 4–5mal so gross wie der Wellenwiderstand sein, und deren Anzahl sollte grösser als etwa 5 sein [1]. Die Verbindungen zwischen den Kondensatorstapeln wurden daher entfernt und durch Kohleschichtwiderstände ersetzt (Fig. 9a). Aus den Oszillogrammen der Figuren 9b und 9c ist ersichtlich, dass sich die stationären Potentialdifferenzen längs dem Kondensator extrem schnell einstellen. Abgesehen vom verzögerten Erscheinen der Potentiale an den räumlich versetzten Messstellen erreichen die Potentiale nicht mehr die hohen Anfangswerte, was darauf zurückzuführen ist, dass die einlaufende Spannungswelle durch die verteilten Widerstände kontinuierlich abgesenkt wird und damit die lokalen Wellenströme reduziert. Die Ströme werden dadurch so eingestellt, dass jeder Längskondensator bereits mit dem Einlaufen der Spannungswelle die richtige Ladung erhält. Stromre-

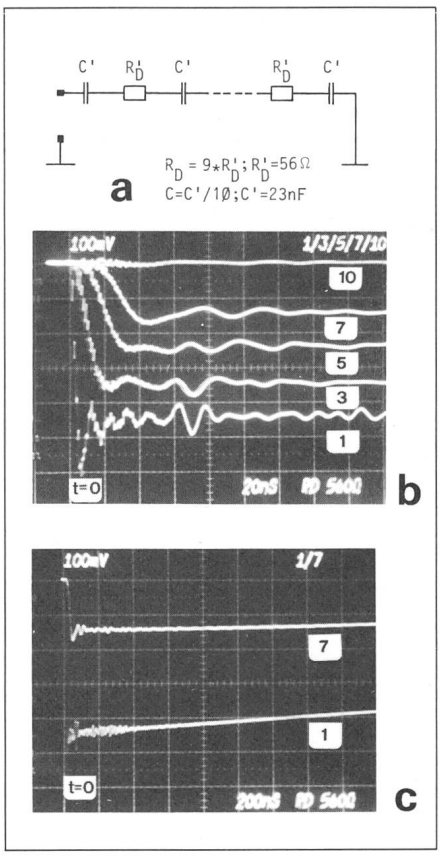


Fig. 9 Messungen am bedämpften Kondensator

a Zuordnung der diskreten Dämpfungswiderstände R_D' zu den Stapel-Kapazitäten C'.
b Zeitlicher Verlauf der Feldstärken an den angegebenen Messstellen 1...10. Messung mit Feldsonde. Zeitmassstab 20 ns/div.
c wie b, jedoch Zeitmassstab 200 ns/div.

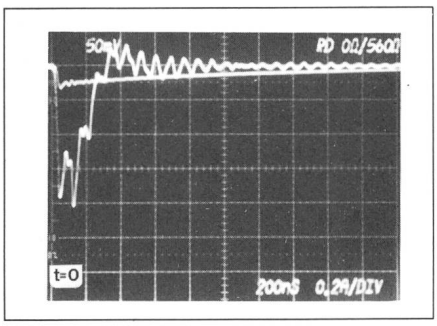


Fig. 10 Stromverlauf am Ende des einseitig geerdeten Kondensators

Flache Kurve $R_D' = 56\,\Omega$ (siehe Fig. 9a)
Steile Kurve $R_D' = 0\,\Omega$
Zeitmassstab 200 ns/div.

flexionen am geerdeten Kondensatorende werden ebenfalls vermieden.

Dieser Vorgang wird durch Figur 10 bestätigt, in der der Stromverlauf am erdseitigen Kondensatorende sowohl ohne ($R_D' = 0$) als auch mit ($R_D' = 56\,\Omega$) innerer Bedämpfung verglichen wird. Die zeitliche Integration über beide Ströme würde zur gleichen Ladung führen, da ja in beiden Fällen die Gesamtladung zur Aufladung der Kapazitäten im System gleich bleibt. Während aber im unbedämpften Fall der Strom zunächst viel zu gross ist und schliesslich durch Mehrfachreflexionen schnell abgebaut wird, zeigt der Stromverlauf im bedämpften Fall

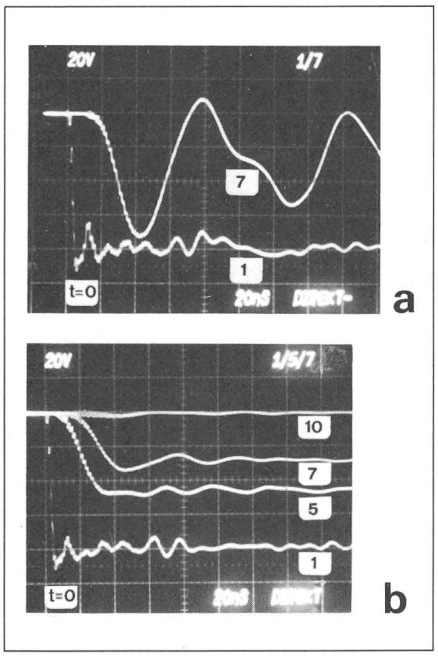


Fig. 11 Zeitlicher Verlauf der Spannung an verschiedenen Stellen des Kondensators bei direkt abgegriffener Spannung

Kondensator einseitig auf Erdpotential
Zeitmassstab: 20 ns/div.
a Messstellen 1, 7; Kondensator unbedämpft (vgl. Fig. 6b)
b Messstellen 1, 5, 7, 10; Kondensator bedämpft (vgl. Fig. 9b)

keine Reflexionsvorgänge, er beginnt mit kleiner Amplitude und klingt exponentiell ab, entsprechend der durch die Widerstände R_D' bedingten Zeitkonstanten.

Um abzuklären, inwiefern die begrenzte räumliche Auflösung der Feldmesssonde lokale Schwingungen unterdrückt, wurden, wie schon eingangs erwähnt, die Spannungen auch direkt am Kondensator abgegriffen. Wie Figur 11 zeigt, ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede zu den Oszillogrammen der Feldmessungen. Mit der Methode der Feldmessung können die Vorgänge also genügend genau erfasst werden.

Diese Auswahl von Messergebnissen lässt die prinzipiellen Vorgänge zwar erkennen, wirft aber auch noch Fragen auf, die am besten mit einer Berechnung der Vorgänge beantwortet werden können. Eine wesentliche Frage stellt sich in bezug auf die Abflachung der Wellenstirn, die durch reine Wanderwellenvorgänge nicht erklärt werden kann, sofern nicht eine sehr stark frequenzabhängige Dämpfung vorausgesetzt wird. Mit den nachfolgenden numerischen Simulationen kann aber zumindest ein Teil der Fragen abgeklärt werden.

4. Numerische Simulation

4.1 Grundlagen für die Berechnung

Wie in der Einleitung erwähnt, wurden Ausgleichsvorgänge auf Hochspannungskondensatoren im Zusammenhang mit kapazitiven Spannungsteilern schon eingehend untersucht. Der Kondensator wird nach Figur 12a durch eine Serieschaltung von N gleichen Elementen dargestellt. Jedes Element stellt ein Glied eines Kettenleiters dar, in welchem Längswiderstand R', Längsinduktivität L', Längskapazität C' sowie Parallelkapazität C_p' und Erdkapazität C_e' enthalten sind (Fig. 12b).

Weil die einzelnen Elemente als solche nicht mehr von Bedeutung sind, nimmt man einen homogenen Aufbau des Kondensators an, d. h., die Anzahl der Kettenglieder strebt gegen unendlich. Dies ermöglicht eine relativ einfache Berechnung der transienten Vorgänge auf dem Kondensator mit Hilfe der Leitungsgleichungen, die im Detail im Anhang durchgeführt wird. Aus der Übertragungsfunktion des Systems (Gl. 1) wird die Schrittantwort in Form einer Summenfunktion berechnet (Gl. 8). Diese Herleitung konnte nicht di-

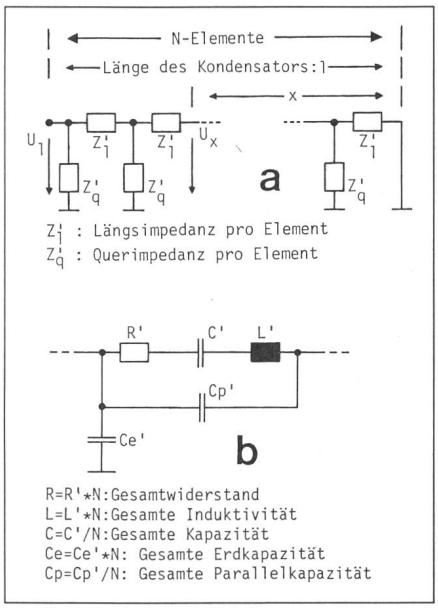


Fig. 12 Kettenleiter-Ersatzschaltbild eines Kondensators

a Ersatzschaltbild für den Gesamtkondensator
b Ersatzschaltbild eines Kettenelementes (bestehend aus Z_l' und Z_q')

rekt von [1] übernommen werden, da es im vorliegenden Fall notwendig ist, den zeitlichen Verlauf der Spannung an allen Stellen des Kettenleiters zu berechnen. Die Vereinfachung, dass die Länge x klein sei gegenüber der Gesamtlänge l des Kondensators (Fig. 12a und Gl. 1), war deshalb nicht zulässig.

Die Summenfunktion wurde auf dem Tischrechner HP 9845 B programmiert. Weil die Rechenzeit mit der Anzahl berechneter Funktionspunkte proportional zunimmt, ist diese Anzahl für den jeweils betrachteten Vorgang beschränkt. Da die berechneten Punkte vom Plotter durch Geradenstücke verbunden wurden, führte dies bei schnell veränderlichen Vorgängen zum Teil zu eckigen Kurvenverläufen.

4.2 Numerische Berechnung der Ausgleichsvorgänge auf Hochspannungskondensatoren

Beim Einsatz des Tischrechners für die vorliegende Arbeit verfolgte man grundsätzlich zwei Ziele: Einmal sollte abgeklärt werden, ob mit Hilfe eines einfachen Ersatzschaltbildes, wie es Figur 12 zeigt, Spannungsformen, wie sie beispielsweise in Figur 6 gemessen wurden, befriedigend erklärt werden können, andererseits sollten, falls die erste Frage positiv beantwortet wurde, durch Vergleiche zwischen den numerischen Berechnungen und den Messungen die für die Anordnung nach Figur 1 gültigen Werte der Elemente des Ersatzschaltbildes bestimmt werden.

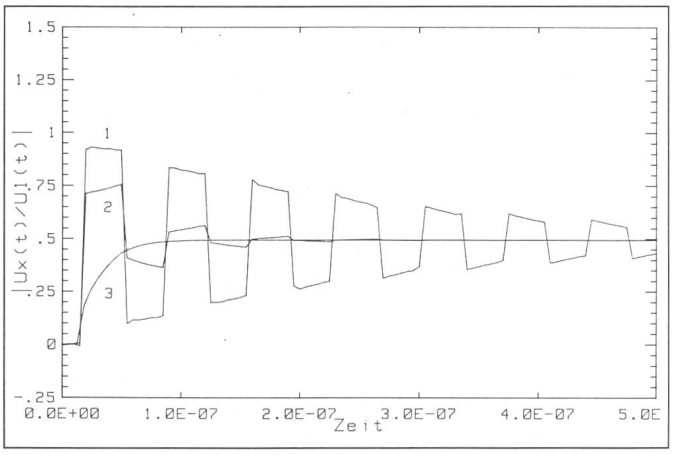


Fig. 13 Berechneter zeitlicher Spannungsverlauf in der Mitte eines Kondensators in Abhängigkeit der Bedämpfung

Parallelkapazität $C_p = 0$, Schritt der Amplitude am Eingang = 1, einseitig geerdet
$C = 5$ nF; $C_e = 500$ pF; $L = 2{,}5$ µH; $C_p = 0$
Kurve 1: $R = 20\ \Omega$
Kurve 2: $R = 100\ \Omega$
Kurve 3: $R = 500\ \Omega$

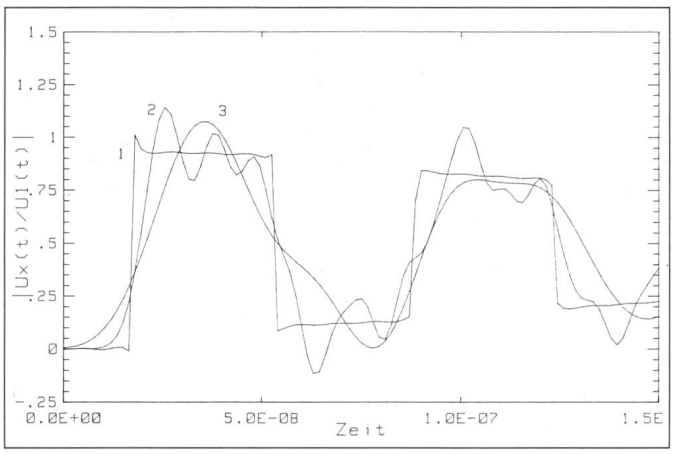


Fig. 14 Berechneter, zeitlicher Spannungsverlauf in der Mitte eines Kondensators bei kleiner Bedämpfung in Abhängigkeit der Parallelkapazität C_p

Schritt der Amplitude am Eingang = 1, einseitig geerdet
$C = 5$ nF; $C_e = 500$ pF; $L = 2{,}5$ µH; $R = 20\ \Omega$
Kurve 1: $C_p = 0$
Kurve 2: $C_p = 0{,}5$ pF
Kurve 3: $C_p = 5$ pF

Um den Einfluss der einzelnen Elemente der Ersatzschaltung auf die Einschwingvorgänge abzuklären, wurden die Werte für R, L, C und C_e vorerst frei gewählt. Anhaltspunkte für die Grössenordnung waren allerdings durch die Kenntnis der Messresultate aus Abschnitt 3 gegeben.

Die Parallelkapazität C_p wurde zunächst null gesetzt. Aus den Messresultaten der Figur 6 ist ersichtlich, dass die Amplituden der auftretenden Schwingungen im mittleren Bereich des Kondensators am grössten sind.

Die Berechnungen wurden deshalb für eine Stelle in der Mitte des Kondensators (x/l = 0,5; Figur 12) gemacht.

Der Wert eines Elementes der Ersatzschaltung wurde nun, bei konstanten anderen Werten, verändert. Durch Vergleich der so berechneten verschiedenen Spannungs-Zeit-Kurven untereinander kann auf den Einfluss des variierten Elements auf die entstehende Kurvenform geschlossen werden.

Für die Berechnungen der Figur 13 war der Längswiderstand R Parameter. Die Kurvenformen lassen sich ohne weiteres interpretieren. Nach der halben Laufzeit ($\tau = \sqrt{L \cdot C_e} = 35{,}4$ ns) trifft der angelegte Spannungsschritt in der Mitte des Kondensators ein. Die Spannung bleibt (für kleine Dämpfung) während τ annähernd konstant, bis die vom kurzgeschlossenen Ende negativ reflektierte Spannungswelle wieder in der Mitte eintrifft. Die reflektierte Welle wird am Eingang wieder negativ reflektiert, so dass sich nach einer weiteren Laufzeit τ die Spannung wieder ändert. Je nach Dämpfung schwingt die Spannung mehr oder weniger schnell auf den stationären Wert ein; bei grosser Dämpfung erreicht sie aperiodisch den Endwert.

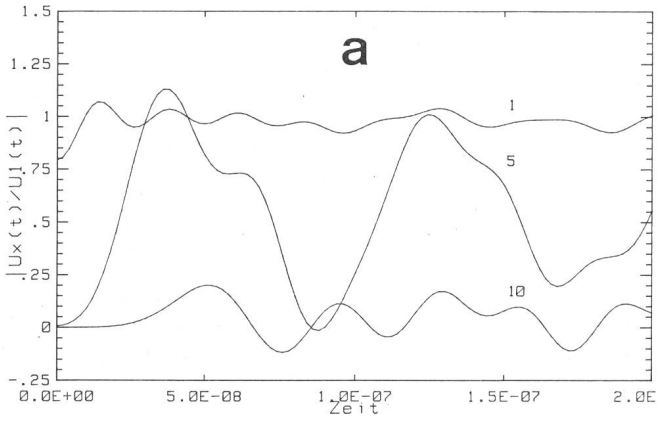
In Abschnitt 2 wurde die Frage nach der Ursache für das Abflachen der Flanke des angelegten Spannungsschrittes bei dessen Vorlaufen längs des Kondensators gestellt. In Figur 14 wird gezeigt, dass die in der Mitte des Kondensators auftretende Rechteckspannung durch das Einführen der Parallelkapazität C_p mit zunehmendem Wert von C_p immer stärker abgerundet wird.

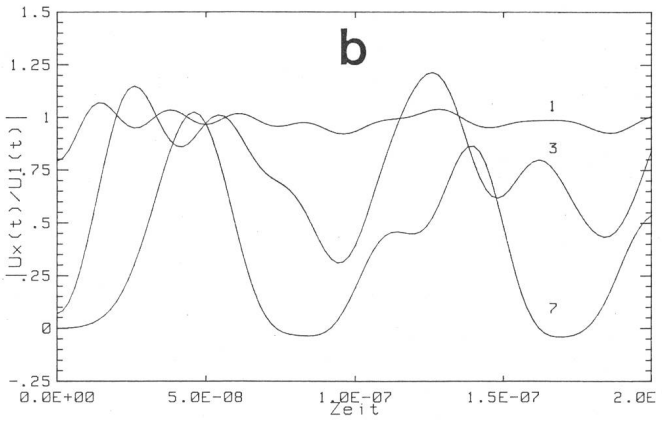
Das Einbringen der Parallelkapazität in das Ersatzschaltbild bewirkt also, dass die Spannung in der Mitte des Kondensators früher anzusteigen bzw. abzufallen beginnt, als dies bedingt durch die mit der Längsinduktivität und Erdkapazität gegebene Laufzeit der Fall wäre. Die Spannungsänderung an irgendeinem Punkt des Kondensators wird nun praktisch ohne Zeitverzögerung, je nach der Grösse von C_p mehr oder weniger stark, von den Spannungsänderungen an allen anderen Punkten des Kondensators beeinflusst. Physikalisch wäre der Vorgang so interpretierbar, dass Feldstärke- und Stromdichteänderungen an einer Stelle des Kondensators nicht nur innerhalb des Kondensators weiterlaufen, sondern dass sie auch über das elektromagnetische Feld ausserhalb des Kondensators übertragen werden. Die Ausbreitung ausserhalb des Kondensators erfolgt allerdings maximal mit Lichtgeschwindigkeit, eine Parallelkapazität im Ersatzschaltbild stellt also lediglich eine verbesserte Annäherung an die Wirklichkeit dar.

Weitere Berechnungen, bei denen die Längskapazität C variiert wurde, ergaben, dass das Einschwingverhalten des Kondensators durch Änderungen von C nicht mehr beeinflusst wird, sobald C wesentlich grösser als C_e und C_p ist.

Um die Werte der Ersatzschaltung so zu bestimmen, dass die berechneten zeitlichen Spannungsverläufe an verschiedenen Stellen des Kondensators den gemessenen in Figur 6 möglichst nahe kommen, ging man von der Messung nach Figur 7 aus. In Abschnitt 3 wurde aus dieser Figur schon der Wellenwiderstand R_w der Anordnung zu 125 Ω bestimmt. Die Beziehungen $R_w = \sqrt{L/C_e}$ und $\tau = \sqrt{L \cdot C_e}$, welche exakt für Kettenleiter gelten, falls die Bedingungen $R = C_p = 0$ und $C \gg C_e$ erfüllt sind, liefern Anhaltspunkte für die Wahl der Werte, mit denen eine Simulation erfolgen soll.

Während also die Grösse des Wellenwiderstandes festliegt, muss die Grösse der wirksamen Induktivität L und Erdkapazität C_e von der Laufzeit τ abhängen. Erste Berechnungen gingen von $\tau = 30$ ns aus, also einer Zeit, die einer Wellengeschwindigkeit entspricht, die aufgrund der ersten Unstetigkeit in den Stromverläufen, Figur 7, zu erwarten wäre. Damit wird $L = 3{,}75$ µH und $C_e = 240$ pF. C_e kann auch aus der Geometrie der Anordnung (Fig. 1), wenn auch nur grob, abgeschätzt werden; eine derartige Abschätzung bestätigt diesen Wert von C_e weitgehend. Die hier nicht wiedergegebenen Ergebnisse der Simulation zeigen aber, dass





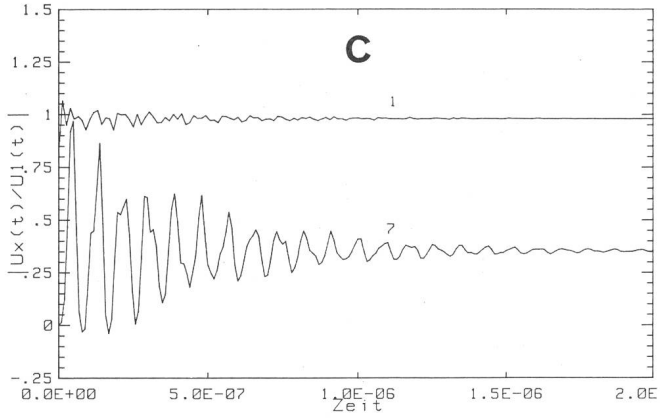


Fig. 15 Berechneter zeitlicher Spannungsverlauf an verschiedenen Stellen eines Kondensators

Schritt der Amplitude am Eingang = 1, einseitig geerdet. Es wurde versucht, die Elemente der Ersatzschaltung so zu wählen, dass die Berechnung den Oszillogrammen der Figur 6 möglichst nahe kommt.

$C = 2{,}3$ nF; $C_e = 340$ pF; $L = 5{,}25$ µH; $C_p = 2{,}5$ pF; $R = 25\ \Omega$

a Spannungen an den Messstellen 1(x/l = 0,98), 5(0,57) und 10(0,05)

b Spannungen an den Messstellen 1, 3(x/l = 0,77) und 7(0,36)

c Spannungen an den Messstellen 1 und 7, anderer Zeitmassstab

die Schwingungen zu hochfrequent, die Laufzeiten also zu klein werden.

Eine Erniedrigung der Frequenz der Schwingungen war also zu erwarten, wenn die Laufzeit τ sukzessive vergrössert wird, ohne dabei das Verhältnis L/C_e, also den Wellenwiderstand, zu verändern. Die gemessene Dämpfung der Schwingungen kann durch eine geeignete Wahl des Widerstandes R simuliert werden. Schliesslich wurde noch C_p variiert, bis die Formen der berechneten und gemessenen Spannungen bzw. Feldstärken möglichst gut übereinstimmten. Natürlich musste der Vorgang adaptiv erfolgen, da eine Änderung der einen Grösse eine Anpassung der andern notwendig machte.

Die wesentlichen Ergebnisse dieses Adaptionsprozesses sind den berechneten Vorgängen der Figuren 15 und 16 zu entnehmen. Mit der eindeutigen Gesamtkapazität des Kondensators von $C = 2{,}3$ nF wurden optimale Simulationsergebnisse mit $C_e = 340$ pF; $L = 5{,}25$ µH; $C_p = 2{,}5$ pF und somit $\tau = 42$ ns; $Z_w = 124\ \Omega$ erzielt, wobei beim reinen Kondensator (ohne zusätzliche Bedämpfung) mit $R = 25\ \Omega$ gemäss Figur 15 die auftretende Dämpfung sehr gut simuliert wird (vgl. Fig. 6). Die zusätzlichen Bedämp-

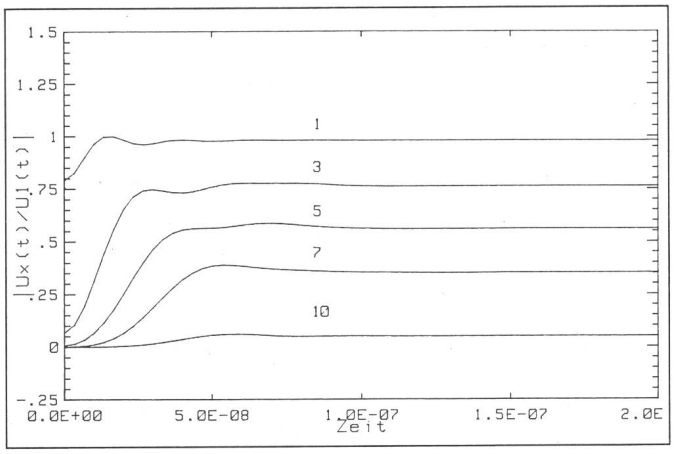


Fig. 16 Berechneter zeitlicher Spannungsverlauf an verschiedenen Stellen eines Kondensators

Schritt der Amplitude am Eingang = 1, einseitig geerdet. Es wurde versucht, die Elemente der Ersatzschaltung so zu wählen, dass die Berechnung den Oszillogrammen der Figur 9b entspricht.

$C = 2{,}3$ nF, $C_e = 340$ pF; $L = 5{,}25$ µH; $C_p = 2{,}5$ pF; $R = 529\ \Omega$

Spannungen an den Messstellen 1(x/l = 0,98), 3(0,77), 5(0,57), 7(0,36) und 10(0,05)

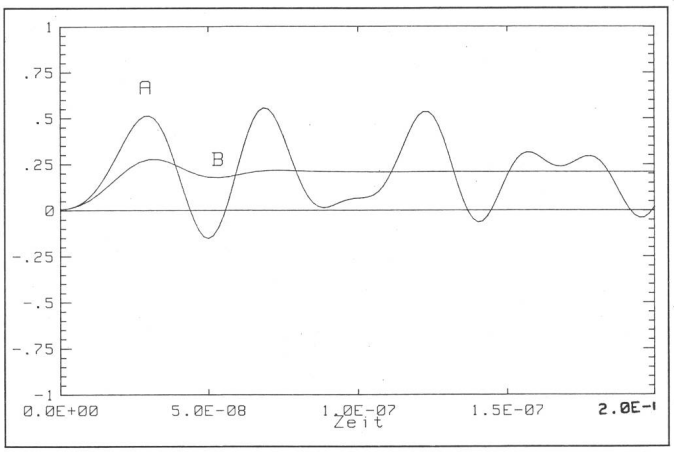


Fig. 17 Berechneter zeitlicher Verlauf der Spannung zwischen den Messstellen 5 und 7

A Ersatzschaltung gleich wie für Figur 15 (Kondensator unbedämpft)

B Ersatzschaltung gleich wie für Figur 16 (Kondensator bedämpft)

fungsmassnahmen mit $R_D' = 9{,}56\ \Omega$ (Fig. 9), also $R = (509 + 25)\ \Omega$, führen auch in Fig. 16 zum Verschwinden von Reflexionsvorgängen, was die Spannungsbeanspruchung der einzelnen Wickel wesentlich vermindert. Um dies zu verdeutlichen, wurde in Figur 17 als Beispiel der zeitliche Verlauf der Spannung zwischen den Messstellen 5 und 7 sowohl für den unbedämpften wie auch den bedämpften Kondensator berechnet. Am unbedämpften Wikkel können demnach Spannungswerte auftreten, die die stationären Werte ganz erheblich übersteigen.

Die diesem Abschnitt zugrunde gelegte Fragenstellung konnte also in befriedigender Weise beantwortet werden. Das Ersatzschaltbild nach Figur 12 stellt ein Modell eines Hochspannungskondensators dar, in welchem Einschwingvorgänge recht wirklichkeitsnah ablaufen. Mit Hilfe einfacher Messungen und durch einen Vergleich Rechnung–Messung können die Parameter bestimmt und die nötigen inneren und eventuell äusseren Beschaltungsmassnahmen zum Schutz des Hochspannungskondensators angegeben werden.

Anhang

Für den am Ende geerdeten Kondensator (Ersatzschaltbild Fig. 12) errechnet sich die Spannung an einem Abgriff auf dem Kondensator bei der Länge x zu

$$\frac{U_x(s)}{U_1(s)} = \frac{\sinh\left(\frac{x}{l}\sqrt{\frac{Z_l(s)}{Z_q(s)}}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{Z_l(s)}{Z_{q'}(s)}}\right)} \qquad (1)$$

l Gesamtlänge des Kondensators
x Länge vom geerdeten Ende aus gemessen
U_x Spannung an der Stelle x
U_1 Spannung am Eingang

Gl. 1 kann geschrieben werden:

$$\frac{U_x(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{p(s)} = \frac{\sinh\left(\frac{x}{l}\sqrt{Z(s)}\right)}{\sinh\sqrt{Z(s)}} \qquad (2)$$

$$\text{mit } \sqrt{Z(s)} = \sqrt{\frac{(R + sL + \frac{1}{sC})sC_e}{1 + (R + sL + \frac{1}{sC})sC_p}}$$

Mit Hilfe der Laplace-Transformation wird die Antwort dieses Übertragungssystems auf einen Einheitsschritt am Eingang berechnet:

$$\text{Schrittantwort } h(t) \circ\!\!-\!\!\bullet \frac{1}{s \cdot p(s)} \qquad (3)$$

Die Lösung von Gl. 3 kann mit dem Heavysideschen Entwicklungssatz erfolgen, wobei a_k die Pole von $p(s)$ sind:

$$y(t) = \frac{1}{p(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{a_k t}}{a_k \cdot p'(a_k)} \qquad (4)$$

Durch Einsetzen von $s = 0$ in Gl. 2 erhält man

$$\frac{1}{p(0)} = \frac{\sinh\left(\frac{x}{l}\sqrt{\frac{C_e}{C_p + C}}\right)}{\sinh\left(\sqrt{\frac{C_e}{C_p + C}}\right)} \qquad (5)$$

Weil keine identischen Nullstellen von Zähler und Nenner existieren, heisst $p(s) = 0$ auch $\sinh\sqrt{Z(s)} = 0$.

Der sinh ist null, wenn das Argument null ist. Damit ist

$$\sqrt{Z(a_k)} + k\pi i = 0 \qquad (6)$$

Als Lösung für die Pole a_k erhält man

$$(a_k)_{1,2} = -a \pm \sqrt{b} = -\frac{R}{2L}$$

$$\pm\sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1 + \frac{C_p}{C} + \frac{C_e}{C \cdot k^2\pi^2}}{\frac{LC_e}{k^2\pi^2}\left(1 + \frac{C_p}{C_e}k^2\pi^2\right)}} \qquad (7)$$

mit $k = 1,2...\infty$. Gl. 4 wird nun

$$y(t) = \frac{1}{p(0)} + e^{-at} \qquad (8)$$

$$\cdot \sum_{k=1}^{\infty} \underbrace{\left(\frac{e^{\sqrt{b}\cdot t}}{(-a + \sqrt{b}) \cdot p'(a_k)} + \frac{e^{-\sqrt{b}\cdot t}}{(-a - \sqrt{b}) \cdot p'(a_k)}\right)}_{S}$$

Durch Ableiten von (2) erhält man $p'(s)$. Berücksichtigt man die Zusammenhänge zwischen Hyperbelfunktionen komplexer Argumente und Winkelfunktionen sowie die Gl. 6, so folgt

$$p'(a_k) = -(-1)^k \cdot \frac{Z'(a_k)}{2k\pi\sin\left(\frac{x}{l}k\pi\right)} \qquad (9)$$

mit

$$Z'(a_k) = \pm 2L\sqrt{|b|}(C_e + C_p k^2\pi^2)^2/C_e \qquad (10)$$

Je nachdem, ob b positiv oder negativ ist, muss Gl. 8 verschieden berechnet werden.

$b > 0$ A4

$$S = -4(-1)^k \cdot \frac{k \cdot \pi\sin\left(\frac{x}{l}k\pi\right)}{Z'(a_k)(a^2 - b)} \cdot \left[a \cdot \sinh(\sqrt{b} \cdot t) + \sqrt{b} \cdot \cosh(\sqrt{b} \cdot t)\right] \qquad (11)$$

$b < 0$

$$S = -4(-1)^k \cdot \frac{k \cdot \pi\sin\left(\frac{x}{l}k\pi\right)}{Z'(a_k)(a^2 + |b|)} \cdot \left[a \cdot \sin(\sqrt{|b|} \cdot t) + \sqrt{|b|} \cdot \cos(\sqrt{|b|} \cdot t)\right] \qquad (12)$$

Literatur

[1] *W. Zaengl* und *K. Feser:* Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stossspannungsteilern. Bull. SEV 55(1964)25, S. 1249...1256.

[2] *W. Zaengl:* Ein neuer Teiler für steile Stossspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.

[3] *T. Yoshizumi, S. Matsuda* and *T. Nitta:* Fast transient overvoltage in GIS caused by the operation of isolators. Gaseous Dielectrics. Proceedings of the third international symposium, 1982; New York a.o., Pergamon Press, 1982, p. 456...465.

[4] *K. Möller:* Ein Beitrag zur experimentellen Überprüfung der Funkengesetze von Toepler, Rompe-Weizel und Braginskii. ETZ-A 92(1971)1, S. 37...42.

[5] *C. T. R. Wilson:* Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A 221(1920)Aug. 27, p. 73...115.

[6] *J. M. Meek* and *M. McCollins:* Measurement of electric fields at electrode surfaces. Electronics Letters 1(1965)4, p. 110...111.