

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 61 (1970)

Heft: 8

Artikel: Ein Beitrag zur Berechnung der Spannungsverteilung von Hochspannungskondensatoren

Autor: Feser, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-915934>

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: 09.01.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Ein Beitrag zur Berechnung der Spannungsverteilung von Hochspannungskondensatoren

Von K. Feser, München

674-680

621.319.4:621.3.027.3

Es wird die Spannungsverteilung von Kondensatoren mit Hilfe eines allgemein gültigen Ersatzschaltbildes berechnet. Durch eine Bedämpfung der Teilelemente mit einigen 100Ω können die inneren Überspannungen wesentlich vermindert werden.

A l'aide d'un schéma équivalent d'une validité générale, on calcule la répartition de la tension des condensateurs. Un amortissement des éléments partiels par quelques 100Ω permet de réduire sensiblement les tensions internes.

1. Einleitung

In der Hochspannungstechnik treten an Kondensatoren sehr oft rasche Spannungsänderungen auf. Z. B. werden kapazitive Spannungsteiler für die Messung rasch veränderlicher Vorgänge verwendet. Daneben treten insbesondere bei Funkenzusammenbrüchen an der Glättungskapazität einer Gleichspannungsanlage oder an der Belastungskapazität einer Stoßanlage Spannungsänderungen auf, die zu Überspannungen an Teilkapazitäten führen.

Für Spannungsteiler wurde dieses Problem der inneren Schwingungen durch die Entwicklung des gedämpft kapazitiven Spannungsteilers [1]¹⁾ beseitigt, der das Messen sehr rasch veränderlicher Stoßspannungen mit einer hohen Bandbreite gestattet.

Auch für die Bedämpfung von Kondensatoren wurde diese Methode bereits mit Erfolg angewendet. Kärner [2] bedämpfte die Belastungskapazität eines Stoßgenerators, um mit Hilfe einer schnell zündenden Schaltfunkenstrecke einen rasch ansteigenden Impuls ohne grosses Überschwingen am Prüfling zu erhalten. Ebenso wurde die Glättungskapazität der Gleichspannungsanlage des Hochspannungsinstituts der TH München durch innere Widerstände bedämpft, um bei einem Gleichspannungsdurchschlag keine zu hohen Teilspannungen zu erhalten. Aus diesen Anwendungsbereichen wird die Wichtigkeit dieser Bedämpfung sichtbar.

Obwohl die praktische Notwendigkeit dieser Massnahme verständlich ist, existieren trotzdem keine Berechnungen über die Spannungsverteilung längs Hochspannungskondensatoren. Deshalb wird im folgenden ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Spannungsverteilung von Kondensatoren angegeben, das sich aus einem allgemein gültigen Ersatzschaltbild ableiten lässt, das in [3] bereits für die Berechnung der Rechteckstossantwort von Spannungsteilern angewendet wurde.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Ersatzschaltbild

Ein Kondensator ebenso wie ein kapazitiver Spannungssteiler kann durch ein Ersatzschaltbild (Fig. 1) nachgebildet werden, dessen tatsächliche Vernachlässigungen unbedeutend sind. Infolge der hohen Spannungen und der dadurch bedingten Grösse der Objekte ist eine Aufteilung in Einzelemente sinnvoll, wodurch man mit der Annahme einer homogenen

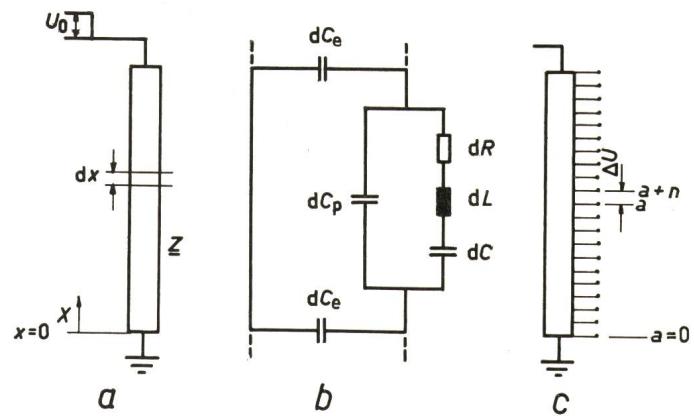


Fig. 1
Ersatzschaltbild von Hochspannungskondensatoren
a allgemeines Ersatzschaltbild;
b ein Element dx

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

$$\gamma l = \sqrt{\frac{Z_l}{Z_q}} = \sqrt{\frac{(R + sL + 1/sC)sC_e}{1 + (R + sL + 1/sC)sC_p}}$$

c Einteilung der homogenen Leitung in 20 Einzelemente für die Berechnung der Überspannungen

$$0 \leq a \leq 19, \quad N = 20, \quad n = 1, \quad d = a + n/2$$

C gesamte Längskapazität; C_e gesamte Erdkapazität; C_p gesamte Parallelkapazität; R gesamter Widerstand; L gesamte Induktivität; Z komplexer Gesamtwiderstand

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

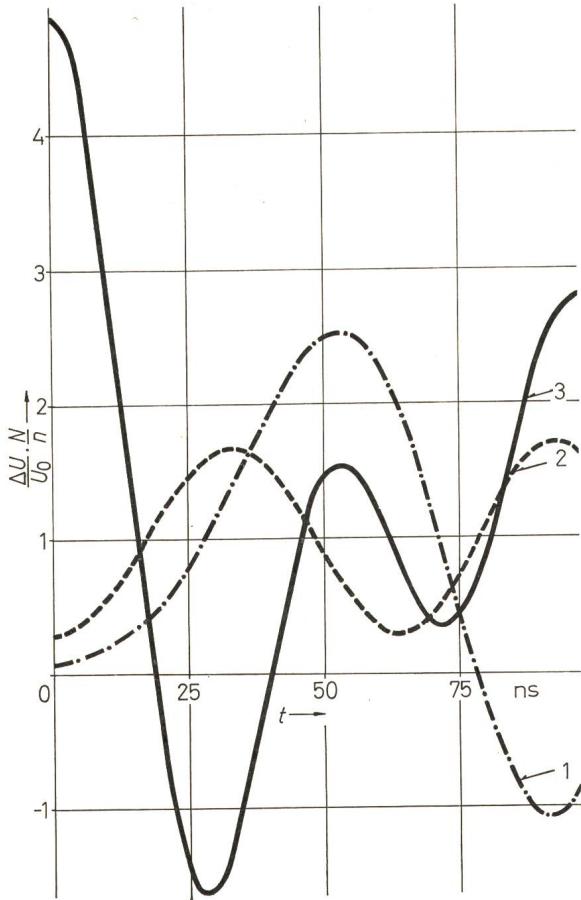


Fig. 2

Spannungsverlauf (Rechteckstossantwort) an verschiedenen Elementen eines Kondensators

($C = 16 \text{ nF}$, $R = 20 \Omega$, $L = 10 \mu\text{H}$, $C_p = 5 \text{ pF}$, $C_e = 150 \text{ pF}$)

- 1 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 0 und 1
- 2 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 9 und 10
- 3 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 19 und 20

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Aufteilung der Einzelemente zu einer sekundärseitig kurzgeschlossenen Leitung als Ersatzschaltbild gelangt. Eine Diskussion über die Berechtigung der einzelnen Elemente findet sich in [3].

3. Berechnungsverfahren

Für die Berechnung der Spannungsverteilung längs eines Kondensators wird dieser in 20 Einzelemente zerlegt ($N = 20$). Von den Leitungsgleichungen ausgehend erhält man unter Beachtung einer kurzgeschlossenen Leitung für die Überspannung ΔU an einem bestimmten Element (Fig. 1c)

$$\Delta U = U(a+n) - U(a) = I_2 Z \left[\sinh[\gamma(a+n)] - \sinh(\gamma a) \right] \quad (1)$$

Bezieht man ΔU auf die gesamte angelegte Spannung U_0 , so wird mit $d = a + n/2$, $l = N$ und $\gamma l = \sqrt{Z_1/Z_q}$:

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{2 \sinh \left(\frac{n}{2N} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_q}} \right) \cosh \left(\frac{d}{N} \sqrt{\frac{Z_1}{Z_q}} \right)}{\sinh \sqrt{\frac{Z_1}{Z_q}}} = \frac{1}{p(s)} \quad (2)$$

Ist U_0 ein Rechteckstoss, erfolgt die Lösung von Gl. (2) mit Hilfe des Heavisideschen Entwicklungssatzes [3]. Die Eigenfrequenzen des Systems haben lauter verschiedene Null-

stellen (kein zweifacher Pol), und diese sind alle von Null verschieden. Im Oberbereich erhält man allgemein:

$$Y(t) = \frac{1}{p(o)} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{e^{akt}}{a_k p'(a_k)}$$

a_k sind die Eigenfrequenzen des Systems, die sich aus den Nullstellen von $p(s)$ errechnen. Der $\sinh \sqrt{Z(s)}$ ist Null, falls

$$\sqrt{Z(s)} = j k \pi$$

mit

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

Die negativen k -Werte entfallen, da die Sprungfunktion erst zur Zeit $t \geq 0$ zugeschaltet wird und damit nur positive Pole als Lösung in Frage kommen. Der Wert $k = 0$ ist ebenfalls keine echte Nullstelle, da für $k = 0$ auch der Nenner Null wird, der Grenzübergang für k gegen Null aber endlich bleibt. Als Lösungen ergeben sich alle $k \geq 1$.

Die Berechnung erfolgt analog zu [3]. Als Ergebnis für den Spannungsverlauf eines Elements errechnet sich mit den Vernachlässigungen

$$n \ll N \quad \text{und} \quad \frac{C_e}{C + C_p} \ll 1$$

im Oberbereich:

$$Y(t) = \frac{n}{N} \left\{ 1 - \frac{C_e}{C + C_p} \left[\frac{1}{6} - \frac{1}{2} \left(\frac{d}{N} \right)^2 \right] + \right. \\ + 2 e^{-at} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\cos \left(\frac{d}{N} k \pi \right)}{\left(1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2 \right) \left(1 + \frac{C_e}{C k^2 \pi^2} + \frac{C_p}{C} \right)} \cdot \\ \left. \left[\cosh(bt) + \frac{a}{b} \sinh(bt) \right] \right\}$$

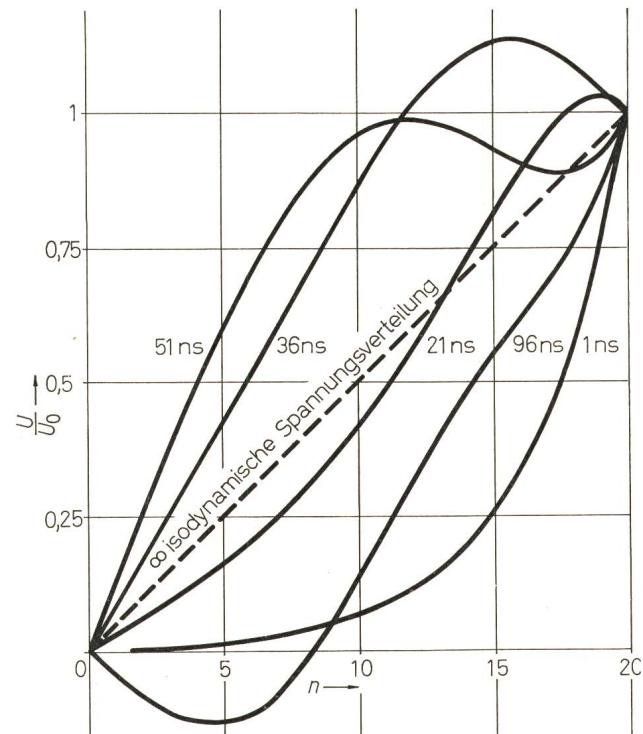


Fig. 3

Spannungsverteilung eines Kondensators zu bestimmten Zeitpunkten

(Angaben wie Fig. 2)

n Anzahl der Elemente

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

mit

$$a = R/2L$$

$$b = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1 + \frac{C_p}{C_e} + \frac{C_e}{C k^2 \pi^2}}{\frac{L C_e}{k^2 \pi^2} \left(1 + \frac{C_p}{C_e} k^2 \pi^2\right)}}$$

und

$$n/2 \leq d \leq N - n/2$$

Für $d = n/2$ ($a = 0$) erhält man die Niederspannungsantwort eines Spannungsteilers [3].

4. Ergebnis

Die folgenden praktischen Berechnungen wurden an einem Kondensator mit einer Kapazität von 16 nF, der in der Gleichspannungsanlage des Instituts als Glättungskapazität eingebaut ist, mit entsprechenden wirklichkeitsnahen Daten für die Störelemente durchgeführt. Für diese Kapazität wurde

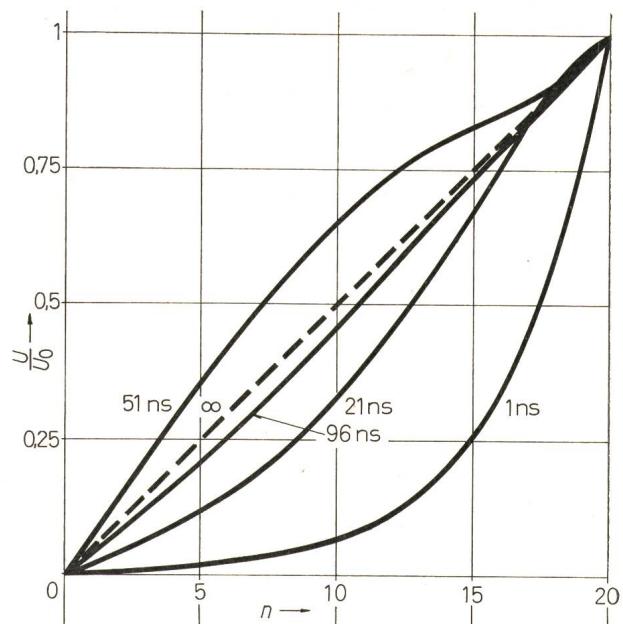


Fig. 5
Wie Fig. 3, aber $R = 500 \Omega$
Bezeichnungen siehe im Text

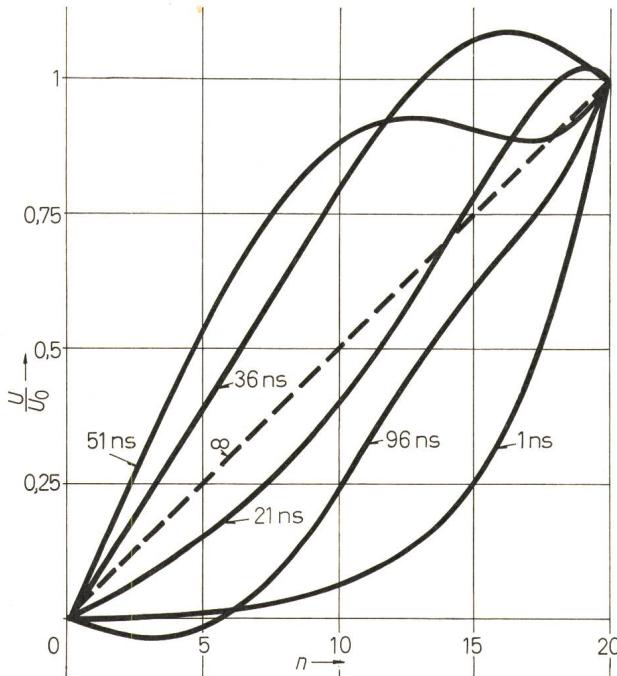


Fig. 4
Wie Fig. 3, aber $R = 100 \Omega$
Bezeichnungen siehe im Text

bei konstanter Grösse der Störelemente der Einfluss eines Dämpfungswiderstandes untersucht. Für die Berechnung der Spannungsverteilung wurde die Kapazität durch 20 Einzellemente ersetzt.

In Fig. 2 ist die Spannungsverteilung einiger Elemente in Abhängigkeit der Zeit aufgetragen. Man erkennt die überaus starke Beanspruchung der Eingangskapazitäten. Am ersten Element liegt bei Zuschaltung einer Sprungfunktion eine um den Faktor 5 erhöhte Überspannung, die infolge der geringen Dämpfung (20Ω) innerhalb ca. 30 ns auf einen negativen Wert überschwingt. Auch der Spannungsverlauf an den übrigen Teilkapazitäten schwingt bei dieser geringen Dämpfung erheblich um den stationären Wert. Damit ergeben sich unzulässig hohe Spannungen an den Teilkapazitäten, die nur durch

eine Überdimensionierung beherrscht werden können. In der Praxis sind die Überspannungen durch den endlichen Anstieg der Eingangsspannung kleiner. In Fig. 3 ist für den gleichen Kondensator die Spannungsverteilung über der Anzahl der Elemente, d. h. längs des Kondensators, zu bestimmten Zeitpunkten wiedergegeben. Die Anfangsverteilung (1 ns) zeigt die starke Beanspruchung der hochspannungsseitigen Teilkapazitäten. Infolge der geringen Dämpfung sind starke Schwingungen möglich.

Die Fig. 4, 5 und 6 zeigen den Einfluss einer inneren Bedämpfung des Kondensators. Mit zunehmendem Widerstand wird die isodynamische Spannungsverteilung längs der Elemente früher erreicht. Für 100Ω ergeben sich noch aus-

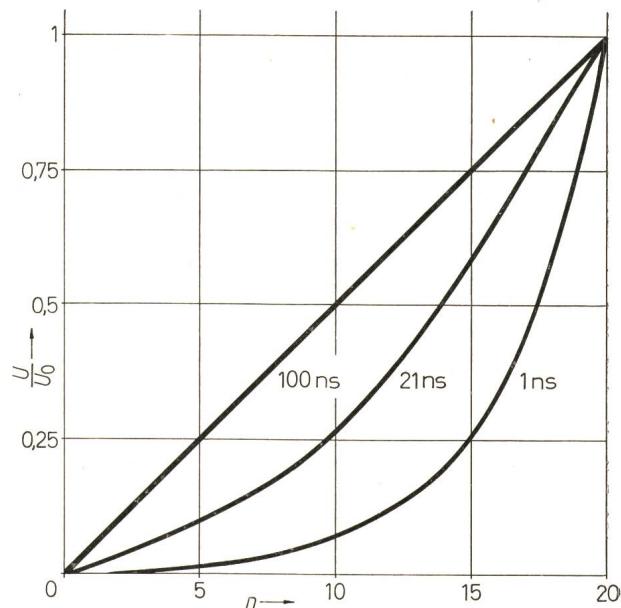


Fig. 6
Wie Fig. 3, aber $R = 1000 \Omega$
Bezeichnungen siehe im Text

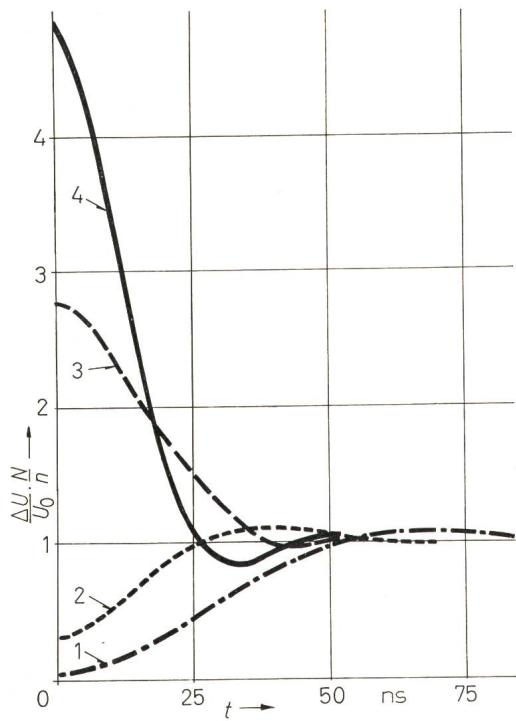


Fig. 7

Spannungsverlauf (Rechteckstossantwort) an verschiedenen Elementen eines Kondensators

(Angaben wie bei Fig. 2, aber $R = 1000 \Omega$)

1 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 0 und 1; 2 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 9 und 10; 3 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 17 und 18; 4 bezogener Spannungsverlauf zwischen Element 19 und 20

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

geprägte Schwingungen. Ein Widerstand von 500...1000 Ω bedämpft das Übertragungsverhalten bereits sehr stark. Praktisch nicht beeinflusst wird durch den Widerstand die An-

fangsverteilung, da sich diese entsprechend den kapazitiven Verhältnissen aufbaut.

Fig. 7 zeigt die Spannungsverteilung an verschiedenen Elementen für eine Bedämpfung mit 1000Ω in Abhängigkeit der Zeit. Man erkennt sehr deutlich, dass mit einem Widerstand von 1000Ω bereits nach ca. 50 ns eine isodynamische Spannungsverteilung erreicht wird. Zum Einschaltagenblick ergibt sich für die hochspannungsseitige Teilkapazität wieder diese etwa 5fache Beanspruchung. In der Praxis können aber Spannungszusammenbrüche an Funkenstrecken oder Rückzündungen von Gleichrichtern nicht in unendlich kurzer Zeit erfolgen, so dass sich die erste hohe Spitz, die durch die Parallelkapazitäten bedingt wird, nicht einstellt.

Als Ergebnis dieser Betrachtungen lässt sich sagen, dass eine Bedämpfung von Kondensatoren für diese eine geringere Beanspruchung mit sich bringt. Dieses Prinzip wird im Stoßspannungsteiler durch die Verteilung der Dämpfungswiderstände auf die einzelnen Stufen bereits seit einiger Zeit angewendet. Man sollte aber auch Belastungskapazitäten von Stoßanlagen und Glättungskapazitäten von Gleichspannungsanlagen mit einigen 100Ω bedämpfen, um die inneren Überspannungen möglichst klein zu halten.

Literatur

- [1] W. Zaengl: Ein neuer Teiler für steile Stoßspannungen. Bull. SEV 56(1965)7, S. 232...240.
- [2] H. Kärner: Die Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Dissertation Technische Hochschule München, 1967.
- [3] W. Zaengl und K. Feser: Ein Beitrag zur Berechnung des Übertragungsverhaltens von Stoßspannungsteilern. Bull. SEV 55(1964)25, S. 1249...1256.

Adresse des Autors:

Dipl.-Ing. K. Feser, Wissenschaftlicher Assistent am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Hochschule München, Arcisstrasse 21, D-8 München.

Kurzberichte — Nouvelles brèves

ETH an Tiefseeforschung beteiligt. Meeresgeophysiker, Ozeanographen und Geologen aus acht verschiedenen Ländern und den Vereinigten Staaten tagten kürzlich im Geologischen Institut der ETH Zürich im Zusammenhang mit dem amerikanischen Projekt für Tiefseebohrungen JOIDES (Joint Oceanographical Institution's Deep Earth Sampling).

Eine erste Phase (1968—1969) mit 90 Bohrungen im Atlantischen und Pazifischen Ozean hat erstmals wissenschaftlich einwandfrei bewiesen, dass die klassische Theorie der Kontinentverschiebung richtig ist. Nun befasst sich die Konferenz mit einer zweiten Phase, die bis 1972 dauern soll und mit 30 Millionen Dollar von der U. S. National Science Foundation unterstützt wird. Prof. K. J. Hsü von der ETH Zürich wird sich als neues Mitglied der Mittelmeerkommission des JOIDES-Projektes mit der Koordinierung der amerikanischen und europäischen Pläne befassen.

Allis-Chalmers und Kraftwerk Union kooperieren. Die Allis-Chalmers Manufacturing Co., Milwaukee (USA), und die Kraftwerk Union AG, Mülheim/Ruhr, sind grundsätzlich übereingekommen, eine neue Gesellschaft für den Vertrieb und die Wartung von thermischen Energie-Erzeugungsanlagen, einschließlich Dampfturbinen und zugehöriger Generatoren, in den USA zu gründen.

Kernwissenschaftliche Dokumentationen sind der Gegenstand eines Vertrages zwischen Euratom und der Internationalen Atomenergie-Organisation. Beide Organisationen haben Dokumentationssysteme aufgebaut. Die wesentlichen Daten von Publikationen und Berichten liegen in einer Form vor, die eine direkte Bearbeitung und Auswertung durch Computer ermöglicht. Fragen von Forschern, Ingenieuren und Technikern, ein spezielles Thema betreffend, können unter Verwendung von mehr als 900 000 Unterlagen rasch, selektiv und sachdienlich beantwortet werden.