

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	45 (1954)
Heft:	7
Artikel:	Spannungsverteilung in einem städtischen Wasserleitungsnetz bei hohen Spannungen oder Strömen von Industriefrequenz und bei Stossbeanspruchung
Autor:	Gugelmann, U. / Jacot, M. / Ruoss, E.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1058802

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: 12.01.2026

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

extremen Steilheiten $\frac{di}{dt} = 5 \cdot 10^2 \frac{A}{\mu s}$ und $\frac{di}{dt} = 2 \cdot 10^4 \frac{A}{\mu s}$. Weitere Parameter stellen die geometrischen Abmessungen des Plattenkondensators dar. Als extreme Fälle sind Kondensatoren mit einem Plattenradius R von 0,5 und 2,5 km aufgezeichnet. Die Distanz der Platten ist gleich deren Radius gewählt. Da zum Ansprechen des Zählwerks ein minimales u_i von ca. 0,8 V in der Antenne induziert werden muss, ergeben sich die räumlichen Zählgrenzen des Einschlagzählers. Diese sind nicht nur für jedes $\left| \frac{di}{dt} \right|_{5 \mu s}$, sondern auch für jeden Plattenkondensator verschieden.

Es bleibt zu berücksichtigen, dass die gemachten Voraussetzungen nur grobe Näherungen der Wirklichkeit sind. Eine Erfassung des Einflusses der Topographie der Gegend, der Wolkenformen usw., ist nicht möglich.

Bessere Ersatzbilder des Blitzes sind leider nur für stationäre Wechselfelder möglich (z. B. Hertzscher Dipol). Für die Berechnung des Magnetfeldes H des Blitzstromes kommen daher nur Fourier-Reihen in Frage, die leider für allgemeine Betrachtungen sehr unübersichtlich sind. Grundsätzlich würde das Bild in der Hinsicht besser, als der Feldabfall mit der Entfernung flacher würde. Die Schwierigkeit, dass sich für den Messbereich des Zählers keine scharfe, vom Stromverlauf unabhängige Grenze (Blitzdistanz) angeben lässt, bleibt jedoch bestehen.

Zusammenfassend kann über den Messbereich des Einschlagzählers unter Berücksichtigung der in Ab-

schnitt 6 aufgeführten Ergebnisse folgendes festgestellt werden. Spricht der Einschlagzähler an, so hat bestimmt ein Blitz in die Erde eingeschlagen, und zwar innerhalb eines Umkreises von höchstens ca. 5 km Radius, was der grössten vertikalen Blitzlänge entsprechen dürfte. Nicht jeder Erdblitz in diesem Umkreis hingegen wird gezählt, d. h. stromschwache und kurze Blitze nur, wenn sie näher liegen. Von der Anzahl der gezählten auf die Anzahl der ungezählten Erdblitze zu schliessen, ist unmöglich. Somit kann lediglich angegeben werden, dass im genannten Umkreis eine bestimmte, minimale Anzahl von kräftigen Erdblitzen eingeschlagen hat.

Für absolute Messungen der Anzahl Blitzentzündungen pro km^2 ist demnach der Einschlagzähler nicht geeignet, trotzdem die Abhängigkeit der induzierten Spannung von den elektrischen Blitzdaten und dessen Entfernung und Lage streng definiert sind. Werden hingegen nur vergleichende Messungen, z. B. zwischen verschiedenen Gebieten gewünscht, so dürfen die Zählungen benutzt werden, falls die topographischen Formen der Gegend einander ähnlich sind. In diesem Falle spielen die beschriebenen Streuungen des Gerätes, sowie die verschiedenen Zählgrenzen keine Rolle, da diese, für viele Einschläge betrachtet, in den verschiedenen Gegenden dieselben sind.

Literatur:

- [1] Golde R. H.: Frequency of occurrence of lightning flashes to earth. Journal of Royal Meteorological Society Bd. 71, Nr. 307/308. Jan.-Apr. 1945.
- [2] Schonland: The Flight of Thunderbolts. Oxford 1950.

Adresse des Autors:

E. Trümpy, dipl. Elektroingenieur ETH, Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6

Spannungsverteilung in einem städtischen Wasserleitungsnetz bei hohen Spannungen oder Strömen von Industriefrequenz und bei Stoßbeanspruchung

(Von U. Gugelmann und M. Jacot, Zürich, und E. Ruoss, Winterthur)

61.316.99 : 628.15

Die Arbeit gibt ein knappes Bild von einem städtischen Wasserleitungsnetz und zeigt, wie mittels einer Darstellung in einem Radialnetz das Problem der Spannungsverteilung bei Beanspruchung durch hohe 50-Hz-Ströme und durch Stoßspannungen sowohl rechnerisch wie mit einfaches Modellversuch annähernd untersucht werden kann.

Ce travail décrit d'abord sommairement un réseau urbain de canalisations de distribution d'eau, puis aborde le problème de la répartition des tensions lors de sollicitations par de forts courants de 50 pér./s ou par une onde de choc. Les auteurs y montrent comment, moyennant la transformation du système en un réseau radial, ce problème peut être étudié aussi bien par le calcul que par essais sur modèle.

I. Einleitung

Nach allgemeiner Praxis der Elektrizitätswerke werden städtische Niederspannungsanlagen an das bestehende Wasserleitungsnetz geerdet. Durch die zunehmende Bevölkerung steigt einerseits die Dichte der angeschlossenen elektrischen Apparate und damit die Wahrscheinlichkeit von Erd- oder Kurzschlüssen, direkten oder indirekten Blitzentzündungen. Andererseits vergrössert sich durch die Zunahme der Starkstromanlagen (Hochspannungs-Übertragungsleitungen, Transformatorenstationen usw.) die Wahrscheinlichkeit, dass dem Wasserleitungsnetz bei Erdschlägen in geerdeten Hochspannungsnetzen hohe Spannungen aufgedrückt werden. Dazu bringt die stets zunehmende Vermischung der elektrischen

Verteilnetze ein Ansteigen der Kurzschlussleistungen mit sich, so dass bei Erdschlägen Erdströme bis zu mehreren kA fliessen können.

In allen diesen Fällen muss man sich fragen, ob nicht gefährliche Berührungsspannungen zwischen dem Wasserleitungsnetz und dem Erdboden oder — bei grossem Spannungsgradienten — zwischen an verschiedenen Punkten geerdeten Objekten auftreten können. Dazu kommt, dass die grossen Ströme in den Wasserleitungsrohren durch Induktion auch Schwachstromanlagen (z. B. Telefon) stören können.

Aus diesen Gründen ist die Spannungsverteilung im Wasserleitungsnetz, wenn diesem an irgendeiner Stelle ein hoher Strom, sei es 50-Hz-Wechselstrom,

oder Stoßspannung, aufgedrückt wird, sehr interessant.

Im Hochspannungslaboratorium der ETH wurde unter der Leitung von Prof. Dr. K. Berger an Hand von elektrischer Nachbildung von städtischen Wasserleitungssystemen diese Verteilung sowohl rechnerisch wie experimentell untersucht. Dabei wurde grosses Gewicht auf die genaue Bestimmung der elektrischen Daten des Wasserleitungssystems gelegt, da ihre Werte hauptverantwortlich für die Richtigkeit und die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse sind.

II. Aufbau eines städtischen Wasserleitungssystems

Pläne von Wasserleitungssystemen, die zuvorkommenderweise von den Elektrizitätswerken der Städte Bern, Winterthur und Zürich zur Verfügung gestellt wurden, zeigen, dass die im Erdkörper verlegten Rohre geschlossene Maschen von verschiedener Form und Grösse je nach Art der Überbauung der Stadt bilden. Der vorliegenden Arbeit wurden folgende Durchschnittsdaten zugrunde gelegt:

Durchschnittliche Maschenweite	100 m
Durchmesser des am häufigsten vorkommenden Rohrtyps	
a) Innendurchmesser	100 mm
b) Aussendurchmesser	112 mm
Rohrlänge (im Durchschnitt)	4 m
Rohrmaterial	Fe-Sandguss und Fe-Schleuderguss

Um das recht inhomogene Bild eines städtischen Wasserleitungssystems rechnerisch erfassen zu können, wurde es idealisiert. Dazu standen prinzipiell zwei Wege offen: das quadratische Netz und das Radialnetz.

Während für moderne Stadtanlagen eher das quadratische Netz Gültigkeit hat, entspricht das Radialnetz mehr den Verhältnissen, wie sie bei unseren älteren Stadtbildungen auftreten. Es besitzt somit den Vorteil grösserer Allgemeingültigkeit. Zudem lässt sich nur bei dieser Netzdarstellung ein Weg finden, der bei zu verantwortendem Aufwand erlaubt, die Spannungsverteilung mit einem einfachen numerischen Verfahren zu berechnen. Als weiteren Vorzug ermöglichen die Symmetrien des Radialnetzes, die Betrachtungen auf einen Viertel des Netzes zu beschränken, wie dies im Folgenden stets getan worden ist.

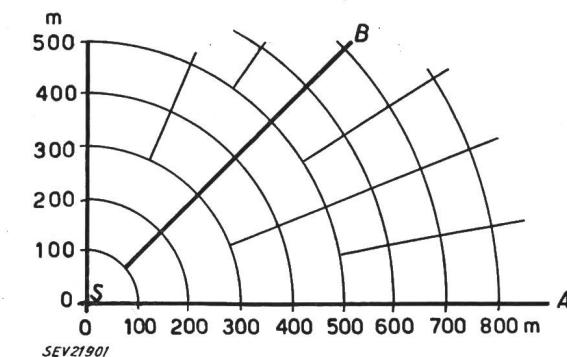


Fig. 1

1/4-Teil des idealisierten Radialnetzes einer Wasserversorgung
A, B Leitungsstrahlen; S Speisepunkt

Der Speisepunkt (Fehlerort) bildet jeweils das Zentrum des Radialnetzes. Von dort aus fügen sich die 100-m-Maschen zwischen die sog. Hauptstrahlen,

welch letztere durch die durch den Speisepunkt verlaufenden Rohrleitungen gebildet werden. Wird bei dieser Darstellung eine gewisse Systematik befolgt, die sich allerdings stark an die wirklichen Verhältnisse anlehnen muss, so ergibt sich eine Idealisierung durch ein Radialnetz, wie es Fig. 1 zeigt.

III. Elektrische Eigenschaften eines Wasserleitungssystems

Ein Rohrstück besitzt eine Längsimpedanz, sowie eine Ableitung gegen Erde. Die Längsimpedanz setzt sich aus einem Ohmschen und einem induktiven Anteil zusammen, während bei der Ableitung ein Ohmscher und ein kapazitiver Anteil auftreten. Diese sind alle stark frequenzabhängig. Sie werden im Folgenden kurz besprochen und jeweils für 100 m Rohrlänge angegeben.

1. Der Ohmsche Widerstand des Rohres

Schleudergussrohre besitzen einen Ohmschen Gleichstromwiderstand von $0,027 \Omega$ pro 100 m Rohrlänge, Sandgussrohre einen solchen von $0,034 \Omega$ pro 100 m. Der Muffenübergangswiderstand kommt dem Widerstand von ca. 30 m Rohr gleich. Angenommen, dass sich im Mittel pro 4 m Rohrlänge eine Muffe befindet, berechnet sich für 100 m Rohrlänge ein Gleichstromwiderstand von

$$R_0 = 0,255 \Omega$$

Bei Wechselstrom tritt Stromverdrängung auf, so dass sich der Ohmsche Widerstand besonders bei hohen Frequenzen wesentlich vergrössert¹⁾. Die Berechnung führt bei Annahme einer relativen Permeabilität von $\mu_r = 200$ (Gusseisen) auf folgende Frequenzabhängigkeit (gültig oberhalb 100 Hz)

$$R_s = 0,618 \cdot 10^{-2} \sqrt{f} + 0,225 \quad \Omega/100 \text{ m} \quad (1)$$

Darin stellt das zweite Glied den Muffenübergangswiderstand dar.

2. Die Rohrinduktivitäten

L_a = äussere Induktivität,

L_i = innere Induktivität, herrührend vom Magnetfeld im Innern des Gusseisens.

a) Die äussere Rohrinduktivität L_a , herrührend vom Magnetfeld ausserhalb des Rohres, beträgt näherungsweise

$$L_a \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{r_a}^{a/2} \ln r \, dr \quad (2)$$

(in Henry pro m Rohrlänge)

Integriert vom äusseren Rohrradius bis zur halben Netzmaschenweite $a/2 = 50$ m ergibt $L_a = 135 \mu\text{H}/100 \text{ m}$.

b) Die innere Induktivität berechnet sich zu:

$$L_i = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \left[\frac{r_i^4}{(r_a^2 - r_i^2)^2} \cdot \ln \left(\frac{r_a}{r_i} \right) - \frac{3r_i^2 - r_a^2}{4(r_a^2 - r_i^2)} \right] \quad (3)$$

worin $\mu_r = 200$
 r_a äusserer Rohrradius
 r_i innerer Rohrradius

¹⁾ Stoßspannungen haben hochfrequenten Charakter.

Für niederfrequenten Wechselstrom ergibt sich näherungsweise eine innere Induktivität von $L_i = 100 \mu\text{H}/100 \text{ m}$.

Die Stromverdrängung bei höheren Frequenzen kommt einer Verkleinerung der Leitschichtdicke und einer Vergrösserung des inneren Rohrradius r_i gleich, d. h. r_i strebt mit zunehmender Frequenz gegen r_a . Es lässt sich beweisen, dass dabei die innere Induktivität rasch abnimmt, bei Frequenzen über 10^4 Hz ist sie praktisch Null. Des weiteren ergibt sich, dass auch die durch die innere Induktivität verursachte Reaktanz $X_i = \omega L_i$ bei höheren Frequenzen vernachlässigbar klein ist gegenüber dem Ohmschen Widerstand R_\sim und der äusseren Reaktanz X_a .

3. Der Ableitungswiderstand des Rohres (Erdungswiderstand R_e)

Für längere, blanke Rohre²⁾ gilt für den Erdungswiderstand [1]³⁾:

$$R_e = \frac{2,3 \lg(2l/d)}{2\pi l} \varrho \left[1 + \frac{\lg(l/2g)}{\lg(2l/d)} \right] \quad (4)$$

worin ϱ spezifischer Widerstand des Erdbodens in $\Omega \cdot \text{m}$
 l Länge in m
 d Rohrdurchmesser in m
 g Tiefe der Rohre im Erdboden in m

Der spezifische Erdwiderstand ϱ variiert bei den verschiedenen Bodenarten in sehr weiten Grenzen. Man findet Werte zwischen 15...1000 $\Omega \cdot \text{m}$. Den Berechnungen wurde ein mittleres $\varrho = 100 \Omega \cdot \text{m}$ zugrunde gelegt [6]. Damit errechnet sich der

Untersuchungen der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) zeigten, dass der Erdwiderstand bei hohen Stoßströmen sinkt [2]. Für Staberdungen ist sein Wert niedriger als bei 50-Hz-Wechselstrom. Es werden deshalb bei Stoßspannung als oberer Mittelwert des Erdungswiderstandes $R_{es} = 1,74 \Omega/100 \text{ m}$ und als unterer $R_{ei} = 0,87 \Omega/100 \text{ m}$ gewählt.

4. Die Erdkapazität des Rohrnetzes

Für die Kapazität C einer aus zwei konzentrischen Zylindern bestehenden Leitung gilt:

$$C = 2\pi \varepsilon l \frac{1}{\ln(R/r)} \quad (5)$$

worin l Rohrlänge
 r Rohrradius ($= 5 \text{ cm}$)
 R Radius der Gegenelektrode (mit 5 m angenommen)

Unter dieser sicher zu strengen Annahme einer Potentialfläche Null in einer Entfernung von 5 m vom Rohr resultiert eine Kapazität $C = 1400 \text{ pF}/100 \text{ m}$, die bestimmt grösser ist als in Wirklichkeit. Bei den höchsten im Stoßspektrum noch wesentlichen Frequenzen von ca. $0,5 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ ergibt sich dabei ein maximaler Leitwert von $\omega C = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ S}/100 \text{ m}$. Gegenüber der Ohmschen Ableitung kann er vernachlässigt werden.

IV. Spannungsverteilung bei Gleichstrom und bei Industriefrequenz

Die Abweichungen der Spannungsverteilung bei Gleichstrom und bei Niederfrequenz von 50 Hz sind

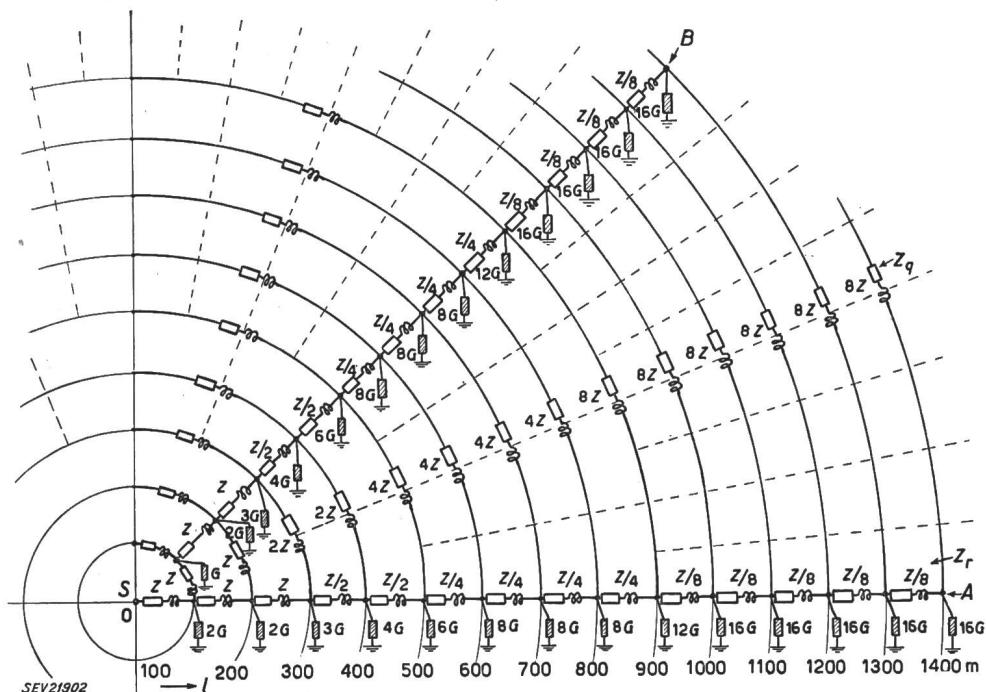


Fig. 2

Netzmodell auf A- und B-Strahl reduziert

l Abstand vom Speisepunkt; Z_q Querimpedanz; Z_r Radialimpedanz
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Erdungswiderstand $R_e = 1,74 \Omega/100 \text{ m}$ Rohr oder ein Leitwert von $G = 0,6 \text{ S}/100 \text{ m}$ Rohr ($G = 1/R_e$).

²⁾ Der Teeranstrich der neuverlegten Rohre verliert seine isolierende Wirkung schon nach kurzer Zeit.

³⁾ Siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

sehr gering, so dass die beiden Fälle gemeinsam behandelt werden können. Berechnungen haben ergeben, dass das Wasserleitungsnetz bei 50 Hz einen Leistungsfaktor von $\cos \varphi = 0,975$ aufweist; es hat praktisch einen Ohmschen Charakter. Die Vergrös-

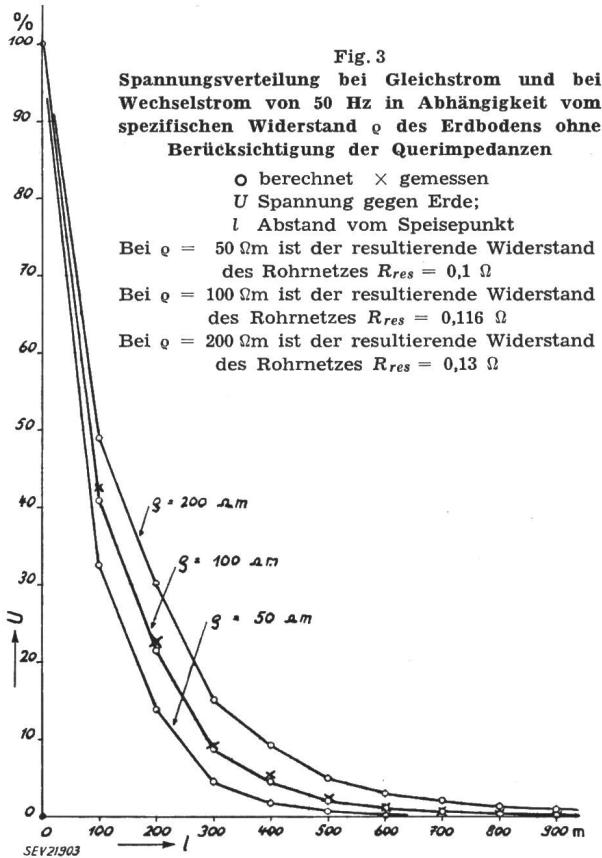
serung der Impedanz durch die Induktivitäten wurde trotzdem mit einem Zuschlag von 4 % auf den Ohmschen Widerstand berücksichtigt.

1. «Elektrisches Bild» des Wasserleitungsnetzes

Im Abschnitt II wurde die vereinfachte Darstellung des Wasserleitungsnetzes in Form eines Radialnetzes beschrieben. Denkt man sich an Stelle der je 100 m langen Rohrstücke zwischen den Knotenpunkten die entsprechenden, im Abschnitt III berechneten, elektrischen Größen R und ωL als Impedanz und G als Leitwert, so erhält man das elektrische Ersatzschema des Wasserleitungsnetzes.

Zur besseren rechnerischen Erfassung sowie zur Herstellung eines einfachen Netzmodells ist die folgend beschriebene Reduktion auf die Hauptstrahlen A und B vorgenommen worden. Die 100-m-Radialimpedanzen der in Fig. 2 gestrichelt angegebenen Strahlen wurden mit den entsprechenden der Hauptstrahlen A und B parallelgeschaltet und die über die 100-m-Rohrstücke verteilten Leitwerte in den nächstäußersten und im Uhrzeigersinn nächstfolgenden Knotenpunkten zusammengefasst. Die Querimpedanzen zwischen den beiden Strahlen wurden addiert.

Für niederfrequente Ströme ist eine solche «punktweise» Zusammenfassung zulässig, da sich dabei die Unterteilung in 100-m-Abschnitte als genügend fein erweist. Die sprunghafte Zunahme von



Impedanz und Leitwert vom Zentrum weg liegt in der Inhomogenität des Wasserleitungsnetzes begründet (100-m-Maschen).

Die Spannungsverteilung wurde gerechnet (numerisches Verfahren) und am Modell gemessen

(experimentelles Verfahren am Netzmodell). Die Resultate sind in den Kurven der Fig. 3 und 4 aufgezeichnet.

2. Numerisches Verfahren

Jede Stufe eines Netzstrahles wird als Spannungssteiler aufgefasst. Die Spannung kann nun bei Annahme eines fiktiven Stromes in der letzten Stufe stufenweise von hinten her berechnet werden. Setzt man die Spannung am Anfangspunkt zu 100 %, so erhält man die prozentuale Spannungsverteilung von Knotenpunkt zu Knotenpunkt. Eine genauere Berechnung des Spannungsverlaufes in den Zwischenstücken zeigte (durch feinere Unterteilung), dass man diesen als quasi-linear annehmen darf.

Die Kurven der Fig. 3 zeigen die Spannungsverteilung für den gewählten «Normalboden» ($\varrho = 100 \Omega\text{m}$, $G = 0,6 \text{ S}/100 \text{ m}$), sowie für einen besser leitenden ($\varrho = 50 \Omega\text{m}$, $G = 1,2 \text{ S}/100 \text{ m}$) und einen schlechter leitenden Boden ($\varrho = 200 \Omega\text{m}$, $G = 0,3 \text{ S}/100 \text{ m}$). Die Rohrimpedanz beträgt $Z = 0,265 \Omega/100 \text{ m}$.

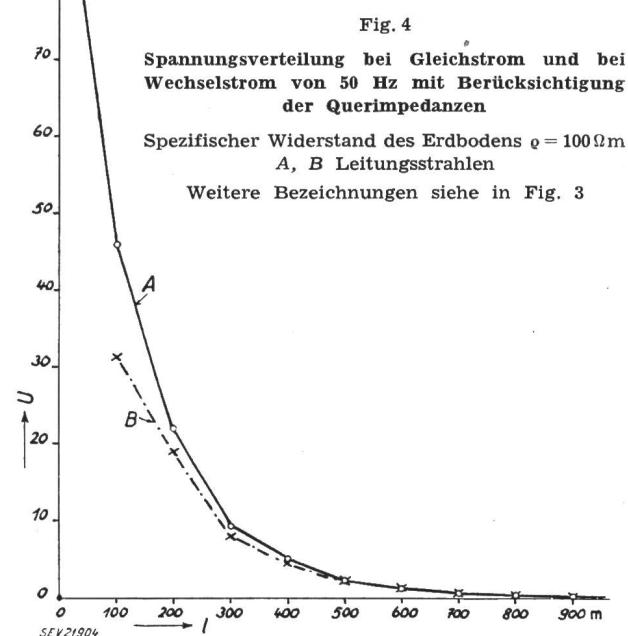
Für die Impedanz des gesamten Rohrleitungsnetzes gegen das Erdreich R_N ist bei einem Boden von

$$\begin{aligned} \varrho = 50 \Omega\text{m}: R_N &= 0,1 \Omega \\ \varrho = 100 \Omega\text{m}: R_N &= 0,116 \Omega \\ \varrho = 200 \Omega\text{m}: R_N &= 0,13 \Omega \end{aligned}$$

Der resultierende Erdungswiderstand am Einspeisepunkt ist somit nur wenig vom spezifischen Bodenwiderstand ϱ abhängig und stets ungefähr 0,1 Ω .

3. Messungen am Netzmodell

In den Kurven der Fig. 3 sind als Kontrolle die am Netzmodell gemessenen Werte (ohne Querimpedanzen) mit den gerechneten verglichen. Sie zeigen eine gute Übereinstimmung.



Die Kurven der Fig. 4 zeigen die gemessene Spannungsverteilung bei Berücksichtigung der Querimpedanzen im «Normalboden» ($\varrho = 100 \Omega\text{m}$). Es

sind dabei die Spannungsunterschiede in Querrichtung des Netzes ersichtlich.

Das Netzmodell erlaubt zusätzlich die Untersuchung der Verhältnisse bei beliebig rekonstruierten Leitungsunterbrüchen (Reparaturen, Leitungsbruch, Eternitrohrstücke, nicht überbrückte Muffen usw.); dabei wurden zum Teil hohe Differenzspannungen an den Unterbruchstellen gemessen.

V. Spannungsverteilung bei Stoß

Da Stoßvorgänge hochfrequente Erscheinungen sind, überwiegt der induktive Widerstand gegenüber dem Ohmschen. Die Spannung sinkt schon nach relativ kurzen Distanzen auf kleine Werte, weshalb man sich auf die Nachbildung eines kleinen Teilgebietes, vom Speisepunkt bis zum ersten Knotenpunkt, des Netzes beschränken kann (Fig. 5).

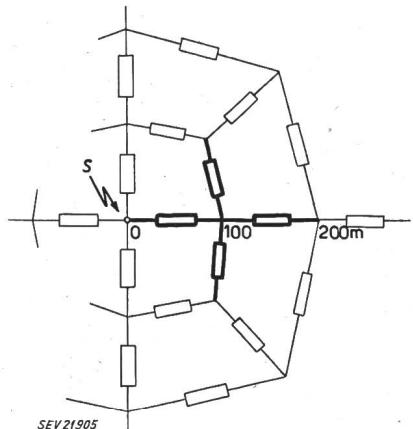


Fig. 5

Netzausschnitt zur Untersuchung bei Stoßspannung
Einschränkung der Untersuchung auf den fett ausgezogenen Teil
S Speisepunkt

Aus diesen Gründen wurde für die Ausmessung mit Stoßspannung bzw. -strom ein spezielles Modell, bestehend aus Induktivitäten und Ableitungswiderständen angefertigt. Zur genauen Bestimmung der

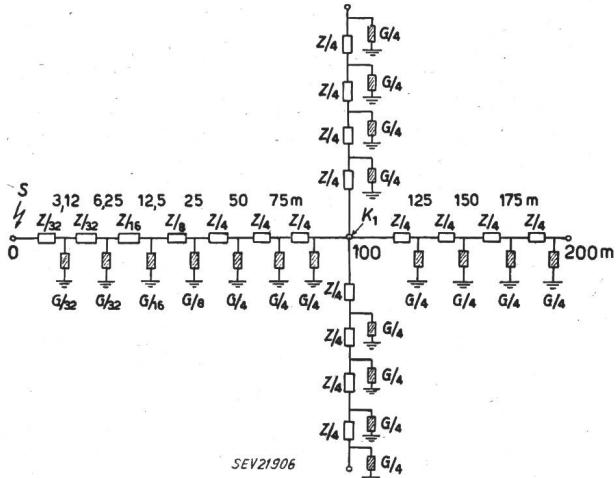


Fig. 6
Netzmodell zur Untersuchung mit Stoßspannung
S Speisepunkt; K₁ 1. Knotenpunkt

Spannungsverteilung unterteilte man die in Fig. 5 angegebenen Teilstücke feiner als beim 50-Hz-Modell, so dass das Netzmodell die Form, wie sie in Fig. 6 angegeben ist, erhielt.

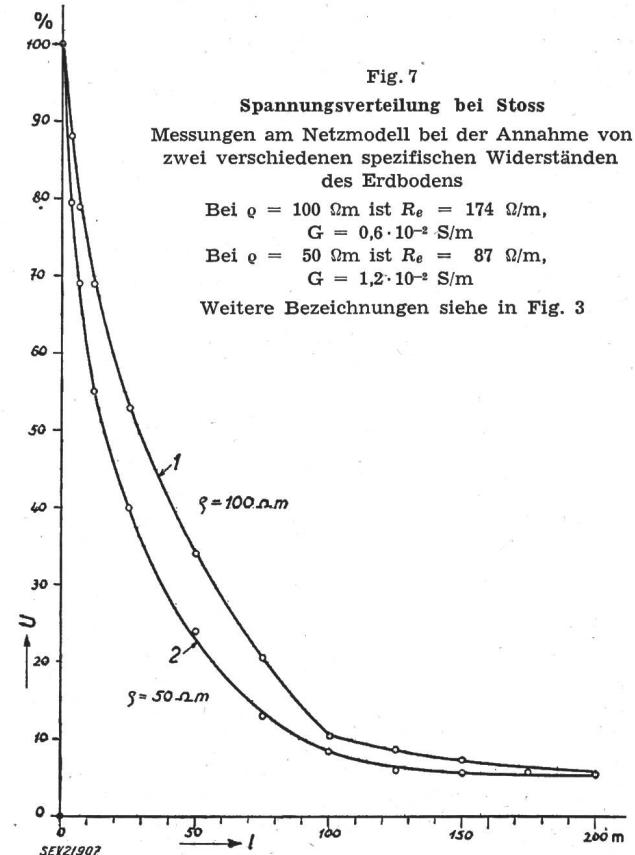
Die Speisung des Modells mit einer Normalstosswelle von 1|50 auf den Punkt 0 ergab die Spannungsverteilung nach den Kurven der Fig. 7. Die Werte wurden bei zwei verschiedenen Erdungswiderständen,

$$R_e = 0,87 \Omega/100 \text{ m} \text{ (entsprechend } G = 1,2 \text{ S}/100 \text{ m}) \text{ und}$$

$$R_e = 1,74 \Omega/100 \text{ m} \text{ (entsprechend } G = 0,6 \text{ S}/100 \text{ m})$$

gemessen.

Man sieht aus diesen Kurven, dass nach 100 m Distanz nur noch ca. 10 % der Anfangsspannung vorhanden ist, was die Beschränkung auf das kleine Teilgebiet rechtfertigt.



Der Vergleich mit den Kurven bei 50-Hz-Strömen zeigt, dass der räumliche Spannungsabfall bedeutend grösser ist. Dabei muss man sich bewusst sein, dass der Anfangswert der im Leitungsnetz auftretenden Stoßspannung (z. B. bei Blitzschlag) viel grösser sein kann als bei Spannungen von 50 Hz.

VI. Hochfrequenz als Ersatz für die Stoßspannung

Die Untersuchungen am Netzmodell mit Stoßspannungen, die sehr kurzzeitige Vorgänge sind, setzt das Vorhandensein eines Kathodenstrahl-Oszillographen voraus, um die schnellen Vorgänge oszillographisch aufzeichnen zu können. Es stellt sich deshalb die Frage, ob ein Stoß durch Hochfrequenz nachgebildet, bzw. seine Auswirkungen mit verschiedenen Frequenzen ermittelt werden kann.

Ein zeitlicher Vorgang $f(t)$ lässt sich nach Fourier durch eine unendliche Summe von Sinusschwingungen darstellen. Die vorkommenden Frequenzen bilden ein kontinuierliches Frequenzspektrum.

Man kann schreiben:

$$f(t) = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{\pi} \int_0^\infty F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] \quad (6)$$

worin $F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$ (6a)

Im vorliegenden Fall ist $f(t)$ der zeitliche Verlauf des Spannungsstosses bei der Einspeisung, also $f(t) \equiv U(t)$.

Die Stossform $U(t)$ mit abgerundetem Fuss lässt sich nur schwer durch eine Formel darstellen [3]; sie lässt sich aber relativ leicht durch eine Exponentialfunktion von der Form $U(t) = k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ annähern.

So kann man z. B. für eine Normalstosswelle von 1|50 schreiben:

$$U(t) = -1,03 u_m (e^{-2,6 t} - e^{-0,0174 t}) \quad (7)$$

wobei t in μs einzusetzen ist.

Diese Funktion besitzt im wesentlichen die Form nach Fig. 8. Gegenüber der Normalstosswelle unter-

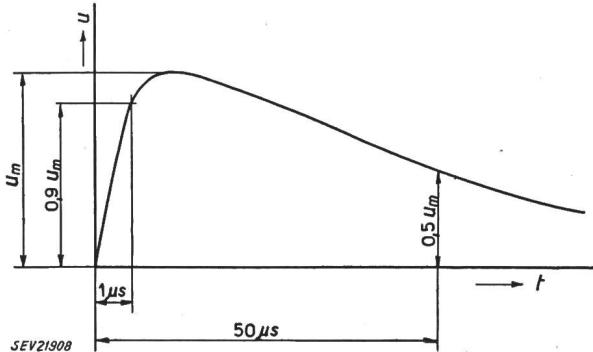


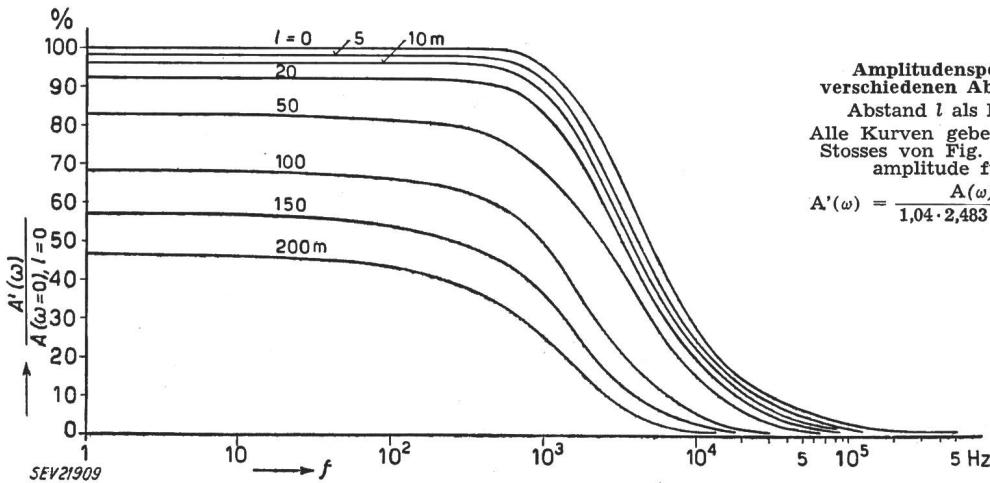
Fig. 8

Stossform nach der Formel

$$U(t) = -1,03 u_m (e^{-2,6 t} - e^{-0,0174 t})$$

Ersatz für den Normalstoss

u Spannung; u_m Scheitelspannung; t Zeit



scheidet sie sich darin, dass die Front nicht mit horizontaler Tangente im Nullpunkt beginnt. Die Funktion $f(t) \equiv U(t) = k(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ wird, als Fourierintegral dargestellt und mit den Beziehungen

$$0 < t < \infty; \quad f(t) = 0 \text{ für } -\infty < t \leq 0$$

wird

$$f(t) = \int_0^\infty \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) \cos(\omega t) + \left(\frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \sin(\omega t) \right] d\omega \quad (8)$$

Der Betrag der Amplitudenfunktion ist

$$A(\omega) \equiv |F(\omega)| = k \frac{\alpha - \beta}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)(\beta^2 + \omega^2)}} \quad (9)$$

$A(\omega)$ stellt das Amplitudenspektrum dar. Setzt man die Werte von α , β und k des angenäherten Stosses 1|50 ein, erhält man

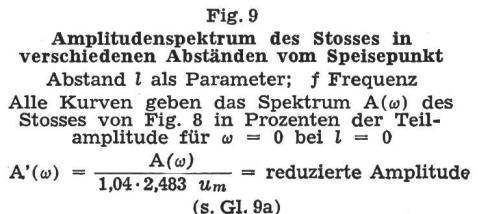
$$A(\omega) = \frac{1,04 \cdot 2,483 U_m}{\sqrt{(6,78 \cdot 10^{12} + \omega^2)(3,04 \cdot 10^8 + \omega^2)}} \quad (\text{Fig. 9})$$

Bei einer Stosswelle von 1|50 kann als «obere Grenzfrequenz» ca. 500 kHz angenommen werden. Da bei unserer Funktion die Front nicht mit horizontaler Tangente im Nullpunkt beginnt, erscheinen im Spektrum noch höhere Frequenzen, allerdings nur noch mit kleinem Amplitudenanteil [3].

Durchläuft der Spannungsstoss die Radialleitung bis zum ersten Knotenpunkt, so wird er gedämpft. Da der induktive Widerstand für grössere Frequenzen höher als für die kleineren, und der Ohmsche Widerstand ebenfalls frequenzabhängig ist, ist die Dämpfung bei hohen Frequenzen grösser als bei niederen.

Nimmt man eine unendlich lange Leitung an oder eine solche, die im 1. Knotenpunkt mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen ist, so kann die Dämpfung für verschiedene Frequenzen in einem gewünschten Abstand vom Speisepunkt gerechnet werden. Man erhält dabei eine kleinere Dämpfung gegenüber den wirklichen Verhältnissen im vermaschten Netz.

Unter den obigen Voraussetzungen gilt:



$$\frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_0} = e^{-\gamma l} \quad (10)$$

$$U_0 = \frac{k}{\pi} \int_0^\infty A(\omega) \cos[\omega t - \varepsilon(\omega)] \quad (11)$$

Für eine Teilschwingung ω_1 gilt

$$\Psi_0(\omega_1) = \frac{k}{\pi} A(\omega_1) \cos [\omega_1 t - \varepsilon(\omega_1)] \quad (12)$$

mit $\gamma = \alpha + j\beta$ und nach der Distanz l gilt

$$\Psi_1(\omega_1) = \frac{k}{\pi} A(\omega_1) e^{-\alpha l} \cos [\omega_1 t - \varepsilon(\omega_1) - \beta l] \quad (12a)$$

Die Amplitude beträgt $A(\omega) e^{-\alpha l}$. Die Dämpfungs-konstante $e^{-\alpha l}$ berechnet sich aus

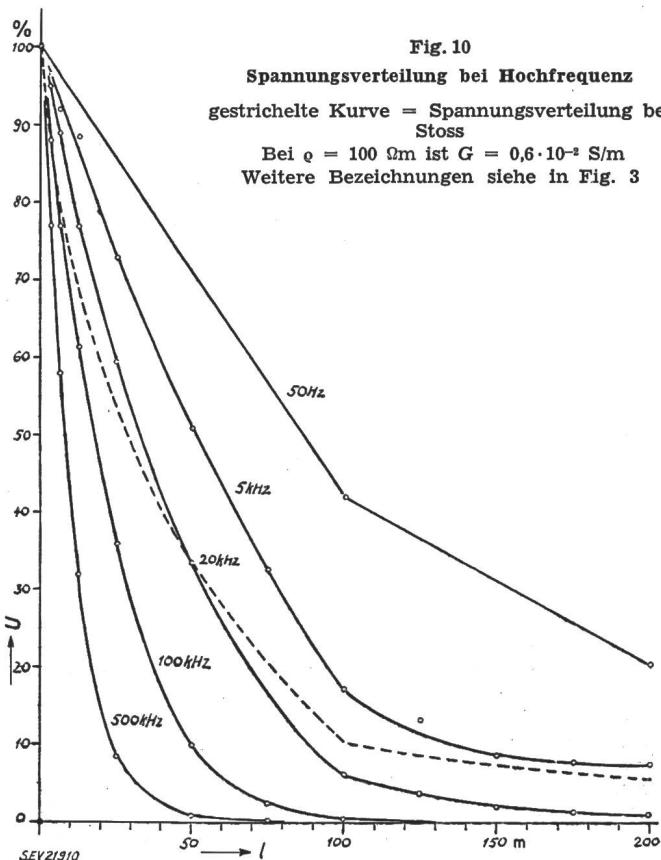
$$\begin{aligned} \gamma = \alpha + j\beta &= \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \\ &= \sqrt{G} \sqrt{R(\omega)} \sqrt{1 + j \frac{\omega [L_a + L_i(\omega)]}{R(\omega) + R_m}} \quad (13) \end{aligned}$$

$$R_m = R_{Muffen} = 2,25 \cdot 10^{-3} \Omega/m$$

$$L_a = 1,35 \cdot 10^{-6} H/m$$

$R(\omega)$ und $L_i(\omega)$ wurden aus der Stromverdrängung ermittelt.

In den Kurven von Fig. 9 ist das Spektrum des Stosses nach Durchlaufen von 10, 20...200 m angegeben. Aus dieser Darstellung wurde gefolgert, dass die Spannungsverteilung bei Stoss in bestimmten Abständen von l m, unter der Annahme, dass unter-



wegs keine Verzweigungen vorkommen, bis zum ersten Knotenpunkt mit der «oberen Grenzfrequenz» f_{+1} dargestellt werden kann (Tabelle I). Als «obere Grenzfrequenz» soll jene Frequenz berechnet werden, wo das Amplitudenspektrum auf ca. 1...1,5 % von $A(\omega = 0)$ abgesunken ist.

Die Kurven der Fig. 10 und 11, die das Spannungsgefälle bei HF darstellen, und in die auch die Spannungsverteilung bei Stoss eingezzeichnet ist,

Obere Grenzfrequenzen

Tabelle I

l m	f_{+1} kHz
0	500
10	100
50	30
100	20
200	10

veranschaulichen, dass tatsächlich je für ein bestimmtes Gebiet eine bestimmte Frequenz den gleichen Spannungsgradienten ergibt wie die Stoßspannung. Der Vergleich mit den Frequenzen, die, wie oben gezeigt, aus dem gedämpften Amplitudenspektrum gefordert werden, ergibt weitgehende Übereinstimmung.

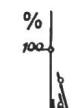
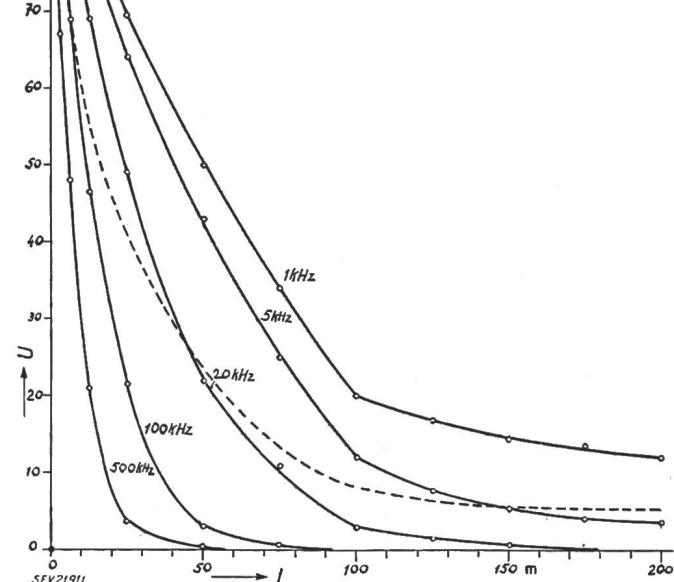


Fig. 11
Spannungsverteilung bei Hochfrequenz
Bei $\rho = 50 \Omega/m$ ist $G = 1,2 \cdot 10^{-2} S/m$
Weitere Bezeichnungen siehe in Fig. 3



Ist demnach aus dem Frequenzspektrum bekannt, welches Frequenzintervall Gültigkeit besitzt, lässt sich der zu erwartende Spannungsabfall der Stoßspannung konstruieren. Wenn auch damit nicht eine ganz genaue Kurvenform erhalten wird, kann doch eine qualitative Aussage über den Verlauf bis zum ersten Knotenpunkt gemacht werden. Darüber hinaus wird die Berechnung kompliziert, die Messung jedoch immer noch sehr einfach.

Unter Anwendung der angegebenen Methode ist es also möglich, die Verteilung einer Stoßspannung in einem städtischen Wasserleitungssystem durch Ausmessung mittels bestimmter Hochfrequenzen zu ermitteln.

Literatur

- [1] Roth A., Hochspannungstechnik. 3. Aufl.; Wien: Springer 1950.
- [2] Berger, K.: Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stoßströmen. Bull. SEV Bd. 37(1946), Nr. 8, S. 197...211.

- [3] Samulon, H.: Spannungsstoss und Fourierspektrum in der Hochspannungstechnik. Bull. SEV Bd. 34 (1943), Nr. 10, S. 279...291.
- [4] Ryf, W.: Erfahrungen mit der Erdung von Starkstromanlagen bei Verwendung isolierender Schraubmuffen in Wasserleitungsrohren. Bull. SEV Bd. 37 (1946), Nr. 24, S. 701...709.
- [5] Ollendorf, F.: Erdströme. Berlin: Springer 1928.
- [6] Sprecher, E.: Untersuchungen über den Erdungswiderstand verschiedener Bodenarten und die Vorausberechnung der Elektroden. Bull. SEV Bd. 25 (1934), Nr. 15, S. 397...404.

- [7] Küpfmüller, K.: Einführung in die theoretische Elektrotechnik. 3. Aufl.; Berlin: Springer 1941.
- [8] Jahnke, E. und F. Emde: Funktionentafeln. Leipzig und Berlin: Teubner 1938.

Adressen der Autoren:

U. Gugelmann, dipl. Ing., Westbühlstr. 10, Zürich 2,
M. Jacot, dipl. Ing., Hotzesteig 2, Zürich 6,
E. Ruoss, dipl. Ing., Zürcherstr. 226, Winterthur.

Bericht an die Schweiz. Elektrowärmekommission über den III. Internationalen Elektrowärmekongress vom Mai 1953 in Paris

Von Prof. Dr. B. Bauer, Zürich

621.365 : 061.3

Die Ingenieure hierzulande sind im allgemeinen keine Freunde internationaler Kongresse. Der Aufwand lohne sich nicht, behaupten sie. Und wenn sie schliesslich trotzdem «für einen Sprung» nach Köln, Rom oder Paris gehen, so glauben sie recht behalten zu haben und finden es nicht der Mühe wert, zuhause über das Gehörte zu berichten.

Warum haben wir denn trotzdem Zeit und Geld geopfert für die Teilnahme am III. Internationalen Elektrowärmekongress? Die Frage ist berechtigt bei dem geringen Interesse, das man der Veranstaltung seinerzeit auch in diesem Kreise entgegenbrachte. Ich stelle daher die Antwort an die oberste Stelle meines Rechenschaftsberichtes.

Man weiss, dass die Schweiz im relativen Elektrowärmeverbrauch in der vordersten Reihe der europäischen Länder steht. Rund 45 % des jährlichen Inlandstromkonsums werden von diesen Anwendungen absorbiert. Auf die motorischen Betriebe entfällt nur ein Anteil von 35 %; die elektrochemischen und -metallurgischen Anwendungen beanspruchen 16,5 % und die Lichterzeugung 6,5 %. Die Elektrowärme ist also unsere grösste Energieverbraucherin, wenngleich sie sich im Anteil an den Produktionskosten, den sie übernehmen will, bescheidener verhält. Was wird ihre Rolle in der Zukunft sein? Werden wir es uns später, wenn der Ausbau der Wasserkräfte mit der Bedarfssteigerung nicht mehr Schritt zu halten vermag, noch leisten können, einen so grossen Betrag der hydraulischen Produktion der Elektrowärme zu überlassen? Welche Wärmeanwendungen sind alsdann in Berücksichtigung des Landesinteresses an den übrigen Stromanwendungen verbrauchswirtschaftlich und ertragsmässig noch zu verantworten? Und wie stellt sich das Problem im Lichte der europäischen Energiewirtschaft? Alle diese Fragen sind heute schon brennend, denn ihre Beantwortung bestimmt die kommende Absatzpolitik der Elektrizitätsunternehmungen, die Entwicklungsprogramme der einschlägigen Apparateindustrie und die Dispositionen des Nutzwärmeverbrauchers.

In der Abklärung der Probleme ist nun gerade das Studium der Elektrowärmeentwicklung in den andern Ländern von Bedeutung. Es ist z. B. wertvoll zu wissen, wie die von den geschilderten Sorgen noch wenig beschwerten Norweger, Schweden und Österreicher hierüber denken; wie die Italiener das Problem zu meistern gedenken, welche den Ausbau ihrer Wasserkräfte beinahe abgeschlossen haben und im grossen Umfang an die thermoelektrische Energieerzeugung herantreten. Es ist endlich sehr wertvoll zu wissen, was sich in den Versorgungsgebieten mit vornehmlicher Elektrizitätsproduktion aus Brennstoff im Sektor der Elektrowärme als wirtschaftlich tragbar erweist für den Lieferer und die Verbraucher, denn diese Anwendungen dürften alsdann auch bei uns heute und in Zukunft Bestand haben.

So sind wir mit wichtigen Fragen und grossen Erwartungen im Frühjahr nach Paris gereist, und ich möchte gleich hier anfügen, dass wir alles in allem nicht enttäuscht zurückgekehrt sind.

Der Reiz der grossangelegten Veranstaltung lag in der schönen Kameradschaftlichkeit getragenen Aussprache zwischen den Vertretern der beteiligten vier Hauptgebiete: der wissenschaftlichen Forschung, der Apparatekonstruktion, der Nutzwärmeanwendung und der Elektrizitätsproduktion. Der Beobachter erkannte erneut, wie im Elektrowärmegebiet noch vieles im Fluss ist. Es sind noch die Pioniere am Werk. Es war von jenem Geist zu spüren, der sich in einer Wandbeschriftung in den Reparaturwerkstätten des Flughaf-

fens Kloten in den Worten kundgibt: «Technische Schwierigkeiten werden sofort behoben; Wunder benötigen etwas längere Zeit.»

Der Arbeitsstoff wurde auf 7 Sektionen verteilt, die insgesamt 150 Berichte zu behandeln hatten. Die Vertreter von 14 Ländern beteiligten sich hieran. Die 6. Sektion hatte, nach der Anzahl der Berichte beurteilt, das grösste Pensum zu erledigen. Ihr Thema lautet: Questions scientifiques se rapportant à l'Electrothermie: Terminologie — Normalisation — Documentation et Diffusion — Enseignement etc. Diese starke Betonung der Grundlagenforschung war bezeichnend für den Geist des Kongresses. Typisch und ehrend ist auch der Umstand, dass die Vertreter Frankreichs den weitesten Beitrag zur Abklärung dieser Fragen leisteten. Es lag kein schweizerischer Bericht vor.

Die Arbeiten der 4. Sektion standen an zweiter Stelle des Interesses. Ihr Thema lautete: Application du chauffage électrique aux matières non métalliques traitées à des températures moyennes (matières plastiques, caoutchouc, peintures et vernis, produits alimentaires, liquides divers, etc.). Wiederum war Frankreich führend. Ihm folgten die interessanten Beiträge deutschen Ursprungs. An dritter Stelle standen Italien und die Schweiz.

In der Rangordnung der Sektionen ist nunmehr von der 1. zu sprechen, deren Aufgabenkreis wie folgt umschrieben wurde: Application du chauffage électrique à la fusion, à l'affinage et au frittage des métaux et alliages, ainsi qu'à la réduction des mineraux. Frankreich, Deutschland und Italien bestritten hier den Hauptteil der Berichte. Die Schweiz war mit einem vertreten.

Die 2. Sektion hatte — immer an der Anzahl der Beziehte gemessen — beinahe das gleiche Pensum zu bewältigen wie die erste. Sie diskutierte die «Application du chauffage électrique aux traitements thermiques des métaux et alliages (trempe et cémentation en particulier), au soudage, au brasage, etc.». Wiederum bestritt Frankreich den Hauptteil der Arbeit. Belgien, Holland und Italien standen im gleichen tieferen Rang. Hierauf folgten die übrigen an dieser Sektion sich beteiligenden Länder. Die Schweiz war mit zwei Berichten vertreten.

In der darauffolgenden Sektion 3: Application du chauffage électrique aux matières non métalliques à haute température (verre, céramique, liants hydrauliques et analogues, etc.) führten hauptsächlich die Franzosen, Holländer und Schweizer das Wort.

Der 7. Sektion wurden gleich viele Berichte wie der vorgenannten dritten zur Diskussion überwiesen. Es handelte sich vornehmlich um die technisch-wirtschaftliche Auswirkung der Elektrowärme auf die Energieproduktion. Der offizielle Titel lautete: Influence du développement des Applications Electrothermiques sur la charge des Centrales et des Réseaux. — Influence des ressources en énergie sur le développement des Applications Electrothermiques. — Contribution de l'Electrothermie à l'amélioration des conditions de travail, etc. Es ist nicht erstaunlich, dass die Beteiligung an der Erörterung dieser Aufgaben verhältnismässig schwach war. In vielen Ländern stellt eben die Elektrowärme noch nicht jene ernsten Probleme, die ich eingangs geschildert habe. Es war ursprünglich gar nicht beabsichtigt, das Thema in das Kongressprogramm aufzunehmen. Es hat hiezu des besondern Drucks der Schweizer und Italiener bedurft. Frankreich hat wiederum den grössten Teil der Berichte beigesteuert. Im 2. Rang stehen Österreich und die Schweiz.