

<b>Zeitschrift:</b>	Schweizerische Bauzeitung
<b>Herausgeber:</b>	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
<b>Band:</b>	61/62 (1913)
<b>Heft:</b>	26
<b>Artikel:</b>	Auftreten und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen
<b>Autor:</b>	Kummer, W.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-30739">https://doi.org/10.5169/seals-30739</a>

### **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:** 23.02.2026

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

Die Konstruktionsdaten der Turbinen sind folgende:

Gefälle Meter	Garantierte Leistung PS <sub>e</sub>	Wassermenge l/Sek.	Uml./Min.
54,00	3250	6000	504
51,50	3100		
54,00	165	300	800
51,50	155		

Mit den grossen Turbinen sind direkt gekuppelt drei Generatoren für Drehstrom von 42 Perioden und 5000 bis 5500 Volt, mit den beiden kleinen Gleichstromdynamos von 125 Volt zur Erregung der Generatoren sowie anderseits für die Nebenbedürfnisse der Zentrale.

Der Drehstrom wird mittels dreier Transformatoren in Öl mit Wasserkühlung auf 35000 bzw. 60000 Volt

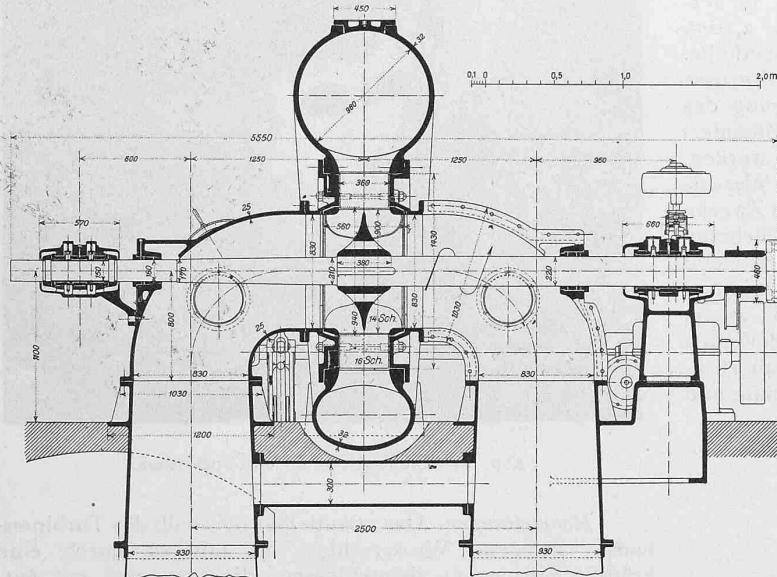


Abb. 22. Schnitt durch die Turbine. — 1:50.

hinauftransformiert. Ein Schaltpult am untern Ende des Maschinensaales ist in Verbindung mit den verschiedenen, auf die drei Stockwerke des Transformatoren- und Schaltgebäudes verteilten elektrischen Apparaten der Kraftverteilung. Die ganze elektrische Anlage wurde ausgeführt vom *Tecnomasio Italiano Brown Boveri* in Mailand.

Am 4. Mai 1910 wurden die offiziellen Abnahmevereekte des maschinellen Teiles durch die Ingenieure Forti und Gaggia vorgenommen. Diese Proben erstreckten sich aber nur auf den Gesamt-Wirkungsgrad von Turbinen und Generatoren; da dieser bedeutend grösser ausfiel als der garantierte, so verzichtete man auf besondere Versuche an den Generatoren. Letztere gaben ab 2784 kw = 3784 elektr. PS bei voller Öffnung einer Turbine, und diese konsumierte 6910 l/Sek. bei 50,80 m Gefälle. Es entspricht dies einem komplexiven Wirkungsgrad eines Aggregates von  $\frac{3784}{4680} = 80,8\%$ . Das würde bei angenommenen 94% der Generatoren  $\eta = \frac{80,8}{94} = 85,9\%$  Wirkungsgrad für die Turbinen ergeben bei voller Öffnung. Die Wassermessung geschah im Unterwasserkanal mittelst Ueberfall nach Bazin.

W. Z.

## Auftreten und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen.

Von Prof. Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich.

(Schluss von Seite 333.)

Von R. Rüdenberg<sup>1)</sup> ist vor kurzem gezeigt worden, dass bei einer stetigen Änderung eines variablen Wellenwiderstandes  $z'$ , derart, dass der zugeordnete Spannungswert  $e'$  mit der Spannung  $e$  auf einer Leitungsbahn von konstantem Wellenwiderstand  $z$  in der Beziehung steht von:

$$\frac{e'}{e} = \sqrt{\frac{z'}{z}}$$

<sup>1)</sup> Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1913, Seite 421.

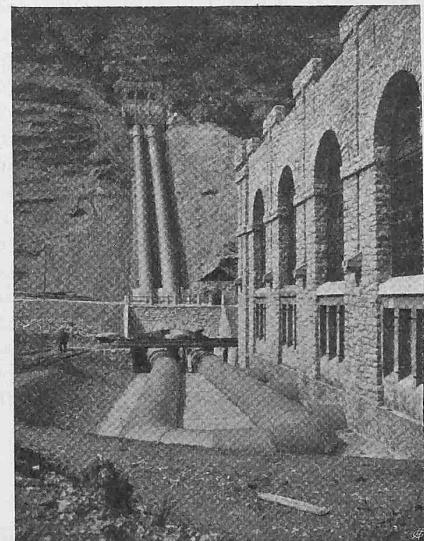


Abb. 17. Druckleitung  $2 \times 1,9 \text{ m} \phi$ .

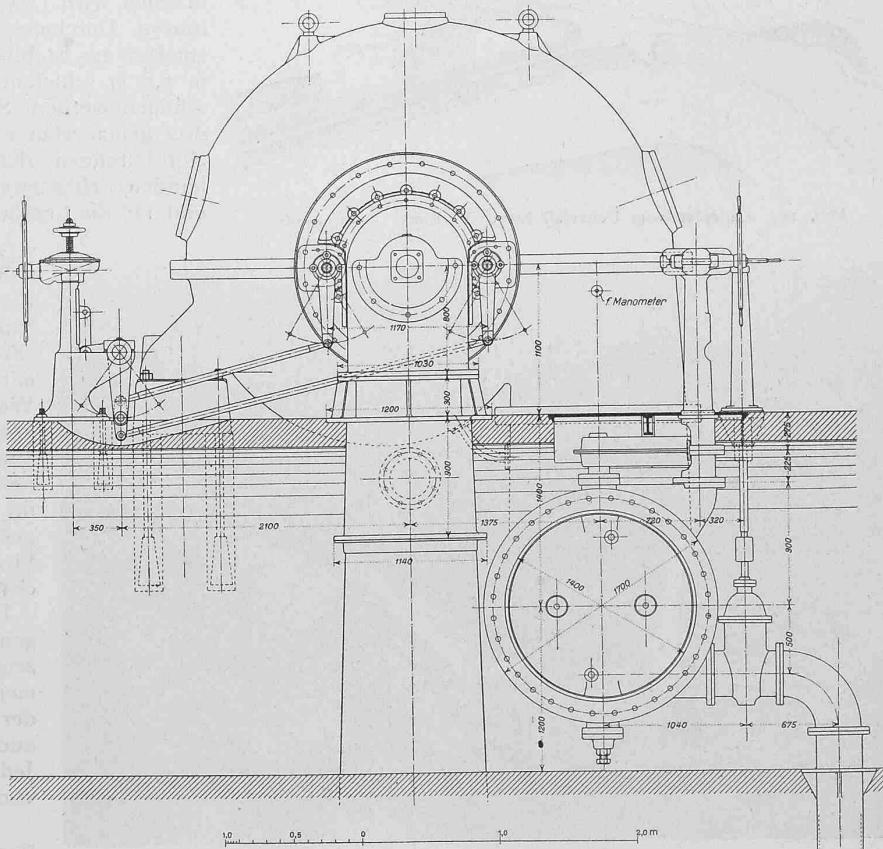


Abb. 21. 3500 PS-Spiral-Francisturbine von A. Riva & Cie., Mailand. — 1:50.

der Effekt  $W$  der wandernden Ueberspannung:

$$W = \frac{e^2}{z} = \frac{e'^2}{z'} = \frac{\left(e \cdot \sqrt{\frac{z'}{z}}\right)^2}{z'} = \text{konstant}$$

unverändert bleibt und somit auf solchen Leitungsanordnungen keine innern Reflexionen auftreten. Rüdenberg hat bei dem Anlass auch gezeigt, dass die auf dieser Anordnung beruhende „Brandung“ von Ueberspannungswellen auch mit Vorteil zu deren Ableitung benutzt werden kann; zu diesem Zwecke wäre gemäss Abbildung 3 der variable Wellenwiderstand aus einer sich allmählich verkleinernden Kapazität und einer sich allmählich vergrössernden Induktivität zusammenzusetzen, derart, dass das endgültige  $e'$  eine sehr grosse Höhe erreichte und eine Glimmlicht- oder Korona-Ausstrahlung bewirken würde. Als noch einfachere Vorrichtung zur Vermeidung von inneren Reflexionen auf Leitungsanordnungen dient auch der Anschluss eines effektiven Dämpfungswiderstandes  $r_o$ , nach Abbildung 4, wobei nach den Untersuchungen von K. W. Wagner<sup>1)</sup> die Bedingung der Reflexionsfreiheit lautet:

$$r_0 = \omega$$

Gegenüber der Anordnung nach Rüdenberg hat die in der Praxis weitverbreitete Anordnung nach Abbildung 4 — wenn auch meist ohne richtige Bemessung von  $r_0$  — den bereits erwähnten Vorteil der Einfachheit; anderseits hat die Anordnung nach Abbildung 3, die unseres Wissens noch nicht erprobt ist, den Vorteil der Wahrung der Isolation.

<sup>1)</sup> Seite 46 des auf Seite 333 letzter Nr. erwähnten Buches.

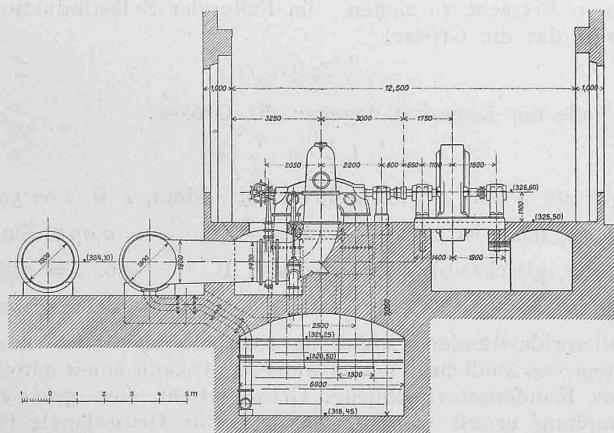


Abb. 19. Querschnitt durch die Zentrale. — 1:250.

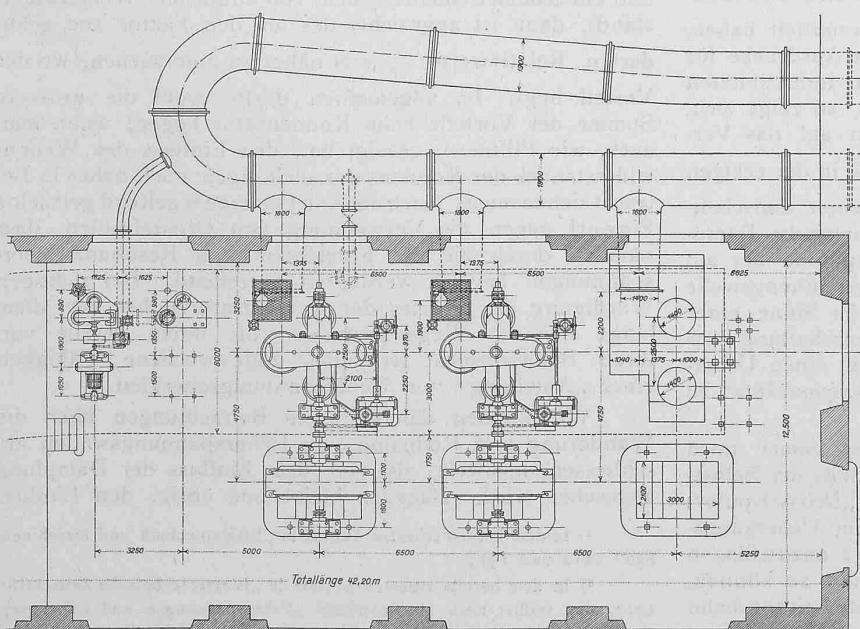


Abb. 18. Grundriss der Zentrale Pedesalto. — Maßstab 1:250.

Nun haben wir bei der bisherigen Betrachtung der Reflexionsvorgänge lediglich an den Zeitpunkt des Auftreffens der ursprünglichen elektrischen Welle an der Uebergangsstelle von einer ersten Leitungsbahn in eine zweite gedacht. Für die Beurteilung des Verhaltens der Wellen in späteren Zeiten kommen die Reflexionsvorgänge an den freien Enden der Leitungsbahnen  $z$  und  $z_a$  in Betracht, zufolge den Wanderungen der Welle  $e_a$  einerseits und der Wellen  $e + e_r$  anderseits. Dabei können nun, nach Rechnungen von *K. W. Wagner*<sup>1)</sup> und *W. Petersen*<sup>2)</sup>, weitere sehr erhebliche Spannungssteigerungen vorkommen.

Es ist im Fernern darauf aufmerksam zu machen, dass ähnlich einfache Be- trachtungen, wie wir sie auf Seite 333 für die Berech- nung der Reflexions- verhältnisse vorge- führt haben, auch für die Berechnung

Abb. 3. Reflexionsfreie Braudung von Ueberspannungen.

von Einschaltvorgängen bei elektrischen Leitungen mit Vorteil benutzt werden können, worauf besonders *R. Rüdenberg*<sup>3)</sup> und *W. Petersen*<sup>4)</sup> hingewiesen haben. Es möge die Leitung vom Wellenwiderstand  $z$ , die unter der Spannung  $e$  steht, plötzlich auf eine Leitung vom Wellenwiderstand  $z_a$  geschaltet werden. Dabei entstehen dann wieder die Spannungen  $e_r$  und  $e_a$ , sowie die Ströme  $i_r$  und  $i_a$ ; weiter gilt:

$$\ell - \ell_r = \ell_a \quad i_r - i_a = 0$$

Damit folgen die sog. „Uebergangsregeln“:

$$\begin{cases} \frac{e_a}{e} = \frac{z_a}{z + z_a} \\ \frac{e_r}{e} = \frac{z}{z + z_a} \end{cases}$$

sowie:

$$i_a = i_r = \frac{e}{z + z_a}$$

Sowohl für die Betrachtung der eigentlichen Reflexionserscheinungen, als auch für diejenige der Uebergangsscheinungen ist es nun zulässig, an Stelle der neuen Leitungsbahn vom Wellenwiderstand  $z_a$  irgend ein verzweigtes System von Leitungsbahnen mit den Wellenwiderstän-

den  $z_a', z_a'', z_a''', z_a'''' \dots$  anzunehmen;  
es gilt dann einfach

$$\frac{I}{z_a} = \frac{I}{z_a'} + \frac{I}{z_a''} + \frac{I}{z_a'''} + \frac{I}{z_a'''} + \dots$$

Findet die Zuschaltung einer neuen Leitungsbahn vom Wellenwiderstand  $z_n$  unter Benutzung eines vorgeschalteten effektiven Schutzwiderstandes  $r$  statt (der nach Ablauf der Einschaltschwingungen kurz geschlossen wird), so tritt an die Stelle von  $z_n$  der Ausdruck  $z_n + r$ .

Wir haben uns schliesslich noch mit dem Einfluss der Einschaltung konzentrierter Induktivitäten oder Kapazitäten oder Kombinationen beider in den Uebergangspunkt von Leitungsbahnen von verschiedenem Wellenwiderstand zu befassen. Solche Rechnungen hat namentlich *E. Pfiffiger*<sup>5)</sup> angestellt. Wir

<sup>1)</sup> Seite 98 des erwähnten Buches.

<sup>2)</sup> Archiv für Elektrotechnik, 1912, S. 233.

<sup>8)</sup> Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1912, Seite 157 ff.

<sup>4)</sup> Elektrotechn. Zeitschrift 1913, S. 167 ff.

<sup>5)</sup> Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1912, Seite 953 ff. und 1913, Seite 45 ff.

können die bezüglichen, für die Praxis wichtigen Resultate am kürzesten folgendermassen entwickeln.

Für die in Abbildung 5 dargestellte Einschaltung einer konzentrierten Induktivität  $L$  ergibt sich für das Spannungsgleichgewicht:

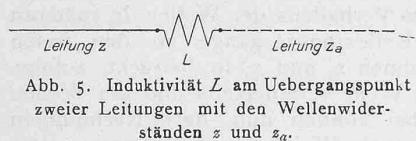


Abb. 5. Induktivität  $L$  am Uebergangspunkt zweier Leitungen mit den Wellenwiderständen  $z$  und  $z_a$ .

stärken wiederum, wie früher:

$$i - i_r = i_a$$

Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge:

$$i \cdot z = e; \quad i_r \cdot z = e_r; \quad i_a \cdot z_a = e_a$$

folgt dann:

$$L \frac{di_a}{dt} + i_a (z + z_a) = 2e$$

woraus sich ergibt:

$$i_a = \frac{2e}{z + z_a} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{L}(z + z_a)t} \right]$$

sowie:

$$\frac{e_r}{e} = \frac{2z_a}{z + z_a} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{L}(z + z_a)t} \right]$$

wobei  $e = 2,718$  die Basis des natürlichen Logarithmenystems bedeutet.

Für den in Abbildung 6 dargestellten Anschluss einer konzentrierten Kapazität  $C$  ergibt sich für die Spannungsgleichheit, wie früher:

$$e + e_r = e_a$$

Für die Kontinuität der Stromstärken gilt:

$$i - i_r = i_a + C \frac{de_a}{dt}$$

Berücksichtigt man wiederum die Zusammenhänge:

$$i \cdot z = e; \quad i_r \cdot z = e_r; \quad i_a \cdot z_a = e_a$$

so folgt:

$$C \frac{de_a}{dt} + e_a \frac{z + z_a}{z \cdot z_a} = \frac{2e}{z}$$

woraus sich ergibt:

$$\frac{e_a}{e} = \frac{2z_a}{z + z_a} \left[ 1 - e^{-\frac{1}{C}(z + z_a)t} \right]$$

Wenn nun die Ausdrücke  $\frac{e_a}{e}$ , wie wir sie für zwischen geschaltete Induktivitäten oder Kapazitäten ermittelt haben, verglichen werden mit dem entsprechenden Ausdrucke für den Fall, dass eine Zwischenschaltung von Induktivitäten oder Kapazitäten nicht vorgenommen wird, so zeigt sich, dass sowohl Induktivitäten wie Kapazitäten auf das Verhältnis  $\frac{e_a}{e}$  dämpfend wirken. Der Ausdruck in der eckigen Klammer enthält die für die zwei Fälle einer Zwischenschaltung von  $L$  oder  $C$  auftretende symmetrische Dämpfungsgröße, die nun nicht bloss die Amplitude der auf eine neue Leitungsbahn übertragenden Ueberspannungswelle reduziert, sondern auch ihre Verzerrung im Sinne einer Verflachung bewirkt. Eine solche Zwischenschaltung verwirklicht somit für eine neue Leitungsbahn einen Ueberspannungsschutz, den man als einen „Reflexionsschutz“ zu bezeichnen hat.

Da jedoch in der Fachwelt zur Zeit immer noch darüber diskutiert wird, ob der Reflexionsschutz der Selbstinduktion (also einer zwischengeschalteten sog. „Drosselpule“) oder derjenige der Kapazität (also eines im Uebergangspunkte angeschlossenen Kondensators) höher anzuschlagen sei, so haben wir, um hier Stellung nehmen zu können, auch noch das für die Rückwirkung auf die erste Leitungsbahn massgebende Verhältnis  $\frac{e_r}{e}$  in Betracht zu ziehen.

Im Falle der Anwendung einer Selbstinduktion folgt aus:

$$e_r = e_a - e + \frac{L}{z_a} \cdot \frac{de_a}{dt}$$

die massgebende Beziehung:

$$\frac{e_r}{e} = \frac{z_a - z}{z + z_a} + \frac{2z_a}{z + z_a} \cdot e^{-\frac{1}{L}(z + z_a)t}$$

Im Falle der Anwendung eines Kondensators folgt aus:

$$e_r = e_a - e$$

entsprechend eine Beziehung:

$$\frac{e_r}{e} = \frac{z_a - z}{z + z_a} - \frac{2z_a}{z + z_a} \cdot e^{-\frac{1}{C}\left(\frac{1}{z} + \frac{1}{z_a}\right)t}$$

Werden nun die Ausdrücke  $\frac{e_r}{e}$  in Falle solcher Zwischenschaltungen verglichen mit dem entsprechenden Ausdrucke ohne eine solche Zwischenschaltung, so zeigt sich, dass zu Beginn der Reflexion die reflektierte Spannung durch Zwischenschaltung der Kapazität dagegen erniedrigt wird. Je nach Art der ersten Leitungsbahn (ob Freileitung oder Maschinenstromkreis) ist der Wert  $\frac{e_r}{e}$  von kleinerer oder grösserer praktischer Bedeutung.

Will man aus dem Verhältnis  $\frac{e_a}{e}$  den Unterschied in der Wirkung von zwischengeschalteter Selbstinduktion, bezw. Kapazität beurteilen, dann hat man den numerischen Wert der in den Ausdrücken  $\frac{e_a}{e}$  vorkommenden Exponentialfunktion in Betracht zu ziehen. Im Falle der Selbstinduktion betrifft das die Grösse:

$$-\frac{1}{L}(z + z_a)t$$

im Falle der Kapazität dagegen die Grösse:

$$-\frac{1}{C}\left(\frac{1}{z} + \frac{1}{z_a}\right)t$$

Sind nun  $z$  und  $z_a$  gleichzeitig relativ klein, z. B.  $z = 50$ ;  $z = 75$ , dann ist  $z + z_a = 125$ ;  $\frac{1}{z} + \frac{1}{z_a} = 0,053$ . Sind  $z$  und  $z_a$  gleichzeitig relativ gross, z. B.  $z = 500$ ,  $z = 750$ , dann ist  $z + z_a = 1250$ ;  $\frac{1}{z} + \frac{1}{z_a} = 0,0053$ . Bei grossen Wellenwiderständen (Luftleitung, sowie ein Sammelschienensystem von ähnlichem Wellenwiderstand) kann somit mittels eines Kondensators üblicher Grösse leicht eine grössere Dämpfung erzielt werden, während eine Drosselpule für dieselbe Wirkung eine unzweckmässige Grösse erhalten dürfte. Sind dagegen  $z$  und  $z_a$  je zehnmal kleiner (Kabel und ein Sammelschienensystem von ähnlichem Wellenwiderstand), dann ist angesichts des um den Faktor 100 geänderten Relativwertes  $\frac{C}{L}$  erst näher zu untersuchen, wo der Vorteil liegt. Im allgemeinen dürfte wohl die grössere Summe der Vorteile beim Kondensator liegen, wenn man auch, wie Pfiffner<sup>1)</sup> gezeigt hat, den Einfluss des Wellenwiderstandes der Kondensatorzuleitungen noch näher in Betracht ziehen muss. Auch der von Petersen<sup>2)</sup> geltend gemachte Einwurf gegen die Verwendung von Drosselpulen, dass nämlich durch sie die Entstehung von Resonanz-Ueberspannungen bewirkt werde, ist zutreffend. Der richtigen Würdigung des Wertes der Kondensatoren hat vor allem lange Zeit im Wege gestanden die ihnen gerade von ihren Befürwortern irrtümlich zugesprochene Fähigkeit einer „Ableitung“ von Ueberspannungsenergien.

Wir können damit unsere Betrachtungen über die Wanderung und Reflexion von Ueberspannungswellen abschliessen, insoweit, als von dem Einfluss der Dämpfung abgesehen wird. Dagegen bleibt uns übrig, den Einfluss

<sup>1)</sup> In dem bereits zitierten Aufsatz in „Elektrotechnik und Maschinenbau“ 1912 und 1913.

<sup>2)</sup> In dem bereits zitierten Aufsatz in „Elektrotechnische Zeitschrift“ 1913, der seither auch als Broschüre „Ueberspannungen und Ueberspannungsschutz“ im Umfang von 33 Oktavseiten und zum Preise von Mk. 1,20 bei Julius Springer, Berlin, erschienen ist.

der Dämpfung zufolge des effektiven Widerstandes und der nicht vollkommenen Isolation jeglicher Leitungsbahn nun auch noch in Betracht zu ziehen. Es macht sich dieser Einfluss aber in dem Sinne geltend, dass die Gefährlichkeit der Spannungs- und Energiewerte der Ueberspannungen schon nach kürzeren Wanderungen erheblich reduziert erscheint. Auf den hohen Schutzwert dieser Dämpfung hat besonders Petersen aufmerksam gemacht und den sehr beachtenswerten Vorschlag ausgesprochen, die Reflexions-Schutzmassnahmen derart anzuordnen, dass die auf Freileitungen entstandenen Ueberspannungen möglichst auf dieselben zurückreflektiert und an Werken oder Unterwerken vorbeigeleitet werden können.

#### Ueber Wicklungsschäden infolge der Ueberspannungen.

Die sog. elektrische Festigkeit oder der Widerstand gegen den Spannungsdurchschlag von Isoliermaterialien wird beansprucht durch den Spannungsgradienten:

$$\frac{de}{dn}$$

wobei  $e$  die das Isoliermaterial „spannende“ Potentialdifferenz oder Spannung und  $n$  die Richtung des Potentialgefälles bezeichnen. Bei Wicklungen, die stationären elektrischen Spannungen ausgesetzt sind, verteilt sich  $\frac{de}{dn}$  gleichmässig, und auf den für die Wicklung zulässigen Betrag bemessen, von Windung zu Windung, von Lage zu Lage. Trifft jedoch eine Ueberspannungswelle auf eine Wicklung auf, so erlangt die Grösse  $\frac{de}{dn}$  nach Massgabe der Wanderungsgeschwindigkeit der Welle und der Wellenform zunächst für die Eingangswindung und hierauf für die folgenden Windungen der gesamten Wicklung Werte, denen das Isoliermaterial im allgemeinen nicht gewachsen sein wird. Da wir die einer wandernden Ueberspannung  $e$  ausgesetzte Wicklung ohne Weiteres auffassen können als eine neue Leitungsbahn vom Wellenwiderstand  $z_a$ , so ist demnach für ihre Beanspruchung massgebend der Wert  $\frac{de_a}{dn}$ , für den gesetzt werden kann:

$$\frac{de_a}{dn} = \frac{de_a}{dx} = \frac{1}{v_a} \cdot \frac{de_a}{dt}$$

da einer räumlichen Verschiebung um  $n$ , bzw. um  $x$  der Welle, eine zeitliche Verschiebung derselben um  $t = \frac{x}{v_a}$  entspricht. Man erkennt nun ohne Weiteres den Einfluss einer vorgeschalteten Selbstinduktion, für die wir fanden:

$$\frac{e_a}{e} = \frac{2 z_a}{z + z_a} \left[ 1 - \frac{1}{L} (z + z_a) t \right].$$

Hier wird nämlich

$$\frac{de_a}{dn} = \frac{2 e}{v_a} \cdot \frac{z_a}{L} \cdot \varepsilon - \frac{1}{L} (z + z_a) t$$

Entsprechend folgt für den Einfluss der vorgeschalteten Kapazität aus:

$$\frac{e_a}{e} = \frac{2 z_a}{z + z_a} \left[ 1 - \frac{1}{C} \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_a} \right) t \right]$$

die Beziehung

$$\frac{de_a}{dn} = \frac{2 e}{v_a} \cdot \frac{1}{C} \cdot \varepsilon - \frac{1}{C} \left( \frac{1}{z} + \frac{1}{z_a} \right) t$$

Sowohl bei Vorschaltung einer Selbstinduktion als auch einer Kapazität wird somit die Beanspruchung der Isoliermaterialien der neuen Leitungsbahn, also der Wicklung um so mehr verkleinert, je grösser  $L$  bzw.  $C$  gewählt wird. Um nun beurteilen zu können, ob die Wirkung der Selbstinduktion oder diejenige der Kapazität die ausgiebiger ist, sollte man über die Grösse der bei Wicklungen in Betracht fallenden Wellenwiderstände  $z_a$  und Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $v_a$  hinreichend orientiert sein, was einstweilen nicht der Fall ist. Eine das Eindringen von Ueberspannungen in Wicklungen erschwerende Schutzkapazität wird nun ohne weiteres geboten durch die sog. Leitungsdurchführungen, insbesondere bei Transformatoren, ein

Umstand, auf den namentlich Petersen<sup>1)</sup> hingewiesen hat. Im weiteren bieten auch die den Wicklungen benachbarten Metallteile, zugehörige Eisenkerne u. a. m. reichliche Dämpfungsquellen für die in eine Wicklung einziehende Ueberspannung, deren Wirkung sich auf alle Fälle nur auf die sog. Eingangswindungen erstrecken wird. Die letztern müssen jedoch auf eine besonders hohe elektrische Festigkeit isoliert werden. Besonders gefährlich sind für das Einwandern in Wicklungen rechteckige Wellenzüge von Ueberspannungen nach Abbildung 1; für die senkrecht abfallende Wellenfront einer solchen Welle hat nämlich  $\frac{de}{dn}$  den Wert  $\infty$ . Wie bereits erwähnt, ist demnach der zeitliche Verlauf einer Ueberspannungswelle von hohem Einfluss auf den durch sie bewirkten Schaden; es ist daher auch dem diesen zeitlichen Verlauf günstig beeinflussenden Reflexionsschutz eine hohe Bedeutung beizumessen.

#### Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs.

Infolge örtlicher und zeitlicher Schwankungen im Spannungsgradienten des elektrischen Erdfeldes können auf ausgedehnten Freileitungen Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs entstehen, die im Wesentlichen auf Phänomenen der elektrischen Ladung oder Entladung der Leitungen beruhen. Ladungen auf Leitungen, die infolge langsamer Änderungen im Spannungsgradienten auch langsam entstehen, bezeichnet man als sogenannte statische Ladungen. Die insbesondere bei Gewittern sich geltend machenden plötzlichen Änderungen im Spannungsgradienten des elektrischen Erdfeldes führen anderseits zu Ueberspannungen, bzw. freien elektrischen Schwingungen, die auf Leitungen in derselben Weise wie die bisher von uns betrachteten Ueberspannungswellen wandern, auf neue Leitungen übertreten und auch reflektiert werden können. Für den Fall einer beispielsweise durch einen Blitzschlag ausgelösten Ueberspannungswelle hat K. W. Wagner 1908 die Gesetze der Wanderung und Reflexion untersucht<sup>2)</sup>. Wenn nun auch prinzipiell die aus atmosphärischen Ursachen entstandenen Ueberspannungswellen derselben Art sind, wie die aus Schaltoperationen hervorgehenden, so besteht zur Zeit dennoch eine grosse Unsicherheit in Bezug auf die tatsächlichen Spannungswerte und Energien Mengen, die den aus atmosphärischen Störungen entstandenen Ueberspannungen eigen sind. Die in den Diskussionen der Fachleute zeitweilig eifrig behandelte Frage nach der Schwingungszahl der in einem Blitzschlag unter Umständen gegebenen Entladung oszillatiorischer Natur<sup>3)</sup> ist aus dem Grunde für den Ueberspannungsschutz unwesentlich, weil für die Frequenz freier Schwingungen von Ueberspannungswellen auf Leitungen die eigenen Konstanten dieser Leitungen massgebend sind.

#### Die Bekämpfung der Ueberspannungen.

Die Massnahmen zur Bekämpfung der Ueberspannungen sind teils vorbeugende, teils ableitende.

*Vorbeugende Massnahmen* gegenüber den aus Schaltvorgängen entstehenden Ueberspannungen betreffen einmal die Ausbildung solcher Schalter, die, wie man sagt, „überspannungsfrei“ funktionieren sollen, sowie ferner die den Schaltern etwa beigefügten sog. „Schutzwiderstände“ für die Zuschaltung neuer Leitungsbahnen, wofür wir die massgebenden Grundlagen auf Seite 341 erörterten. In der Literatur wird als vorbeugende Massnahme auch die Wahl hoher Betriebsspannungen erwähnt, weil dadurch für eine gegebene Leistung der Anlage ein möglichst niedriger Betriebsstrom und daher auch eine möglichst niedrige Ausschaltüberspannung entstehen; dazu ist zu bemerken, dass für die Wahl der Betriebsspannung höhere Rücksichten

<sup>1)</sup> Hochspannungstechnik, Seite 137 ff. Das sehr lesenswerte Werk ist 1911 im Verlage von F. Enke erschienen.

<sup>2)</sup> Seite 44 ff. des bereits erwähnten Werkes.

<sup>3)</sup> Vergl. die Miscellanea-Notiz „Ueber die Schwingungszahl des Blitzes“ auf Seite 55 von Bd. LVI. der Bauzeitung.

bestimmend sind, als die grössere oder kleinere Vorbeugungssicherheit gegenüber Ausschaltungs-Ueberspannungen. Vorbeugenden Wert haben auch rein sinusförmige Kurven der Generatoren-Spannung, die übrigens auch schon aus andern, ebenfalls wichtigen Rücksichten gefordert werden muss.

Gegenüber den aus atmosphärischen Ursachen begründeten Ueberspannungen kommen als vorbeugende Massnahmen in Betracht ein günstiges Leitungstracé (Vermeidung von erheblichen Höhendifferenzen, von besondern gewitterreichen Gegenden u. a. m.) und besondere Schutzdrähte (Blitzseile) für Freileitungen, oder aber die Verlegung von Leitungen in unterirdische Kabel.

Die *Massnahmen zur Ableitung* auftrittender Ueberspannungen bestehen einerseits aus den Reflexionschutzmitteln, die zur Aufzehrung der Ueberspannungsenergien durch die Dämpfung auf denjenigen Leitungen, in die diese Energien durch Reflexion geworfen werden, führen sollen, und anderseits aus den eigentlichen Ueberspannungsableitern, die selbst aus Dämpfungswiderständen gebildet sein müssen. Als Reflexionsschutzmittel kommen Kondensatoren und Drosselspulen in Betracht, als eigentliche Ueberspannungsableiter Apparate für dauernde oder zeitweilige Erdung der zu schützenden Leitungsbahnen. Durch die dauernde Erdung entfernt man vor allem die durch atmosphärische Ursachen bedingte sog. statische Aufladung der Leitungen. Sie dient aber auch — bei richtiger Bemessung eines dazu bestimmten effektiven Widerstandes — zur reflexionsfreien Ableitung von energie schwächeren Wanderwellen (Abbildung 4). Als Apparate für zeitweilige Erdung verwendet man Funkenstrecken, über die und über einen mit ihnen in Reihe geschalteten weiteren effektiven Widerstand eine zeitweilige Ableitung besonders energiestarker Wanderwellen ebenfalls reflexionsfrei erfolgen soll. Im gleichen Sinne dürfte auch der in Abbildung 3 dargestellte, wohl aber noch nicht erprobte, Brandungsableiter nach Rüdenberg funktionieren. Apparate mit Funkenstrecken-Ableitung bestehen in grosser Mannigfaltigkeit der Bauarten und Ausführungsformen. Man verwendet sie als sog. „Grobschutz“ oder als sog. Feinschutz, je nachdem die Funkenstrecken auf grössere oder kleinere Spannungen und Energien eingestellt werden. Bei ihrer Anwendung ist Vorsicht aus dem Grunde am Platze, damit nicht durch den die Funkenstrecke überbrückenden Lichtbogen schon während seines Bestehens oder dann bei seiner Unterbrechung neue Ueberspannungen erregt werden; auch sind sie in Bezug auf das „Ansprechen“ heikel und nicht

unbedingt zuverlässig. Als Endziel der Entwicklung des Ueberspannungsschutzes dürfte daher wohl das vollständige Verlassen dieser Apparate zu Gunsten solcher für dauernde Ableitung in Frage kommen, wobei als Feinschutz Widerstände nach Abbildung 4 (vor allem Wasserstrahlerder), als Grobschutz der Brandungsableiter nach Rüdenberg besonders zu entwickeln wären.

An dem typischen Beispiel eines grösseren Kraftwerkes mit direkter Speisung von Freileitungen (Abb. 7) soll nun der den

heutigen Anschauungen am vollkommenen entsprechende Ueberspannungsschutz gezeigt werden. Die von allen Induktivitäten befreiten Freileitungs-Einführungen 1, 2, 3, 4 (mit überbrückten Stromwandlern) sollen sich zunächst nach dem Vorschlage von Petersen<sup>1)</sup> an den Hilfssammel-

<sup>1)</sup> „Ueberspannungen und Ueberspannungsschutz“, Seite 15; bzw. E. T. Z. 1913, Seite 239.

schielen HSS treffen, hinter denen erst der Reflexionschutz RM und erst weiter die Oberspannungs-Sammelschienen OSS mit Apparaten DE für dauernde Erdung und Apparaten ZE für zeitweilige Erdung kommen. Die ersten können als Wasserstrahlerder oder als Erdungsstromspulen gebaut sein; im ersten Fall vermögen sie unter Umständen auch als Dämpfungswiderstände zu dienen, wofür, gegenüber grösseren Ueberspannungsenergien, die Apparate ZE für zeitweilige Erdung sammeln zugehörigen weiteren Dämpfungswiderständen in erster Linie zu dienen haben. Zwischen den Oberspannungs-Sammelschienen OSS und den Unterspannungs-Sammelschienen USS liegen die hochspannungsseitig durch Reflexions-Schutzapparate RM gesicherten Transformatoren T. An USS ist wiederum ein Apparat für zeitweilige Erdung angeschlossen und es folgen hierauf die ebenfalls durch Reflexionsschutzapparate RM gesicherten Generatoren G.

\* \* \*

Nach einem kurzen Hinweis auf die wirtschaftliche Bedeutung der Ueberspannungsschäden haben wir somit zunächst die aus einfachen Schaltvorgängen entstehenden Ueberspannungen besprochen, sowie auch die Möglichkeit ihrer Berechnung dargelegt. Als Hauptteil der vorliegenden Arbeit haben wir hierauf auf diejenigen Rechnungen hingewiesen, die es ermöglichen, die Vorgänge der Reflexion und des Ueberganges von Ueberspannungswellen an der Grenze verschiedener Leitungsbahnen zahlenmäßig zu verfolgen, sowie auch den Einfluss von Schutzwiderständen, Kondensatoren und Drosselspulen als Schutzapparate zu beurteilen. Dazu dient auch der Hinweis auf die Art der Beanspruchung der Isolation von Wicklungen durch Ueberspannungen. In Bezug auf die Entstehung von Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs haben wir uns angesichts des Fehlens genauen zahlenmässigen Materials über deren Spannungs- und Energieverhältnisse nur kurz gefasst. Auf Grund der heute als unbestritten geltenden Erkenntnis und Erfahrung haben wir dann an Hand eines Beispiels gezeigt, in welcher Weise Reflexionsapparate und eigentliche Ueberspannungsableiter in eine Anlage einzubauen sind.

Als hauptsächlichsten Fortschritt, den in jüngster Zeit unsere Erkenntnis über Auftreten und Bekämpfung der Ueberspannungen machte, haben wir zweifellos die Arbeiten der von uns genannten Forscher über die rechnungsmässige Verfolgung der Vorgänge der Reflexion und des Ueberganges von Ueberspannungswellen an der Grenze verschiedener Leitungsbahnen zu betrachten. Damit können wir jetzt aber auch ermessen, dass der Reflexionsschutz, den einerseits die energieliefernden Werke und anderseits deren Abnehmer von elektrischer Energie für ihre Anlagen anwenden, unbedingt nach einheitlichen Gesichtspunkten durchzuführen ist, wenn nicht unter Umständen die Art und Bemessung des Ueberspannungsschutzes der Anlagen auf der einen Seite diejenigen der andern Seite in Mitteileidenschaft ziehen soll. Deswegen erscheint es gerechtfertigt, dass in Zukunft anlässlich der Revision elektrischer Anlagen den Massnahmen zur Wahrung einer grösseren Einheitlichkeit des Ueberspannungsschutzes vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt wird.

Peter Behrens<sup>1)</sup>.

(Mit Tafel 71 bis 74.)

Von talentvollen Architekten sehen wir schon da und dort gute Landhäuser, städtische Wohn- und Geschäftshäuser, ja sogar öffentliche Gebäude gebaut, die alle das Bestreben zeigen, sichtbarer Ausdruck unseres Zeitempfindens zu sein. Aber was wollen diese vereinzelten, erfreulichen Leistungen sagen im Vergleich zu der grossen Masse von Bauerzeugnissen der Industrie und Spekulation. Die ausdrucksvolle

<sup>1)</sup> Siehe unter Literatur auf Seite 348 dieser Nummer. Die Abbildungen zu diesem Artikel sind mit freundlicher Genehmigung des Verlages dem Prachtband „Peter Behrens“ entnommen.

Redaktion.

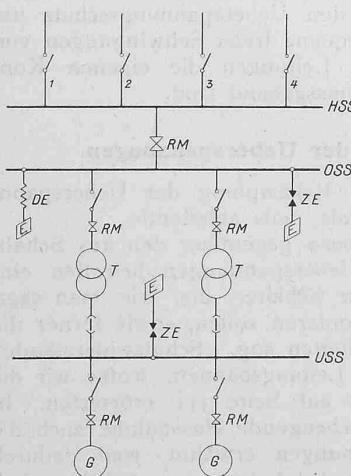


Abb. 7. Beispiel.