

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 17 (1926)  
**Heft:** 6

**Artikel:** Wegleitung für den Schutz von Gleichstromanlagen gegen Ueberspannungen  
**Autor:** Schait, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059803>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

# SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

## ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke } REDAKTION { Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité  
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Verlag und Administration { Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. } Editeur et Administration  
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XVII. Jahrgang  
XVII<sup>e</sup> Année

Bulletin No. 6

Juni 1926  
Juin

### Wegleitung

## für den Schutz von Gleichstromanlagen gegen Ueberspannungen<sup>1)</sup>.

Aufgestellt von der Gruppe b (Ueberspannungsschutz) der Kommission des S.E.V. und V.S.E. für Hochspannungsapparate, Ueberspannungsschutz und Brandschutz<sup>2)</sup>.

### A. Einleitung.

Bearbeitet im Auftrage der Gruppe b, von Dr. ing. H. Schait, Zürich.

Das Anwendungsgebiet der Gleichstrom-Starkstromanlagen ist gegenwärtig ein wesentlich beschränkteres als dasjenige der Wechselstrom-Starkstromanlagen. Diese Gleichstromanlagen kommen neben Wechselstromanlagen im Gebiet der Gebrauchsniederspannungen (in der Schweiz ca. 100 ÷ 500 Volt) und sodann für Kraftübertragungen auf grosse Entfernung in Frage; ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet des Gleichstromes bildet die elektrische Traktion. Der Stadt- und Vorortverkehr wird in der überwiegenden Zahl der Fälle durch Gleichstrombahnen bewältigt und auch bei Ueberlandbahnen ist der Gleichstrom vorherrschend. Ferner kommt der Gleichstrom in ausgedehntem Masse auch für Vollbahntraktion in Frage. Wenn auch die Grenzen der verschiedenen Anwendungsgebiete des Gleichstromes keine starren sind, sondern durch den jeweiligen Stand der Technik und durch wirtschaftliche Erwägungen beeinflusst werden, so kann doch gesagt werden, dass gegenwärtig Gleichstromanlagen mit Spannungen über 3000 Volt selten anzutreffen sind.

Die vorliegende Wegleitung will Angaben über den Schutz aller dieser Gleichstromanlagen geben, wobei davon abgesehen wird, für die verschiedenen Anwendungsgebiete des Gleichstromes besondere Leitsätze aufzustellen, da es sich ja bei allen um dieselben physikalischen Erscheinungen handelt. Es liegt aber in der Natur der Sache, dass die Bedeutung der Vorbeugungs- und Schutzmassnahmen bei den verschiedenen Anwendungsgebieten eine verschiedene sein kann. In solchen Fällen ist an der betreffenden Stelle besonders darauf hingewiesen.

Die *Ursachen*, welche in Gleichstromanlagen gefährliche Ueberspannungen erzeugen können, lassen sich folgendermassen klassifizieren:

1. *Direkter Uebertritt des Potentials* der Atmosphäre auf Freileitungen bei direktem Blitzschlag oder des Potentials von Anlageteilen verschiedener Spannung bei leitender Verbindung zwischen denselben.

<sup>1)</sup> Vorlage an die Generalversammlung des S.E.V. vom 15. August 1926.

<sup>2)</sup> Die Gruppe b besteht aus den Herren: Präsident: Prof. Dr. *Kummer*, Zürich; Mitglieder: Dr. *B. Bauer*, Schaffhausen; *Ch. Belli*, Genève; *G. Courvoisier*, Baden; *J. Gysel*, Zürich; *R. Schmidt*, Lausanne; *R. Thury*, Genève; *C. Wick*, Zürich; Mitarbeiter: Dr. *H. Schait*, Zürich.

2. *Elektrostatische Induktion* von Anlageteilen durch die Atmosphäre oder zwischen Anlageteilen stark verschiedener Spannungen.
3. *Abschalten elektrischer Kreise.*
4. *Sprungwellen.*
5. *Resonanzen.*

### 1. Direkter Spannungsübertritt.

Die gefährlichste Form des Spannungsübertrittes besteht bei direktem Blitzschlag, d. h. wenn der Entladungskanal der Atmosphäre seinen Weg nach Erde über eine Freileitung nimmt. Wird die Freileitung an der Einschlagstelle nicht gerade zerstört, so treten wenigstens Ueberschläge von der Leitung nach Erde auf. Nebst der Erhöhung

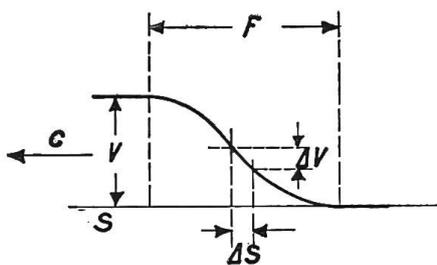


Fig. 1.  
Entladungswelle.  
 $F$  = Wellenstirn.  
 $V$  = Höhe der Sprungwelle.  
 $S$  = Weg.

der Leiterspannung gegen Erde bilden sich zufolge dieser Ueberschläge Entladungswellen oder eine Reihe kombinierte Entlade- und Ladewellen aus (siehe Fig. 1 und 2). Ihre steile Wellenstirn verursacht beim Auftreffen auf Wicklungen Spulen und Lagendurchschläge.

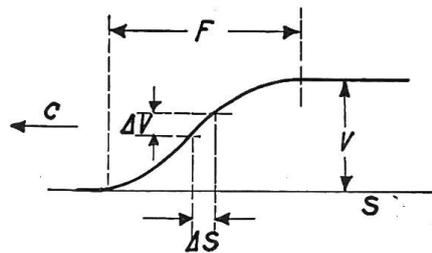


Fig. 2.  
Ladewelle.  
 $C$  = Geschwindigkeit der Welle in Bewegungsrichtung.  
 $\frac{DV}{ds}$  = Steilheit der Welle.

Da auf Anhöhen der Spannungsgradient des Erdfeldes grösser ist als in der Ebene, so sind dort Freileitungen durch direkte und indirekte Blitzschläge besonders gefährdet. An solchen exponierten Stellen empfiehlt es sich, die Stützisolatoren in der Höhe ihrer Basis mit einem Metallring zu versehen, um dieselben vor der schädlichen Einwirkung des Lichtbogens zu schützen (siehe Fig. 3). Indem der Lichtbogen

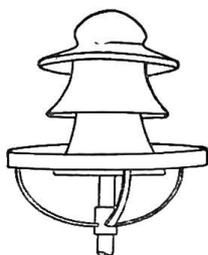


Fig. 3.  
Stützisolator mit metallenen Schutzring.

zwischen Leiter und dem vom Isolator abstehenden Metallring übergeht, wird der Isolator vor starker Erwärmung geschützt. Auch wird zufolge des Metallringes das Schmelzen des Leiters eher vermieden, da der Lichtbogensaustritt sich nicht auf eine kleine Leiterstelle beschränkt, sondern in verästelter Form auftritt. Bei Bahnen mit relativ niedrigen Spannungen ist das Anbringen von Metallringen oder -Bügeln an den Isolatoren in der Regel nicht notwendig.

Bis heute sind keine praktisch anwendbaren Schutzmittel bekannt geworden, welche die zerstörende Wirkung der direkten Blitzschläge, die sich allerdings in der Regel auf die nähere Umgebung der Einschlagstelle beschränken, mit Sicherheit verhüten könnten.

Entsteht eine leitende Verbindung zwischen Anlageteilen verschiedener Betriebsspannungen bei Lichtbogenüberschlag oder direktem Kontakt, dann steht das Objekt mit kleinerer Betriebsspannung unter Ueberspannung. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens dieser Erscheinung kann jedoch durch reichliche Distanzierung der Leiter und sorgfältiger Ausführung von Leitungskreuzungen herabgesetzt werden.

### 2. Elektrostatische Induktion.

Freileitungen sind der elektrostatischen Induktion des luftelektrischen Feldes ausgesetzt und sind somit der Entstehungsort statischer Ladungen, die sich der Betriebsspannung überlagern.

Solche Ladungen können entstehen bei langsamer Verschiebung des luftelektrischen Feldes (Herannahen von Wolken usw.). Da diese Vorgänge verhältnismässig langsam vor sich gehen, verteilen sich die Ladungen gleichmässig auf das ganze Netz. Bei hoher Isolation desselben und wenn Erdungen fehlen, können hohe

Spannungen durch statische Ladungen entstehen, welche zu Ueberschlägen nach Erde Veranlassung geben.

Solche Ladungen werden frei bei plötzlichen Aenderungen des luftelektrischen Feldes (Entladung von über der Freileitung befindlichen Wolken nach Erde, indirekte Blitzschläge genannt) und verursachen Spannungsdifferenzen auf der Leitung und gegen Erde, welche im Entstehungsmoment auf der Leitung örtlich begrenzt sind und sich dann in Form von Ladewellen nach beiden Seiten in das Netz hinein fortpflanzen (siehe Fig. 2). Die Neigung der Wellenstirn ist klein und deshalb als solche ungefährlich, dagegen können diese Ladewellen infolge der Höhe ihrer Spannung gegen Erde zu Ueberschlägen an irgend welchen Stellen des Netzes führen.

Die Gefährdung von Anlageteilen durch solche Ueberspannungen kann man mittels vorbeugender Schutzanordnungen herabsetzen. So kann die ungehinderte statische Aufladung der Freileitung durch das Erdfeld, durch stetige Ableitung der elektrischen Mengen nach Erde über den Betrieb nicht beeinträchtigende Widerstände (z. B. Metallwiderstände, siehe Fig. 4) vermieden werden. Netze, die eine betriebsmässige Erdung besitzen, benötigen keine derartigen Einrichtungen.

Ueber der Freileitung an denselben Masten geführte Erdseile verringern die Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs. Der Schutzwert solcher Seile ist allerdings nicht sehr hoch einzuschätzen. In der Regel ist nur ein Erdseil pro Leitung wirtschaftlich gerechtfertigt und zwar hauptsächlich dann, wenn dasselbe auch andere Dienste leistet, wie z. B. die Verbesserung der Erdung von Eisenmasten. Bei Holzmastenleitungen empfiehlt sich die Anwendung des Erdseiles nicht, weil die elektrische Festigkeit der Leitung infolge der Verkleinerung der Isolationsstrecke des Holzes zwischen Leitung und Erdseil in höherem Masse herabgesetzt wird als die Beanspruchung der Isolatoren bei Blitzschlägen. Diese letztere beträgt bei Anwendung eines Erdseiles nur ca. 30 %. Allgemein ist zu sagen, dass das Erdseil bei Gleichstromfreileitungen weniger in Frage kommt als bei Wechselstromleitungen.

Bei parallel laufenden Leitungen tritt kapazitive Spannungsübertragung auf. Die kapazitiv übertragenen Spannungen können unter Umständen, z. B. bei neben hochisolierten Gleichstromleitungen parallel geführten Wechselstromleitungen hoher Spannung, für das Gleichstromnetz gefährliche Werte annehmen. Diese können, beispielsweise durch Verdrillung der Wechselstromleitungen, auf ungefährliche Werte herabgesetzt werden. Bei Niederspannungsanlagen ist aber die kapazitive Spannungsübertragung wegen der den kleinen Spannungen entsprechend schwächeren Isolation der Gleichstromnetze unbedeutend, so dass es kaum nötig erscheint, Leitungsverdrillungen und ähnliche Schutzmassnahmen vorzunehmen. Dasselbe gilt auch für Bahnanlagen, für die die Fahrzeuge zwischen dem Fahrdrabt und der Geleiserückleitung erdend wirken. Wo zufolge parallel laufender Leitungen bei Arbeiten an Leitungen Personengefährdung möglich wird, sind die Leiter allpolig und beidseitig zu erden.

### 3. Abschaltung elektrischer Kreise.

Gefährliche Ueberspannungen treten nur beim Abschalten von Magnetwicklungen auf. Dabei kann die Ueberspannung, wie Versuche im Laboratorium gezeigt haben, das 50fache der Betriebsspannung erreichen. Durch die Ueberbrückung der Magnetwicklungen oder der Schalter werden diese Ueberspannungen auf ein ungefährliches Mass reduziert.

Bezüglich der Art des Schalters haben Erfahrungen und Versuche gezeigt, dass bei Gleichstrom der Luftschalter zu Ueberspannungen weniger Anlass als der Oel-schalter gibt. Auch hatten dem Gleichstromölschalter folgende Nachteile an: Die

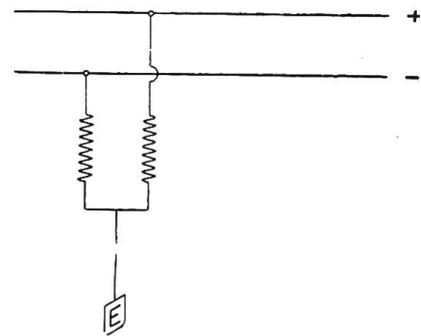


Fig. 4.  
Metallwiderstände zur Ableitung  
statischer Ladungen.

Kontakte müssen sehr tief unter Oel angeordnet werden, das Oel verrusst nach wenigen Schaltungen mit verhältnismässig geringer Leistung stark.

Luftschalter mit magnetischer Blasung, die als Schnellschalter ausgebildet sind, neigen eher zur Erzeugung von Ueberspannungen, da der Lichtbogen momentan abgerissen wird und sich somit nahezu die ganze an den Strom gebundene magnetische Energie in elektrische Energie umwandelt; die Verwendung der Schnellschalter erfolgt aber in solchen Stromkreisen, bei denen der magnetischen Energie Gelegenheit geboten wird, sich grösstenteils in den Ohmschen Widerständen des Stromkreises und in der Ableitung infolge unvollkommener Isolation aufzuzehren. (Bei plötzlicher Abschaltung der Erregerwicklung von Umformern kann sich die aufgespeicherte Energie im Ankerstromkreis in Wärme umsetzen).

Das normale Abschalten belasteter Gleichstromleitungen erzeugt keine Ueberspannungen, die besondere Schutzrichtungen verlangen.

Die beim Schalten entstehenden Lade- und Entladewellen werden zufolge des Lichtbogens stark gedämpft, wodurch die Wellenfront verflacht und eine Gefährdung von Wicklungen vermieden wird.

Sicherungen sind in bezug auf Erzeugung von Ueberspannungen beim Abschalten ziemlich gleichwertig mit Schnellschaltern mit magnetischer Blasung. Eine genaue obere Stromstärkegrenze für die Verwendung von Sicherungen kann nicht angegeben werden. Dagegen empfiehlt es sich, im Hinblick auf die Vermeidung von Schaltüberspannungen bei Spannungen von etwa 400 Volt an, bei grösseren Stromstärken Sicherungen nicht mehr zu verwenden.

#### 4. Sprungwellen.

Elektrische Schwingungen bestehen in der periodischen Umwandlung der Energieform, indem die in der Induktivität gebundene magnetische Energie sich umsetzt in elektrische Energie, welche in der Kapazität aufgespeichert wird und umgekehrt. Bei gleichmässig über das Leitergebilde verteilter Induktivität und Kapazität spricht man von Wanderwellenschwingungen, die sowohl als Entlade- oder Ladewellen, wie auch als Kombination beider in regelmässigem Wechsel auftreten können.

Entladewellen (Fig. 1) treten auf, wenn bei einer Leitung Ueberschläge nach Erde oder nach andern Polen entstehen. Dadurch nimmt die betreffende Stelle der Leitung plötzlich ein anderes Potential an. Da sich solche lokale Potentialänderungen den benachbarten Leitungsteilen nur mit endlicher Geschwindigkeit mitteilen können, behalten diese ihre Spannung momentan noch bei. Dadurch entsteht in Richtung der Leitung ein starkes Spannungsgefälle, das längs derselben verläuft. Besonders hoch wird dieses Gefälle dann, wenn die Spannung der Leitung durch vorhergehende Ueberspannungsvorgänge über die Betriebsspannung hinaus gesteigert worden ist. Als Ursache für Entladewellen kommen in erster Linie Ueberschläge nach Erde infolge atmosphärischer Ueberspannungen in Frage, sodann gewöhnliche Erd- und Kurzschlüsse und Schaltvorgänge. Treffen solche Entladewellen auf Wicklungen auf, so wird z. B. bei Ueberschlag nach Erde die Spannung der ersten Windung gegen Erde auf Null gebracht, während weiter innen liegende Wicklungsteile noch die vorherbestehende Spannung bewahren. Dadurch treten zwischen benachbarten Teilen der Wicklung grosse Spannungsunterschiede auf, welche bis zum 100fachen der betriebsmässigen Beanspruchung ansteigen können.

Ladewellen (Fig. 2) entstehen dadurch, dass entweder einzelne Stellen von Leitungen (bei Schaltvorgängen und direkten Blitzschlägen) oder ganze Leiterstrecken (bei indirekten Blitzschlägen) plötzlich auf höhere Spannung gegen Erde gebracht werden.

Dadurch entstehen wieder Spannungsgefälle in Richtung der Leitung, welche grundsätzlich dieselben Folgen wie bei Entladewellen haben können. Erfahrungsgemäss ist diese Erscheinung aber, soweit das Spannungsgefälle selbst in Frage kommt, weniger gefährlich bei indirekten Blitzschlägen, weil dasselbe flach verläuft, und bei Schaltvorgängen, weil die Ueberspannung nicht gross ist.

Es ist gebräuchlich, steile Wellen Sprungwellen zu nennen.

Nach Erkenntnis der Gefahr, die in den Sprungwellen liegt, hat man Mittel zur Abflachung ihres steilen Gefälles gesucht, ebenso zu ihrer Reflexion und Ableitung nach Erde. In den Schutzdrosselspulen und Schutzkondensatoren erblickte man Mittel zur Reflexion von Spannungen bzw. Stromstärke, sowie auch Mittel zur Abflachung der steilen Stirn. In den Ableitern (wie Hörnerableiter und Walzenableiter mit Widerständen und andere mehr) erkannte man auch Mittel zur Ableitung der Sprungwellen nach Erde. Drosselspulen sollen die im Netz entstandenen Sprungwellen wieder auf dasselbe zurückwerfen, die Maschinen schützen und die Umwandlung der Sprungwellenenergie in dem Ohmschen Widerstande des Netzes in Wärme herbeiführen. Da aber der Theorie, nach der man Drosselspulen glaubte rechnen zu können, Vereinfachungen zugrunde liegen, die sich als unzulässig erweisen haben, und die Wirkungsweise solcher Spulen heute noch nicht so erforscht ist, wie der Ueberspannungsschutz es erfordert, so muss noch durch Betriebserfahrungen der Nutzen dieser Apparate erwiesen werden.

Kondensatoren besitzen nur dann eine Schutzwirkung, wenn ihre Kapazität genügend gross gewählt wird. Vor allem muss auch verlangt werden, dass sie betriebssicher sind; sie sollen deshalb mit mindestens derselben Spannung und Dauer wie die übrigen Anlageteile geprüft werden.

Drosselspulen und Kondensatoren kommen besonders bei Gleichstrom-Hochspannungs-Serieanlagen zum Schutze von Generatoren und Motoren in Betracht, welche nicht an Kabel-, sondern an Freileitungsnetzen liegen.

Die Funkenableiter mit Serienwiderstand erfüllen ihren Zweck bisher oft nicht, da der in Serie geschaltete Ableiterwiderstand, der ein sicheres Löschen des Lichtbogens gewährleisten und zugleich eine genügende Ableitung von Sprungwellenenergie gestatten soll, zu gross bemessen wurde. Dieser Widerstand sollte nicht grösser sein als der sogenannte Wellenwiderstand<sup>1)</sup> der Freileitung, an welche die Funkenableiter angeschlossen sind, d. h. nicht grösser als ca. 500 bis 600 Ohm. Die Herstellung zuverlässig wirkender und jederzeit betriebsbereiter Ableiterwiderstände bereitet bei hohen Betriebsspannungen Schwierigkeiten. Bei kleinen Betriebsspannungen muss die Ueberschlagsdistanz der Hörner für wirksamen Schutz der Anlageteile klein bemessen werden, wobei aber die Ueberschlagsspannung durch Staub, Regen usw. wesentlich herabgesetzt werden kann, wodurch unangenehme Betriebsstörungen erfolgen; deshalb sind diese Ableiter besonders sorgfältig gegen das Eindringen von Fremdkörpern zu schützen, bzw. öfters zu reinigen. Wasserwiderstände in Serie mit Funkenableitern sind nicht empfehlenswert, da sich das Wasser unzulässig rasch erwärmt, sein Widerstandswert daher abnimmt, wodurch die Stromstärke vergrössert wird. Entweder bleibt dann der Lichtbogen stehen oder schlägt gegen Erde über, oder das Wasser verspritzt explosionsartig. Inwieweit eine Verbesserung der Funkenableiter durch Kombination mit automatischer Lichtbogenlöschung erzielt werden kann, wird die Zukunft lehren. Ueber die andern Ableiter sind zu wenig einwandfreie Betriebserfahrungen bekannt geworden, um dieselben empfehlen zu können.

Da das Anbringen von Funkenableitern prinzipiell eine gute Massnahme zum Schutz elektrischer Anlagen gegen Ueberspannungen ist, können Ableiter zugelassen werden, wenn ihre Ausführung folgenden Bedingungen genügt: Die Durchschlags- bzw. Ueberschlagsspannung hat für die jeweilige Einstellung annähernd konstant zu sein; der Ohmwert des Ableiterwiderstandes soll so klein als praktisch möglich gehalten werden und jedenfalls den Wellenwiderstand der Leitung, an der der Ableiter liegt, nicht überschreiten; beim Ansprechen soll der Widerstand den Betriebsstrom begrenzen und die sofortige Unterbrechung sicherstellen, ohne dadurch Störungen zu verursachen.

<sup>1)</sup> Darunter versteht man die Quadratwurzel aus dem Verhältnis der Induktivität zur Kapazität gegen Erde pro km Einzelleiter.

In welchem Masse den Wicklungen vorgeschaltete Drosselpulen oder Kondensatoren auf Wanderwellen einwirken, wird heute noch nicht so weit überblickt, dass eine Wegleitung für die Bemessung dieser Apparate gegeben werden könnte.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, dass es heute keinen sicher wirkenden äusseren Schutz gegen Sprungwellen gibt, sondern dass man, sofern es sich nicht um bereits bestehende Anlagen handelt, diesen Schutz am besten in die zu schützende Wicklung selbst verlegt, d. h. sie sprungwellensicher baut.

### 5. Resonanzen.

Jedem Stromkreis, der Induktivität und Kapazität enthält, kommt eine durch deren Grösse bestimmte Eigenfrequenz zu. Wird ein solcher Kreis durch eine Spannung erregt, deren Frequenz Impulsfrequenz heissen möge, so tritt eine Resonanzerscheinung auf, wenn Impulsfrequenz und Eigenfrequenz übereinstimmen. Mechanisch kann die Resonanzerscheinung folgendermassen gedeutet werden: Es lässt sich vergleichsweise der Begriff „Induktivität“ durch „Masse“, die Grösse „Kapazität“ durch „Feder“ ersetzen. Wir erhalten dann bei Aufhängung der Masse an die Feder ein schwingungsfähiges Gebilde, das bei Anstoss zu schwingen beginnt. Die Zahl der Schwingungen dieses Gebildes wird durch die Masse und Federkraft bestimmt und heisst Eigenfrequenz. Sobald wir das mit seiner Eigenfrequenz schwingende System durch eine Kraft, die im Rhythmus des schwingenden Gebildes variiert, anstossen, vergrössern sich die Schwingungsamplituden immer mehr. Man sagt, das Gebilde führt Resonanzschwingungen aus.

Die Impulsfrequenz elektrischer Schwingungskreise kann durch die Frequenz von Oberwellen von Maschinen oder durch die Frequenz von Sprungwellenzügen gebildet sein.

Angeregt durch Oberwellen, kann Resonanz auftreten; diese hat jedoch praktisch kaum unzulässige Ueberspannungen zur Folge. Viel eher tritt Resonanz auf, angeregt durch Sprungwellenzüge beim Auftreffen derselben auf lokale Schwingungskreise, gebildet aus Schutzdrosselpulen und Sammelschienenkapazität. Resonanzueberspannungen, die durch Sprungwellenzüge angeregt werden, wird vorgebeugt durch Parallelwiderstände zu den im Zuge der Leitungsführung liegenden Induktivitäten, wie Auslösespulen und Schutzdrosselpulen, da damit eine Dämpfung von Schwingungskreisen erzielt wird.

### B. Leitsätze.

#### 1. Die Arten der Ueberspannungen in Gleichstromanlagen.

1. Wird an irgend einer Stelle der Anlage die dem normalen Betriebszustand entsprechende Spannungsbeanspruchung überschritten, dann besteht an dieser Stelle eine Ueberspannung. Die Ueberspannung kann gefährlich werden zufolge ihrer Höhe, ihrer örtlichen Verteilung auf dem Leiter und im Dielektrikum und ihrer Häufigkeit und Dauer. An Anlageteilen für mindestens 1500 Volt Betriebsspannung ist den Leitsätzen an Hand der Erfahrung eine Ueberspannung, die ca. 75 % der niedrigsten in Anwendung gebrachten Prüfspannung der verschiedenen zusammengehörenden Anlageteile übersteigt, als gefährlich zu Grunde gelegt, sofern Luft als Isolation in Betracht kommt. Eine Ausnahme machen dabei Anlageteile mit festen Isolierstoffen, soweit ganz kurzzeitige Ueberspannungen in Frage kommen; für diese sind erst höhere Ueberspannungen gefährlich (hohe Momentanfestigkeit). Als gefährlich gelte bei Wicklungen eine örtliche Spannungsverteilung an dem Leiter und im Dielektrikum, wenn sie die bei der Isolationsprüfung herrschende Beanspruchung übertrifft. Für den Grad der Gefährlichkeit der Dauer oder der Häufigkeit, die ja gewöhnlich beide keine beträchtlichen Werte annehmen, lassen sich heute noch keine allgemein gültigen Angaben machen. Bei Anlagen für Betriebsspannungen unter 1500 Volt, bei denen mit der Zeit eine unkontrollierbare Abnahme der Isolationsfestigkeit statt-

findet, können schon Ueberspannungen, die wesentlich niedriger als 75 % der Prüfspannung liegen, mit Rücksicht auf die Gefährdung von Personen bedenklich werden.

2. Die Ueberspannungen, welche gefährliche Werte annehmen können, lassen sich wie folgt klassifizieren:

- a) Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs.
- b) Schaltueberspannungen.
- c) Resonanzueberspannungen.
- d) Direkter Spannungsübertritt.
- e) Kapazitive Ueberspannungen.
- f) Kombinierte Ueberspannungen.

3. Das lufterlektrische Feld induziert in der Seriekapazität, gebildet aus den Elektrodenpaaren: einerseits Wolke-Freileitung, andererseits Freileitung-Erde, Teilspannungen, die für das Netz unzulässig hoch werden können (langsame statische Ladungen). Durch momentane Aenderungen des lufterlektrischen Feldes während Gewittern („indirekte“ Blitzschläge) werden Ladungen frei und verursachen Ueberschläge nach Erde und damit Sprungwellen von gefährlicher Höhe. Ferner können Blitzschläge die Anlage treffen („direkte“ Blitzschläge), sie sind aber seltener.

4. Beim Abschalten von Magnetwicklungen entstehen gefährliche Ueberspannungen. Sonst entstehen bei den Ein- und Ausschaltvorgängen Sprungwellen, deren Höhe aber meistens ungefährlich ist.

5. Resonanzueberspannungen der Sprungwellen können entstehen bei Lade- und Entladevorgängen, wenn die Frequenz der dabei auftretenden Sprungwellenzüge angenähert oder gerade gleich ist der Eigenfrequenz von Schwingungskreisen, gebildet aus Induktivitäten, wie Relais und Drosselspulen mit dahinterliegenden Kapazitäten, wie Kabel.

Resonanzueberspannungen mit Oberwellenfrequenz erreichen in Gleichstromanlagen keine gefährliche Höhe.

6. Der direkte Spannungsübertritt wird durch eine leitende Verbindung zwischen Anlageteilen verschiedener Betriebsspannungen oder Stromarten, bei direktem Kontakt oder bei Lichtbogenüberschlag, herbeigeführt.

7. Kapazitiv übertragene Ueberspannungen können bei parallel geführten, voneinander isolierten Leitungen, also auch in einer Gleichstromleitung, die mit einer hochgespannten Wechselstromleitung parallel läuft, auftreten; sie sind jedoch in der Regel dann nicht von gefährlicher Art.

8. Die in den Anlagen auftretende kombinierte Ueberspannung ist das Schlussglied mehrfacher Verkettungen von Störungsursachen, wie sie unter 3 bis 7 behandelt werden.

## 2. Methoden der Schutzmassnahmen.

### a) Isolation der Anlage.

9. Die Isolation der Maschinen und Apparate soll der Spannungsprüfung unterzogen werden, die nach besonderen Normalien vorgenommen werden soll<sup>2)</sup>.

10. Stütz-, Trag- und Durchführungsisolatoren sind derart auf elektrische Festigkeit zu bemessen, dass ihre Durchschlagsfestigkeit grösser ist als die Ueberschlagsfestigkeit des trockenen und sauberen Isolators. Glimmentladungen sind im Betriebszustand unzulässig.

11. Die Isolationsfestigkeit von Anlagen mit Freileitungsnetzen soll kurzzeitigen Beanspruchungen gegenüber möglichst *einheitlich* sein. Damit können zwar bei indirekten Blitzschlägen Leitungsüberschläge nicht vermieden werden, wohl aber die Ueberschläge in Innenräumen, indem dieselben von der Ueberspannung zeitlich später betroffen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass feste Isolierstoffe von gleicher elektrischer Dauerfestigkeit, d. h. bei Dauerprüfung, eine wesentlich höhere momentane elektrische Festigkeit besitzen als die Luft.

Einteilung  
der Ueberspan-  
nungen.

Ueber-  
spannungen  
atmosphärischen  
Ursprungs.

Schalt-  
ueberspannungen

Resonanz-  
ueberspannungen

Direkter  
Spannungs-  
übertritt.

Kapazitiv über-  
tragene Ueber-  
spannungen.

Kombinierte  
Ueber-  
spannungen.

Isolations-  
festigkeit von  
Maschinen und  
Apparaten.

Isolations-  
festigkeit von  
Isolatoren.

Isolations-  
festigkeit von  
Anlagen.

<sup>2)</sup> Die Aufstellung solcher Normalien ist in Aussicht genommen.

*b) Vorbeugungsmassnahmen.*

Allgemeine  
Angaben.

12. Die erste und vornehmste Lösung des praktischen Ueberspannungsschutzes liegt in den vorbeugenden Massnahmen gegen das Auftreten primärer Störungserscheinungen und den Vorkehrungen gegen die Verkettungen weiterer Ueberspannungsmöglichkeiten mit der primären Ueberspannung. Die Aufstellung eigentlicher Schutzapparate ist nur dann gerechtfertigt, wenn die vorbeugenden Massnahmen keine hinreichende Sicherheit gewähren.

Massnahmen  
gegen  
atmosphärische  
Ueber-  
spannungen.

13. Atmosphärische Ueberspannungen bei Freileitungen lassen sich nicht vermeiden. Jedoch kann die Höhe der Ueberspannungen durch ein Erdseil verringert werden. Der grösseren Isolationfestigkeit wegen, die Freileitungen mit Holzmasten gegenüber solchen mit Eisenmasten besitzen, empfiehlt sich die Anwendung eines Erdseiles nur für letztere. Metallringe oder -Bügel an Isolatoren schützen diese vor Zertrümmerung und die Leiter vor dem Durchschmelzen durch den Lichtbogen. Der Einbau derselben ist besonders an durch Gewitter gefährdeten Stellen und an vereinzelt stehenden Eisenmasten empfehlenswert.

Massnahmen  
gegen Schalt-  
überspannungen.

14. Die durch das Abschalten von Magnetwicklungen bedingten hohen Ueberspannungen werden durch Shuntung, eventuell auch durch Vorschaltwiderstände unterdrückt. Die Verwendung von Luftschaltern empfiehlt sich, während Oelschalter im allgemeinen ungeeignet sind.

Massnahmen  
gegen  
Resonanz-  
überspannungen.

15. Die durch Sprungwellenzüge in lokalen Schwingungskreisen hervorgerufenen Resonanzüberspannungen können durch Einbau Ohmscher Widerstände in die Schwingungskreise gedämpft werden.

Massnahmen  
gegen den  
direkten  
Spannungs-  
übertritt.

16. Die stromführenden Leitungen getrennter Anlageteile sind zur Vermeidung des direkten Spannungsübertrittes möglichst weit voneinander zu entfernen. Dazu gehört auch die besonders sorgfältige Ausführung von Leitungskreuzungen und die sachgemässe Ausführung der Erdung der Gestelle.

Massnahmen  
gegen kapazitiv  
übertragene  
Ueber-  
spannungen.

17. Bei parallel geführten Leitungen verschiedener Spannungen, bei denen durch kapazitive Uebertragungen gefährliche Ueberspannungen auftreten, empfiehlt sich die teilweise Verlegung der einen Leitung oder die Vergrösserung der Erdkapazität der Leitung mit niedriger Spannung (Anwendung von Kabeln oder Kondensatoren). Bei Betriebsarbeiten an einer Leitung ist die abgeschaltete Strecke zur Vermeidung kapazitiv übertragener Spannungen allpolig und beidseitig zu erden.

*c) Wahl der Schutzmittel gegen entstandene Ueberspannungen.*

Langsame  
atmosphärische  
Ladungen.

18. Zwecks Ableitung der durch das luftelektrische Feld erzeugten statischen Ladungen sind an die Sammelschienen Ableitungswiderstände anzuschliessen. Wo Korrosion unterirdisch verlegter metallischer Leitungen zu befürchten ist, sollen statt mit solchen Leitungen in Verbindung stehender Wasserstrahlerder hochohmige Kohle- oder Metallwiderstände zwischen Leiter und Erde eingebaut werden. Bei Bahnanlagen mit einem geerdeten Pol, sowie bei Dreileiteranlagen mit geerdetem Nullleiter sind keine Ableitungswiderstände notwendig, da die elektrischen Mengen bereits einen Weg zu ihrem Abflusse nach Erde besitzen.

Indirekte  
Blitzschläge

19. Die Gefährlichkeit von Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs kann in gewissen Fällen durch sogenannte Funkenableiter herabgesetzt werden. Dies trifft zu für alle Anlagen zwischen 1500 und ca. 5000 Volt Betriebsspannung. Solche Funkenableiter können aber ihren Zweck nur erfüllen, wenn ihre Durchschlags- bzw. Ueberschlagsspannung für die jeweilige Einstellung annähernd konstant ist, wenn sie wiederholtes und andauerndes Ansprechen ohne Schaden aushalten und im Falle von Freileitungen, wenn ihr Widerstand kleiner ist als der Wellenwiderstand einer Freileitung, d. h. kleiner als ca. 600 Ohm.

Sprungwellen.

20. Die steile Front von Sprungwellen, die zu Ueberspannungen zwischen den Windungen von Wicklungen führt, kann durch konzentrierte Kapazitäten, bzw. konzentrierte Induktivitäten vor den Wicklungen abgeflacht werden. Da die Herstellung sprungwellensicherer Wicklungen Schwierigkeiten bereitet, sind vorgeschaltete Kabel-

stücke, Kondensatoren, bzw. Drosselspulen, oder sowohl Kondensatoren als auch Spulen, deren Kapazität bzw. Induktivität jedoch nicht allgemein angegeben werden können, zu empfehlen. Da durch Induktivitäten und Kapazitäten lokale Schwingungskreise geschaffen werden können, ist dabei stets auf die Dämpfung dieser Kreise mittels Widerständen zu achten.

### 3. Nutzenwendungen.

21. Die nachfolgende Tabelle zeigt für jede praktisch vorkommende Netzart für Gleichstromanlagen die Mittel zur Bekämpfung der am Kopfe jeder Horizontalreihe angegebenen Ueberspannungen, mit Ausnahme der kombinierten Ueberspannungen, für welche die Massnahmen für die Elemente, aus denen solche Ueberspannungen bestehen, kombiniert gelten.

*Uebersicht über die zu verwendenden Schutzmittel für Gleichstromanlagen.*

Art der Ueberspannung	Netze bis 1500 Volt		Netze über 1500 Volt		Bahnen
	Freileitung	Kabel	Freileitung	Kabel	
Langsame atmosphärische Aufladung von Freileitungen	ungefährlich	Kommen hier nicht vor	In ungeerdeten Netzen, d. h. ohne ein Pol an Erde oder ohne geerdeten Nulleiter sind Ableiter zwischen Leiter und Erde zu schalten (hochohm. Kohle- oder Metall- oder Wasserwiderstände).	Kommen hier nicht vor	Zufolge der Erdung eines Poles ungefährlich
Indirekte Blitzschläge	Gegen Staub und Regen geschützte Funkenableiter empfohlen für Erzeugungs- und Unterstationen	Kommen hier nicht vor	Möglichst einheitliche Isolationsfestigkeit für Stationen und Freileitungen. Möglichst grosse Festigkeit von Wicklungen. Ueberbrückung von Induktivitäten wie Spulen mit Widerständen. Schutzringe bei Freileitungsisolatoren an exponierten Punkten. Direkt an Freileitungen angeschlossenen Generatoren und Motoren sind Kabel (Kondensatoren) oder Drosselspulen vorzuschalten, eventuell sind Funkenableiter vorzusehen.	Kommen hier nicht vor	
Schaltueberspannungen	Shuntung der Schalter oder Magnetwicklungen (Erregerwicklungen) mittelst Widerstände, ev. Vorschaltwiderstände; sonst ungefährlich. Für Spannungen von 400 Volt an zuverlässige Lichtbogenschalter (Luftschalter), event. mit Parallelwiderständen. Vermeidung von Schmelzsicherungen von etwa 400 Volt an und bei grösseren Stromstärken.				
Resonanzueberspannungen der Entladewellen bei Erd- und Kurzschluss	Ungefährlich	Ungefährlich	Ueberbrückung von Induktivitäten wie Drosselspulen, Relais usw. mittelst Widerständen.		
Direkter Spannungsübertritt	Nullpunktserdung in Dreileiteranlagen. Sorgfältige Ausführung von Leitungskreuzungen und möglichst grosse Entfernung zwischen Leitern von Anlageteilen verschiedener Betriebsspannung. Sorgfältige Erdung von Traggestellen.				
Kapazitiv uebertragene Ueberspannungen	Bei parallel geführten Leitungen verschiedener Spannungen teilweise Verlegung der einen Leitung; Vergrösserung der Kapazität der Leitung mit niedriger Spannung mittelst Kabeln oder Kondensatoren.				