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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 80 (1989)

Heft: 13

Artikel: Überspannungsschutz im Verteilnetz

Autor: Biasiutti, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903694

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 09.12.2025

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

Überspannungsschutz im Verteilnetz

G. Biasiutti

Dieser Artikel umreisst die wichtigsten Aspekte, welche bei der Konzeption des Überspannungsschutzes in Mittelspannungverteilnetzen beachtet werden müssen. Die Qualität des Überspannungsschutzes in Verteilnetzen kann durch den Einsatz der funkenstreckenlosen Metalloxid-Ableiter in gewisser Hinsicht verbessert werden; andere Faktoren, wie die Positionierung und die Art des Anschlusses der Ableiter, sind allerdings nicht minder massgebend.

Cet article esquisse les aspects essentiels dont il faut tenir compte lors la conception de la protection contre les surtensions dans les réseaux de distribution moyenne tension. La qualité de la protection contre les surtensions dans les réseaux de distribution peut être améliorée à certains égards en utilisant des parafoudres à oxydes de métaux sans éclateur; d'autres facteurs, tels que le positionnement et le mode de raccordement des parafoudres ne sont cependant pas moins importants.

Adresse des Autors

Gianni Biasiutti, Dr. Ing., Bernische Kraftwerke AG, Elektromechanische Abteilung, 3013 Bern

Die experimentellen Untersuchungen erfolgten im Kabelwerk Dätwyler AG, 6460 Altdorf

Eine entscheidende Voraussetzung für den störungsfreien Betrieb elektrischer Versorgungsnetze ist ein angemessener Schutz der Betriebsmittel vor unzulässiger Überspannungsbeanspruchung. Diese Feststellung ist für Verteilnetze nicht minder zutreffend als für Netze der oberen Spannungsebenen, denn die Überspannungen können dort, bezogen auf die relativ niedrigen Betriebsspannungen, in besonders gefährlicher Höhe auftreten.

Der Überspannungsschutz im Verteilnetz befindet sich heute, nach langen Jahren gleichbleibender Technologie, in einem markanten Entwicklungsschritt: Als Alternative zu den bewährten und technisch ausgereiften Funkenstrecken-Ableitern stehen heute bestechend einfache Ableiter, bestehend aus spannungsabhängigen Widerständen, sogenannte Metalloxid-Ableiter, zur Verfügung [1]. Ausserdem hat der Kompaktbau von Schaltstationen zu einer bis inklusive dem Kabelendverschluss vollständig berührungssicheren Kapselung der Feldeinheiten geführt, so dass hier der Ableiter seinen angestammten Aufstellungsort vollkommen verloren hat. Dies zwang zur Entwicklung einer völlig neuen Ableiter-Anschlusstechnik, welche mit jener des Kabels kompatibel ist und damit in das neue Konzept passt.

Dieser Technologiewandel gibt Anlass, die bekannten, für den Anwendungstechniker massgebenden Aspekte zum Überspannungsschutz im Verteilnetz kurz zu erörtern. Es soll damit aufgezeigt werden, an welchen Parametern sich die Wirksamkeit von Schutzmassnahmen entscheidet und welche Vorteile über die erwähnten Ableiter-Entwicklungen zu gewinnen sind.

Wenn sich die nachfolgenden Ausführungen auf Feinverteilnetze – also auf Netze der Ebenen 10 ... 30 kV – beziehen, dann sollen der Einfachheit halber immer einige Verallgemeinerungen gelten: Namentlich handle es sich um ein *gemischtes* Freileitungs- und Kabelnetz, es seien nur Kunststoffkabel eingesetzt, und der Sternpunkt sei isoliert oder über eine Drossel nicht-wirksam geerdet.

Ursprung, Amplituden und Ausbreitung von Überspannungen

Bevor man sich mit dem Schutz gegen Überspannungen befasst, ist es zweckmässig, sich die Natur der wichtigsten Überspannungen zu vergegenwärtigen. Ganz allgemein kennt man drei grundsätzlich verschiedene Ursachen für höhere Überspannungen in elektrischen Netzen [2]: Es sind dies Erdschlüsse, Schalthandlungen und Blitzeinwirkungen. Wie in Tabelle I orientierend zusammengestellt ist, lösen sie Überspannungen von ganz verschiedener Form, Amplitude und Dauer aus.

Die relativ niedrigen Betriebsspannungen der Verteilnetze bringen es mit sich, dass die durch Erdschlüsse und Schalthandlungen ausgelösten Überspannungen von weit geringerer Amplitude sind als jene, die der Blitz, wel-

Ursache	Form	Dauer	Amplitude
Erdschluss →	Wechselspannung	Std	$\sqrt{3}$ p.u.
intermittierender Erdschluss →	Schwingung	ms	< 4 p.u.
Schalthandlung →			
Blitzschlag →	Wanderwelle	µs	< 12 p.u.

Tabelle I
Ursache, Form, Dauer und höchste Amplitude von Überspannungen in Verteilnetzen

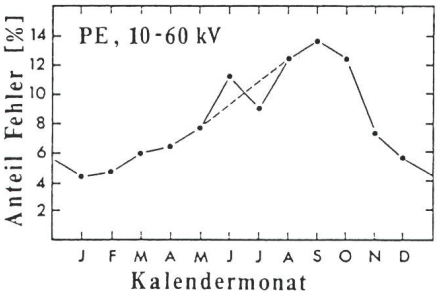
p.u. per unit: 1 p.u. = $\sqrt{2} \cdot U_0$

U_0 Phasenspannung

cher sich nicht nach der Systemspannung richtet, verursacht. Blitzeinwirkungen bedeuten deshalb die dominierende Überspannungsbeanspruchung von Betriebsmitteln in Verteilnetzen. Diese Feststellung wird durch Figur 1 unterstützt. Sie zeigt eine über zwei Jahrzehnte aufgenommene Verteilung von Störungen an Polyäthylen-Kabeln. Interessant ist dabei die Häufung der Fehler während der Gewitterzeit.

Die folgenden Ausführungen werden sich weitgehend auf die für Isolierungen in Verteilnetzen primär massgebenden Blitzüberspannungen beschränken. Es darf aber der Hinweis nicht fehlen, dass auch die anderen genannten Ursachen von Überspannungen durchaus von Bedeutung sein können [3]. Man denke zum Beispiel an intermittierende Erdschlüsse in vermeintlich gelöschten Netzen, welche mit ihren 100 Einschwingvorgängen pro Sekunde und Amplituden bis etwa 3.5 p.u. besonders die ausgedehnten Kabelisolierungen in Mitleidenschaft ziehen können.

Zur Beschreibung seiner Wirkungen ist der Blitz als Stromquelle aufzufassen, die der Freileitung einen Strom einprägt – im Verteilnetz normalerweise allen drei nahe beeinanderliegenden Leitern gemeinsam. Dieser eingeprägte Strom fliesst von der Einschlagstelle her als Wanderwelle in beiden Richtungen weg und erzeugt dabei eine Spannungsamplitude entsprechend dem Produkt aus Strom und Wellenwiderstand des Leiters. Im Verteilnetz kann man dabei annehmen, dass pro Leiter und Ausbreitungsrichtung etwa ⅙ des Blitzstromes fliesst. Zur Berechnung der Anfangs-Scheitelspannungen dieser Wellen können die Blitzstrom-Verteilungskurven in [4] herangezogen werden: Unter Annahme eines Wellenwiderstandes der Freileitung von 450 Ω ergibt sich für den 50%-Wert negativer Blitze von 35 kA eine Spannungsamplitude von etwa 2,6 MV; für die höchsten in [4] gemessenen Blitzstromstärken wäre dieser Wert noch etwa dreimal grösser. Solch hohe Spannungen können im Verteilnetz praktisch aber nur auf extremen Weitspannleitungen erzeugt werden, denn wenn die Welle den nächstliegenden Mast erreicht, leitet sie schon bei wesentlich niedrigerer Spannung einen Überschlag des Isolators ein. Dadurch wird der Blitzstrom teilweise über den Mast ins Erdreich abgeleitet, und die Spannung der weiterlaufenden Welle stellt sich auf den reduzierten Strom ein. Dieser Vorgang wiederholt sich an den folgenden Masten so lange, bis die Spannung der Welle kleiner ist als die gemeinsame Haltespannung von Isolator und Mast. Man erkennt daraus, dass gerade auf den im Verteilnetz noch verbreiteten Holzmastleitungen besonders hohe Überspannungen zu erwarten sind, liegen doch die Überschlagspannungen trokkener Holzmaste im Megavolt-Bereich. Hingegen können die Isolatoren an Stahl- und Betonmasten die im Rahmen des Überspannungsschutzes wichtige Stromableitungsfunktion sehr gut wahrnehmen. Um diese Schutzaufgabe nicht zu beeinträchtigen, darf ihre Stoss-Haltespannung, gemessen am entsprechenden koordinierten Stosspegel, nicht überdimensioniert werden! Das Löschen der von den Wanderwellen hervorgerufenen und unter der Betriebsspannung weiterbrennenden Isolatorüberschläge vollzieht dann viel später und ausserhalb unserer Betrachtungen das Überstrom-Schutzrelais der betroffenen Leitung.



Figur 1 Störungsstatistik für PE-Kabel: Verteilung der aufgetretenen Fehler über die Kalendermonate, Periode 1968–1987; Firma Dätwyler AG

PE-Kabel Polyäthylen-Kabel

10...60 kV Nennspannung der Kabel

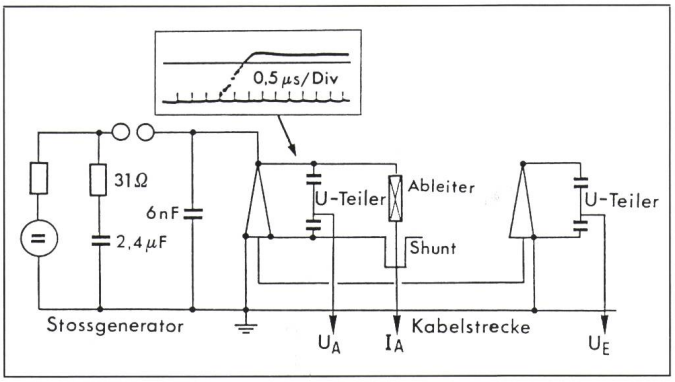
In der weiteren Ausbreitung der inzwischen stark entladenen Überspannungswelle werden dann Reflexionen an den Übergängen Freileitung/Kabel auftreten. Entsprechend dem Sprung des Wellenwiderstandes von rund 15:1 dringen zunächst nur etwa 13% der an der Stossstelle ankommenden Welle in das Kabel ein, der Rest wird reflektiert. Diese relativ kleine weiterlaufende Welle vermag dann aber das Kabel, durch mehrfache Reflexionen, sukzessive auf höhere Spannungen aufzuladen [2; 5]. Bei offenem Kabelende, entsprechend zum Beispiel dem Transformator einer Kopfstation, wird unter Umständen sogar die doppelte Amplitude der von der Freileitung eingefallenen Welle erreicht.

Aufgrund dieser Wanderwellen-Reflexionsvorgänge nimmt das Kabel eine Schlüsselposition bezüglich der «Gestaltung» der die anderen Betriebsmittel beanspruchenden Überspannung ein. Es ist deshalb richtig, bei der Diskussion der Schutzmassnahmen das Kabel in den Vordergrund zu stellen. Dies ist nicht nur wichtig, weil es mit seiner ausgedehnten, hochbeanspruchten Isolierung selber eines optimalen Schutzes bedarf, sondern weil sein Schutz sehr weitgehend auch den Schutz der nachgeschalteten Betriebsmittel darstellt.

Anforderungen an den Überspannungsschutz

Zur Formulierung der grundsätzlichen Anforderungen an die besonderen Überspannungs-Schutzeinrichtungen, die Ableiter, sind folgende Gedanken richtungsweisend:

Für Betriebsmittel mit *gasförmiger* oder *flüssiger Isolierung* können Überspannungsbeanspruchungen weitgehend als nicht-zusammenhängende Einzelereignisse betrachtet werden. Den Ableitern kommt dann die Aufgabe zu, die Spannungen in allen Punkten des Netzes so weit zu begrenzen, dass die *Isolationsniveaus* der verschiedenen Geräte nicht erreicht werden. Soweit dies bei der einzelnen Überspannungsbeanspruchung der Fall ist, bleibt diese ohne jegliche Folgen für die Geräte. So gesehen sind die Anforderungen an den Überspannungsschutz also eindeutig definiert. Aus der Sicht des *Kabels* zeigt sich dagegen ein anderes Bild: Ein auf die Spannungsebene bezogenes Isolationsniveau im Sinne eines Schwellwertes kann hier nicht festgelegt werden. Eine einzelne Überspannungsbeanspruchung wird auch, zumindest bei der anfänglich sehr hohen Festigkeit des Kabels, nur äusserst selten zu einem unmittelbaren Ausfall führen. Vielmehr ist es gewissermassen das Spannungs-Zeit-Integral der Beanspruchungen, welches das Kabel allmählich schwächt. Wegen dieser unvermeidlichen, betriebsbedingten Degradation der Isolierung [3] stellen die Kabel besondere Ansprüche an den Überspannungsschutz. Ein an die Kabel angepasstes Konzept des Überspannungsschutzes muss demnach auf einen haushälterischen Verbrauch ihrer Lebensdauer ausgerichtet sein. Das bedeutet, die Überspannungen sollten *so gut als möglich begrenzt* werden.



Figur 2 Versuchsaufbau, bestehend aus Stossgenerator und Kabelstrecke, mit Ableiter, Stromshunt und Spannungsteiler

Stossgenerator
200 kV, ≤ 8 kA
Kabelstrecke
VPE, U = 20 kV,
Wellenwiderstand:
29 Ω, Länge: 2 km

VPE	Vernetztes Polyäthylen-Kabel
U	Kabelnennspannung
U_A, U_E	Spannungen an den Kabelendverschlüssen
I_A	Strom durch Ableiter am Kabelanfang

Für die Praxis leitet sich daraus ab: Bezüglich Typenwahl, Positionierung und Montage von Ableitern gibt es normalerweise keine absolute Grenze zwischen «Anforderungen erfüllt» und «Anforderungen nicht erfüllt». Die Schutzeinrichtungen sind vielmehr dann als genügend anzusehen, wenn sie eine technisch-wirtschaftlich *optimale* Lösung darstellen.

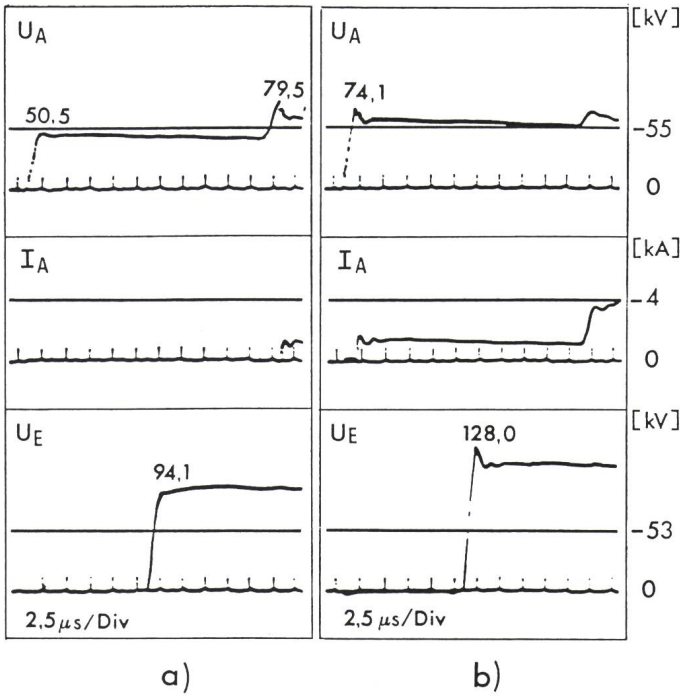
Positionierung und Montage von Ableitern

Wenn sich der Anwender fragt, *wo* in einem Verteilnetz zweckmässigerweise Ableiter eingebaut werden sollen, wird er sich primär an folgenden Regeln orientieren: Kabelstrecken von mehr als etwa 15 m Länge, sowohl im Zuge einer Freileitung wie auch als Stationseinführungen, erfordern stets beidseitig Ableiter. Reine Kabelnetze sollen normalerweise bis zur zweiten Station nach dem Freileitungsübergang auf diese Weise mit Ableitern ausgerüstet werden [6]. Die Elemente der über Kabel angespeisten Stationen befinden sich meist innerhalb der Schutzdistanz [6] und sind deshalb durch die Kabelableiter ebenfalls vollwertig geschützt.

Prinzipiell ist dem Ableiter am freileitungsnahen und demjenigen am freileitungsfernen Ende eines Kabels dieselbe Bedeutung beizumessen. Je nach Wellenwiderstands-Verhältnissen, Überspannungssteilheit und -amplitude sowie Kabellänge kann nämlich entweder der eine oder der andere Ableiter durch früheres Ansprechen wirkungsvoller sein und sind beide absolut unerlässlich. Einige *Versuchsergebnisse* sollen diese Aussage noch verdeutlichen: Zunächst zeigt Figur 2 den verwendeten Versuchsaufbau zur Untersuchung der Schutzwirkung von Ableitern insbesondere an langen Kabelstrecken. Bei Einspeisung eines Stossstromes mit 1,2 µs Stirnzeit und langem Rücken wurden an den Kabelendverschlüssen die Spannungen, sowie die Ströme durch die jeweils angeschlossenen Ableiter gemessen und oszillographiert. Dazu waren abgestimmte gedämpft kapazitive Spannungsteiler und bifilare koaxiale Stromshunts eingesetzt. Der Stossgenerator wurde derart aufgebaut, dass der Seriewiderstand angenähert dem Wellenwiderstand des Kabels entsprach. Die Figur 3 zeigt nun für den Fall des lediglich am *Anfang* mittels *Funkenstrecken-Ableiter* (BHF 7/24, Sprecher Energie) geschützten Kabels die aufgezeichneten Spannungen und Ströme. In den Oszillogrammen sind die Spannungs-Scheitelwerte in Kilovolt eingetragen. Im Teilbild a) wurde die eingespeiste Welle kleiner als die Ansprechspannung des Ableiters gewählt und im Teilbild b) grösser als diese. Die Messungen zeigen erwartungsgemäss, dass in beiden Fällen – sowohl bei Ansprechen wie auch bei Unterlaufen des Ableiters – am offenen Kabelende hohe Spannungen entstehen. Das Ansprechen des Ableiters ist am Einsetzen des Stromflusses festzustellen. Die Situation a) hätte durch Verlegen des Ableiters an das Kabelende entschärft werden können, in der Situation b) wäre dadurch aber das Risiko gestiegen. Für einen hinreichenden Schutz muss das Kabel also beidseitig mit Ableitern bestückt sein.

Teilbild b) der Figur 3 streicht noch eine weitere wesentliche Tatsache hervor: Die für Funkenstrecken-Ableiter charakteristische Ansprech-Spannungsspitze tritt selbst nach einer Wellenausbreitung von 2 km am Kabelende noch ausgeprägt in Erscheinung. Man erkennt daraus die ausserordentlich geringe Dämpfung der Kunststoffkabel; sie leistet also im Zusammenhang mit Überspannungsphänomenen keinen nennenswerten Beitrag. Dies trifft nicht nur auf VPE-, sondern ebenso auf das bei 50 Hz eigentlich stärker verlustbehaftete EPR-Kabel zu, weil nämlich die dielektrischen Verluste bei hohen Frequenzen hauptsächlich von den in beiden Fällen ähnlich gearteten Halbleiterschichten herrühren.

Sind die Einbauorte der Ableiter einmal festgelegt, bleibt noch das *Wie* ihrer Montage zu klären: Massgebend hierfür ist der Grundsatz, dass die Ableiter immer in unmittelbarer Nach-



Figur 3 Spannungsverlauf am Kabelanfang (U_A) und am Kabelende (U_E) sowie Stromverlauf durch den Ableiter am Kabelanfang (I_A)

Einlaufende Welle
a) kleiner,
b) grösser als die Ansprechspannung des Ableiters.

Versuchsaufbau gemäss Figur 2.
Ableiter: BHF 7/24, Sprecher Energie

barschaft der Kabelendverschlüsse einzubauen sind. Es ist dabei sowohl hochspannungs- wie auch erdseitig auf möglichst kurze, direkte Verbindungen zwischen Kabel und Ableiter zu achten. Kurze Verbindungen zwischen Kabelendverschluss und Ableiter sind für einen optimalen Schutz nicht nur des Kabels selbst, sondern gleichermassen auch der nachgeschalteten Betriebsmitel absolute Voraussetzung.

Um diese wichtige Feststellung näher zu erläutern, zeigt Figur 4 eine Untersuchung des Einflusses verschiedener Ableiter-Anschlusslängen. Der Versuchsaufbau entspricht weiterhin der Figur 2; für diese Untersuchung wurde das Kabel allerdings mit einem *Metalloxid-Ableiter* am *Ende* beschaltet. Dabei wurden drei verschiedene Distanzen zwischen Endverschluss und Ableiter gewählt: 0,3 m; 2,3 m; 3,5 m. Die Oszillogramme zeigen, dass sich die Spannung am Endverschluss in Funktion der Distanz des Ableiters wesentlich erhöht; für die gewählten Versuchsparameter beträgt die Erhöhung etwa 25% pro Meter Distanz. Aufgrund des Spannungsverlaufs (Spitze in der Stirne, gleichbleibender Rücken) kann man auf einen rein induktiven Spannungsabfall in den verlängerten Anschlussleitungen schliessen (NB: Der MO-Ableiter zeigt *keine* Ansprechspitzen!). Diese Annahme wurde auch durch die Feststellung bestätigt, dass die Oszillogramme vom Querschnitt der Anschlussleitungen (4-mm²-Draht oder 50-mm²-Seil) nahezu unabhängig sind.

Eine Zusammenstellung der für 0,5 MHz sowie die räumlichen Verhältnisse einer Verteilnetz-Station berechneten Impedanzen verschiedener Leiter in Tabelle II vermag die beschriebenen Messungen leicht zu erklären: Bezüglich der sehr steil ansteigenden Wellen, wie sie durch nahe Blitzeinwirkungen hervorgerufen werden können, ist der Betrag der induktiven Reaktanz der betrachteten Leitungsarten um wenigstens drei Zehnerpotenzen grösser als der ohmsche Widerstand. Dies bedeutet, dass die Impedanz ausschliesslich durch die Geometrie der Leitungen bestimmt wird, wobei gilt: je grösser die Oberfläche der Leiter, desto tiefer die Impedanz. Dies führt in der Praxis zur Wahl von flächenhaften oder, noch besser, von vermaschten Verbindungen.

Dass die Angaben in Tabelle II tatsächlich zu vernünftigen Ergebnissen in bezug auf die Spannungsabfälle ΔU in den Anschlussleitungen eines Ableiters führen, zeigt eine überschlägige Rechnung für die Parameter des in Figur 4 dargestellten Versuchs, im speziellen für die Anschlussverlängerung von Fall 1 zu Fall 3 um 2×3,2 m:

$$\Delta U = L(\Delta I/\Delta t)$$

mit ΔU: Spannungsabfall in den Verbindungen; ΔI: Stromanstieg (ΔI = 3,6 kA); Δt: Zeitdauer des Stromanstiegs (Δt = 1 µs) und L: Induktivität (L = 1,1 µH/m×2×3,2 m). Die Rechnung mit diesen Daten liefert ΔU = 25,3 kV; die Messung für die Erhöhung der Anstiegsspitze ergibt ΔU_M = 74,9 kV − 42,5 kV = 32,4 kV.

Die Parameter der Wanderwelle von Figur 4 entsprechen einer durchaus realitätsgerechten Überspannungssituation an einem Kabelende (z.B. naher Blitzeinschlag [4] mit Ansprechen des freileitungsseitigen Ableiters). Man darf deshalb festhalten, dass der hier gefundene Spannungsabfall von etwa 5 kV/m eine für übliche Anschlussleitungen typische Grössenordnung darstellt. Weil nun die Reduktion dieses Wertes mittels flächenhafter oder vermaschter Verbindungen sowieso nur erdseitig und selbst dort nicht immer möglich ist, verlangen die Ableiter für eine bestimmungsgemässe Wirksamkeit allem voran *kurze* Anschlussleitungen.

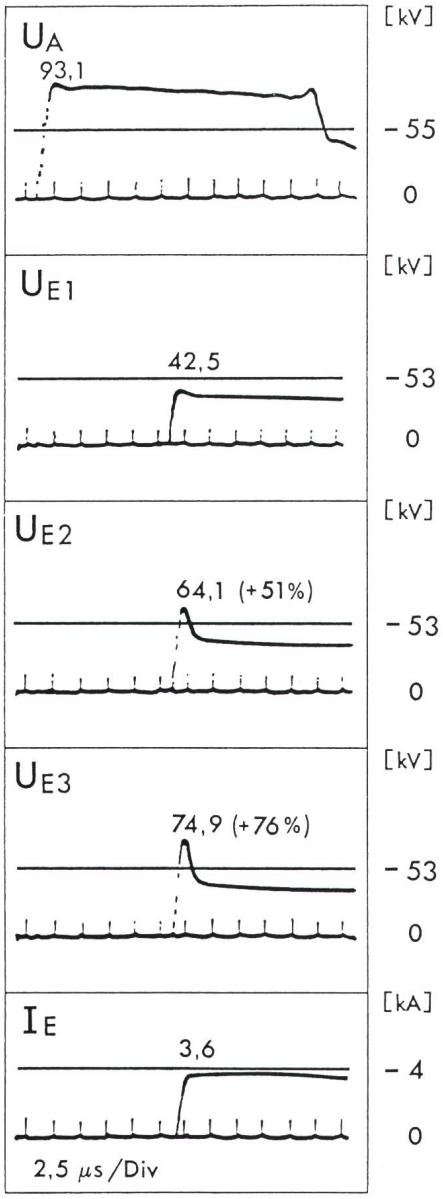
Die *generelle* Beeinträchtigung der Schutzwirkung von Ableitern durch lange Anschlussleitungen soll durch die Figur 5 veranschaulicht werden. Es wird angenommen, es sei eine Freileitung über ein Kabel in eine Schaltstation eingeführt. Bei Blitzschlag in die Freileitung tragen die fett gezeichneten Leitungen den höchsten Strom. Während diese Strompfade auf der Freileitungsseite als selbstverständlich erscheinen, wird stationsseitig oftmals übersehen, dass die gefährlichen hochfrequenten Stromanteile nicht etwa

Art der Leitung	L µH/m	X Ω/m	R Ω/m
4 mm2 Installationsdraht	1,2	3,8	$5 \cdot 10^{-3}$
6 mm ø Draht	1,1	3,5	$7 \cdot 10^{-4}$
95 mm2 Seil	1,0	3,1	$2 \cdot 10^{-4}$
500 mm2 Seil	0,8	2,5	$4 \cdot 10^{-5}$
30 x 3 mm Band	0,8	2,5	$2 \cdot 10^{-4}$
2 x 95 mm2, Abstand 0,4 m	0,4	1,3	$1 \cdot 10^{-4}$
400 x 0,5 mm Flachband	0,3	0,9	$1 \cdot 10^{-4}$

Berechnung für eine Frequenz von 0,5 MHz (ungefähre Ersatzfrequenz für die Stirne einer Norm-Blitzstosswelle). Für freiluftseitige Verbindungen müssen obige Induktivitäten mit etwa einem Faktor 2 multipliziert werden.

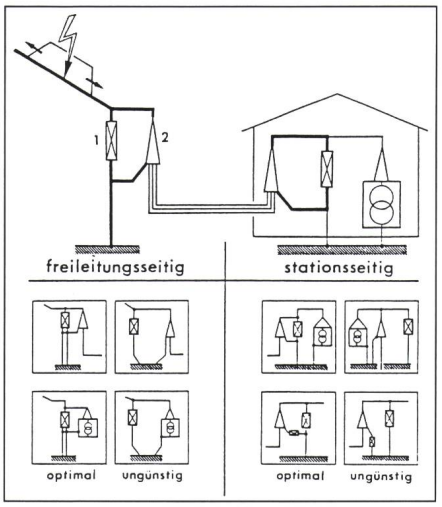
L Induktivitätsbelag
X Reaktanzbelag
R Widerstandsbelag

Tabelle II Impedanzen verschiedener Erdungsleitungen, berechnet für die räumlichen Verhältnisse einer Verteilnetz-Innenraumstation



Figur 4 Spannungsverlauf am Kabelanfang (U_A) und am Kabelende (U_E) sowie Stromverlauf durch den Ableiter am Kabelende (I_E)

Distanz zwischen Endverschluss und Ableiter 0,3 m (U_{E1}); 2,3 m (U_{E2}); 3,5 m (U_{E3}). Versuchsaufbau gemäss Figur 2. Ableiter: MWK 14, 10 kA, ABB.



Figur 5
Anschlusstechnik für Ableiter
Zum oberen Teilbild: die fettgezeichneten Verbindungen tragen hohe Ströme
1 Ableiter
2 Kabelendverschluss

über die Stationserde, sondern zu einem grossen Teil über den Kabelschirm zurückfliessen. Dies ist der Fall, weil sich die hochfrequenten Ströme den Weg geringster Flussverkettung suchen.

Bezüglich der Überspannungsbeanspruchungen stellt man also folgendes fest: Das Kabel greift sich an den Ableiter-Anschlussleitungen eine Spannung ab, welche sich aus der Ansprechspannung des Ableiters und einem Anteil des Spannungsabfalls in dessen Anschlussleitungen zusammensetzt. Je weiter die Abgriffe (Kabelleiter- und Kabelschirmanschluss) auseinander liegen, desto höher ist die Spannungswelle, welche das Kabel beansprucht und in die Station einläuft. Dort wird die Welle infolge Reflexion am Kabelende vergrössert, so dass auch der zweite Ableiter anspricht. Und an seinen Anschlussleitungen greift sich schliesslich die Station ihre Überspannung ab. Je länger diese Anschlüsse vom stationsinternen Ableiter zum dortigen Kabelendverschluss sind, desto höher ist die Überspannung, welche am Kabelende entsteht und die Station beansprucht. Dieser Gedankengang bestätigt also die eingangs aufgestellte Behauptung: Durch eine enge Nachbarschaft von Ableiter und Kabelendverschluss wird nicht nur das Kabel, sondern werden auch die nachgeschalteten Betriebsmittel optimal geschützt. Die wichtigsten Richtlinien bezüglich der Führung der Verbindungen werden durch die Skizzen in der unteren Hälfte von Figur 5 dargestellt. Falls in einer Station mehrere Kabelabgänge vorhanden sind, benötigt jedes Kabel seinen eigenen, im obigen Sinne montierten Ableiter. Der Begriff der «Schutzdistanz» [6] darf im Zusammenhang mit Kabeln nicht angewendet werden!

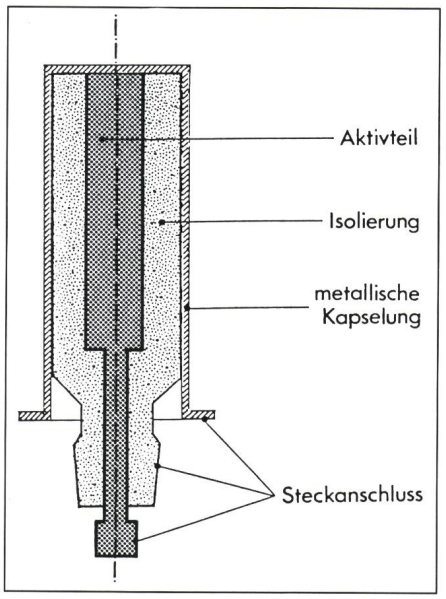
Wenn man nun die neuen Metalloxid-Ableiter mit berührungssicherem, steckbarem Gehäuse (Figur 6) im Lichte der vorangegangenen Ausführungen betrachtet, so fällt sofort auf, dass diese hinsichtlich ihrer Gestaltung ein nicht mehr zu überbietendes Optimum darstellen: Sowohl der Leiteranschluss als auch der Schirmanschluss beschreiben den kürzesten Weg und bilden darüber hinaus mit dem Ableiterelement zusammen eine koaxiale Anordnung, in welcher die Induktivität ohnehin besonders niedrig ist. Unabhängig vom Fabrikat kann man deshalb festhalten, dass ein bestimmtes Ableiterelement im steckbaren Gehäuse die beste Schutzwirkung aufweist.

Die verbesserte Schutzwirkung des gekapselten Ableiters kommt allerdings nur dann zum Tragen, wenn auch der Schirm des entsprechenden Kabels sehr kurz mit seinem Steckergehäuse verbunden ist. Für den Fall zwischengeschalteter Schirm-Überspannungsableiter, d.h. bei einseitig isoliertem Schirm, müssen diese zusätzlichen Ableiter selbstverständlich direkt neben dem Kabelstecker montiert werden.

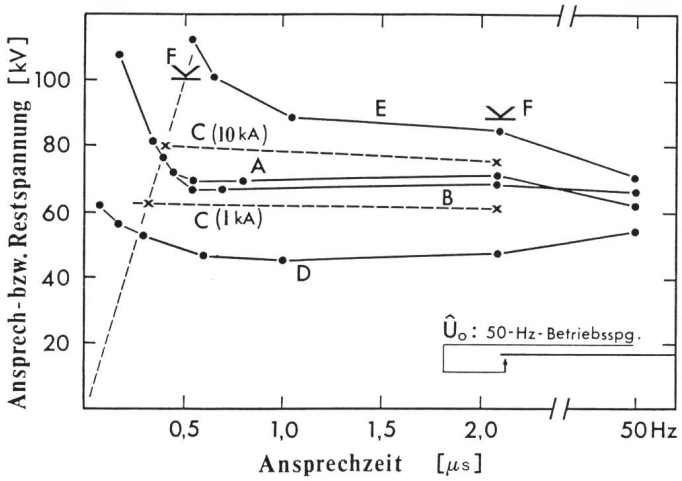
Funkenstrecken- und Metalloxid-Ableiter im Vergleich

Als Überspannungsableiter im Verteilnetz diente bisher fast ausschliesslich der Plattenfunkenstrecken(PF)-Ableiter mit Siliziumkarbid-Strombegrenzungswiderständen. Nun steht mit dem Metalloxid(MO)-Ableiter [1; 7] ein gänzlich neuer Typ zur Verfügung, der in verschiedener Hinsicht Vorteile bietet: Mit blossem, elektrisch extrem nicht-linearem Widerstandsblock als Aktivteil ohne jegliche Zusatzelemente ist er robust und elektrisch hoch belastbar. Bei entsprechender Dimensionierung und nötigenfalls unter Parallelschaltung kann man dem Ableiter ohne Zerstörungsgefahr höchste Ströme zumuten. Dieser Robustheit verdankt er auch seine Eignung zum Einbau in berührungssichere Kapselungen. Obwohl für die Bemessung der Nennspannung des MO-Ableiters im nicht-wirksam geerdeten Verteilnetz dieselben Richtlinien [8] gelten wie für PF-Ableiter, ist durch exakte Abstimmung auf die höchsten Betriebsspannungen und Verzicht auf einen Sicherheitszuschlag dennoch häufig die Wahl einer etwas tieferen Nennspannung möglich.

Die gelegentlich geäusserte Meinung (z.B. in [1]), der MO-Ableiter biete sozusagen von Natur aus ein tieferes Schutzniveau als der PF-Ableiter, trifft im Verteilnetz, d.h. bei ähnlicher Nennspannung (höchstzulässige Betriebsspannung) beider Ableiter, hingegen nicht zu. Dies erkennt man aus vergleichenden Messungen der Ansprech- bzw. Restspannungen verschiedener Ableitertypen, welche in Figur 7 zusammengestellt sind. Die verwendeten Prüfmittel entsprechen im wesentlichen jenen des Aufbaus von Figur 2. Die in Figur 7 eingetragenen Messpunkte bedeuten jeweils den Mittelwert aus 5 Stössen gleicher Steilheit; die Differenz zwischen dem höchsten und dem tiefsten Einzelwert war stets kleiner als 6%. Die Messergebnisse zeigen zunächst, dass die Ansprechkennlinien moderner PF-Ableiter (Kurven *A* und *B* in Figur 7; vergl. auch [9]) wesentlich unter den nach IEC [10] geforderten, ebenfalls in der Figur eingetragenen Grenzwerten liegen. Dabei sind diesbezüglich beide untersuchten Fabrikate praktisch gleichwertig. Es wurde im weiteren festgestellt, dass sich verschiedene Einheiten des gleichen Typs, selbst nach längerem Feldeinsatz nur unwesentlich voneinander unterscheiden



Figur 6 Prinzipdarstellung eines gekapselten, steckbaren Ableiters



A BHF 7/24, 10 kA; Plattenfunkenstrecken-Ableiter, Sprecher Energie
B WG 24, 10 kA; Plattenfunkenstrekken-Ableiter, ABB
C MWK 24, 10 kA; mit I = 1 kA und I = 10 kA; MO-Ableiter, ABB
D HML 24, 10 kA; magnetisch beblasener Ableiter, ABB
E VH 24, 5 kA; älterer Plattenfunkenstrekken-Ableiter, BBC
F Grenzwerte nach IEC [9]

Figur 7 Gemessene Ansprechspannungen von 24-kV-Funkenstrekken-Ableitern und Restspannungen von 24-kV-Metalloxid-Ableitern
Messungen in Funktion der Ansprechzeit (variable Spannungsanstiegs-Steilheit) unter 1,2/50-µs-Blitzstoss sowie bei 50 Hz

(Grössenordnung 10%). Ältere Ableiter-Konstruktionen mit einer wenig optimierten Potentialsteuerung der Funkenstrecken (Kurve *E* in Figur 7) weisen dagegen ein bedeutend ungünstigeres Ansprechverhalten auf. Über die besten Eigenschaften im Blitzstoss-Bereich verfügen die kostspieligen magnetisch beblasenen Ableitertypen (Kurve *D*). Schliesslich sind in Figur 7 noch die Restspannungen entsprechender MO-Ableiter für 1 kA und 10 kA Ableitstrom der Wellenformen 1/3 µs und 8/20 µs eingetragen (Kurven *C*); sie sind mit den Ansprechspannungen hochwertiger PF-Ableiter vergleichbar.

Gemäss den vorliegenden Ergebnissen beschränken sich also die eindeutigen Vorteile des MO-Ableiters hinsichtlich seines Schutzniveaus auf den hier nicht untersuchten Schaltstoss- sowie auf den extremen Steilstoss-Bereich. Wie in [11] nachgewiesen wurde, verläuft das Schutzniveau der MO-Ableiter tatsächlich bis hinab zu Ansprechzeiten von einigen Nanosekunden praktisch flach. Gegenüber den primär relevanten Blitzüberspannungen mit Stirnzeiten grösser als 1 µs besitzt der PF-Ableiter hingegen ein ebenso tiefes Schutzniveau wie der MO-Ableiter. Vorteile können in dieser Hinsicht mit dem MO-Ableiter höchstens über den kleinen Spielraum der Nennspannung erreicht werden. Dabei muss man sich aber vor Augen halten, das die erreichbare Verbesserung des Schutzniveaus von vielleicht einigen Kilovolt in einer etwas überlangen Anschlussleitung bereits wieder verloren ist.

Schlussbemerkung

Ohne die Vorteile der MO-Ableiter und besonders jener in der gekapselten Ausführung abzuwerten, muss doch festgehalten werden, dass die Qualität des Überspannungsschutzes im Verteilnetz weniger von der Wahl des Ableiter-Typs als vielmehr von der Standortwahl und der Montage abhängt. Wenn sich der Anwender für den Einsatz von MO- anstelle von PF-Ableitern entscheidet, dann wird er dies vor allem wegen ihrer geringeren Zerstörungsanfälligkeit tun und in einzelnen Fällen auch zur Erzielung eines gewissen Schutzes vor hohen Schaltüberspannungen.

Für Netzbereiche, die Leitungen enthalten, welche mit solchen höherer Spannungsebene auf gleichem Gestänge parallel laufen, ist der MO-Ableiter allerdings noch in anderer Hinsicht vorteilhaft: Falls die beiden fremden Systeme in Berührung geraten, entsteht durch den Akt der Berührung eine transiente Welle und nach dem Abklingen der Ausgleichsschwingungen eine netzfrequente Spannungserhöhung. Beim Einsatz von PF-Ableitern können die transienten Wellen irgend einen Ableiter zur Zündung führen und ihn dadurch der anschliessenden Zerstörung durch die erhöhte Wechselspannung preisgeben. Das Unangenehme für den Netzbetreiber ist dabei die Tatsache, dass er einerseits mangels Voraussehbarkeit der Wanderwellen-Ausbreitungsvorgänge die gefährdeten Ableiter nicht kennt und anderseits auch keine wirklich greifenden Massnahmen zur Verfügung hat, um einzelne PF-Ableiter (z.B. stationsinterne) vor der Zerstörung zu schützen. Bei Verwendung von MO-Ableitern hingegen bietet sich die Möglichkeit der Staffelung der Nennspannungen [1]: Durch eine um 10...15% höhere Bemessung der Nennspannung der stationsinternen Ableiter wird erreicht, dass die freileitungsseitigen Ableiter einen grösseren Anteil des gefährlichen 50-Hz-Stromes führen und damit letztere schützen. Eine gewisse Erhöhung des Schutzniveaus bezüglich Blitzüberspannungen muss dabei allerdings in Kauf genommen werden. Man wird deshalb eine solche Staffelung der Ableiter-Nennspannungen nur bei effektiver Gefahr einer Systemberührung anwenden, da sich die Stromaufteilung bei Blitzeinwirkungen durch diese Massnahme ohnehin nicht merklich beeinflussen lässt.

Literatur

[1] *H.R. Bracher* und *A. Mayer:* Metalloxid-Überspannungsableiter im Mittelspannungsnetz. Bull. SEV/VSE 80(1989)9, S. 521...526.
[2] *R. Rudolph* und *A. Mayer:* Überspannungsschutz von Mittelspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985)4, S. 204...208.
[3] *G. Biasiutti:* Lebensdauer von Kunststoffenergiekabeln. Teil 1: Einflussfaktoren. Bull. SEV/VSE 79(1988)23, S. 1448...1455.
[4] *R.B. Anderson* et *A.J. Eriksson:* Récapitulation des paramètres de la foudre. Applications techniques. Rapport CIGRE 33-06, 1980.
[5] *M. Christoffel:* Der Einfluss von Kabelstrekken auf die Überspannungsvorgänge in Übertragungssystemen mittlerer und hoher Spannung. Brown Boveri Mitt. 51(1964)6, S. 369...376.
[6] *H. Stephanides* und *W. Lacher:* Wo baut man Ableiter ein? Eine Wegleitung. Oberentfelden, Sprecher Energie AG, 1985.
[7] *A. Mayer* und *R. Rudolph:* Funkenstreckenlose Überspannungsableiter ermöglichen optimalen Überspannungsschutz. Brown Boveri Technik 72(1985)12, S. 576...585.
[8] *G. Biasiutti:* Einsatz von Überspannungsableitern im Verteilnetz. Altdorf, Kabelwerke Dätwyler AG, 1988.
[9] *W. Lacher:* Prüfungen mit dem neuen Überspannungsableiter BHF 9CC, 9 kV bis 36 kV. Neues von Sprecher -(1979)3, S. 14...16.
[10] Parafoudres. Première partie: Parafoudres à résistance variable pour réseaux à courant alternatif. Publication de la CEI 99-1, deuxième édition, 1970.
[11] *W. Schmidt* a.o.: Behaviour of MO-surge-arrester blocks to fast transients. IEEE Trans. PD 4(1989)1, p. 292...300.