

Überspannungsableiter- und Betriebsmittelzuverlässigkeit

K.-H. Weck, Mannheim

1. Einleitung

Überspannungsableiter werden seit mehreren Jahrzehnten zur Begrenzung von Überspannungen an Betriebsmitteln eingesetzt. Die Begrenzung der Überspannungen auf Werte deutlich unterhalb der Bemessungs-Isolationspegel vermeidet weitgehend die Überbeanspruchung der Isolation, selbst wenn diese durch Alterungs- oder andere Vorgänge nicht mehr der ursprünglichen Bemessung entspricht. Die dadurch erzielte Verbesserung der Betriebsmittelzuverlässigkeit ist umso größer, je tiefer die Überspannungsbegrenzung einsetzt, d. h. je tiefer der Schutzpegel der Ableiter liegt.

Für einen bestimmten Ableitertyp, z. B. dem hier betrachteten Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken, besteht ein nahezu fest vorgegebener, vom Hersteller der Ableiter unabhängiger Zusammenhang zwischen Schutzpegel, Dauerspannung und Bemessungsspannung. Niedrige Werte für diese drei Kenngrößen eines Ableiters bedingen höhere Beanspruchungen des Überspannungsableiters im Betrieb durch die Betriebsspannung oder durch Überspannungen. Wenn diese Beanspruchungen über das Vermögen der ausgewählten Ableiter hinausgehen, steigt das Risiko eines Ableiterausfalls während des Betriebs, d. h. die Zuverlässigkeit der Ableiter sinkt.

Dies bedeutet, daß niedrige Kennwerte des Überspannungsableiters auf der einen Seite die Zuverlässigkeit der Betriebsmittel erhöhen, auf der anderen Seite jedoch die Zuverlässigkeit der Ableiter selbst erniedrigen. Bei vorgegebenem Isolationspegel der Betriebsmittel sind die Kennwerte des Überspannungsableiters also so auszuwählen, daß sich ein Optimum aus Betriebsmittel- und Überspannungsableiterzuverlässigkeit ergibt. Dieser Optimierungsprozess ist ganz besonders für die Verwendung von Metalloxidableitern im gelöschten Netz schwierig, da die Marge zwischen den in solchen Netzen auftretenden Spannungsbeanspruchungen und den üblicherweise angewendeten Isolationspegeln im Vergleich zu den Netzen mit geerdetem Sternpunkt klein ist, und für die Auswahl der Ableiter nur ein kleiner Spielraum verbleibt. Die für die Beanspruchung der Ableiter und für den Schutz der Betriebsmittel maßgebenden Vorgänge bedürfen hier einer eingehenden Betrachtung, damit sowohl Ableiter- als auch Betriebsmittelzuverlässigkeit den betrieblichen Anforderungen entsprechen. Dabei sind die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- Auswahl von Konstruktion und Kenndaten der Überspan-

nungsableiter so, daß die Fehlerrate im Betrieb klein ist, z. B. kleiner 0,5 % pro Jahr.

- Trennung der möglichen Fehlerursachen von Überspannungsableitern in konstruktions-, kennwert- und ereignisbedingte, unvermeidbare Fehlerursachen.
- Auswahl der Ableiterschutzpegel oder der Betriebsmittelisolation so, daß die Fehlerrate klein ist, z. B. kleiner 0,5 % pro Jahr.
- Trennung der möglichen Fehlerursachen der Betriebsmittel in überspannungsbedingte und andere Ursachen.
- Optimierung der kenndatenbedingten Ableiter-Fehlerrate und der überspannungsbedingten Betriebsmittel-Fehlerrate.

2. Ableiter-Zuverlässigkeit

2.1 Fehlerursachen von Metalloxidableitern

Die im Betrieb beobachteten Fehlerursachen an Überspannungsableitern lassen sich in drei Kategorien aufteilen:

- Konstruktionsbedingte Fehlerursachen.
Zu ihnen zählen die mechanische Beschädigung des Gehäuses, z. B. während der Montage, Undichtigkeiten, Temperaturerhöhungen durch Fremdschichtentladungen an der Gehäuseoberfläche oder die Alterung der Varistoren und der Aufbauelemente durch innere Teilentladungen. Sie können nur durch die Auswahl der Ableiterkonstruktion beeinflusst werden, und unterliegen somit nicht der in der Einleitung geforderten Optimierung der Zuverlässigkeiten von Betriebsmitteln und Ableitern, wohl aber einem technisch-wirtschaftlichen Optimierungsprozeß.
- Kennwertbedingte Fehlerursachen
Fehler, die durch die unzureichende Auswahl der Ableiterkennwerte auftreten können, sind die Temperaturerhöhungen der Varistoren bei den im Betrieb auftretenden Spannungen.
- Ereignisbedingte Fehlerursachen
Hierunter sollen Fehlerursachen verstanden werden, die durch die Auswahl der Ableiter nur wenig oder gar nicht beeinflusst werden können. Hierzu zählt insbesondere die in Mittelspannungs-Holzmastleitungen häufige Beanspruchung durch direkte Blitzeinschläge, deren Beherrschung zu unwirtschaftlichen Ableiterauslegungen führen würde. In der Regel müssen diese Fehler akzeptiert werden. Andere ereignisbedingte Fehlerursachen, wie Überbeanspruchungen durch Kippschwingungen oder durch Spannungsübertritt müssen durch Maßnahmen begrenzt werden, die außerhalb der Zielsetzung dieses Aufsatzes liegen.

2.2 Konstruktionsbedingte Fehlerursachen

Das Schadensgeschehen im Netz der vergangenen Jahre zeigt deutlich, daß konstruktionsbedingte Fehler einen beträchtlichen

Anteil an der Gesamtfehlerrate ausmachen. Bei den auch heute noch in der Mehrzahl eingesetzten Ableiterkonstruktionen sind dies im wesentlichen die mechanische Beschädigung des Gehäuses bei Montagearbeiten oder Undichtigkeit der Gehäuse. Die aus diesen Gründen rührende Fehlerrate muß durch geeignete Konstruktionsmaßnahmen klein gehalten werden. Eine Optimierung von Ableiter- und Betriebsmittelzuverlässigkeit macht nur dann einen Sinn, wenn eine Abhängigkeit zwischen den beiden besteht, und die Ableiterzuverlässigkeit nicht durch andere Fehlerereignisse bestimmt ist.

Die Temperaturerhöhung der Metalloxidvaristoren durch Fremdschicht-Entladungen auf dem Ableitergehäuse ist international sehr in Diskussion [1]. Obwohl die zu diesen Temperaturerhöhungen führenden Vorgänge und Einflußfaktoren bei weitem nicht vollständig geklärt sind, gibt es zwei übereinstimmend akzeptierte Ergebnisse, die in dem in Tafel 1 wiedergegebenen Beispiel verdeutlicht sind [2].

- Bei einteiligen Metalloxidableitern ist die Temperaturerhöhung durch Fremdschicht-Entladungen selbst bei den höchstmöglichen Spannungsbeanspruchungen (Zeile 3 in Tafel 1) vernachlässigbar klein.
- Bei zweiteiligen Metalloxidableitern ist die Temperaturerhöhung nur dann hoch, wenn die Spannung über einem gewissen Wert (etwa 60 % der Bemessungsspannung) liegt.

Diese Ergebnisse zeigen, daß für die Temperaturerhöhung der Varistoren die Kommutierung des Oberflächenstroms in den Aktivteil des Ableiters am Flansch von mehrteiligen Ableitern maßgebend ist, und nicht die Spannungsfehlersteuerung durch die kapazitive Versteuerung des Varistorstapels innerhalb einer Einheit. Im gelöschten 20-kV- oder 110-kV-Netz kommen in der Regel nur einteilige Ableiter zum Einsatz. Die Temperaturerhöhungen durch Fremdschicht-Entladungen haben dann keine Bedeutung. Auch für zweiteilige Ableiter ist in der Regel die zweite Bedingung, daß die im Normalbetrieb anliegende Spannung unterhalb 60 % der Bemessungsspannung liegt, erfüllt. Diese Schlußfolgerungen dürfen jedoch nicht ohne weiteres auf die Netze mit höheren Betriebsspannungen und geerdetem Sternpunkt übertragen werden.

Die durch Oberflächenströme an der äußeren Oberfläche des Porzellangehäuses verursachte Potentialversteuerung führt zu Querbeanspruchungen, die Teilentladungen im Gehäuse hervorrufen können. Solche Versteuerungen bilden sich schon bei sehr kleinen Fremdschicht-Beanspruchungen aus. Sie sind daher nicht Fremdschicht-Beanspruchungen im ursprünglichen Sinn, da sie bereits unter Regen in den saubersten Gebieten

aufreten können und auch hier bereits zu Fehlern geführt haben [3]. Teilentladungen innerhalb des Gehäuses haben zwei Auswirkungen:

- Sie verursachen durch chemische Reaktion eine Reduzierung des im Gehäuse vorhandenen Sauerstoffs, der zur Stabilisierung der Metalloxide bewußt eingebracht ist. Wenn die Sauerstoffkonzentration einen gewissen Wert unterschreitet, kann bei unzureichend gefertigten Varistoren (Passivierung) Sauerstoff aus den Metalloxiden austreten und sich die Kennlinie der Varistoren verändern. Bild 1 zeigt als Beispiel eine solche Veränderung der Strom-Spannungs-Kennlinie eines Mittelspannungsableiters im Fremdschicht-Laborversuch.
- Sie verursachen eine chemische Zersetzung der Kunststoff-Aufbauteile im Ableiter. Dabei unterscheiden sich die Vorgänge im Metalloxidableiter nicht von denen im Funkenstreckenableiter, da sie lediglich die Aufbauelemente, nicht aber den Aktivteil betreffen.

Beide Vorgänge sind in einem Überspannungsableiter äußerst unerwünscht, insbesondere, da Kunststoffzersetzung durch Teilentladungen stets mit Wasserbildung verbunden ist. Da durchaus Möglichkeiten bestehen, beide Vorgänge zu vermeiden oder zumindest zu begrenzen, haben die deutschen EVU einen Langzeitversuch entwickelt [3], der auch als Konstruktionsprüfung in die IEC eingebracht ist. Er besteht im wesentlichen aus einem 2000 Stunden Salznebel-Versuch bei dem sehr geringen Salzgehalt von 1 kg pro m³, der Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinie vor und nach dem Versuch und der Überprüfung der Spannungsfestigkeit nach dem Versuch, wobei eventuell vorhandenes Wasser durch Abkühlung des Ableiters zur Kondensation führen soll. Bei erfolgreichem Bestehen des Versuchs sollte ein ausreichendes Ableiterverhalten im Betrieb gewährleistet sein.

2.3 Kennwertbedingte Fehlerursachen

Die Kennwerte eines Metalloxidableiters sind in Tafel 2 zusammengestellt, wobei entsprechend den Normen IEC 99-4 oder der zukünftigen Norm DIN VDE 0675, Teil 4, unterschieden wird in auswählbare Kennwerte und Kennwerte, die durch die einmal getroffene Auswahl festgelegt sind. Die durch unzureichende Kennwerte der Ableiter möglichen Fehler können auf drei Vorgängen beruhen:

- Temperaturerhöhung der Varistoren durch Überspannungsvorgänge mit nachfolgender thermischer Instabilität bei Betriebsspannung.

Tafel 1. Höchste, nach einstündigen Salznebel-Laborversuchen festgestellte Temperatur in Metalloxidableitern [2]

Prüfspannung kV	Bemessungsspannung kV	Anzahl der Bauglieder	Salzgehalt kg/m ³	Höchste Temperatur °C
71	132	1	40	< 37
110	132	1	56	< 37
123	132	1	28	< 37
142	264	2	40	< 37
220	264	2	14	99
220	264	2	28	149

Tafel 2. Kennwerte von Metalloxidableitern

Auswählbare Kennwerte	Durch Auswahl festgelegte Kennwerte
Dauerspannung Bemessungsspannung Nennableitstoßstrom	Hochstoßstrom (4/10) Schaltstoßstrom (30/100) für 10-kA- und 20-kA-Ableiter Rechteckstrom für 5-kA-Ableiter
Leitungsentladungsklasse für 10-kA-Ableiter	

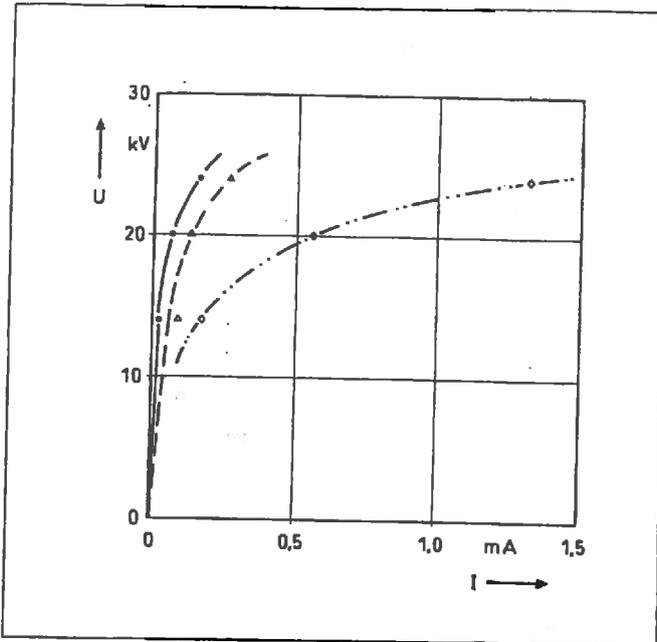


Bild 1. Änderung der Spannungs-Strom-Kennlinie eines Metalloxydableiters, Dauerspannung 22 kV, während eines Salznebel-Laborversuchs mit $2,5 \text{ kg/m}^3$
 • - Neuzustand, Δ - nach 597 Stunden, \diamond - nach 4365 Stunden

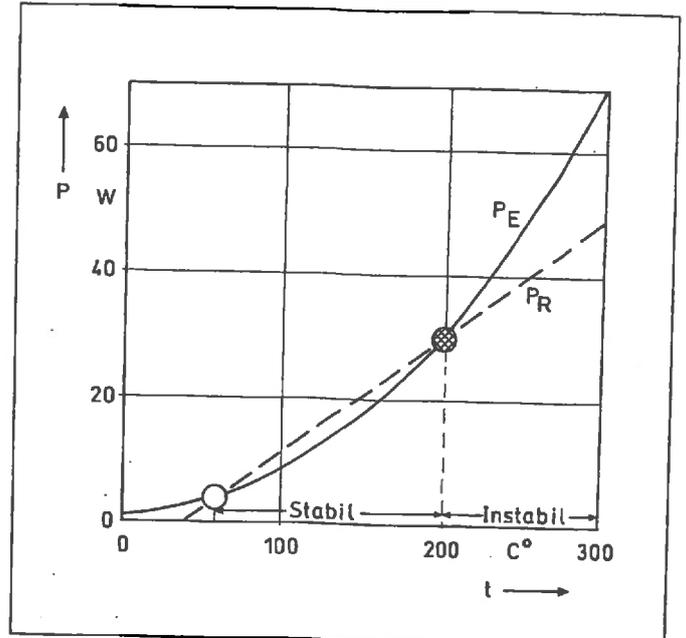
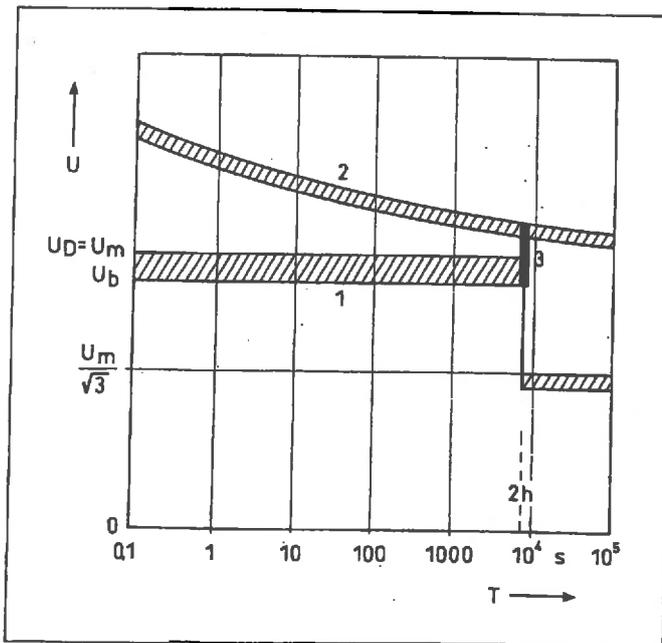


Bild 2. Abschätzter Wärmeausgleich in einem Mittelspannungsableiter, 24 kV
 P_E - In den Metalloxydvaristoren erzeugte Leistung
 P_R - An die Umgebung abgegebene Wärmeleistung

- Temperaturerhöhung der Varistoren durch hohe, lang andauernde Überspannungen mit Durchschlag der Varistoren.

Bild 3. Prinzip der Auswahl von Dauer- und Bemessungsspannung von Metalloxydableitern in Netzen mit Erdschlußlöschung

- 1 - Bereich der Erdschluß-Spannungserhöhungen
- 2 - Wechselspannungszeitkennlinie des Metalloxydableiters
 obere Grenze: ohne vorherige Energiebeanspruchung
 untere Grenze: mit Nennenergie-Vorbeanspruchung
- 3 - Anpassungsbereich der Wechselspannungszeitkennlinie an die Spannungserhöhung



- Auftreten sehr hoher Spannungen durch Ströme sehr hoher Amplitude mit der Folge eines Durchschlags oder Überschlages der Varistoren.

Der Effekt der thermischen Instabilität eines Metalloxydableiters beruht auf der Tatsache, daß der ohm'sche Strom durch den Ableiter wie bei allen Halbleitern überproportional mit der Temperatur ansteigt [4]. Damit steigt auch die im Ableiter erzeugte Wärmeleistung überproportional mit der Temperatur, während sich die abgegebene Leistung durch Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung in diesem Bereich etwa linear mit der Temperatur ändert. Man erhält somit eine Leistungsbilanz, wie sie in Bild 2 für einen Überspannungsableiter im 20-kV-Netz näherungsweise dargestellt ist. Es ergibt sich ein stabiler Bereich, im Beispiel zwischen etwa 60°C und 200°C , in dem die Temperatur des Ableiters nach Erhöhung der Temperatur wieder auf den Anfangswert von etwa 60°C zurückgeht, und ein instabiler Bereich, im Beispiel über 200°C , in dem die Temperatur bis zur Zerstörung des Ableiters ansteigt.

Verantwortlich für die sich im Metalloxydableiter im Betrieb einstellende Temperaturerhöhung sind die Überspannungen im wesentlichen durch Erdschlüsse, Schaltheandlungen oder durch Blitzeinschläge in die Freileitungen. Zur Auswahl der geeigneten Kennwerte eines Metalloxydableiters dient die Wechselspannungszeitkennlinie. Sie bedeutet die zulässige Höhe einer am Ableiter liegenden Wechselspannung in Abhängigkeit ihrer Dauer, wenn anschließend die Spannung auf die Dauerspannung des Ableiters gesenkt wird. Sie ist abhängig von der zu Beginn der Prüfung aufgetragenen Energie und sollte vom Hersteller erfragt werden. In Bild 3 ist eine solche Wechselspannungszeitkennlinie als Beispiel wiedergegeben. Die Wechselspannungs-Zeitkennlinie ist zu vergleichen mit den im Netz auftretenden Spannungserhöhungen beim Erdschluß.

Im gelöschten Netz ist die Höhe der Erdschluß-Spannungserhöhung etwa gleich der verketteten Betriebsspannung, ihre Dauer gleich der Erdschlußdauer, die in Bild 3 mit zwei Stunden als ihrem typischen Höchstwert angenommen ist.

Im Grundsatz gilt die Forderung, daß die Wechselspannungs-Zeitkennlinie oberhalb der Netzbeanspruchungs-Kennlinie liegen muß. Es ergeben sich dann aber drei Unsicherheiten, die eine statistische Betrachtungsweise, d. h. ein Umsetzen der Anforderung in eine zu erwartende Fehlerrate, unmöglich oder zumindest für die Anwender gelöschter Netze zu schwierig macht:

- Die im Fehlerfall auf den beiden nicht fehlerhaften Leitern herrschende Spannung gegen Erde variiert mit der tatsächlich vorhandenen Betriebsspannung und dem Fehlerort. Eine statistische Betrachtungsweise der Spannungserhöhung ist unüblich, und es wird in der Regel die höchste Betriebsspannung oder gar die höchste Spannung für Betriebsmittel eingesetzt, also $U_m = 24 \text{ kV}$ im 20-kV-Netz oder $U_m = 123 \text{ kV}$ im 110-kV-Netz.
- Die Erdschlußdauer kann sehr unterschiedlich sein, aber auch hier wird in der Regel der auf der Erfahrung beruhende Maximalwert eingesetzt oder gar angenommen, daß der Erdschluß als Dauerbeanspruchung anzusehen ist.
- Die zu Beginn des Fehlers mögliche Energieaufnahme des Metalloxidableiters ist nur sehr ungenau bekannt und es wird angenommen, daß sie der Bemessungsenergieaufnahme, also der in der Typenprüfung abgeprüften Energieaufnahme entspricht.

Alle Annahmen liegen naturgemäß auf der sicheren Seite und eine mögliche Erniedrigung der Dauer- und Bemessungsspannung von etwa 10 %, wie sie bei einer eingehenderen Betrachtungsweise durchaus möglich wäre und in Bild 3 als Bereich (3) angedeutet ist, kommt in der praktischen Anwendung wegen der schwierigen Bestimmung der tatsächlich herrschenden Bedingungen nicht zur Anwendung. Diese Vorgehensweise war schon bei den Funkenstreckenableitern üblich und dementsprechend ist die Fehlerrate der Ableiter, die auf die Auswahl der Kennwerte zurückzuführen ist, praktisch gleich Null.

Bei der so vorgenommenen Auswahl der Ableiterkennwerte Dauerspannung und Bemessungsspannung treten hohe, lang andauernde Beanspruchungen der Ableiter durch Überspannungen bei normalen Schalthandlungen im Netz nicht auf. Hohe Beanspruchungen können allerdings entstehen, wenn gesunde Leitungsabschnitte bei der Fehlersuche aus einem erdschlußbehafteten Netz geschaltet werden. Die hierbei beobachteten Ableiterfehler können durchaus auf diese Beanspruchungen zurückzuführen sein, da sie bei der Auswahl der Kennwerte nicht berücksichtigt sind.

3. Betriebsmittel-Zuverlässigkeit

3.1 Schutzverhalten der Metalloxidableiter

Mit der Festlegung der Dauerspannung ist das Schutzverhalten eines Metalloxidableiter nur noch von zwei Faktoren abhängig:

- Lage der Dauerspannung auf der Spannungs-Strom-Kennlinie der Metalloxidvaristoren. Der höchste erreichbare Wert liegt bei etwa 80 % der Bemessungsspannung, wenn vom Hersteller die Bemessungsspannung gleich der Referenzspannung gewählt wird.
- Durchmesser der Metalloxidvaristoren. Im Bereich der für

Schaltüberspannungen maßgebenden Schaltstoßströme ist die Spannungs-Strom-Kennlinie der Metalloxidableiter so flach, daß der Durchmesser einfluß vernachlässigbar ist. Im für die Blitzüberspannungen zutreffenden Bereich der Blitzstoßströme (5 kA bis 20 kA) bewirkt eine Verdopplung der Varistorfläche eine Erniedrigung der Restspannung um etwa 6 %.

Der Schaltstoßstrom-Schutzpegel des Metalloxidableiters ist seine Restspannung bei den genormten Stromamplituden. Er liegt etwa bei dem 2,5fachen des Effektivwerts der Dauerspannung, d. h. dem 1,8fachen seines Scheitelwertes. Bei der Wahl der Dauerspannung gleich der höchsten Spannung für Betriebsmittel wäre der Schaltstoßstrom-Schutzpegel, also etwa 60 kV für das 20-kV-Netz, und etwa 310 kV für das 110-kV-Netz. Die Werte liegen deutlich unterhalb derer vom Funkenstreckenableiter, so daß im Bereich der Schaltüberspannungen ein besserer Schutz vorliegt.

Der Blitzstoßstrom-Schutzpegel des Metalloxidableiters ist seine Restspannung bei Nennableitstoßstrom. In Deutschland sind Nennableitstoßströme von 5 kA oder 10 kA üblich, wobei im 110-kV-Netz ausschließlich 10-kA-Ableiter eingesetzt werden. In den Mittelspannungsnetzen haben sich 5-kA-Ableiter als ausreichend erwiesen [5]. Es muß beachtet werden, daß es in dieser Spannungsebene durchaus sinnvoll sein kann, einen Ableiter mit 5 kA zu benennen, um einen geforderten Schutzpegel einzuhalten, obwohl der Ableiter in seinem Energieaufnahmevermögen einem 10-kA-Ableiter entspricht. Als Richtwert kann man für den Schutzpegel das 3fache bis 3,3fache des Effektivwertes der Dauerspannung annehmen. Im Bereich der durch Blitzeinschläge verursachten Stromsteilheiten haben Metalloxidableiter eine merkliche Reaktionszeit. Bild 4 zeigt eine aus [6] entnommene Zusammenstellung der bei verschiedenen Stoßströmen gemessenen Restspannung. Bei Frontzeiten von 1 μs liegt die Restspannung zwischen 3 % und 8 % höher als bei der für den Nennableitstoßstrom geltenden Frontzeit 8 μs . Dieser Anstieg der Restspannung ist zu vergleichen mit der Durchzündverzögerung von Funkenstreckenableitern, so daß das Schutzverhalten der Metalloxidableiter und der Funkenstreckenableiter in diesem Bereich gleichgesetzt werden kann, wenn gleiche Schutzpegel vorliegen.

3.2 Stehspannung der Isolation

In der Spannungsebene der Netze mit Erdschlußlöschung wird die Isolation nach der Bemessungs-Wechselspannung und der Bemessungs-Blitzstoßspannung ausgelegt und in einer Typprüfung nachgewiesen. Es kann jedoch nicht vorausgesetzt werden, daß diese Werte auch bei den im Betrieb befindlichen Geräten vorliegen. Eine Reihe von Einflußfaktoren wie Alterung, Fertigungsstreuung oder Veränderungen bei einem Zusammenbau vor Ort bewirkt, daß die Stehspannungen der Betriebsmittel im Betrieb deutlich niedriger sind als die Bemessungswerte. Diese Tatsache wurde durch Vor-Ort-Spannungsprüfungen für Mittelspannungsanlagen [7] und gasisolierte Schaltanlagen nachgewiesen [8].

Die kommenden Vorschriften DIN VDE 0111 [9] berücksichtigen dies durch die Einführung der Koordinations-Stehspannung und empfehlen die Anwendung eines Sicherheitsfaktors zwischen dieser und der Bemessungsspannung. Es hat sich gezeigt,

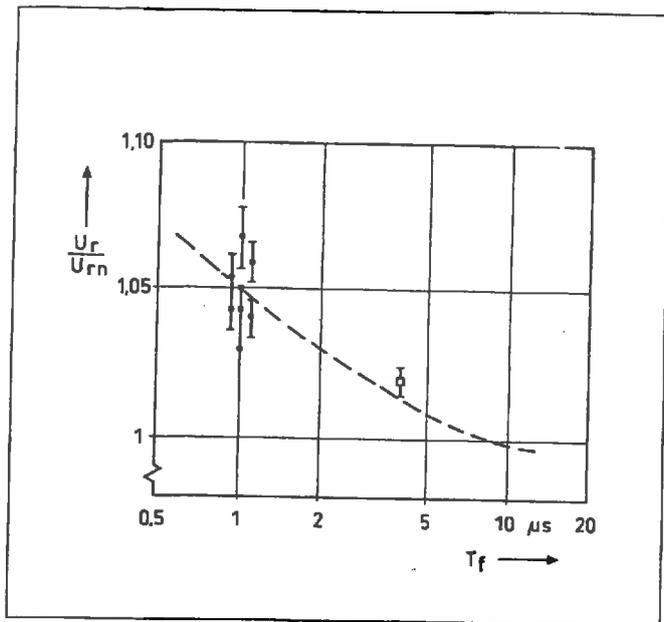


Bild 4. Restspannung U_r von Metalloxidableitern bezogen auf die Restspannung U_m bei Nennableitstoßstrom in Abhängigkeit von der Frontzeit T_f , des Stoßstroms. (Stromamplituden 10 kA) [6]

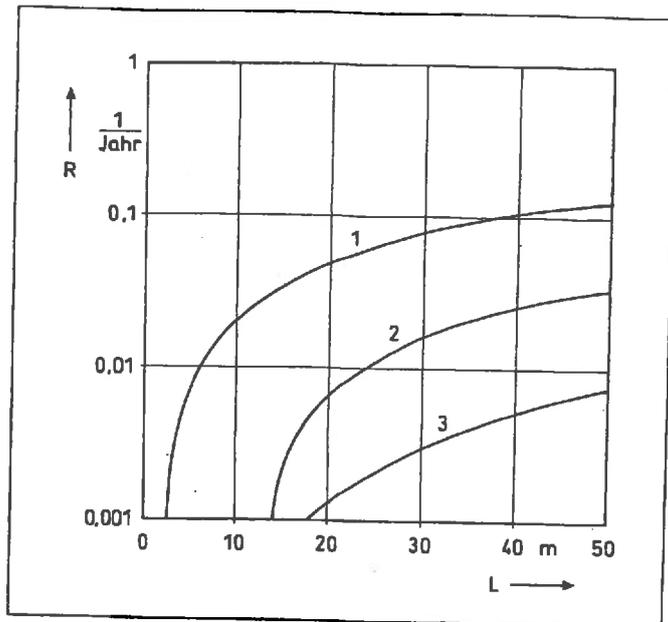


Bild 5. Erwartete Fehlerrate R von Betriebsmitteln in Abhängigkeit vom Abstand L zwischen Überspannungsableiter und Betriebsmittel
Typische Werte für: 1 - 20 kV-Ortsnetzstationen an Holzmast-Freileitungen, 2 - 20-kV-Ortsnetzstationen an Stahl- oder Betonmast-Freileitungen, 3 - 110-kV-Schaltanlagen

daß für den Bereich der gelöschten Netze ein Sicherheitsfaktor von 1.15 ausreicht, die oben genannten Einflußfaktoren abzudecken. Die für die Luftisolation vorhandenen Einflüsse der atmosphärischen Bedingungen sind durch diesen Faktor abgedeckt. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Scheitelwert der Bemessungs-Wechselspannung die für die Schaltüberspannung erforderliche Koordinations-Schaltstoßspannung abdeckt, ergeben sich die folgenden Werte:

20-kV-Betriebsmittel

Bemessungs-Wechselspannung:	50 kV
Bemessungs-Blitzstoßspannung:	125 kV
Koordinations-Schaltstoßspannung:	61 kV
Koordinations-Blitzstoßspannung:	109 kV

110-kV-Betriebsmittel

Bemessungs-Wechselspannung:	230 kV
Bemessungs-Blitzstoßspannung:	550 kV
Koordinations-Schaltstoßspannung:	283 kV
Koordinations-Blitzstoßspannung:	478 kV

3.3 Betriebsmittel-Zuverlässigkeit

Für die Abschätzung der Betriebsmittel-Zuverlässigkeit muß man annehmen, daß ein Isolationsfehler immer dann auftritt, wenn die Koordinations-Stehspannungen überschritten werden, obwohl dies nicht immer zutreffen wird. Die Betriebsmittel-Zuverlässigkeit ist umso geringer, je häufiger eine solche Überschreitung auftritt.

In gelöschten Netzen treten langsam ansteigende (Schalt-) Überspannungen beim Erdschluß und durch Schalthandlungen auf. Sie erreichen im Normalfall Höchstwerte gleich dem 2,8fachen Scheitelwert der Betriebsspannung zwischen Leiter und Erde, also 56 kV im 20-kV-Netz und 280 kV im 110-kV-Netz.

Ein Vergleich mit den in Abschnitt 3.1 für diese Spannungen angegebenen Schutzpegel der Ableiter zeigt, daß sie keinen merklichen Schutz gegen diese Spannungen bieten. Allerdings werden die vorhandenen Koordinations-Stehspannungen nicht überschritten, so daß eine Isolationsgefährdung hier auch nicht besteht. Lediglich in Ausnahmefällen, z. B. beim Erdschluß an Netzausläufern oder bei Schalthandlungen in Netzen mit Erdschluß, können höhere Spannungswerte erreicht werden. In vielen Fällen werden Metalloxidableiter dann einen ausreichenden Überspannungsschutz darstellen. Es sei jedoch erwähnt, daß diese für die gelöschten Netze geltenden Zusammenhänge für Netze mit geerdetem Sternpunkt nicht zutreffen, da hier im Vergleich zur Betriebsspannung niedrigere Ableiter-Dauerspannungen gewählt werden können, und somit niedrigere Schutzpegel erreicht werden, und ein Schutz gegen Schaltüberspannungen besteht.

In gelöschten Netzen dient der Ableiter zum Schutz gegen Blitzüberspannungen, und er ist damit vorrangig für Betriebsmittel in Freileitungsnetzen erforderlich. Die Ermittlung der Zuverlässigkeit solcher Betriebsmittel erfordert die Berücksichtigung mehrerer Einflußfaktoren und Überspannungsberechnungen, wenn eine hohe Genauigkeit gefordert wird. In der Anwendungs-Richtlinie zu DIN VDE 0111 [9] ist eine Näherungsgleichung angegeben, die die wichtigsten Einflußfaktoren berücksichtigt:

- Schutzpegel des Ableiters;
- Abstand zwischen Ableiter und Betriebsmittel;
- Zahl der angeschlossenen Freileitungen;
- das Blitzverhalten der Freileitung wie Fehlerrate, Leiter-Leiter- oder mehrfach Leiter-Erd-Überschläge und Steilheitsdämpfung durch Korona;

- Spannweite, da rückwärtige Überschlüge oder Schirmfehler nicht an der Freileitungseinführung zur Schaltanlage entstehen können.

Die Besprechung der für die Anwendung dieser Formel notwendigen Eingangsdaten würde den Rahmen dieses Aufsatzes sprengen. Stellvertretend hierfür zeigt Bild 5 für die in Deutschland üblichen Daten für Ableiter und Freileitungen die errechneten, zu erwartenden Fehlerraten der Betriebsmittel in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Ableiter und Betriebsmittel. Aus ausgewerteten Schadensstatistiken [5] läßt sich schließen, daß eine Fehlerrate von 0,001 pro Jahr entsprechend 1 Fehler pro 1000 Betriebsmittel und Jahr (0,1 %) erreicht werden kann und sollte. Für die in Bild 5 dargestellten Beispiele ist der für diese Rate notwendige Abstand der Schutzbereich des Ableiters. Der Schutzbereich des Ableiters ist besonders klein für Mittelspannungs-Holzmasleitungen (ca. 3 m), verursacht durch die hohen, einlaufenden Blitzüberspannungen. Für Stahl- oder Betonmasleitungen ergeben sich merklich größere und leichter zu verwirklichende Schutzbereiche.

Die Kurven in Bild 5 zeigen aber auch, daß Betriebsmittel außerhalb des Schutzbereiches nicht ungeschützt sind, und größere Anschlußabstände in Einzelfällen durchaus akzeptiert werden können. Für Geräte außerhalb des Schutzbereiches besteht allerdings ein höheres Fehlerrisiko, das z. B. bei Holzmasleitungen bereits bei einem Abstand von 8 m das 10fache der anzustrebenden Fehlerrate beträgt.

Das gleiche Konzept läßt sich auch auf den Einfluß des Ableiter-Schutzpegels anwenden. Eine Erhöhung des Pegels um 10 % entspricht für die Mittelspannungen einer Erhöhung des Abstands um 40 %, im 110-kV-Netz um 60 %. Entsprechend Bild 5 bedeutet dies eine Erhöhung der Fehlerrate um einen Faktor 5 bis 7 im Mittelspannungsbereich, und um einen Faktor von 3 im 110-kV-Bereich.

Diese Erhöhung der Fehlerrate kann aber durch die Verwendung kleinerer Abstände wieder ausgeglichen werden. Da bei sonst gleichen Gegebenheiten die Schutzbereiche proportional zur Differenz zwischen Koordinations-Blitzstoßspannung und Blitzstoß-Schutzpegel sind, können die neuen Schutzbereiche, ausgehend von den bisher vorliegenden Werten, durch einfache Umrechnung ermittelt werden.

4. Optimierung und Schlußfolgerungen

Die Optimierung der Zuverlässigkeiten von Überspannungsableiter und Betriebsmittel ist einfach, da im Netz mit Erdschlußlösung jeweils nur ein Vorgang zu berücksichtigen ist:

- Die Ableiterzuverlässigkeit ist bestimmt durch sein Verhalten im Fall eines lang anstehenden Erdschlusses. Alle anderen Netzvorgänge haben keine Auswirkungen oder sind durch die Wahl der Ableiterdaten nicht oder nur wenig beeinflussbar.
- Die Betriebsmittel-Zuverlässigkeit ist bestimmt durch den Schutz des Ableiters gegen Blitzüberspannungen. Andere Überspannungen liegen unterhalb des Ableiter-Schutzpegels und können durch die Wahl der Ableiter-Kenndaten nicht beeinflusst werden.

Die Tatsache, daß unterschiedliche Schutzpegel durch den Abstand zwischen Ableiter und zu schützenden Betriebsmitteln weitgehend ausgeglichen werden kann, macht die Anpassung der Dauerspannung an Höhe und Dauer der im Erdschluß

zwischen Leiter und Erde liegenden Spannung vorrangig. Da mit der Erdschluß-Spannungserhöhung alle Überspannungsableiter in dem betroffenen Netzabschnitt beansprucht werden, ist die Zahl der Ableiter hoch, und das Fehlerrisiko des Ableiters muß demnach klein sein. Es wird daher empfohlen, die durch die Wechselspannungs-Zeitkennlinie mögliche Marge nicht auszunutzen, und die Dauerspannung der Ableiter gleich der Erdschluß-Spannungserhöhung zu setzen. Da die Spannung am Einbauort der Ableiter dabei durchaus höher als die höchste Betriebsspannung sein kann, der tatsächliche Wert meist jedoch nicht bekannt ist, sollte die Dauerspannung gleich der höchsten Spannung für Betriebsmittel sein. Die so erhaltenen Werte sind in Tafel 3 zusammengefaßt. Die kenndatenbedingte Fehlerrate ist damit gleich oder nahezu gleich null.

Tafel 3. Empfohlene Kennwerte von Metalloxidableitern in gelöschten Netzen

Netz-Nennspannung kV	Dauerspannung	Bemessungsspannung	Restspannung bei Nenn-Ableitstoßstrom
	min. kV	min. kV	max kV
6	7,2	9	26
10	12	15	40
15	17,5	22	60
20	24	30	80
30	36	45	120
110	123	144	370

Die Betriebsmittel-Zuverlässigkeit hängt dann vom Schutzpegel des Ableiters und seinem Einbauort ab. Die Betriebserfahrung mit Funkenstreckenableitern hat gezeigt, daß die Betriebsmittel-Zuverlässigkeit mit den für diesen Ableiter üblichen Schutzpegeln hoch ist. Es ist daher empfehlenswert, die für diesen Ableitertyp geforderten Werte auch auf den Metalloxidableiter anzuwenden. Sie sind in Tafel 2 mit angegeben. Sollten aus wirtschaftlichen Gründen höhere Werte zugelassen werden, dann sollte dies durch den Einsatz geringerer Abstände ausgeglichen werden.

Literatur

- [1] Weck, K.H.: Spezialbericht zu Gruppe 33 Vorzugsthema 2 "Metalloxidableiter". CIGRE-Bericht 33-00, 1992
- [2] Petrusch, W. e. a.: Thermisches Verhalten und Einflüsse auf die Langzeitbeständigkeit von Metall-Oxid-Ableitern bei leitfähigen Oberflächen - Ablagerungen. FGH Technischer Bericht 1-272, 1990
- [3] Verma, M.P. e. a.: Long-term performance of metal-oxide-arresters at operating voltage. CIGRE-Bericht 33-204, 1992
- [4] Balzer, G.: Aufbau und Wirkungsweise der Metalloxidableiter. ELEKTRIE 47 (1993) 7, S. 252 - 257
- [5] Heiß, W.A. e. a.: Überspannungsableiter in Mittelspannungs-Verteilungsnetzen. - Auswahlkriterien und Betriebserfahrungen. - Elektrizitätswirtschaft 91 (1992) 343 - 350
- [6] Hileman, A.R. e. a.: Protection performance of metal oxide surge arresters. ELECTRA 133 (1990) 132 - 144
- [7] Heiß, W. e. a.: Schadensrisiko von Mittelspannungsschaltanlagen bei betrieblicher Alterung der Isolation. Elektrizitätswirtschaft 86 (1987) 344 - 350
- [8] Krüger, K. e. a.: Correlation between on-site test voltages and insulation coordination of GIS. CIGRE-Bericht 23/33-02, 1992
- [9] DIN VDE 0111, Entwurf 1992: Isolationskoordination für Betriebsmittel in Drehstromnetzen über 1 kV. Teil 100: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen. Teil 200: Anwendungsrichtlinie EA6458