**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:** 75 (1984)

**Heft:** 23

**Artikel:** Bemessung, Prüfung und Einsatz von Metalloxid-Ableitern

**Autor:** Rudolph, R.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-904522

**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:** 13.07.2025

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

# Bemessung, Prüfung und Einsatz von Metalloxid-Ableitern

R. Rudolph

*Ausgehend von der konventionellen Ableitertechnik wird im Vergleich dazu das Schutzprinzip und der Aufbau der neuen MO-Ableiter beschrieben. Dank des heute erreichten Entwicklungsstandes ist eine hohe Betriebssicherheit gewährleistet. Die Ableiterprüfungen nach dem Vorschlag der IEC-Arbeitsgruppe werden erläutert; dabei wird ersichtlich, dass dem Nachweis der thermischen Stabilität der Ableiter besondere Bedeutung zukommt. Verschiedene Einsatzmöglichkeiten des neuen Ableitertyps werden beschrieben und seine Schutzcharakteristik mit der konventionellen Technik verglichen. Daraus ergeben sich Schwerpunkte für den heutigen Anwendungsbereich des MO-Ableiters.*

*Par comparaison avec la technique des parafoudres conventionnels, l'article décrit le principe de protection et la construction des nouveaux parafoudres à oxydes métalliques. Grâce au niveau élevé de développement atteint actuellement, la sécurité de fonctionnement est garantie. L'article commente les nouveaux essais pour parafoudres, selon la proposition du groupe de travail de la CEI, d'où il ressort qu'on accorde une importance particulière à la démonstration de la stabilité thermique. L'article décrit diverses possibilités d'utilisation du nouveau type de parafoudres dont la caractéristique de protection est comparée à celle de la technique conventionnelle. On en déduit les principes de base pour le domaine d'utilisation du parafoudre à oxydes métalliques.*

Der Aufsatz ist eine überarbeitete Fassung des Vortrages vom 21. Februar 1984 an der ETHZ im Rahmen des Kolloquiums «Aktuelle Probleme der Energietechnik».

**Adresse des Autors**

*René Rudolph*, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie, Abt. ATW, Werk Oerlikon, CH-8050 Zürich.

## 1. Einführung

Überspannungen in Hochspannungsnetzen können in Extremfällen zur Zerstörung der Isolation von elektrischen Betriebsmitteln führen. Daraus folgen schwere Schäden an den Geräten, Ausfall der Energieversorgung und damit wirtschaftliche Verluste. Es ist Aufgabe einer geeigneten Isolationskoordination, die Wahrscheinlichkeit eines Schadens durch Überspannungen zu senken. Unvermeidbare Überschläge sind auf solche Stellen zu beschränken, wo sie keinen Schaden anrichten können.

Im Rahmen der Isolationskoordination werden Überspannungsschutzeinrichtungen eingesetzt. Massgebend für deren Dimensionierung sind die zu erwartenden Überspannungen. Diese können verschiedene Ursachen und Formen haben:

- *Zeitweilige (temporäre) Spannungserhöhung:* Dazu zählen ungedämpfte oder nur schwach gedämpfte, schwingende Überspannungen. Die Schwingungsfrequenz ist häufig betriebsfrequent oder eine Harmonische der Netzfrequenz. Sie treten bei Lastabwurf, Schalthandlungen, Fehlern mit Erdberührung, Nichtlinearitäten im Netz usw. auf. Sie liegen im allgemeinen unterhalb 1,5 p.u.[1]) und dauern zwischen 0,1 s und einigen 100 s.
- *Schaltüberspannungen:* Diese Überspannungsart dauert nur kurz (0,1...100 ms) und besteht meist aus stark gedämpften Schwingungen mit Frequenzen bis zu einigen kHz. Sie entstehen durch Schalthandlungen oder Fehlerfälle und liegen normalerweise unterhalb 4 p.u. in Mittelspannungsnetzen und 3 p.u. in Hochspannungsnetzen.
- *Blitzüberspannungen:* Sie haben ihre Ursache im allgemeinen in atmosphärischen Entladungen. Die Überspannung wird am Einschlagsort des Blitzes durch das Produkt aus eingeprägtem Blitzstrom und Stossimpedanz bestimmt. Die Höhe dieser unipolaren Überspannung kann je nach der Isolation der Einschlagstelle einige 100 bis wenige 1000 kV betragen. Sie erreicht ihren Scheitelwert innerhalb weniger µs und klingt anschliessend sehr schnell wieder ab.

[1]) Die Amplitude der Überspannungen wird auf den Scheitelwert der maximalen Betriebsspannung zwischen Leiter und Erde bezogen ($U_m$ = maximale Betriebsspannung; 1 p.u. = $U_m \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3}$).

## 2. Konventionelle Ableitertechnik

Schon in den Anfängen der Energieübertragung zeigte sich die Notwendigkeit, Anlagen und Apparate gegen Überspannungen zu schützen. Als Schutz dienten zunächst Funkenstrekken, deren Ansprechen allerdings Kurzschlüsse und Netzunterbrechungen auslöste. Der Wunsch nach einer sicheren und wirtschaftlichen Lösung führte um 1930 zur Entwicklung der heute bekannten Überspannungsableiter. Eine erste konstruktive Lösung besteht in der Serieschaltung von Plattenfunkenstrecken, die durch Isoliermaterial distanziert sind. Noch während des Ansteigens der Überspannungen sprechen die Funkenstrecken an und schliessen einen Strompfad gegen Erde, über den der Blitzstrom abgeleitet wird. Der in Serie mit den Funkenstrecken geschaltete Widerstand begrenzt den unter der Netzspannung fliessenden Folgestrom. Damit löscht der Lichtbogen zwischen den Plattenfunkenstrecken beim nächsten Nulldurchgang der Spannung. Diese auch heute noch in Mittelspannungsnetzen eingesetzten Plattenfunkenstreckenableiter begrenzen Blitzüberspannungen in isolierten Netzen auf rund 4 p.u.

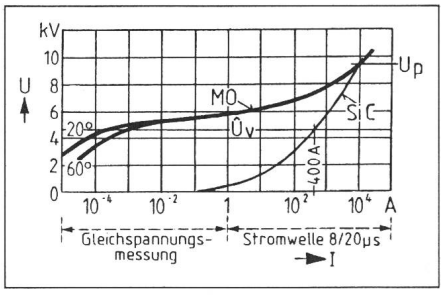


**Fig. 1 Einfach logarithmische Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie von Widerstandsscheiben aus MO und SiC**

Die Forderung nach einem tieferen Schutzniveau sowie einem höheren Energieaufnahmevermögen, besonders in Höchstspannungsnetzen, führte zur Entwicklung des magnetisch beblasenen Ableiters. Sein Prinzip besteht darin, den Lichtbogen der Funkenstrecken nicht einfach zwischen zwei Platten bei praktisch konstanter Länge brennen zu lassen, sondern ihn unter Einwirkung eines Magnetfeldes zu verlängern. Die dadurch entstehende Lichtbogenspannung hilft, den unter der Netzspannung fliessenden Folgestrom zu verkleinern. Die Löschung kann dann wesentlich vor dem Nulldurchgang der treibenden Spannung erfolgen. In einem starr geerdeten Netz lassen sich damit Schutzwerte von 2,2 p.u. erzielen.

## 3. MO-Widerstände als Ableiterelemente

In jüngster Zeit ist ein keramischer Widerstand aus einer Mischung von Metalloxiden (MO) entwickelt worden. Seine Strom-Spannungs-Kennlinie ist extrem nichtlinear (Fig. 1). Die Funktionsweise dieser Ableiter, die nur aus der Serieschaltung von Widerstandsscheiben (ohne Funkenstrekken) bestehen, ist extrem einfach. Bei einer Überspannung an den Ableiterklemmen steigt der Strom durch den Ableiter kontinuierlich und verzögerungsfrei an, entsprechend der dargestellten Kennlinie. Es findet kein eigentliches Ansprechen statt, sondern die Scheiben gehen kontinuierlich in den leitenden Zustand über. Nach dem Abklingen der Überspannung geht der Strom entsprechend der Kennlinie wieder zurück. Im Gegensatz zu den Funkenstreckenableitern fliesst also praktisch kein Folgestrom.

In Figur 1 ist die Kennlinie einer MO-Scheibe mit der maximal zulässigen 50-Hz-Dauerbetriebsspannung von $U_v$ = 3,25 kV dargestellt. Bei Gleichspannungsbelastung mit $\hat{U}_v$ = 4,6 kV fliesst ein Gleichstrom in der Grössenordnung von mA. Die kapazitive Komponente bei 50 Hz und $U_v$ liegt zwischen 1,5 und 2 mA Scheitelwert. Das Schutzniveau (Restspannung) bei 10 kA Blitzstrom beträgt $U_p$ = 9,4 kV. Vergleichsweise ist im Diagramm auch die Kennlinie eines konventionellen SiC-Widerstandes (Siliziumkarbid) eingezeichnet, der bei 10 kA ebenfalls eine Restspannung von 9,4 kV hat. Da SiC eine wesentlich kleinere Nichtlinearität aufweist, würde der Dauerstrom eines funkenstrekkenlosen SiC-Ableiters bei Nennbelastung $\hat{U}_v$ rund 400 A betragen. Ein solcher Ableiter wäre natürlich aus thermischen Gründen nicht machbar. Die konventionellen Ableiter benötigen deshalb Seriefunkenstrecken, welche bei Dauerbetrieb die Spannung übernehmen.

## 4. Prinzipieller Aufbau der MO-Ableiter

Der Aktivteil von MO-Ableitern besteht aus einer oder mehreren Säulen von in Serie geschalteten MO-Scheiben. Die Säulen stehen in einem Isoliergehäuse, meistens ein mit Schirmen versehenes Porzellanrohr, welches den Aktivteil nach aussen luftdicht abschliesst. Die Anzahl der in Serie geschalteten MO-Scheiben ist proportional der maximal zulässigen 50-Hz-Dauerbetriebsspannung $U_c$, im englischen Sprachgebiet auch MCOV (Maximum Continuous Operating Voltage) genannt. Mit $U_c$ beanspruchte Widerstandssäulen verhalten sich elektrisch wie eine Serieschaltung von vielen Kondensatoren. Die Streukapazitäten der einzelnen Widerstände gegen Erde bewirken deshalb, dass längs der Säulenachse die einzelnen Widerstände mit zunehmendem Abstand vom Erdboden spannungsmässig stärker beansprucht werden. Dieser Effekt kann durch geeignete Steuerringe wieder ausgeglichen werden (Fig. 2). Mit den heutigen Grossrechnern ist es möglich, Ort und Grösse der Steuerringe so zu optimieren, dass die Abweichung von der linearen Spannungsverteilung längs der Ableiterachse nur wenige Prozent beträgt. Die spannungsmässig am stärksten beanspruchten Widerstände sind also, bezogen auf die lineare Spannungsverteilung, einer etwas erhöhten Dauerbetriebsspannung ausgesetzt. Um diesen Effekt auszugleichen, werden im Ableiter dem Versteuerungsgrad $v$ entsprechend mehr Widerstände eingebaut:

$$U_c = U_v / v$$

Damit ist sichergestellt, dass die Widerstände höchstens mit $U_v$ belastet werden, wenn der Ableiter unter der Dauerbetriebsspannung $U_c$ steht.

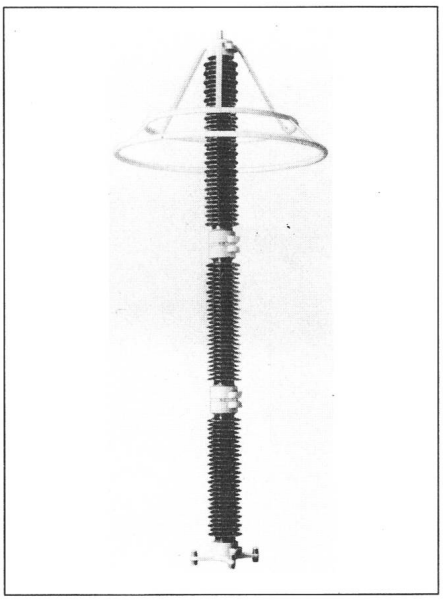

**Fig. 2 Überspannungsableiter Typ MWL 253 mit Steuerring**

Einsäuliger Aufbau des Aktivteils. Maximal zulässige Dauerbetriebsspannung $U_c$ = 253 kV. Geeignet als Ableiter zwischen Phase und Erde in einem 420-kV-Drehstromnetz.

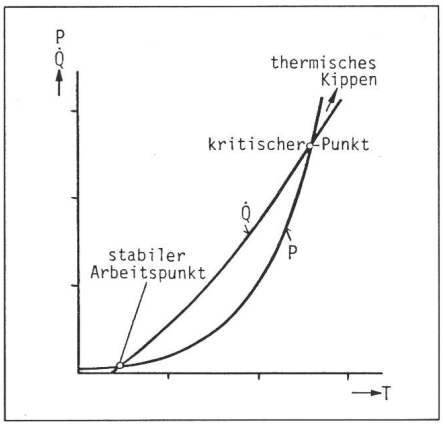


**Fig. 3 Verlustleistung $P$ der MO-Scheiben und Wärmefluss $\dot{Q}$ vom Aktivteil des Ableiters an die äussere Umgebung in Funktion der MO-Temperatur $T$ bei Dauerbetriebsspannung $U_c$**

## 5. Stabilitätsfragen

In Figur 3 sind die Verlustleistung $P$ der MO-Scheiben und der Wärmefluss $\dot{Q}$ vom Aktivteil an die äussere Umge-

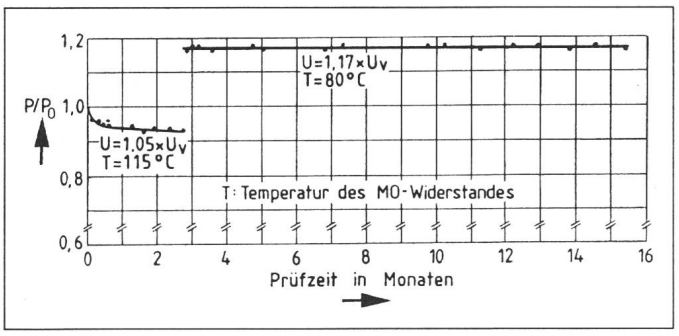


**Fig. 4**
**Alterungsprüfung an einem MO-Widerstand bei Wechselspannung**

$P_0$ Verlustleistung am Versuchsanfang
$P$ Verlustleistung in Funktion der Versuchsdauer

bung in Funktion der MO-Widerstands-Temperatur dargestellt. Im Temperaturbereich oberhalb des kritischen Punktes reicht die Kühlung der Scheiben ($\dot{Q}$) nicht aus, um die bei der Dauerbetriebsspannung $U_c$ erzeugte Verlustleistung $P$ nach aussen abzuführen; der Ableiter würde thermisch zerstört. Durch geeignete Dimensionierung der Widerstände und konstruktive Massnahmen, wie z. B. Kühlung der Blöcke, ist es möglich, den kritischen Punkt so hoch zu legen, dass er auch bei schwersten im Betrieb zu erwartenden Überspannungen mit Sicherheit nicht erreicht wird.

Auf der anderen Seite zeigt der beschriebene Mechanismus klar die Grenzen des Energieaufnahmevermögens der MO-Ableiter. Die zugeführte Energie darf nur so gross ein, dass der kritische Punkt nie erreicht wird. Dann ist $P < \dot{Q}$, und die MO-Scheiben kühlen sich ab, bis der stabile Arbeitspunkt erreicht ist.

Für die thermische Stabilität eines MO-Ableiters ist also die Verlustleistung der Scheiben bei $U_c$ von grosser Bedeutung. Bei den ersten MO-Widerständen zeigte sich die Tendenz, dass diese unter Wechselspannungsbeanspruchung mit der Zeit zunahm, was prinzipiell zum thermischen Kippen des Ableiters führt. Bei den heutigen Widerständen ist dieser Alterungseffekt nicht mehr vorhanden:

Figur 4 zeigt die Alterungsprüfung an einer MO-Scheibe. Während 2,75 Monaten wurde der Prüfling bei einer Temperatur von 115 °C an Spannung gelegt. Um die Beanspruchung zu erhöhen, wurde die 50-Hz-Prüfspannung $U$ um 5% höher als die maximal zulässige Dauerbetriebsspannung $U_v$ gewählt. Anfänglich nahm die Verlustleistung etwas ab und blieb anschliessend praktisch konstant. Beim gleichen Prüfling wurde im folgenden die Prüfspannung $U$ auf 1,17 $U_v$ erhöht. Die Betriebstemperatur musste gleichzeitig aus experimentellen Gründen auf 80 °C abgesenkt werden. Auch bei dieser Versuchsreihe war selbst nach 13 Monaten Prüfzeit noch keine Zunahme der Verlustleistung ersichtlich.

## 6. Aufbau und thermisches Verhalten

Das Ableitergehäuse besteht aus einem Hohlisolator mit beidseitigen metallischen Abschlussarmaturen. Darin sind die MO-Widerstände in einer hochtemperaturbeständigen Silikon-Vergussmasse eingebettet. Der Wärmetransport vom Widerstandsstapel an die atmosphärische Luft erfolgt durch Wärmeleitung über die Vergussmasse und das Porzellangehäuse. Die Beimischung von Korund in die Vergussmasse und die exzentrische Anordnung der Widerstandssäule optimieren die Wärmeleitfähigkeit nach aussen und gewährleisten eine intensive Kühlung der MO-Scheiben. Die leicht elastische Vergussmasse hält die Widerstände im Isolatorgehäuse fest, so dass auch beim Transport in horizontaler Lage oder bei Stossbelastung durch Erdbeben kein Schaden entsteht.

Nach dem Begrenzen der Überspannungen fliesst bei MO-Ableitern kein Folgestrom mehr. Im Gegensatz zu den konventionellen Funkenstreckenableitern sind daher die MO-Ableiter während längerer Zeit mit erhöhter netzfrequenter Spannung belastbar (Fig. 5). $T \cdot U_c$ ist die zulässige betriebsfrequente Überspannung, welche während der Zeitdauer $t$ vom Ableiter bewältigt werden kann. Je höher die temporäre Überspannung ist, desto kürzer ist die zulässige Belastungsdauer. Das gleiche gilt für die energiemässige Vorbelastung des Ableiters unmittelbar vor dem Auftreten der temporären Überspannung: Je stärker die thermische Vorbelastung ist, desto kürzer ist die zulässige Belastungsdauer $t$ bei der temporären Überspannung. Dank der guten Widerstandskühlung ist die Festigkeit $T$ bei den MWL-Ableitern gross. Aus Figur 5, Kurve b, ist ersichtlich, dass ein mit 8 kJ pro kV $U_c$ vorbelasteter Ableiter (z. B. durch einige Leitungsentladungen) unmittelbar anschliessend noch während 1 s mit der temporären Überspannung $1{,}45 \cdot U_c$ beansprucht werden kann. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Ableiter vor und nach der Überspannung an $U_c$ liegt und dass die Umgebungstemperatur mit Sonneneinstrahlung 40 °C bzw. ohne Sonneneinstrahlung 45 °C nicht übersteigt. Anschliessend an eine starke Energiebelastung muss sich der Ableiter bei $U_c$ wieder abkühlen können. Die Abkühlzeit für 3 bzw. 6 kJ/kV $U_c$ beträgt etwa 25 bzw. 60 min. Diese Wartezeit steht netzseitig im Anschluss an so energiereiche Schaltüberspannungen (Netzstörung) praktisch immer zur Verfügung.

Um die Anforderungen an das Energieaufnahmevermögen der Ableiter zu veranschaulichen, sind anschliessend einige Beispiele zusammengestellt:

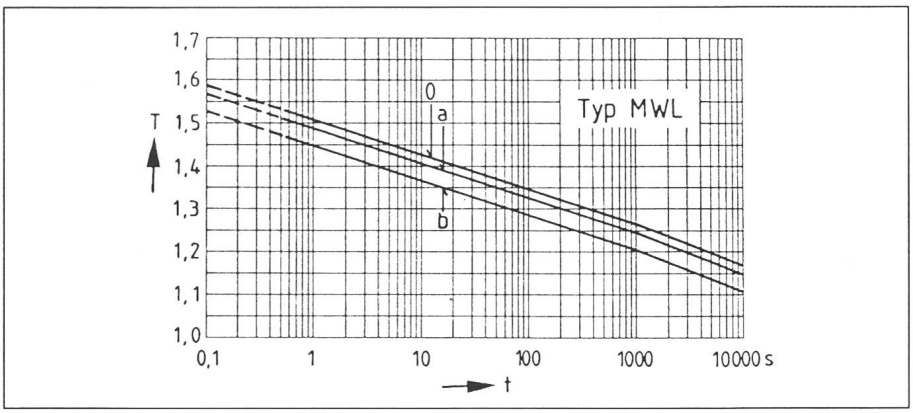


**Fig. 5 Festigkeit $T$ (bezogen auf $U_c$) gegen temporäre Überspannungen in Abhängigkeit von der Zeit $t$ bei einer Umgebungstemperatur von 45 °C**

Die Kurve 0 gilt für Ableiter ohne Vorbelastung, die Kurve a bei Vorbelastung mit $E$ = 4 kJ/kV $U_c$, die Kurve b bei Vorbelastung mit $E$ = 8 kJ/kV $U_c$.
$t$ = Dauer der Überspannungen bei Betriebsfrequenz

- Ein Blitzstrom 10 kA mit Wellenform 8/20 µs ergibt etwa 0,5 kJ/kV $U_c$
- Ein Blitzstrom 100 kA mit Wellenform 4/10 µs ergibt etwa 4 kJ/kV $U_c$
- Eine Rechteckwelle 1000 A×2 ms ergibt etwa 5 kJ/kV $U_c$
- Eine Leitungsentladung der IEC-Klasse 4 entsprechend einer 420 km langen Leitung im 525-kV-Netz ergibt etwa 3 kJ/kV $U_c$.

Besonders bei Schaltüberspannungen ist das Energieaufnahmevermögen der Ableiter wichtig. Die stärksten konventionellen Ableiter haben etwa die gleiche Energieaufnahmefähigkeit wie der einsäulige MO-Typ MWL. Bei der MO-Technik ist jedoch die Parallelschaltung von Widerstandssäulen möglich. Damit ist jedes technisch notwendige Energieaufnahmevermögen realisierbar. Für Systemspannungen über 420 kV wird meistens der zweisäulige Ableiter-Typ MWM verwendet. Sein Energieaufnahmevermögen beträgt 16 kJ/kV $U_c$.

## 7. Die Dauerbetriebsspannung $U_c$ im Drehstromnetz

In Netzen mit isoliertem (nicht niederohmig geerdetem) oder induktiv geerdetem Sternpunkt werden einphasige Erdschlüsse oft nicht sofort ausgeschaltet. Die Leiter-Erdspannung der gesunden Phasen steigt dabei unter Umständen für Stunden auf die verkettete Netzspannung an. Bei solchen Netzen wählt man daher die Dauerbetriebsspannung $U_c$ der Phasenableiter gleich der maximalen verketteten Netzspannung $U_m$. Eine kurzzeitige netzfrequente Erhöhung der Systemspannung um den Faktor $T$ gemäss Figur 5 ist für die Ableiter selbst bei einpoligem Erdschluss zulässig.

Sind Netze mit isoliertem Sternpunkt mit einem Erdschlussschutz ausgerüstet, dann sind auch kleinere Werte von $U_c$ möglich:

$$U_c \geqq U_m / T$$

$T$ ist der Figur 5 zu entnehmen, wobei $t$ der maximalen Erdschlussdauer entspricht.

Bei niederohmig geerdeten Netzen mit Erdfehlerfaktor $C_e \leqq 1{,}4$ (starr geerdet) ist eine Dauerbetriebsspannung des Ableiters von

$$U_c \geqq U_m / \sqrt{3}$$

zulässig. Wohl kann hier die Spannung in den Phasen bei einpoligem Erdschluss auf 1,4 p.u. ansteigen, so dass der Ableiter mit 1,4 $U_c$ belastet wird. Die automatische Schnellausschaltung begrenzt die Dauer des Erdschlusses aber auf weniger als 1 s. Für diese Zeit hat der Ableiter eine Festigkeit von mindestens $T = 1{,}45$ (Fig. 5). Er könnte also während dieser Zeitspanne selbst bei maximaler Vorbelastung (8 kJ/kV $U_c$) noch einer Spannung von $1{,}45 \cdot U_c$ widerstehen.

Unter ganz besonderen Umständen kann auch in starr geerdeten Netzen die Phasen-Erde-Spannung während einiger Perioden über 1,4 p.u. ansteigen. In diesen Fällen muss auch $U_c$ grösser als $U_m / \sqrt{3}$ gewählt werden.

## 8. Schutzcharakteristik und Schutzniveau

Funkenstreckenlose MO-Ableiter haben keine Ansprechspannung, sondern eine Restspannung $U_p$. Sie ist gleich der Spannung zwischen den Ableiterklemmen während des Durchganges eines Impulsstromes. Die Schutzcharakteristik wird mit folgenden drei Stromwellen hinreichend beschrieben:

- Die Stromwelle 1/5 µs bei 10 kA entspricht einer sehr steilen Überspannungswelle. Die zugehörige Restspannung ist vergleichbar mit der Frontansprechspannung konventioneller Funkenstrecken-Ableiter.
- Die Stromwelle 8/20 µs bei 10 kA Scheitelwert ergibt eine Restspannung, die ungefähr dem Schutzniveau bei Blitzüberspannung entspricht.
- Die Stromwelle 30/60 µs entspricht einem steilen Schaltspannungsimpuls. Die Restspannung bei 1 kA mit dieser Wellenform ergibt etwa das Schutzniveau bei Schaltspannungsbeanspruchung.

Das Schutzniveau der MO-Ableiter ist der Strom-Spannungs-Kennlinie zu entnehmen, wie sie beispielsweise für den Typ MWL in Figur 6 dargestellt ist. Das Schutzniveau bei Schaltüberspannungen liegt zwischen demjenigen von Stromform 8/20 µs und Rechteckwelle. Bei sehr steilen Überspannungswellen (Stromform 1/5 µs) liegt es etwa 10...15% über der 8/20-µs-Kurve.

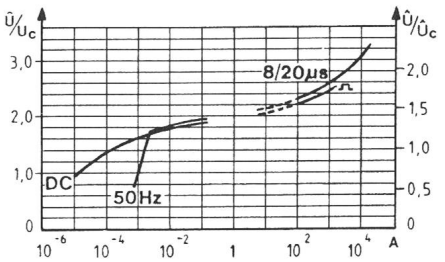


**Fig. 6 Einfach logarithmische Darstellung der Strom-Spannungs-Kennlinie (bezogen auf $U_c$) des einsäuligen Ableitertyps MWL**

Durch Parallelschalten von MO-Säulen kann das Ableiterschutzniveau reduziert werden. Die Verdopplung der Säulenzahl lässt die Verdopplung des Ableitstromes bei gleichbleibendem Schutzniveau zu.

Ein Vergleich der Schutzniveaus des einsäuligen MO-Ableiters MWL mit den besten konventionellen Ableitern mit magnetisch beblasenen Funkenstrecken ergibt folgendes Bild:

*Isoliertes Netz* (Erdfehlerfaktor $C_e = \sqrt{3}$): Bei Blitzüberspannungen ist der konventionelle Ableiter rund 25% besser. Bei Schaltüberspannungen sind beide Typen etwa gleich gut.

*Starr geerdetes Netz ($C_e$ = 1,4) oder isoliertes Netz mit Erdschlussschutz ($t \leqq 3$ s):* Bei Blitzüberspannungen sind beide Typen etwa gleich gut. Bei Schaltüberspannungen ist der MO-Ableiter etwa 25% besser.

Bei Netzspannungen über 300 kV sind die Schaltüberspannungen für die Isolationsbemessung massgebend. In diesen geerdeten Netzen garantiert der MO-Ableiter gerade bei Schaltüberspannungen ein tiefes Schutzniveau ($U_p$ = 1,75 p.u.). Die daraus resultierenden Einsparungen hinsichtlich der Isolationskosten sind ein wesentlicher Vorteil des MO-Ableiters.

## 9. Prüfungen

Die relativ aufwendige Überprüfung der Funkenstrecken fällt bei den MO-Ableitern weg. Dafür werden sehr genaue Stückprüfungen an den Widerständen durchgeführt. Heute werden die MO-Ableiter nach den Vorschlägen der Arbeitsgruppe IEC TC 37 WG4, Stand Februar 1984, geprüft. Endgültige Vorschriften sind noch in Arbeit.

*Stückprüfungen an Teilableitern:*

- Dichtigkeitsprüfung
- Steuerstrommessung bei $U_c$ und 1,25 $U_c$
- Teilentladungsmessung bei $1{,}05 \cdot U_c$ mit der Forderung < 2,5 µV oder < 5 pC
- Stromaufteilung bei mehrsäuligen Ableitern

*Typenprüfungen am Ableiter:*

- Isolationsprüfung am Gehäuse
- Teilentladungsmessung am ganzen Ableiter bei $1{,}05 \cdot U_c$
- Nachweis der thermischen Stabilität
- Druckentlastungsprüfung
- Verschmutzungsprüfung

- Umbruchversuche
- Erdbebenverhalten

Bei den Steuerstrom- und Teilentladungsmessungen würden sich eventuelle Unregelmässigkeiten bei der Ableitermontage zeigen.

*Stückprüfungen an MO-Scheiben:*
- Rechteckwellenprüfung mit 3×3 Entladungen
- Restspannungsprüfung Stromwelle 8/20 µs
- Messung der Verlustleistung bei $U_v$ und Raumtemperatur

Die Rechteckwellenprüfung dient zum Nachweis der Homogenität und des Energieaufnahmevermögens der einzelnen Widerstände. Widerstände mit einer Langwellenfestigkeit von 1000 A×2 ms werden bei 1100 A×2 ms stückgeprüft.

Die Restspannungsprüfung bei Nennableitstrom (z. B. 10 kA) ist die Basis für die Festlegung des Ableiterschutzniveaus. Die maximal zulässige Dauerbetriebsspannung $U_v$ der Widerstände ist direkt proportional dieser Restspannung.

*Typenprüfungen an MO-Scheiben*
- Stabilitätsprüfung bei erhöhter Temperatur und anliegender Wechselspannung (Alterungsprüfung)
- Restspannungsprüfung bei verschiedenen Stromwellen

*Typenprüfungen am thermischen Abbild*
- Arbeitsprüfung bei 50-Hz-Spannung und Blitzstrombelastung
- Kombinierte Arbeits- und Stabilitätsprüfung mit Einschluss von
  - Leitungsentladung (Rechteckwelle)
  - Hochstrombelastung
  - netzfrequenter Spannungserhöhung

Für den MO-Ableiter sind die Arbeitsprüfungen im wesentlichen eine thermische Beanspruchung. Die dazu erforderliche Energie ist gross, weshalb die vorhandenen beschränkten Prüfeinrichtungen meistens nur eine Prüfung an relativ kleinen Ableiter-Elementen zulassen. Damit während der Prüfung trotzdem die richtigen Verhältnisse im Ableiter nachgeahmt werden, muss der Prüfling ein vollwertiges thermisches Abbild von einem Ableiter-Abschnitt darstellen.

In mehrsäuligen Ableitern ist wegen der stark nichtlinearen Strom-Spannungs-Charakteristik dafür zu sorgen, dass bei energiestarken Strombelastungen die Entladeströme auf die parallelen Säulen richtig verteilt werden.

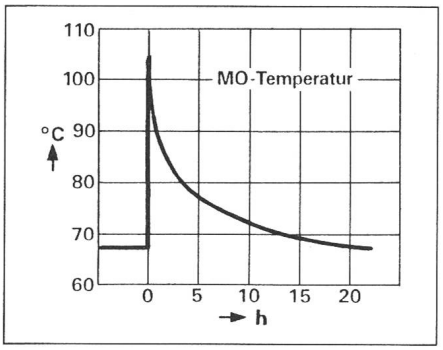


**Fig. 7 Nachweis der thermischen Stabilität am viersäuligen Ableitertyp MWS 72**

Energieinjektion von 2208 kJ (30,6 kJ/kV $U_c$) bei 55 °C Raumtemperatur und dauernder Spannungsbelastung von $U_c$ = 72 kV

Die Restspannungswerte (10 kA, 8/20 µs) der einzelnen Widerstände werden bei der Stückprüfung sehr genau gemessen und gespeichert. Mit Hilfe eines Sortierungsprogramms ermittelt ein Computer diejenigen Widerstände, welche innerhalb einer Säule jeweils in Reihe zu schalten sind. Vor dem Einbau der Säulen in den Porzellanisolator wird die Stromaufteilung auf die parallelen Säulen experimentell überprüft. Damit wird erreicht, dass im ungünstigsten Fall die Strombelastung einer Säule höchstens 20% höher ist als der Mittelwert von allen parallel geschalteten Säulen.

Anhand einer Typenprüfung wurde die thermische Stabilität an einem viersäuligen Ableiter vom Typ MWS 72 nachgewiesen. Der Ableiter wurde dazu in einem klimatisierten Raum bei 55 °C so lange mit $U_c$ = 72 kV belastet, bis sich der thermisch stabile Zustand eingestellt hat: Die Aussentemperatur des Porzellangehäuses erreichte 60 ± 2 °C, und der stabile Arbeitspunkt (Fig. 3) der MO-Widerstände lag bei 67 °C. Durch Erhöhung der angelegten 50-Hz-Spannung wurde dem Prüfling in 3...4 min die maximal zulässige Energie von 2208 kJ zugeführt (Fig. 7). Anschliessend wurde der Ableiter wieder mit $U_c$ = 72 kV belastet. Der Ableiter bzw. die MO-Widerstände kühlten sich entsprechend der Kurve in Figur 7 wieder ab. Der kritische Temperatur-Punkt (Fig. 3) wurde also nicht erreicht. Damit ist der experimentelle Nachweis der Betriebstüchtigkeit des Ableiters erbracht.

## 10. Einsatz der MO-Ableiter

Die Wahl des Ableiters richtet sich nach der maximalen Netz- oder Systemspannung $U_m$ und der Sternpunktbehandlung des Netzes, d.h. dem Erdfehlerfaktor $C_e$, sowie nach dem Einsatzort. Einige Beispiele mögen dies veranschaulichen:

*Ableiter zwischen Phase und Erde*

Bei $C_e = \sqrt{3}$ ist $U_c = U_m$ erforderlich. Bei $C_e = \sqrt{3}$ und Ausschaltung eines Erdschlusses innerhalb 3 s wird $U_c = U_m/1{,}4$ angenommen. Bei $C_e = 1{,}4$ wählt man $U_c = U_m/\sqrt{3}$.

*Ableiter zwischen den Phasen*

$U_c = U_m$; unabhängig von $C_e$.

*Ableiter zwischen Transformator-Sternpunkt und Erde*

Bei $C_e = \sqrt{3}$ wird $U_c = U_m/\sqrt{3}$ angenommen. Bei $C_e = \sqrt{3}$ und Erdschlussausschaltung innerhalb 3 s genügt $U_c = U_m/1{,}4\sqrt{3}$. Bei $C_e = 1{,}4$ kann man $U_c = 0{,}4\ U_m/1{,}45$ wählen.

*Ableiter bei Generatorableitung* (Phase-Erde)

Bei $C_e = \sqrt{3}$ ist $U_c = U_m$ erforderlich. Spannungserhöhungen infolge Lastabwurf sind berücksichtigt.

*Ableiter beim Maschinentransformator, hochspannungsseitig*

$C_e = 1{,}4$; Lastabwurffaktor $\vartheta_L = 1{,}05...1{,}5$
Sternpunkt-Erde: $U_c = \vartheta_L\, 0{,}4\ U_m/1{,}45$
Phase-Erde: $U_c = \vartheta_L\, 1{,}4\ U_m/\sqrt{3}\cdot 1{,}45$

Wenn der Sternpunkt des Transformators starr geerdet ist, genügt für die Phasenableiter $U_c = U_m/\sqrt{3}$, unabhängig von $\vartheta_L$.

*Hochfrequenzsperren* (Parallelschutz)

$U_c = \omega L\, I_k/1{,}4$

$I_k$ maximaler Kurzschlussstrom durch die Sperre
$L$ Induktivität der Sperre
$\omega$ Kreisfrequenz

*Ableiterschutz für gekapselte $SF_6$-Anlagen (GIS)*

In Systemen mit niederohmiger Sternpunkterdung haben MO-Ableiter bei sehr steilen Überspannungsvorgängen ein tieferes Schutzniveau als konventionelle. Sie eignen sich daher zum Schutz von GIS besonders gut. In gewissen Fällen sind noch gekapselte Ableiter innerhalb der Anlage notwendig. Ihr Bedarf hängt ab von der
- Amplitude und Steilheit der freileitungsseitig ankommenden Überspannungswelle
- Schutzcharakteristik der freileitungsseitigen Überspannungsableiter
- Länge und Stossimpedanz der $SF_6$-Anlage
- Stosshaltespannung der Anlage bzw. der zu schützenden Transformatoren

*Ableiter bei Umgebungstemperaturen über 40 °C*

Bei höheren Betriebstemperaturen als 40 °C bzw. 45 °C ohne Sonneneinstrahlung muss für $U_c$ ein höherer Wert gewählt werden: pro 5 °C Temperaturerhöhung ist $U_c$ um 2...3% zu vergrössern.

## 11. Schlussbetrachtung

Der hohe Entwicklungsstand der MO-Technik erlaubt die Herstellung von Widerständen mit sehr starker Nichtlinearität. Prüfungen und Felderfahrungen zeigen, dass die Stabilitätsfragen gelöst sind.

Es steht ausser Frage, dass der MO-Ableiter im Mittelspannungsnetz einen ausgezeichneten Überspannungsschutz ermöglicht.

Im Hochspannungsnetz mit isoliertem Sternpunkt bietet der konventionelle Ableiter mit magnetisch beblasenen Funkenstrecken bei Blitzüberspannungen einen rund 25% besseren Schutz. In diesen Netzen wird der MO-Ableiter daher hauptsächlich dort Verwendung finden, wo sein grosses Energieaufnahmevermögen Vorteile bringt. Im Netz mit isoliertem Sternpunkt und mit Erdschlussschutz hingegen ist der MO-Ableiter dem konventionellen überlegen, weshalb er hier den konventionellen Ableiter bereits verdrängt hat.

Im Hochspannungsnetz mit niederohmig geerdetem Sternpunkt sind die temporären betriebsfrequenten Überspannungen für die Dimensionierung der Ableiter massgebend. Höhe und Dauer dieser Überspannungen verhalten sich der Festigkeit $T$ der MO-Ableiter (Fig. 5) sehr ähnlich: hohe Überspannungen währen nur kurzzeitig, länger dauernde netzfrequente Überspannungen sind relativ klein von Betrag. Dies erlaubt die Realisierung eines wesentlich tieferen Schutzniveaus, als es mit den konventionellen Ableitern bisher möglich war. Deshalb wird in diesem Netz der MO-Ableiter die konventionelle Technik bald ersetzen.

Die zulässige Parallelschaltung ermöglicht es, das Energieaufnahmevermögen dieser neuen Generation von Überspannungsableitern so stark zu vergrössern, dass auch die schwierigsten Überspannungsprobleme gelöst werden können. Dieser ausgezeichnete Überspannungsschutz erfordert allerdings eine sehr genaue Kenntnis aller Vorgänge im Netz.