



SIEMENS



[www.siemens.com/energy/arrester](http://www.siemens.com/energy/arrester)

# Metalloxid-Ableiter in Hochspannungsnetzen

Grundlagen

**Autor:**  
Volker Hinrichsen  
3. Auflage

Answers for energy.



## Vorwort zur dritten Auflage

Dieses Ableiterhandbuch erschien erstmalig im Jahr 2001 als erster Teil eines ursprünglich zweiteilig geplanten Buches. Es erfreut sich seitdem großer Beliebtheit und wurde in mehrere Sprachen übersetzt. Jedoch konnte der damals angekündigte zweite Teil aus persönlichen, beruflichen Gründen bis heute nicht fertig gestellt werden. Als Konsequenz daraus ist nun von der Zweiteiligkeit des ursprünglichen Konzepts vorerst Abstand genommen worden. Zum Ausgleich wurden in diese Auflage einige zusätzliche Details mit aufgenommen, die in den ersten beiden Auflagen bewusst weggelassen wurden, um weitgehend deren reinen Grundlagencharakter zu wahren.

Natürlich haben in den Jahren seit 2001 einige Weiterentwicklungen stattgefunden, sowohl die Ableitertechnik als auch die Ableiternormung betreffend. Das hat eine völlige Überarbeitung erforderlich gemacht. Damit liegt mit dem vorliegenden Band nun wieder ein Handbuch über die Grundlagen der Metalloxid-Überspannungsableiter in Hochspannungsnetzen auf dem aktuellen Stand der Technik und der Normung vor. Es sollte einem Anwender, der sich neu in dieses Aufgabengebiet einarbeiten will oder muss, ermöglichen, zunächst ohne weiteres Literaturstudium die wesentlichen Zusammenhänge für die Bemessung oder die Auswahl von Überspannungsableitern zu erkennen und zu verstehen. Für weitergehende Fragestellungen ist dieser Band darüber hinaus um eine Liste jüngerer Literatur über Überspannungsableiter erweitert worden.

Das bewährte Konzept der ersten Auflage wurde unverändert beibehalten. Es werden zunächst einige grundsätzliche Betrachtungen zum Einsatz und zur Wirkungsweise von Überspannungsableitern angestellt. Anschließend werden die konstruktiven Merkmale der mit Abstand am häufigsten eingesetzten Ableiter – solchen für Freiluftanwendungen in Hoch- und Mittelspannungsnetzen – beschrieben. Es schließt sich ein ausführlicher Teil zur systematischen Vorgehensweise bei der elektrischen und mechanischen Auslegung eines Ableiters an. Dieser wird durch konkrete Auslegungsbeispiele abgerundet. Den Abschluss bilden schließlich ein Kapitel über die im Zusammenhang mit Überspannungsableitern oder deren Einsatz derzeit vorliegenden Normen sowie ein Begriffserklärungsteil, der auch für sich alleine als Nachschlagewerk dienen kann.

Es soll an dieser Stelle auch darauf hingewiesen werden, dass sich die Ableiternormung derzeit wieder einmal in einem großen Umbruch befindet. Wesentliche Änderungen der nächsten Ausgabe (Edition 3.0) der Ableiterprüfvorschrift IEC 60099-4 werden die Definitionen und Prüfanforderungen des Energieaufnahmevermögens betreffen. Die amerikanische Ableiterprüfvorschrift IEEE C62.11 geht einen ähnlichen Weg. Damit wird vielleicht bereits in wenigen Jahren eine erneute Überarbeitung dieses

Handbuchs erforderlich sein. Solange soll und wird es aber hoffentlich allen Betroffenen und Interessierten gute Dienste leisten.

Allen, die durch wertvolle Hinweise, Kritik und Diskussionen zur Entstehung und Weiterentwicklung dieses Handbuches beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Kritik und Anregungen zur Verbesserung des Handbuches sind wie immer jederzeit willkommen.

Berlin und Darmstadt, im September 2011

Reinhard Göhler  
Siemens AG  
E T HP AR  
D-13623 Berlin  
[arrester@siemens.de](mailto:arrester@siemens.de)

Volker Hinrichsen  
TU Darmstadt  
Fachgebiet Hochspannungstechnik  
D-64283 Darmstadt  
[hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de](mailto:hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de)

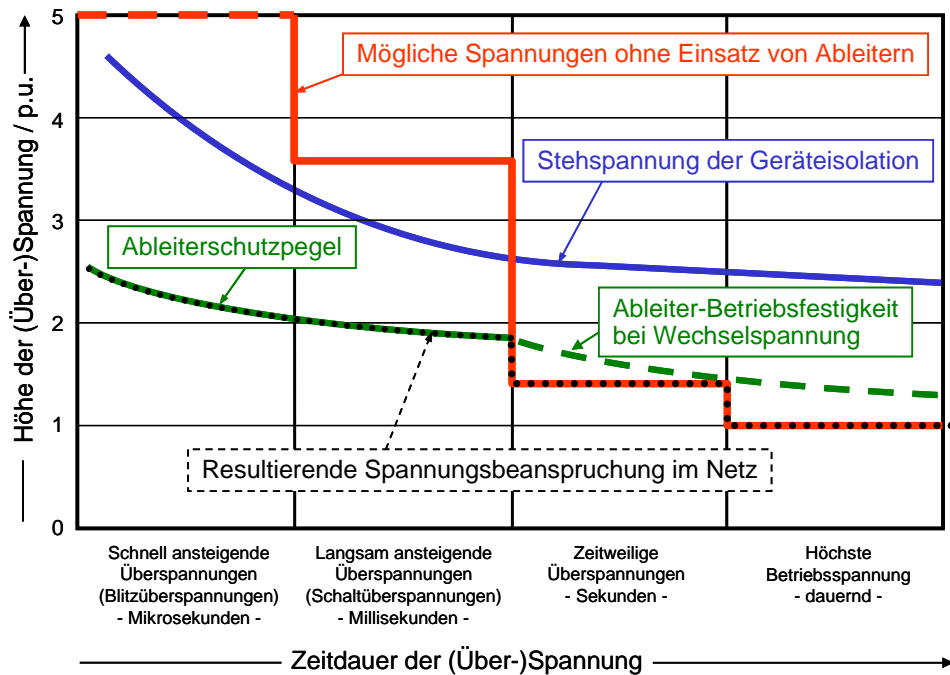
## Inhalt

Vorwort zur dritten Auflage .....	1
Inhalt .....	3
Aufgabe und Wirkungsweise von MO-Ableitern.....	5
Konstruktiver Aufbau von MO-Ableitern .....	18
Auslegung von MO-Ableitern .....	37
Auswahl der Dauerspannung $U_c$ und der Bemessungsspannung $U_r$ .....	39
Auswahl des Nenn-Ableitstoßstromes $I_n$ .....	43
Auswahl der Leitungsentladungsklasse .....	45
Auswahl und Überprüfung der Schutzpegel .....	49
Auswahl des Gehäuses.....	52
Betriebsbedingungen .....	62
Beispiele .....	62
Beispiel 1: "110-kV-Netz mit Erdschlusskompensation" .....	64
Beispiel 2: "220-kV-Netz mit direkter Sternpunktterdung" .....	66
Beispiel 3: "380-kV-Netz mit direkter Sternpunktterdung; Industrieverschmutzung" .....	68
Beispiel 4: "20-kV-Netz mit Erdschlusskompensation oder isoliertem Sternpunkt" .....	70
Ableiter zum Schutz von Transformator-Sternpunkten .....	72
Vorschriften .....	73
Weiterführende Literatur .....	79
Anhang: Ableitertechnik in Stichworten .....	83



## Aufgabe und Wirkungsweise von MO-Ableitern

Überspannungsableiter – oder kurz Ableiter – stellen ein unentbehrliches Hilfsmittel der [Isolationskoordination](#)<sup>1</sup> in elektrischen Energieversorgungsnetzen dar. **Bild 1** verdeutlicht das. Dort sind schematisch die in Hochspannungsnetzen auftretenden Spannungen, bezogen auf den Scheitelwert der höchsten dauernd auftretenden Leiter-Erde-Spannung<sup>2</sup>, in Abhängigkeit von der Zeitdauer ihres Auftretens dargestellt.



**Bild 1:** Schematische Darstellung der Höhe der in elektrischen Hochspannungsnetzen auftretenden Spannungen und Überspannungen in Abhängigkeit von der Zeitdauer ihres Auftretens ( $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3}$ ), mit und ohne Überspannungsableiter

Die Zeitachse ist grob unterteilt in den Bereich der [schnell ansteigenden Überspannungen](#) (im allgemeinen [Blitzüberspannungen](#)) im Mikrosekunden-Bereich, der [langsam ansteigenden Überspannungen](#) (im allgemeinen [Schaltüberspannungen](#)) im Millisekundenbereich<sup>3</sup>, der [zeitweiligen oder temporären Überspannungen](#) ("TOV"; temporary overvoltages) im Sekundenbereich und schließlich der zeitlich unbegrenzt

<sup>1</sup> Unterstrichene Begriffe werden im Anhang näher erläutert. In der elektronischen Version des Handbuchs können die Begriffe durch Anklicken mit dem Mauszeiger direkt angesprungen werden.

<sup>2</sup>  $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3}$

<sup>3</sup> Der besseren Lesbarkeit wegen sollen die "schnell ansteigenden Überspannungen" im Weiteren kurz als "Blitzüberspannungen" und die "langsam ansteigenden Überspannungen" kurz als "Schaltüberspannungen" bezeichnet werden, obwohl diese Gleichsetzung nach der Vorschrift zur Isolationskoordination, IEC 60071-1, nicht völlig korrekt ist.

auftretenden, höchsten Betriebsspannung. Die möglichen, ohne Einsatz von Ableitern auftretenden Spannungen bzw. Überspannungen können Werte von mehreren p.u. annehmen. Betrachtet man dagegen den Kurvenverlauf der [Stehspannung](#) der Geräteisolation, wobei mit Geräten elektrische Betriebsmittel wie Leistungstransformatoren oder Messwandler gemeint sind, so erkennt man, dass beginnend im Bereich der Schaltüberspannungen<sup>1</sup>, insbesondere aber im Bereich der Blitzüberspannungen die Geräteisolation den auftretenden Spannungshöhen nicht mehr gewachsen ist. Hier greifen die Ableiter ein. Durch ihren Einsatz wird sichergestellt, dass die an den Anschlussklemmen der Betriebsmittel auftretenden Spannungen jederzeit – bei Einhaltung eines angemessenen Sicherheitsabstandes – unterhalb der Stehspannung verbleiben. Ihre Wirkung erstreckt sich also auf die Begrenzung der Höhe von Blitz- und Schaltüberspannungen. Jedoch können und sollen Ableiter im Allgemeinen keine zeitweiligen Überspannungen begrenzen. Vielmehr müssen sie dafür ausgelegt sein, diesen, wie auch der Dauerbetriebsspannung, standzuhalten, ohne selbst Schaden zu nehmen. Das ist in Bild 1 durch den rechten, gestrichelten Teil der Ableiterkurve dargestellt, in dem die Ableiter genau wie die übrigen Geräte im Netz eine genügende, oberhalb der Beanspruchungen liegende Betriebsfestigkeit aufweisen müssen.

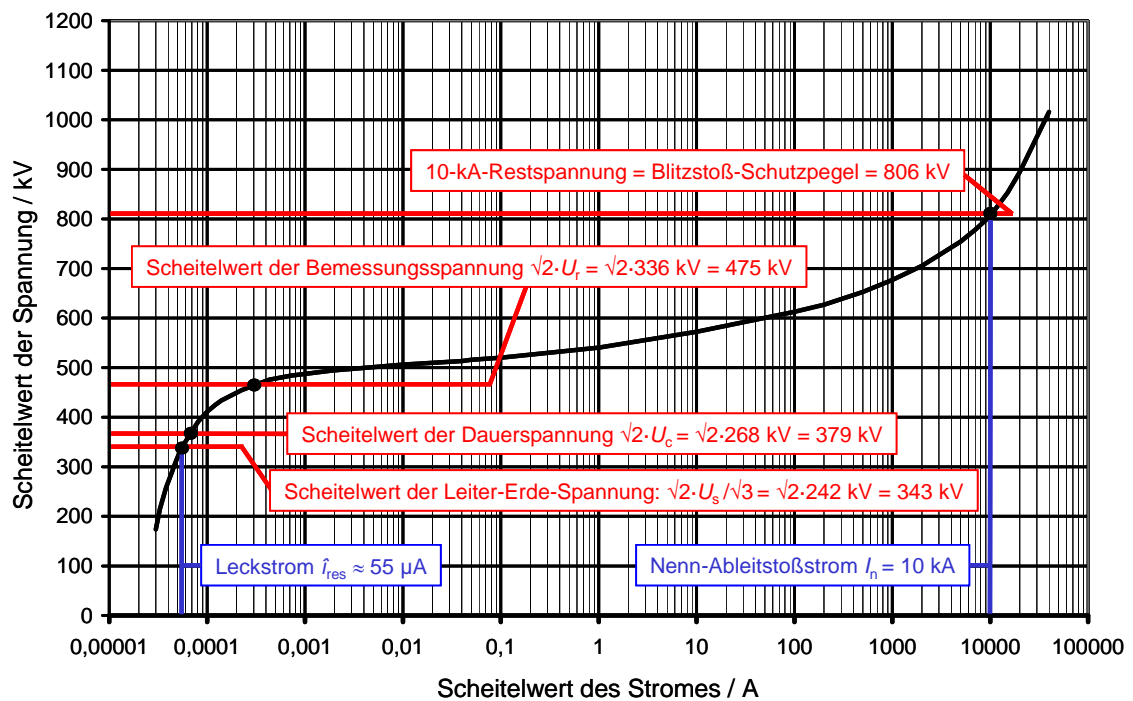
Als Ableiter sind zwar immer noch [Funkenstreckenableiter](#) mit Ableitwiderständen aus [Siliziumkarbid \(SiC\)](#) im Einsatz, für den Neueinsatz kommen heute jedoch nur noch funkenstreckenlose [Metalloxid-\(MO-\)Ableiter](#), das heißt Ableiter mit Ableitwiderständen aus Metalloxid ([Metalloxid- oder MO-Widerständen](#)) zur Anwendung. Die charakteristische Eigenschaft eines MO-Widerstandes ist seine extrem nicht-lineare [Spannungs-Strom- oder U-I-Kennlinie](#), die eine Abtrennung des Widerstandes durch Serienfunkenstrecken vom Netz, wie sie bei den Ableitern mit SiC-Widerständen noch zwingend erforderlich war, überflüssig macht. Die im Bereich der möglichen anliegenden betriebsfrequenten Spannungen fließenden Ströme sind so klein, dass der Ableiter sich fast wie ein Isolator verhält. Werden dem Ableiter dagegen [Stoßströme](#) im Kiloampere-Bereich eingepreßt, wie es beim Auftreten von Blitz- oder Schaltüberspannungen der Fall ist, bleibt die resultierende Spannung an seinen Anschlussklemmen niedrig genug, um die Isolation der zugeordneten Betriebsmittel vor den Auswirkungen der Überspannungen zu schützen.

---

<sup>1</sup> Schaltüberspannungen spielen in den Verteilungs- und unteren Übertragungsspannungsebenen nur eine untergeordnete Rolle, gewinnen aber in den hohen und höchsten Spannungsebenen mit zunehmender Höhe der Netzennspannung an Bedeutung.



Ein Beispiel für die  $U$ - $I$ -Kennlinie eines typischen, zwischen Leiter und Erde angeschlossenen MO-Ableiters in einem 420-kV-Netz mit [direkter Sternpunktterdung](#) zeigt **Bild 2**. Auf der Ordinate sind Spannungsscheitelwerte in linearem, auf der Abszisse Stromscheitelwerte in logarithmischem Maßstab aufgetragen. Die Kennlinie erstreckt sich in der gezeigten Darstellung über einen Strombereich von 50  $\mu$ A bis 50 kA, das heißt über neun Zehnerpotenzen. Um mit ihr vertraut zu werden, sollen im Folgenden – auf der Kennlinie von links nach rechts gehend – einige wichtige Begriffe erläutert werden.



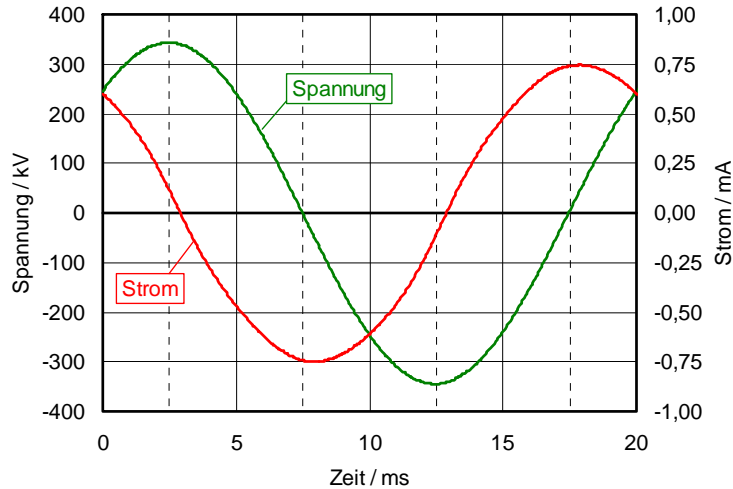
**Bild 2:**  $U$ - $I$ -Kennlinie eines MO-Ableiters für ein direkt geerdetes 420-kV-Netz

Die im Betrieb mögliche, dauernd am Ableiter anliegende Wechselspannung ist die höchste Leiter-Erde-Spannung des Netzes. Ihr Scheitelwert beträgt in diesem Fall:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3} = \sqrt{2} \cdot 420 \text{ kV} / \sqrt{3} = 343 \text{ kV}^1$$

Dabei fließt durch den Ableiter der sogenannte [Leckstrom](#). Dieser setzt sich aus einer großen kapazitiven und einer wesentlich kleineren resistiven Komponente zusammen. Insgesamt ist der Leckstrom also – wie auch in **Bild 3** zu erkennen – überwiegend kapazitiv. In der  $U$ - $I$ -Kennliniendarstellung wird jedoch ausschließlich die resistive Kompo-

<sup>1</sup> Es ist für die Ableiterauslegung äußerst wichtig, nicht von der [Nennspannung](#)  $U_n$  des Netzes (in diesem Fall also 380 kV), sondern von der [höchsten Betriebsspannung](#)  $U_s$  auszugehen.



**Bild 3:** Verläufe von Spannung und Leckstrom bei Betrieb des Beispielableiters von Bild 2 an der Leiter-Erde-Spannung ( $U_s = 420 \text{ kV}$ )

nente dargestellt. Sie beträgt in diesem Beispiel  $\hat{i}_{\text{res}} \approx 55 \mu\text{A}$ , während der Gesamtstrom einen Scheitelwert von etwa  $0,75 \text{ mA}$  aufweist.

Der nächste Kennlinienpunkt von Bedeutung ist die **Dauerspannung** des Ableiters. Für diese wird nach **IEC** das Formelzeichen  $U_c$  verwendet, im angloamerikanischen Raum ist der Begriff **MCOV** (Maximum Continuous Operating Voltage) üblich. Sie ist die betriebsfrequente Spannung, an der der Ableiter dauernd, ohne irgendwelche Einschränkungen, betrieben werden können muss. Sämtliche in der Typprüfung nachgewiesenen Eigenschaften des Ableiters gelten unter der Annahme, dass dieser an einer Spannung in Höhe seiner Dauerspannung liegt. Wie aus Bild 2 ersichtlich, ist die Dauerspannung höher als die höchste dauernd auftretende Leiter-Erde-Spannung. Empfohlen wird ein Zuschlag von mindestens 5% (IEC 60099-5). Damit soll vor allem möglichen Oberschwingungen in der Netzspannung Rechnung getragen werden. Im gewählten Beispiel weist der Ableiter eine Dauerspannung von  $U_c = 268 \text{ kV}$  auf, die damit knapp 11 % über der höchsten dauernd möglichen Leiter-Erde-Spannung liegt<sup>1</sup>.

Etwas irreführend ist der Name des nächsten Kennlinienpunktes. Die **Bemessungsspannung** (Formelzeichen:  $U_r$ ) eines MO-Ableiters ist nicht, wie man zunächst vermuten mag, eine Spannung, die für zeitlich unbegrenzte Dauer an den Ableiter angelegt werden darf (dies ist die bereits erläuterte Dauerspannung). Vielmehr charakterisiert sie die Fähigkeit des Ableiters, mit zeitweiligen Überspannungen im Netz umzugehen. Sie

<sup>1</sup> Die Wahl einer höheren als der mindestens erforderlichen Dauerspannung kommt der Stabilität des Ableiters im Dauerbetrieb zugute; siehe Abschnitt "Auslegung von MO-Ableitern".

darf nur zeitlich begrenzt – normgemäß für eine Dauer von 10 Sekunden – anliegen. Einige Hersteller lassen auch eine Zeit von 100 Sekunden zu. Die Kennlinie zeigt, dass unter diesen Bedingungen ein Leckstrom (genauer: dessen resistive Komponente) von ca. 300  $\mu\text{A}$  fließt. Dies würde bei dauerndem Betrieb bereits zu einer erhöhten Betriebstemperatur des Ableiters führen, allerdings noch nicht innerhalb von zehn und auch nicht von hundert Sekunden. Die zeitliche Begrenzung hat ihre eigentliche Ursache darin, dass der Ableiter, nachdem er zum Beispiel einen Stoßstrom nach Erde abgeleitet hat (nachdem er also "arbeiten" musste), stark erwärmt ist und dann der Leckstrom auf Grund seines positiven Temperaturkoeffizienten um ein Vielfaches ansteigt (die Temperaturabhängigkeit der  $U$ - $I$ -Kennlinie ist in der vereinfachten Darstellung von Bild 2 nicht gezeigt). In diesem Fall könnte ein längeres Anliegen der Bemessungsspannung dazu führen, dass der Ableiter nicht mehr abkühlen kann, sondern [thermisch instabil](#) wird und sich bis zur Selbstzerstörung weiter aufheizt.

Die Bemessungs- und die Dauerspannung eines Ableiters stehen in einem festen Verhältnis zueinander. Dieses hat, fast ausnahmslos und herstellerunabhängig<sup>1</sup>, einen Wert von 1,25. In dem gewählten Beispiel beträgt die Bemessungsspannung damit  $U_r = 1,25 \cdot U_c \approx 336 \text{ kV}$ <sup>2</sup>.

Damit ist der für betriebsfrequente Spannungen interessierende Bereich der  $U$ - $I$ -Kennlinie zunächst beschrieben. Die Kennlinie geht nun in einen Bereich über, in dem bereits geringfügige Spannungserhöhungen zu erheblichen Anstiegen des Stromes führen. Er ist den transienten Vorgängen im Zeitbereich von Milli- und Mikrosekunden, also den Schalt- und den Blitzüberspannungen vorbehalten. Ein dauerndes Anlegen betriebsfrequenter Spannung in diesem Kennlinienbereich würde zur Zerstörung des Ableiters in Sekundenbruchteilen führen.

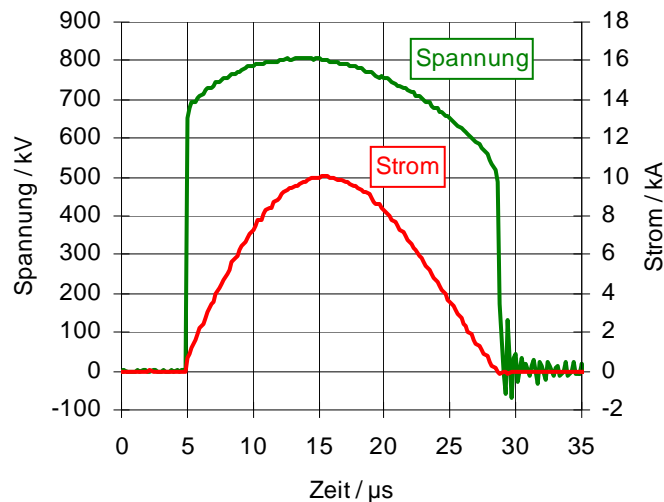
Die Kennlinie im Bereich von Strömen größer als etwa 100 A beschreibt die Schutzcharakteristik des Ableiters. Deren wichtigste Kenngröße ist der in Bild 2 eingetragene [Blitzstoß-Schutzpegel](#). Damit wird diejenige Spannung bezeichnet, die zwischen den Ableiterklemmen abfällt, wenn durch den Ableiter sein [Nenn-Ableitstoßstrom](#) fließt. Letzterer ist ein [Blitzstoßstrom](#) von genormtem zeitlichen Verlauf, dessen Amplitude nach der Vorschrift IEC 60099-4 in unterschiedliche Klassen von 1,5 kA bis 20 kA ein-

---

<sup>1</sup> Trotzdem gibt es für dieses Verhältnis keine unmittelbare einfache physikalische Begründung. Es ergibt sich rein empirisch.

<sup>2</sup> Durch Rundung treten bei dieser Rechnung Abweichungen bis zu 1 kV auf, siehe dazu die Auslegungsbeispiele am Ende des Handbuchs.

geteilt wird. Für Hochspannungsableiter (in Netzen mit  $U_s \geq 72,5$  kV) sind nur die beiden Klassen 10 kA und 20 kA üblich, für Mittelspannungsableiter ( $U_s \leq 52$  kV) ist auch der Wert von 5 kA von großer Bedeutung. Über die Eigenschaften des Ableiters sagt der Wert des Nenn-Ableitstoßstromes allerdings nur wenig aus. Zwei "10-kA-Ableiter" können sehr stark voneinander abweichende Eigenschaften haben. Der Nenn-Ableitstoßstrom kann daher bei der Auswahl eines Ableiters auch nicht für sich allein betrachtet werden. Für das Beispiel in Bild 2 wurde ein 10-kA-Ableiter gewählt. Damit bedeutet die Aussage "Blitzstoß-Schutzpegel = 806 kV": zwischen den Klemmen dieses Ableiters fällt eine Spannung von maximal 806 kV ab, wenn durch ihn ein Blitzstoßstrom von 8  $\mu$ s Stirnzeit, 20  $\mu$ s Rückenhalbwertzeit und einem Scheitelwert von 10 kA fließt. Die Verhältnisse sind in **Bild 4** noch einmal dargestellt.



**Bild 4:** Restspannung des Beispielableiters von Bild 2 ( $U_r = 336$  kV) bei Fließen des Nenn-Ableitstoßstromes von 10 kA

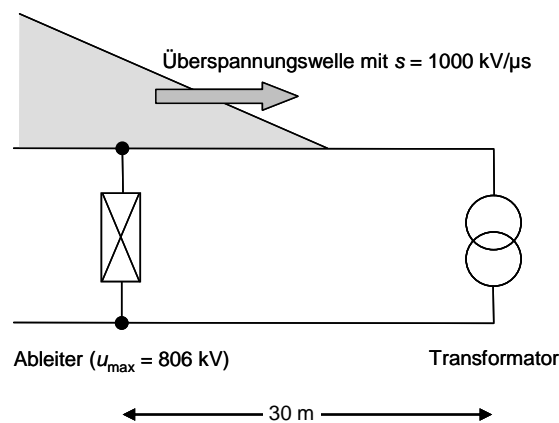
Ein Blitzstoß-Schutzpegel von 806 kV heißt, dass sich der Scheitelwert der Ableiterklemmenspannung während eines Ableitvorganges, ausgehend vom Normalbetrieb an Leiter-Erde-Spannung, um einen Faktor von nur etwa 2,35 erhöht (806 kV gegenüber 343 kV), während gleichzeitig die Stromamplitude um gut acht Zehnerpotenzen ansteigt (von 55  $\mu$ A auf 10 kA). Dies belegt die extreme Nichtlinearität der MO-Ableiter-Kennlinie.

Betriebsmittel im 420-kV-Netz haben üblicherweise eine [Bemessungs-Blitzstoßspannung](#)<sup>1</sup> (LIWW) von 1425 kV. Dieser (Prüfspannungs-)Wert darf in der Praxis allerdings

<sup>1</sup> Häufig wird in diesem Zusammenhang vom BIL – dem basic lightning impulse insulation level – gesprochen. Dieser Begriff aus den US-amerikanischen Vorschriften ist jedoch in den IEC-Vorschriften

nie erreicht werden. Entsprechend der Anwendungsrichtlinie zur Isolationskoordination, IEC 60071-2, sollte im Falle nicht-selbstheilender Isolation die höchste im Betrieb auftretende Spannung um einen Faktor von 1,15 darunter bleiben, also einen Wert von 1239 kV nicht überschreiten. Trotzdem scheint der Blitzstoß-Schutzpegel von 806 kV des Beispielableiters zunächst einmal mehr als ausreichend Sicherheit zu bieten. Es sei hier aber darauf hingewiesen, dass dieser Wert eine Spannung *an den Ableiterklemmen* darstellt, verursacht durch das Fließen eines idealen, genormten Prüfstromes in Höhe des Nenn-Ableitstoßstromes. Drei wesentliche Ursachen können die Spannung *an den Klemmen des zu schützenden Betriebsmittels* weitaus höhere Werte annehmen lassen:

- a) **Wanderwellenvorgänge:** Schnell ansteigende Überspannungen breiten sich in Form von Wanderwellen auf der Leitung aus. An Stellen, an denen sich der Wellenwiderstand der Leitung ändert, treten Brechungen und Reflexionen auf. Insbesondere gilt für ein offenes Leitungsende, dass eine Spannungswelle dort vollständig positiv reflektiert wird. Die Spannungshöhe zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort der Leitung ergibt sich aus der Summe der jeweiligen Augenblickswerte aller einzelnen Spannungswellen. Am offenen Leitungsende verdoppelt sie sich damit. Ein angeschlossener Transformator wirkt näherungsweise wie ein offenes Leitungsende, da seine Wicklungsinduktivität für schnelle Vorgänge einen gegenüber dem Wellenwiderstand der Leitung sehr großen Widerstand aufweist. Was das für Folgen hat, soll an einem vereinfachten Beispiel erläutert werden (**Bild 5**). Eine Überspannungswelle mit einer Stirnsteilheit von 1000 kV/μs laufe auf den Transformator zu. Die



**Bild 5:** Beispielanordnung zur Erläuterung des Schutzbereiches von Ableitern  
(Erläuterungen siehe Text)

nicht definiert (siehe Erläuterungen zum BIL im Anhang). Nach IEC ist der korrekte Term "standard rated lightning impulse voltage" mit der Abkürzung LIWV.

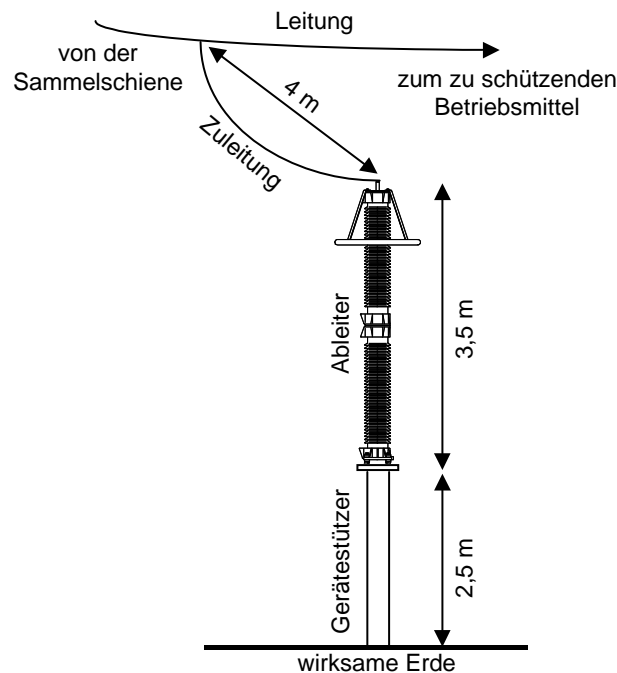
Ausbreitungsgeschwindigkeit einer solchen Welle auf einer Leitung in Luft, wie in diesem gewählten Beispiel, ist die Lichtgeschwindigkeit, das heißt 300.000 km/s beziehungsweise 300 m/ $\mu$ s. Als Ableiter wird ein idealisierter Ableiter angenommen, der sich bis zu einer Spannungshöhe von 806 kV wie ein idealer Isolator verhält, höhere Überspannungen aber exakt auf einen Wert von 806 kV begrenzt. Die Überspannungswelle passiert zunächst den Ableiter und erreicht 0,1  $\mu$ s später – nach der Laufzeit auf der 30 m langen Strecke zwischen Ableiter und Transformator – den Transformator. Zu diesem Zeitpunkt hat die Spannung am Ableiter einen Wert von  $1000 \text{ kV}/\mu\text{s} \cdot 0,1 \mu\text{s} = 100 \text{ kV}$  erreicht, der Ableiter verhält sich also noch wie ein Isolator. Am Transformator wird die ankommende Welle reflektiert, es läuft von dort deshalb eine zusätzliche Spannungswelle derselben Form und Polarität wieder zurück. Die Überlagerung beider Wellen führt dazu, dass die Spannung am Transformator mit doppelter Steilheit, also mit  $2000 \text{ kV}/\mu\text{s}$  ansteigt. Nach weiteren 0,1  $\mu$ s weist die Spannung dort somit einen Wert von 200 kV auf. Gleichzeitig hat die reflektierte Welle den Ableiter erreicht, an dem die Spannung bis zu diesem Zeitpunkt mit der ursprünglichen Steilheit angestiegen war und daher inzwischen auch einen Wert von 200 kV erreicht hat. Von nun an überlagern sich auch am Ableiter hin- und rücklaufende Welle. Sowohl hier als auch am Transformator steigen ab jetzt die Spannungen mit einer Steilheit von  $2000 \text{ kV}/\mu\text{s}$  an. Die Verhältnisse ändern sich erst wieder, wenn die Spannung am Ableiter dessen Begrenzungswert von 806 kV erreicht hat. Gemäß der eingangs getroffenen Annahme kann sie keine höheren Werte annehmen. Dies lässt sich nach den Gesetzmäßigkeiten der Wanderwellenausbreitung nur erreichen, indem vom Ableiter von nun an nach beiden Seiten je eine negative Spannungswelle mit einer Steilheit von  $2000 \text{ kV}/\mu\text{s}$  ausgeht. Die vorzeichenrichtige Überlagerung der ursprünglichen mit der vom Transformator reflektierten und der nun wiederum vom Ableiter reflektierten Wellen führt dazu, dass die Spannung am Ableiter konstant auf einem Wert von 806 kV verbleibt. Es vergehen nun weitere 0,1  $\mu$ s, nämlich wiederum die für die 30 m lange Strecke zwischen Ableiter und Transformator benötigte Laufzeit, bis die vom Ableiter reflektierte, negative Welle den Transformator erreicht. In dieser Zeit ist die Spannung dort aber bereits um weitere 200 kV angestiegen, besitzt also schon einen Wert von 1006 kV. Erst jetzt macht sich der Ableiter am Transformator "bemerkt" und baut die erreichte Spannung wieder ab<sup>1</sup>. Das Beispiel zeigt, dass die Spannung am zu schützenden Be-

---

<sup>1</sup> Da auch die ankommende negative Welle wieder in voller Höhe reflektiert wird, ergibt sich nach der Überlagerung aller Teilwellen am Transformator nicht nur eine Begrenzung der Spannung auf den Wert von 1006 kV, sondern sogar ein Spannungsabbau. Führt man die Rechnung in der beschriebenen Weise

triebsmittel erheblich höher werden kann als am Ableiter. Wie hoch genau, hängt wesentlich vom Abstand zwischen Ableiter und zu schützendem Betriebsmittel und der Steilheit der Spannung ab (das gleiche Beispiel mit doppeltem Abstand und einer nur 10 % höheren Spannungssteilheit gerechnet würde ergeben, dass die genannte maximal zulässige Spannung von 1239 kV am Transformator bereits überschritten würde)<sup>1</sup>. Eine wichtige Erkenntnis aus diesem Beispiel ist somit auch, dass ein Ableiter nur einen begrenzten räumlichen Schutzbereich hat!

- b) **Induktive Spannungsfälle:** Der in **Bild 6** gezeigte Strompfad des Ableitstoßstromes vom Anschlusspunkt des Ableiters an der Leitung bis zur wirksamen Erde hat eine Länge von zehn Metern. Seine Induktivität besitzt bei einem spezifischen Wert von  $1 \mu\text{H}$  je Meter Länge (Richtwert für die Eigeninduktivität eines gestreckten Leiters in großem Abstand zu anderen spannungsführenden oder geerdeten Teilen) einen Wert



**Bild 6:** Typische geometrische Anordnung eines Ableiters in einer 420-kV-Station

fort, stellt sich am Transformator ein schwingender Spannungsverlauf mit einem Maximalwert von 1006 kV ein. In der Praxis werden Höhe und Verlauf der Schwingung allerdings durch verschiedene, hier nicht betrachtete Einflüsse gedämpft.

<sup>1</sup> Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die *Höhe* der ursprünglich einlaufenden Überspannungswelle keinerlei Auswirkung auf den beschriebenen Vorgang hat, sofern sie über dem Schutzpegel des Ableiters liegt!

von 10  $\mu\text{H}$ . Typischerweise muss mit Steilheiten des Blitzstoßstromes von 10  $\text{kA}/\mu\text{s}$  gerechnet werden. Unter diesen Bedingungen fällt an der gezeigten Anordnung eine induktive Spannung von

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} = 10 \mu\text{H} \cdot 10 \text{kA}/\mu\text{s} = 100 \text{kV}$$

ab. Diese tritt zwar nicht unbedingt exakt zeitgleich mit dem Maximum der Ableiterrestspannung auf. Der Wert von 100 kV zeigt aber die Größenordnung von möglichen induktiven Spannungsfällen auf, die sich der Ableiterrestspannung überlagern können.

- c) **Ableitstoßströme höher als der Nenn-Ableitstoßstrom:** Der Schutzpegel des Ableiters ist als seine Restspannung bei Nenn-Ableitstoßstrom definiert. Es können aber durchaus auch höhere Ableitstoßströme fließen. Das wird von dem Ableiter zwar auch unbeschadet überstanden, jedoch fällt dabei entsprechend dem Verlauf der  $U$ - $I$ -Kennlinie eine höhere Restspannung an seinen Klemmen ab (Erhöhung in der Größenordnung von 5% bis 15% bei einer Verdoppelung der Stromamplitude).

Für die Auswahl des Ableiterschutzpegels müssen also Details wie der Abstand des Ableiters vom zu schützenden Betriebsmittel, die spezielle Anlagenkonfiguration oder die typischen Überspannungsbeanspruchungen in der Anlage berücksichtigt werden. Bei nicht zu groß gewählten Abständen führt in der Regel ein Faktor von mindestens 1,4 zwischen der Bemessungs-Blitzstoßspannung des zu schützenden Betriebsmittels und dem Blitzstoß-Schutzpegel des Ableiters zu einem sicheren Schutz gegen schnell ansteigende Überspannungen. In Zweifelsfällen muss jedoch, etwa bei Auftreten von besonders steilen Überspannungen oder bei ungewöhnlich großen Abständen zwischen Ableiter und zu schützendem Betriebsmittel, die Schutzwirkung anhand einer eingehenden Rechnung überprüft werden<sup>1</sup>.

Neben einer Auslegung für stabilen Dauerbetrieb ( $U$ - $I$ -Kennlinie im Leckstrombereich) und der Auswahl ausreichend niedriger Schutzpegel ( $U$ - $I$ -Kennlinie im Hochstrombereich) muss der Ableiter auch noch das für den jeweiligen Einsatzfall erforderliche [Energieaufnahmevermögen](#) besitzen. Dabei sind zwei unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen:

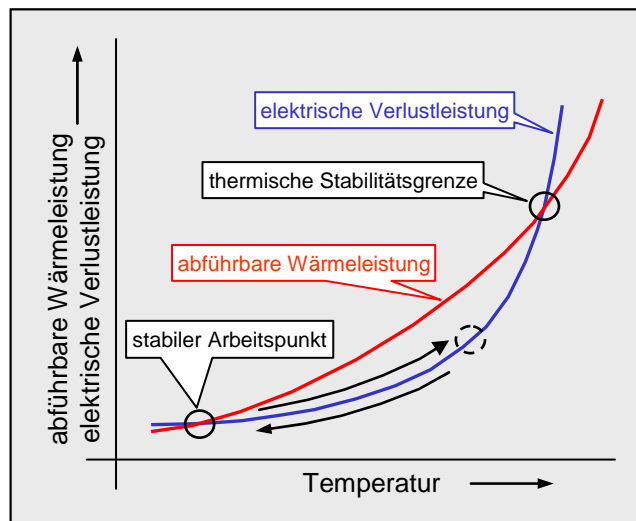
---

<sup>1</sup> Weitere Hinweise dazu finden sich in IEC 60071-2 und IEC 60099-5.



Die während eines einmaligen Ableitvorganges schlagartig in den Ableiter eingebrachte Energie darf einen Wert nicht überschreiten, bei dem die Metalloxid-Widerstände thermomechanisch überlastet werden. Sinnvollerweise spricht man in diesem Zusammenhang vom [Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen](#) des Ableiters. Die Belastbarkeitsgrenze ist dadurch gegeben, dass eine innerhalb weniger Mikro- oder Millisekunden eingebrachte hohe Energie sprungartige Temperaturerhöhungen und damit verbunden extrem hohe mechanische Zug- und Druckbeanspruchungen der Keramik der MO-Widerstände bewirkt. Das kann zu Rissbildung oder im Extremfall sogar zum Bruch der Keramik führen. Zusätzlich unterstützt wird dieser Effekt durch kleinste Inhomogenitäten in der Keramik, die trotz ausgereifter Fertigungstechnologie grundsätzlich unvermeidbar sind. Diese bewirken bei extrem hohen Strom- bzw. Energiedichten lokale, auf engsten Raum beschränkte Überhitzungen der Keramik. Da die Wärme sich nicht schnell genug in das umgebende Material ausbreiten kann, entstehen dabei zusätzliche thermomechanische Spannungen. Ähnlich können heiße Stromkanäle, die sich an Inhomogenitäten ausbilden, einen elektrischen Durchschlag herbeiführen. Weiterhin kann es zu einem äußeren Überschlag kommen. Das Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen ist damit wesentlich eine charakteristische Eigenschaft der in dem Ableiter eingesetzten Metalloxidwiderstände, praktisch unabhängig von der übrigen Ableiterkonstruktion. Es wird so spezifiziert, dass zur tatsächlichen Belastbarkeitsgrenze der Widerstände ein genügend großer Sicherheitsabstand besteht.

Ganz andere Zusammenhänge gelten für das [thermische Energieaufnahmevermögen](#). Dieses ist als diejenige maximal zulässige Energie definiert, die in den Ableiter eingebracht werden kann, so dass er anschließend noch wieder auf seine normale Dauerbetriebstemperatur abkühlen kann. **Bild 7** veranschaulicht die Problematik: die im Ableiter unter Einwirkung der anliegenden betriebsfrequenten Spannung umgesetzte elektrische Verlustleistung ist stark temperaturabhängig. Mit wachsender Temperatur der MO-Widerstände steigt sie überproportional an. Demgegenüber kann der Ableiter konstruktionsbedingt aber nur eine bestimmte Wärmeleistung an die Umgebung abführen. Zwar nimmt auch dieser Wert mit der Temperatur zu, jedoch längst nicht so stark wie die elektrische Verlustleistung. Die beiden Leistungskurven haben zwei gemeinsame Schnittpunkte. Der linke ist ein stabiler Arbeitspunkt. In diesem wird genauso viel Wärme nach außen abgeführt wie in den MO-Widerständen erzeugt wird: es herrscht thermisches Gleichgewicht. Ein Ableitvorgang stört dieses Gleichgewicht. Die eingebrachte Energie erhöht schlagartig die Temperatur, und der Arbeitspunkt wandert, wie in Bild 7 durch einen Pfeil angedeutet, auf der elektrischen Verlustleistungskurve nach rechts. Solange der rechte Schnittpunkt der Kurven nicht erreicht wird, kann die bei dieser Temperatur umgesetzte Verlustleistung mühelos wieder in Form von Wärme-



**Bild 7:** Zur Definition der thermischen Stabilitätsgrenze

leistung abgeführt werden, und der Ableiter kehrt auf den stabilen Arbeitspunkt zurück. Wird jedoch der rechte Schnittpunkt – ein instabiler Arbeitspunkt – überschritten, ist ein Abkühlen nicht mehr möglich. Der Ableiter wird dann thermisch instabil und heizt sich bis zur Selbstzerstörung auf. Dieser Schnittpunkt stellt daher die thermische Stabilitätsgrenze des Ableiters dar. Das thermische Energieaufnahmevermögen wird so angegeben, dass die damit verbundene Temperaturerhöhung den Ableiter auf eine Temperatur bringt, die zur thermischen Stabilitätsgrenze einen ausreichenden Sicherheitsabstand aufweist. Die thermische Stabilitätsgrenze liegt, von Konstruktion zu Konstruktion unterschiedlich, bei Werten von etwa 190 °C bis 220 °C.

Beide bisher genannten Definitionen des Energieaufnahmevermögens sind so nicht in den Vorschriften genormt. Nach der für Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken maßgeblichen Vorschrift IEC 60099-4 wird das Energieaufnahmevermögen einzig über die sogenannte Leitungsentladungsklasse beschrieben. Deren Definition ist jedoch kompliziert. Indirekt handelt es sich dabei um das thermische Energieaufnahmevermögen. Darauf wird später in diesem Kapitel noch ausführlich eingegangen<sup>1</sup>.

Zum Energieaufnahmevermögen ist abschließend zu sagen, dass Ableiter üblicherweise dafür ausgelegt sind, nur einen Bruchteil der durch einen Blitzeinschlag in eine Freileitung eingebrachten Ladung nach Erde abzuführen. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die auf der Freileitung entstehende Überspannung ein oder mehrere

<sup>1</sup> Das System der Leitungsentladungsklassen ist gegenwärtig in der Diskussion. Vermutlich wird in der nächsten Ausgabe der IEC 60099-4 dieses System aufgegeben, und stattdessen werden rein ladungs- und energiebasierte Definitionen eingeführt, systematisch differenziert nach thermischer und nach Impulsbeanspruchung.

Leitungsisolatoren überschlagen. Der größte Teil der Ladung wird über die Überschlagskanäle gegen Erde abgeführt. In die Stationen (Schaltanlagen, Umspannwerke) laufen nur noch die auf die Höhe der Isolatorüberschlagsspannung begrenzten Überspannungen und über den Wellenwiderstand der Leitung damit verknüpfte Ströme mit entsprechend reduziertem Ladungsinhalt ein. Nur diese müssen von den Ableitern in der Station weiter begrenzt bzw. die darin enthaltene Ladung abgeführt werden.

In den Mittelspannungsnetzen sind die Ableiter meist direkt im Zuge der Freileitung angeordnet, etwa an Maststationen oder Kabelendverschlüssen. Hier kann es gelegentlich dazu kommen, dass ein Blitz so dicht an einem Ableiter einschlägt, dass der Ableiter durch überschlagende Isolatoren nicht oder nur wenig entlastet wird. Man spricht in diesem Fall von einem [ableiternahen Blitzeinschlag](#). Dieser ist eine häufige Ursache für Ableiterausfälle in Mittelspannungsnetzen. In Hochspannungsnetzen versucht man diesen Fall dadurch zu vermeiden, dass in unmittelbarer Nähe von Stationen der Erdseilenschutz verbessert wird, beispielsweise durch Verlegen von doppelten Erdseilen. Ableiternahe Blitzeinschläge treten deshalb in Verbindung mit Hochspannungsableitern praktisch nicht auf. Dementsprechend sind deren Ausfallraten um etwa eine Größenordnung niedriger als die von Mittelspannungsableitern.

## Konstruktiver Aufbau von MO-Ableitern

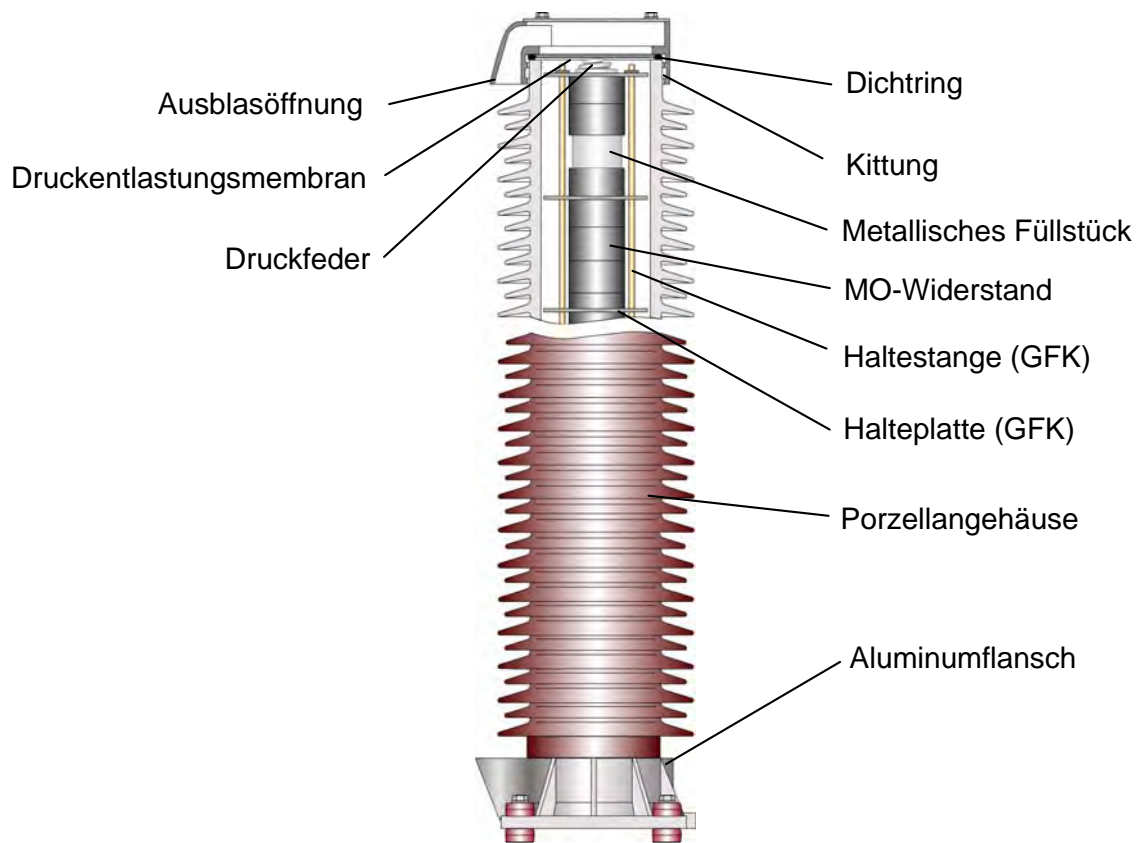
Dieses Kapitel beschreibt den grundsätzlichen konstruktiven Aufbau von MO-Ableitern. Von den vielen Möglichkeiten, Ableiter aufzubauen, sind zu Gunsten der Übersichtlichkeit bewusst nur einige wenige Beispiele ausgewählt, an denen das Prinzip verständlich wird.

Der Fortfall der bei den Funkenstreckenableitern noch notwendigen Serienfunkenstrecken hat die Konstruktion von Ableitern erheblich vereinfacht. Bestimmte Bauformen von Ableitern mit Kunststoffgehäuse sind überhaupt erst durch die Einführung der funkenstreckenlosen Metalloxidtechnik möglich geworden. Der wesentliche Fortschritt liegt darin, dass in einem MO-Ableiter nur noch ein einziges "aktives" Element, nämlich die Säule von MO-Widerständen, wirksam ist. An die MO-Widerstände werden allerdings entsprechend hohe Anforderungen gestellt, da sie sämtliche Funktionen, die im Funkenstreckenableiter auf verschiedene Komponenten aufgeteilt waren, allein übernehmen müssen. So sollen sie unter der Einwirkung der dauernd anliegenden Betriebsspannung alterungsstabil sein, die während eines Ableitvorganges umzusetzenden Energien aufnehmen bzw. Ladungen abführen und anschließend den Folgestrom (Leckstrom) auf für den stabilen Betrieb ungefährlich niedrige Werte begrenzen können. Damit kommt der Entwicklung der MO-Widerstände und ihrer Fertigungstechnologie (die Herstellung von MO-Widerständen ist wesentlich komplizierter als die von SiC-Widerständen) hohe Bedeutung zu. Darauf wird aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Hier soll es ausschließlich um den konstruktiven Aufbau von MO-Ableitern gehen.

**Bild 8** zeigt im Schnitt ein [Bauglied](#) eines MO-Ableiters mit Porzellangehäuse für den Einsatz in Hochspannungsnetzen. Die **MO-Widerstandssäule** mitsamt der zugehörigen Stützkonstruktion bildet den eigentlichen [Aktivteil](#) des Ableiters. Die Säule besteht aus einzelnen, übereinandergestapelten MO-Widerständen. MO-Widerstände werden fast ausnahmslos in zylindrischer Form gefertigt (**Bild 9**)<sup>1</sup>. Ihr Durchmesser bestimmt maßgeblich das Energieaufnahmevermögen, die Strombelastbarkeit und den Schutzpegel. Er liegt im Bereich von etwa 30 mm für den Einsatz in Mittelspannungsnetzen bis zu 100 mm und mehr für Hoch- und Höchstspannungsnetze und Sonder-

---

<sup>1</sup> Einige – vor allem japanische – Hersteller verwenden auch Bauformen mit Mittelloch, ähnlich der Form eines Toroids ("Donuts"). Für Niederspannungsvaristoren sind außerdem quadratische Bauformen bekannt.



**Bild 8:** Schnitt durch ein Bauglied eines MO-Ableiters mit Porzellanengehäuse

anwendungen, für die ein hohes Energieaufnahmevermögen gefordert ist<sup>1</sup>. Bei besonders hohen Forderungen werden Aktivteile auch mehrsäulig, das heißt mit parallelgeschalteten MO-Widerständen ausgeführt.

Die Höhe von MO-Widerständen variiert von etwa 20 mm bis 45 mm. Sie ist im wesentlichen fertigungsbedingt und hängt von den vorhandenen Werkzeugen und Fertigungseinrichtungen ab. Allerdings lässt sie sich nicht beliebig steigern, da mit zunehmender Höhe (wie auch mit zunehmendem Durchmesser) die Homogenität des Widerstandsmaterials in der Fertigung immer schwerer zu kontrollieren ist. Diese entscheidet aber wesentlich mit über das Energieaufnahmevermögen und vor allem über die Reproduzierbarkeit der spezifizierten technischen Daten.

<sup>1</sup> Eigentlich ist natürlich das Volumen der MO-Widerstände die bemessende Größe. Für einen gegebenen Schutzpegel eines Ableiters liegt aber die Länge der MO-Widerstandssäule in etwa fest, so dass das Energieaufnahmevermögen nur noch über den Durchmesser der MO-Widerstände beeinflusst werden kann.

Die  $U$ - $I$ -Kennlinie eines MO-Widerstandes oder auch eines kompletten MO-Ableiters lässt sich auf die [Feldstärke-Stromdichte-Kennlinie](#) ( $E$ - $J$ -Kennlinie) des zugrunde liegenden Materialsystems, das abhängig von den Inhaltsstoffen und der Fertigungstechnologie ist, zurückführen. Man erhält sie einfach durch Multiplikation der Feldstärke mit der jeweiligen Höhe und der Stromdichte mit der jeweiligen Querschnittsfläche.



**Bild 9:** Metalloxid-Widerstände

Die Restspannung je Millimeter Bauhöhe bei einem Blitzstoßstrom von 10 kA Scheitelwert – die bezogene 10-kA-Restspannung – liegt im Bereich von etwa 450 V/mm für einen typischen MO-Widerstand in einem Mittelspannungsableiter (32 mm Durchmesser) bis herab zu etwa 330 V/mm für einen solchen von 100 mm Durchmesser für Einsatz in Höchstspannungsnetzen<sup>1</sup>. Für einen Ableiter im 420-kV-Netz kommen z.B. typischerweise MO-Widerstände von 60 mm Durchmesser zum Einsatz. Bei einer üblichen Höhe von 36 mm und einer bezogenen 10-kA-Restspannung von 360 V/mm weist damit jeder einzelne Widerstand eine 10-kA-Restspannung von etwa 13 kV auf. Um damit den Blitzstoß-Schutzpegel von 806 kV des Beispiels aus Bild 2 zu realisieren, müssen 62 Widerstände aufeinandergestapelt werden. Die daraus resultierende Höhe der MO-Widerstandssäule von gut 2,2 m ließe sich zwar durchaus gerade eben noch in einem einzigen Porzellangehäuse unterbringen. Aus dielektrischen Gründen (Forderungen nach [Schlagweite](#) und [Kriechweg](#)) muss das Gehäuse jedoch wesentlich länger ausgeführt werden, so dass Ableiter im 420-kV-Netz typischerweise aus mindestens zwei Baugliedern in Reihe bestehen. Dieses Beispiel zeigt, dass die Ableiterhöhe in den meisten Fällen nicht von der Höhe des Aktivteils bestimmt wird.

---

<sup>1</sup> Ursache für diese Unterschiede sind die je nach verwendetem Durchmesser unterschiedlichen Stromdichten bei der zugrundegelegten Stromhöhe von 10 kA. Je niedriger die Stromdichte ist, desto niedriger fällt die Restspannung aus.

Mit Hilfe **metallischer Füllstücke** wird die Länge des Aktivteils an die Gehäuselänge des Baugliedes angepasst. Im einfachsten Fall sind dies Aluminiumrohre, die zur Erzielung eines gleichmäßigen Flächendrucks mit Deckeln abgeschlossen werden. Gelegentlich werden aber auch massive Aluminiumteile eingesetzt, die gleichzeitig als Wärmesenken dienen und damit das thermische Energieaufnahmevermögen des Ableiters erhöhen.

Die derart aufeinandergestapelten MO-Widerstände müssen im Gehäuse mechanisch fixiert werden. Dabei geht es zum einen darum, dass sie sich während des Transports<sup>1</sup> oder bei einer von der Senkrechten abweichenden Einbaulage des Ableiters nicht aus ihrer ursprünglichen Lage verschieben können, zum anderen ist aber auch ein gewisser axialer Kontaktdruck erforderlich, um die im Betrieb auftretenden Strombelastungen problemlos beherrschen zu können. Bild 8 stellt eine von vielen Realisierungsmöglichkeiten dar. Mehrere **Haltestangen** aus **GFK**-Material umschließen die MO-Widerstandssäule wie einen Käfig. In regelmäßigen Abständen zusätzlich vorgesehene **Halteplatten** – ebenfalls aus GFK – verhindern einerseits ein Auseinanderbiegen der Haltestangen und begrenzen andererseits ein mögliches Durchbiegen der gesamten Konstruktion in Richtung der Gehäusewand. Eine am oberen Ende der Säule angreifende starke **Druckfeder** (bei hohen Anforderungen gegebenenfalls auch mehrere) verspannt den so aufgebauten Aktivteil im Gehäuse.

An die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der gesamten Stützkonstruktion werden hohe Anforderungen gestellt. Sie muss konstruktiv so ausgelegt und ausgeführt sein, dass sie unter allen Betriebsbedingungen frei von elektrischen Teilentladungen bleibt. Neben einer hohen mechanischen Festigkeit werden weiterhin hohe Temperaturbeständigkeit und Kriechstromfestigkeit sowie niedrige Entflammbarkeit bzw. selbstverlöschende Brandeigenschaften gefordert.

Für das Ableitergehäuse kamen bis weit in die 1980er Jahre hinein ausschließlich und für Hochspannungsableiter auch heute noch zu einem großen Teil **Porzellangehäuse** – wie in Bild 8 dargestellt – zum Einsatz. Das Gehäuse ist an seinen Enden mit **Aluminiumflanschen**<sup>2</sup> versehen, die mit Hilfe einer **Kittung**<sup>3</sup> aufgebracht sind. Bei

---

<sup>1</sup> Häufig stellt der Transport die höchste mechanische Beanspruchung eines Ableiters während seiner gesamten Lebensdauer dar.

<sup>2</sup> Gelegentlich, bei besonders hohen mechanischen Anforderungen, kommen auch Stahlflansche zum Einsatz.

<sup>3</sup> Es sind auch Konstruktionen mit aufgeklemmten Flanschen gebräuchlich.



Wahl eines für Freilufteinsatz geeigneten Aluminiumwerkstoffes ist eine Lackierung der Flansche nicht erforderlich.

Für die Kittung hat sich die Verwendung von [Schwefelzement](#) bewährt. Neben günstigen mechanischen Eigenschaften bietet er gegenüber dem aus der Isolatortechnik bekannten und dort hauptsächlich eingesetzten [Portlandzement](#) Vorteile in der Fertigung: er kann problemlos, ohne Korrosion zu verursachen, direkt mit Aluminium in Verbindung gebracht werden und lässt sich schnell verarbeiten, da er bereits unmittelbar nach dem Verguss annähernd seine mechanische Endfestigkeit erreicht.

Bei geeigneter konstruktiver Ausbildung und Formgebung der Porzellanenden und der Flansche lässt sich erreichen, dass die Kittung immer mechanisch fester ist als das Porzellan selbst. Das bedeutet, dass die Festigkeit des Porzellans für die Festlegung der zulässigen mechanischen Kopfkkräfte am Ableitergehäuse voll ausgenutzt werden kann.

Isolator-Porzellane werden in verschiedenen Qualitäten gefertigt, für die die mechanischen Mindestanforderungen in Vorschriften, z.B. IEC 60672-3, festgelegt sind. Für Ableitergehäuse kommen in der Regel zwei Qualitäten zum Einsatz, das [Quarzporzellan](#) ("C 110" nach IEC 60672-3) und das [Tonerde-Porzellan](#) oder auch [Aluminiumoxid-Porzellan](#) ("C 120"). Höhere mechanische Festigkeiten lassen sich mit Tonerde-Porzellan erreichen, das eine gegenüber Quarzporzellan etwa doppelt so hohe spezifische Festigkeit aufweist. Einen nicht unwesentlichen Einfluss auf die mechanische Festigkeit hat die Glasur, die nicht nur außen, sondern auch an den Porzellaninnenwänden aufgebracht wird. In die Festigkeit des Gehäuses geht natürlich auch entscheidend die Geometrie der Porzellane ein. Sowohl die Wandstärke als auch der Durchmesser spielen dabei eine wichtige Rolle. Mit zunehmender Höhe der Systemspannung und damit wachsenden Anforderungen an die Festigkeit werden daher Porzellane immer größeren Durchmessers eingesetzt<sup>1</sup>.

Keine weitere technische Bedeutung hat dagegen die Farbe der Glasur. Am gängigsten ist das "Elektrobraun" (Farbton RAL 8016), häufig wird jedoch auch – besonders

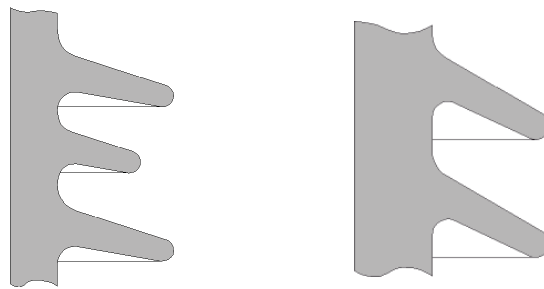
---

<sup>1</sup> Ein großer Porzellandurchmesser kann allerdings auch aus elektrischen Gründen, nämlich für die Kurzschlussfestigkeit oder für das Betriebsverhalten unter Fremdschichtbedingungen, sinnvoll sein. Zu letzterem eine kurze Erläuterung: Größere Porzellandurchmesser bewirken zwar zunächst eine stärkere elektrische Entladungsaktivität auf der Oberfläche. Deren thermische Auswirkungen auf den Aktivteil sind jedoch wegen der großen Abstände und folglich kleinen Koppelkapazitäten nur gering. Auch die am Aktivteil auftretenden Radialfeldstärken und somit das Risiko von Teilentladungen im Ableiterinnern werden durch größere Gehäusedurchmesser verringert.



im angloamerikanischen Raum – ein hellgrauer Farbton (ähnlich RAL 7004) bevorzugt. Ein Einfluss des Farbtones auf die Ableiter-Innentemperatur auf Grund unterschiedlicher thermischer Emissionsgrade und Absorptionsverhältnisse lässt sich zwar theoretisch herleiten, bleibt als Gesamteffekt jedoch vernachlässigbar, so dass er bei der Ableiterauslegung keine Berücksichtigung findet.

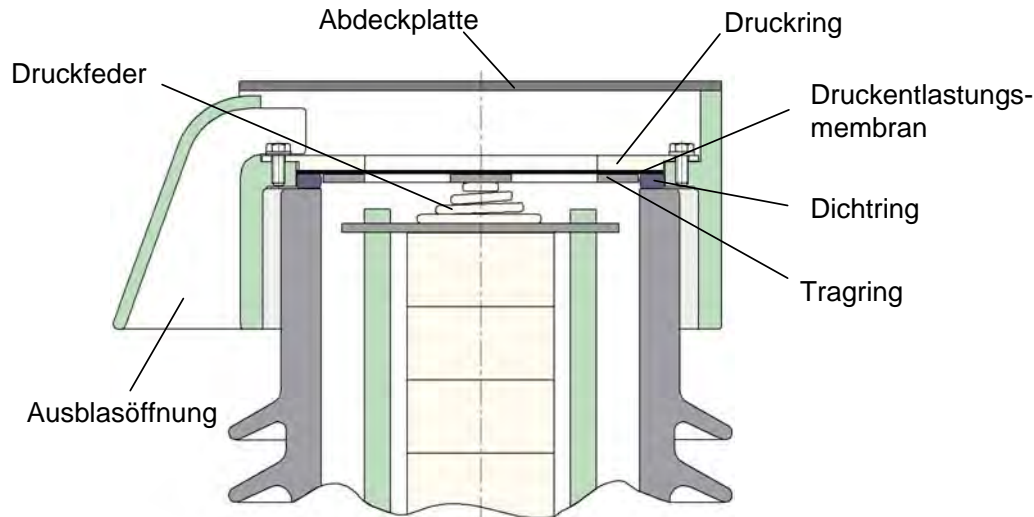
Neben dem Schutz des Aktivteils vor Umwelteinflüssen soll das Ableitergehäuse vor allem auch einen ausreichenden [Kriechweg](#) bereitstellen. Es ist hierzu mit Schirmen versehen, die sehr unterschiedlich ausgebildet sein können. Für die Gestaltung des Schirmprofils (Schirmabstände, Schirmausladung, Schirmneigungswinkel) gibt die Anwendungsrichtlinie Reihe IEC 60815 Empfehlungen, die vom Hersteller eingehalten werden sollten. Am augenfälligsten ist der Unterschied zwischen einem Groß-Klein-Schirm- bzw. Wechselschirm-Profil und einem Normalschirm-Profil (**Bild 10**). Es kann keine generelle Empfehlung gegeben werden, welchem der beiden Typen der Vorzug zu



**Bild 10:** Groß-Klein-Schirmprofil (links) und Normalschirm-Profil (rechts)

geben ist. Stärken des Groß-Klein-Schirmprofils sind seine gute Unterdrückung von durchgängigen leitfähigen Schichten auf der Oberfläche und das sehr große Verhältnis von Kriechweg zu Gesamtlänge, das bei einer gegebenen Kriechwegforderung zu kürzeren Baulängen des Ableiters führt. In künstlichen Verschmutzungsprüfungen unter Salznebel (nach der Prüfvorschrift IEC 60507) schneidet es in der Regel besser ab als ein vergleichbares Normal-Schirmprofil. Letzteres weist dagegen ein besonders gutes Selbstreinigungsverhalten im praktischen Betrieb auf und hat sich dadurch oft ausgezeichnet bewährt. Im Zweifelsfall sollte bei der Auswahl des Schirmprofils auf für den jeweiligen Standort vorliegende Betriebserfahrungen zurückgegriffen werden.

Die Erläuterungen zu Bild 8 werden nun mit der Beschreibung des Dichtungssystems abgeschlossen. Dieses stellt eine der kritischsten Komponenten eines Ableiters dar – mit die häufigste in der Ableiterliteratur und von Anwendern genannte Ausfallursache von Ableitern ist Undichtigkeit. Dem Dichtungssystem kommen drei Aufgaben zu, die zum Teil schwer miteinander vereinbar sind: zum einen soll es für die gesamte Lebensdauer



**Bild 11:** Dichtungssystem eines Hochspannungsableiters mit Porzellangehäuse

des Ableiters – dabei wird von 25 bis 30 Jahren ausgegangen – das Eindringen von Feuchtigkeit sicher unterbinden, zum anderen soll es eine schnell wirksame Druckentlastungsvorrichtung für den seltenen Fall einer Ableiterüberlastung bilden, bei der sich schlagartig hohe Gehäuse-Innendrucke aufbauen, die andernfalls zum Zerbersten des Porzellankörpers führen würden. Und schließlich muss an dieser Stelle ein sauberer Stromübergang vom Flansch zur MO-Widerstandssäule sichergestellt werden.

In dem in **Bild 11** gezeigten Beispiel besteht das Dichtungssystem im Wesentlichen aus einem **Dichtring** und der **Druckentlastungs-membran**. Beide Elemente sind zweimal, jeweils an beiden Enden des Gehäuses, vorhanden. Der Dichtring liegt auf der Stirnfläche des Porzellankörpers auf. Erfolgt die Dichtung an dieser Stelle, ist die Kittung zwischen Flansch und Porzellan nicht in das Dichtsystem einbezogen. Das reduziert die Anforderungen an die Kittung, erfordert aber äußerste Sorgfalt bei der Bearbeitung der Porzellanstirnflächen und ihre anschließende Qualitätskontrolle.

Hohe Anforderungen müssen vor allem an das Material der Dichtringe gestellt werden. So erweist sich zum Beispiel Naturkautschuk als ungeeignet, da es im Laufe der Zeit versprödet. Beständigkeit gegen Ozon ist hier eine elementare Forderung, die heutzutage aber durch Verwendung von synthetischen Materialien gut zu erfüllen ist.

Die in dieser Ableiterkonstruktion eingesetzte Druckentlastungs-membran besteht aus einem hochreinen Edelstahl- oder Nickelwerkstoff von nur wenigen Zehntel Millimetern Dicke. Die Membran für eine Dauer von 30 Jahren gegen Korrosion unempfindlich zu machen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe für Konstruktion und Qualitätssicherung.

Die Membran wird mit einem am Flansch verschraubten metallischen **Druckring** gegen den Dichtring gepresst. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ausschließlich elektrochemisch untereinander verträgliche Materialkombinationen verwendet werden. Andernfalls wäre Spaltkorrosion unweigerlich die Folge, was über kurz oder lang zu Undichtigkeit führen würde.

Vorteil des Prinzips der Druckentlastungsmembran<sup>1</sup> ist ihre extrem kurze Öffnungszeit im Falle einer Ableiterüberlastung. Eine Ableiterüberlastung ist ein äußerst seltenes Ereignis<sup>2</sup>, kann aber grundsätzlich, auch durch noch so reichliche Bemessung des Ableiters, nicht ausgeschlossen werden. Mögliche Ursachen dafür sind beispielsweise ableiternahe Blitzeinschläge oder Spannungsübertritt von einem System höherer auf ein System niedrigerer Spannung, etwa auf einer Trasse mit mehreren übereinander geführten Spannungsebenen durch Leiterseilriss oder Seiltanzen. In einem solchen Fall kommt es zur Überlastung eines oder mehrerer MO-Widerstände in dem betroffenen Ableiter. Es bildet sich ein Teillichtbogen aus, der sich in Sekundenbruchteilen zu einem durchgängigen Lichtbogen im Gehäuse-Inneren zwischen den beiden Flanschen entwickelt. Durch diesen fließt der volle, sich am Einbauort des Ableiters einstellende Kurzschlussstrom des Netzes (Effektivwert bis zu etwa 80 kA, Scheitelwert bis zu etwa 200 kA). In der Folge kommt es zu einem sprunghaften Druckanstieg innerhalb des Gehäuses. Die Druckentlastungsmembranen reißen dabei innerhalb weniger Millisekunden auf und sorgen so für eine sichere Druckentlastung, lange bevor der Berstdruck des Gehäuses erreicht wird. Die heißen, unter starkem Überdruck stehenden Gase treten mit hoher Geschwindigkeit durch die beiden **Ausblasöffnungen** aus dem Gehäuse-Inneren aus ("Ausblasen" des Ableiters). Außerhalb des Gehäuses treffen die beiden Gasstrahlen aufeinander und bewirken so, dass der bis dahin im Gehäuse-Inneren brennende Lichtbogen nach außen kommutiert und außerhalb des Gehäuses weiterbrennt, bis der Fehler weggeschaltet wird. Bis dahin kann es zwar immer noch auf Grund der extremen thermischen Belastung zu einem Bruch des Porzellans<sup>3</sup> kommen, wegen des praktisch drucklosen Zerfalls können dadurch jedoch keine schwerwiegenden Schäden mehr angerichtet werden.

Erlischt der im Gehäuse-Inneren brennende Lichtbogen infolge von Netzvorgängen bereits vor dem Öffnen der Druckentlastungsmembran oder erfolgt der Druckanstieg

---

<sup>1</sup> Es sind auch andere Arten der Druckentlastung gebräuchlich, zum Beispiel federbelastete Verschlüsse.

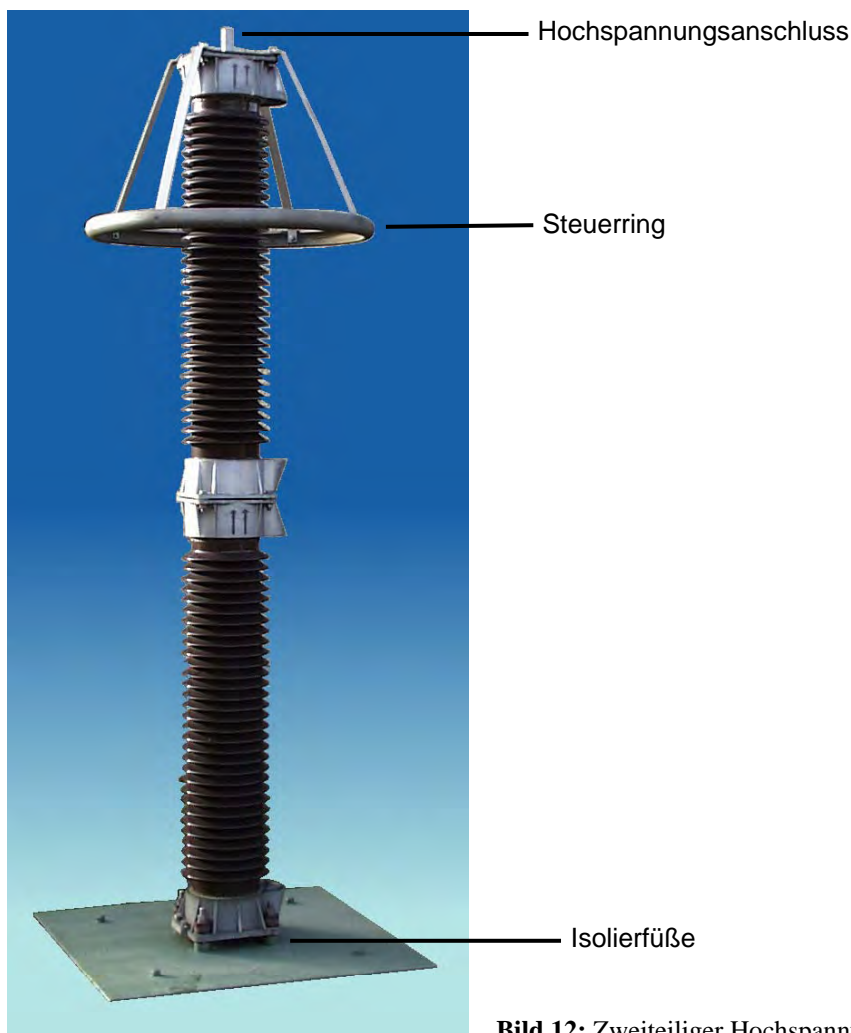
<sup>2</sup> In Hochspannungsnetzen noch wesentlich seltener als in Mittelspannungsnetzen.

<sup>3</sup> Sogenannter thermischer Sekundärbruch, der nach den IEC-Vorschriften ausdrücklich zugelassen ist.

aufgrund eines nur sehr kleinen Fehlerstromes vergleichsweise langsam (ein Fall, der insbesondere in kompensierten Netzen eintreten kann), so reißen die Druckentlastungsmembranen nicht auf, sondern ziehen nur Falten, die – in diesem Falle bewusst – zur Undichtigkeit des Gehäuses führen<sup>1</sup>. Dadurch ist es ausgeschlossen, dass ein ausgefallener Ableiter unter einem Überdruck von mehr als 1 bar stehen kann. Das reduziert Sicherheitsrisiken bei der Demontage des defekten Ableiters erheblich.

Die wichtigsten Komponenten eines MO-Ableiters sind nun – am Beispiel eines Hochspannungsableiters mit Porzellangehäuse – beschrieben. Zu einem kompletten Hochspannungsableiter gehören jedoch noch einige weitere Details (**Bild 12**).

Es wurde bereits erwähnt, dass ab einer bestimmten Länge der MO-Widerstandssäule der Ableiter nicht mehr einteilig gebaut werden kann. Die größte, aus technisch-wirt-



**Bild 12:** Zweiteiliger Hochspannungsableiter

<sup>1</sup> Einen derart ausgefallenen Ableiter erkennt man äußerlich an einem stark verrußten Gehäuse.

schaftlichen Gründen<sup>1</sup> noch sinnvolle Länge eines Porzellangehäuses liegt bei etwa zwei Metern. Damit lässt sich gerade eben noch ein Ableiter für ein direkt geerdetes 245-kV-Netz in einem Bauglied unterbringen, wenn die Kriechwegforderungen nicht überdurchschnittlich hoch sind. Für alle höheren Spannungsebenen müssen Ableiter mehrteilig aufgebaut werden, im 420-kV-Netz zum Beispiel zweiteilig, in den höheren Spannungsebenen oder bei extremen Kriechwegforderungen auch drei-, vier- oder fünfteilig. Eine Begrenzung nach oben gibt es im Prinzip nicht, solange der Ableiter noch ausreichende mechanische Eigenschaften aufweist.

Ab einer Länge von etwa eineinhalb bis zwei Metern aufwärts und meistens auch bei mehrteiligen Ableitern werden [Steuerringe](#) zwingend erforderlich. Diese dienen dazu, die durch am Ableiter angreifende Erdkapazitäten ungünstig beeinflusste Aufteilung der Spannung entlang des Ableiters vom hochspannungsseitigen bis zum erdseitigen Ende zu vergleichmäßigen. Ohne entsprechende Gegenmaßnahmen würden die MO-Widerstände am hochspannungsseitigen Ende des Ableiters wesentlich höher beansprucht als die am erdseitigen Ende, verbunden mit einer möglicherweise unzulässig hohen Erwärmung. Steuerringe unterscheiden sich in ihren Durchmessern und in der Länge ihrer Befestigungsstreben. Als Faustformel gilt: je größer der Durchmesser und je länger die Streben, desto besser fällt die vergleichmäßigende Wirkung auf die Spannungsverteilung aus. Dabei ist es aber aus zwei Gründen gleichzeitig auch ein Anliegen, beide der genannten Größen möglichst klein zu halten:

- Die einschlägigen Vorschriften zur Errichtung von Starkstromanlagen<sup>2</sup> schreiben Mindestabstände zwischen den Leitern benachbarter Phasen vor. Diese Forderungen gelten auch für den Abstand der Steuerringe zweier benachbarter Ableiter. Je kleiner die Steuerringe sind, desto kleiner können die Mittenabstände benachbarter Ableiter und damit die Feldteilung gewählt werden.
- Die Befestigungsstreben lassen sich nicht beliebig verlängern, da für das leere Ableitergehäuse Stehspannungsforderungen einzuhalten sind. Bei zu langen Streben treten insbesondere bei der Prüfung mit [Schaltstoßspannung](#) Überschläge vom Steuerring über den nächstgelegenen Flansch nach Erde oder direkt nach Erde auf.

---

<sup>1</sup> Einer der Gründe ist die mit zunehmender Gehäuselänge abnehmende Kurzschlussfestigkeit. Ein anderer ist, dass die meisten Hersteller von Porzellanisolatoren größere Längen nicht mehr in einem Stück brennen können.

<sup>2</sup> Zum Beispiel in Europa das Harmonisierungsdokument HD 637 S1 (deutsche Fassung: DIN VDE 0101).

Steuerringe werden von den Anwendern gelegentlich als störend empfunden, weil sie in der Schaltanlage Platz kosten. Es ist aber extrem wichtig, die vom Hersteller vorgesehenen und mitgelieferten Steuerringe vor Ort auch wirklich zu montieren. Wird dies unterlassen, kann thermisches Instabilwerden und in Folge der Ausfall des Ableiters die Folge sein.

Nicht mit den Steuerringen zu verwechseln sind [Koronaringe](#), die gelegentlich in den Höchstspannungsebenen vorgesehen werden, um die Anschlussklemmen elektrostatisch abzuschirmen und so die höchstens zulässigen [Funkstörspannungswerte](#) einzuhalten<sup>1</sup>.

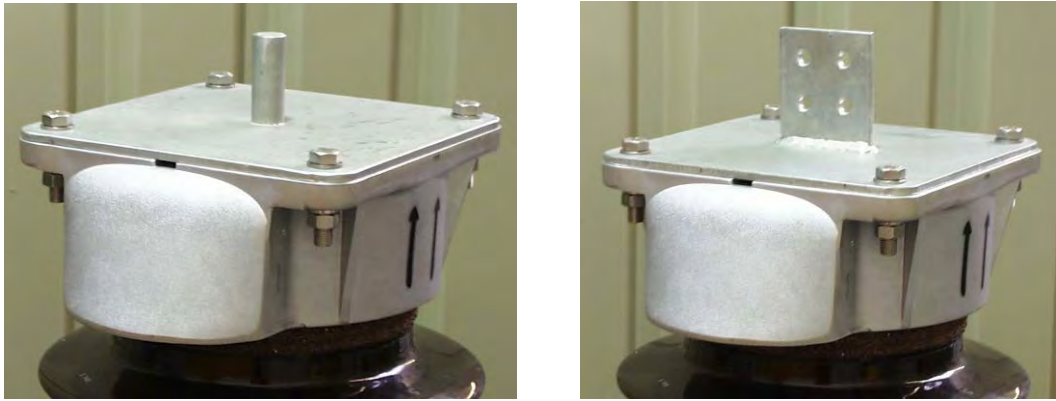
In Hochspannungsnetzen werden Ableiter meist nicht direkt geerdet, sondern es werden Geräte wie [Ansprechzähler](#), [Kontrollfunkenstrecken](#) oder [Leckstromüberwachungsgeräte](#) mit dem Ableiter in Reihe geschaltet. Dazu wird der Ableiter mit Hilfe von **Isolierfüßen** isoliert aufgestellt (**Bild 13**). Die Erdung erfolgt dann über die entsprechenden Überwachungsgeräte. Die Isolierfüße müssen mechanisch so bemessen sein, dass sie die am Ableiter im Betrieb dauernd oder kurzzeitig angreifenden Kräfte aufnehmen können. Elektrisch müssen sie eine ausreichende Spannungsfestigkeit aufweisen, um bei den durch die parallel liegenden Überwachungsgeräte und die Eigeninduktivität der Erdleitung verursachten Spannungsfällen nicht überzuschlagen.



**Bild 13:** Unterer Ableiterflansch mit Isolierfüßen und montiertem Leckstromüberwachungsgerät

---

<sup>1</sup> Weitere Erläuterungen zu Steuerringen und Koronaringen finden sich im Anhang unter dem Stichwort [Steuerring](#).



**Bild 14:** Bolzenanschluss (links) und Flachanschluss (rechts)

Die Erdanschlussleitung sollte einen Querschnitt von wenigstens 35 mm<sup>2</sup> aufweisen, weniger aus elektrischen Gründen – hierfür wäre ein kleinerer Querschnitt völlig ausreichend – als aus Gründen der mechanischen Festigkeit und Witterungsbeständigkeit.

Der **Hochspannungsanschluss** dient dem Anschluss des Leiterseiles. Es kommen in der Regel Bolzen- oder Flachanschlüsse zur Anwendung (**Bild 14**). Ihre Ausführung ist genormt, zum Beispiel nach DIN oder – in den Vereinigten Staaten – nach [NEMA](#). Es sind jedoch auch kundenspezifische Sonderausführungen üblich.

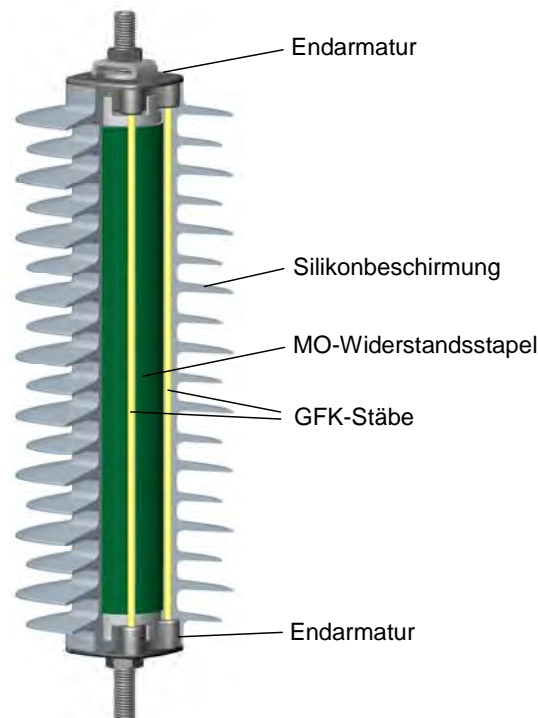
Die nun folgenden Bilder zeigen einige weitere Ausführungen von MO-Ableitern: einen Mittelspannungsableiter mit Kunststoffgehäuse sowie zwei unterschiedliche Ausführungen von Hochspannungsableitern mit Kunststoffgehäuse. Die gewählten Beispiele unterscheiden sich teilweise stark in ihren Konstruktionsmerkmalen und geben einen Überblick über einige grundsätzliche, im Einsatz befindliche Ableiterbauformen. Auf [Mittelspannungsableiter mit Porzellangehäuse](#) soll hier nicht mehr im Detail eingegangen werden, da sie mittlerweile praktisch vollständig von Ableitern mit Kunststoffgehäuse abgelöst worden sind. Allerdings befinden sie sich noch in Millionenstückzahlen im Einsatz. Eine Abbildung dazu findet sich im Anhang.

Nicht zuletzt auf Grund der häufigen, durch Undichtigkeit verursachten Ausfälle billig konstruierter Mittelspannungsableiter mit Porzellangehäuse kamen Mitte der 1980er Jahre die ersten mit einer Kunststoffisolierung versehenen Mittelspannungsableiter auf den Markt. Deren auffälligstes Konstruktionsmerkmal ist das unmittelbar auf die MO-Widerstände aufgebrachte Kunststoffgehäuse. Damit entfällt der gasgefüllte Zwischenraum zwischen dem Aktivteil und dem Gehäuse, und bei geeigneter konstruktiver Ausgestaltung des Übergangs vom Kunststoffgehäuse auf die Endarmaturen kann auf ein Dichtungssystem völlig verzichtet werden. Ebenfalls kann es im Überlastfall nicht zu einem Druckaufbau im Gehäuse-Inneren mit dem damit verbundenen Risiko eines Ge-



häusebruchs kommen. Trotzdem sind auf diesem Prinzip aufbauend noch sehr unterschiedliche Konstruktionen möglich<sup>1</sup>.

Die im Falle eines Porzellanisolators in einer einzigen Komponente vereinigten Eigenschaften – Schutz vor Umwelteinflüssen und Bereitstellung eines ausreichenden Kriechweges einerseits, mechanische Festigkeit andererseits – sind bei den Ableitern mit Kunststoffgehäuse auf zwei unterschiedliche Einzelkomponenten aufgeteilt. Die mechanische Festigkeit wird praktisch ausnahmslos durch [glasfaserverstärkte Kunststoffe \(GFK\)](#) erzielt. In dem in **Bild 15** gezeigten Beispiel dienen dazu mehrere Stäbe, die in den Endarmaturen verspannt (z.B. gecrimpt) sind und den MO-Widerstandsstapel wie einen Käfig umschließen. Man spricht in diesem Zusammenhang daher auch von einem "Käfig-Design"<sup>1</sup>. In diesem sind allerdings auch die MO-Widerstände Teil der mechanisch tragenden Konstruktion. Es entsteht eine mechanisch hochfeste Einheit aus MO-Widerständen, Endarmaturen und der GFK-Struktur. Diese wird in eine Spritzform



**Bild 15:** Aufbau eines Mittelspannungsableiters mit Kunststoffgehäuse

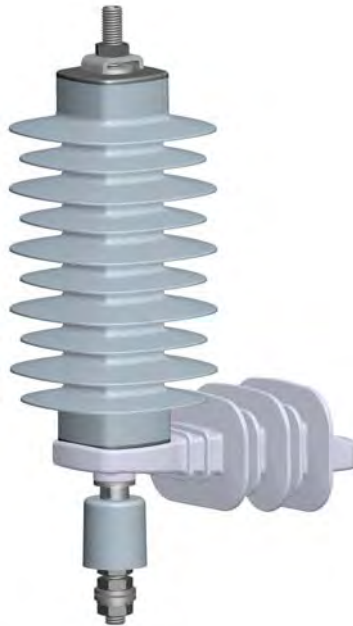
<sup>1</sup> Es muss darauf hingewiesen werden, dass Ableiter mit direkt aufgebrachtem Kunststoffgehäuse leider doch nicht "per se" dicht und überlastsicher sind, wie es anfänglich oft erhofft wurde. Auch bei diesen Ableitern spielen bestimmte Konstruktionsmerkmale und die Fertigungsqualität weiterhin eine wichtige Rolle.



ingelegt, in der anschließend [Silikongummi](#) direkt aufgespritzt wird. Durch entsprechende Fertigungstechniken kann erreicht werden, dass das Silikongummi einschlussfrei und unlösbar mit den übrigen Komponenten verbunden ist – der Ableiter ist buchstäblich "aus einem Guss". Wesentlicher Vorteil des in diesem Fall eingesetzten Silikongummis gegenüber auch verwendeten billigeren Materialien sind die hervorragenden Langzeiteigenschaften – hier kann man mittlerweile auf eine etwa vierzigjährige Betriebserfahrung zurückblicken – und die für Silikon charakteristische Eigenschaft der [Hydrophobie](#): Wasser perlt, selbst dann noch, wenn die Silikonoberfläche stark verschmutzt ist, einfach ab. Das unterdrückt die Ausbildung leitfähiger Fremdschichten und wirkt sich vorteilhaft auf das Betriebsverhalten des Ableiters unter Verschmutzungsbedingungen aus.

Bei der in Bild 15 gezeigten Konstruktion ist das Risiko eines berstenden und splittenden Gehäuses im Falle einer Ableiterüberlastung ausgeschlossen. Ein durch einen Durch- oder Überschlag der MO-Widerstände entstehender Lichtbogen reißt das Silikongummi-Gehäuse auf und findet praktisch widerstandslos seinen Weg nach außen.

Die Vorzüge einer solchen Ableiterkonstruktion sind hier nur angedeutet. Zusammen



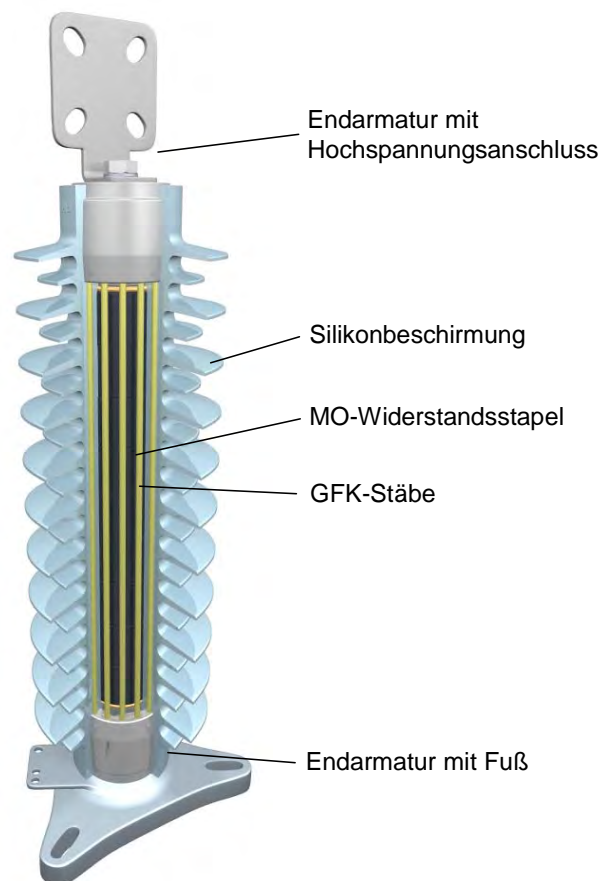
**Bild 16:** Mittelspannungsableiter mit Kunststoffgehäuse, Abtrennvorrichtung und Isolierschelle

---

<sup>1</sup> Eine andere häufige Ausführung verwendet auf die MO-Widerstände gewickelte Matten oder Bänder, die nach dem Aushärten des in ihnen enthaltenen Harzes ein steifes, direkt an den MO-Widerständen anliegendes Rohr bilden. Eine solche Ausführung wird häufig als "Wickel-Design" bezeichnet.

mit der auch gegebenen Gewichtseinsparung gegenüber einem Porzellan Gehäuse, der risikoloserer Handhabung während Transports und Montage und nicht zuletzt der Tatsache, dass sich solch ein Ableiter auch noch kostengünstiger herstellen lässt als ein Ableiter mit Porzellan Gehäuse, stellen sich Vorteile ein, die es verständlich machen, warum sich im Mittelspannungsbereich Ableiter mit Kunststoffgehäuse so gut durchsetzen konnten und die Geräte mit Porzellan Gehäuse völlig vom Markt verdrängt haben.

Eine Besonderheit von Mittelspannungsableitern ist es, dass sie häufig in Verbindung mit einer [Abtrennvorrichtung](#) eingesetzt werden. Diese Zusatzeinrichtung, die sowohl im Ableiter integriert als auch, wie im **Bild 16** dargestellt, außerhalb angebracht sein kann, ist für den störungsfreien Betrieb eines Mittelspannungsnetzes oft von großer Bedeutung. Die Standorte der Ableiter sind hier nicht wie in den Hochspannungsnetzen auf nur wenige Schaltanlagen oder Umspannwerke beschränkt. Vielmehr sind Ableiter über das ganze Netz verteilt (Maststationen, Kabelendverschlüsse), und ein ausgefallener Ableiter ist bei der großen räumlichen Ausdehnung dieser Netze oftmals nur schwer auszumachen und kann auch dann nicht immer sofort ausgewechselt werden. Die Abtrennvorrichtung soll dafür sorgen, dass nach einem eventuellen Ausfall der Ableiter galvanisch vom Netz getrennt wird. Anderenfalls könnte der Ableiter nach einem sol-

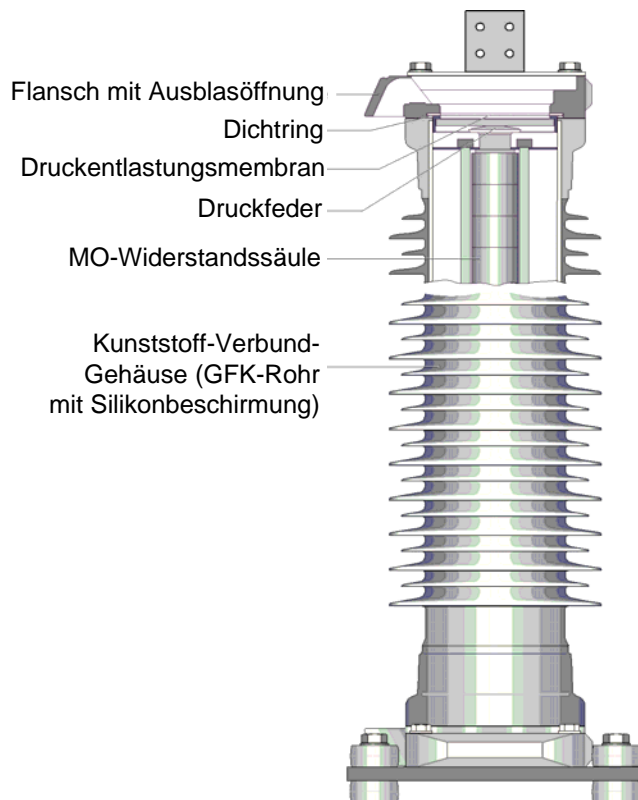


**Bild 17:** Hochspannungsableiter mit Kunststoffgehäuse im "Käfig-Design"

chen Vorfall einen bleibenden Erdschluss bilden. Der Ableiter muss dann natürlich, wie in Bild 16 zu sehen, mit einer [Isolierschelle](#) montiert sein. Diese muss so bemessen sein, dass sie der anliegenden Leiter-Erdspannung (der Ableiter stellt nach dem Ausfall praktisch einen Kurzschluss dar) für eine gewisse Zeit standhält – eine Anforderung, die nicht immer einfach zu erfüllen ist. Als Nachteil des Einsatzes von Abtrennvorrichtungen bleibt zu nennen, dass durch sie ein Ableiterausfall oft unerkannt bleibt und der Schutz vor Überspannungen an dieser Stelle dann unwissentlich nicht mehr gegeben ist. Für den Einsatz von Abtrennvorrichtungen kann daher keine generelle Empfehlung gegeben werden. In kompensierten Netzen, die längere Zeit auch mit einem Erdschluss betrieben werden können, kommen sie eher selten zum Einsatz, häufiger dagegen in direkt geerdeten Netzen. Im Einzelnen hängt das allerdings stark von der Betriebsphilosophie des jeweiligen Netzbetreibers ab.

Das Prinzip des Käfig-Designs ist auch für Hochspannungsableiter übernommen worden. Ein Beispiel dafür zeigt **Bild 17**. Zum Erzielen ausreichend hoher mechanischer Festigkeiten und einer hohen Kurzschlussfestigkeit besteht der GFK-Käfig hier aus wesentlich mehr Stangen als bei einem Mittelspannungsableiter. Im Übrigen sind die Konstruktionsmerkmale jedoch die gleichen. Um mit einem solchen Design in höhere Spannungsebenen zu gehen, werden einfach mehrere Module aneinandergereiht.

Insbesondere in den Höchstspannungsebenen oder gar den derzeit entstehenden Ultrahochspannungsebenen (UHV;  $U_s > 800$  kV) können die dort vorliegenden mechanischen Anforderungen mit einem solchen Design zusehends schwer erfüllt werden. Ein Problem kann z.B. die nicht mehr vernachlässigbare Auslenkung unter mechanischer Biegelast darstellen. Ab einer bestimmten Gesamtlänge lässt sich der Ableiter daher nur noch hängend mit beweglicher Aufhängung installieren. Auch das in den hohen Spannungsebenen häufig erforderliche Parallelschalten mehrerer MO-Widerstandssäulen kann sehr aufwendig werden, da in diesem Fall komplette Ableiter einschließlich ihrer Gehäuse parallel angeordnet werden müssen. Hier bewährt sich die in **Bild 18** gezeigte, bereits Ende der 1980er Jahre eingeführte Konstruktion. Es handelt sich um einen Hochspannungsableiter im Kunststoffgehäuse unter Verwendung eines [Verbund-Hohlisolators](#), wie er beispielsweise auch bei Wandlern und Durchführungen zur Anwendung kommt. Diese Ausführungsart wird zur Abgrenzung gegenüber anderen Ableitern mit Kunststoffgehäuse auch als "Rohr-Design" bezeichnet. Es fällt sofort auf, dass es sich im Prinzip um den gleichen Aufbau handelt wie bei dem Ableiter von Bild 8. In der Tat ist im Wesentlichen nur der Porzellanisolator durch einen Verbund-Hohlisolator ersetzt. Dieser besteht aus einem GFK-Rohr, auf das die Beschirmung – praktisch ausnahmslos aus Silikongummi – direkt aufgespritzt oder in Form vorbereiteter Schirme



**Bild 18:** Schnitt durch ein Bauglied eines Hochspannungsableiters mit Kunststoff-Verbund-Gehäuse

aufgeschoben und [aufvulkanisiert](#) wird. Dieses Konstruktionsprinzip bietet einige, für Anwendungen bis in die höchsten Spannungsebenen hinein wesentliche Vorteile. Da der innere Aufbau eines GFK-Rohres (z.B. Anteil an Glasfasern, Wickelwinkel der Fasern), seine Wandstärke und sein Durchmesser in weiten Grenzen frei wählbar sind, lässt sich einem solchen Rohr fast jede gewünschte mechanische Eigenschaft verleihen. So kann es, um nur einige Möglichkeiten zu nennen, auf Zugfestigkeit, Biegefestigkeit oder Innendruckfestigkeit hin optimiert werden. Es ist damit möglich, Hochspannungsableiter mechanisch so stark auszulegen, dass sie etwa schwerste Erdbeben unversehrt überstehen und gleichzeitig in einer Schaltanlage auch noch als Stützer eingesetzt werden können.

Der letztgenannten Anwendung kommt eine weitere, nur diesem Design eigene Eigenschaft zugute: im Falle einer Ableiterüberlastung ist bei dieser Bauweise sichergestellt, dass es in keinem Fall zu einem Gehäusebruch, ja nicht einmal zum Auswurf von Innenteilen kommt. Das Rohr bleibt mechanisch nahezu unversehrt und bietet damit die bestmögliche Sicherheit für die gesamte Schaltanlage (siehe dazu auch das Kapitel über die Auslegung von Ableitern).

Einer weiteren Verbreitung einer solchen Konstruktion standen lange Zeit die im Vergleich zu Porzellanisolatoren wesentlich höheren Kosten von Verbund-Hohlisolatoren entgegen. Mit deren wachsender Verbreitung und entsprechend größer werdendem Marktangebot dürfte sich die Situation jedoch weiter zugunsten dieser Technik ändern. In bestimmten Anwendungen ist sie praktisch ohne Alternative.

Abschließend kann gesagt werden, dass die aktuelle Entwicklung eindeutig in Richtung kunststoffisolierter Ableiter in allen Spannungsebenen geht. In der Mittelspannung ist diese Entwicklung bereits zu praktisch einhundert Prozent vollzogen. In den Hoch- und Höchstspannungsebenen, in denen solche Veränderungen mehr Zeit benötigen, weil dort die Investitionskosten höher sind und die Akzeptanz neuer Technologien im Allgemeinen geringer (weil auch riskanter) ist, wird noch etwas Zeit vergehen. Jedoch wächst auch dort der Anteil kunststoffisolierter Ableiter gegenüber solchen im Porzellangehäuse stetig, denn die damit verbundenen Kosten- und die Technikvorteile liegen einfach auf der Hand.



## Auslegung von MO-Ableitern

Für die Auslegung eines MO-Ableiters ist zunächst das Verständnis dafür wichtig, in welcher Weise sich verschiedene Forderungen und Einflussgrößen auf das Betriebsverhalten des Ableiters auswirken. Bei Kenntnis der grundlegenden Zusammenhänge lässt sich dann auch für weniger gebräuchliche Anwendungsfälle ein passender Ableiter auslegen. Dieses Kapitel erläutert die allgemeine Vorgehensweise und schließt mit einfachen Beispielrechnungen zur Auswahl von typischen Ableitern zum Überspannungsschutz von Betriebsmitteln in Wechselspannungsnetzen der Spannungsebenen  $U_s = 24 \text{ kV}$  bis  $U_s = 420 \text{ kV}$ . Die Ableiter werden dabei grundsätzlich zwischen Phase und Erde angeschlossen ("Phasenableiter"). Es wird außerdem kurz auf die Auslegung von Ableitern zum Schutz des Transformatorsternpunkts ("Sternpunktbleiter") eingegangen.

Die Darstellung erfolgt dabei ausschließlich aus Gerätesicht, das heißt unter der Fragestellung, wie der Ableiter für den geplanten Einsatzfall zu bemessen ist, so dass er einerseits seine Schutzaufgabe gut erfüllt und andererseits so sicher ausgelegt ist, dass er nicht selber zum Problemfall wird. Dagegen wird an dieser Stelle nicht auf die Einsatzphilosophie eingegangen, an welcher Stelle im Netz etwa oder an welchem Betriebsmittel Ableiter eingesetzt werden sollten. Dazu können die einschlägigen IEC-Publikationen 60071-1 und 60071-2 zur Isolationskoordination oder die Anwendungsempfehlungen für Überspannungsableiter IEC 60099-5 herangezogen werden.

Es wird auf die für die Prüfung und den Einsatz von funkenstreckenlosen Metalloxidableitern maßgebliche internationale Prüfvorschrift IEC 60099-4 und Anwendungsrichtlinie IEC 60099-5 Bezug genommen. Diese liegen auch als "DIN EN"-Publikationen unter den gleichen Nummern und mit exakt gleichem Wortlaut auf Deutsch vor. Die entsprechende amerikanische (IEEE) Prüfvorschrift C62.11 und Anwendungsrichtlinie C62.22 sind am Ende dieses Handbuchs zwar aufgeführt, werden aber hier nicht angewendet. Sie unterscheiden sich auch heute noch in einigen Punkten mehr oder weniger stark von den jeweiligen IEC-Publikationen, obwohl Bestrebungen im Gange sind, beide Vorschriftenwerke einander anzugleichen.

Die Anforderungen an einen MO-Ableiter lassen sich auf zwei wesentliche Grundforderungen zurückführen. Einerseits soll der Ableiter eine ausreichende Schutzwirkung besitzen, andererseits für einen stabilen Dauerbetrieb ausgelegt sein. Ausreichende Schutzwirkung bedeutet, dass die an dem zu schützenden Betriebsmittel auftretenden Überspannungen immer mit genügendem Sicherheitsabstand unterhalb dessen Stehspannung bleiben müssen. Stabiler Dauerbetrieb heißt, dass der Ableiter alle Bela-

stungsfälle, die im Normalbetrieb und bei Netzfehlern auftreten, sicher beherrschen und anschließend thermisch stabil bleiben muss.

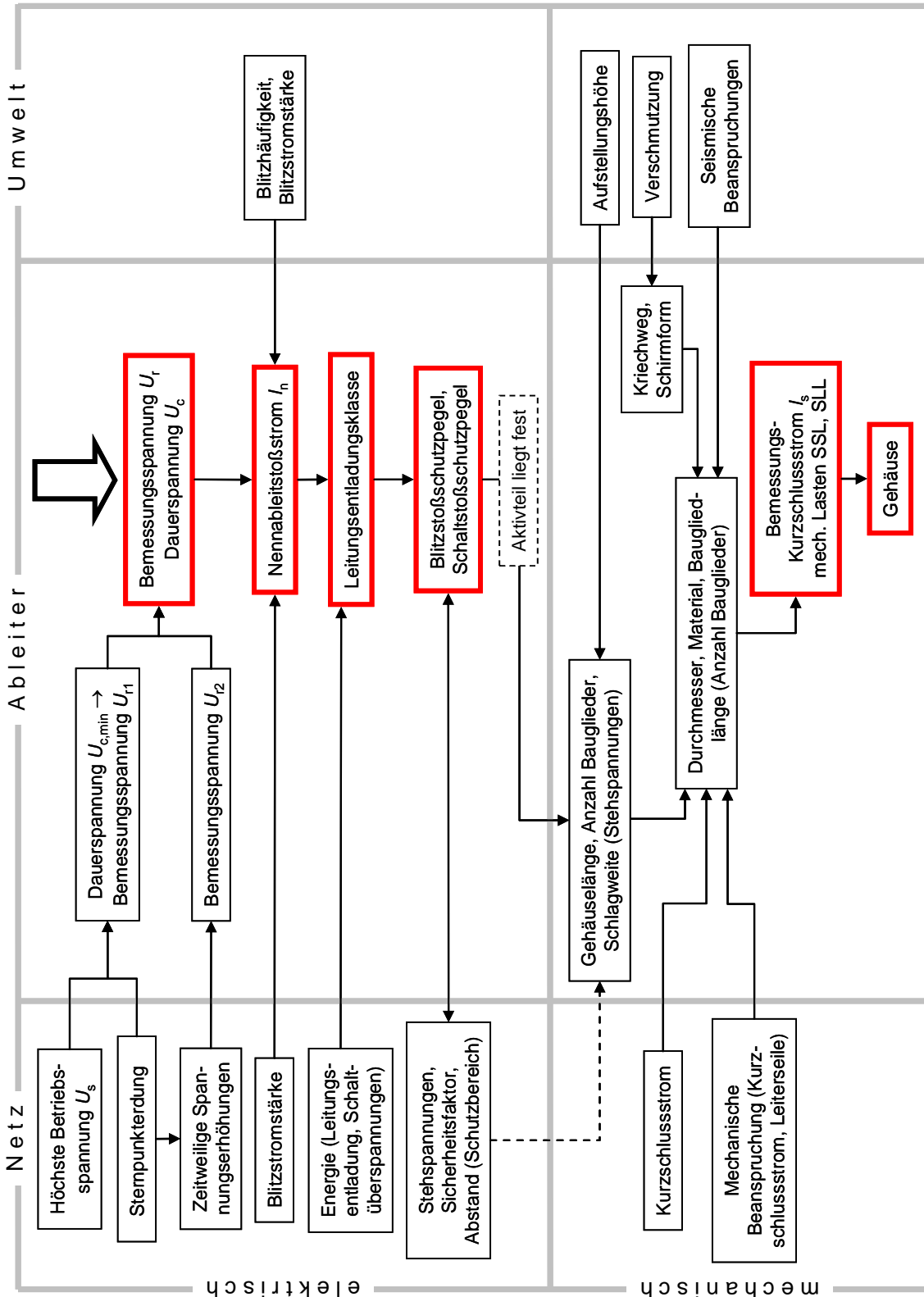


Bild 19: Vorgehensweise bei der Auslegung eines MO-Ableiters für ein Hochspannungsnetz



Beide Grundforderungen lassen sich nicht unabhängig voneinander erfüllen. Eine Reduzierung des Schutzpegels hat unweigerlich eine höhere Beanspruchung im Dauerbetrieb zur Folge, und umgekehrt lässt sich die Dauerspannung eines Ableiters nicht beliebig erhöhen, ohne auch gleichzeitig den Schutzpegel anzuheben. Beide Betriebspunkte sind – zumindest für einen gegebenen Typ von MO-Widerständen – über die Spannungs-Strom-Kennlinie fest miteinander verknüpft.

Als zusätzliche Forderung dürfen zudem während der ganzen Lebensdauer eines Ableiters keine Veränderungen seiner Eigenschaften auftreten, und er muss unempfindlich gegenüber Umgebungseinflüssen wie Verschmutzung, Sonneneinstrahlung oder mechanischen Belastungen sein.

In **Bild 19** ist die Vorgehensweise zur Auslegung eines Ableiters in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Dabei wird von einem Hochspannungsableiter ausgegangen, da an einen solchen im Vergleich zu Mittelspannungsableitern mehr und auch höhere Anforderungen gestellt werden. Die in dem Bild gezeigten Auslegungsschritte werden nachfolgend in der Reihenfolge ihrer Ausführung näher erläutert.

### **Auswahl der Dauerspannung $U_c$ und der Bemessungsspannung $U_r$**

Damit der Ableiter seine Schutzfunktion sicher ausüben kann, muss sichergestellt sein, dass er selber im Dauerbetrieb stabil arbeitet. Deshalb wird im ersten Schritt seine mindestens erforderliche Dauerspannung  $U_{c,min}$  festgelegt. Diese muss, wie bereits in Zusammenhang mit Bild 2 erläutert, so hoch sein wie die dauernd auftretende Leiter-Erde-Spannung des Netzes<sup>1</sup>, versehen mit einem Zuschlag von wenigstens 5%. Der Zuschlag trägt möglichen Oberschwingungen in der Netzspannung Rechnung, die den Scheitelwert der Spannung erhöhen können<sup>2</sup>.

Unter "dauernd" anliegender Spannung ist hier jede Spannung zu verstehen, die für eine zusammenhängende Zeitdauer von mehr als 30 Minuten auftritt. Daher ist für die Festlegung der Dauerspannung auch die Sternpunktbehandlung des Netzes bemessend.

---

<sup>1</sup> Bei der Ableiterauslegung ist zu beachten, dass alle Ableiterspannungen grundsätzlich Phase-Erde-Spannungen sind. Generell steht keine einzige Ableiterkenngröße für verkettete Werte.

<sup>2</sup> Aufgrund der starken Nichtlinearität der  $U-I$ -Kennlinie spielt weniger der Effektivwert einer anliegenden Wechselspannung eine Rolle als deren Scheitelwert, der die resistive Komponente des Leckstromes periodisch im Augenblick des Spannungsscheitels überproportional erhöhen kann.

In isolierten oder kompensierten Netzen<sup>1</sup> nimmt im Falle eines einphasigen Erdfehlers die Spannung der gesunden Phasen gegen Erde den Wert der verketteten Spannung an ([Erdfehlerfaktor](#)  $k = 1,73$ ). Da kompensierte Netze ohne weiteres für Zeitdauern von mehr als 30 Minuten in diesem Zustand betrieben werden, ist für die Dauerspannung des Ableiters für diesen Fall der Wert der höchsten Betriebsspannung  $U_s$  anzusetzen. Nur der fünfprozentige Zuschlag wird hier nicht berücksichtigt.

Direkt geerdetes Netz:

$$U_{c,\min} \geq 1,05 \cdot U_s / \sqrt{3}$$

Isoliertes oder kompensiertes Netz:

$$U_{c,\min} \geq U_s$$

Über die Vorauswahl der mindestens erforderlichen Dauerspannung gelangt man mit Hilfe eines Faktors, der in der Regel einen Wert von 1,25 besitzt<sup>2</sup> (es gibt allerdings Ausnahmen davon), auf die Bemessungsspannung  $U_{r1} = 1,25 \cdot U_{c,\min}$ . Dies ist die mindestens erforderliche, jedoch noch nicht die endgültige Bemessungsspannung des Ableiters.

Direkt geerdetes Netz:

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot 1,05 \cdot U_s / \sqrt{3}$$

Isoliertes oder kompensiertes Netz:

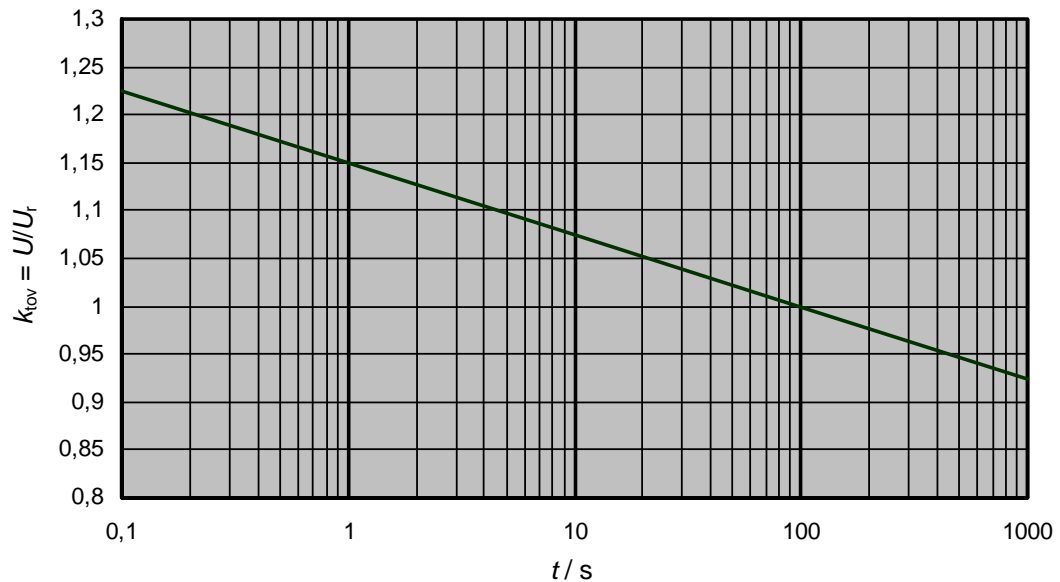
$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot U_s$$

Man erkennt aus diesen beiden Beziehungen leicht, dass die mindestens erforderliche Bemessungsspannung eines Ableiters im starr geerdeten Netz 76 % der (verketteten) Systemspannung beträgt, in einem isoliert oder kompensiert betriebenen Netz dagegen 125 %.

Auf einem ganz anderen Weg ergibt sich eine notwendige Bemessungsspannung bei Betrachtung der im Netz auftretenden zeitweiligen Spannungserhöhungen. Der Sonderfall der kompensiert oder isoliert betriebenen Netze, in denen die zeitweiligen Spannungserhöhungen direkt maßgeblich für die Dauerspannung sind, wurde bereits erwähnt. Bei direkter Sternpunktterdung dagegen erreichen die zeitweiligen Spannungserhöhungen Werte bis zum 1,4-fachen der maximalen Leiter-Erde-Spannung (Erdfehlerfaktor  $k \leq 1,4$ ) für Zeitdauern von einigen Zehntel bis zu einigen Sekunden. Betriebsfrequente Spannungen oberhalb seiner Dauerspannung dürfen an einem Ableiter nur

<sup>1</sup> Kompensierte Netze findet man überwiegend in Mitteleuropa vom Mittelspannungsbereich bis in die 170-kV-Ebene. Netze höherer Spannungsebenen weisen grundsätzlich direkte Sternpunktterdung auf.

<sup>2</sup> Für den Wert 1,25 gibt es keine physikalische Begründung. Er hat sich rein empirisch im Laufe der Entwicklung herstellerunabhängig für praktisch alle Bauformen von MO-Ableitern ergeben.



**Bild 20:** Beispiel für eine Spannungs-Zeit- ( $U$ - $t$ -) Kennlinie

zeitlich begrenzt anliegen. Je höher die Spannung, desto kürzer ist dabei die zulässige Beanspruchungszeit. Dieser Zusammenhang wird in der [Spannungs-Zeit- oder  \$U\$ - \$t\$ -Kennlinie](#) des Ableiters beschrieben (**Bild 20**). Diese gibt die Höhe einer zulässigen betriebsfrequenten Spannung als auf die Bemessungsspannung  $U_r$  bezogenen Effektivwert über der Zeitdauer – aufgetragen in logarithmischem Maßstab – an. Das Verhältnis dieser Spannungen ist der Faktor  $k_{tov}$ . Dabei wird von dem ungünstigen Fall ausgegangen, dass der Ableiter zuvor bereits auf eine Temperatur von  $60\text{ °C}$  aufgeheizt war und unmittelbar vor dem Anlegen der betriebsfrequenten Spannung seine volle Nennenergie aufnehmen musste. Man erkennt aus Bild 20, dass unter diesen Bedingungen die Bemessungsspannung  $U_r$  für eine Zeit von 100 Sekunden anliegen darf<sup>1</sup>. Die 10-Sekunden-Spannung liegt dagegen 7,5 % und die 1-Sekunden-Spannung bereits 15 % über der Bemessungsspannung. Mit der  $U$ - $t$ -Kennlinie wird nun folgendermaßen gearbeitet: es sei beispielsweise die Spannungshöhe  $U_{tov}$  bekannt, die für eine Dauer von einer Sekunde im Netz auftreten kann. Dieser Spannungswert muss entsprechend der  $U$ - $t$ -Kennlinie dem 1,15-fachen der Ableiter-Bemessungsspannung entsprechen ( $k_{tov} = 1,15$ ). Mit anderen Worten: die auszuwählende mögliche Bemessungsspannung  $U_{r2}$  des Ableiters ist der vorliegende 1-s-Spannungswert dividiert durch den für eine Zeitdauer von einer Sekunde gültigen Faktor  $k_{tov}$ , in diesem Fall also 1,15. Allgemein heißt das:

<sup>1</sup> In der [Arbeitsprüfung](#) (im Rahmen der Typprüfung) nach IEC 60099-4 muss die Bemessungsspannung jedoch nur für eine Dauer von 10 Sekunden angelegt werden. Die Auslegung auf 100 Sekunden dient in diesem Fall der zusätzlichen Sicherheit.

Direkt geerdetes Netz:

$$U_{r2} = U_{\text{tov}}/k_{\text{tov}}$$

Liegen aus Kenntnis der Netzverhältnisse weitere Spannungs-Zeit-Wertepaare vor, ist für jedes von ihnen getrennt die notwendige Bemessungsspannung zu ermitteln. Liegen überhaupt keine Angaben vor, so ist im Falle direkter Sternpunktterdung von einem Erdfehlerfaktor von 1,4 und einer Zeitdauer von zehn Sekunden für das Auftreten zeitweiliger Spannungserhöhungen auszugehen. Die höchste der so über die auftretenden zeitweiligen Überspannungen bestimmten Bemessungsspannungen ist die Bemessungsspannung  $U_{r2}$  in Bild 19. Zur Festlegung der endgültigen Bemessungsspannung des Ableiters ist es jetzt nur noch ein kleiner Schritt:  $U_r$  ist der höhere der beiden Werte  $U_{r1}$  und  $U_{r2}$ , aufgerundet auf den nächst höheren durch drei teilbaren Wert<sup>1</sup>.

War die Bemessungsspannung  $U_{r2}$  größer als  $U_{r1}$ , so ist natürlich noch die Dauerspannung neu festzulegen:

Nach derartiger Festlegung der Dauer- und Bemessungsspannung ist der Ableiter

$$U_r = \max \{ U_{r1}, U_{r2} \}$$

aufgerundet auf einen durch 3 teilbaren Wert

grundsätzlich sowohl für einen stabilen Dauerbetrieb als auch für Betrieb unter den Bedingungen der im Netz auftretenden zeitweiligen Spannungserhöhungen ausgelegt. Es

$$U_c = U_r/1,25$$

ist jedoch empfehlenswert, eine etwas höhere als die beschriebene Mindestbemessung auszuwählen, solange dadurch der Schutzpegel des Ableiters nicht unverträglich hoch wird. In der Regel lassen die aus dem Netzbetrieb vorliegenden Schutzpegelforderungen

<sup>1</sup> Die Vorschrift IEC 60099-4 nennt Stufen, in denen die Bemessungsspannung angegeben werden soll. Diese liegen je nach Höhe der Bemessungsspannung zwischen 1 kV und 24 kV, wobei auch andere Stufen zulässig sind, solange sich insgesamt eine durch 6 teilbare Bemessungsspannung ergibt. Heute werden allerdings durchweg feinere Stufen, z. B. 3 kV, auch für höchste Bemessungsspannungen angeboten.

das zu<sup>1</sup>. Eine höhere Bemessung kommt der Stabilität des Ableiters zugute und bringt zusätzliche Sicherheit beispielsweise bei Betrieb unter Fremdschichtbedingungen oder bei Auftreten unvorhergesehen hoher zeitweiliger Spannungserhöhungen. Meist findet man daher in den Netzen Ableiter mit höheren als den mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannungen vor. Im Einzelnen hängt das allerdings stark von der Betriebsphilosophie des jeweiligen Anwenders ab.

### Auswahl des Nenn-Ableitstoßstromes $I_n$

Der Nenn-Ableitstoßstrom dient der Klassifizierung der MO-Ableiter. Technisch gesehen ergibt er sich aus einer typischen maximal in der Schaltanlage zu erwartenden Blitzstromamplitude, für die über den zugehörigen Blitzschutzpegel der Ableiter die Isolationskoordination durchgeführt wird. Diese Amplitude errechnet sich aus der Überschlagspannung  $U_{\ddot{u}}$  der Freileitungsisolatoren, dem Blitzschutzpegel  $U_{pl}$  der Ableiter und dem Wellenwiderstand  $Z$  der Freileitung zu  $I_{max} = (2 \cdot U_{\ddot{u}} - U_{pl})/Z$ . In dieser Gleichung trägt der Faktor 2 der Tatsache Rechnung, dass auf Grund der Gesetzmäßigkeiten der Wanderwellenausbreitung der in die Schaltanlage laufende Blitzstrom sich im Ableiter verdoppelt, da dieser näherungsweise ein kurzgeschlossenes Leitungsende (mit in Reihe liegender Konstantspannungsquelle) darstellt. Dazu ein Zahlenbeispiel für ein 420-kV-Netz:  $U_{\ddot{u}} = 2,1 \text{ MV}$ ,  $U_{pl} = 806 \text{ kV}$ ,  $Z = 350 \text{ } \Omega \rightarrow I_{max} = 9,7 \text{ kA}$ .

IEC 60099-4 definiert derzeit fünf verschiedene Werte<sup>2</sup>, die unterschiedlichen Bereichen der Bemessungsspannung zugeordnet sind:

**Tabelle 1:** Nennableitstoßströme nach IEC 60099-4

1,5 kA	2,5 kA	5 kA	10 kA	20 kA
"in Klärung"	$U_r \leq 36 \text{ kV}$	$U_r \leq 132 \text{ kV}$	$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 360 \text{ kV}$	$360 \text{ kV} < U_r \leq 756 \text{ kV}$

Nun sagt der Zahlenwert direkt allerdings noch nichts über die Betriebseigenschaften des Ableiters aus. So kann etwa ein 10-kA-Ableiter ohne weiteres auch Blitzstoßströme

<sup>1</sup> Eine Ausnahme stellen die Netze der höchsten Spannungsebenen  $U_s \geq 550 \text{ kV}$  dar. Forderungen nach niedrigen Schaltstoßschutzpegeln geben hier meist wenig Spielraum, die Bemessungsspannung über den mindestens erforderlichen Wert hinaus zu erhöhen.

<sup>2</sup> Nach IEC 60099-4, Tabelle 1. Die IEC-Vorschrift gibt die Werte in "A" an, also z.B. 10 000 A statt 10 kA. Es hat sich aber im allgemeinen Sprachgebrauch die Angabe in "kA" durchgesetzt. Auch die deutsche Fassung der Vorschrift, DIN EN 60099-4, macht kA-Angaben.

höherer Amplituden ableiten, ohne Schaden zu nehmen. Die eigentliche Bedeutung dieser Klassifizierung liegt darin, dass abhängig von der Klasse unterschiedliche weitere Anforderungen und Prüfbedingungen spezifiziert werden.

Für Mittelspannungsableiter, bei denen hauptsächlich die Klassen 5 kA und 10 kA zum Einsatz kommen, stellt der Nenn-Ableitstoßstrom tatsächlich ein echtes Unterscheidungsmerkmal dar. Bei der Durchführung der [Arbeitsprüfung](#) wird in einen 5-kA-Ableiter die Energie in Form zweier [Hochstoßstrom-Impulse](#) von jeweils 65 kA eingebracht, nachdem er vorher mit 20 Blitzstoßströmen in Höhe seines Nenn-Ableitstoßstromes – also 5 kA – belastet wurde. Beim 10-kA-Ableiter beträgt der entsprechende Wert des Hochstoßstromes dagegen 100 kA und die Höhe der Blitzstoßströme 10 kA. Da für die in Mittelspannungsableitern eingesetzten kleinen MO-Widerstände (Durchmesser im Bereich von kleiner 30 mm bis 45 mm) diese Beanspruchungen bereits eine hohe energetische Belastung darstellen, muss ein 10-kA-Ableiter zum Bestehen dieser Prüfung tatsächlich mit großvolumigeren MO-Widerständen ausgerüstet sein als ein 5-kA-Ableiter. Für mitteleuropäische Verhältnisse sind in den Mittelspannungsnetzen 5-kA-Ableiter völlig ausreichend, nur in Ausnahmefällen (z. B. aufgrund eines überdurchschnittlich hohen [keraunischen Pegels](#)) wird die Verwendung von 10-kA-Ableitern empfohlen. In der Praxis setzen sich allerdings zunehmend die 10-kA-Ableiter durch, da die Preisunterschiede zwischen beiden Typen immer geringer werden, während es gleichzeitig logistische Vorteile mit sich bringt, nur einen Ableitertyp im gesamten Netz einzusetzen.

Für Hochspannungsableiter kommen nur die beiden Klassen 10 kA und 20 kA in Frage. Entsprechend der oben gezeigten Tabelle wäre im 170-kV-Netz zwar noch der Einsatz von 5-kA-Ableitern möglich, in der Praxis ist das aber unüblich. Auch die Anwendungsrichtlinie IEC 60099-5 empfiehlt 5-kA-Ableiter nur für Spannungen bis  $U_s = 72,5$  kV.

Die beiden Klassen 10 kA und 20 kA unterscheiden sich im wesentlichen darin, welche [Leitungsentladungsklassen](#) ihnen zugeordnet werden können: für 10-kA-Ableiter sind das die Klassen 1 bis 3 und für 20-kA-Ableiter die Klassen 4 und 5. Dementsprechend etwa können verschiedene 10-kA-Ableiter sehr unterschiedliche Betriebseigenschaften haben, und die eigentlich klassifizierende Größe ist weniger der Nenn-Ableitstoßstrom als die Leitungsentladungsklasse. Bis in die 420-kV-Ebene hinein ist der Einsatz von 10-kA-Ableitern der Leitungsentladungsklasse 3 problemlos möglich, allerdings werden bereits auch in dieser Spannungsebene 20-kA-Ableiter eingesetzt, zum Teil unter Verwendung der gleichen MO-Widerstände. Technisch notwendig ist das jedoch in aller Regel nicht.

## Auswahl der Leitungsentladungsklasse

Die Leitungsentladungsklasse ist das eigentliche Unterscheidungsmerkmal von Hochspannungsableitern. Sie ist die einzige derzeit in IEC 60099-4 vorgesehene Möglichkeit, das Energieaufnahmevermögen eines Ableiters zu spezifizieren. Dabei findet es sich allerdings nur indirekt in dem Wert der Leitungsentladungsklasse wieder. Der Zusammenhang ist relativ schwer verständlich, was letztendlich dazu geführt hat, dass praktisch alle Hersteller in ihren Katalogen zusätzlich von den IEC-Definitionen abweichende Angaben zum Energieaufnahmevermögen machen<sup>1</sup>.

Der Definition der Leitungsentladungsklassen liegt die Annahme zugrunde, dass eine aufgrund einer Schalthandlung auf eine bestimmte Spannung aufgeladene lange Übertragungsleitung sich in Form eines [Wanderwellenvorganges](#) in den Ableiter entlädt. Ausgehend von dem Ersatzschaltbild einer Leitung als Kettenleiter von  [\$\pi\$ -Gliedern](#) fließt dabei ein Strom, dessen Höhe sich aus der Spannungshöhe und dem [Wellenwiderstand](#) der Leitung und dessen Stromflusszeit sich aus der Länge der Leitung und der Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektrischen Wanderwelle ergibt. Es stellt sich dabei ein im idealen Fall rechteckförmiger Impulsstromverlauf ein. Dieser Vorgang muss im Labor in einer [Leitungsentladungsprüfung](#) nachgebildet werden. Der Impulsstrom wird dabei üblicherweise mit Hilfe eines [Kettenleiters](#) erzeugt, der letztlich nichts weiter als die Leitungsnachbildung aus einer Hintereinanderschaltung einer endlichen Zahl (etwa 10 bis 30) von  $\pi$ -Gliedern darstellt. Die Vorschrift IEC 60099-4 definiert nun 5 verschiedene Leitungsentladungsklassen mit von Klasse 1 bis Klasse 5 steigenden Anforderungen an den Ableiter, indem die für die Prüfung einzustellenden elektrischen Parameter des Kettenleiters festgelegt werden:

---

<sup>1</sup> Das Leitungsentladungsklassensystem hat seine eigentliche Berechtigung für Funkenstreckenableiter mit strombegrenzenden Funkenstrecken, und als Anfang der achtziger Jahre – in den Anfängen der MO-Ableitertechnik – begonnen wurde, eine Prüfvorschrift für MO-Ableiter zu erarbeiten, hat man dieses System in damaliger Ermangelung besserer Alternativen übernommen. Ist ein solches System aber erst einmal eingeführt, lässt es sich nur schwer wieder ändern. Es wird in der Normung jedoch bereits über neue Definitionen des Energieaufnahmevermögens nachgedacht, die den in heutigen Ableiteranwendungen auftretenden Beanspruchungen besser gerecht werden.

**Tabelle 2:** Leitungsentladungsklassen und zugehörige Prüfparameter nach IEC 60099-4

Leitungsentladungsklasse	Wellenwiderstand $Z$ in $\Omega$	Scheiteldauer $T$ in $\mu\text{s}$	Ladespannung $U_L$ in kV (Gleichspannung)
1	$4,9 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
2	$2,4 \cdot U_r$	2000	$3,2 \cdot U_r$
3	$1,3 \cdot U_r$	2400	$2,8 \cdot U_r$
4	$0,8 \cdot U_r$	2800	$2,6 \cdot U_r$
5	$0,5 \cdot U_r$	3200	$2,4 \cdot U_r$

$U_r$  = Bemessungsspannung des Prüflings als Effektivwert in kV

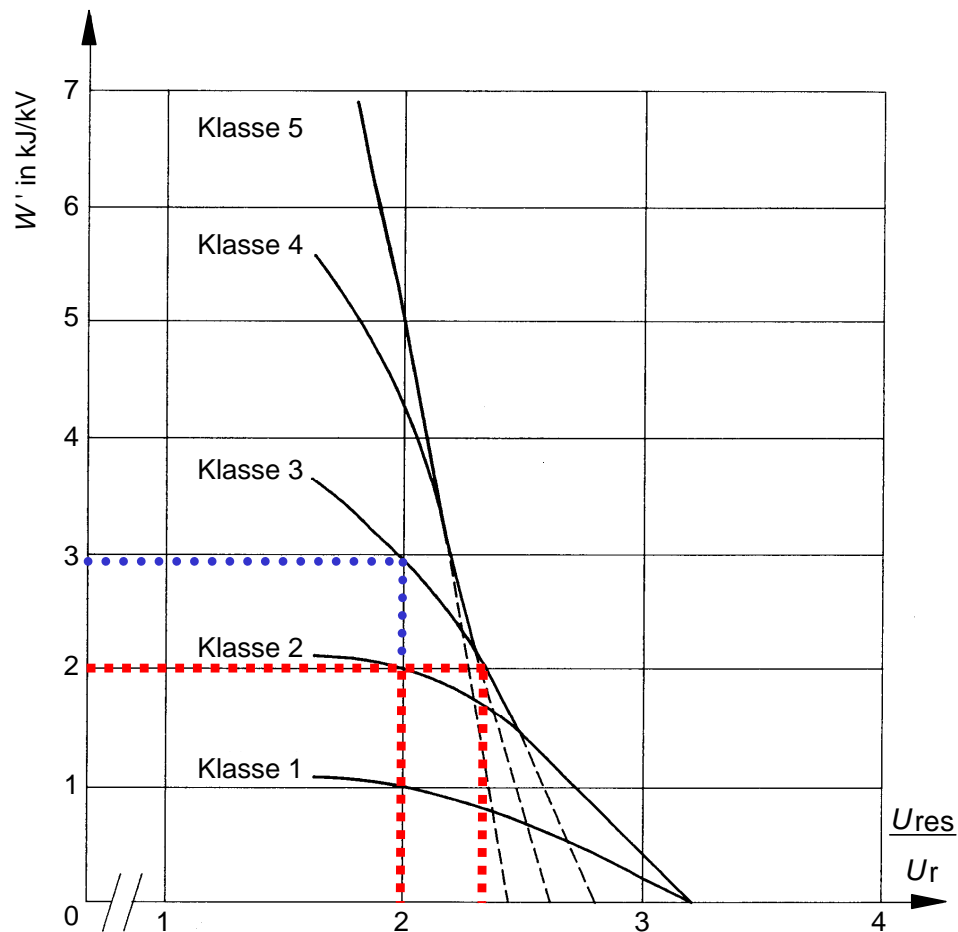
Diese Parameter sind aus typischen Betriebseigenschaften und -bedingungen von Hochspannungsübertragungsleitungen abgeleitet<sup>1</sup>. Aus der Tabelle lassen sich noch keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die in der Prüfung auftretende Belastung des Ableiters ziehen. Die IEC-Vorschrift 60099-4 gibt daher zusätzlich ein Diagramm an, das die während einer einzelnen Leitungsentladung<sup>2</sup> im Prüfling umgesetzte Energie, bezogen auf seine Bemessungsspannung<sup>3</sup> darstellt. Diese Energie ist nicht konstant, sondern hängt von der Höhe des Ableiterschutzpegels – genauer gesagt: der Schaltstoßrestspannung  $U_{\text{res}}$  beim Fließen des jeweils kleineren Schaltstoßstroms aus Tabelle 5 – ab. Je höher diese Restspannung gewählt wird, desto weniger Energie muss der Ableiter während einer Leitungsentladung aufnehmen, da die Leitung bei einer höheren Restspannung weniger stark entladen wird. Das erwähnte Diagramm ist in **Bild 21** wiedergegeben. Nun lässt sich die Schwierigkeit, mit Hilfe der Leitungsentladungsklasse das Energieaufnahmevermögen zu spezifizieren, gut erkennen. Werden MO-Widerstände eines bestimmten spezifischen Energieaufnahmevermögens eingesetzt, kann der Ableiter je nach Wahl der Restspannung unterschiedlichen Leitungsentladungsklassen zugeordnet werden. Das zeigt folgendes Beispiel (rote gestrichelte Linien in Bild 21): bei Verwendung ein- und derselben MO-Widerstände, die je Leitungsentladung 2 kJ/kV an Energie aufnehmen können (während der mit zwei Leitungsentladungen durchgeführten

<sup>1</sup> Siehe dazu auch IEC 60099-1, Tabelle C.1 bzw. IEC 60099-5, Tabelle 1.

<sup>2</sup> Während der für Ableiter der Leitungsentladungsklassen 2 bis 5 durchzuführenden [Arbeitsprüfung mit Rechteckstoßstrom](#) wird der Prüfling mit **zwei** dieser Entladungen im Abstand von etwa einer Minute beansprucht. Das heißt, ein Ableiter muss mindestens das Zweifache des in dem Diagramm genannten Wertes an Energie aufnehmen können, ohne thermisch instabil zu werden.

<sup>3</sup> Es ist üblich, so auch in der Vorschrift IEC 60099-4, die Energie auf die Bemessungsspannung zu beziehen. Einige Hersteller verwenden jedoch die Dauerspannung als Bezugswert, was seine Ursache unter anderem darin hat, dass in der US-amerikanischen Ableitervorschrift IEEE C62.11 eine Bemessungsspannung gar nicht definiert ist (stattdessen wird dort ein von der IEC-Definition der Bemessungsspannung abweichendes "duty cycle voltage rating" angegeben).





**Bild 21:** Die während einer einzelnen Leitungsentladung eingebrachte spezifische Energie, bezogen auf die Bemessungsspannung des Ableiters, in Abhängigkeit von der Schaltstoßrestspannung des Ableiters, ebenfalls bezogen auf die Bemessungsspannung (nach IEC 60099-4)

Arbeitsprüfung insgesamt also den doppelten Wert, nämlich 4 kJ/kV, ohne thermisch instabil zu werden), besitzt der Ableiter bei einem Verhältnis  $U_{res}/U_r = 2$  die Leitungsentladungsklasse 2, jedoch bereits die Leitungsentladungsklasse 3, wählt man das Verhältnis  $U_{res}/U_r = 2,35$ . Der mit der Leitungsentladungsklasse 3 scheinbar "bessere" Ableiter ist aber möglicherweise für den geplanten Einsatzfall schlechter geeignet, weil sein Schutzpegel höher ist! Um dagegen die Leitungsentladungsklasse 3 unter Beibehaltung des Verhältnisses  $U_{res}/U_r = 2$  zu erreichen, müssten MO-Widerstände mit einem Energieaufnahmevermögen von knapp 6 kJ/kV (etwa 3 kJ/kV je Entladung; blaue gepunktete Linien in Bild 21), das heißt solche größeren Durchmessers, eingesetzt werden.

Umgekehrt kann aus der Leitungsentladungsklasse nur in Verbindung mit der Restspannung auf das Energieaufnahmevermögen – und damit auf die verwendeten MO-Widerstände – eines Ableiters geschlossen werden. Es ist wichtig, sich diesen Zusammenhang bei der Auswahl eines Ableiters klarzumachen.

Liegen keine besonders erleichternden oder erschwerenden Netzbedingungen vor, werden folgende Leitungsentladungsklassen abhängig von der Systemspannung empfohlen (IEC 60099-5):

**Tabelle 3:** Richtwerte für Leitungsentladungsklassen abhängig von der Systemspannung

Leitungsentladungsklasse	$U_s$ / kV
1	$\leq 245$
2	$\leq 300$
3	$\leq 420$
4	$\leq 550$
5	$\leq 800$

Tatsächlich tendiert man in der Praxis jedoch häufig dazu, die jeweils nächst höhere der in der Tabelle genannten Leitungsentladungsklassen auszuwählen. Das führt auf die Problematik, dass die derzeit höchste Leitungsentladungsklasse 5 oft nicht mehr die Anforderungen in den Höchstspannungsnetzen mit  $U_s > 550$  kV abdeckt. Tatsächlich werden in diesen Spannungsebenen, teilweise auch bereits in der 550-kV-Ebene, Widerstandsdurchmesser beziehungsweise Parallelschaltungen von Widerständen eingesetzt, die ein weitaus größeres Energieaufnahmevermögen ergeben als es der Leitungsentladungsklasse 5 entspricht. Für diese Netze ist es allerdings auch üblich, die Forderungen an das Energieaufnahmevermögen durch eingehende Netzstudien genau zu ermitteln, so dass hier vom Anwender in der Regel ein genauer Wert für das Energieaufnahmevermögen anstelle einer Leitungsentladungsklasse spezifiziert wird.

Mit der Entscheidung für eine bestimmte Leitungsentladungsklasse – und damit indirekt für ein bestimmtes Energieaufnahmevermögen – ist auch die Entscheidung für den benötigten Durchmesser der MO-Widerstände getroffen. Dabei kann die folgende Zuordnung als grobe Orientierung dienen:

**Tabelle 4:** Typische Zuordnung von MO-Widerständen zu Leitungsentladungsklassen

MO-Widerstands-Durchmesser in mm	Leitungsentladungsklasse
50	1 und 2
60	2 und 3
70	3 und 4
80	4 und 5
100 (oder $2 \cdot 70$ )	5 und höher

Mit der Festlegung der Bemessungsspannung und anschließenden Wahl des MO-Widerstands-Durchmessers liegt die gesamte Schutzcharakteristik des Ableiters eindeutig fest. Alle Restspannungswerte ergeben sich über die dem ausgewählten MO-Widerstand zugehörige  $U-I$ -Kennlinie. Es ist jetzt im nächsten Schritt zu prüfen, ob die so erhaltenen Schutzwerte ausreichend sind.

## Auswahl und Überprüfung der Schutzpegel

Am häufigsten wird die Schutzcharakteristik eines Ableiters nach seinem Blitzstoß-Schutzpegel, das heißt nach seiner Restspannung bei Fließen des Nenn-Ableitstoßstromes beurteilt. Wie bereits im Abschnitt "Aufgabe und Wirkungsweise von MO-Ableitern" erwähnt, ist nach der Anwendungsrichtlinie zur Isolationskoordination, IEC 60071-2, sicherzustellen, dass zwischen der Bemessungs-Blitzstoßspannung eines zu schützenden Betriebsmittels mit nichtselbstheilender Isolation und den höchsten an seinen Klemmen auftretenden Blitzüberspannungen mindestens ein Faktor – der sogenannte [Sicherheitsfaktor  \$K\_s\$](#)  – von 1,15 liegt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Spannung an den Klemmen des zu schützenden Betriebsmittels durch Wanderwellenvorgänge und induktive Spannungsfälle grundsätzlich höher sein kann als unmittelbar an den Ableiterklemmen. Außerdem muss der – in Hochspannungsnetzen allerdings eher unwahrscheinliche – Fall eines Ableitstromes berücksichtigt werden, der höher ist als der Nenn-Ableitstoßstrom des Ableiters.

Bei nicht zu großen Abständen zwischen Ableiter und Betriebsmittel – Ableiter haben einen räumlichen [Schutzbereich](#) von nur einigen wenigen Metern in Mittelspannungsnetzen bis hin zu wenigen zehn Metern in Hoch- und Höchstspannungsnetzen – führt meist ein Schutzpegel von nicht mehr als dem Wert der Bemessungsblitzstoßspannung des Betriebsmittels dividiert durch einen Faktor von 1,4 zu einem ausreichenden Schutz vor Blitzüberspannungen. Es ist aber zu beachten, dass für besondere Netzkonfigurationen und Anwendungsfälle oder bei größeren Abständen zwischen Ableiter und Betriebsmittel diese Vereinfachung nicht ausreichend ist. Die richtige und allgemeine Vorgehensweise ist daher, die auftretenden Überspannungen durch Berechnungen zu bestimmen und die erforderlichen Schutzpegel des Ableiters durch eine Isolationskoordinationsstudie festzulegen. Informationen und Anleitung dazu geben die IEC-Publikationen 60071-1 und 60071-2 zur Isolationskoordination sowie die Anwendungsempfehlungen für Überspannungsableiter IEC 60099-5.

Es ist üblich, die Blitzstoß-Restspannung zusätzlich auch noch für den zweifachen Wert des Nenn-Ableitstoßstromes anzugeben. Die entsprechenden Werte liegen im allgemeinen 5 % bis 15 % über dem Blitzstoß-Schutzpegel.

In Höchstspannungsnetzen ist häufig der [Schaltstoß-Schutzpegel](#) der entscheidende Schutzkennwert eines Ableiters. Er wird grundsätzlich jeweils für zwei verschiedene, in der IEC-Vorschrift 60099-4 vorgegebene [Schaltstoßströme](#) angegeben:

**Tabelle 5:** Schaltstoßströme für Hochspannungsableiter nach IEC 60099-4

Ableitertyp	Schaltstoßströme in A
20 kA, LD-Klassen 4 und 5	500 und 2000
10 kA, LD-Klasse 3	250 und 1000
10 kA, LD-Klassen 1 und 2	125 und 500

Die Schaltstoß-Restspannungswerte liegen typischerweise, je nach verwendeten MO-Widerständen und dem jeweiligen Schaltstoßstromwert, im Bereich von 75 % bis 90 % des 10-kA-Blitzstoß-Schutzpegels. Bei einem Schaltstoßstrom von 1 kA kann man als Richtwert mit etwa 85 % des 10-kA-Blitzstoß-Restspannungswertes rechnen<sup>1</sup>.

Genauso wie für den Blitzstoß-Schutzpegel gilt auch für den Schaltstoß-Schutzpegel, dass er so zu wählen ist, dass Schaltüberspannungen an dem zu schützenden Betriebsmittel nicht höher werden als dessen Bemessungs-Schaltstoßspannung<sup>2</sup> dividiert durch den Sicherheitsfaktor  $K_s$  ( $K_s = 1,15$  im Falle nichtselbstheilender Isolation). Wegen der vergleichsweise langsamen Vorgänge brauchen jedoch Spannungserhöhungen durch Wanderwelleneffekte oder induktive Spannungsfälle nicht berücksichtigt zu werden. Das bedeutet, dass der Schaltstoß-Schutzpegel nicht niedriger als die Bemessungs-Schaltstoßspannung des Betriebsmittels, dividiert durch einen Faktor von 1,15 ausgelegt zu werden braucht.

In einigen besonderen Anwendungsfällen ist die Kenntnis des [Steilstoß-Schutzpegels](#) erforderlich. Auch dieser wird deshalb üblicherweise im Datenblatt des Ableiters genannt. Die Restspannung von MO-Widerständen ist bei Steilstoßstrombeanspruchung rund 5% (im Extremfall 10%) höher als bei Blitzstoßstrombeanspruchung gleicher

<sup>1</sup> Herstellerabhängige Abweichungen davon sind möglich.

<sup>2</sup> Häufig wird in diesem Zusammenhang vom SIL – dem basic switching impulse insulation level – gesprochen. Dieser Begriff aus den US-amerikanischen Vorschriften ist jedoch in den IEC-Vorschriften nicht definiert (siehe Erläuterungen zum [SIL](#) im Anhang).

Höhe. Vorsicht ist jedoch bei der Interpretation der entsprechenden Restspannungsangaben geboten. Grundsätzlich wird die Restspannung bei steilen Stromanstiegen (Stirnzeiten im Bereich  $\leq 1 \mu\text{s}$ ) durch zwei unterschiedliche, jedoch immer zusammen auftretende Effekte beeinflusst: das zeitliche Verhalten des MO-Materials beim Übergang vom nichtleitenden in den leitenden Zustand stellt sich rein äußerlich wie ein induktives Verhalten dar (der Scheitelwert der Restspannung liegt zeitlich vor dem Scheitelwert des Stromes, siehe [Bild 4](#)), und zusätzlich wirkt die Induktivität der geometrischen Anordnung mit ca.  $1 \mu\text{H}$  je Meter Bauhöhe. Letzterer Einfluss kann zu einer Erhöhung der Restspannung um weitere 5% oder sogar mehr führen. Die IEC-Vorschrift 60099-4 definiert sehr genau, wie diese beiden Effekte voneinander zu trennen sind, und dass beide zusammen im spezifizierten Steilstoß-Schutzpegel eines Ableiters enthalten sein müssen. Nicht alle Hersteller halten sich jedoch genau an diese Vorgaben, so dass in Zweifelsfällen eine Rückfrage angebracht ist.

Ergibt die Überprüfung der Schutzcharakteristik für alle aufgeführten Stoßstrombeanspruchungen, dass die Schutzpegelforderungen erfüllt sind, so ist die Auswahl der elektrischen Kennwerte des Ableiters an dieser Stelle abgeschlossen. Was ist jedoch zu tun, wenn einer der genannten Restspannungswerte zu hoch ist? Verknüpft über die  $U-I$ -Kennlinie der verwendeten MO-Widerstände stehen sämtliche Restspannungswerte sowie die Dauer- und die Bemessungsspannung in einem festen Verhältnis zueinander. Daher kann ein einzelner dieser Werte nicht für sich allein abgesenkt werden. Es müsste also, um beispielsweise einen niedrigeren Schaltstoßpegel zu erhalten, die gesamte Kennlinie nach unten verschoben werden. Dies verbietet sich jedoch, da dann automatisch auch die Dauer- und Bemessungsspannung um den gleichen Prozentsatz niedriger würden und ein stabiler Dauerbetrieb so nicht mehr gewährleistet wäre. Es gibt in diesem Falle in der Regel nur ein einziges zulässiges Mittel: es müssen MO-Widerstände größeren Querschnitts ausgewählt werden. Das kann durch Wahl eines größeren Durchmessers oder durch Parallelschaltung mehrerer Widerstände erreicht werden. Grundsätzlich gilt, dass das Verhältnis von Blitzstoß-Schutzpegel zur Bemessungsspannung umso kleiner ist, je größer der MO-Widerstands-Querschnitt ist. Das kann man sich recht einfach an Hand der  $E-J$ -Kennlinie klarmachen: bei gleichem eingepprägten Strom führt der größere Querschnitt zu einer geringeren Stromdichte und damit, dem Verlauf der Kennlinie folgend, auf niedrigere Spannungen je Millimeter Bauhöhe („Feldstärken“). Bei gleicher Dauer- und Bemessungsspannung wird also ein größerer Widerstands-Querschnitt niedrigere Schutzpegel zur Folge haben. Das Verhältnis der

Restspannung bei einem Blitzstoßstrom von 10 kA zum Effektivwert der Bemessungsspannung liegt zwischen Werten von über drei bei Mittelspannungsableitern bis annähernd herab zu zwei für schwere, mehrsäulige Hochspannungsableiter<sup>1</sup>. Die Forderung nach niedrigen Restspannungswerten ist also häufig der Grund dafür, dass in Ableitern größere oder mehr Widerstände eingesetzt werden, als für das benötigte Energieaufnahmevermögen (bzw. die Leitungsentladungsklasse) eigentlich erforderlich wäre. Deshalb sollten niedrige Restspannungswerte wirklich nur dann gefordert werden, wenn sie unbedingt notwendig sind.

## Auswahl des Gehäuses

Die Auswahl des Gehäuses erfolgt im Wesentlichen nach dielektrischen und mechanischen Gesichtspunkten. Festzulegen sind die Länge, der Kriechweg, die Schirmform, der Durchmesser und das Material. Durch das Gehäuse bestimmte Ableiterkennwerte sind der [Bemessungs-Kurzschlussstrom](#)  $I_s$  sowie die [Festgelegte Dauerlast](#), SLL, und die [Festgelegte Kurzzeitlast](#), SSL.

Die Mindest-Gehäuselänge ergibt sich natürlich zunächst aus der Forderung, dass die Säule von MO-Widerständen (der Aktivteil), dessen Länge sich durch die Festlegung der elektrischen Daten in den bis hierher durchgeführten Auswahlritten ergibt, aufgenommen werden können muss. In der Regel ist das jedoch nicht die bemessende Größe. Meist führen die weiteren Forderungen zu Längen, die über die des Aktivteils weit hinausgehen.

Als erstes ist hier die [Schlagweite](#) zu nennen, die sich aus den Stehspannungsforderungen ergibt. Gemäß IEC 60099-4 muss das Ableitergehäuse folgende Prüfanforderungen erfüllen:

---

<sup>1</sup> Die Faktoren sind im Einzelnen natürlich stark herstellerabhängig, bewegen sich aber allgemein in diesem Rahmen.

**Tabelle 6:** Geforderte Stehspannungen der Ableitergehäuse nach IEC 60099-4

	$I_n = 10 \text{ kA und } 20 \text{ kA}$		$I_n \leq 5 \text{ kA und Ableiter für hohe Blitzstrombelastungen } (1 \text{ kV} \leq U_s \leq 52 \text{ kV})$
	$U_r \geq 200 \text{ kV}$	$U_r < 200 \text{ kV}$	
Prüfung mit Blitzstoßspannung	1,3 · Blitzstoß-Schutzpegel		
Prüfung mit Schaltstoßspannung	1,25 · Schaltstoß-Schutzpegel	–	–
Prüfung mit Wechselspannung ( $\hat{u}$ ; Dauer 1 min)	–	1,06 · Schaltstoß-Schutzpegel	0,88 · Blitzstoß-Schutzpegel

Aus diesen Anforderungen ergeben sich Prüfspannungen, die unterhalb der der übrigen Betriebsmittel des Netzes liegen, wie folgendes Beispiel für die Steh-Blitzstoßspannung zeigt: ein für das 420-kV-Netz typischer Ableiter hat einen Blitzstoß-Schutzpegel von 806 kV (siehe [Bild 2](#)). Sein Gehäuse ist daher mit einer Blitzstoßspannung von  $1,3 \cdot 806 \text{ kV} = 1048 \text{ kV}$  zu prüfen, was einem Wert von nur 74 % der in diesem Netz üblichen Bemessungs-Blitzstoßspannung von 1425 kV entspricht. Die einfache Rechtfertigung dafür ist, dass das Ableitergehäuse die bestgeschützte Isolation innerhalb des Netzes überhaupt ist. An ihm können nie höhere Spannungen auftreten, als sie unmittelbar an den in ihm enthaltenen MO-Widerständen abfallen. Dabei sind in den in der Tabelle genannten Faktoren bereits unterschiedliche atmosphärische Bedingungen – z. B. Aufstellung in bis zu 1000 m Höhe – sowie die Möglichkeit höherer Ableitströme als Nenn-Ableitstoßstrom berücksichtigt. Trotzdem werden jedoch leider häufig für das Ableitergehäuse die gleichen Stehspannungswerte wie für die übrigen Betriebsmittel gefordert, was dann zu unnötig langen und damit unökonomischeren und auch technisch nachteiligen Ableitergehäusen führt<sup>1</sup>.

Bei Aufstellungshöhen oberhalb 1000 m – das zählt entsprechend der IEC-Definition schon nicht mehr zu den "normalen Betriebsbedingungen"<sup>2</sup> – müssen größere Schlagweiten und Gehäuselängen gewählt werden, um die geforderten Stehspannungswerte unter den Bedingungen verringerter Luftdichte zu halten.

Ein weitaus häufigerer Grund für längere Gehäuse sind jedoch Kriechwegforderungen. Zu der ausschließlich durch die Länge des Aktivteils bedingten kürzestmöglichen

<sup>1</sup> Durch Verwendung längerer Gehäuse können sich beispielsweise eine geringere Kurzschlussfestigkeit oder eine ungünstigere Spannungsverteilung entlang der Ableiterhöhe ergeben.

<sup>2</sup> Erläuterung später in diesem Abschnitt

Gehäuselänge gelangt man in der Regel nur bei einer Auslegung für die [Fremdschichtklassen](#) "a", "b" oder "c"<sup>1</sup>, d.h. bei [vereinheitlichten spezifischen Kriechwegen](#) von maximal 34,6 mm/kV bzw. [spezifischen Kriechwegen](#) von maximal 20 mm/kV<sup>2</sup>. Für mitteleuropäische Verhältnisse ist das oft ausreichend, weltweit spielen jedoch auch die Fremdschichtklassen "d" und "e" eine große Rolle, die zu vereinheitlichten spezifischen Kriechwegforderungen von 43,3 mm/kV und 53,7 mm/kV (entsprechend spezifischen Kriechwegen von 25 mm/kV und 31 mm/kV) führen. Darüber hinaus gibt es durchaus auch Standorte, die die Verwendung noch längerer Kriechwege erforderlich machen, zum Beispiel solche mit maritimem Wüstenklima, gegebenenfalls noch zusätzlicher Industrierverschmutzung. Unter solch extremen Bedingungen ist allerdings zu bedenken, dass es für Ableiter auch noch weitere, oftmals besser geeignete Maßnahmen zur Erhöhung der Betriebssicherheit gibt als allein die Erhöhung des Kriechweges. Dazu gehören zum Beispiel die Wahl einer höheren Dauer- und Bemessungsspannung (damit allerdings auch eines höheren Schutzpegels), die Verwendung von MO-Widerständen größeren Durchmessers oder der Einsatz von Gehäusen mit größerem Abstand zwischen Aktivteil und Gehäusewand (zur Verringerung der kapazitiven Kopplung zwischen äußeren elektrischen Entladungen und dem innen liegenden Aktivteil). Auf alle Fälle ist im Auge zu behalten, dass die mit der alleinigen Kriechwegverlängerung einhergehende "künstliche" Verlängerung des Aktivteils (durch Einfügen von metallischen Längenausgleichsstücken), wie bereits im Zusammenhang mit den Stehspannungsforderungen erwähnt, durchaus auch nachteilige Auswirkungen auf das übrige Betriebsverhalten haben kann.

Auf die unterschiedlichen Schirmprofile und einige ihrer Eigenschaften wurde bereits im Abschnitt "Konstruktiver Aufbau von MO-Ableitern" eingegangen. Eine generelle Empfehlung für ein bestimmtes Schirmprofil kann hier nicht gegeben werden. Im Zweifel sollte eines gewählt werden, mit dem an dem jeweiligen Standort auch bisher schon gute Erfahrungen gewonnen wurden.

Für Ableiter mit Kunststoffgehäuse kann bei Verwendung von Silikonbeschirmung theoretisch von einem "Silikonbonus" Gebrauch gemacht werden. Wegen deren Hydrophobie-Eigenschaften ließe sich der Kriechweg beispielsweise auf 80% des für Porzellangehäuse erforderlichen Wertes verringern. Praktisch wird das aber meist nicht ge-

---

<sup>1</sup> Entsprechend der Definition in IEC 60815-1

<sup>2</sup> Bezüglich der Unterschiede in den Kriechwegdefinitionen sowie der Fremdschichtklassen in der alten IEC 60815, Ed. 1, 1986 und der aktuellen IEC 60815-1, -2, -3, erschienen 2008, siehe Anhang.



nutzt, da theoretisch die Hydrophobie unter bestimmten Betriebsbedingungen (z.B. lang anhaltende, ununterbrochene Befeuchtung) verloren gehen kann und das Gehäuse unter diesen Bedingungen einem Porzellan Gehäuse vergleichbare Isoliereigenschaften aufweist. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Ausführungen in IEC 60815-3 verwiesen.

Nachdem bis hierher die Gehäuseparameter auf Grund elektrischer Forderungen festgelegt sind, folgen im nächsten und letzten Schritt die mechanischen Kriterien. Sie führen indirekt auf die Auswahl des Gehäusematerials und des Gehäusedurchmessers. Über die im Betrieb auftretenden mechanischen Beanspruchungen eines Ableiters herrschen oft nur unklare Vorstellungen, und dementsprechend häufig werden Forderungen oft gar nicht, manches Mal jedoch auch in unnötiger Höhe gestellt. Liegen keinerlei Erkenntnisse über die tatsächlichen Beanspruchungen vor, können für Hochspannungsnetze folgende Angaben zu den erforderlichen statischen Kopfkräften als Richtwerte dienen:  $F_{\text{stat}} = 350 \text{ N}$  für  $U_s = 72,5 \text{ kV}$ ,  $F_{\text{stat}} = 400 \text{ N}$  für  $U_s = (123...420) \text{ kV}$ ,  $F_{\text{stat}} = 600 \text{ N}$  für  $U_s = 550 \text{ kV}$  und  $F_{\text{stat}} = 800 \text{ N}$  für  $U_s = 800 \text{ kV}$ . Diese Werte stellen absolute Mindestforderungen dar unter der Maßgabe, dass der Ableiter über zugentlastende Seilschlaufen angeschlossen ist und die Windgeschwindigkeit einen Wert von  $34 \text{ m/s}$  ( $\approx 120 \text{ km/h}$ ) – das gehört nach IEC 60694 zu den "normalen Betriebsbedingungen" – nicht überschreitet.

Neben den statischen Kopfkräften, mit denen ein Ableiter in der Regel nur wenige Probleme haben wird, sind jedoch auch dynamische Beanspruchungen zu berücksichtigen. Diese können beispielsweise durch Kurzschlussstromkräfte auf die Leiterseile oder durch Windböen auftreten. Dabei dürfen Ableiter mit Porzellan Gehäuse auf Grund der spröden und stark streuenden Materialeigenschaften von Porzellan statisch mit höchstens 40 % ihrer dynamischen Festigkeit belastet werden. Die spezifizierten zulässigen dynamischen Kopfkräfte sollten wiederum einen mindestens zwanzigprozentigen Sicherheitsabstand zu tatsächlich in Prüfungen ermittelten mittleren Bruchwerten aufweisen<sup>1</sup>. Für die statische Kopfkraft hat IEC den Begriff [Festgelegte Dauerlast](#) (SLL; specified long-term load) eingeführt, für die dynamische die [Festgelegte Kurzzeitlast](#) (SSL; specified short-term load) und für den [Mittelwert der Bruchlast](#) die Abkürzung MBL. Damit können nun die oben gemachten Kopfkraft-Angaben für Ableiter mit Porzellan Gehäuse zu der folgenden Tabelle erweitert werden:

---

<sup>1</sup> Angaben entsprechend DIN 48113 bzw. IEC 60099-4, Anhang M

**Tabelle 7:** Empfohlene mechanische Festigkeiten für Ableiter mit Porzellangehäuse

Spannungsebene $U_s$ / kV	SLL / N	SSL / N	MBL / N
< 123	350	875	$\geq 1050$
123 ... 420	400	1000	$\geq 1200$
550	600	1500	$\geq 1800$
800	800	2000	$\geq 2400$

Für Ableiter mit Kunststoffgehäuse sehen die Verhältnisse etwas anders aus, sind aber wegen der vielen unterschiedlichen Ausführungsformen und teils noch unzureichender Betriebserfahrung bis heute nicht in den Prüfvorschriften verbindlich festgelegt. Auf alle Fälle kann offensichtlich ein geringerer Abstand zwischen statischen und dynamischen Kräften gewählt werden, da Kunststoffgehäuse (mit Ausnahme von Gießharzgehäusen, die ähnlich spröde Eigenschaften aufweisen wie Porzellan und von daher genauso betrachtet werden) in ihren mechanischen Eigenschaften weniger stark streuen. Nach heutigen Erkenntnissen scheint eine statische Auslastung von 70% des Bruchwertes (wobei dieser für Kunststoffgehäuse schwer zu definieren und zu ermitteln ist) unbedenklich zulässig zu sein. Im Unterschied zu Porzellangehäusen werden Kunststoffgehäuse allerdings unter Einwirkung mechanischer Kräfte sichtbar ausgelenkt. Das ist kein grundsätzliches Problem, muss jedoch in solchen Fällen, in denen dieses Verhalten stören würde, durch Wahl eines mechanisch kräftigeren Gehäuses berücksichtigt

**Bild 22:** Ableiter mit Kunststoffgehäuse für ein 550-kV-Netz während einer Erdbebenprüfung auf dem Schwingtisch

werden, welches bei den auftretenden Belastungen weniger stark ausgelastet und damit auch weniger stark ausgelenkt wird<sup>1</sup>.

Für kunststoffisolierte Ableiter in Mittelspannungsnetzen kann eine dynamische Festigkeit (SSL) von 250 N als ausreichend betrachtet werden, was in einer statischen Festigkeit (SLL) von 175 N resultiert.

Führen die in Tabelle 7 genannten Werte noch auf vergleichsweise geringe Anforderungen an die Gehäusefestigkeit, können sich diese bei Berücksichtigung von Erdbebenbeanspruchungen ganz erheblich steigern. Solche Beanspruchungen gehören nicht mehr zu den "normalen Betriebsbedingungen", und damit verbundene Forderungen müssen in einer Ausschreibung explizit genannt werden. Es existieren verschiedene genormte Berechnungs- und Prüfverfahren, das Verhalten des Ableiters unter diesen Bedingungen zu bestimmen. Ein übliches Verfahren ist es, den kompletten Ableiter einer Erdbebenprüfung auf dem Schwingtisch zu unterziehen, wobei er mindestens in zwei, besser in drei Achsen gleichzeitig beschleunigt wird (**Bild 22**). Die Anregung kann mit sinusförmigen Größen – kurzzeitig-dauernd oder transient – oder mit einem Frequenz- und Amplitudengemisch erfolgen, das dem eines wirklichen Erdbebens möglichst nahe kommt ("time-history-test"). Extreme Forderungen lassen sich in vielen Fällen mit Kunststoffgehäusen, insbesondere solchen nach dem "Rohr-Design", leichter erfüllen als mit Porzellangehäusen.

Die Betrachtung seismischer Beanspruchungen ist naturgemäß nur für wenige Standorte weltweit erforderlich. Grundsätzlich immer muss jedoch die in dieser Aufzählung letzte mechanische Eigenschaft, die Kurzschlussfestigkeit, betrachtet werden. Sie charakterisiert das Ausfallverhalten eines Ableiters nach einer eingetretenen betriebsmäßigen Überlastung der MO-Widerstände. In dem ausgesprochen seltenen Fall einer Überlastung, beispielsweise im Mittelspannungsnetz durch einen [ableiternahen Blitzeinschlag](#) oder – noch seltener – im Hochspannungsnetz durch Spannungsübertritt von einem System höherer auf ein System niedrigerer Spannung, verursacht durch Leiterseilriss oder Seiltanzen, entsteht im Inneren des Ableitergehäuses ein Lichtbogen, durch den der sich am Einbauort des Ableiters einstellende betriebsfrequente Kurzschlussstrom fließt. Bei Ableitern, deren Gehäuse ein Gasvolumen einschließt, kommt es dadurch zu einem schlagartigen Druckanstieg im Gehäuseinneren. Druckentlastungseinrichtungen verhindern eine Explosion des Gehäuses. Die Prüfvorschriften für Ablei-

---

<sup>1</sup> Weitere Informationen finden sich im Anhang unter dem Stichwort [Mechanische Lasten](#).

ter (IEC 60099-1, IEC 60099-4, IEEE C62.11) haben in diesem Zusammenhang daher in der Vergangenheit ein "Druckentlastungsverhalten" und "Druckentlastungsprüfungen" definiert oder tun es teilweise heute noch. Mit den aufgekommenen neuen Gehäuse-techniken kunststoffisolierter Ableiter, deren Gehäuse teilweise kein eingeschlossenes Gasvolumen mehr enthalten, ist es jedoch sinnvoll, allgemeiner von "Kurzschlussverhalten" zu reden, und dementsprechend heißen die zugehörigen Prüfungen in IEC 60099-4 jetzt "[Kurzschlussprüfungen](#)". Denn bei solchen Gehäusen baut sich im Kurzschlussfall kein definierter Druck auf, der eine Druckenlastungseinrichtung betätigt, sondern der entstehende Lichtbogen sucht sich seinen Weg direkt an beliebigen oder an speziell dafür vorgesehenen Stellen durch die Gehäusewand. Das Ziel bleibt aber immer das Gleiche: im Falle einer Ableiterüberlastung muss entsprechend den Prüfbedingungen sichergestellt sein, dass das Gehäuse entweder gar nicht erst zerbricht oder aber die Gehäusebruchstücke und ausgeworfenen Teile innerhalb eines Kreises um den Ableiter herum zu Boden fallen, dessen Radius in etwa der Ableiterhöhe entspricht (das bedeutet einen zulässigen Fallwinkel der Teile von ca. 45 °). Ein Gehäusebruch ist unter diesen Bedingungen ausdrücklich zulässig, auf keinen Fall jedoch ein gewaltsames Zerlegen des Gehäuses, wobei das "gewaltsame Zerlegen" eben über den Bereich um den Ableiter herum definiert ist, in dem die Teile verbleiben müssen<sup>1</sup>. Nur Teile von jeweils maximal 60 g Gewicht dürfen auch außerhalb gefunden werden<sup>2</sup>. Die Möglichkeit eines Gehäusebruchs ist beim Anlagenbau zu beachten. So ist zum Beispiel wegen dieses Risikos im Allgemeinen davon abzuraten, einen Ableiter gleichzeitig zum Abstützen einer Leitung oder einer Sammelschiene einzusetzen. Wird dies gewünscht, sollte auf Ableiter mit Kunststoffgehäuse im "Rohr-Design" ausgewichen werden, wobei anzumerken bleibt, dass auch hier nicht alle Konstruktionen dieses Verhalten sicherstellen können<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Wer nie einer nicht bestandenen Kurzschlussprüfung beigewohnt hat, ist auch schon bei einem drucklos zerbrechenden Ableiter geneigt, von einer "Explosion" zu sprechen. Eine wirkliche nicht erfolgreiche Druckentlastung stellt sich aber tatsächlich so dar, dass große Ableiterteile einige zehn Meter weit in die Umgebung geschleudert werden.

<sup>2</sup> Häufig werden auch nach einer an sich erfolgreich verlaufenen Kurzschlussprüfung kleinste Ableiterstückchen außerhalb des Kreises gefunden, die allein aufgrund der durch den Lichtbogen verursachten Druckwelle dorthin geschleudert wurden.

<sup>3</sup> Es versteht sich von selbst, dass der Ableiter nach einem solchen Kurzschluss, auch wenn von einem "Bemessungs"-Kurzschlussstrom die Rede ist, irreversibel zerstört ist und ausgewechselt werden muss.  $I_s$  charakterisiert damit nur einen Strom, der *im Fehlerfall* nicht zu einem unkontrollierten Zerlegen des Ableiters mit den möglichen sich daraus ergebenden Konsequenzen für Personal und Schaltanlage führt.

Der maximale, für eine Dauer von 200 ms fließende Kurzschlussstrom ist der Bemessungs-Kurzschlussstrom  $I_s$ , angegeben in Ampere. Die folgende Tabelle nennt die genormten Bemessungs-Kurzschlussströme und die sich daraus ergebenden weiteren Prüfanforderungen:

**Tabelle 8:** Ströme in der Kurzschlussprüfung (nach IEC 60099-4)

Bemessungs-Kurzschlussstrom (Dauer 200 ms) / A	Verminderte Kurzschlussströme (Dauer 200 ms) / A		Niedriger Kurzschlussstrom (Dauer 1 s) / A
80 000	50 000	25 000	600 ± 200
63 000 <sup>1</sup>	25 000	12 000	
50 000	25 000	12 000	
40 000	25 000	12 000	
31 500	12 000	6 000	
20 000	12 000	6 000	
16 000	6 000	3 000	
10 000	6 000	3 000	
5 000	3 000	1 500	

Der bei der Ableiterauswahl gewählte Bemessungs-Kurzschlussstrom sollte mindestens dem maximal zu erwartenden Kurzschlussstrom am Einbauort des Ableiters entsprechen. Die Prüfvorschrift verlangt, dass die Prüfung mit dem vollen Bemessungs-Kurzschlussstrom so durchgeführt wird, dass dem Strom ein abklingendes Gleichstromglied überlagert ist, so dass der Scheitelwert das 2,5-fache des Effektivwerts erreicht (im Falle von  $I_s = 80\,000\text{ A}$  bedeutet das, dass in der Prüfung ein Scheitelwert von 200 kA erreicht werden muss!). Das bildet den ungünstigsten Fall eines generatornahen Kurzschlusses nach. In der Tabelle sind weiterhin verminderte Kurzschlussströme von etwa 50 % und 25 % des Bemessungs-Kurzschlussstroms aufgeführt, die ebenfalls zu prüfen sind. Das ist darin begründet, dass in der Praxis gelegentlich beobachtet wurde, dass Ableitergehäuse bei kleineren als den spezifizierten maximalen Kurzschlussströmen bersten, weil die Druckentlastungseinrichtungen nur für den Extremfall optimiert waren, bei niedrigeren Strömen dagegen zu träge reagierten. Schließlich ist auch noch mit "niedrigem Kurzschlussstrom" von einheitlich 600 A ± 200 A zu prüfen. Dieser muss für die Dauer einer Sekunde fließen, und innerhalb dieser Zeit müssen die Druckent-

<sup>1</sup> Prüfungen für  $I_s = 63\,000\text{ A}$  werden häufig mit 65 kA durchgeführt, um auch die Prüfanforderungen der IEEE-Norm zu erfüllen, die für Ströme  $\geq 40\text{ kA}$  Stromwerte in 5-kA-Schritten vorgibt.



lastungseinrichtungen des Ableiters geöffnet haben. Dieser Teil der Prüfung dient dem Nachweis, dass die Druckentlastungseinrichtungen des Ableiters auch bei sehr niedrigen Fehlerströmen in der Lage sind zu öffnen.

Für die hohen Ströme wird die Kurzschlussfestigkeit am längsten Bauglied einer Typenreihe nachgewiesen. Bei Ableitern mit Porzellangehäuse wird sie wesentlich durch die folgenden Parameter beeinflusst:

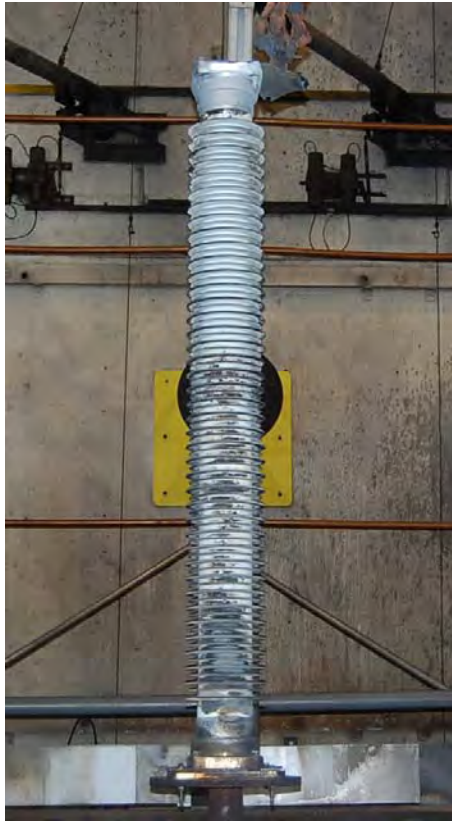
- Gehäusedurchmesser: größere Durchmesser ergeben eine höhere Festigkeit;
- Gehäuselänge: mit zunehmender Länge nimmt bei gegebenem Durchmesser die Festigkeit ab;
- Wandstärke: die Festigkeit nimmt mit der Wandstärke zu;
- Gehäusematerial: die Porzellanqualität "C 120" ergibt höhere Festigkeiten als die Qualität "C 110".

Für Ableiter mit Kunststoffgehäuse gelten zwar bezüglich der ersten beiden Parameter grundsätzlich die gleichen Zusammenhänge. Es spielen aber noch weitere konstruktionsbedingte Einflussgrößen eine Rolle, zum Beispiel, ob es sich um einen Ableiter mit eingeschlossenem Gasvolumen ("Rohr-Design") handelt oder nicht, und falls nicht, ob es sich etwa um ein "Käfig-Design" oder ein "Wickel-Design" handelt, und auch diese wieder jeweils in unterschiedlichen Varianten. Dies soll an dieser Stelle nicht weiter



**Bild 23:** Ableiter mit Kunststoffgehäuse im "Käfig-Design" nach einer Kurzschlussprüfung mit Bemessungskurzschlussstrom (65 kA, 200 ms). Das Gehäuse ist aufgerissen, jedoch mechanisch unversehrt. Gut zu erkennen ist in diesem Bild der Prüfaufbau. Nähere Information dazu unter [Kurzschlussprüfungen](#) im Anhang.

vertieft werden. Die **Bilder 23 bis 25** zeigen Ergebnisse erfolgreich bestandener Kurzschlussprüfungen mit Bemessungs-Kurzschlussstrom an zwei Ausführungen von Ableitern mit Kunststoffgehäuse sowie an einem Ableiter mit Porzellangehäuse.



**Bild 24:** Ableiter mit Kunststoffgehäuse im "Rohr-Design" nach einer Kurzschlussprüfung mit Bemessungskurzschlussstrom (80 kA, 200 ms). Das Gehäuse ist völlig unversehrt.



**Bild 25:** Ableiter mit Porzellangehäuse nach einer Kurzschlussprüfung mit Bemessungskurzschlussstrom (63 kA, 200 ms). Das Gehäuse ist, bis auf einige gebrochene Schirme, intakt geblieben.

An diesem Punkt ist die Auswahl des Ableiters vollständig abgeschlossen. Die mechanischen Anforderungen in Summe – also geforderte Kopfkräfte, seismische Beanspruchungen und Kurzschlussfestigkeit – führen auf eine geeignete Kombination von Gehäusematerial und -typ, Durchmesser und Länge. Dabei ist die Länge von Porzellangehäusen aus technischen und fertigungstechnischen Gründen auf ein Maß von etwa zwei Metern begrenzt, für Ableiter mit Kunststoffgehäuse – zumindest für bestimmte Konstruktionen – sind auch noch größere Längen möglich und üblich. Überschreitet die erforderliche Gesamtlänge des Ableiters den möglichen Wert für ein einzelnes Gehäuse, wird der Ableiter aus mehreren Baugliedern zusammengesetzt. Es ist jedoch nicht nur eine Kostenfrage – mehrere Bauglieder bedeuten auch mehrfach vorhandene Flansche, Dichtungen, Druckentlastungseinrichtungen usw. – sondern auch für das Verhalten un-

ter Fremdschichtbedingungen vorteilhaft und anzustreben, Ableiter möglichst einteilig auszuführen<sup>1</sup>. Dies ist zur Zeit für Ableiter mit Porzellan Gehäuse bis in die 245-kV-Ebene und für bestimmte Konstruktionen von Ableitern mit Kunststoffgehäuse bis in die 300-kV-Ebene möglich.

## Betriebsbedingungen

Es war bisher bereits an mehreren Stellen von "normalen Betriebsbedingungen" die Rede. Standardmäßig werden vom Hersteller alle Ableiterkennwerte nur für diese normalen Betriebsbedingungen festgelegt. Im Zuge der Ableiterauswahl ist daher auch zu überprüfen, ob diese Bedingungen auf den geplanten Einsatzfall zutreffen. Nachfolgend sind die in der Vorschrift IEC 60099-4, Absatz 5.4.1 genannten normalen Betriebsbedingungen<sup>2</sup> aufgelistet:

- Temperatur der umgebenden Luft zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $+40\text{ °C}$
- Sonneneinstrahlung  $1,1\text{ kW/m}^2$
- Aufstellungshöhe bis 1000 m über NN
- Frequenz der Betriebsspannung zwischen 48 Hz und 62 Hz
- Dauernd anliegende betriebsfrequente Spannung zwischen den Klemmen des Ableiters nicht größer als die Ableiterdauerspannung
- Windgeschwindigkeit  $\leq 34\text{ m/s}$
- senkrechte Aufstellung des Ableiters

## Beispiele

Die Beschreibung der Vorgehensweise zur Auslegung und Auswahl von Ableitern ist nun beendet, und es folgen einige erläuternde Zahlenbeispiele<sup>3</sup>. Sie beziehen sich zunächst auf die häufigste Ableiteranwendung, den Anschluss zwischen Phase und Erde

---

<sup>1</sup> Rein theoretisch besteht unter bestimmten Bedingungen bei mehrteiligen Ableitern die Möglichkeit, dass unter Fremdschichteinwirkung auf der Gehäuseoberfläche fließende Ströme an den Zwischenflanschen in die Aktivteile der nächsten Bauglieder kommutieren und deren Aktivteile erwärmen.

<sup>2</sup> Beispiele für "besondere Betriebsbedingungen" gibt IEC 60099-4 im Anhang A. Weiterhin informiert der Anhang G über Angaben für Anfragen und Angebote.

<sup>3</sup> Die resultierenden Ableiterkennwerte sind als Anhaltswerte zu verstehen und im Detail natürlich herstellerepezifisch.



("Phasenableiter"), und sind als Standardauslegungen zu verstehen, so wie sie auch vom Hersteller vorgenommen würden, wenn in einer Anfrage zu Ableitern keine weiteren Angaben außer zur Netzspannung und zur Sternpunktbehandlung des Netzes gemacht werden. Dies stellt zugleich die mindestens benötigte Information dar, ohne die ein Ableiter nicht sinnvoll ausgelegt werden kann. Es kann sich auf diesem Wege natürlich auch nur ein Ableiter ergeben, der nicht mehr als die absoluten Mindestanforderungen für einen Betrieb in dem jeweiligen Netz erfüllt. Die auf Grund so weniger Eingabedaten festgelegten Kennwerte sollten sorgfältig geprüft werden, um sicherzustellen, dass nicht doch die eine oder andere sich aus dem tatsächlichen Netzbetrieb ergebende Anforderung unberücksichtigt geblieben ist. Je mehr Betriebsbedingungen genauer spezifiziert werden können, desto sicherer kann man sich anschließend sein, dass der danach ausgelegte Ableiter allen Anforderungen des betreffenden Einsatzfalles gewachsen ist. In besonderen Fällen kann eine Netz- bzw. Isolationskoordinationsstudie die Wirksamkeit einer Ableiterauslegung und den damit erzielbaren Schutz elektrischer Betriebsmittel gegen Blitz- und Schaltüberspannungen nachweisen.

Anschließend wird auch kurz auf die elektrische Auslegung von Ableitern zum Schutz des Transformatorsternpunkts ("Sternpunktbleiter") eingegangen.

Die Zahlenbeispiele stellen zwar funktionsfähige Mindestbemessungen, jedoch nicht unbedingt typische und allgemein übliche Auslegungen dar. Diese werden – aus gutem Grund – meist mit mehr Sicherheiten versehen. Insbesondere lässt sich mit der Wahl höherer als der mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannungen wesentlich die Betriebssicherheit erhöhen, während die damit einhergehende Erhöhung der Schutzpegel in aller Regel problemlos in Kauf genommen werden kann. Einige nationale Ausgaben der Anwendungsrichtlinie IEC 60099-5 – so auch die deutsche – enthalten einen informativen Anhang B mit gebräuchlichen Ableiterbemessungen, denen die in den einzelnen Ländern üblichen Werte der Dauer- und Bemessungsspannung und des Schutzpegels für die einzelnen Netzspannungsebenen entnommen werden können.

## Beispiel 1: "110-kV-Netz mit Erdschlusskompensation"

(Alle mit \* gekennzeichneten Angaben sind typische, im Einzelnen jedoch herstellerabhängige Werte.)

### Stillschweigend getroffene Annahmen, wenn keine weiteren speziellen Forderungen vorliegen:

- $U_s = 123 \text{ kV}$
- LIWV = 550 kV
- Betrieb im Erdschlussfall für > 30 min.
- erforderlicher Nenn-Ableitstoßstrom  $I_n = 10 \text{ kA}$
- erforderliche Leitungsentladungsklasse: 2
- Fremdschichtklasse: b ("leicht")
- maximaler Kurzschlussstrom: 40 kA

### Ermittlung der mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_{c, \min} = U_s = 123 \text{ kV}$
- $U_{r, \min} = 1,25^* \cdot U_{c, \min} = 1,25^* \cdot 123 \text{ kV} = 154 \text{ kV}$   
(Die Bemessungsspannung ist im kompensierten Netz allerdings ohne technische Bedeutung.)

### Festlegung der tatsächlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_r = U_{r, \min}$  aufgerundet auf den nächsten durch 3 teilbaren Wert = 156 kV
- $U_c = U_r / 1,25^* = 156 \text{ kV} / 1,25^* = 124 \text{ kV}^1$

### Auswahl von für $I_n = 10 \text{ kA}$ und LD-Klasse 2 geeigneten MO-Widerständen:

- MO-Durchmesser: 60\* mm
- $\hat{u}_{10 \text{ kA}} / U_r = 2,3^*$  (Dieser Faktor ist charakteristisch für den verwendeten MO-Widerstand bei Bemessung für die Leitungsentladungsklasse 2.)

### Die sich damit ergebende Schutzcharakteristik\*:

- Blitzstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$ ): 359 kV<sup>2</sup>
- Schaltstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{0,5 \text{ kA}, 30/60 \mu\text{s}}$ ): 287 kV
- Steilstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 1/<20 \mu\text{s}}$ ): 381 kV (ohne Geometrieinfluss)

<sup>1</sup> Betriebsfrequente Spannungen werden auf ganze Zahlenwerte abgerundet.

<sup>2</sup> Restspannungswerte werden auf ganze Zahlenwerte mathematisch gerundet.

**Überprüfung der Schutzwerte:**

- $LIWV / \hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}} = 550 \text{ kV}/359 \text{ kV} = 1,53 \rightarrow$  im allgemeinen ausreichend

**Höhe der MO-Widerstandssäule:**

- $h_{\text{MO}} = 1000^* \text{ mm}$

**Auswahl eines Gehäuses:**

Mindestanforderungen:

- Stehblitzstoßspannung:  $1,3 \cdot \text{Blitzstoß-Schutzpegel} = 1,3 \cdot 359 \text{ kV} = 467 \text{ kV}$
- Stehwechselspannung 1 min, nass:  $1,06/\sqrt{2} \cdot \text{Schaltstoß-Schutzpegel} = 1,06/\sqrt{2} \cdot 287 \text{ kV} = 215 \text{ kV}$
- Kriechweg:  $16 \text{ mm/kV} \cdot 123 \text{ kV}$  (bzw.  $27,7 \text{ mm/kV} \cdot 71 \text{ kV}$ )  $\approx 1970 \text{ mm}$
- zulässige Kopfkraft statisch (SLL): 400 N
- zulässige Kopfkraft dynamisch (SSL): 1000 N
- Kurzschlussfestigkeit (Bemessungs-Kurzschlussstrom  $I_s$ ): 40 kA
- aufnehmbare Aktivteillänge: 1000 mm
- Anzahl der Bauglieder: 1
- Steuerring: nein

## Beispiel 2: "220-kV-Netz mit direkter Sternpunktterdung"

(Alle mit \* gekennzeichneten Angaben sind typische, im Einzelnen jedoch herstellerabhängige Werte.)

### Stillschweigend getroffene Annahmen, wenn keine weiteren speziellen Forderungen vorliegen:

- $U_s = 245 \text{ kV}$
- LIWV = 950 kV
- Erdfehlerfaktor  $k = 1,4$
- maximale Dauer von zeitweiligen Spannungserhöhungen: 10 s
- erforderlicher Nenn-Ableitstoßstrom  $I_n = 10 \text{ kA}$
- erforderliche Leitungsentladungsklasse: 3
- Fremdschichtklasse: b ("leicht")
- maximaler Kurzschlussstrom: 50 kA

### Ermittlung der mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_{c, \min} = 1,05 \cdot U_s / \sqrt{3} = 1,05 \cdot 245 / \sqrt{3} \text{ kV} = 149 \text{ kV}$
- $U_{r1, \min} = 1,25^* \cdot U_{c, \min} = 1,25^* \cdot 149 \text{ kV} = 187 \text{ kV}$
- $U_{r2, \min} = 1,4 \cdot (U_s / \sqrt{3}) / k_{\text{tov}, 10 \text{ s}} = 1,4 \cdot (245 / \sqrt{3}) / 1,075^* \text{ kV} = 185 \text{ kV}$   
( $k_{\text{tov}, 10 \text{ s}}$  aus [Bild 20](#))

### Festlegung der tatsächlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_r = U_{r1, \min}$  aufgerundet auf den nächsten durch 3 teilbaren Wert = 189 kV  
Üblicherweise wird in diesem Netz ein Ableiter mit wenigstens 198 kV Bemessungsspannung eingesetzt. Dies führt zu einer wesentlich stabileren Auslegung und bietet trotzdem noch ausreichend niedrige Schutzpegel:
- $U_r = 198 \text{ kV}$
- $U_c = U_r / 1,25^* = 198 \text{ kV} / 1,25^* = 158 \text{ kV}$

### Auswahl von für $I_n = 10 \text{ kA}$ und LD-Klasse 3 geeigneten MO-Widerständen:

- MO-Durchmesser:  $60^*$  mm
- $\hat{u}_{10 \text{ kA}} / U_r = 2,4^*$  (Dieser Faktor ist charakteristisch für den verwendeten MO-Widerstand bei Bemessung für die Leitungsentladungsklasse 3 (vgl. Beispiel 1!).)

**Die sich damit ergebende Schutzcharakteristik\*:**

- Blitzstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$ ): 475 kV
- Schaltstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{1 \text{ kA}, 30/60 \mu\text{s}}$ ): 394 kV
- Steilstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 1/<20 \mu\text{s}}$ ): 504 kV (ohne Geometrieinfluss)

**Überprüfung der Schutzwerte:**

- LIWV /  $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}} = 950 \text{ kV}/475 \text{ kV} = 2,0 \rightarrow$  mit Sicherheit ausreichend

**Höhe der MO-Widerstandssäule:**

- $h_{\text{MO}} = 1300^*$  mm

**Auswahl eines Gehäuses:**

Mindestanforderungen:

- Stehblitzstoßspannung:  $1,3 \cdot \text{Blitzstoß-Schutzpegel} = 1,3 \cdot 475 \text{ kV} = 618 \text{ kV}$
- Stehwechselfeldspannung 1 min, nass:  $1,06/\sqrt{2} \cdot \text{Schaltstoß-Schutzpegel} = 1,06/\sqrt{2} \cdot 394 \text{ kV} = 295 \text{ kV}$
- Kriechweg:  $16 \text{ mm/kV} \cdot 245 \text{ kV}$  (bzw.  $27,7 \text{ mm/kV} \cdot 141,5 \text{ kV}$ ) = 3920 mm
- zulässige Kopfkraft statisch (SLL): 400 N
- zulässige Kopfkraft dynamisch (SSL): 1000 N
- Kurzschlussfestigkeit (Bemessungs-Kurzschlussstrom  $I_s$ ): 50 kA
- aufnehmbare Aktiveillänge: 1300 mm
- Anzahl der Bauglieder: 1\*
- Steuerring: nein\* (Grenzfall)

### Beispiel 3: "380-kV-Netz mit direkter Sternpunktterdung; Industrieverschmutzung"

(Alle mit \* gekennzeichneten Angaben sind typische, im Einzelnen jedoch herstellerabhängige Werte.)

#### Stillschweigend getroffene Annahmen, wenn keine weiteren speziellen Forderungen vorliegen:

- $U_s = 420 \text{ kV}$
- LIWV = 1425 kV
- Erdfehlerfaktor  $k = 1,4$
- maximale Dauer von zeitweiligen Spannungserhöhungen: 10 s
- erforderlicher Nenn-Ableitstoßstrom  $I_n = 10 \text{ kA}$
- erforderliche Leitungsentladungsklasse: 3
- Fremdschichtklasse: d ("schwer")
- maximaler Kurzschlussstrom: 50 kA

#### Ermittlung der mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_{c, \min} = 1,05 \cdot U_s / \sqrt{3} = 1,05 \cdot 420 / \sqrt{3} \text{ kV} = 255 \text{ kV}$
- $U_{r1, \min} = 1,25^* \cdot U_{c, \min} = 1,25^* \cdot 255 \text{ kV} = 319 \text{ kV}$
- $U_{r2, \min} = 1,4 \cdot (U_s / \sqrt{3}) / k_{\text{tov}, 10 \text{ s}} = 1,4 \cdot (420 / \sqrt{3}) / 1,075^* \text{ kV} = 316 \text{ kV}$   
( $k_{\text{tov}, 10 \text{ s}}$  aus [Bild 20](#))

#### Festlegung der tatsächlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_r = U_{r1, \min}$  aufgerundet auf den nächsten durch 3 teilbaren Wert = 321 kV  
Üblicherweise wird in diesem Netz ein Ableiter mit wenigstens 336 kV Bemessungsspannung eingesetzt. Dies führt zu einer wesentlich stabileren Auslegung und bietet trotzdem noch ausreichend niedrige Schutzpegel:
- $U_r = 336 \text{ kV}$
- $U_c = U_r / 1,25^* = 336 \text{ kV} / 1,25^* = 268 \text{ kV}$

#### Auswahl von für $I_n = 10 \text{ kA}$ und LD-Klasse 3 geeigneten MO-Widerständen:

- MO-Durchmesser: 60\* mm
- $\hat{u}_{10 \text{ kA}} / U_r = 2,4^*$  (Dieser Faktor ist charakteristisch für den verwendeten MO-Widerstand bei Bemessung für die Leitungsentladungsklasse 3 (vgl. Beispiele 1 und 2!).

**Die sich damit ergebende Schutzcharakteristik\*:**

- Blitzstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$ ): 806 kV
- Schaltstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{1 \text{ kA}, 30/60 \mu\text{s}}$ ): 669 kV
- Steilstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 1/<20 \mu\text{s}}$ ): 854 kV (ohne Geometrieinfluss)

**Überprüfung der Schutzwerte:**

- LIWV /  $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}} = 1425 \text{ kV}/806 \text{ kV} = 1,77 \rightarrow$  mit Sicherheit ausreichend

**Höhe der MO-Widerstandssäule:**

- $h_{\text{MO}} = 2200^*$  mm

**Auswahl eines Gehäuses:**

Mindestanforderungen:

- Stehblitzstoßspannung:  $1,3 \cdot \text{Blitzstoß-Schutzpegel} = 1,3 \cdot 806 \text{ kV} = 1048 \text{ kV}$
- Stehschaltstoßspannung:  $1,25 \cdot \text{Schaltstoß-Schutzpegel} = 1,25 \cdot 669 \text{ kV} = 836 \text{ kV}$
- Kriechweg:  $25 \text{ mm/kV} \cdot 420 \text{ kV}$  (bzw.  $43,3 \text{ mm/kV} \cdot 242,5 \text{ kV}$ ) = 10500 mm
- zulässige Kopfkraft statisch (SLL): 400 N
- zulässige Kopfkraft dynamisch (SSL): 1000 N
- Kurzschlussfestigkeit (Bemessungs-Kurzschlussstrom  $I_s$ ): 50 kA
- aufnehmbare Aktivteillänge: 2200 mm (2·1100 mm)\*
- Anzahl der Bauglieder: 2\*
- Steuerring: ja

## Beispiel 4: "20-kV-Netz mit Erdschlusskompensation oder isoliertem Sternpunkt"

(Alle mit \* gekennzeichneten Angaben sind typische, im Einzelnen jedoch herstellerabhängige Werte.)

### Stillschweigend getroffene Annahmen, wenn keine weiteren speziellen Forderungen vorliegen:

- $U_s = 24 \text{ kV}$
- LIWV = 125 kV
- Betrieb im Erdschlussfall für > 30 min.
- erforderlicher Nenn-Ableitstoßstrom  $I_n = 10 \text{ kA}$
- Fremdschichtklasse: b ("leicht")
- maximaler Kurzschlussstrom: 20 kA

### Ermittlung der mindestens erforderlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_{c, \min} = U_s = 24 \text{ kV}$
- $U_{r, \min} = 1,25^* \cdot U_{c, \min} = 1,25^* \cdot 24 \text{ kV} = 30 \text{ kV}$   
(Die Bemessungsspannung ist im kompensierten bzw. isolierten Netz allerdings ohne technische Bedeutung.)

### Festlegung der tatsächlichen Dauer- und Bemessungsspannung:

- $U_r = U_{r, \min}$  aufgerundet auf den nächsten durch 3 teilbaren Wert = 30 kV
- $U_c = U_r / 1,25^* = 30 \text{ kV} / 1,25^* = 24 \text{ kV}$

### Auswahl von für $I_n = 10 \text{ kA}$ geeigneten MO-Widerständen:

- MO-Durchmesser:  $40^* \text{ mm}$
- $\hat{u}_{10 \text{ kA}} / U_r = 2,65^*$  (Dieser Faktor ist charakteristisch für den verwendeten MO-Widerstand.)

### Die sich damit ergebende Schutzcharakteristik:

- Blitzstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}}$ ): 80 kV (Entspricht der Forderung in VDE 0675, Teil 5)
- Steilstoß-Schutzpegel ( $\hat{u}_{10 \text{ kA}, 1/<20 \mu\text{s}}$ ): 85 kV (ohne Geometrieinfluss)

### Überprüfung der Schutzwerte:

- $\text{LIWV} / \hat{u}_{10 \text{ kA}, 8/20 \mu\text{s}} = 125 \text{ kV} / 80 \text{ kV} = 1,56 \rightarrow$  ausreichend



**Höhe der MO-Widerstandssäule:**

- $h_{MO} = 200^*$  mm

**Auswahl eines Gehäuses (Kunststoff):**

Mindestanforderungen:

- Stehblitzstoßspannung:  $1,3 \cdot \text{Blitzstoß-Schutzpegel} = 1,3 \cdot 80 \text{ kV} = 104 \text{ kV}$
- Stehwechselfeldspannung 1 min, nass:  $0,88/\sqrt{2} \cdot \text{Blitzstoß-Schutzpegel} = 0,88/\sqrt{2} \cdot 80 \text{ kV} = 50 \text{ kV}$
- Kriechweg:  $16 \text{ mm/kV} \cdot 24 \text{ kV}$  (bzw.  $27,7 \text{ mm/kV} \cdot 13,9 \text{ kV}$ )  $\approx 385 \text{ mm}$
- zulässige Kopfkraft statisch (SLL): 175 N
- zulässige Kopfkraft dynamisch (SSL): 250 N
- Kurzschlussfestigkeit (Bemessungs-Kurzschlussstrom  $I_s$ ): 20 kA
- aufnehmbare Aktiveillänge: 200 mm
- Anzahl der Bauglieder: 1 (in der Mittelspannung generell üblich)
- Steuerring: für Mittelspannungsableiter generell nicht erforderlich

## Ableiter zum Schutz von Transformator-Sternpunkten

Ableiter zum Überspannungsschutz von Transformator-Sternpunkten, kurz "Sternpunktbleiter", stellen die häufigste Sonderanwendung von Ableitern dar. Die Anwendungsrichtlinie IEC 60099-5 empfiehlt beispielsweise, jeden über eine Durchführung zugänglichen, nicht geerdeten Sternpunkt mit Hilfe eines Ableiters gegen Blitz- und Schaltüberspannungen zu schützen. Nachdem die Vorgehensweise bei der Auslegung der Phasenableiter sehr ausführlich hergeleitet wurde, soll hier nur kurz auf die Besonderheiten bei Sternpunktbleitern eingegangen werden. Grundsätzlich gilt:

- Die Leitungsentladungsklasse der Sternpunktbleiter sollte mindestens der Leitungsentladungsklasse der zugehörigen Phasenableiter entsprechen.
- Für den Schutzpegel kann der 1-kA-Restspannungswert herangezogen werden, da höhere Ströme nicht auftreten.
- Der Sicherheitsabstand zwischen Bemessungs-Blitzstoßspannung (LIWV) des Transformatorsternpunkts und dem Ableiterschutzpegel kann kleiner gewählt werden als für die Phasenableiter, da die Spannungsanstiege nicht so schnell sind, dass Wanderwellenvorgänge eine Rolle spielen.
- Bei voll isoliertem Transformator-Sternpunkt empfiehlt IEC 60099-5, die Bemessungsspannung der Sternpunktbleiter zu etwa 60 % der der Phasenableiter zu wählen:  $U_{r, Sp-A} \approx 0,6 \cdot U_{r, Ph-A}$
- Zur Entlastung der Phasenableiter können Sternpunkt- und Phasenableiter aber auch so koordiniert werden, dass die Sternpunktbleiter z.B. bei intermittierenden Erdfehlern früher eingreifen als die Phasenableiter und so die Phasenableiter entlasten. In diesem Falle lautet die Empfehlung:  $U_{r, Sp-A} \approx 0,45 \cdot U_{r, Ph-A}$ , d.h. die Bemessungsspannung der Sternpunktbleiter beträgt dann nur noch etwa 45 % der der Phasenableiter. Diese Bemessung wird in Deutschland häufig gewählt. Die Sternpunktbleiter tragen damit natürlich ein höheres Risiko einer Überlastung, und tatsächlich sind Sternpunktbleiter die einzigen Hochspannungsableiter, deren Fehlerrate (bewusst!) nennenswert von Null abweicht. Aus diesem Grund ist es gerade für so ausgelegte Ableiter wichtig, eine extrem kurzschluss sichere Gehäusetechnik einzusetzen. Hier bieten sich z.B. Ableiter mit Kunststoffgehäuse, vorzugsweise im "Rohr-Design" an, die diesbezüglich die größtmögliche Sicherheit bieten.

In den jeweiligen nationalen Fassungen der Anwendungsrichtlinie für Überspannungsableiter, IEC 60099-5 (in Deutschland also die DIN EN 60099-5), finden sich im Anhang B in Tabellenform die in den jeweiligen Ländern gebräuchlichen Ableiterkennwerte, sowohl für die Phasenableiter als auch für die Sternpunktbleiter. Auf diese Tabellen sei insbesondere bezüglich der Sternpunktbleiter verwiesen.

## Vorschriften

Die nachfolgende Aufstellung beschreibt den aktuellen Stand der wichtigsten IEC-Vorschriften über Ableiter und damit zusammenhängende Themengebiete. Die ebenfalls angegebenen deutschen Vorschriften sind jeweils wörtliche Übersetzungen der entsprechenden IEC-Vorschriften.

Seit Januar 1997 werden die IEC-Publikationen neu nummeriert, um eine Übereinstimmung bei der Bezeichnung der europäischen und der internationalen Normen zu erzielen. Dazu wird zur alten Nummer die Zahl 60000 hinzuaddiert. Mit bereits vor dem Jahre 1997 veröffentlichten Publikationen wird ebenso verfahren, auch wenn sie tatsächlich noch unter der alten Nummer vorliegen.

Wegen ihrer überregionalen Bedeutung sind am Schluss auch die amerikanische Ableitervorschrift und Anwendungsrichtlinie mit aufgeführt.

### *a) IEC/EN/DIN/VDE-Ableitervorschriften*

---

#### **IEC 60099-1, Edition 3.1, 1999-12**

**(Edition 3: 1991 consolidated with amendment 1: 1999)**

Surge arresters – Part 1: Non-linear resistor type gapped surge arresters for a.c. systems

#### **DIN EN 60099-1 (VDE 0675 Teil 1), Manuskript März 2000**

Überspannungsableiter – Teil 1: Überspannungsableiter mit nichtlinearen Widerständen und Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze  
(IEC 60099-1:1991 + A1:1999) Deutsche Fassung EN 60099-1:1994 + A1:1999

*Anmerkung:* Diese Vorschriften werden nicht mehr überarbeitet und möglicherweise sogar demnächst zurückgezogen.

---

#### **IEC 60099-4, Edition 2.2, 2009-05**

Surge arresters – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems

#### **DIN EN 60099 Teil 4 (VDE 0675 Teil 4, Februar 2010)**

Überspannungsableiter – Teil 4: Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken für Wechselspannungsnetze

---

**IEC 60099-5, Edition 1.1, 2000-03**

Surge arresters – Part 5: Selection and application recommendations

**DIN EN 60099-5 (VDE 0675 Teil 5), 2000-09**

Überspannungsableiter – Teil 5: Anleitung für die Auswahl und die Anwendung

*Anmerkung:* Eine völlige Neufassung der IEC 60099-5 (Edition 2) wird gerade von IEC TC37 MT10 ("Maintenance Team 10") erstellt und befindet sich im Abstimmungsverfahren. Der aktuelle Stand ist das IEC-Dokument 37/371/CDV. Nach Einführung diverser erforderlicher Änderungen wird der FDIS Ende des Jahres 2011 erscheinen.

---

**IEC 60099-6, First Edition, 2002-08**

Surge arresters – Part 6: Surge arresters containing both series and parallel gapped structures – Rated 52 kV and less)

*Anmerkung:* Zu dieser IEC-Vorschrift existiert keine deutsche Fassung, weil sie nicht als europäische Norm übernommen wurde. Sie betrifft eine Ausführung von Überspannungsableitern (Mittelspannungs-MO-Ableiter mit internen Serienfunkenstrecken), die bisher nur am amerikanischen Markt Anwendung finden.

---

**IEC 60099-8 Ed. 1.0, 2011-01**

Surge arresters - Part 8: Metal-oxide surge arresters with external series gap (EGLA) for overhead transmission and distribution lines of a.c. systems above 1 kV

**DIN EN 60099-8 (VDE 0675-8):2011-11**

Deutsche Fassung; Überspannungsableiter – Teil 8: Metalloxid-Überspannungsableiter mit externer Serienfunkenstrecke (EGLA) für Übertragungs- und Verteilungsleitungen von Wechselstromsystemen über 1 kV

---

***b) IEC/EN/DIN/VDE-Vorschriften zur Isolationskoordination***

---

**IEC 60071-1, Eighth Edition, 2006-01**

Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principles and rules

**DIN EN 60071-1 (VDE 0111 Teil 1), 2010-09**

Isolationskoordination – Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen

---

**IEC 60071-2, Third Edition, 1996-12**

Insulation co-ordination – Part 2: Application guide

**DIN EN 60071-2 (VDE 0111 Teil 2), September 1997**

Isolationskoordination – Teil 2: Anwendungsrichtlinie

**IEC TR 60071-4, First Edition, 2004-06**

Insulation co-ordination – Part 4: Computational guide to insulation co-ordination & modelling of electrical networks

**IEC TS 60071-5, First Edition, 2002-06**

Insulation co-ordination – Part 5: Procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations

---

*c) Allgemeine, auch für Ableiter wichtige IEC/EN/DIN/VDE-Vorschriften*

---

**IEC 60060-1, Ed. 3.0, 2010-09**

High-voltage test techniques. Part 1: General definitions and test requirements

**DIN IEC 60060-1, 1994-06**

Hochspannungs-Prüftechnik; Teil 1: Allgemeine Festlegungen und Prüfbedingungen

**DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1), 2005-09**

High voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements (IEC 42/188/CD: 2005)

---

**IEC 60507, Second edition 1991-04**

Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on a.c. systems

**DIN EN 60507 (VDE 0448 Teil 1), April 1994**

Fremdschichtprüfungen an Hochspannungsisolatoren zur Anwendung in Wechselspannungssystemen

---

**IEC 60672-3, Second Edition, 1997-10**

Ceramic and glass-insulating materials – Part 3: Specifications for individual materials

**DIN VDE 0335 Teil 3, Februar 1988**

Keramik- und Glas-Isolierstoffe - Werkstoffkennwerte

**IEC 60694, Second Edition, 1996-05**

Common specifications for high-voltage switchgear and control standards

**DIN EN 60694 (VDE 0670 Teil 1000), Oktober 1998**

Gemeinsame Bestimmungen für Hochspannungs-Schaltgeräte-Normen

---

(IEC 60694:1996) Deutsche Fassung EN 60694:1996 + Corrigendum

---

**IEC/TS 60815-1, Ed. 1.0, 2008-10**

Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 1: Definitions, information and general principles

**IEC/TS 60815-2 Ed. 1.0, 2008-10**

Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 2: Ceramic and glass insulators for a.c. systems

**IEC/TS 60815-3 Ed. 1.0, 2008-10**

Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions - Part 3: Polymer insulators for a.c. systems

**E DIN IEC 60815-1 (VDE 0446-201), 2007-07**

Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen – Teil 1: Begriffe, Definitionen und allgemeine Grundlagen

**E DIN IEC 60815-2 (VDE 0446-202), 2007-07**

Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen – Teil 2: Keramik- und Glasisolatoren für Wechselspannungssysteme

**E DIN IEC 60815-3 (VDE 0446-203), 2008-04**

Auswahl und Bemessung von Hochspannungsisolatoren für verschmutzte Umgebungen – Teil 3: Polymerisolatoren für Wechselspannungssysteme

---

**DIN 48 113, September 1973**

Stützisolatoren für Schaltgeräte und Schaltanlagen für Spannungen über 1 kV – Zuordnung der Begriffe für Biegefestigkeit

---

**HD 637 S1:1999**

Power installations exceeding AC 1 kV / Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV

**DIN VDE 0101, Januar 2000**

Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV  
(Deutsche Fassung HD 637 S1:1999)

**IEC 61936-1, Ed. 2.0, 2010-08**

Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules

**DIN EN 61936-1; VDE 0101-1:2008-12**

Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV - Teil 1: Allgemeine Bestimmungen (IEC 99/81/CDV:2008); Deutsche Fassung FprEN 61936-1:2008

---

---

**IEC TS 62073, First Edition, 2003-06**

Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces

---

***d) US-amerikanische Ableitervorschriften***

---

**IEEE C62.11-2005 (Revision of IEEE C62.11-1999)**

IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (> 1 kV)

*Anmerkung:* Diese Vorschrift gilt sowohl für Ableiter mit als auch für solche ohne Funkenstrecken, unabhängig von der Art der Ableitwiderstände.

---

**IEEE Std. C62.22-2009 (Revision of IEEE C62.22-1997)**

IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems

---





## Weiterführende Literatur

### **Cigré Technical Brochure 60**

Metal Oxide Arresters in AC Systems  
April 1991

### **Cigré Technical Brochure xxx** (Nummer steht noch nicht fest)

Evaluation of stresses of Surge Arresters and appropriate test procedures  
Voraussichtliches Erscheinungsjahr: 2012 (WG A3.17)

### **Cigré Technical Brochure 455**

Aspects for the Application of Composite Insulators to High Voltage ( $\geq 72$  kV) Apparatus  
April 2011 (WG A3.21)

### **Cigré Working Group 33.06**

Metal oxide surge arresters in AC systems  
Part 1: General properties of the metal oxide surge arrester  
Part 2: Performance of metal oxide surge arresters under operating voltage  
Part 3: Temporary overvoltages and their stresses on metal oxide surge arresters  
ELECTRA 128, S. 99-125

### **Cigré Working Group 33.06**

Metal oxide surge arresters in AC systems  
Part 4: Stresses in metal oxide surge arresters due to temporary harmonic overvoltages  
ELECTRA 130, S. 78-115

### **Cigré Working Group 33.06**

Metal oxide surge arresters in AC systems  
Part 5: Protection performance of metal oxide surge arresters  
Part 6: Selection of metal oxide surge arrester characteristics from the standards  
ELECTRA 133, S. 133-165

### **Fien, Hinrichsen**

Hochspannungs-Metalloxid-Ableiter: Auslegungs- und Konstruktionskriterien  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93(1994), Heft 19, S. 1148-1156

**Göhler**

Einfluß der Dimensionierung auf das stabile Betriebsverhalten von Metalloxidableitern

ETG-Fachbericht Nr. 29: Magnetische Werkstoffe, Varistoren und Supraleiter; Anwendungen und Entwicklungstendenzen, VDE-Verlag Berlin, Offenbach, 1989, S. 103-112

**Göhler, Schubert, Weck, Hinrichsen, Tuzek, Clemens, Appel**

Special Requirements on Surge Arrester Design for UHV A.C. Systems above 800 kV System Voltage

Cigré Session 2010, Paris, Report A3-104-2010

**Heinrich, Hinrichsen**

Diagnostics and Monitoring of Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Networks - Comparison of Existing and Newly Developed Procedures

IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 1, January 2001, pp. 138-143

**Hinrichsen, Göhler, Lipken, Breilmann**

Economical overvoltage protection by metal-oxide surge arresters integrated in 420-kV centre-break disconnectors - Substation integration, design and test experience

Cigré Session 2000, Paris, Paper 33-104

**Hinrichsen, Petrusch, Richter, Steinfeld**

Prüfung des Langzeitverhaltens von silikonisierten Überspannungsableitern

ETG-Workshop "Silikonelastomere", Berlin, 20.3.2003, ETG-Fachbericht 93, S. 119-128

**Hinrichsen**

Latest Designs and Service Experience with Station-Class Polymer Housed Surge Arresters

World Conference on Insulators, Arresters & Bushings, Marbella (Málaga), Spain, November 16-19, 2003, Proceedings pp. 85-96

**Hinrichsen**

Latest Test Requirements and Emerging Standards for Transmission Line Arresters

World Conference on Insulators, Arresters & Bushings, Hong Kong, November 27-30, 2005

**Hinrichsen**

Bauformen und Betriebsverhalten kunststoffisolierter Ableiter  
RCC Fachtagung "Werkstoffe für Isolatoren, Überspannungsableiter, Kabelgarnituren,  
Schaltgeräte in der Hochspannungstechnik", Berlin, 6./7.4.2006

**Hinrichsen**

Overview of Recent Technological Developments for HV Line and Station Arresters  
& Future Tendencies; World Conference on Insulators, Arresters & Bushings, Rio de  
Janeiro, May 14-16, 2007

**Hinrichsen, Reinhard, Richter (on behalf of Cigré WG A3.17)**

Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters - Part 1: A  
Critical Review of the Standards  
Cigré SC A3 Technical Colloquium, Rio de Janeiro, September 12/13, 2007

**Hinrichsen**

Testing Requirements and Actual IEC Work on Distribution and Transmission Line  
Arresters  
Cigré Colloquium "Application of Line surge Arresters in Power Distribution and  
Transmission Systems", Cavtat/Croatia, May 26 to 29, 2008

**Hinrichsen, Göhler, Clemens, Steinmetz, Riffon**

External Grading Systems for UHV Metal-Oxide Surge Arresters - A New Approach  
to Numerical Simulation and Dielectric Testing  
Cigré Session 2008, Paris, Report A3-205

**Hinrichsen, Tuzek, Reinhard**

Recent Experimental Findings on the Energy Handling Capability of Metal-Oxide  
Varistors for High-Voltage Applications  
World Congress on Insulators, Arresters and Bushings, Crete, May 10-13, 2009

**Hinrichsen, Möhring, Wietoska, Haupt, Bockenheimer, Heinemann, Berger,  
Gottschalk, Kurda, Mikli, Schmuck, Seifert**

Resistance to Vapor Permeation of Factory New and of Mechanically Stressed Com-  
posite Hollow Insulators  
Cigré Session 2010, Paris, Report A3-304-2010

**Reinhard, Hinrichsen, Richter, Greuter (on behalf of Cigré WG A3.17)**

Energy Handling Capability of High-Voltage Metal-Oxide Surge Arresters - Part 2: A Results of a Research Test Program  
Cigré Session 2008, Paris, Report A3-309

**Richter, Schmidt, Kannus, Lahti, Hinrichsen, Neumann, Petrusch, Steinfeld**

Long Term Performance of Polymer Housed MO-Surge Arresters  
CIGRÉ Session 2004, Paris, Report A3-110

**Sakshaug, Kresge, Miske**

A new Concept in Station Arrester Design  
IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, no. 2,  
March/April 1977, pp. 647 – 656

**Steinfeld, Kruska, Hinrichsen**

Bauarten silikonisierter Überspannungsableiter  
ETG-Workshop "Silikonelastomere", Berlin, 20.3.2003, ETG-Bericht 93, S. 109-118

**Tuczek, Reinhard, Hinrichsen**

Energieaufnahmevermögen von Metalloxidvaristoren eingesetzt in Überspannungsableitern elektrischer Energieversorgungsnetze  
RCC Fachtagung "Werkstoffe - Forschung und Entwicklung neuer Technologien zur Anwendung in der elektrischen Energietechnik", Berlin, 6./7.5.2009

**Völcker**

Einsatz von Überspannungsableitern unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Sternpunktbehandlung in MS- und HS-Verteilnetzen  
Bulletin SEV/VSE 82(1991)15, S. 21-26

**Völcker**

Einsatz von Metalloxidableitern in Mittel- und Hochspannungsnetzen  
Elektrizitätswirtschaft, Jg. 86(1987), Heft 13, S. 561-566

## Anhang: Ableitertechnik in Stichworten

Dieser Teil des Ableiterhandbuches erläutert die wichtigsten, in der Ableitertechnik gebräuchlichen oder mit ihr in Zusammenhang stehenden Begriffe<sup>1</sup>.

**Ableiter-Bemessungsspannung:** → [Bemessungsspannung eines Ableiters](#)

**Ableiter-Bauglied:** → [Bauglied eines Ableiters](#)

**Ableiter-Dauerspannung:** → [Dauerspannung eines Ableiters](#)

**Ableiternaher Blitzeinschlag:** Von einem ableiternahen Blitzeinschlag spricht man, wenn ein Blitz in ein Leiterseil so dicht neben einem Ableiter einschlägt, dass es nicht zu einem Isolatorüberschlag kommt, bevor die über die Leitung laufende Überspannungswelle den Ableiter erreicht. Dies führt in Mittelspannungsnetzen häufig zur Zerstörung des betroffenen Ableiters, weil Ableiterauslegungen von dem üblichen Fall ausgehen, dass der größte Teil der in der Blitzentladung enthaltenen Ladung bereits vor Erreichen des Ableiters durch überschlagende Leitungsisolatoren zur Erde abgeführt worden ist.

**Abnahmeprüfungen:** Standardmäßig sind nach IEC 60099-4 an MO-Ableitern ohne Funkenstrecken, falls Abnahmeprüfungen vereinbart wurden, folgende Prüfungen an der auf eine ganze Zahl nach unten abgerundeten dritten Wurzel der Liefermenge durchzuführen:

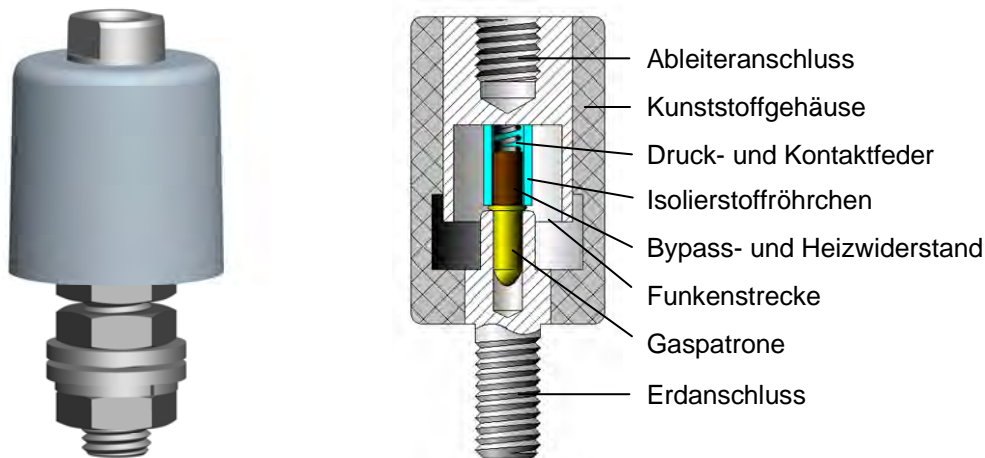
- Messung der Wechselfspannung am vollständigen Ableiter bei → [Referenzstrom](#)
- Messung der → [Restspannung](#) bei → [Blitzstoßstrom](#) am kompletten Ableiter oder an den einzelnen → [Baugliedern](#), möglichst bei → [Nenn-Ableitstoßstrom](#)
- → [Teilentladungsprüfung](#) am kompletten Ableiter oder an den einzelnen → [Baugliedern](#)
- Dichtigkeitsprüfung

**Abtrennvorrichtung:** Eine in der Erdanschlussleitung mit dem Ableiter in Reihe liegende Vorrichtung, die nach einer erfolgten Überlastung den Ableiter vom Netz trennt. Dies ist insbesondere in Verbindung mit kunststoffisolierten Ableitern wichtig, da deren Gehäuse bei einem Ausfall nicht zerfallen und die Ruß- und Verbrennungsspuren an-

---

<sup>1</sup> Die unterstrichenen Begriffe (Hyperlinks) sind Schlüsselwörter, die an entsprechender Stelle weiter erläutert werden. In der elektronischen Version dieses Handbuchs können sie durch Anklicken direkt angesprungen werden.

schließend einen Erdschluss bilden (während Porzellanableiter häufig völlig auseinanderbrechen und damit eine offene Trennstelle bilden). Ohne Abtrennvorrichtung wäre – zumindest in starr geerdeten Netzen – ein anschließender Betrieb des entsprechenden Leitungsabschnitts nicht mehr möglich. Nachteilig ist dagegen, dass nach erfolgter Abtrennung des Ableiters – oft unbemerkt – der Schutz gegen Überspannungen nicht mehr gegeben ist. Abtrennvorrichtungen werden ausschließlich im Mittelspannungsbereich oder in Verbindung mit →[Leitungsableitern](#) eingesetzt. Eines der häufigsten Wirkungsprinzipien heute gefertigter Abtrennvorrichtungen ist das Auslösen einer kleinen Sprengladung (z. B. Patrone einer Gaspistole) durch die thermische Einwirkung des nach dem Ableiterausfall fließenden netzfrequenten Erdfehlerstromes. Die Sprengladung zerreißt das sie umgebende Kunststoffgehäuse und bewirkt damit die Abtrennung der Erdungslitze vom Ableiter:



**Aktivteil:** die Säule(n) von MO-Widerständen eines Ableiters zusammen mit ihrer Stütz- und Haltekonstruktion.

**Aluminiumoxid-Porzellan:** →[Tonerde-Porzellan](#)

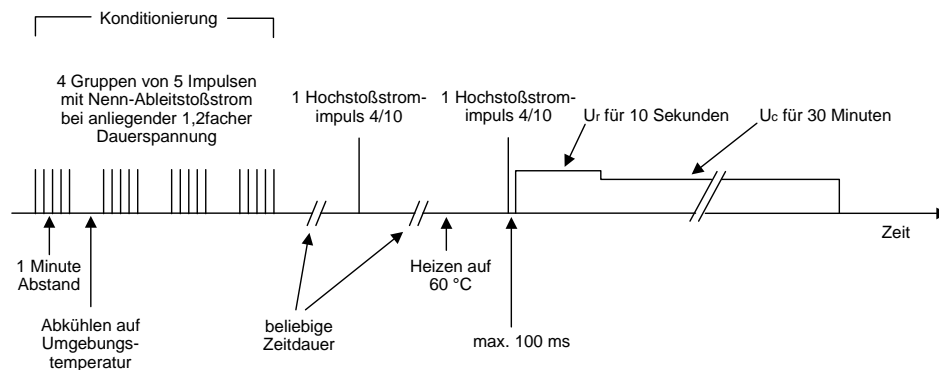
**ANSI:** American National Standards Institute

**Ansprechzähler:** Ein außerhalb des Ableiters angebrachtes Gerät (siehe Abbildung), das ein elektromechanisches oder elektronisches Zählwerk zur Erfassung von Ansprechvorgängen enthält. Ansprechzähler liegen in Reihe mit dem Ableiter in der Erdanschlussleitung. Dazu muss der Ableiter mit Hilfe von Isolierfüßen isoliert aufgestellt werden. Siehe auch →[Leckstromüberwachungsgerät](#)



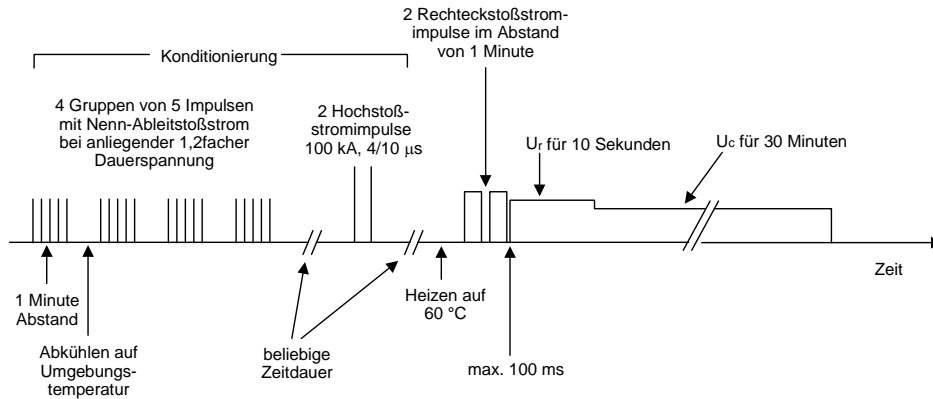
**ArbeitsprüfungHH:** In den Arbeitsprüfungen (IEC 60099-4, Absatz 8.5) wird nachgewiesen, dass der Ableiter nach Energieeinbringung unter den Bedingungen gleichzeitig auftretender →[zeitweiliger Überspannungen](#) →[thermisch stabil](#) bleibt (d.h. wieder auf normale Betriebstemperatur abkühlt). Dabei wird von ungünstigsten Randbedingungen bezüglich möglicher →[elektrischer Kennlinienalterung](#) der MO-Widerstände, der Umgebungs- und der Betriebstemperatur ausgegangen. Die Arbeitsprüfungen dürfen an →[Teilableitern](#) durchgeführt werden, die das elektrische und thermische Verhalten des wirklichen Ableiters nachbilden (sogenanntes →[Thermisches Äquivalent](#)). Es wird unterschieden zwischen der →[Arbeitsprüfung mit Hochstoßstrom](#) und der →[Arbeitsprüfung mit Rechteckstoßstrom](#).

**Arbeitsprüfung mit Hochstoßstrom:** siehe IEC 60099-4, Absatz 8.5.4. Durchzuführen an Ableitern mit 1,5 kA, 2,5 kA oder 5 kA →[Nennableitstoßstrom](#) und an 10-kA-Ableitern der →[Leitungsentladungsklasse](#) 1. Der Ablauf ist in dem folgenden Bild schematisch dargestellt:



Auch an 20-kA-Ableitern für hohe Blitzstrombelastungen im Spannungsbereich 1 kV bis 52 kV wird eine Arbeitsprüfung mit Hochstoßstrom, jedoch mit einem anderen Ablauf, durchgeführt (siehe IEC 60099-4, Anhang C).

**Arbeitsprüfung mit RechteckstoßstromHH:** siehe IEC 60099-4, Absatz 8.5.5. Durchzuführen an 10-kA-Ableitern der →[Leitungsentladungsklassen](#) 2 und 3 sowie an 20-kA-Ableitern der Leitungsentladungsklassen 4 und 5. Der Ablauf ist in dem folgenden Bild schematisch dargestellt:



**Aufschiebetechnik:** Eine Methode, →[GFK-Stäbe](#) (bei der Herstellung von Verbund-Langstabilisatoren) oder [GFK-Rohre](#) (bei der Herstellung von →[Verbund-Hohlisolatoren](#)) mit Schirmen zu versehen. Es sind im wesentlichen zwei Verfahren üblich:

- 1) Auf den GFK-Kern wird zunächst eine glatte Hülle aus demselben oder einem ähnlichen Material wie die Schirme aufgespritzt, aufextrudiert oder aufgeschumpft. Anschließend werden vorgefertigte Schirme aufgeschoben. Anzahl und Abstand der Schirme voneinander richten sich nach den Kriechwegforderungen.
- 2) Vorgefertigte Schirme werden direkt auf das GFK-Rohr geschoben. Die Schirme haben untereinander keinen Abstand, sondern überdecken sich an den Enden schindelförmig.

Durch Einsatz von →[Haftvermittlern](#), →[RTV-Silikon](#)-Zwischenschichten und eine Wärmenachbehandlung im Ofen wird ein fester, nur noch schwer lösbarer Verbund der Schirme mit dem GFK-Körper hergestellt. Es sind jedoch auch Konstruktionen bekannt, bei denen die Schirme nur in gedehntem Zustand aufgeschoben werden und sich allein durch die mechanische Spannung auf dem Kern halten.

**Ausbreitungsgeschwindigkeit** einer →[Wanderwelle](#): Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle auf einer Leitung beträgt

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot c_0$$



mit

$\epsilon_r$  ... Dielektrizitätszahl des umgebenden Dielektrikums

$\mu_r$  ... Permeabilitätszahl des umgebenden Dielektrikums

$\epsilon_0$  ... Permittivität des Vakuums,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m

$\mu_0$  ... Permeabilität des Vakuums,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

$c_0$  ... Lichtgeschwindigkeit,  $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$  m/s bzw. 300 m/ $\mu$ s

Das bedeutet, dass sich eine elektromagnetische Welle ([Wanderwelle](#)) auf einer Freileitung ( $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 1$ ) mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet ( $v = 300$  m/s), in einem Kabel dagegen je nach Aufbau der Isolation ( $\epsilon_r = 2 \dots 4$ ,  $\mu_r = 1$ ) mit (0,5...0,7)-facher Lichtgeschwindigkeit ( $v = 150 \dots 210$  m/s).

**Basic lightning impulse insulation level:** → [BIL](#)

**Bauglied eines Ableiters:** Ein in ein Gehäuse eingebauter Teil eines Ableiters, der parallel und/oder in Reihe mit anderen Baugliedern zu einem Ableiter mit höherer → [Bemessungsspannung](#) und/oder Bemessungsstrom zusammengesetzt werden kann (IEC 60099-4, 3.6).

**Bemessungs-Blitzstoßspannung:** (englisch: "standard rated lightning impulse withstand voltage" → [LIWV](#); nach amerikanischem Sprachgebrauch auch → [BIL](#) für "Basic lightning impulse insulation level") Genormter Wert einer Blitzstoßprüfungsspannung, mit der nachgewiesen wird, dass die Isolierung der erforderlichen Stehspannung entspricht. Die den verschiedenen → [höchsten Spannungen für Betriebsmittel Um](#) zugeordneten Bemessungs-Blitzstoßspannungen sind in IEC 60071-1, Tabellen 2 und 3 aufgeführt.

**Bemessungs-Kurzschlussstrom:** Effektivwert des symmetrischen höchsten Kurzschlussstromes, der nach Überlastung eines Ableiters über den die MO-Widerstände überbrückenden Lichtbogen fließen kann, ohne zu einem gewaltsamen Zerbersten des Gehäuses zu führen. Formelzeichen  $I_s$ . Hat die ehemalige → [Druckentlastungsklasse](#) der früheren Ausgaben der Vorschrift IEC 60099-4 abgelöst. Der Nachweis erfolgt durch die → [Kurzschlussprüfungen](#) (früher: Druckentlastungsprüfungen).

**Bemessungs-Schaltstoßspannung:** (englisch: "standard rated switching impulse withstand voltage" → [SIWV](#); nach amerikanischem Sprachgebrauch auch → [SIL](#) für "Basic switching impulse insulation level") Genormter Wert einer Schaltstoßprüfungsspannung, mit der nachgewiesen wird, dass die Isolierung der erforderlichen Stehspannung entspricht. Bemessungs-Schaltstoßspannungen sind nur für Betriebsmittel des [Bereichs](#)

**II** nach IEC 60071-1, also der Spannungsebenen  $U_m > 245$  kV festgelegt. Die den verschiedenen [→höchsten Spannungen für Betriebsmittel  \$U\_m\$](#)  zugeordneten Bemessungsschaltstoßspannungen sind in IEC 60071-1, Tabelle 3 aufgeführt.

**Bemessungsspannung eines Ableiters:** (Ableiter-Bemessungsspannung, Formelzeichen  $U_i$ ) Höchster zulässiger Effektivwert der Wechselspannung über den Ableiterklemmen, für die der Ableiter bemessen ist, um unter den Bedingungen [→zeitweiliger Spannungserhöhungen](#), wie sie in den [→Arbeitsprüfungen](#) festgelegt sind, bestimmungsgemäß zu arbeiten. Üblicherweise wird sie von den Herstellern so definiert, dass sie für eine Dauer von 10 Sekunden (das entspricht den Verhältnissen in den Arbeitsprüfungen) oder 100 Sekunden an den Ableiter gelegt werden darf. Die Bemessungsspannung ist Bezugsgröße für die Festlegung von Betriebseigenschaften (IEC 60099-4, 3.8).

**Bereiche der höchsten Spannung für Betriebsmittel:** Nach IEC 60071-1, Abschnitt 4.8 werden die genormten höchsten Spannungen für Betriebsmittel in zwei Bereiche unterteilt:

- Bereich I:  $1 \text{ kV} \leq U_m \leq 245 \text{ kV}$
- Bereich II:  $U_m > 245 \text{ kV}$

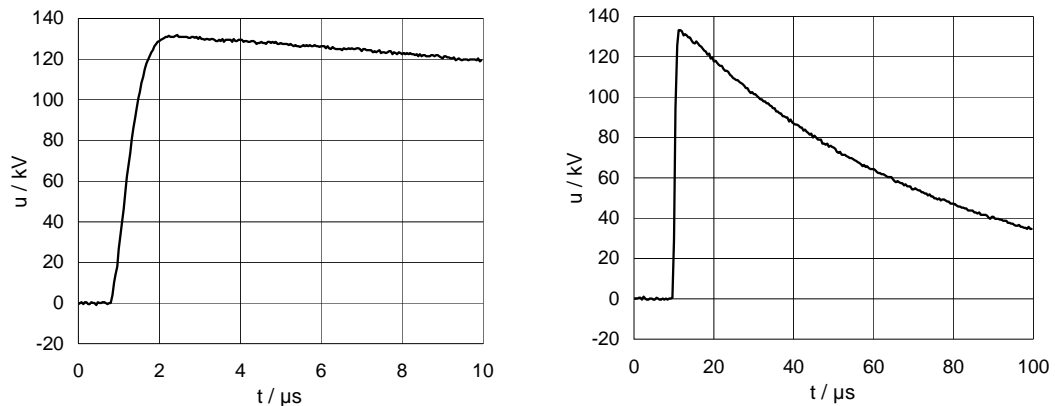
**Besondere Betriebsbedingungen:** sind definiert in IEC 60099-4, Anhang A. Weiterhin informiert IEC 60099-4 im Anhang G über Angaben für Anfragen und Angebote. Siehe auch [→Normale Betriebsbedingungen](#).

**BILHH:** Abkürzung für "basic lightning impulse insulation level". Obwohl dieser Begriff häufig auch dann verwendet wird, wenn im Übrigen auf [→IEC](#)-Vorschriften Bezug genommen wird, handelt es sich um einen ausschließlich bei [→IEEE](#) und [→ANSI](#) definierten Begriff (siehe Vorschriften IEEE Std 1313.1-1996, IEEE Std C62.2-1987, IEEE Std C62.22-1991, ANSI C92.1-1982). In der IEC-Vorschrift 60071-1, Ed. 8, 2006-01 wird stattdessen der Begriff "Standard rated lightning impulse withstand voltage" mit der Abkürzung [→LIWV](#) verwendet, in der deutschen Übersetzung VDE 0111 Teil 1, Juli 1996 [→Bemessungs-Blitzstoßspannung](#).

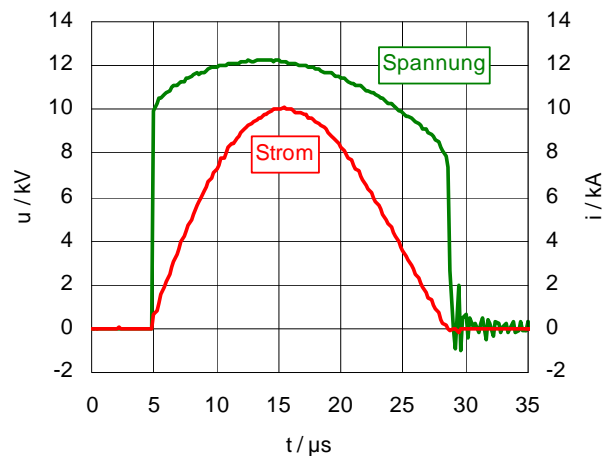
**Blitzstoß-Schutzpegel:** Maximalwert der [→Restspannung](#) des Ableiters beim Fließen des [→Nenn-Ableitstromes](#).

**Blitzstoßspannung:** Eine in IEC 60060-1 genormte Prüfspannung zum Nachweis der dielektrischen Festigkeit gegenüber [schnell ansteigenden Überspannungen](#). Die genormte Blitzstoßspannung 1,2/50 weist eine Zeit bis zum Erreichen des Spannungsscheitels von 1,2  $\mu\text{s}$  und eine [Rückenhalfwertzeit](#) von 50  $\mu\text{s}$  auf. Die beiden Oszil-

logramme zeigen die genormte Blitzstoßspannung in zwei unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen.



**Blitzstoßstrom:** →[Stoßstrom](#) 8/20 mit einer →[Stirnzeit](#) zwischen 7  $\mu\text{s}$  und 9  $\mu\text{s}$  und einer →[Rückenthalbwertzeit](#) zwischen 18  $\mu\text{s}$  und 22  $\mu\text{s}$  (IEC 60099-4, Absatz 3.17). Blitzstoßströme werden im Labor zur Ermittlung der →[Spannungs-Strom-Kennlinie](#) von Ableitern, →[Teilableitern](#) oder →[MO-Widerständen](#) sowie während der →[Konditionierung](#) im Zuge der →[Arbeitsprüfung](#) benötigt. Sie werden durch die Entladung eines Kondensators in einem aperiodisch gedämpften RLC-Schwingkreis erzeugt. Die Stromamplituden liegen im Bereich von 100 A bis zu 40 kA. Das folgende Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Restspannungsmessung an einem MO-Widerstand bei einem Blitzstoßstrom von 10 kA.



**Blitzüberspannung:** sehr kurzzeitige Überspannung verursacht durch direkten Blitzeinschlag in ein Leiterseil, Erdseil oder Mast, oder induziert durch Blitzströme in benachbarten Leitungen oder metallischen Strukturen. Der überwiegende Teil (80%...90%) der Blitzentladungen hat negative Polarität. Die Ströme liegen größtenteils im Bereich von 30 kA bis 50 kA bei gemessenen Maximalwerten bis zu 300 kA. Die

Stirnanstiegszeit beträgt nur wenige  $\mu\text{s}$ , die gesamte Dauer einige 10  $\mu\text{s}$  bis 100  $\mu\text{s}$ . In der Regel besteht ein Blitz aus mehreren Entladungen im selben Kanal (Folgeblitze), die in zeitlichen Abständen von etwa 5 ms bis 200 ms auftreten. Die Höhe der durch Blitzeinschlag verursachten Überspannungen ergibt sich aus dem über die Leitung fließenden Blitzstrom und dem  $\rightarrow$ [Wellenwiderstand](#) der Leitung und kann mehrere Millionen Volt betragen. Durch das Überschlagen der Leitungsisolatoren wird die Höhe jedoch faktisch auf den Wert der Isolatorüberschlagsspannung begrenzt. Nur diese Überspannungen laufen noch in die Schaltanlagen ein und müssen von den dort installierten Ableitern weiter begrenzt werden. Blitzüberspannungen gehören meist zur Klasse der  $\rightarrow$ [Schnell ansteigenden Überspannungen](#) nach IEC 60071-1 bzw. VDE 0111 Teil 1.

**Dauerspannung eines Ableiters:** (Ableiter-Dauerspannung, Formelzeichen  $U_c$ ) Die Dauerspannung ist der höchstzulässige Effektivwert der betriebsfrequenten Wechselspannung, die dauernd über den Ableiterklemmen anliegen darf (IEC 60099-4, 3.9).

**Degradation:**  $\rightarrow$ [Elektrische Kennlinienalterung](#)

**Direkte Sternpunktterdung:** Sternpunktbehandlung eines Netzes, bei der ein oder mehrere Sternpunkte unmittelbar mit Erde verbunden sind (IEC 60071-1, 3.12).

**Direktumguss:** Eine Möglichkeit, die Silikonbeschirmung auf einen Ableiter oder auf das GFK-Rohr eines  $\rightarrow$ [Verbund-Hohlisolators](#) aufzubringen (im Gegensatz zur  $\rightarrow$ [Aufschiebetechnik](#)). Dabei kommen verschiedene Techniken zum Einsatz. Am häufigsten wird der zu umgießende Körper in eine dicht schließende, längs geteilte Form eingelegt und in einem Schuss vollständig umgossen. Dies ist bis zu Längen von über zwei Metern möglich und üblich. Für längere Körper wird die Beschirmung nacheinander in mehreren Schüssen aufgebracht, wobei der jeweilige Verguss an den vorher aufgetragenen anvulkanisiert wird. Der resultierende Verguss weist zwei Längs-"Nähte" auf, die sich jedoch bei sorgfältiger Ausführung nicht nachteilig auf das Betriebsverhalten auswirken. Bei einem anderen Verfahren wird der Verguss schrittweise Schirm für Schirm mit Hilfe einer einteiligen, den Körper ringförmig umschließenden Form aufgebracht, die an dem Körper entlanggeführt wird. Es ist auch ein Verfahren bekannt, bei dem die Silikonmasse spiralförmig mit Hilfe einer an dem rotierenden Körper entlangfahrenden Form aufgebracht wird. Es ergeben sich dabei keine einzelnen, voneinander getrennten Schirme, sondern eine Endlos-Spirale.

**Druckentlastungsklasse:** Nach früheren Ausgaben der Vorschrift IEC 60099-4 (für MO-Ableiter ohne Funkenstrecken) und IEC 60099-1 (für SiC-Ableiter mit Funkenstrecken) der Effektivwert des symmetrischen höchsten Kurzschlussstromes (angegeben

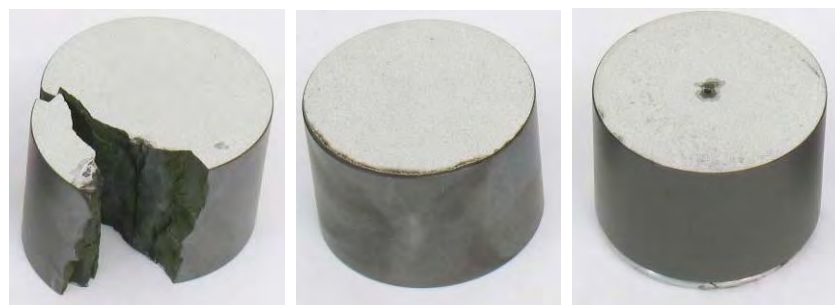
in Kiloampere, zum Teil auch mit einem Buchstaben von A bis D), der nach Überlastung eines Ableiters über den im Gehäuse gezündeten Lichtbogen fließen kann, ohne zu einem gewaltsamen Zerbersten des Gehäuses zu führen. Heute ist die Angabe der Druckentlastungsklasse durch den → [Bemessungs-Kurzschlussstrom](#) abgelöst. Der Nachweis erfolgt durch die → [Kurzschlussprüfungen](#) (früher: Druckentlastungsprüfungen).

**Druckentlastungsprüfungen:** → [Kurzschlussprüfungen](#)

**EGLA:** (externally gapped line arrester) → [Leitungsableiter](#) mit externer Serienfunkenstrecke; die zuständige Prüfvorschrift ist IEC 60099-8.

**Eigeninduktivität eines Ableiters:** MO-Widerstände haben bei ansonsten gleichen Stromstärken eine mit der Stromsteilheit zunehmende Restspannung. So muss bei [Steilstoßstrombeanspruchung](#) mit einer gegenüber einer gleich hohen [Blitzstoßstrombeanspruchung](#) um etwa 5 % erhöhten Restspannung gerechnet werden. Zusätzlich sind jedoch auch induktive Spannungsfälle aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Ableiters für sehr kurze Anstiegszeiten des Ableitstoßstromes (Stirnzeiten kleiner als etwa 1  $\mu$ s) zu berücksichtigen. Für Freiluftableiter rechnet man mit der Eigeninduktivität eines geraden, gestreckten Leiters in großem Abstand zu anderen Leitern oder geerdeten Teilen. Eine solche Anordnung besitzt eine Induktivität von etwa 1  $\mu$ H/m. Für metallgekapselte, gasisolierte Ableiter kann dagegen wegen ihres koaxialen Aufbaus ein Wert von nur 0,3  $\mu$ H/m angesetzt werden. In die Gesamtbetrachtung des Schutzpegels für steile Stoßstrombeanspruchungen gehen weiterhin noch die Zuleitungsinduktivitäten vom Anschlusspunkt des Ableiters an die Leitung bis zu seiner Anschlussklemme sowie von seinem Erdanschluss bis zur wirksamen Stationserde ein.

**Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen:** Die während eines einzelnen Ableitvorganges maximal aufnehmbare Energie eines Ableiters. Sie wird praktisch durch kleinste Inhomogenitäten in der Sinterkeramik der MO-Widerstände begrenzt. Bei Überschreiten dieses Wertes besteht das Risiko thermomechanischen Bruchs, elektrischer Überschlüge oder Durchschläge oder der MO-Widerstände (siehe Bild). Das Einzelimpuls-



Energieaufnahmevermögen ist kleiner als das → [thermische Energieaufnahmevermögen](#). Wie dieses ist es allerdings in den IEC-Vorschriften nicht definiert und wird deshalb nicht von jedem Hersteller angegeben, und wenn, dann häufig unter unterschiedlichen Randbedingungen. Als ein indirektes Maß für das Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen kann die → [Langwellenfestigkeit](#) betrachtet werden. Nach IEC 60099-4 ist das Energieaufnahmevermögen ausschließlich über die → [Leitungsentladungsklasse](#) definiert.

**E-J-Kennlinie:** → [Feldstärke-Stromdichte-Kennlinie](#)

**Elektrische Kennlinienalterung:** Veränderung (genauer: Verschlechterung) der → [Spannungs-Strom-Kennlinie](#) eines MO-Widerstandes oder -Ableiters im → [Leckstrom](#)-Bereich. Bei nach heutigem Stand der Technik gefertigten Widerständen, die mit Energien innerhalb des spezifizierten Bereichs beansprucht werden, ist eine elektrische Kennlinienalterung nicht zu erwarten. Elektrische Kennlinienalterung kann jedoch unter bestimmten Bedingungen durch extreme, außergewöhnlich hohe Impulsstrombeanspruchungen der MO-Widerstände auftreten. Auch bestimmte Zusammensetzungen der die MO-Widerstände umgebenden Gas-Atmosphäre oder anderer, fester oder flüssiger Isoliermedien können durch chemische Einflüsse eine elektrische Kennlinienalterung bewirken, wenn bei der Herstellung der MO-Widerstände keine gezielten Maßnahmen dagegen getroffen wurden. Teilweise ist die elektrische Kennlinienalterung reversibel (die Kennlinie "erholt sich").

**Energieaufnahmevermögen:** → [Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen](#), → [thermisches Energieaufnahmevermögen](#), → [Leitungsentladungsklasse](#)

**Erdfehlerfaktor:** (Formelzeichen nach IEC 60071-1:  $k$ ) Verhältnis des Effektivwertes der höchsten betriebsfrequenten Leiter-Erde-Wechselspannung eines nicht fehlerbetroffenen Außenleiters (hiervon werden ein oder zwei Außenleiter beeinflusst) während eines Fehlers mit Erdberührung an einer beliebigen Stelle des Netzes zum Effektivwert der betriebsfrequenten Leiter-Erde-Wechselspannung, die ohne Fehler am gleichen Ort vorhanden wäre. Der Erdfehlerfaktor bezieht sich nur auf eine bestimmte Stelle eines Drehstromnetzes und auf einen bestimmten Netzzustand (VDE 0111 Teil 1, 3.15). Die Höhe des Erdfehlerfaktors wird durch die Sternpunktbehandlung des Netzes beeinflusst. Es gilt  $k \leq 1,4$  in einem Netz mit → [direkter Sternpunkterdung](#) und  $k \geq 1,7$  in einem Netz mit → [isoliertem Sternpunkt](#) oder mit → [Erdschlusskompensation](#).

**Erdschlusskompensation:** Sternpunktbehandlung eines Netzes, bei der ein oder mehrere Sternpunkte über eine Reaktanz geerdet sind und demzufolge die kapazitive Kom-

ponente des Erdschlussstromes im Wesentlichen kompensiert ist. In einem Netz mit Erdschlusskompensation ist der Reststrom im Fehlerfall auf einen Wert begrenzt, bei dem ein Lichtbogen in Luft gewöhnlich selbst erlischt (IEC 60071-1, 3.14). Häufig wird in diesem Zusammenhang auch von einem "gelöschtem Netz" gesprochen.

**Feldstärke-Stromdichte-Kennlinie:** (auch: *E-J*-Kennlinie) Darstellung der Feldstärke (streng genommen der auf die Höhe bezogenen Spannung) eines MO-Widerstandsystems in Abhängigkeit von der Stromdichte. Auf der Ordinate sind üblicherweise Feldstärke-Scheitelwerte aufgetragen. Die Abszisse gibt Stromdichte-Scheitelwerte (im Bereich betriebsfrequenter Stromdichten nur die resistive Komponente) an, in logarithmischer Darstellung und über einen Bereich von mehreren Zehnerpotenzen. Durch Multiplikation der Feldstärke mit der Höhe und der Stromdichte mit der Stromquerschnittsfläche kann daraus für jede beliebige, auf diesem Materialsystem basierende MO-Widerstandsbauf orm deren *U-I*-Kennlinie konstruiert werden.

**Festgelegte Dauerlast:** → [SLL](#)

**Festgelegte Kurzzeitlast:** → [SSL](#)

**Fremdschichtklasse:** Ein Maß für die Fremdschichtbeanspruchung der Betriebsmittel an einem Standort. Die Festlegungen der Fremdschichtklassen nach IEC 60815-1, Ed. 1.0, 2008-10 sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt. Abhängig von der Fremd-

Klasse	Definition	USCD mm/kV	(SCD) mm/kV
a	sehr leicht	22	12,7
b	leicht	27,8	16
c	mittel	34,7	20
d	schwer	43,3	25
e	sehr schwer	53,7	31

schichtklasse empfiehlt IEC 60815-2 (für Porzellan- und Glasisolatoren) und IEC 60815-3 (für Kunststoffisolatoren) die ebenfalls in der Tabelle gezeigte Zuordnung zum → [vereinheitlichten spezifischen Kriechweg](#) (USCD), der allerdings anschließend noch isolatorspezifisch zu korrigieren ist. Der Vollständigkeit halber sind auch die umgerechneten Werte für den → [spezifischen Kriechweg](#) (SCD) mit angegeben, der noch in der Vorgängerfassung der Norm, IEC 60815 Ed. 1, 1986, definiert war (SCD- und USCD-Werte unterscheiden sich definitionsgemäß um den Faktor  $\sqrt{3}$ ). Dort waren auch die Fremdschichtklassen noch anders definiert: "I" – "leicht", "II" – "mittel", "III" – "schwer", "IV" – "sehr schwer", und die Empfehlungen für Porzellanisolatoren lauteten:



"I" – SCD = 16 mm/kV; "II" – SCD = 20 mm/kV; "III" – SCD = 25 mm/kV; "IV" – SCD = 31 mm/kV.

**Funkenstreckenableiter:** Ein (SiC)-Ableiter, der eine oder mehrere Funkenstrecken in Reihenschaltung mit einem oder mehreren nichtlinearen Widerständen aufweist (VDE 0675 Teil 1, 2.2). Obwohl es auch Metalloxidableiter mit Funkenstrecken gibt, die sowohl innerhalb (IEC 60099-6) als auch außerhalb (→[EGLA](#), IEC 60099-8) des Gehäuses angeordnet sein können, werden im allgemeinen Sprachgebrauch als Funkenstreckenableiter üblicherweise nur die vor Einführung der funkenstreckenlosen Metalloxidableiter üblichen →[Siliziumkarbid](#)- (SiC-) Ableiter mit Funkenstrecken bezeichnet.

**Funktörspannung:** (englisch: radio interference voltage, RIV) Eine durch äußere elektrische Teilentladungen ("Korona") an den sich auf hohem Potential befindlichen Ableiterkomponenten (im wesentlichen der hochspannungsseitige Flansch und Anschluss) verursachte, mit einem Störspannungsmessempfänger gemessene Spannung, angegeben in Mikrovolt. Für Ableiter mit  $U_r \geq 77$  kV ist eine entsprechende Prüfung durchzuführen, in der bei einer anliegenden Spannung von  $U = 1,05 \cdot U_c$  ein Funktörspannungs-Pegel von 2 500  $\mu$ V nicht überschritten werden darf (IEC 60099-4, 6.15 und 8.12). Ein mögliches Hilfsmittel zur Reduzierung des Funktörspannungspegels stellen →[Koronaringe](#) dar. Ansonsten sind die üblichen hochspannungstechnischen Optimierungen vorzunehmen (Vermeidung scharfer Kanten, Vergrößerung von Rundungsradien, Nutzung elektrostatischer Schirmwirkungen).

**Glasfaserverstärkter Kunststoff:** (abgekürzt: GFK) Dieses Material wird in Ableitern häufig für die Stützkonstruktion der MO-Säule eingesetzt. In kunststoffisolierten Ableitern stellt es – beispielsweise in Form von Stäben, Schlaufen, Rohren oder gewickelten Matten – die wichtigste Komponente zum Erreichen der mechanischen Festigkeit des Gehäuses dar.

**GFK:** Abkürzung für →[Glasfaserverstärkter Kunststoff](#)

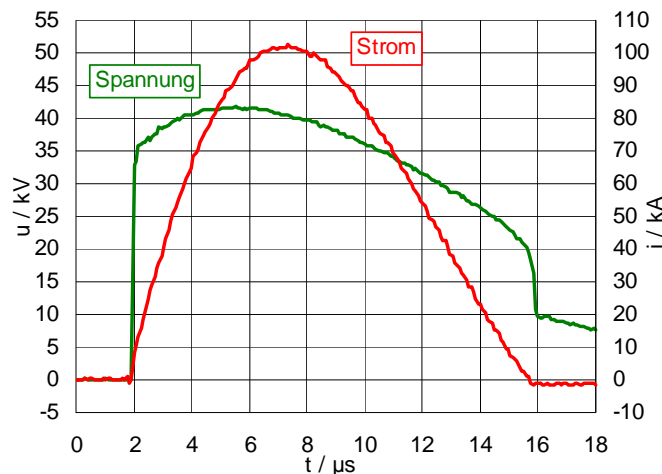
**Haftvermittler:** (englisch: Primer) Eine chemische Flüssigkeit, die, vor dem Aufbringen des →[Silikongummi](#)s aufgetragen, einen festen chemischen Verbund zwischen dem Silikongummi und beliebigen anderen Materialien (Aluminium, →[GFK-Körper](#), →[MO-Widerstände](#)) nach dem →[Aufvulkanisieren](#) bewirkt.

**Höchste Betriebsspannung eines Netzes<sup>HH</sup>:** (Formelzeichen  $U_s$ ) Effektivwert der höchsten Außenleiterspannung bei Normalbetrieb zu einem beliebigen Zeitpunkt an einem beliebigen Punkt des Netzes (IEC 60071-1, 3.9).



**Höchste Spannung für ein Betriebsmittel:** (Formelzeichen  $U_m$ ) Effektivwert der höchsten Außenleiterspannung, für die ein Betriebsmittel im Hinblick auf seine Isolierung und andere Eigenschaften, die sich in den entsprechenden Gerätebestimmungen auf diese Spannungen beziehen, zu bemessen ist (IEC 60071-1, 3.10).

**Hochstoßstrom:** Scheitelwert eines  $\rightarrow$ [Stoßstroms](#) 4/10, mit dem die Stabilität des Ableiters bei ableiternahen Blitzeinschlägen geprüft wird (IEC 60099-4, 3.31). Es ist jedoch anzumerken, dass ein Hochstoßstrom mit einer Amplitude von zum Beispiel 100 kA wenig mit einem wirklichen Blitzentladungsstrom gleicher Höhe, der eine Zeitdauer von einigen hundert Mikrosekunden aufweisen kann, zu tun hat. Insbesondere bei der Prüfung von Ableitern mit MO-Widerständen von mehr als 40 mm Durchmesser stellt der Hochstoßstrom daher weniger eine energetische als vielmehr eine dielektrische Beanspruchung dar (wegen der dabei auftretenden hohen  $\rightarrow$ [Restspannung](#)). Hochstoßströme werden im Labor für die  $\rightarrow$ [Arbeitsprüfung](#) an Ableitern oder  $\rightarrow$ [Teilableitern](#) benötigt. Sie werden durch die Entladung eines Kondensators in einem aperiodisch gedämpften RLC-Schwingkreis erzeugt. Die Stromamplituden liegen im Bereich von 10 kA bis zu 100 kA (siehe IEC 60099-4, Tabelle 6). Das folgende Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Hochstoßstromprüfung an einem Teilableiter bei einer Stromamplitude von 100 kA:



**HTV-Silikon:** Hochtemperaturvernetzendes Silikon (englisch: high temperature vulcanizing silicone). Eine Einkomponenten-Silikonart, die in extrem hochviskosem Zustand (vergleichbar Knetgummi) angeliefert, unter hohen Drücken (einige zehn MPa) und Temperaturen ( $> 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) in die Formen gespritzt wird und anschließend bei ähnlich hohen Temperaturen  $\rightarrow$ [ausvulkanisiert](#).

**Hydrophobie:** Die Eigenschaft, Wasser abzustoßen. Auf einer hydrophoben Oberfläche können sich keine geschlossenen Wasserfilme bilden. Aufgebrachtes Wasser zieht sich

stattdessen sofort zu einzelnen Tropfen zusammen und perlt von der Oberfläche ab. Nach einem Vorschlag des Swedish Transmission Research Institute ("STRI guide 92/1: Hydrophobicity classification guide") wird der Grad der Hydrophobie in sieben Klassen von HC 1 bis HC 7 eingeteilt. HC 1 steht dabei für eine vollkommen hydrophobe und HC 7 für eine vollkommen hydrophile (d. h. geschlossen benetzbare) Oberfläche. Diese Einteilung ist von IEC übernommen worden: IEC TS 62073, First Edition, 2003-06 "Guidance on the measurement of wettability of insulator surfaces" (siehe dort für weitere Informationen zum Thema). Allerdings heißen die Hydrophobieklassen dort nun "WC" (für wettability class). Ein Material, bei dem die Eigenschaft der Hydrophobie extrem stark ausgebildet ist, ist →[Silikongummi](#).

**IEC:** Abkürzung für "International Electrotechnical Commission". Kommission für die weltweite Normung auf dem Gebiet der Elektrotechnik und Elektronik mit Sitz in Genf.

**IEEE:** Abkürzung für "Institute of Electrical and Electronics Engineers", eine Amerikanische Organisation mit Sitz in New York, die unter anderem Normen auf dem Gebiet der Elektrotechnik und Informationstechnik erarbeitet und vertreibt.

**Impedanz-Sternpunkterdung:** Sternpunktbehandlung eines Netzes, bei der ein oder mehrere Sternpunkte zur Begrenzung des Erdkurzschlussstromes über eine Impedanz mit Erde verbunden sind (IEC 60071-1, 3.13).

$I_n$ : →[Nenn-Ableitstoßstrom](#)

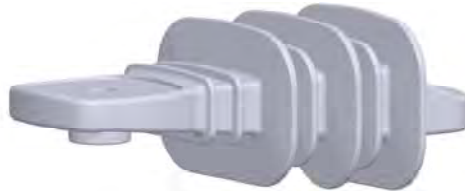
$I_s$ : →[Bemessungs-Kurzschlussstrom](#)

**Isokeraune:** Linie gleicher →[Keraunischer Pegel](#) auf einer Landkarte

**Isolationskoordination:** Auswahl der dielektrischen Festigkeit von Betriebsmitteln, die für ein bestimmtes Netz vorgesehen sind, in Abhängigkeit von Spannungen, die in diesem Netz unter Berücksichtigung der betrieblichen Umgebungsbedingungen und der Eigenschaften der verfügbaren Überspannungs-Schutzeinrichtungen auftreten können (IEC 60071-1, 3.1).

**Isolierter Sternpunkt:** Sternpunktbehandlung eines Netzes, bei dem kein Sternpunkt betriebsmäßig Erdverbindung hat, mit Ausnahme von Verbindungen mit hoher Impedanz für Schutz- und Messeinrichtungen (IEC 60071-1, 3.11).

**Isolierschelle:** Eine isolierende Befestigungsschelle, mit der im Mittelspannungsnetz Ableiter mit Abtrennvorrichtungen montiert werden. Die Isolierschelle muss nach ei-



nem Ableiterausfall der anliegenden Leiter-Erdspannung (der ausgefallene Ableiter wirkt als Kurzschluss!) standhalten können, bis der Ableiter ausgewechselt ist. Das Bild zeigt eine Isolierschelle in Kunststoffausführung. Bei → [Mittelspannungsableitern mit Porzellangehäuse](#) wurden zu diesem Zweck häufig metallische Schellen um das Porzellangehäuse gelegt, s. Abbildung dort.

**Keraunischer Pegel:** (in der Literatur häufig fälschlicherweise als isokeraunischer Pegel bezeichnet) mittlere Anzahl von Gewittertagen pro Jahr. Aus dem keraunischen Pegel kann auf die Erdblitzdichte und damit auf die zu erwartenden Beanspruchungen der Ableiter im Netz geschlossen werden. Siehe auch → [Isokeraune](#).

**Kettenleiter:** Nachbildung einer Leitung als Reihenschaltung von  [\$\pi\$ -Gliedern](#) (Längsinduktivitäten und Querkapazitäten). In Stoßstromlaboratorien zur Prüfung von Ableitern werden Kettenleiter für die → [Prüfung mit Rechteckstoßstrom](#) (IEC 60099-4, 8.4.3), die → [Leitungsentladungsprüfung](#) (IEC 60099-4, 8.4.2) und die → [Arbeitsprüfung mit Rechteckstoßstrom](#) (IEC 60099-4, 8.5.5) verwendet. Ein Beispiel für einen Kettenleiter wird in IEC 60099-4, Anhang J gegeben.

**Konditionierung:** Die Konditionierung ist Teil der → [Arbeitsprüfung](#) und findet vor dem eigentlichen Nachweis der → [thermischen Stabilität](#) nach Energieeinbringung statt. Sie soll, soweit vorhanden, eine Voralterung (→ [Degradation](#)) der MO-Widerstände bewirken, damit die eigentliche Arbeitsprüfung nicht vereinfachend an neuwertigen Widerständen durchgeführt wird. Die Konditionierung erfolgt durch zwanzig → [Blitzstoßstrombeanspruchungen](#) von der Höhe des → [Nenn-Ableitstoßstromes](#), die einer anliegenden betriebsfrequenten Wechselspannung von 1,2facher → [Dauerspannung](#) überlagert werden. Bei Arbeitsprüfungen an Ableitern der → [Leitungsentladungsklassen](#) 2 bis 5 schließt sich außerdem noch eine Beanspruchung mit zwei → [Hochstoßstromimpulsen](#) von jeweils 100 kA Scheitelwert an.

**Kontrollfunkenstrecke:** Ein außerhalb des Ableiters angebrachtes Gerät, das herausnehmbare Zählelektroden zur Erfassung der Anzahl, Intensität und Polarität von Ansprechvorgängen enthält. Jeder Ansprechvorgang des Ableiters hinterlässt auf den Zählelektroden Marken, deren Aussehen Rückschlüsse auf Höhe, Dauer und Polarität des



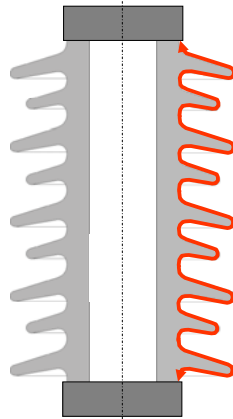
geflossenen Stromes zulässt. Kontrollfunkenstrecken liegen in Reihe mit dem Ableiter in der Erdanschlussleitung. Dazu muss der Ableiter mit Hilfe von Isolierfüßen isoliert aufgestellt werden. Die Bilder zeigen eine Kontrollfunkenstrecke am Ableiter montiert (oben links), geöffnet mit den herausgenommenen Zählelektroden (oben rechts) sowie Beispiele für Ansprechmarken auf den Zählelektroden (unten).

**Koordinationsstehspannung:** (Formelzeichen:  $U_{cw}$ ) Ein Begriff aus der →[Isolationskoordination](#): Wert der →[Stehspannung](#) einer praktischen Isolieranordnung, für den sich eine akzeptable Fehlerrate (das sogenannte Auswahlkriterium) ergibt. Der Einsatz von Überspannungsableitern soll sicherstellen, dass der Wert der Koordinationsstehspannung an einem Betriebsmittel nicht überschritten wird. Zur genauen Definition der genannten Begriffe und ihrer Bedeutung und Ermittlung bei der Vorgehensweise zur Isolationskoordination siehe IEC 60071-1 und 60071-2.

**Koronaring:** Dient der elektrostatischen Abschirmung des hochspannungsseitigen Ableiteranschlusses zur Reduzierung der →[Funkstörspannung](#) (radio interference voltage, RIV) und darf nicht mit einem →[Steuerring](#) verwechselt werden. Abbildung siehe unter →[Steuerring](#)

**Kriechweg:** Der Kriechweg eines Isolators gibt die entlang der Gehäuseoberfläche gemessene Distanz zwischen seinen metallischen Endarmaturen an (rote Kurve im Bild). Er ist eine wichtige Auslegungsgröße für das Verhalten eines Isolators oder eines mit einem solchen Isolator aufgebauten Gerätes unter Fremdschichtbeanspruchung. Siehe

auch → [Mindestkriechweg](#), → [Nennkriechweg](#), → [spezifischer Kriechweg](#), → [vereinheitlichter spezifischer Kriechweg](#), → [Schlagweite](#)



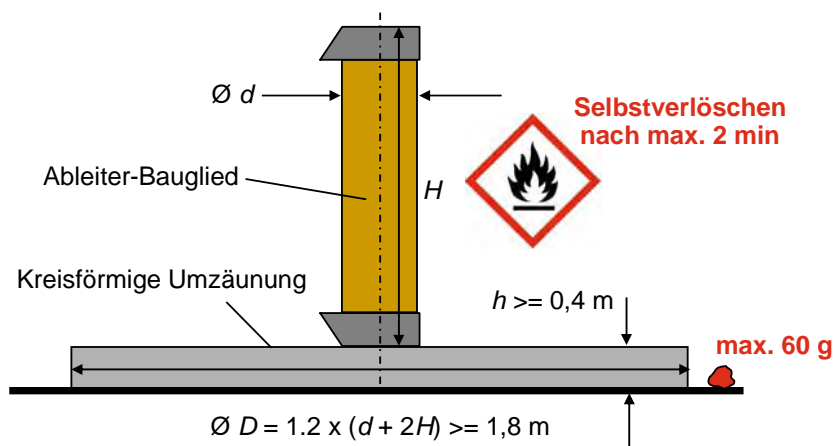
**Kurzschlussfestigkeit:** Fähigkeit eines Ableiters, nach einer erfolgten Überlastung dem anschließend fließenden Kurzschlussstrom standzuhalten, ohne dass es zu einem gewaltsamen Zerbersten des Gehäuses kommt. Die Kurzschlussfestigkeit wurde früher als → [Druckentlastungsklasse](#) und wird heute als → [Bemessungs-Kurzschlussstrom](#) angegeben und durch die → [Kurzschlussprüfungen](#) bzw. die Druckentlastungsprüfungen nachgewiesen.

**Kurzschlussprüfungen:** (früher: Druckentlastungsprüfungen) An Ableitern, für die der Hersteller eine → [Kurzschlussfestigkeit](#) angibt, weisen diese Prüfungen unter anderem nach, dass das Ableitergehäuse Kurzschlussströmen unter festgelegten Prüfbedingungen standhält, ohne zu bersten (ein druckloses Zerbrechen ist aber ausdrücklich zugelassen). Außer mit dem → [Bemessungs-Kurzschlussstrom](#)  $I_s$  (Stromflussdauer 200 ms) muss auch mit zwei **verminderten Kurzschlussströmen** (Stromflussdauer ebenfalls 200 ms)

Bemessungs-Kurzschlussstrom (Dauer 200 ms) / A	Verminderte Kurzschlussströme (Dauer 200 ms) / A		Niedriger Kurzschlussstrom (Dauer 1 s) / A
80 000	50 000	25 000	600 ± 200
63 000	25 000	12 000	
50 000	25 000	12 000	
40 000	25 000	12 000	
31 500	12 000	6 000	
20 000	12 000	6 000	
16 000	6 000	3 000	
10 000	6 000	3 000	
5 000	3 000	1 500	

geprüft werden (ca. 50 % und ca. 25 % von  $I_s$ ) sowie mit einem **niedrigen Kurzschlussstrom** von  $600 \text{ A} \pm 200 \text{ A}$  (Dauer 1 s). Die genormten Ströme sind in der Tabelle zusammengefasst. Die Prüfung ist für die hohen Ströme am längsten Bauglied der Typenreihe durchzuführen, für den niedrigen Strom ist die Baugliedlänge nicht spezifiziert. Der Kurzschluss wird im Falle von Ableitern mit eingeschlossenem Gasvolumen durch einen Zünddraht initiiert, sonst durch gezielte Überlastung des Aktivteils durch Anlegen einer hohen Spannung (tatsächlich ist die Unterscheidung der Ableitertypen für die Kurzschlussprüfung etwas komplizierter, siehe dazu IEC 60099-4). Im ersten Fall muss sich dem Strom ein abklingendes Gleichstromglied derart überlagern, dass der erste Stromsichelwert dem 2,5-fachen des Effektivwertes entspricht (bei  $I_{\text{eff}} = 80 \text{ kA}$  also  $\hat{i} = 200 \text{ kA}$ ). Die Prüfung gilt als erfolgreich bestanden, wenn keine Teile schwerer als 60 g außerhalb der (in der Regel kreisförmigen) Umzäunung, wie in der Abbildung gezeigt, gefunden werden. Weiterhin wird verlangt, dass entstehendes offenes Feuer innerhalb von zwei Minuten von selbst verlöscht.

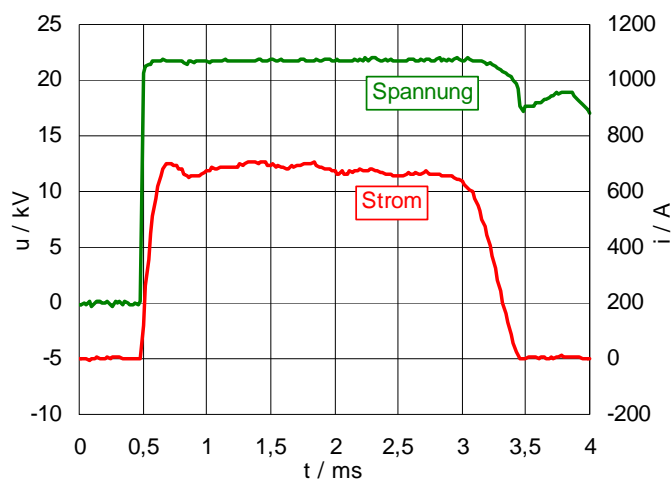
**Langsam ansteigende Überspannung:** Transiente Überspannung, normalerweise unipolar, mit Anstiegszeiten ( $\rightarrow$  [Stirnzeiten](#)) von  $20 \mu\text{s}$  bis  $5000 \mu\text{s}$  und  $\rightarrow$  [Rückenthalbwertzeiten](#) kleiner gleich  $20 \text{ ms}$  (IEC 60071-1, 3.17).



**Langwellenfestigkeit:** Die Langwellenfestigkeit ist kein nach IEC 60099-4 genormter Begriff. Sie wird trotzdem von praktisch allen Herstellern angegeben, da sie ein gutes Maß für das  $\rightarrow$  [Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögen](#) (nach IEC 60099-4 ebenfalls nicht definiert) eines Ableiters darstellt. Es ist allgemein üblich, die Langwellenfestigkeit als einen maximal zulässigen  $\rightarrow$  [Rechteckstoßstrom](#) einer Scheiteldauer von 2 ms oder 2,4 ms anzugeben. Mit diesem Strom werden einzelne MO-Widerstände in Anlehnung an die  $\rightarrow$  [Prüfung mit Rechteckstoßstrom](#) achtzehn mal hintereinander belastet. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Widerstände keine Zeichen von Durchschlag,

Überschlag, Riss oder anderen Beschädigungen zeigen und sich ihre  $\rightarrow$ [Restspannung](#) bei  $\rightarrow$ [Nenn-Ableitstoßstrom](#) um nicht mehr als 5 % verändert hat.

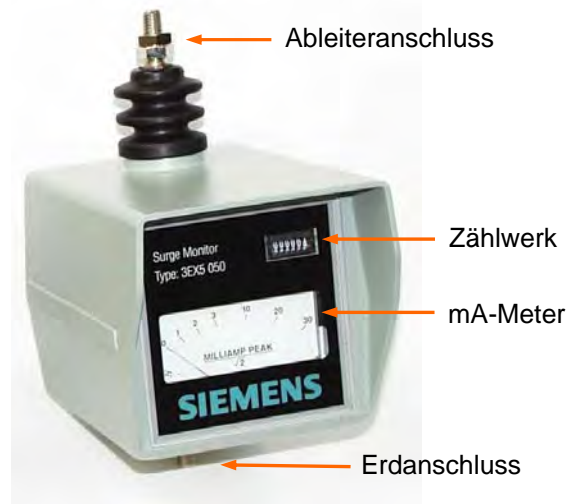
**Langwellenstoßstrom:**  $\rightarrow$ [Stoßstrom](#), der rasch auf einen Höchstwert ansteigt, auf diesem Wert für eine vorgegebene Zeitdauer im Wesentlichen konstant bleibt und dann rasch zu Null abfällt. Kennwerte eines Rechteckstoßstromes sind Polarität, Scheitelwert, Scheiteldauer und Gesamtdauer (IEC 60099-4, 3.18). Rechteckstoßströme werden im Labor für die  $\rightarrow$ [Prüfung mit Rechteckstoßstrom](#) und die  $\rightarrow$ [Arbeitsprüfung mit Rechteckstoßstrom](#) an einzelnen  $\rightarrow$ [MO-Widerständen](#),  $\rightarrow$ [Teilableitern](#) oder Ableitern benötigt. Sie werden üblicherweise durch die Entladung eines aus Kapazitäten und Induktivitäten gebildeten  $\rightarrow$ [Kettenleiters](#) erzeugt. Die Stromamplituden betragen bis zu 2 kA und die Scheiteldauern bis zu einigen Millisekunden. Das folgende Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Rechteckstoßstromprüfung an einem  $\rightarrow$ [Teilableiter](#) bei einem Stromscheitelwert von etwa 700 A und einer Scheiteldauer von 2,4 ms (entspricht der typischen Stromform bei einer  $\rightarrow$ [Leitungsentladungsprüfung](#) der  $\rightarrow$ [Leitungsentladungs-klasse 3](#)):



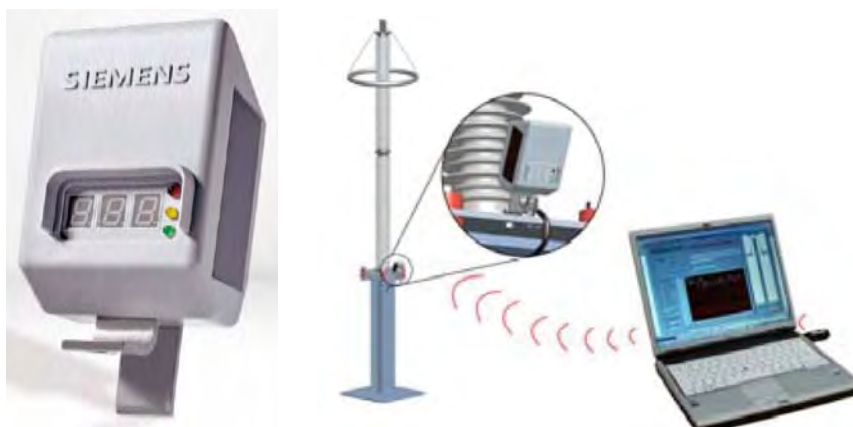
**Leckstrom:** Strom, der bei der dauernd anliegenden betriebsfrequenten Spannung durch den Ableiter fließt. Bei Wechselspannungsbeanspruchung setzt er sich aus einer starken kapazitiven und einer wesentlich kleineren resistiven Komponente zusammen. Der kapazitive Anteil wird außerdem stark durch am Ableiter angreifende Streukapazitäten beeinflusst. Der Scheitelwert des Leckstromes liegt üblicherweise, je nach verwendeten MO-Widerständen und Einbauort des Ableiters, im Bereich von 0,5 mA bis 2 mA.



**Leckstromüberwachungsgerät:** Ein außerhalb des Ableiters angebrachtes Gerät (siehe Abbildung), das den aktuell durch den Ableiter fließenden Leckstrom misst. In der Regel wird der Scheitelwert des Stromes erfasst. Zur Anzeige gebracht wird entweder der Scheitelwert selbst oder über einen Skalierungsfaktor ein scheinbarer Effektivwert. Meistens ist zusätzlich ein → [Ansprechzähler](#) integriert (siehe Bild). Leckstromüberwachungsgeräte liegen in Reihe mit dem Ableiter in der Erdanschlussleitung. Dazu muss der Ableiter mit Hilfe von Isolierfüßen isoliert aufgestellt werden.



Neuere Entwicklungen basieren auf einer Auswertung der dritten Harmonischen im Leckstrom und werten darüber die resistive Komponente aus. Durch eingebaute E-Feld-Sensoren wird der Einfluss der dritten Harmonischen in der Spannung, der die Messung stark verfälschen kann, kompensiert. Die folgende Abbildung zeigt ein solches System, das vor Ort aus Solarstrommodulen versorgt wird, den Leckstrom digital anzeigt und zusätzlich über eine "Ampelfunktion" verfügt ("in Ordnung" – "Warnung" – "Alarm"). Die Messwerte können über eine Funkschnittstelle auf einen USB-Speicherstick übertragen werden, von dem aus eine weitere Auswertung und Archivierung über Computer möglich ist. Weitere Information zur Ableiterüberwachung siehe IEC 60099-5.





**Leistungsableiter:** Ableiter, die im Zuge einer Freileitung parallel zu den Leitungsisolatoren installiert werden und dort Überschläge der Isolatoren verhindern. Leistungsableiter werden vorzugsweise dort eingesetzt, wo es auf Grund fehlenden oder ungenügenden Erdseilschutzes und/oder hoher Masterdungsstoßwiderstände (z.B. bei stark felsigem Untergrund) gehäuft zu [→rückwärtigen Überschlägen](#) kommt. Zur nachträglichen Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit bereits bestehender Übertragungs- oder Verteilungsleitungen ist oft die Installation von Leistungsableitern an allen oder auch nur an einigen Masten eine kostengünstige Alternative zur Verbesserung des Erdseilschutzes oder der Masterdungsverhältnisse. Leistungsableiter werden sowohl in funkenstreckenloser Technik eingesetzt als auch in Verbindung mit einer externen Serienfunkenstrecke, die die Ableiter im Normalbetrieb, gegenüber Schaltüberspannungen oder auch nach einer Überlastung von der Leitung isolieren. Für diese setzen sich die Begriffe [NGLA](#) (non-gapped line arrester) und [EGLA](#) (externally gapped line arrester) durch.

**Leitungsentladungsklasse:** Die Leitungsentladungsklasse ist die einzige in IEC 60099-4 vorgesehene Möglichkeit, das Energieaufnahmevermögen eines Ableiters zu spezifizieren. Es sind 5 Leitungsentladungsklassen (1 bis 5) mit wachsenden Anforderungen an das Energieaufnahmevermögen definiert. Sie unterscheiden sich in den Prüfparametern der [→Leitungsentladungsprüfung](#) (IEC 60099-4, Tabelle 4). In Verbindung mit der [→Schaltstoßrestspannung](#) kann aus der Leitungsentladungsklasse eines Ableiters dessen [→thermisches Energieaufnahmevermögen](#) berechnet werden (siehe IEC 60099-4, Anhang E). Siehe auch [Bild 21](#) mit den zugehörigen Erläuterungen.

**Leitungsentladungsprüfung:** Die Leitungsentladungsprüfung ist eine spezielle Form der [→Prüfung mit Rechteckstoßstrom](#). In dieser Prüfung (IEC 60099-4, 7.4.2) wird ein Ableiter, Teilableiter oder einzelner MO-Widerstand mit insgesamt 18 Rechteckstoßströmen, deren Parameter in IEC 60099-4, Tabelle 4 festgelegt sind, beansprucht. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Widerstände keine Zeichen von Durchschlag, Überschlag, Riss oder anderen Beschädigungen zeigen und sich ihre [→Restspannung](#) bei [→Nenn-Ableitstoßstrom](#) um nicht mehr als 5 % verändert hat.

**LIWV:** HHAbkürzung für "standard rated lightning impulse withstand voltage" (deutsch: [→Bemessungs-Blitzstoßspannung](#)) nach IEC 60071-1. Entspricht dem [→BIL](#) der amerikanischen IEEE-Vorschriften.

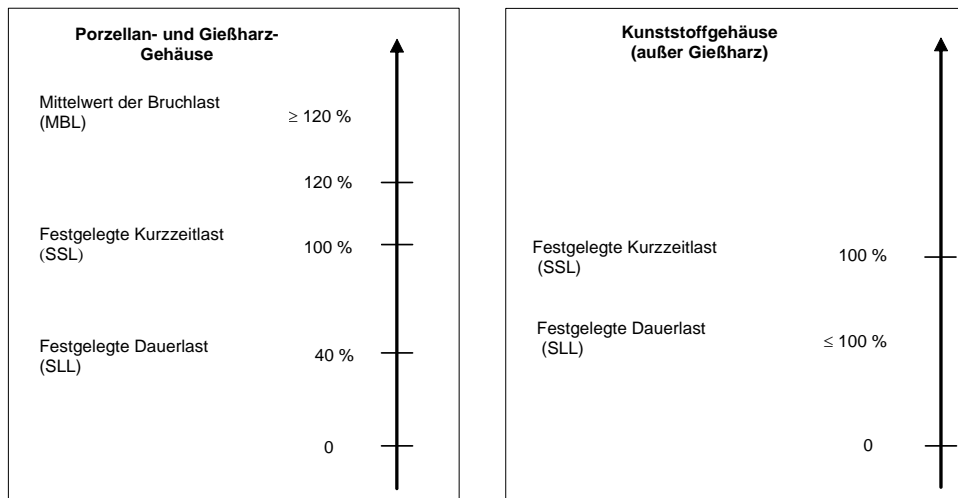
**LR:** [→LSR](#)

**LSR:** (auch: LR) Abkürzung für Liquid Silicone Rubber = Flüssig-Silikon. Eine Silikonart von im Anlieferzustand mittlerer Viskosität, die aus zwei Komponenten zu etwa gleichen Teilen gemischt wird, mit geringen Drücken in Formen gefüllt werden kann und bei Temperaturen von 110 °C bis 200 °C → [vernetzt](#). LSR löst zunehmend das zur Zeit noch weit verbreitete → [RTV-Silikon](#) ab, da es bei ähnlich guten Betriebseigenschaften kostengünstiger in der Beschaffung und in der Verarbeitung ist.

**MBL** → [Mittelwert der Bruchlast](#)

**MCOV:** (Abkürzung für: Maximum Continuous Operating Voltage) Ein nur in der US-amerikanischen Ableitervorschrift IEEE Std C62.11 definierter Begriff: "The maximum designated root-mean-square (rms) value of power frequency voltage that may be applied continuously between the terminals of the arrester". Entspricht der → [Dauer-spannung](#)  $U_c$  nach IEC 60099-4.

**Mechanische LastenH:** Statische und dynamische Lasten sind in IEC 60099-4 wie in der Abbildung gezeigt definiert. Während die gezeigten Festlegungen für Porzellangehäuse heute unumstritten sind, ist dies für die verschiedenen Ausführungsformen kunststoffisolierter Ableiter, bei denen teilweise der Aktivteil fester und mechanisch tragender Bestandteil des Gehäuses ist, nicht der Fall. Es bleibt daher derzeit dem Hersteller überlassen, wie er die Lasten festlegt. In IEC 60099-4 ist in diesem Fall nur definiert, wie der Nachweis der spezifizierten Lasten in der Typprüfung zu erbringen ist. Gießharzgehäuse verhalten sich mechanisch eher wie Porzellangehäuse (d.h. spröde) und werden daher in der Norm genauso behandelt wie diese. → [Festgelegte Dauerlast](#), → [SLL](#), → [Festgelegte Kurzzeitlast](#), → [SSL](#), → [Mittelwert der Bruchlast](#)



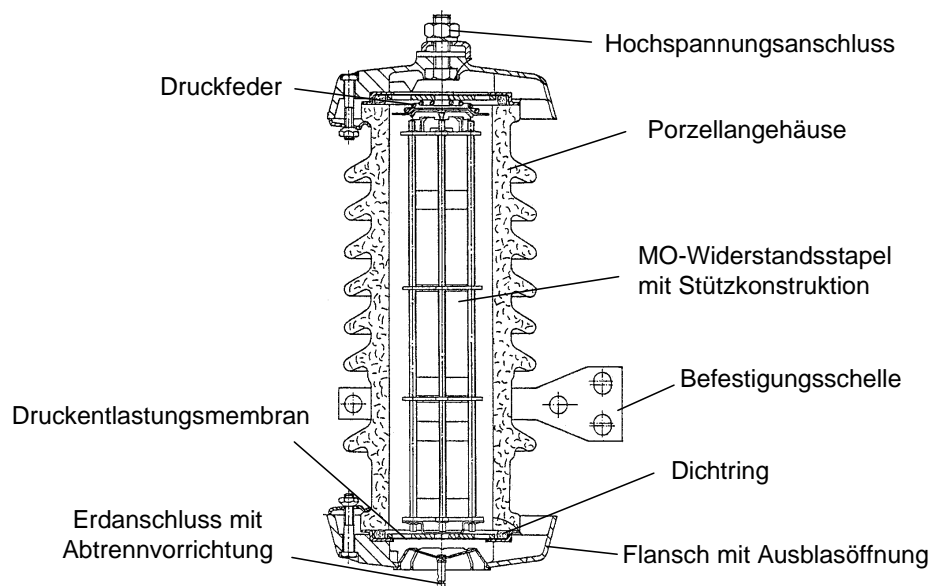
**Metalloxidableiter:** (genauer: Metalloxidableiter ohne Funkenstrecken) Ableiter mit in Reihe und/oder parallelgeschalteten spannungsabhängigen Metalloxidwiderständen ohne innere Reihen- oder Parallelfunkenstrecken (IEC 60099-4, 3.1).

**Metalloxid-Widerstand:** (MO-Widerstand) Widerstand mit extrem nichtlinearer Spannungs-Strom-Kennlinie. Alle heute als Metalloxidwiderstände bezeichneten Widerstände bestehen zu etwa 90 % aus Zinkoxid (ZnO; daher wird für Metalloxidableiter gelegentlich auch der Name ZnO-Ableiter verwendet). Die restlichen 10 % setzen sich aus rund zehn verschiedenen Dotierelementen in Form von Oxiden seltener Erden (Bi, Sb, Co, Mn) zusammen, die mit Anteilen von wenigen ppm bis zu einigen Prozent beigemischt werden. Die Komponenten werden sorgfältig zu Pulver gemahlen, vermischt, aufgeschlämmt, granuliert, zu zylindrischen (teilweise auch toroidförmigen) Körpern verpresst und dann bei Temperaturen bis zu 1200 °C zu einer festen, homogenen Keramik gesintert. Die Stirnseiten werden abschließend plangeschliffen und metallisiert und die Umfangsflächen mit einer Beschichtung (z. B. Glasur) versehen. Die üblichen Abmessungen heute gefertigter Metalloxidwiderstände liegen bei Durchmessern zwischen knapp 30 mm und gut 100 mm, die Höhen betragen maximal ca. 45 mm.

**Mittelwert der Bruchlast:** (mean breaking load, MBL) Mittelwert der durch Versuche ermittelten Bruchlast für Ableiter im Porzellan- oder Gießharzgehäuse. Siehe auch unter →[Mechanische Lasten](#)

**Mindestkriechweg:** Garantierter Kriechweg eines Isolators, in der Regel einige Prozent kleiner als der →[Nennkriechweg](#).

**Mittelspannungsableiter mit Porzellangehäuse:** Werden heute praktisch nicht mehr gefertigt, sind aber noch in großen Mengen im Einsatz. Es finden sich bei ihnen fast alle der allgemein im Zusammenhang mit Ableitern im Porzellangehäuse Textteil dieses



Handbuches genannten Konstruktionselemente wieder, wie die Abbildung zeigt. Obwohl für Mittelspannungsableiter noch weit mehr als für Hochspannungsableiter niedrige Herstellkosten oberstes Gebot sind, müssen auch bei ihnen insbesondere an das Dichtungssystem allerhöchste Ansprüche gestellt werden. Nicht immer stand allerdings auf Grund des enormen Kostendrucks Qualitätsdenken an vorderster Stelle, und Undichtigkeit ist weltweit insbesondere in der Mittelspannung eine häufige Ausfallursache und war eine der treibenden Kräfte für die Umstellung auf Kunststoffgehäuse Mitte der 1980er Jahre (allerdings liegen auch ohne Dichtigkeitsprobleme die Ausfallraten von Mittelspannungsableitern wesentlich über denen der Hochspannungsableiter, weil sie häufiger durch ableiternahe Blitzeinschläge energetisch überlastet werden). Ein Mittelspannungsableiter im Porzellan Gehäuse weist grundsätzlich das gleiche Dichtungssystem auf wie ein Hochspannungsableiter. Es kommen das gleiche Prinzip zur Anwendung und die gleichen Materialien zum Einsatz, und auch für das Überlastverhalten gilt wegen des gleichen Druckentlastungsprinzips das zum Hochspannungsableiter Gesagte. Es gab aber – und gibt sie in den Netzen immer noch – viele Konstruktionen von Mittelspannungsableitern mit Porzellan Gehäuse, die nicht mit einer Druckentlastungseinrichtung versehen sind. Das muss man, wenn nicht schon damals, so doch spätestens heute, als nicht mehr zeitgemäß bezeichnen.

**MO-Ableiter:** → [Metalloxidableiter](#)

**MO-Widerstand:** → [Metalloxid-Widerstand](#)

**Nassgewickeltes GFK-Rohr:** GFK-Rohr, das durch Aufwickeln von kunstharzgetränkten Glasfasern auf einen Kern erzeugt wird. Dieses Herstellungsverfahren bedingt, dass die Glasfasern nur schräg (also beispielsweise nicht exakt in Richtung der Rohrachse, wie es bei → [vakuuminprägnierten GFK-Rohren](#) möglich ist) ausgerichtet werden können. Dadurch bleibt die erreichbare Biegefestigkeit unter den Werten, die sich mit in den Abmessungen vergleichbaren vakuuminprägnierten Rohren bei überwiegender Ausrichtung der Glasfasern in Achsrichtung des Rohres erzielen lassen. Außerdem lassen sich Lufteinschlüsse nicht sicher vermeiden, was bei Betrieb unter extrem hohen elektrischen Feldstärken störend sein kann (Gefahr von inneren Teilentladungen; bei Verwendung der GFK-Rohre für Verbundgehäuse von Freiluftableitern werden diese kritischen Feldstärken jedoch nie erreicht). Nassgewickelte Rohre sind aber einfacher zu fertigen als vakuuminprägnierte Rohre.

**NEMA:** Abkürzung für "National Electrical Manufacturers Association", eine amerikanische Organisation für die Entwicklung von Industriestandards für die Elektroindustrie mit Hauptsitz in Rosslyn, Virginia, USA.

**Nenn-Ableitstoßstrom:** Scheitelwert des → [Blitzstoßstromes](#), nach dem ein Ableiter eingeteilt wird. IEC 60099-4 gibt fünf verschiedene mögliche Nenn-Ableitstoßströme vor: 1,5 kA, 2,5 kA, 5 kA, 10 kA und 20 kA. Bei Mittelspannungsableitern ist der Nenn-Ableitstoßstrom ein direktes Maß für das Energieaufnahmevermögen. Bei Hochspannungsableitern charakterisiert der Nenn-Ableitstoßstrom alleine die Betriebseigenschaften noch nicht. Es müssen zusätzlich weitere Eigenschaften wie die → [Leitungsentladungsklasse](#) herangezogen werden.

**Nennkriechweg:** Der einem Isolator zugeordnete Kriechweg. Durch Fertigungstoleranzen können sich im tatsächlichen Kriechweg Abweichungen von wenigen Prozent nach oben oder unten ergeben. Der garantierte Kriechweg ist der → [Mindestkriechweg](#).

**NGLA:** non-gapped line arrester = funkenstreckenloser → [Leitungsableiter](#). Die zuständige Prüfvorschrift ist IEC 60099-4.

**Niedriger Kurzschlussstrom:** → [Kurzschlussprüfungen](#)

**Nennspannung eines NetzesHH:** ein geeigneter, gerundeter Spannungswert zur Bezeichnung oder Identifizierung eines Netzes (VDE 0111 Teil 1, Absatz 3.8). Siehe auch → [Höchste Betriebsspannung eines Netzes](#), → [Höchste Spannung für ein Betriebsmittel](#).

**NGLA:** (non- gapped line arrester) funkenstreckenloser → [Leitungsableiter](#)

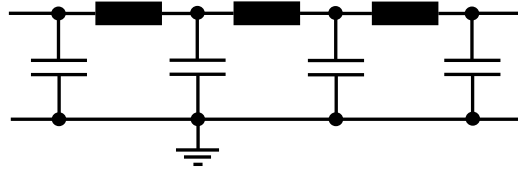
**Normale Betriebsbedingungen:** Nach IEC 60099-4, 5.4.1 gelten die folgenden Bedingungen als normale Betriebsbedingungen:

- Temperatur der umgebenden Luft zwischen  $-40\text{ °C}$  und  $+40\text{ °C}$ ;
- Sonneneinstrahlung  $1,1\text{ kW/m}^2$ ;
- Aufstellungshöhe bis 1000 m über NN;
- Frequenz der Betriebsspannung zwischen 48 Hz und 62 Hz;
- Dauernd anliegende betriebsfrequente Spannung zwischen den Klemmen des Ableiters nicht größer als die Ableiter-Dauerspannung,
- Windgeschwindigkeit  $\leq 34\text{ m/s}$ ,
- senkrechte Aufstellung des Ableiters.

Siehe auch → [Besondere Betriebsbedingungen](#).

**Pi-Glied:** ( $\pi$ -Glied) Als  $\pi$ -Glied wird eine elektrische Schaltung bezeichnet, die aus einem Längselement und einem jeweils davor und dahinter angeordneten Querelement gegen Erde bzw. Masse besteht. Eine (verlustlose) Leitung lässt sich als [Kettenleiter](#)

von  $\pi$ -Gliedern darstellen, deren Längselemente von Induktivitäten und deren Querelemente von Kapazitäten gegen Erde gebildet werden, siehe Abbildung:

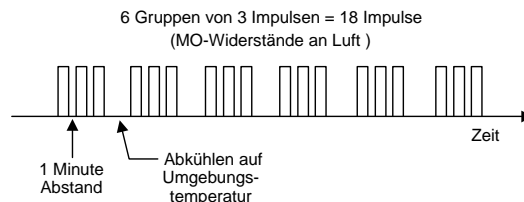


**Portlandzement:** Eine u. a. für Porzellan-Langstab- und Hohlisolatoren zur Befestigung der Metallarmaturen verwendete Zementsorte. Da in Verbindung mit Aluminium Korrosion auftritt, muss bei Verwendung von Aluminiumflanschen vor dem Vergießen eine isolierende Zwischenschicht (z. B. Bitumen) aufgebracht werden. Dies lässt sich durch Verwendung von →[Schwefelzement](#) umgehen.

**Primer:** →[Haftvermittler](#)

**Prüfungen:** →[Typprüfungen](#), →[Stückprüfungen](#), →[Abnahmeprüfungen](#)

**Prüfung mit Rechteckstoßstrom:** (häufig auch Langwellenprüfung genannt) Diese Prüfung nach IEC 60099-4, 8.4.3 dient an sich dem Nachweis des in der IEC-Vorschrift allerdings nicht definierten Einzelimpuls-Energieaufnahmevermögens. Sie wird an einzelnen MO-Widerständen in offener Luft nach dem folgenden Schema durchgeführt:



Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Widerstände keine Zeichen von Durchschlag, Überslag, Riss oder anderen Beschädigungen zeigen und sich ihre →[Restspannung](#) bei →[Nenn-Ableitstoßstrom](#) um nicht mehr als 5 % verändert hat.

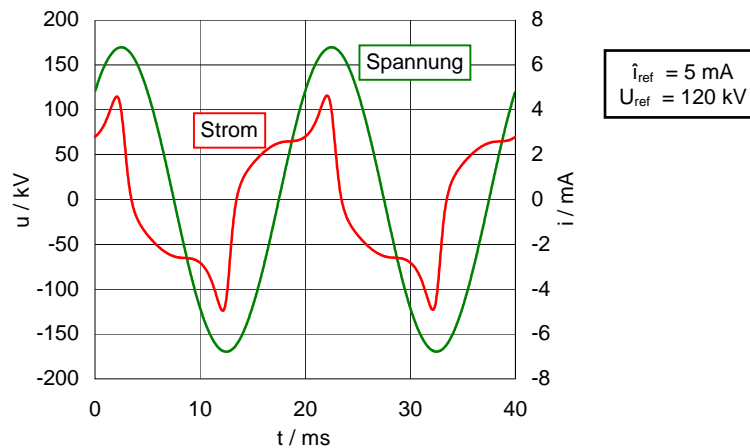
**Quarzporzellan:** Qualität "C 110" nach IEC 60672-3/VDE 0335 Teil 3

**Radio interference voltage:** →[Funkstörspannung](#)

**Rechteckstoßstrom:** →[Langwellenstoßstrom](#)

**Referenzspannung:** (Formelzeichen  $U_{ref}$ ) durch  $\sqrt{2}$  dividierter Scheitelwert der betriebsfrequenten Spannung über den Ableiterklemmen beim Fließen des →[Referenzstromes](#). Die Referenzspannung wird zur Auswahl des richtigen Prüflings in

der Arbeitsprüfung benötigt. In der Stückprüfung wird sie zum einfachen, indirekten Nachweis dafür gebraucht, dass ein Ableiter bzw. ein Ableiterbauglied entsprechend den Restspannungs-Vorgaben gebaut wurde (die jeweiligen Restspannungen und die Referenzspannung stehen in einem festen Verhältnis zueinander). Das Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Referenzspannungsmessung an einem Ableiterbauglied in der Stückprüfung.



**Referenzstrom:** Scheitelwert des betriebsfrequenten Stromes (bei unsymmetrischem Strom der höhere der beiden Scheitelwerte), bei dem die  $\rightarrow$ [Referenzspannung](#) ermittelt wird. Der Referenzstrom wird vom Hersteller für jeden MO-Widerstandstyp festgelegt und liegt im Bereich von etwa 0,5 mA bis 10 mA. Er soll so groß gewählt werden, dass der Scheitelwert eindeutig durch die resistive Komponente im Leckstrom verursacht wird, so dass Beeinflussungen der Referenzspannungsmessung durch Streukapazitäten ausgeschlossen sind. Beispiel für eine Referenzspannungsmessung mit Referenzstrom siehe unter  $\rightarrow$ [Referenzspannung](#).

**Restspannung:** Die zwischen den Klemmen des Ableiters abfallende Spannung bei Einprägen eines  $\rightarrow$ [Stoßstromes](#). Für Stoßströme in Form und Höhe der genormten Prüfstoßströme ( $\rightarrow$ [Blitzstoßstrom](#),  $\rightarrow$ [Schaltstoßstrom](#),  $\rightarrow$ [Steilstoßstrom](#)) entspricht die dabei auftretende Restspannung dem dieser Stromform und -höhe zugeordneten  $\rightarrow$ [Schutzpegel](#).

**RIV:** englisch für "radio interference voltage",  $\rightarrow$ [Funkstörspannung](#)

**Routineprüfungen:**  $\rightarrow$ [Stückprüfungen](#)

**RTV-Silikon:** Raumtemperaturvernetzendes Silikon (englisch: room temperature vulcanizing silicone). Eine im Anlieferungszustand niedrigviskose Silikonart, die aus zwei



Komponenten in stark unterschiedlichen Mengenverhältnissen gemischt wird, anschließend drucklos in Formen gefüllt werden kann und bei Raumtemperatur → [vernetzt](#). Zur Verkürzung der Prozesszeiten in der Fertigung erfolgt das Ausvulkanisieren jedoch üblicherweise bei erhöhten Temperaturen. Wird zunehmend durch → [LSR \(bzw. LR\)](#) abgelöst.

**Rückenhalfwertzeit eines Stoßes ( $T_2$ ):** Zeitspanne zwischen Stoßbeginn und dem Zeitpunkt, in dem die Spannung oder der Strom auf den halben Scheitelwert abgefallen ist. Sie wird in Mikrosekunden angegeben (IEC 60099-4, 3.25).

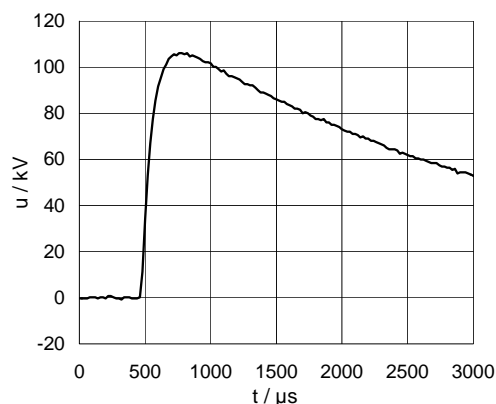
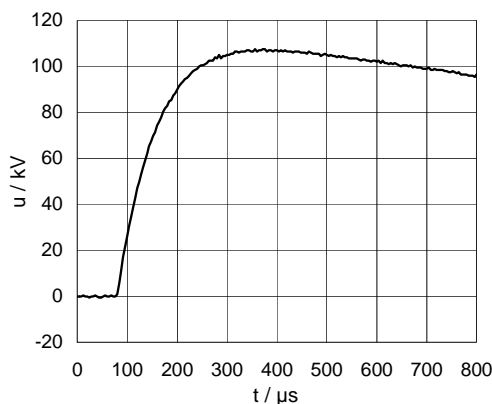
**Rückwärtiger Überschlag:** Überschlag eines Freileitungsisolators aufgrund einer Potentialanhebung des Mastes bei Blitzeinschlag in das Erdseil oder direkt in den Mast. Rückwärtige Überschläge treten insbesondere bei hohen Masterdungsstoßimpedanzen auf, da diese beim Fließen des Blitzableitstromes hohe Spannungsfälle verursachen. Rückwärtige Überschläge können durch Einsatz von → [Leitungsableitern](#) vermieden werden.

**SCD:** → [Spezifischer Kriechweg](#)

**Schaltstoßrestspannung:** → [Restspannung](#) des Ableiters bei → [Schaltstoßstrom](#). Die Schaltstoßströme sind in IEC 60099-4, 8.3.3, Tabelle 4 vorgegeben.

**Schaltstoß-Schutzpegel:** Maximalwert der → [Restspannung](#) des Ableiters beim Fließen der genormten → [Schaltstoßströme](#). Er wird jeweils für zwei verschiedene Stoßstromamplituden im Bereich von 125 A bis 2000 A angegeben (IEC 60099-4, Tabelle 4).

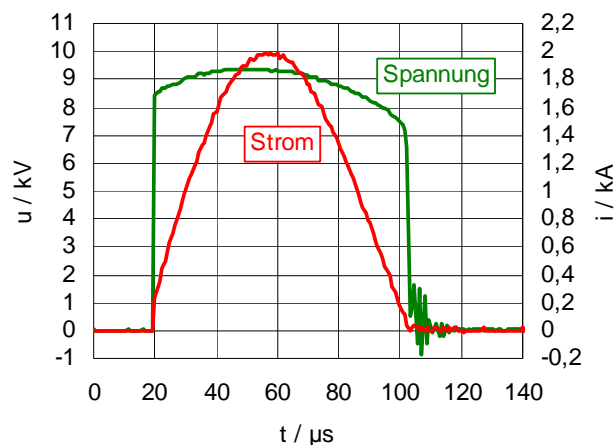
**Schaltstoßspannung:** Eine in IEC 60060-1 genormte Prüfspannung zum Nachweis der dielektrischen Festigkeit gegenüber [langsam ansteigenden Überspannungen](#). Die genormte Schaltstoßspannung 250/2500 weist eine Zeit bis zum Erreichen des Spannungsscheitels von 250  $\mu\text{s}$  und eine [Rückenhalfwertzeit](#) von 2500  $\mu\text{s}$  auf. Die folgenden bei-





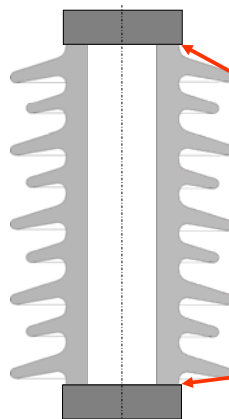
den Oszillogramme zeigen die genormte Schaltstoßspannung in zwei unterschiedlichen zeitlichen Auflösungen:

**Schaltstoßstrom:** Scheitelwert des  $\rightarrow$ [Stoßstroms](#) mit einer Stirnzeit zwischen  $30 \mu\text{s}$  und  $100 \mu\text{s}$  und einer Rückenhalbwertzeit von etwa zweifacher Stirnzeit (IEC 60099-4, 3.32). Schaltstoßströme werden im Labor zur Ermittlung der  $\rightarrow$ [Spannungs-Strom-Kennlinie](#) von Ableitern,  $\rightarrow$ [Teilableitern](#) oder  $\rightarrow$ [MO-Widerständen](#) benötigt. Sie werden durch die Entladung eines Kondensators in einem aperiodisch gedämpften RLC-Schwingkreis erzeugt. Die Stromamplituden liegen im Bereich von  $125 \text{ A}$  bis zu  $2 \text{ kA}$  (siehe IEC 60099-4, Tabelle 4). Das folgende Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Restspannungsmessung an einem MO-Widerstand bei einem Schaltstoßstrom von  $2 \text{ kA}$ :



**Schaltüberspannung:** Kurzzeitige Überspannung verursacht durch Ausgleichsvorgänge auf Grund von Schalthandlungen oder Netzfehlern (Erdschluss, induktives und kapazitives Schalten, Lastabwurf, Ferroresonanz etc.). Die Frequenz liegt im Bereich von  $100 \text{ Hz}$  bis  $10 \text{ kHz}$ , und es treten Stirnzeiten in der Größenordnung von  $30 \mu\text{s}$  bis  $3000 \mu\text{s}$  auf. Die Spannungshöhe kann je nach Netznominalspannung Werte zwischen 2 p.u. und 3 p.u. annehmen ( $1 \text{ p.u.} = \sqrt{2} \cdot U_s / \sqrt{3}$ ). Schaltüberspannungen gehören meist zur Klasse der  $\rightarrow$ [Langsam ansteigenden Überspannungen](#) nach IEC 60071-1.

**Schlagweite:** Die Schlagweite eines Isolators ist die kürzeste Verbindung ("mit einem gespannten Faden gemessen", daher auch gelegentlich "Fadenmaß" genannt) zwischen seinen metallischen Endarmaturen (rote Linie im Bild). Siehe auch  $\rightarrow$  [Kriechweg](#)



**Schnell ansteigende Überspannung:** Transiente Überspannung, normalerweise unipolar, mit Anstiegszeiten ( $\rightarrow$ [Stirnzeiten](#)) von 0,1  $\mu\text{s}$  bis 20  $\mu\text{s}$  und  $\rightarrow$ [Rückenhalfwertzeiten](#) kleiner 300  $\mu\text{s}$  (IEC 60071-1, 3.17).

**Schutzbereich eines Ableiters:** Grundsätzlich hat ein Ableiter einen begrenzten räumlichen Schutzbereich von nur wenigen Metern bis zu einigen zehn Metern. Der Schutzbereich ist dabei definiert als der größtmögliche Abstand zu dem zu schützenden Gerät, für den die sich aus der Isolationskoordination ergebenden Anforderungen für einen gegebenen Ableiterschutzpegel und eine gegebene  $\rightarrow$ [Koordinationsstehspannung](#) noch erfüllt sind (IEC 60099-5, 4.3.1). Ableiter sollten daher so dicht wie möglich an dem zu schützenden Betriebsmittel aufgestellt werden. Da sich  $\rightarrow$ [schnell ansteigende Überspannungen](#) in Form von  $\rightarrow$ [Wanderwellen](#) auf der Leitung ausbreiten, kann die Spannung an den Anschlussklemmen des zu schützenden Betriebsmittels wesentlich höhere Werte annehmen als den der Restspannung des zugeordneten Ableiters. Der Ableiter wird mit einer zeitlichen Verzögerung "wirksam", die von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wanderwelle und dem räumlichen Abstand, also der Laufzeit zwischen Ableiter und zu schützendem Betriebsmittel, abhängt. Ganz entscheidenden Einfluss hat auch die Steilheit der Überspannung. Im allgemeinen müssen Schutzpegel und Einbauort des Ableiters so aufeinander abgestimmt werden, dass am zu schützenden Betriebsmittel der Wert der  $\rightarrow$ [Koordinationsstehspannung](#) nicht überschritten wird. Einzelheiten zur Vorgehensweise siehe IEC 60099-5, 60071-1 und 60071-2. Für die einfache Anordnung eines am Ende einer Stickleitung angeschlossenen Transformators lässt sich der räumliche Schutzbereich der zugeordneten Ableiter nach folgender Faustformel abschätzen:

$$x_s = \frac{\frac{\text{LIWV}}{1,15} - u_{pl}}{2 \cdot s} \cdot v$$

mit  $x_s$  räumlicher Schutzbereich in m

LIWV Bemessungsblitzstoßspannung des zu schützenden Betriebsmittels in kV

$u_{pl}$  Blitzstoßschutzpegel des Ableiters in kV

$s$  Steilheit der Blitzüberspannung in kV/ $\mu\text{s}$  (typischer Wert: 1000 kV/ $\mu\text{s}$ )

$v$   $\rightarrow$ [Ausbreitungsgeschwindigkeit](#) einer Wanderwelle in m/ $\mu\text{s}$

(Freileitung:  $v = c_0$  (Lichtgeschwindigkeit) = 300 m/ $\mu\text{s}$ ;

Kabel:  $v \approx 150 \dots 210$  m/ $\mu\text{s}$ )

Danach ergibt sich bei Anschluss über eine Freileitung überschlagsmäßig für das direkt geerdete 420-kV-Netz (LIWV = 1425 kV,  $u_{pl} \approx 800$  kV) ein maximaler Schutzbereich von etwa 67 m, für das 24-kV-Mittelspannungsnetz mit Erdschlusskompensation

(LIWV = 125 kV,  $u_{pl} = 80$  kV) dagegen ein solcher von nur gut 4 m! Siehe auch [Bild 5](#) mit dem zugehörigen Beispiel.

**Schutzpegel:** Maximalwert der  $\rightarrow$ [Restspannung](#) des Ableiters beim Fließen eines genormten  $\rightarrow$ [Stoßstromes](#). Dabei wird unterschieden zwischen dem  $\rightarrow$ [Blitzstoß-Schutzpegel](#), dem  $\rightarrow$ [Schaltstoß-Schutzpegel](#) und dem  $\rightarrow$ [Steilstoß-Schutzpegel](#).

**Schwefelzement:** Eine Zementart, die unter anderem zum Aufkitten metallischer Flansche auf Porzellanisolatoren verwendet wird. Schwefelzement besteht zu etwa 65% aus hochreinem Schwefel und zu etwa 35% aus mineralischen Füllstoffen. Er wird bei Temperaturen von etwa 140 °C vergossen und erstarrt unmittelbar nach dem Verguss bei Unterschreiten einer Temperatur von etwa 120 °C. Vorteil des Schwefelzements gegenüber dem auch eingesetzten  $\rightarrow$ [Portlandzement](#) ist, dass er problemlos mit Aluminium in Verbindung gebracht werden kann. Nachteilig ist, dass sich seine Festigkeit bei Temperaturen oberhalb 90 °C zu mindern beginnt. Da diese Temperaturen an Ableiterflanschen aber nicht erreicht werden, kommt Schwefelzement an Ableitern häufig zum Einsatz.

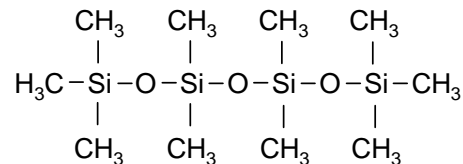
**SiC-Widerstand:**  $\rightarrow$ [Siliziumkarbid-Widerstand](#)

**Sicherheitsfaktor  $K_s$ :** Ein Faktor, mit dem die  $\rightarrow$ [Koordinationsstehspannung](#) zu multiplizieren ist, um die erforderliche  $\rightarrow$ [Stehspannung](#) eines Betriebsmittels zu erhalten. Vereinfacht gesagt muss für jedes Betriebsmittel sichergestellt sein, dass an seinen Klemmen keine Spannungen auftreten, die höher sind als dessen Bemessungsspannungen, dividiert durch den Sicherheitsfaktor  $K_s$ . Ableiter schützen meist nicht-selbstheilende Isolation. Für diese gilt  $K_s = 1,15$ . Damit sind beispielsweise in einem Netz mit  $U_s = 420$  kV zum Überspannungsschutz eines Transformators mit einer Bemessungsblitzstoßspannung von 1425 kV der Blitzstoßschutzpegel und der Aufstellungsort des Ableiters so zu wählen, dass an der Transformatordurchführung ein Wert einer Blitzüberspannung von  $1425 \text{ kV} / 1,15 = 1239 \text{ kV}$  nicht überschritten wird. Zur genauen Definition der genannten Begriffe und ihrer Bedeutung und Ermittlung bei der Vorgehensweise zur Isolationskoordination siehe IEC 60071-1 und 60071-2.

**SILHH:** Abkürzung für "basic switching impulse insulation level". Obwohl dieser Begriff häufig auch dann verwendet wird, wenn im Übrigen auf  $\rightarrow$ [IEC](#)-Vorschriften Bezug genommen wird, handelt es sich um einen ausschließlich bei  $\rightarrow$ [IEEE](#) und  $\rightarrow$ [ANSI](#) definierten Begriff (siehe Vorschriften IEEE Std 1313.1, IEEE Std C62.2, IEEE Std C62.22, ANSI C92.1). In der IEC-Vorschrift 60071-1 wird stattdessen der

Begriff "standard rated switching impulse withstand voltage" → [SIWV](#) verwendet, in der deutschen Übersetzung → [Bemessungs-Schaltstoßspannung](#).

**Silikongummi:** (englisch: silicone rubber, chemisch korrekte Abkürzung SI oder auch – je nach Ausführung – MQ, VMQ, PMQ, PVMQ, in der Literatur häufig einfach: SIR). Charakteristisch für Silikongummi ist das Si-O-Si-O-Grundgerüst mit den daran angehängten Methylgruppen (CH<sub>3</sub>):



Füllstoffe wie Aluminiumtrihydrat (ATH) oder spezielle Additive bewirken die für Anwendungen in der Hochspannungstechnik erforderliche Lichtbogen- und Kriechstrombeständigkeit. Neben einigen sehr vorteilhaften Eigenschaften wie hohe Elastizität und Reißfestigkeit, hohe Temperaturbeständigkeit (problemlos einsetzbar im Temperaturbereich von -45 °C bis +180 °C), Schwerbrennbarkeit (bei Brandeinwirkung bleibt zudem nur isolierende Kieselsäure zurück) und hohe elektrische Durchschlagfestigkeit ist die bemerkenswerteste Eigenschaft von Silikongummi die Hydrophobie: Wasser perlt von Silikon-Oberflächen einfach ab. Diese Eigenschaft überträgt sich auch auf Fremdschichtbeläge, womit Silikon-Isolatoren selbst in stark verschmutztem Zustand wasserabweisend wirken und so den damit isolierten Geräten besonders gute Betriebseigenschaften unter Fremdschichtbedingungen verleihen. Zwar kann sich die Hydrophobie unter länger anhaltender Einwirkung von Feuchtigkeit oder elektrischen Oberflächenentladungen verschlechtern, jedoch kehrt sie nach Fortfall dieser Einflüsse grundsätzlich nach kurzer Zeit (wenige Stunden bis Tage) wieder auf ihr ursprüngliches Maß zurück – ein Mechanismus, der nach heutigen Erkenntnissen zeitlich unbegrenzt wirkt. Silikongummi wird in drei unterschiedlichen Grundformen verarbeitet: → [HTV-Silikon](#), → [RTV-Silikon](#) und → [LSR bzw. LR](#).

**Siliziumkarbid-Widerstand:** (SiC-Widerstand) Nichtlinearer Widerstand, wie er vor Einführung der → [Metalloxidwiderstände](#) als Ableitwiderstand in Ableitern eingesetzt wurde. Die Nichtlinearität ist wesentlich schwächer ausgeprägt als bei einem Metalloxidwiderstand. Deshalb benötigen Ableiter mit Siliziumkarbid-Widerständen Serienfunkenstrecken, die den Ableiter im Dauerbetrieb von der Leitung trennen und nach einem Ableitvorgang den netzfrequenten Folgestrom durch den Ableiter löschen ("Löschfunkenstrecken").

**SIR:** → [Silikongummi](#)

**SIWV:** Abkürzung für "standard rated switching impulse withstand voltage" (deutsch: →[Bemessungs-Schaltstoßspannung](#)) nach IEC 60071-1. Entspricht dem →[SIL](#) der amerikanischen IEEE-Vorschriften.

**SLL:** Specified long-term load (Deutsch: festgelegte Dauerlast) Entsprechend der Definition in IEC 60099-4 eine Kraft rechtwinklig zur Längsachse eines Ableiters, die im Betrieb dauernd anliegen darf, ohne irgendeine mechanische Beschädigung des Ableiters hervorzurufen. Im Gegensatz dazu →[SSL](#). Siehe auch unter →[Mechanische Lasten](#)

**Spannungs-Strom-Kennlinie:** (auch:  $U$ - $I$ -Kennlinie) Darstellung der Spannung an den Ableiterklemmen in Abhängigkeit vom Strom. Auf der Ordinate sind üblicherweise Spannungsscheitelwerte aufgetragen, häufig in auf den →[Blitzstoß-Schutzpegel](#) bezogenen Werten. Die Abszisse gibt Stromscheitelwerte (im Bereich betriebsfrequenter Ströme nur die resistive Komponente) an, in logarithmischer Darstellung und über einen Bereich von mehreren Zehnerpotenzen (z. B. von 10  $\mu$ A bis 100 kA). Beispiel für eine Spannungs-Strom-Kennlinie: Teil 1, [Bild 2](#).

**Spannungs-Zeit-Kennlinie:** (auch:  $U$ - $t$ -Kennlinie) Darstellung am Ableiter anliegender zulässiger betriebsfrequenter Spannungen in Abhängigkeit von der erlaubten Beanspruchungsdauer. Die Spannung wird als auf die Dauer- oder Bemessungsspannung bezogener Effektivwert angegeben. Die Zeitachse ist logarithmisch eingeteilt und erstreckt sich beispielsweise über einen Zeitbereich von 100 ms bis 1000 s. Beispiel für eine Spannungs-Zeit-Kennlinie: Teil 1, [Bild 20](#).

**Spezifischer Kriechweg:** (SCD; specific creepage distance) Auf den Wert der →[Höchsten Betriebsspannung für ein Betriebsmittel](#),  $U_m$  (verkettete Spannung!), bezogener →[Kriechweg](#) eines Isolators, angegeben in mm/kV. Ein Isolator mit einem Kriechweg von 10 500 mm für den Einsatz in einem 420-kV-Netz hat demnach einen spezifischen Kriechweg von 25 mm/kV. In der IEC 60815, Ed. 1 von 1986 wurde Bezug auf den spezifischen Kriechweg genommen. Die im Jahr 2008 neu erschienene Reihe IEC60815-1, -2 und -3 definiert und verwendet dagegen den →[vereinheitlichten spezifischen Kriechweg](#), der nicht mehr die verkettete sondern die Leiter-Erd-Spannung als Bezugswert verwendet. Der Beispielableiter hat danach einen *vereinheitlichten* spezifischen Kriechweg von 43,3 mm/kV. Der spezifische Kriechweg wird entsprechend der vorliegenden →[Fremdschichtklasse](#) ausgewählt.

**SSL:** Specified short-term load (Deutsch: festgelegte Kurzzeitlast). Entsprechend der Definition in IEC 60099-4 die größte Kraft rechtwinklig zur Längsachse eines Ableiters, die im Betrieb kurzzeitig und bei relativ seltenen Ereignissen anliegen darf (z. B.

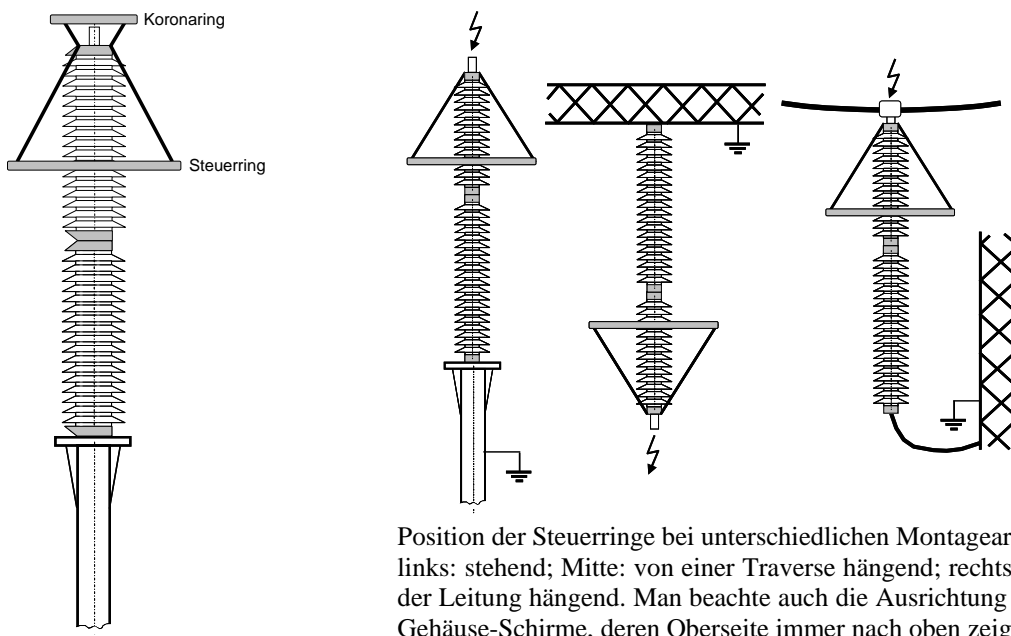
Kurzschlussstromkräfte, sehr hohe Windlasten oder Erdbebenbeanspruchungen), ohne irgendeine mechanische Beschädigung des Ableiters hervorzurufen. Für Erdbebenbeanspruchungen müssen ggf. höhere Lasten als SSL berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu → [SLL](#). Siehe auch unter → [Mechanische Lasten](#)

**Standard rated lightning impulse withstand voltage:** → [Bemessungs-Blitzstoßspannung](#)

**Standard rated switching impulse withstand voltage:** → [Bemessungs-Schaltstoßspannung](#)

**Stehspannung:** Wert der Prüfspannung, der unter bestimmten Bedingungen bei einer Stehspannungsprüfung angelegt wird, bei der eine festgelegte Anzahl von Durchschlägen toleriert wird (IEC 60071-1, 3.23; dort auch weitere Einzelheiten).

**SteuerringHH:** Steuerringe werden ab einer Ableiterlänge von eineinhalb bis zwei Metern und grundsätzlich bei mehrteiligen Ableitern eingesetzt. Sie sind vom hochspannungsseitigen Flansch etwa über ein Viertel der Ableiterlänge in Richtung des erdseitigen Endes ausgerichtet und dienen dazu, die durch am Ableiter angreifende Erdkapazitäten ungünstig beeinflusste Aufteilung der Spannung entlang des Ableiters vom hochspannungsseitigen bis zum erdseitigen Ende zu vergleichmäßigen. Ohne ihn würden die MO-Widerstände am hochspannungsseitigen Ende des Ableiters wesentlich höher beansprucht als die am erdseitigen Ende, was zu einer ggf. unzulässig starken Erwärmung des Aktivteils in diesem Bereich führen würde. Bei hängender Montage des Ableiters ergeben sich unterschiedliche Positionen des Steuerrings, z.B. bei einem an

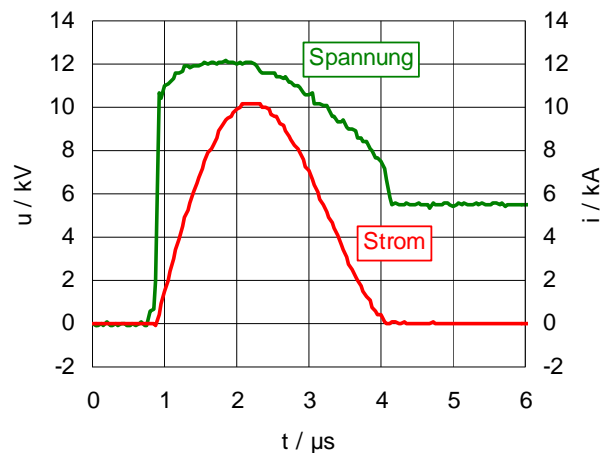


Position der Steuerringe bei unterschiedlichen Montagearten links: stehend; Mitte: von einer Traverse hängend; rechts: in der Leitung hängend. Man beachte auch die Ausrichtung der Gehäuse-Schirme, deren Oberseite immer nach oben zeigt.

einer Masttraverse oder in einem Portal installierten Ableiter im Vergleich zu einem direkt in der Leitung hängenden → [Leitungsableiter](#), siehe dazu die Abbildung. Ein Steuerring ist nicht zu verwechseln mit einem → [Koronaring](#), der nur der elektrostatischen Abschirmung des hochspannungsseitigen Anschlusses zur Reduzierung der → [Funkstörspannung](#) dient.

**Steilstoß-Schutzpegel:** Maximalwert der → [Restspannung](#) des Ableiters beim Fließen eines → [Steilstoßstromes](#) von der Höhe des → [Nennableitstoßstromes](#).

**Steilstoßstrom:** → [Stoßstrom](#) mit einer → [Stirnzeit](#) zwischen  $0,9 \mu\text{s}$  und  $1,1 \mu\text{s}$  und einer → [Rückenhalfwertzeit](#) von nicht mehr als  $20 \mu\text{s}$  (IEC 60099-4, 3.16). Steilstoßströme werden im Labor zur Ermittlung der → [Spannungs-Strom-Kennlinie](#) von Ableitern, → [Teilableitern](#) oder → [MO-Widerständen](#) benötigt. Sie werden in einem induktivitätsarmen Aufbau durch die praktisch ungedämpfte Entladung eines Kondensators in den Prüfling erzeugt. Die Stromamplituden liegen im Bereich von  $1,5 \text{ kA}$  bis zu  $20 \text{ kA}$ . Das abgebildete Oszillogramm zeigt ein Beispiel für eine Restspannungsmessung an einem MO-Widerstand bei einem Steilstoßstrom von  $10 \text{ kA}$ :



**Sternpunktbehandlung des Netzes:** Netze der elektrischen Energieübertragung und -verteilung werden nach der Art der Sternpunktbehandlung unterschieden in solche mit → [isoliertem Sternpunkt](#), → [direkter Sternpunkterdung](#), → [Impedanz-Sternpunkterdung](#) und → [Erdschlusskompensation](#).

**Stirnzeit eines Stoßstromes ( $T_1$ ):** Zeit in Mikrosekunden, festgelegt als das 1,25-fache der Zeitspanne zwischen den Augenblicken, in denen der Stoßstrom 10% und 90% seines Scheitelwertes erreicht (IEC 60099-4, 3.23)



**Stoßstrom:** Unipolarer Stromimpuls, der idealerweise schnell auf einen Scheitelwert ansteigt und dann – in der Regel langsamer – wieder auf den Wert Null abfällt. Sein zeitlicher Verlauf wird gekennzeichnet durch die →[Stirnzeit](#)  $T_1$  und die →[Rückenhalfwertzeit](#)  $T_2$  in Mikrosekunden (Ausnahme: →[Rechteckstoßstrom](#), der durch Polarität, Scheitelwert, Scheiteldauer und Gesamtdauer charakterisiert ist). Die Darstellungsweise ist  $T_1/T_2$  ohne Angabe der Zeiteinheit. Beispielsweise wird der →[Blitzstoßstrom](#) ( $T_1 = 8 \mu\text{s}$ ,  $T_2 = 20 \mu\text{s}$ ) als ein Strom der Form 8/20 beschrieben.

**Stückprüfungen:** Nach IEC 60099-4 sind an MO-Ableitern ohne Funkenstrecken mindestens folgende Stückprüfungen durchzuführen:

- Messung der →[Referenzspannung](#)
- Prüfung der →[Restspannung](#) (am kompletten Ableiter, an den einzelnen →[Baugliedern](#) oder an den einzelnen MO-Widerständen)
- →[Teilentladungsprüfung](#)
- Dichtigkeitsprüfung
- Stromaufteilungsprüfung (nur bei mehrsäuligen Ableitern)

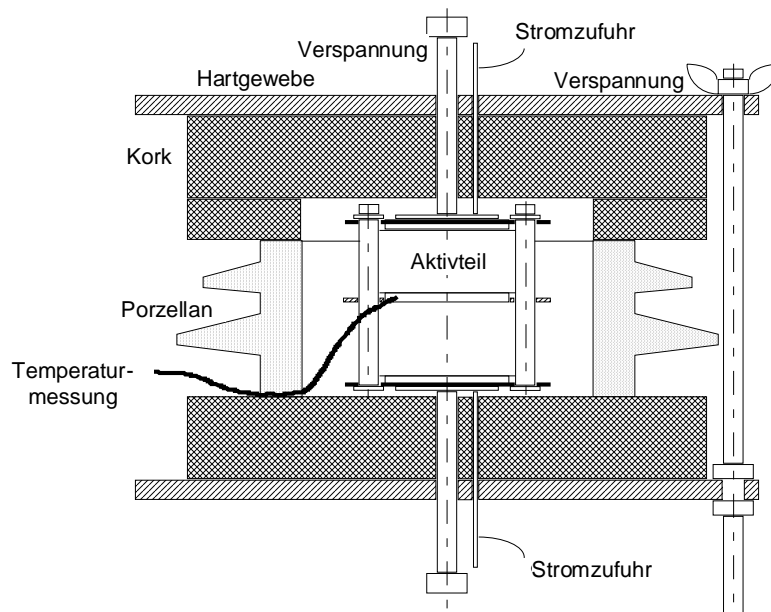
**Teilableiter:** Ein Teil eines Ableiters, der für eine bestimmte Prüfung das Verhalten des ganzen Ableiters nachbildet. Ein Teilableiter muss nicht ein →[Ableiter-Bauglied](#) sein. (IEC 60099-4, 3.5). Ein Beispiel für einen Teilableiter ist das →[thermische Äquivalent](#).

**Teilentladungsprüfung:** Diese Prüfung weist nach, dass bei anliegender 1,05facher →[Dauerspannung](#) der Ableiter ausreichend frei von Teilentladungen im Inneren ist. "Ausreichend frei" bedeutet nach IEC 60099-4 einen Teilentladungspegel  $\leq 10 \text{ pC}$ . Die Teilentladungsprüfung ist Teil der →[Typprüfungen](#) und gehört zu den wichtigsten →[Stückprüfungen](#). Sie ist außerdem als →[Abnahmeprüfung](#) definiert.

**Temporäre Überspannung:** →[Zeitweilige Überspannung](#)

**Thermisches Äquivalent:** Ein in den →[Arbeitsprüfungen](#) verwendeter →[Teilableiter](#), der das elektrische und thermische Verhalten eines vollständigen Ableiters nachbildet. Die Anforderungen sind in IEC 60099-4, 8.5.3.2 festgelegt (allerdings nicht ganz widerspruchsfrei). Im Prinzip ist ein thermisches Äquivalent ein Ausschnitt des Original-Ableiters, der an seinen Enden so gut thermisch isoliert ist, dass die Wärme überwiegend in radialer Richtung abgegeben wird. Die Abbildung zeigt ein Ausführungsbeispiel für einen porzellanisolierten Hochspannungsableiter:





**Thermisches Energieaufnahmevermögen:** Energie, die maximal vom Ableiter in Form mehrerer, kurz aufeinanderfolgender Ableitvorgänge aufgenommen werden kann, ohne dass er →[thermisch instabil](#) wird (siehe auch [Bild 7](#)). Das thermische Energieaufnahmevermögen ist größer als das →[Einzelpuls-Energieaufnahmevermögen](#). Wie dieses ist es allerdings in den IEC-Vorschriften nicht definiert und wird deshalb nicht von jedem Hersteller angegeben, und wenn, dann häufig unter unterschiedlichen Randbedingungen. Sinnvoll ist es, die →[Arbeitsprüfung](#) als Randbedingung zu definieren. Dann ist das thermische Energieaufnahmevermögen diejenige Energie, die maximal im Rahmen und unter den Bedingungen einer Arbeitsprüfung in den Ableiter eingebracht werden kann. Nach IEC 60099-4 ist das Energieaufnahmevermögen nur über die →[Leitungsentladungsklasse](#) definiert.

**Thermisches Instabilwerden:** Verhalten eines Ableiters, der durch unzulässig hohe Energieeinbringung bis über seine →[thermische Stabilitätsgrenze](#) (siehe [Bild 7](#)) hinaus erwärmt wurde und anschließend an betriebsfrequenter Spannung liegt. Der Ableiter heizt sich durch den dann fließenden, stark erhöhten Leckstrom bis zur Selbstzerstörung auf, falls er nicht rechtzeitig freigeschaltet wird.

**Thermische Stabilitätsgrenze:** Höchste Temperatur der MO-Widerstände, von der aus ein Ableiter bei anliegender betriebsfrequenter Spannung und der maximalen noch zu den →[normalen Betriebsbedingungen](#) zählenden Umgebungstemperatur von +40 °C wieder auf seine normale Betriebstemperatur abkühlen kann. Siehe auch [Bild 7](#) mit den zugehörigen Erläuterungen. Die thermische Stabilitätsgrenze liegt, je nach Ableiterausführung, bei Werten von ca. 190 °C bis 220 °C.

**Tonerde-Porzellan:** (auch: Aluminiumoxid-Porzellan) Qualität "C 120" nach IEC 60672-3/VDE 0335 Teil 3

**TOV:** Abkürzung für temporary overvoltage, → [Zeitweilige Überspannung](#)

**Typprüfungen:** Nach IEC 60099-4 sind an MO-Ableitern ohne Funkenstrecken folgende Typprüfungen durchzuführen:

- Spannungsprüfungen der Ableitergehäuse (Stehspannungen)
- → [Restspannungsprüfungen](#)
- → [Rechteckstoßstromprüfungen](#)
- → [Arbeitsprüfungen](#)
- → [Kurzschlussprüfungen](#)
- Prüfung unter Fremdschichtbedingungen (nach Anhang F von IEC 60099-4)
- Dichtigkeitsprüfung
- Stromaufteilungsprüfung (nur bei mehrsäuligen Ableitern)
- Mechanische Prüfungen

$U_c$ : → [Dauerspannung eines Ableiters](#)

$U_m$ : → [Höchste Spannung für ein Betriebsmittel](#)

$U_n$ : → [Nennspannung eines Netzes](#)

$U_s$ : → [Höchste Betriebsspannung eines Netzes](#)

$U_r$ : → [Bemessungsspannung eines Ableiters](#)

$U_{ref}$ : → [Referenzspannung](#)

**USCD:** → [Vereinheitlicher spezifischer Kriechweg](#)

**$U$ - $I$ -Kennlinie:** → [Spannungs-Strom-Kennlinie](#)

**$U$ - $t$ -Kennlinie:** → [Spannungs-Zeit-Kennlinie](#)

**Vakuumimprägniertes GFK-Rohr:** Ausführung eines GFK-Rohres, das durch Tränken der vorher gewickelten Glasfaserstruktur in Kunstharz unter Vakuum hergestellt wird. Vorteil dieses Herstellungsverfahrens ist die erzielbare Freiheit von Lufteinschlüssen (dadurch kein Auftreten von inneren Teilentladungen auch unter höchsten elektrischen Feldstärken) sowie die hohe erreichbare Biegefestigkeit bei überwiegender Ausrichtung der Glasfasern in Achsrichtung des Rohres. Die Herstellung ist aber aufwendiger als die → [nassgewickelter Rohre](#).

**Vereinheitlichter spezifischer Kriechweg:** (USCD, unified specific creepage distance) Auf den Wert der höchsten über dem Isolator anliegenden Betriebsspannung, d.h. der → [Höchsten Betriebsspannung für ein Betriebsmittel](#) dividiert durch Wurzel aus drei ( $U_m/\sqrt{3}$ ) bezogener → [Kriechweg](#) eines Isolators, angegeben in mm/kV. Ein Isolator mit einem Kriechweg von 10 500 mm für den Einsatz in einem 420-kV-Netz hat demnach einen vereinheitlichten spezifischen Kriechweg von 43,3 mm/kV. In der IEC 60815, Ed. 1 von 1986 wurde noch Bezug auf den → [spezifischen Kriechweg](#) genommen, der die verkettete Spannung als Bezugswert verwendet und sich somit um den Faktor  $\sqrt{3}$  vom vereinheitlichten spezifischen Kriechweg unterscheidet. Der vereinheitlichte spezifische Kriechweg wurde im Jahr 2008 mit der neu erschienenen Reihe IEC60815-1, -2 und -3 eingeführt. Der vereinheitlichte spezifische Kriechweg wird entsprechend der vorliegenden → [Fremdschichtklasse](#) ausgewählt.

**Verbund-Hohlisolator:** (englisch: composite hollow insulator) Ein aus einem GFK-Rohr mit aufgebrachtener Kunststoffbeschirmung aufgebauter Hohlisolator. Das GFK-Rohr kann → [nassgewickelt](#) oder → [vakuuminprägniert](#) ausgeführt sein. Die Beschirmung besteht praktisch ausnahmslos aus → [Silikongummi](#). Unterschiede bestehen in der Art der Aufbringung: → [Aufschiebetechnik](#), → [Direktumguss](#).

**Verminderter Kurzschlussstrom:** → [Kurzschlussprüfungen](#)

**Vernetzen:** (auch: vulkanisieren) Verknüpfung der individuellen fadenförmigen Moleküle eines Polymerwerkstoffes zu einem dreidimensionalen Netzwerk. In den Materialbezeichnungen ist ein vernetztes Material oft durch den Zusatz "V" gekennzeichnet (Beispiel: das thermoplastische Polyethylen (PE) wird zu thermoelastischem vernetztem Polyethylen (VPE)).

**Vulkanisieren:** → [Vernetzen](#)

**Wanderwellen:** Spannungs- und Stromimpulse, deren Anstiegszeit oder gesamtes zeitliches Auftreten kürzer ist als die Ausbreitungszeit einer elektromagnetischen Welle auf der Leitung (man spricht dann von einer "elektrisch langen Leitung"), breiten sich als Wanderwellen auf der Leitung aus. Sie spielen daher immer im Fall schnell ansteigender Überspannungen (häufigste Ursache: Blitzüberspannungen) eine Rolle, praktisch keine jedoch für langsam ansteigende Überspannungen (häufigste Ursache: Schaltüberspannungen). Die Höhen der Spannungs- und Stromwelle sind über den → [Wellenwiderstand](#)  $Z$  der Leitung miteinander verknüpft ( $U = Z \cdot I$ ). Nach den für ihre Ausbreitung geltenden Gesetzmäßigkeiten treten an Stellen, an denen sich der Wellenwiderstand der Leitung ändert, Brechungen und Reflexionen auf. Trifft zum Beispiel

eine Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z_1$  auf eine andere Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z_2$  oder auf einen Abschlusswiderstand der (reellwertigen) Impedanz  $Z_2$ , so ist beispielsweise der Spannungsbrechungsfaktor  $\beta_u = 2 \cdot Z_2 / (Z_2 + Z_1)$  und der Spannungsreflexionsfaktor  $r_u = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$ . Das kann Spannungserhöhungen (im Extremfall bis zur Verdoppelung) zur Folge haben und ist bei der Auslegung von Ableitern und der Wahl ihres Aufstellungsortes zu berücksichtigen (→ [Schutzbereich eines Ableiters](#)).

**Wellenwiderstand:** Für die Ausbreitung von Wanderwellen auf einer Leitung maßgeblicher Widerstand. Bei Vernachlässigung des ohmschen Widerstands- und Ableitungsbelages (d.h. bei Annahme einer verlustlosen Leitung) ergibt er sich aus den Induktivitäts- und Kapazitätsbelägen der Leitung zu:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

mit  $L'$  Induktivitätsbelag in H/m  
 $C'$  Kapazitätsbelag in F/m

Aus der obigen Gleichung ergibt sich, dass der Wellenwiderstand längenunabhängig, also an jedem Ort der Leitung gleich ist. Für Hochspannungs-Übertragungsleitungen liegt sein Wert zwischen etwa 300  $\Omega$  ( $U_s = 800$  kV) und 450  $\Omega$  ( $U_s \leq 245$  kV) (siehe IEC 60099-1, Tabelle C.1).

**Zeitweilige Überspannung:** (auch: temporäre Überspannung) Betriebsfrequente Spannungserhöhungen, die aufgrund von Schalthandlungen oder Netzfehlern für die Dauer von einigen Zehntel Sekunden bis zu einigen Sekunden auftreten können. Ihre Höhe hängt von der Art der → [Sternpunktbehandlung](#) ab. Einen Sonderfall stellen → [gelöschte](#) und → [isolierte](#) Netze dar, in denen im Erdschlussfall die gesunden Phasen gegen Erde den Wert der verketteten Spannung annehmen. Dieser Betriebszustand kann für längere Zeit (bis zu mehreren Stunden) bestehen bleiben.

**ZnO-Widerstand:** → [Metalloxidwiderstand](#)



Herausgeber und Copyright © 2012:  
Siemens AG  
Energy Sector  
Freyeslebenstraße 1  
91058 Erlangen, Germany

Siemens AG  
Energy Sector  
Power Transmission Division  
High Voltage Products  
Nonnendammallee 104  
13629 Berlin, Germany

[www.siemens.com/energy/arrester](http://www.siemens.com/energy/arrester)

Mehr Informationen unter:

Tel.: +49 30 386 33 222

Fax: +49 30 386 26 721

E-Mail: [arrester.energy@siemens.com](mailto:arrester.energy@siemens.com)

Power Transmission Division  
Bestell-Nr. E50001-G630-H197 | Printed in Germany |  
Dispo 30002 | c4bs-Nr. 7457 |  
TH 263-110564 | OD | 472781 | WS | 02121.0

Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Dokument genannten Handelsmarken  
und Warenzeichen sind Eigentum der Siemens AG  
bzw. ihrer Beteiligungsgesellschaften oder der  
jeweiligen Inhaber.

Änderungen vorbehalten.

Die Informationen in diesem Dokument enthalten  
allgemeine Beschreibungen der technischen Möglich-  
keiten, welche im Einzelfall nicht immer vorliegen.  
Die gewünschten Leistungsmerkmale sind daher im  
Einzelfall bei Vertragsschluss festzulegen.