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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 7

Artikel: Überspannungen und Isolationskoordination

Autor: Feser, Kurt

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902061

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Siehe Rechtliche Hinweise.

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. Voir Informations légales.

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. See Legal notice.

Download PDF: 14.05.2025

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

Aufgabe der Isolationskoordination ist es, die Festigkeit der Isolationen mit den zu erwartenden Beanspruchungen im Netz in Einklang zu bringen. Dieser Beitrag gibt zunächst einen Einblick in die Entstehung und Ausbreitung von Überspannungen in Übertragungs- und Verteilnetzen. Anschliessend wird die Festigkeit unterschiedlicher Isolationsklassen charakterisiert und gezeigt, wie die Isolationskoordination anhand von Wahrscheinlichkeitsaussagen über Überspannungen und Durchbruchspannungen vorgenommen werden kann.

Überspannungen und Isolationskoordination

■ Kurt Feser

Ziel der Isolationskoordination ist der störungsfreie Betrieb von Übertragungs- und Verteilnetzen für die gesamte Lebensdauer der Betriebsmittel eines Netzsystems. Die Lebensdauer der Hochspannungsbetriebsmittel liegt in der Grössenordnung einiger Jahrzehnte. Während dieser Zeit werden die Betriebsmittel durch die Betriebsspannung und durch verschiedene Überspannungen beansprucht. Abhängig vom Aufbau der Isolation eines Betriebsmittels können diese Spannungsbeanspruchungen zu einer Minderung der Isolationsfestigkeit führen. Neben den Spannungen führen aber auch viele weitere Umweltbedingungen zu Beanspruchungen, die zur Alterung des Materials und damit zu einer verminderten Festigkeit führen können. Hierbei kann es sich zum Beispiel um Temperaturschwankungen handeln, die O-Ringe vorzeitig undicht werden lassen, oder um Stromkräfte, wie sie bei Kurzschlüssen auftreten können. Wird eine bestimmte Festigkeit unterschritten, kann es beim Auftreten der nächsten Überspannung oder auch bei Betriebsspannung zu einem Durchschlag kommen. Durch Online- und Offline-Messungen, die Aussagen über den Isolationszustand erlauben, wird mit Hilfe einer adaptiven Wartung versucht, den Isolationszustand so zu verbessern, dass für eine bestimmte Zeit wieder ein sicherer Betrieb möglich ist.

Die adaptive Wartung auf der Basis von diagnostischen Messungen hat den grossen Vorteil, dass man die Wartung nach technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Gesichtspunkten optimieren kann. Für den wirtschaftlichen Betrieb eines Netzes ist dabei die Nutzungsdauer der Betriebsmittel eine wichtige Grösse. Betrachtet man die Betriebsmittel im Netz, so ist einsichtig, dass kostenintensive Betriebsmittel, die meist auch lange Reparaturzeiten haben, anders zu behandeln sind als Betriebsmittel, die schnell ausgetauscht oder repariert werden können. Bei den wirtschaftlichen Überlegungen spielen die Folgekosten eine wichtige Rolle. Entsprechend wird man auch Schutzeinrichtungen, zum Beispiel Ableiter, den wichtigen und kostenintensiven Betriebsmitteln zuordnen.

Überspannungen

Zur Beanspruchung einer Isolation müssen alle Spannungsbeanspruchungen berücksichtigt werden. Neben der Betriebsspannung, die als Dauerspannung der höchsten Netzspannung entspricht,

Adresse des Autors
Kurt Feser, Prof. Dr.-Ing., Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47 D-70569 Stuttgart

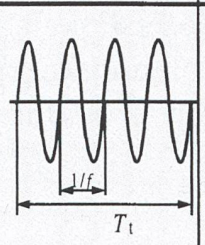
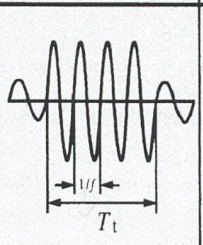
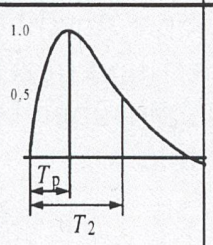
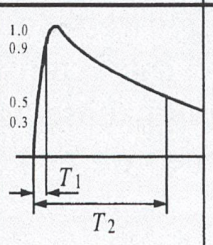
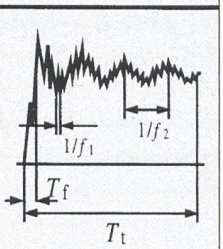
Kategorie	niederfrequent		transient		
	dauernd	zeitweilig	langsamer Anstieg	schneller Anstieg	sehr schneller Anstieg
Spannungsform					
Bereich der Spannungsformen	f = 50 Hz oder 60 Hz $T_t \geq 3600$ s	10 Hz< f<500 Hz 3600 s≥T_t≥ 0,03 s	5 ms ≥T_p> 20 µs $T_2 \leq 20$ ms	20 µs ≥T_1 > 0,1 µs $T_2 \leq 300$ µs	100 ns ≥ T_f > 3 ns 0,3 MHz < f < 100 MHz 30 kHz < f_2 < 300 kHz $T_t \leq$ 3 ms
genormte Spannungsform	f = 50 Hz oder 60 Hz T_t*)	48 Hz≤ f ≤62 Hz T_t=60 s	T_p= 250 µs T_2= 2,5 ms	T_1=1,2 µs T_2= 50 µs	*)
genormte Steh-spannungsprüfung	*)	Kurzzeit-Wechsel-spannungs-prüfung	Schaltstoss-spannungs-prüfung	Blitzstoss-spannungs-prüfung	*)
*) festzulegen durch das zuständige Geräte-Komitee					

Tabelle I Kategorien und Formen von Spannungs- und Überspannungsbeanspruchungen [1]

handelt es sich um Überspannungen mit unterschiedlichen Zeitverläufen.

Tabelle I zeigt eine Zusammenstellung der Kategorien und Formen aller Spannungs- und Überspannungsbeanspruchungen, die im folgenden näher erläutert werden sollen.

Die zeitweiligen Überspannungen können durch Schaltvorgänge, durch Resonanzbedingungen oder durch Nichtlinearitäten (Ferroresonanz) ausgelöst werden. Sie sind durch ihre Amplituden, ihre Spannungsform (sinusförmig) und ihre Dauer gekennzeichnet. Für die Isolationskoordination kann die Form der Überspannung der Form der betriebsfrequenten Überspannung gleichgesetzt werden. Beim Erdfehler eines Aussenleiters sind die Überspannungsamplituden der beiden anderen Aussenleiter von der Sternpunkterdung des Netzes und der Fehlerstelle abhängig. Die Dauer der Überspannung entspricht der Fehlerdauer bis zur Fehlerabschaltung. In Netzen mit niederohmiger Sternpunkterdung beträgt die Dauer im allgemeinen weniger als 1 Sekunde und die Amplitude ist kleiner als 1,4 p.u., das heisst kleiner als das 1,4-fache des erlaubten Wertes. In Netzen mit Erdschlusskompensation und Fehlerabschaltung beträgt die Dauer weniger als 10 Sekunden, und in Netzen ohne Erdfehlerabschaltung kann die Dauer mehrere Stunden betragen. Die Amplitude der nicht vom Fehler betroffenen Leiter kann in beiden Fällen bis zu 1,7 p.u. ansteigen.

Beim Lastabwurf können betriebsfrequente Überspannungen zwischen Leiter und Erde von 1,2 p.u. mit einer Dauer von einigen Minuten bei mässig ausgedehnten Netzen und von 1,5 p.u. mit einer Dauer von einigen Sekunden bei ausgedehnten Netzen auftreten. Durch Resonanzerscheinungen bedingte zeitweilige Überspannungen können extrem hohe Werte erreichen. Diese Überspannungen müssen durch entsprechende Massnahmen (z.B. Netzschaltung) verhindert werden oder möglichst schnell abgeschaltet werden. Die Bemessungsspannung für die Ableiter richtet sich nach den maximalen netzfrequenten Überspannungen, wobei Resonanzen für die Auswahl der Bemessungsspannung nicht berücksichtigt werden.

Langsam ansteigende Überspannungen entstehen im allgemeinen durch Einschalten und Wiedereinschalten einer Leitung, durch Fehler, durch Lastabwürfe, durch Schalten von kapazitiven und induktiven Strömen und durch ferne Blitzeinschläge in Leiter von Freileitungen. Die repräsentative Spannungsform ist die genormte Schaltstossspannung 250/2500. Die beim Einschalten und Wiedereinschalten von Leitungen am abnehmerseitigen Leitungsende entstehenden 2-%-Überspannungswerte zwischen Aussenleiter und Erde sind in Bild 1 zusammengestellt [2].

Die Werte in Bild 1 beruhen auf Ergebnissen und Studien. Sie enthalten die Auswirkungen der meisten Faktoren, welche die Überspannungen bestimmen. Diese liegen zwischen 1,2 p.u. und 3,5 p.u. Überspannungen, die bei Fehlern auftreten, liegen üblicherweise bei Netzen mit Erdschlusskompensation oder isoliertem Sternpunkt unter 2,7 p.u., bei Netzen mit niederohmiger Sternpunkterdung unter 1,8 p.u. Die Überspannungen bei Lastabwurf liegen ebenfalls unter 2 p.u. Langsam ansteigende Überspannungen, die ihre Ursache in fernen Blitzeinschlägen haben, werden für die Isolationskoordination vernachlässigt.

Schnell ansteigende Überspannungen können wiederum durch Schaltvorgänge, Fehler und Blitzeinschläge in Leitungen und Schaltanlagen bedingt sein. Blitzüberspannungen werden durch direkte Blitzeinschläge in Leiterseile oder durch rückwärtige Überschläge verursacht. Durch Blitzeinschläge in der Nähe einer Leitung treten auch induzierte Blitzüberspannungen auf, die in der Regel Überspannungsamplituden unter 400 kV aufweisen und deshalb für die unteren Spannungsebenen Bedeutung haben.

Die repräsentative Form der Blitzüberspannung ist die genormte Blitzstossspannung 1,2/50. Der direkte Blitzeinschlag kann Überspannungsamplituden von einigen Megavolt zur Folge haben, die aber durch die Freileitungsisolation auf entsprechende Werte knapp über dem Isolationspegel begrenzt werden. Der rückwärtige Überschlag (Überschlag von

einem geerdeten Teil auf spannungsführende Teile) hat eine Überspannung mit einer Amplitude, die durch den Isolationspegel bestimmt wird, und eine Anstiegszeit, die der Zusammenbruchszeit des rückwärtigen Überschlags entspricht, zur Folge. Die Überspannungen, die bei Schaltvorgängen und Fehlern entstehen, haben eine maximale Amplitude von 2 p.u. beim Schalten von Leistungsschaltern ohne Rückzündungen und von 3 p.u. beim Schalten von Leistungsschaltern mit Rückzündungen sowie beim Schalten von Trennschaltern. Durch konstruktive Massnahmen (Erdseile, Masterdungswiderstand) kann das Auftreten von Blitzüberspannungen begrenzt werden.

Sehr schnell ansteigende Überspannungen haben ihre Ursache in Trennschalterbetätigungen oder Fehlern in gasisolierten Anlagen (GIS). Sie entstehen infolge des schnellen Durchschlages der Gasstrecke (innerhalb einiger Nanosekunden) und der nahezu ungedämpften Ausbreitung der Überspannungen in einer GIS. Die Form der Überspannung ist charakterisiert durch einen schnellen Anstieg der Spannung auf eine Amplitude von maximal 3 p.u. und mehrere Ausgleichsvorgänge, die durch die GIS und die angeschlossenen Betriebsmittel (Transformator) bestimmt werden. Eine sehr schnell ansteigende Überspannung wird auch bei einem EXO-EMP (Atombombenexplosion in grosser Atmosphärenhöhe) induziert. Die Anstiegszeit der induzierten Überspannung kann wenige Nanosekunden betragen und hängt vom Netzaufbau ab. Die Amplitude der Überspannung bei einer anregenden Feldstärke von 50 kV/m kann einige 100 kV erreichen, so dass diese Ursache für Überspannungen vor allem für die unteren Spannungsebenen zu beachten ist.

Die Ausbreitung der Überspannungen erfolgt auf den Freileitungen mit Lichtgeschwindigkeit. Eine Dämpfung wird im wesentlichen durch die Koronaentladung erzielt, wobei die Koronaentladung zu einer Verlängerung der Stirnzeit (geringere Steilheit) und einer Reduzierung der Amplitude der Überspannung führt. Überspannungen, die über der Festigkeit der Freiluftisolation liegen, führen an dieser zu Überschlägen, so dass die Überspannungen auf die Isolationspegel begrenzt werden. Die Folge des Überschlags ist aber ein Netzkurzschluss, der abgeschaltet werden muss und dadurch weitere Schaltüberspannungen auslöst.

Festigkeit von Isolationen

Die dielektrische Festigkeit von Isolationssystemen wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst. Die Amplitude, die Form und die Polarität der angelegten Spannung beeinflussen die Durchschlagsspannung, ebenso wie die Feldverteilung in dem Isoliersystem. Daneben spielt das Isoliermedium eine wichtige Rolle. Man unterscheidet zwischen gasförmigen, flüssigen und festen Isolierstoffen. Verunreinigungen und lokale Inhomogenitäten sind für die verschiedenen Isoliermedien von unterschiedlicher Bedeutung. Ein weiterer wichtiger Parameter sind die Umgebungsbedingungen, zum Beispiel der Druck, die Temperatur oder die Feuchte. Die mechanischen und thermischen Beanspruchungen können eine Isolierung schwächen, das heisst die Vorgeschichte sollte für die Beurteilung eines Isoliersystems bekannt sein. Auch chemische Einflüsse, zum Beispiel durch Teilentladungen, Oberflächeneinflüsse an Leitern oder mechanische Verformungen durch Kurzschlüsse können die Festigkeit der Isoliersysteme verändern. Alle diese Einflussfaktoren gilt es über die Lebensdauer eines Betriebsmittels zu beobachten und zu bewerten. In der Regel kennt man die Isolierfestigkeit der verwendeten Isoliermittel im Neuzustand. Wesentlich schwieriger ist die Bewertung der Isolation nach einigen Jahren und vielen betrieblichen Beanspruchungen. Von gasförmigen Isolierstrecken kann man grundsätzlich annehmen, dass die Festigkeit des Isoliergases (Luft oder SF_6) über der Zeit erhalten bleibt. Das gilt aber nur mit Einschränkungen, denn Verunreinigungen, hervorgerufen durch betriebliche Tätigkeiten, können die Festigkeit von gasförmigen Isoliersystemen trotzdem herabsetzen. Bei Öl/Papier-Isolationssystemen nimmt man eine kontinuierliche Abnahme der Festigkeit mit der Zeit durch die Spannungsbeanspruchung (Temperatur, Teilentladung) an. Feste Isoliersysteme werden in der Regel durch Teilentladungen bei Betriebsspannung relativ schnell zerstört. Alle Isolationssysteme gewinnen an Festigkeit, falls die Dauer der Spannungsbeanspruchung abnimmt. Der Anstieg der Festigkeit hängt aber sehr vom Feldverlauf und vom Isoliermedium ab. Sehr schnell ansteigende Überspannungen führen in den meisten Betriebsmitteln zu nichtlinearen Spannungsverteilungen, die bei der Konstruktion beachtet werden müssen. Bei den typischen Geometrien der Elektroden-

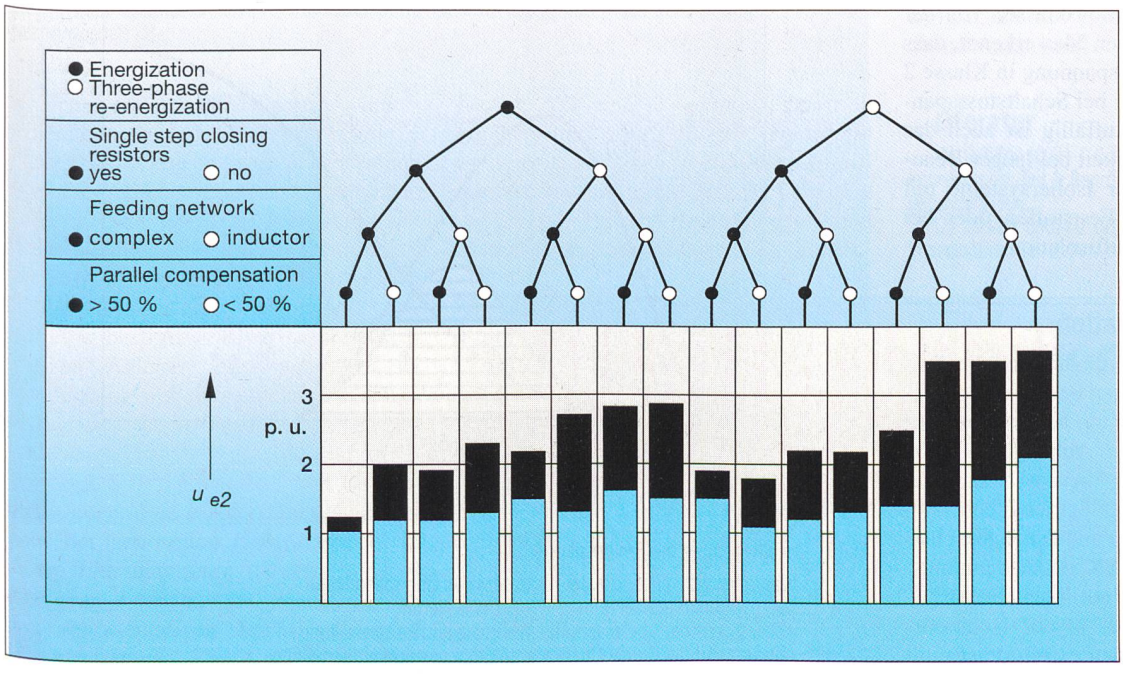


Bild 1 2-%-Überspannungswerte
Bereiche der 2-%-Werte langsam ansteigender Überspannungen am abnehmerseitigen Leitungsende beim Einschalten und Wiedereinschalten der Leitung

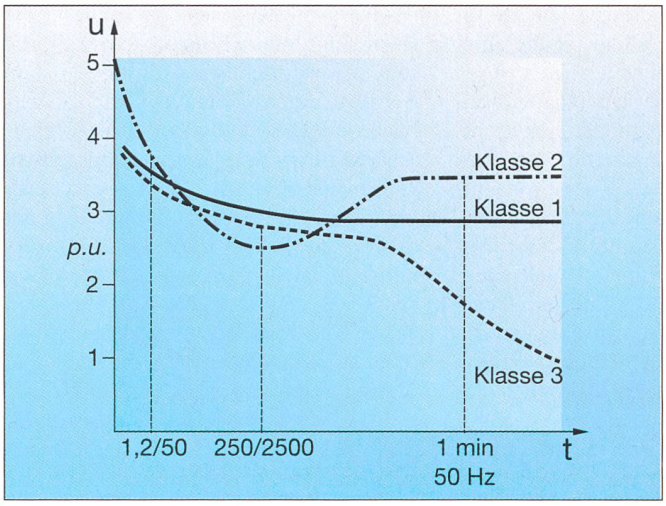


Bild 2 Abhängigkeit der relativen Stehspannungen der drei typischen Isolierklassen von der Beanspruchungsdauer

Isolierklasse 1: Gase
Isolierklasse 2: Luft
Isolierklasse 3: Feststoff, Flüssigkeiten, Verschmutzung

anordnungen in Hochspannungsanlagen entsteht der höchste Feldstärkegradient in den meisten Fällen an dem an Spannung liegenden Leiter, womit in Luft die positive Polarität die kritische Beanspruchung darstellt. Bei Verschmutzung ist das Verhalten der äusseren Isolation gegenüber der Betriebswechselspannung wichtig und kann die Auslegung der Isolierung bestimmen. Überschläge der äusseren Isolierung treten in der Regel auf, wenn die Oberfläche verschmutzt ist und infolge von leichtem Regen, Schnee, Tau oder Nebel angefeuchtet wird, ohne einen bemerkenswerten Abwascheffekt zu erreichen. Die Festigkeit eines Isolationssystems wird in der Regel experimentell ermittelt, und die für die Isolationskoordination wichtigen Stehspannungen werden nach statistischen Gesichtspunkten ausgewertet.

Für prinzipielle Betrachtungen kann man die Isolierstoffsysteme in drei Klassen einteilen. Bild 2 zeigt die Abhängigkeit der relativen Stehspannungen der drei typischen Isolationsklassen von der Beanspruchungsdauer. Man erkennt, dass der Verlauf der Stehspannung in Klasse 2 (Luft) ein Minimum bei Schaltstossspannungen aufweist. Auffällig ist auch das Absinken der Festigkeit bei langer Beanspruchungsdauer für Isoliersysteme mit Flüssigkeiten oder Feststoffen oder bei verschmutzter Freiluftisolation.

Isolationskoordination

Die Isolationskoordination ist die 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 [1].

Man unterscheidet in der Isolationskoordination zwischen einem deterministischen und einem statistischen Verfahren. Das deterministische Verfahren wird gewöhnlich dann angewendet, wenn keine durch Prüfung oder Rechnung bestimmten statistischen Informationen über die Überspannungen und die Festigkeit vorliegen. Das statistische Verfahren zur Isolationskoordination beruht auf Ergebnishäufigkeiten, das heisst auf der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Überspannungen und der Durchschlags-Wahrscheinlichkeitsverteilung der Isolierung. Indem die Häufigkeitsverteilung der Überspannungen $f(U)$ und die entsprechende Durchschlags-Wahrscheinlichkeitsverteilung der Isolierung $P(U)$ kombiniert werden, kann das Fehlerrisiko R ermittelt werden:

$$R = \int_0^\infty f(U) \cdot P(U) dU$$

Bild 3 zeigt die prinzipiellen Abhängigkeiten zur Berechnung des Fehlerrisikos einer Isolierung. Die Isolationskoordination soll eine akzeptable Fehlerrate sicherstellen. Das Betriebsverhalten der Isolierung wird aufgrund der Anzahl von Isolationsfehlern während des Betriebes bewertet. Fehler in verschiedenen Netzteilen können unterschiedliche Folgen haben. In einem vermaschten Netz ist ein bleibender Leitungsfehler nicht so schwerwiegend wie ein Sammelschienenfehler. Beispiele für akzeptable Fehlerraten (~0,1% pro Jahr) können Fehlerstatistiken entnommen werden. Wenn man die Berechnung der Fehlerrate für die verschiedenen Isolierungen in einem Netz und für verschiedene Netzzustände wiederholt, kann man die gesamte Nichtverfügbarkeit des Netzes infolge von Isolationsfehlern ermitteln. Damit kann man mit der statistischen Isolationskoordination die Fehlerhäufigkeit als Funktion der gewählten Auslegungsparameter des Netzes angeben. Wenn dann die Ausfallkosten des Netzes mit den Kosten einer gewählten Auslegung verglichen würden, liesse sich prinzipiell die Isolation nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten optimieren.

In der Praxis ist dies jedoch sehr schwierig, denn die Konsequenzen von Isolationsfehlern bei unterschiedlichen Netzzuständen und die Unsicherheit bei Angaben über nicht gelieferte Energie sind nur schwer erhältlich. Es ist daher besser, die Isolierung leicht überzudimensionieren als sie zu optimieren. Die Auslegung von Isoliersystemen beruht dann

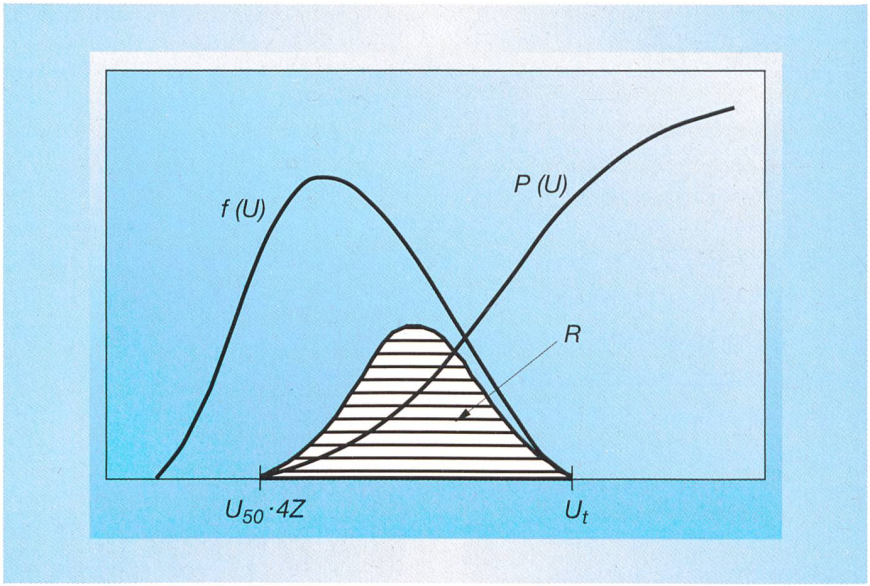


Bild 3 Zur Berechnung des Fehlerrisikos R

$f(U)$ Wahrscheinlichkeitsdichte des Auftretens von Überspannungen
$P(U)$ Durch-/Überschlagswahrscheinlichkeit der Isolierung
U_t Abbruchwert der Überspannungs-Wahrscheinlichkeitsverteilung
$U_{50} \cdot 4Z$ Abbruchwert der Durch-/Überschlags-Wahrscheinlichkeitsverteilung

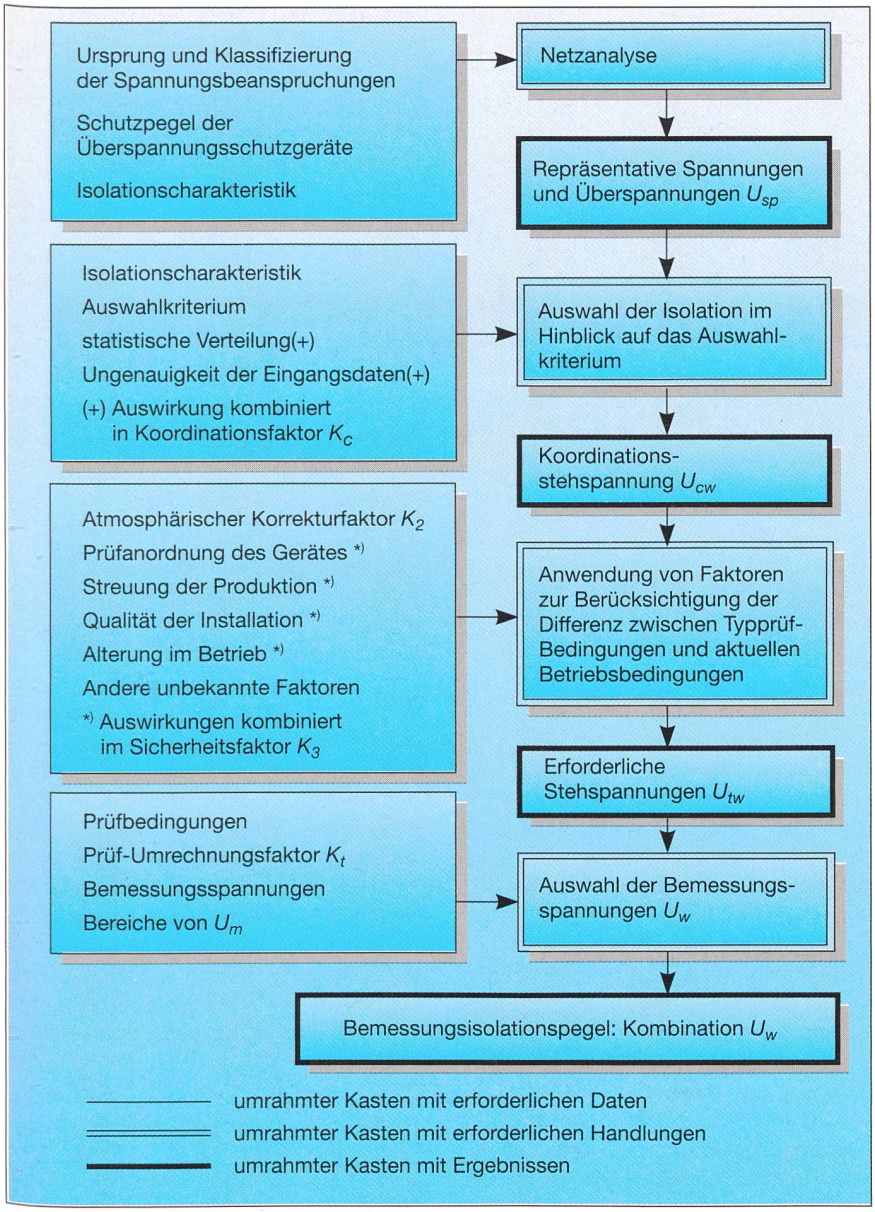


Bild 4 Flussdiagramm zur Bestimmung des Bemessungsisolationspegels bzw. des genormten Isolationspegels [1]

auf dem Vergleich der Fehlerraten unterschiedlicher Auslegungsalternativen.

Aus Bild 3 ergeben sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten, um eine akzeptable Fehlerrate zu erhalten. Man kann die Wahrscheinlichkeitsdichte für das Auftreten von Überspannungen zu kleineren Überspannungen hin verschieben oder auf eine bestimmte Überspannung begrenzen (Ableiter), oder man kann die Durchschlagswahrscheinlichkeit der Isolierung zu höheren Spannungen hin verschieben.

In Bild 4 ist das Vorgehen zur Bestimmung der Bemessungsisolationspegel bzw. der genormten Isolationspegel in einem Flussdiagramm dargestellt. Über eine genaue Netzanalyse gelangt man zu den repräsentativen Spannungen und Überspannungen. Die Auswahl der Isolierung soll eine akzeptable Fehlerrate ergeben und führt zu den Koordinationsstehspannungen. Durch die Anwendungen von Faktoren, die die Differenz zwischen Typprüf-Bedingungen und aktuellen Betriebsbedingungen berücksichtigen, gelangt man zu den erforderlichen Stehspannungen. Wenn diese Faktoren im einzelnen nicht ermittelt werden können, muss ein Gesamtsicherheitsfaktor verwendet werden, der auf Erfahrung beruht. Als Sicherheitsfaktor wird für die innere Isolation 1,15 und für die äussere Isolation 1,05 empfohlen [2]. Die richtige Auswahl der Bemessungsisolationspegel besteht in der wirtschaftlichsten Kombination von Bemessungsspannungen der Isolierung, die ausreichend sicherstellt, dass alle erforderlichen Stehspannungen erfüllt sind.

Prüfungen, Monitoring

Der Nachweis der elektrischen Isolationsfestigkeit wird durch Spannungsprüfungen erbracht. Da nicht alle Stehspannungen geprüft werden können, müssen Prüfumrechnungsfaktoren verwendet werden, um eine bestimmte erforderliche Stehspannung in eine andere Prüfspannung umzurechnen [2]. Auch die anzuwendenden Prüfverfahren sind in [2] beschrieben. Der Betrieb und jede weitere Prüfung vermindert in der Regel die Isolationsfestigkeit. Deshalb werden Wiederholungsprüfungen nach einer Wartung bei niedrigeren Spannungen durchgeführt. Ein kontinuierliches Überwachen des Isoliersystems während des Betriebs könnte die Durchschlagswahrscheinlichkeit von Isoliersystemen weiter reduzieren. Die Frage ist nur, welche Parameter überwacht werden sollen und welche Beziehung zwischen den überwachten Parametern und der Festigkeit der Isolierung besteht. Im Idealfall könnte der überwachte Parameter rechtzeitig eine Wartung auslösen und die Nutzungsdauer des Betriebsmittels entsprechend verlängern.

Literatur

[1] DIN/EN 60071-1 (VDE 0111, Teil 1) Isolationskoordination: Teil 1: Begriffe, Grundsätze und Anforderungen,1996.

[2] DIN/EN 60071-2 (VDE 0111, Teil 2) Isolationskoordination: Teil 2: Anwendungsrichtlinie, 1997.

Surtensions et coordination de l'isolation

La coordination de l'isolation doit concilier la résistance des isolations avec les sollicitations à s'attendre dans le réseau. Cet article donne d'abord une vue sur la formation et la propagation des surtensions dans les réseaux de transport et de distribution. Puis on caractérise la résistance des différentes classes d'isolation et montre comment on peut procéder à la coordination de l'isolation en s'appuyant sur des pronostics probabilistes relatifs aux surtensions et aux tensions de claquage.