

Wahrscheinlichkeitsüberlegungen bei der Wahl von Sicherheitsvorkehrungen in elektrischer Verteilnetzen

Autor(en): **Homberger, E.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **65 (1974)**

Heft 12

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915425>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Wahrscheinlichkeitsüberlegungen bei der Wahl von Sicherheitsvorkehrungen in elektrischen Verteilnetzen ¹⁾

Von E. Homberger

621.316.1 : 614.825 : 519.21

Es ist mir eine besondere Freude, hier in Österreich über Wahrscheinlichkeitsfragen im Zusammenhang mit der Sicherheit elektrischer Anlagen sprechen zu dürfen, erhielt ich doch den Impuls hierzu von Ihrem Landsmann Dr. *Erbacher*. Als ich vor einigen Jahren Gelegenheit hatte, dem Wahrscheinlichkeitsdenken Dr. *Erbachers* bei der Beeinflussung von Schwachstromanlagen durch Hochspannungsleitungen zu folgen, kam mir der Gedanke, für Sicherheitsvorschriften ähnliche Überlegungen anzustellen. Ich erinnerte mich dabei, wie stark bei der Bearbeitung von Vorschriften das Gefühlsmässige in den Vordergrund tritt und welche Bedeutung irgend einem Unfall, dessen Hergang nicht einmal genau bekannt ist, beigemessen wird. Daraus resultierten Vorschriften mit ungleich hohem Sicherheitsniveau und auch Schutzvorkehrungen mit zweifelhaftem Wert. Nichts kann aber den Sicherheitsbestrebungen mehr schaden, als Anordnungen, die ungeeignet oder gar sinnlos sind.

Mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen scheint es mir möglich zu sein, das Sicherheitsniveau klarer und eindeutiger festzulegen und die zur Verfügung stehenden Mittel sinnvoll einzusetzen. Es geht mir dabei nicht etwa darum, die heutige Sicherheit zu vermindern oder gar eine vermehrte Zahl von Unfällen in Kauf zu nehmen, sondern solche Schutzmassnahmen wegzulassen, die mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nie einen Unfall zu vermeiden vermögen.

Die Zeit fehlt hier, um die ganze Problematik theoretisch behandeln oder auch nur einen Abriss über die Wahrscheinlichkeitsrechnung geben zu können. Hiezu verweise ich auf die Veröffentlichungen von Dr. *Erbacher* und Dr. *Kuhnert* [1; 4; 6; 7; 8]²⁾. Ich möchte hier lediglich auf die Grundgleichungen hinweisen und anschliessend einige praktische Beispiele darlegen.

Es scheint mir vor allem wichtig, sich daran zu erinnern, was man unter Wahrscheinlichkeit versteht. Hiefür gilt folgender Grundsatz:

$$\text{Wahrscheinlichkeit } w = \frac{\text{Anzahl der günstigen Möglichkeiten}}{\text{Anzahl aller Möglichkeiten}}$$

Bei meiner Betrachtung handelt es sich also um einen Vergleich von Vorfällen an einer Anlage innerhalb eines Zeitabschnittes, beispielsweise eines Jahres. Die Anlage, an der sich die Vorfälle zutragen, ist als gleichmässig aufgebaut anzusehen. Vorderhand ist es somit unerheblich, ob einzelne Teile der Anlage einen Vorfall begünstigen oder ob innerhalb des betrachteten Zeitabschnittes bessere Voraussetzungen für das Eintreten des Vorfalles bestehen.

Oft kann ein Vorfall nur dann eintreten, wenn zwei oder mehrere voneinander unabhängige Ereignisse gleichzeitig vorkommen. Die Vorfalldwahrscheinlichkeit ergibt sich in diesem Fall aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse, also

$$w = w_1 \cdot w_2 \cdot \dots \cdot w_n$$

¹⁾ Vortrag, gehalten an der 47. Arbeitstagung der Arbeitsgruppe «Sicherheitstechniker der Elektrizitätsversorgungsunternehmen Österreichs» vom 16. Oktober 1973 in Gmunden (Oberösterreich).

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

In der Schutztechnik spielt nicht nur die Sicherheit für Personen und Sachen, sondern auch die Zuverlässigkeit einer Anlage eine Rolle. Was nützt eine Anlage, an der sich nur mit äusserst geringer Wahrscheinlichkeit ein Unfall ereignen kann, die aber dauernd zu Betriebsstörungen Anlass gibt? Hierüber spricht sich eine kürzlich erschienene Schrift der Schweizerischen Unfallversicherungsanstalt (SUVA) aus [2].

Wenden wir uns nun einigen praktischen Beispielen aus der Schutztechnik in den Verteilnetzen der Elektrizitäts-Versorgungs-Unternehmen (EVU) zu.

Das klassische Beispiel ist nach wie vor die Schutzmassnahme gegen gefährliche Berührungsspannungen an Freileitungsmasten. Jeder Betriebsmann einer EVU weiss, dass gelegentlich ein Leitungsisolator durch- oder überschlägt oder eine Berührung zwischen einem Polleiterseil und dem Erdseil auftritt. Dabei fliesst Strom über leitende Masten – Eisen- oder Betonmasten – nach Erde ab. Da mit hohen Erdschlußströmen und beträchtlichen Erdübergangswiderständen an den Masten gerechnet werden muss, sind auch gefährlich hohe Berührungs- und Schrittspannungen in Mastnähe zu erwarten. Zur Vermeidung von Unfällen muss nach schweizerischen Vorschriften jedes leitende Tragwerk einer Leitung höherer Spannung geerdet werden und zwar so, dass der Erdungswiderstand des Erdes 20 Ω nicht überschreitet. Ist ein Erdseil vorhanden, so darf der Erdungswiderstand aller durch das Erdseil parallel geschalteter Erder an keiner Stelle mehr als 20 Ω betragen. In neuerer Zeit hat man erkannt, dass durch die Festlegung eines höchst zulässigen Erderwiderstandes ein Unfall nicht auszuschliessen ist, weshalb die spannungssteuernde Verlegung der Erder um den Mast propagiert wird. So oder so verursacht das Erden beträchtliche Kosten.

In der Unfallverhütung ist Kostendenken verpönt, obschon gerade dadurch sicherheitsgerechtes Verhalten gefördert werden könnte. Kostendenken hat aber vor allem dann einen Sinn, wenn es darum geht, nutzlose Schutzmassnahmen wegzulassen, um die frei werdenden Mittel und Arbeitskräfte dort einzusetzen, wo ein wirklicher Erfolg erwartet werden darf.

Zur Beurteilung des notwendigen Aufwandes für Schutzmassnahmen an Freileitungsmasten ist die Häufigkeit und Dauer von Erdschlüssen, aber auch die Häufigkeit und Dauer der Mastberührungen massgebend. Über die Zahl der Erdschlüsse geben die Störungsstatistiken, insbesondere jene des Verbandes der Elektrizitätswerke Österreichs [3] weitgehend Auskunft. Die Erdschlussdauer hängt von der Sternpunktbehandlung im betrachteten Netz und den zugehörigen Überstromschutz-Apparaturen ab. Über die Berührungshäufigkeit und -dauer liegen naturgemäss nur wenig Unterlagen vor.

Für meine Beispiele wählte ich die 110-kV-Netze, die in Österreich und Deutschland weitverbreitet, in der Schweiz allerdings nicht bekannt sind. Einen ähnlichen Aufbau weisen die schweizerischen 130- und 150-kV-Netze auf, die aber nicht wie in Österreich und Deutschland gelöscht, sondern mit starrer Sternpunktterdung betrieben werden. Hingegen unterscheiden sich die topographischen und klimatischen Verhältnisse in Österreich und in der Schweiz nur wenig, so dass mindestens für diese beiden Länder Vergleiche möglich sind.

Nach Tabelle 4 der österreichischen Störungs- und Schadenstatistik 1966–1970 ereigneten sich im 110-kV-Netz rund 5,3 Erdschlüsse pro Jahr und 100 km Netzlänge. Aus Tabelle 12 ist erkennbar, dass die Mehrzahl der Erdschlüsse gar nicht auf den Leitungen, sondern anderswo im Netz, offenbar in den Stationen auftreten. Es kann angenommen werden, dass lediglich etwa 0,8...1 Erdschlüsse auf die Leitungen entfallen. Unter der Annahme, dass auf 100 km Leitungslänge etwa 250 Masten stehen, ergeben sich

$$n_M = \frac{n}{M} = \frac{1 \text{ Erdschluss}}{250 \text{ Masten}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Erdschlüsse pro Jahr und Mast, also im Mittel alle 250 Jahre ein Erdschluss auf jeden Mast.}$$

Die Erdschluss-Häufigkeitsdichte n_M wird vielfach als Vorfalls-Wahrscheinlichkeit bezeichnet, was aber nicht stimmen kann, weil ja die Grunddefinition der Wahrscheinlichkeit nicht berücksichtigt ist. Vielmehr muss das Verhältnis zur möglichen Zahl der Erdschlüsse pro Jahr bestimmt werden. Die mögliche Erdschluss-Häufigkeit entspricht den Zeitabschnitten mit der Dauer, während welcher ein Erdschluss bestehen kann. In gelöschten Netzen werden die zwei- und dreipoligen Erdschlüsse wohl spätestens nach 1 Sekunde weggeschaltet sein, die einpoligen jedoch minuten-, ja stundenlang bestehen bleiben. Statistische Werte fehlen leider. Für das gelöschte Netz wählte ich absichtlich eine etwas lange Erdschlussdauer von 100 min und nehme weder Rücksicht auf ein- und mehrpolige, noch auf selbstlöschende und stehende Erdschlüsse. Für das Netz mit geerdetem Sternpunkt setze ich eine mittlere Erdschlussdauer von 1 s in Rechnung.

Die mögliche Erdschlusshäufigkeit beträgt somit im gelöschten 110-kV-Netz:

$$n_{\text{tot}} = 365 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ h} \cdot \frac{60}{100} \text{ min} = 5,26 \cdot 10^3 \text{ Erdschlüsse/Jahr}$$

und bei starrer Sternpunktserdung:

$$n_{\text{tot}} = 365 \text{ Tage} \cdot 24 \text{ h} \cdot 3600 \cdot 1 \text{ s} = 3,154 \cdot 10^7 \text{ Erdschlüsse/Jahr}$$

Somit ergibt sich im gelöschten 110-kV-Netz eine Vorfalls-wahrscheinlichkeit pro Mast von:

$$W_V = \frac{4}{5,26 \cdot 10^3 \cdot 10^3} \approx 8 \cdot 10^{-7}$$

und im starr geerdeten 110-kV-Netz:

$$W_V = \frac{4}{3,15 \cdot 10^3 \cdot 10^7} \approx 1,3 \cdot 10^{-10}$$

Sowohl im starr geerdeten als auch im gelöschten Netz tritt nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit eine Berührungsspannung an einem Mast auf. Sie bleibt auch dann noch klein, wenn man berücksichtigt, dass sich jeder Erdschluss auf verschiedenen Masten auswirkt. Massgebend für die Unfallgefahr ist nun aber das gleichzeitige Auftreten einer Berührungsspannung mit einer Mastberührung.

Offensichtlich finden öftere oder gar ständige Mastberührungen bei Leitungsarbeiten statt. Drittpersonen berühren die Masten eher zufällig. Es fragt sich somit, ob der Freileitungsmonteur besonders gefährdet sei. An rund 250 Tagen verbringt er 8 h im Bereiche der Leitungen. Allerdings berührt er nur während einem kleinen Bruchteil dieser Zeit Masten eingeschalteter Leitungen. Die Berührungswahrscheinlichkeit ist also sicher bedeutend kleiner als

$$W_B = \frac{250 \text{ Tage} \cdot 8 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 0,23$$

Die Gesamtwahrscheinlichkeit für die Koinzidenz der Ereignisse «Berührungsspannung am Mast» und «Berührung des Mastes» ist, da beide Ereignisse unabhängig voneinander sind, das Produkt beider Wahrscheinlichkeiten:

$$W_{(V, B)} = W_V \cdot W_B$$

Besteht also, wie vorhin festgestellt, schon eine kleine Vorfalls-wahrscheinlichkeit, so ergibt sich noch eine bedeutend kleinere Unfallwahrscheinlichkeit. Weder Monteure noch Drittpersonen scheinen gefährdet, es sei denn, sie gäben während ihrer Anwesenheit an einem Leitungsmast selbst Anlass zu einem Erdschluss.

Nun erachte ich es aber doch als notwendig, einige kritische Betrachtungen anzustellen. Das gute Ergebnis wurde ja in erster Linie dadurch erzielt, dass die wenigen Ereignisse gleichmässig über einen grösseren Zeitraum (1 Jahr) und über grössere Strecken verteilt angenommen wurden. Ausserdem ist die Zeitdauer der betrachteten Ereignisse relativ kurz. Lange Betrachtungszeiten erhöhen zwar die Genauigkeit der statistischen Angaben, sofern sich die Einflussgrössen im gleichen Zeitraum nicht verändern; die tages- oder jahreszeitlich bedingten Ereignis-Anhäufungen lassen sich jedoch kaum erkennen. Erfahrungsgemäss nimmt die Erdschluss-Anfälligkeit auf Freileitungen bei extrem hohen oder tiefen Temperaturen, bei Gewittern, bei Naßschneefällen, bei Stürmen, also an wenigen, besonders gekennzeichneten Tagen zu. Je nach der Spannungsebene verschiebt sich die Bedeutung der einzelnen Einflussgrössen. Ist entsprechend den örtlichen Verhältnissen mit einer Berührungswahrscheinlichkeit gegen 1 zu rechnen, so besteht trotz der errechneten geringen Unfallwahrscheinlichkeit gleichwohl die Möglichkeit eines Unfalles.

Bei der gegenwärtigen Revision der schweizerischen Erdungsbestimmungen hat man wohl Wahrscheinlichkeitsüberlegungen angestellt, aber gleichzeitig auch den vorerwähnten besonderen Verhältnissen Rechnung getragen. Man unterteilte nämlich die Masten in 3 Kategorien:

Solche, die auf freiem Felde oder an anderen Orten mit geringer Berührungswahrscheinlichkeit stehen, solche, die sich an oft begangenen Orten befinden und solche, bei denen sich oft und unbeachtet Annäherungen durch einzelne oder gar mehrere Personen ergeben.

An die Erdungen der 1. Mastkategorie werden keine Bedingungen gestellt, bei der 2. Kategorie ebenfalls nicht, doch darf ein allfälliger Erdschluss nicht länger als 2 s bestehen bleiben, bei der 3. Kategorie ist hingegen eine Vollschutzmassnahme notwendig, d.h. Berührungs- und Schrittspannungen im Bereiche des Mastes dürfen die vorgeschriebenen Werte in keinem Fall übersteigen. Mit dieser Ordnung dürfte bei weit geringerem Aufwand eine bedeutend höhere Sicherheit erreicht werden als bis anhin. Es bleibt allerdings noch zu überlegen, ob nicht besondere Schutzmassnahmen für das Arbeiten an den Masten eingeschalteter Leitungen getroffen werden müssen.

Nebst den Masterdungen lassen sich auch andere Schutzvorkehrungen mit Wahrscheinlichkeitsüberlegungen auf ihre sicherheitstechnische Eignung hin untersuchen. Vor allem wäre es interessant, die Gefahrenwahrscheinlichkeit für das Personal von Unterwerken und anderen Personen, die sich in der Nähe

solcher Anlagen aufhalten, für den Fall von Erdschlüssen zu kennen. Mit Rücksicht darauf, dass in der Regel verschiedene Leitungen in die Stationen einmünden und die Stationen selbst umfangreiche Leitungssysteme mit zahlreichen Apparaten aufweisen, ist hier die Möglichkeit einer Spannungs-Anhebung bedeutend grösser als an einem einzelnen Leitungsmasten. Über die zu treffenden Schutzmassnahmen ist deshalb schon viel und ausführlich geschrieben worden, wobei jedoch meist nur die maximal mögliche Gefährdungsspannung, nicht aber die Wahrscheinlichkeit der Gefährdung in Betracht gezogen wurde. Ob die aufwendigen Erdungsanlagen gerechtfertigt sind, ist eigentlich ungewiss [9].

Einen beträchtlichen Aufwand an Schutzmassnahmen erfordern auch die Stationen der Mittelspannungsnetze und zwar nicht nur zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen, sondern auch zur Verunmöglichung direkter Berührung der Leiter sowie gegen Auswirkungen von Überströmen und Überspannungen. Zum Teil sind die Massnahmen durch Erfahrungen begründet, wobei eigentlich nur schlechte Erfahrungen berücksichtigt werden dürfen. Denn sowohl ausreichende als übertriebene Schutzvorkehrungen liefern bezüglich Sicherheit gute Erfahrungen. Weil viele behaupten, ihr System habe sich bewährt, fällt es auch schwer, Einheitslösungen einzuführen. Will man sich indessen durchsetzen und etwas Neues beliebt machen, so hat man sich auf Fakten oder wenigstens auf glaubwürdige Schätzungen zu stützen.

Im Verlaufe der letzten Jahre haben in der Schweiz die vorfabrizierten, gekapselten Transformatorenstationen mehr und mehr Eingang gefunden. Es wird behauptet, dass solche Anlagen weniger unfallanfällig seien. Eine Analyse der Ursachen von Unfällen über einen längeren Zeitabschnitt könnte hierüber einigermaßen Aufschluss geben. In der Schweiz ereigneten sich in den letzten 16 Jahren an den Hochspannungseinrichtungen insgesamt 205 Unfälle (Flambogenunfälle ohne Stromdurchgang durch den Körper nicht eingerechnet), also 12,8 Unfälle pro Jahr.

Nach Ursachen unterteilt, ergibt sich folgendes Bild:

Pos. 1	Spontanbewegung nach unter Spannung stehenden Teilen	21 (10,3%)
Pos. 2	Bei Arbeiten benachbarte, ungedeckte unter Spannung verbliebene Teile berührt	54 (26,3%)
Pos. 3	Bei Reinigungsarbeiten unbedachte Annäherung an offene unter Spannung stehende Teile	18 (8,8%)
Pos. 4	Versehentlich in unter Spannung stehende Zelle getreten	19 (9,2%)
Pos. 5	Bei der Suche nach der Ursache von Betriebsstörungen offene unter Spannung stehende Teile berührt	20 (9,7%)
Pos. 6	Ungenauere Instruktion und fehlende Überwachung nicht fachlich ausgebildeter Leute	19 (9,2%)
Pos. 7	Neugierde, Überheblichkeit, Fahrlässigkeit	18 (8,8%)
Pos. 8	Annäherung mit Niederspannungsprüfer an Hochspannung	10 (4,8%)
Pos. 9	Bei Arbeiten versehentlich nicht ausgeschaltet oder zu früh wieder eingeschaltet	20 (9,7%)
Pos. 10	Materialdefekte, unbestimmte Ursache	6 (3,1%)
	Total Unfälle	205 (100%)

Wären ausschliesslich vollgekapselte (vollisolierte) Anlagen im Betrieb, die im Defektfalle ausgewechselt werden müssten,

die also an Ort und Stelle keine Eingriffe ermöglichen, so sollten die Ursachen-Positionen 1...5 und 8 entfallen, d.h. rund 70 % weniger Unfälle vorkommen. Aber selbst die ausschliessliche Verwendung blechgekapselter, luftisolierter Stationen, die wegen ihrer gedrängten Bauart ebenfalls keine Reparaturen zulassen, deren unter Spannung stehende Teile aber immerhin zugänglich gemacht werden können, sollte die Unfallhäufigkeit um annähernd 40 % vermindern.

Die neuen Konstruktionen stellen also eine wesentliche sicherheitstechnische Verbesserung dar. Es fragt sich nur, ob nicht vermehrt andere Gefahrenquellen in den Vordergrund treten. Denkbar sind folgende:

1. Schlecht zugängliche Kabelenden bei Reparatur- und Ergänzungsarbeiten;
2. Kabelenden ungenügend getrennt von den bei Arbeiten unter Spannung verbleibenden Stationsteilen;
3. Bei Störungssuche und Reparaturen Stationszuleitungen nicht ausgeschaltet (Vermeidung lange dauernder Stromunterbrüche durch Schaltungen in den Nachbarstationen);
4. Irrtum bei der Freischaltung einer Station (in Nachbarstation falschen Schalter betätigt);
5. Erschwerte Feststellung des Spannungszustandes;
6. Erschwerte Erdungsmöglichkeit.

Aufgrund der statistischen Angaben über die Schadenhäufigkeit in Transformatorenstationen und an Kabelendverschlüssen des Mittelspannungsbereiches kann die Vorfalldwahrscheinlichkeit, die mit den neuen Gefahrenquellen verknüpft sind, abgeschätzt werden. Allerdings müssen beträchtliche Fehler in Kauf genommen werden, da aus den Störungsstatistiken nicht hervorgeht, wie viele Stationen mit Kabel- und wie viele mit Freileitungsanschluss im Betrieb sind, die Störungen an Kabelendverschlüssen auf 100 km Netzlänge und nicht auf Stationen bezogen sind und noch nicht genügend Angaben über das Störverhalten gekapselter Anlagen zur Verfügung stehen. Die Betriebsleiter bestimmter Netzgebiete dürften immerhin in der Lage sein, eine einigermaßen richtige Voraussage zu errechnen und die angebotenen Fabrikate sicherheitstechnisch zu beurteilen.

Auf Wahrscheinlichkeitsüberlegungen beruht auch die Absicht einiger EVU, Überstromschutzapparate auf der Hochspannungsseite der Transformatorenstationen wegzulassen. Die Störungsstatistiken lassen nämlich erkennen, dass Transformatorenschäden selten geworden sind. Selbst in ausgesprochenen Freileitungsnetzen, wo indessen systematisch moderne Überspannungsableiter eingebaut wurden, beschränken sich die Störungen auf wenige Ausnahmefälle. Erfahrungsgemäss bilden Hochspannungssicherungen selbst Störquellen. Mit dem Weglassen der Sicherungen entfallen nicht nur Störursachen, sondern auch Anlaßstellen von Unfällen. Obschon die vorgeschlagene Disposition den Vorschriften widerspricht, durfte das Starkstrominspektorat einem Versuch in grösserem Umfang zustimmen.

Verschiedene Fakten, nicht zuletzt die stetig wachsenden Schwierigkeiten, Freileitungen bauen zu können, veranlassten zwei grosse schweizerische Verteilgesellschaften, eine Erhöhung der Spannung auf der mittleren Verteilerebene unter Beibehaltung der üblichen Betonmasten ins Auge zu fassen. Die eine Gesellschaft erachtete eine Anhebung von 50 auf 110 kV mit zweisträngigen Leitungen bei einer Begrenzung des Erdschlussstromes auf 4 kA als beste Lösung, die andere entschied sich für 132 kV (max. Betriebsspannung 145 kV) mit einsträngigem Zweierbündel. Bei dieser Lösung wird der System-Nullpunkt

starr und wirksam geerdet, so dass reduzierte Isolation (Stoss-haltesspannung 550 kV) zur Anwendung kommen kann. Die Erdschlußströme übersteigen im Extremfall 10 kA, wobei beträchtliche Beeinflussungsspannungen auftreten können.

Unter der Voraussetzung, dass die Erdschlußhäufigkeit nicht wesentlich von jener der bestehenden Betonmasten-Leitungen abweicht, sollte es innert der Lebensdauer der 132-kV-Netze kaum zu personengefährdenden Zuständen oder aussergewöhnlichen Materialschäden durch Beeinflussungsspannungen kommen [7; 8].

Nun weicht aber der Aufbau der 132-kV-Leitungen doch in verschiedenen Punkten vom Üblichen ab, so dass es auch hier angezeigt erscheint, eine kritische Betrachtung anzustellen:

1. Bei starrer, wirksamer Sternpunktserdung und beim vorliegenden Netzaufbau dürfte jeder Erdschluss auf den Leitungen irgendwo zu gefährlichen Berührungsspannungen führen. Durch die Begrenzung des maximalen Erdschlußstromes auf wenige kA, könnte unter Umständen erreicht werden, dass nicht mehr alle Erdschlüsse gefährliche Zustände bewirken. Ohne die Auswirkungen der Strombegrenzung näher zu untersuchen, lässt sich nun aber an der bereits weiter vorne durchgeführten Berechnung der Unfallwahrscheinlichkeit zeigen, dass während der Lebensdauer der Leitungen auch dann nicht mit einer Gefahr für die sich im Bereiche der Leitungen bewegenden Menschen zu rechnen ist, wenn sämtliche Erdschlüsse höhere als die zulässig erachteten Berührungsspannungen bewirken.

2. Die Anwendung der «wirksamen» Erdung bedingt gegenüber den üblichen Systemen eine Verminderung der Kettenimpedanz Erdseil-Maste, also vorab eine Verstärkung des Erdseil-Querschnittes. Es ist deshalb damit zu rechnen, dass nicht nur über den erdschlussbetroffenen Mast, sondern noch über verschiedene weitere der benachbarten Masten beträchtliche Ströme wegfließen, die zu hohen Berührungsspannungen führen. Mit Rücksicht auf die geringe Gesamtzahl der zu erwartenden Erdschlüsse, wird jedoch die Unfallwahrscheinlichkeit durch Berührungsspannungen nicht wesentlich erhöht.

3. Dadurch, dass anstelle von zwei Strängen die Leitungen mit einem Zweierbündel versehen werden, vermindert sich in den Stationen die Zahl der Leitungsfelder auf die Hälfte. Somit reduziert sich auch die Zahl der Erdschlüsse und anderer Fehler in Zellen, die zu Unfällen Anlass geben könnten.

4. Die Verminderung der Felderzahl in den Stationen erhöht den Anreiz, gekapselte Anlagen zu erstellen, wodurch sich die Unfallgefahr für das Betriebspersonal weiter vermindern wird.

Zusammenfassend darf festgestellt werden, dass sich mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsüberlegungen die bisher üblichen Sicherheitsmassnahmen nicht nur vereinfachen, sondern ohne Mehraufwand sogar verbessern lassen. Sie eignen sich auch zur sicherheitstechnischen Beurteilung von neuen Lösungen, die man bis anhin rundweg als «gefährlich» abgetan hatte. Ob-schon ich mich auf wenige Beispiele der Hochspannungstechnik und erst noch auf oberflächliche Betrachtungen beschränken

musste, hoffe ich, dass die angedeutete Richtung von Spezialisten weiterverfolgt wird. Insbesondere gäbe es innerhalb der Niederspannungsinstallationen noch manche Möglichkeit, einfachere, zweckmässigere und dennoch sichere Lösungen zu finden. Ich möchte hier nur die Auswahl der verschiedenen Schalterarten und ihre Sicherung durch Überstromschutz-apparate erwähnen.

Bei allen Vorteilen, die die Wahrscheinlichkeitsüberlegungen versprechen, muss man jedoch kritisch bleiben. Die grosse Schwierigkeit besteht nämlich darin, dass nur relativ wenig statistisches Material zur Verfügung steht, sich wenig Vorfälle innerhalb grosser Zeiträume ereignen und sich die statistischen Angaben auf eine Vielfalt ungleichartiger Objekte beziehen, die unter ganz ungleichen Bedingungen arbeiten, also die Grundbedingungen der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht erfüllen. Dessen ungeachtet, vermag die Wahrscheinlichkeitsrechnung einen groben Rahmen abzustecken. Es bleibt alsdann dem Kenner der örtlichen oder besonderen Verhältnisse vorbehalten, die Resultate der Wirklichkeit entsprechend zu deuten.

Da, wie nun verschiedentlich erwähnt, die statistischen Unterlagen in der Sicherheitstechnik eine wichtige Rolle spielen, sollten sich die Vorschriften-Kommissionen mehr als bis anhin damit befassen, welches Unterlagenmaterial zur Beurteilung einer Gefahrensituation zu beschaffen ist. Ich bin überzeugt, dass auf dieser Basis manche Vorschrift ein anderes Gesicht erhalten würde.

Literatur

- [1] E. Kuhnert: Betriebssicherheit elektrischer Anlagen und ihre Bedeutung für die Beeinflussungstechnik. ETZ-A 91(1970)5, 279...283.
- [2] R. Troxler: Zuverlässigkeit und Sicherheit im Arbeitsschutz. Schweizerische Blätter für Arbeitssicherheit (1973)112.
- [3] H. Stimmer und E. Schuh: Störungs- und Schadensstatistik 1966-1970. Wien, Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, 1972.
- [4] E. Kuhnert: Die Wahrscheinlichkeit von Störungen und Schadensfällen in Mittelspannungsnetzen. Bull. SEV 62(1971)18, S. 911...914.
- [5] E. Schindler: Störungen und Schäden an elektrischen Einrichtungen im Lichte der Statistik. Bull. SEV 62(1971)19, S. 943...947 + Nr. 20, S. 985...987.
- [6] W. Erbacher: Statistische Beurteilung der Häufigkeit und Grösse induktiver Beeinflussung von Fernmelde-Leitungen durch Hochspannungsleitungen. ÖZE 13(1960)1, S. 1...9.
- [7] W. Erbacher: Zuverlässigkeit von Beeinflussungen durch Höchstspannungsanlagen unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit. ETZ-A 90(1969)22, S. 564...568.
- [8] W. Erbacher: Die Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit bei der Beurteilung von Beeinflussungsfragen. Bull. SEV 61(1970)4, 183...186.
- [9] B. Wawretschek: Die Erdungsanlage eines Umspannwerkes mit niederohmiger Sternpunktterdung. Elektrizitätswirtsch. 72(1973)23, S. 791...797.
- [10] H. R. Strickler: Überlegungen, welche die Bernischen Kraftwerke zum Einführen der 132-kV-Spannungsebene bewegen haben. Bull. SEV 64(1973)8, S. 525...531.
- [11] E. Nohl: Untersuchungen der NOK zur Einführung einer neuen Spannungsebene zwischen 100 und 150 kV. Bull. SEV 64(1973)8, S. 532...537.

Adresse des Autors:

E. Homberger, Obergeringenieur, Chef des Eidg. Starkstrominspektorates, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.