

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 59 (1968)
Heft: 19

Artikel: Betriebserfahrungen mit den polyäthylenisolierten Hochspannungskabeln im Netz des Aargauischen Elektrizitätswerkes
Autor: Wernli, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916079>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

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

Erfahrungen mit Kunststoffkabeln

Bericht über die 33. Diskussionsversammlung vom 14. Dezember 1967 in Zürich und vom 4. Juli 1968 in Lausanne

Betriebserfahrungen mit den polyäthylenisolierten Hochspannungskabeln im Netz des Aargauischen Elektrizitätswerkes

Von E. Wernli, Aarau

621.315.211.9.004.6

Seit der Aufnahme der Fabrikation polyäthylenisolierter Hochspannungskabel (PET) in der Schweiz im Jahre 1950 wurden keine bedeutenden Fortschritte in Bezug auf elektrische Festigkeit gemacht.

Betrachtet man die physikalischen Eigenschaften von Polyäthylen, so werden die Bestrebungen der Kabelindustrie verständlich, diesen Kunststoff als Dielektrikum sowohl für Hoch- und Niederspannungskabel als auch für Fernmeldekabel und isolierte Leiter einzusetzen.

Dabei sind für die Verwendung des Polyäthylens als Isolation für Hoch- und Niederspannungskabel — auf welche sich die folgenden Ausführungen beschränken sollen — vor allem die niedrige Dielektrizitätskonstante, der sehr kleine Verlustfaktor sowie die scheinbar hohe Durchschlagsfestigkeit von Bedeutung. Obwohl die chemische Industrie, die mit der Grundstoffherstellung beschäftigt ist, von einer guten Homogenität des Ausgangsmaterials spricht, hat sich die elektrische Durchschlagsfestigkeit noch nicht merklich verbessert. Die elektrische Durchschlagsfestigkeit von Polyäthylen, die an Folien gemessen wurde, ist in der Literatur sehr unterschiedlich, je nach Dicke der Prüflinge, angegeben, und zwar mit 30 kV/mm bei einer 1 mm starken Platte bis 600 kV/mm bei einer 0,02 mm dicken Folie.

Die Versuche haben aber eindeutig gezeigt, dass eine starke Abhängigkeit der Wechselspannungsfestigkeit von der Foliendicke besteht. So betrug z. B. die Durchschlagsfeldstärke von 0,3 mm starken Folien etwa 73 kV/mm, während 1,0 mm dicke Platten schon bei 43 kV/mm durchschlugen. Diese Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit des Polyäthylens von der Foliendicke konnte bei Durchschlagsversuchen mit Gleichspannungen nicht festgestellt werden. Für die Gleichspannungsfestigkeit ergaben sich 650 kV/mm, unabhängig von der Dicke der Prüflinge.

Die elektrische Festigkeit polyäthylenisolierter Kabel, deren Kupferleiter maschinell mit Polyäthylen umspritzt wird, verhält sich anders als bei Platten und Folien. Hier findet man, dass die Durchschlagsfeldstärke mit wachsendem Leiterradius sehr stark abfällt. So wurde z. B. bei einem Radius von 0,5 mm 80 kV/mm gemessen, während bei einem Radius von 1,5 mm nur noch 42 kV/mm erreicht wurden.

Bei den Untersuchungen hat sich also ergeben, dass die elektrische Festigkeit polyäthylenisolierter Kabel im wesentlichen eine Funktion des Leiterradius und fast völlig unabhängig von der Isolationswandstärke ist, was eine Eigenart des Materials bei den üblicherweise benutzten Spritzverfahren zu sein scheint.

In die gleiche Richtung weisen übrigens auch die Stoßspannungsuntersuchungen an polyäthylenisolierten Kabeln, wo

ebenfalls eine starke Abhängigkeit der Durchschlagsfestigkeit von Leiterdurchmessern beobachtet wurde.

Es muss angenommen werden, dass in den Hohlräumen der Isolation von Polyäthylenkabeln der Durchschlag eingeleitet werden kann.

Es hat sich auf Grund der damaligen Betriebserfahrungen gezeigt, dass bei diesem für die Kabeltechnik so interessanten Isolierstoff Polyäthylen noch nicht mit hoher Durchschlagsfestigkeit gerechnet werden kann.

Bei den für die Energieübertragung üblichen Leiterquerschnitten wird man aber nur mit einer Durchschlagsfestigkeit von etwa 15 bis 18 kV/mm rechnen dürfen, so dass man diesen Kabeln nach dem derzeitigen Stand der Technik wohl die gleiche Isolationswandstärke geben muss wie normalen Massekabeln.

Auf Grund der einschlägigen Literatur und der Untersuchungen der Kabelfabriken besteht zur Zeit folgende Situation: Durchschläge des Polyäthylens werden ausschliesslich auf feine Lufteinschlüsse oder Einschlüsse feiner Staubeilchen zurückgeführt. Die elektrische Glimmentladung ist ein Todfeind des PET. Feine Staubeinschlüsse führen zu baumartigen Verästelungen im PET und schliesslich zum Durchschlag. Daneben steht die Vermutung, dass unter Einfluss kurzweiliger Strahlung oder anderer Energiezufuhr ein Zerfall der Fadenmoleküle im Sinn einer Kristallbildung möglich sei. Diese Kristallbildung soll zu einer Volumenänderung führen, die dann wieder Anlass zu feinsten Hohlräumen gibt und damit zu elektrischen Glimmentladungen führen kann.

Dieser Vorgang würde einen Materialfehler bedeuten, währenddem die beiden ersten Vorgänge erhöhte Sorgfalt bei der Fabrikation des PET-Kabels verlangen würden. Allgemein bekannt ist ferner, dass sich PET mit den üblichen technischen Mitteln nicht kleben lässt. Das heisst aber auch, dass an den Grenzflächen des PET immer feinste Spalten vorkommen müssen.

Die Kabelfabriken ziehen diese Überlegung zunutze und umpressen mit grösster Sorgfalt das gereinigte Kupferseil direkt mit einem PET-Leiterschirm, wobei die Oberfläche mit Graphit leitend gemacht wird. Um Staubeintritt in das PET zu verhindern, wird das kornartige Material mit Röhrchen aus dem Behälter herausgesaugt und direkt in die Presse geführt.

Eine englische Kabelfabrik umpresst das Cu-Seil von Kabeln für mehr als 6 kV Betriebsspannung mit einem Halbleiter, der dann erst mit dem PET umpresst wird. Diese Methode macht kleine Lufteinschlüsse am Cu-Seil bedeutungslos, weil diese Blasen elektrisch vom Halbleiter kurzgeschlossen werden. Dagegen entsteht eine neue Schwierigkeit beim Übergang von dieser Halbleiterschicht zum PET. Auch hier müssen

feinste Spalten unter allen Umständen bei der wechselnden Ausdehnung des Cu-Seils vermieden werden. Da eine feste Verbindung mit dem PET nicht gelingt und andererseits die innere Oberfläche des PET beim Umpressen für eine Graphitierung nicht zugänglich ist, ist das Problem nicht einfach zu lösen.

Da auch zwischen den Herstellungsmethoden der schweizerischen Kabelwerke für PET-Kabel anfänglich merkliche Unterschiede bestanden, wurde anhand der Statistik unseres Werkes versucht festzustellen, ob sich die Fabrikationsmethoden auf die Lebensdauer der PET-Kabel merklich auswirkten.

Ich möchte vorausschicken, dass der Kanton Aargau von drei Hauptflüssen, Aare, Reuss, Limmat und vom Rhein, teilweise als Grenzfluss, durchflossen wird, was zwei Drittel der Wasser-Abflussmenge aus der Schweiz ausmacht. Ferner bestehen im Kanton Aargau ausgedehnte Grundwasserströme und im Rheintal grössere Salzsteinlager. Diese Elemente tragen zur Gewitterhäufigkeit bei.

Gemäss unserer Statistik entstanden folgende Defekte an PET-Kabelzuleitungen: Diese weist eine lineare Zunahme der Defekte auf im Verhältnis zur der Anzahl und Längen der erstellten PET-Kabelzuleitungen. Zwischen den Jahren 1951 und 1961 wurden 81 PET-Kabelzuleitungen zu Transformatorstationen erstellt mit einer totalen Länge von 12,839 km. Es sind drei Kabelwerke beteiligt:

Kabelwerk 1: 26 Zuleitungen von totaler Länge von 5,084 km. Davon gingen 11 Zuleitungskabel defekt von zirka 2 km Länge.

Kabelwerk 2: 25 Zuleitungen von totaler Länge von 4,203 km. Davon gingen 7 Zuleitungskabel defekt von 2,2 km totaler Länge.

Kabelwerk 3: 30 Zuleitungen von totaler Länge von 3,552 km. Davon gingen 7 Zuleitungskabel von 0,525 km totaler Länge defekt.

Zusammengefasst kann im wesentlichen folgendes Untersuchungsergebnis mitgeteilt werden:

1. Die nach Fertigstellung der 16 kV-Kabel gemessenen Verlustwinkel betragen:
bei Spannungen von 6...29 kV im Kabel durchwegs bei 50 Hz

$$\operatorname{tg} \delta \cong 0,2...0,4$$

2. Die nach zirka fünf Jahren ausgebauten Kabelstücke ergeben im Gegensatz dazu:
bei Spannungen von 6...29 kV im Kabel

$$\operatorname{tg} \delta \cong 0,3...0,9$$

Es lässt sich somit eine starke Zunahme der dielektrischen Verluste nach fünf Jahren feststellen. Die Zunahme ist für verschiedene Abschnitte sehr verschieden. Das heisst, dass es sich um lokale Verschlechterung der Eigenschaften handelt.

Die jeweilige Ermittlung der Fehlerstelle mit der Messbrücke ergab, dass das Kabel mindestens an mehreren Stellen der gleichen Ader Defekte aufwies. Die Kabel konnten daher aus betrieblichen Gründen nicht repariert und mussten ausgetauscht werden. Als Ersatz wurden mit wenigen Ausnahmen Papierbleikabel verwendet. Die Auswechslungskosten gingen, weil die Garantie meistens abgelaufen war, zu Lasten des Elektrizitätswerkes. Einige defekte Kabel wurden den Kabelwerken zur Untersuchung zwecks Feststellung des Defektes eingesandt.

3. Die an 20 m langen Abschnitten aus einem neuen Kabel vorgenommenen Stossversuche wurden bei steigenden Stoßspannungen, begonnen mit 150 kV (1000 Stösse), dann 160 kV (500 Stösse), dann 170 kV (150 Stösse) usw., durchgeführt.

Die Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

a) Bei Stoßspannungen stets gleichbleibender Polarität werden Durchschlagswerte von 210...250 kV nach insgesamt zirka 4500...6800 Stössen erreicht.

b) Bei Stoßspannungen mit abwechselnder Polarität (je 10 +, dann 10 -; dann 10 + usw. bei derselben Spannungsreihe 150 kV, 160 kV usw.) wurden in zwei Reihen nur 150 kV Durchschlagsspannung erreicht, nach zirka 624—960 Stössen. In zwei weiteren Reihen wurden 170 kV nach total 2050 Stössen sowie 180 kV nach total 2120 Stössen erreicht.

c) Bei dauernd angelegter Wechselspannung von 13 kV 50 Hz, der die Stoßspannungen überlagert wurden, und zwar mit je 10 positiven Stössen unter dem Winkel φ und dann 10 positiven Stössen unter dem Winkel $180^\circ + \varphi$ wurden bei 3 Reihen erreicht: 150 kV nach 800 Stössen, 170 kV nach 1940 Stössen, 180 kV nach 2200 Stössen total.

d) Eine letzte Reihe mit dauernd angelegter Wechselspannung von 13 kV, der die Stoßspannungen aber in rein zufälligen Phasenlagen überlagert wurden, ergab 190 kV nach knapp 2500 Stössen total.

Aus diesen ausführlichen Stossversuchen lässt sich schliessen, dass ein Effekt der Umpolarisierung vorhanden ist, indem die stets mit gleicher Polarität erfolgenden Stoßspannungen Durchschlagswerte von 210...250 kV ergaben, gegenüber 150...180 kV in allen Fällen, wo die Polarität nach je 10 Stössen gewechselt wurde.

Ferner zeigt sich, dass die restliche Länge eines bereits mit einem Durchschlag behafteten Kabelstückes stets eine merklich höhere Durchschlagsspannung aufweist als das gesamte Kabel.

Auch diese Beobachtung deutet darauf hin, dass es schwache Stellen gibt, währenddem der übrigbleibende Teil noch merklich stärker ist, d. h. dass die Qualität nicht homogen ist; die Streuung der Werte ist relativ gross. Schliesslich kann aus der grossen Anzahl Stossversuche der wesentliche Schluss gezogen werden, dass eine Schwächung der PET-Isolation durch hohe Stoßspannungen nicht vorhanden ist.

Auf Grund weiterer Versuche und unter Berücksichtigung der Statistik defekter Kabel der drei Kabellieferanten kann festgestellt werden, dass nicht eindeutige Fabrikations- bzw. Materialfehler vorliegen. Es können also keine Anhäufungen von Fabrikationsfehlern vorliegen.

Nach den heutigen Erkenntnissen scheint es sich bei der Defekteursache vielfach um einen noch nicht sicher bekannten Störeffekt an der Grenzschicht des PET gegen den Leiter zu handeln.

Solange aber die Ursache der Durchschläge und damit wohl auch die Mittel zu ihrer Verhinderung nicht angegeben werden können, kann wohl nicht von «Fabrikationsfehlern» die Rede sein. Die Frage nach einer ungewöhnlichen Häufung von Fabrikationsfehlern ist somit zu verneinen.

Aus den genannten Gründen muss mit allen Mitteln versucht werden, zunächst das Grenzschicht-Problem PET-Cu und die eventuelle Entstehung von Raumladungen im PET abzuklären.

Die General Electric hatte vor einigen Jahren an kurzen, polyäthylenisolierten Kabeln für Hochfrequenz bestimmte

Versuche gemacht, um die Lebensdauer zu bestimmen. Die Impulse, mit Zähler gezählt, werden bei verschiedenen Frequenzen und verschiedenen Stossformen gegeben. Die Entladungen im Dielektrikum fanden unabhängig von der Periodenzahl statt. Die Versuche haben gezeigt, dass eine bestimmte Anzahl Impulse bis zum Defektgehen der Isolation gegeben werden müssen, d. h. dass die Lebensdauer von einer genauen Anzahl Impulse abhängig ist!

Bei 9 kV 100 Impulse pro Periode
Lebensdauer bei 50 Hz 16 Jahre,
bei 10 kV 2,3 Jahre,
bei 20 kV 2,8 Monate.

Durch die Korona-Entladungen wird das Isoliermaterial zerfressen, wobei durch den Chemismus Hohlräume entstehen. Eine Karbonisierung findet bei Polyäthylen nicht statt.

Es resultiert aus diesen Versuchen, dass die Lebensdauer eines guten Kabels 1012 Impulse und eines schlechten Kabels 109 Impulse beträgt. Nachfolgend werden einige an Kabeln durchgeführte Fehlerortsbestimmungen erläutert.

A. Kabeldefekt im Hochspannungs-Polyäthylenkabel 16/9,2 kV 3 × 1 × 35 mm², 296 m in Meisterschwanden-Sandacker

Fabrikation 1953	Dicke mm	Durchmesser mm
Kupfer		7,65
Isolation	5,5	18,65
Graphiertes Band	0,1	19,05
Kupferband	0,15	19,65
PVC-Mantel	1,8	23,25

Verlegung: Im Boden 80...90 cm tief; zugedeckt mit Kabelsteinen Typ Hunziker Nr. 13.

Enden: In der TS Sandacker und auf dem 10 m hohen Mast mit Endverschlüssen ausgerüstet. Diese wurden später durch einen verbesserten Typ ersetzt.

Schutzeinrichtung: Überspannungsableiter in sämtlichen TS.

Daten: Kabelendabschlüsse Porzellan mit Araldit ausgegossen.

Juni 1953	Verlegung des Kabels und Montage der Endverschlüsse
-----------	---

4. Okt. 1953 Durchschlag eines Endverschlusses und Ersatz durch drei neue verbesserte Endverschlüsse

13. Jan. 1954

26. Febr. 1954

15. Sept. 1954

Dezember 1956

Juli 1958

7. Dez. 1958

19. Dez. 1958

Ende Dezember
1958

Durchschlag eines Endverschlusses auf dem
Kabel TS Bahnhof des gleichen Netzes

Neuer Durchschlag eines Endverschlusses
und Ersatz durch drei neue Endverschlüsse
Durchschlag eines Endverschlusses auf dem
andern Kabel des gleichen Netzes

Ersatz der Endverschlüsse durch verbesserte
Endverschlüsse mit Pentalex gefüllt

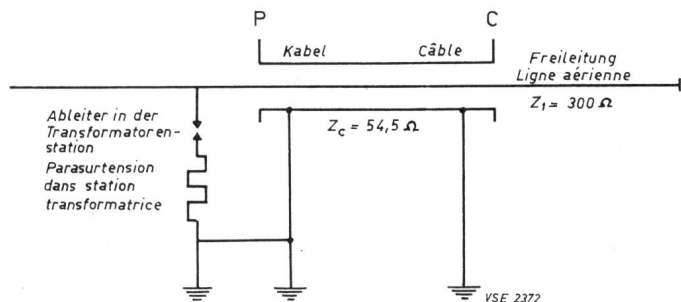
Durchschlag des Kabels 83 m vom Mast entfernt, wahrscheinlich von einer Überspannung herrührend und Reparatur mit 3 m Kabel und 6 Muffen

Neuer Durchschlag rund 60 m vom Mast entfernt

Durchschlag in einer Muffe
Ersatz des ganzen Kabels durch ein neues
Hochspannungs-PET-isoliertes Kabel
20/11,5 kV, mit einer Isolationsdicke von
6,6 mm.

Erklärung des Störungsfalles

In der Gegend von Meisterschwanden treten alljährlich heftige Gewitter auf. Es erwies sich als notwendig, diese Anlage auf den Standpunkt der Koordination der Isolation zu untersuchen und hiefür das Schutzniveau des Überspannungsableiters mit den möglichen Überspannungen längs des Kabels zu vergleichen. Das Schema der Anlage ist wie folgt:



Kapazität des Kabels	$C = 0,139 \text{ } \mu\text{F/km}$
Induktivität des Kabels	$L = 0,412 \text{ mH/km}$
Dielektrische Konstante	$\varepsilon = 2,3$
Wellen-Impedanz	$Z_c = 54,5 \text{ } \Omega$
Fortpflanzungsgeschwindigkeit	$V = 198 \text{ m/}\mu\text{s}$

Daraus sieht man, dass die Zeit, welche eine Oberwelle braucht, um das Kabel zu durchlaufen, $1,5 \mu\text{s}$ entspricht. Wir nennen diese Zeitdauer T .

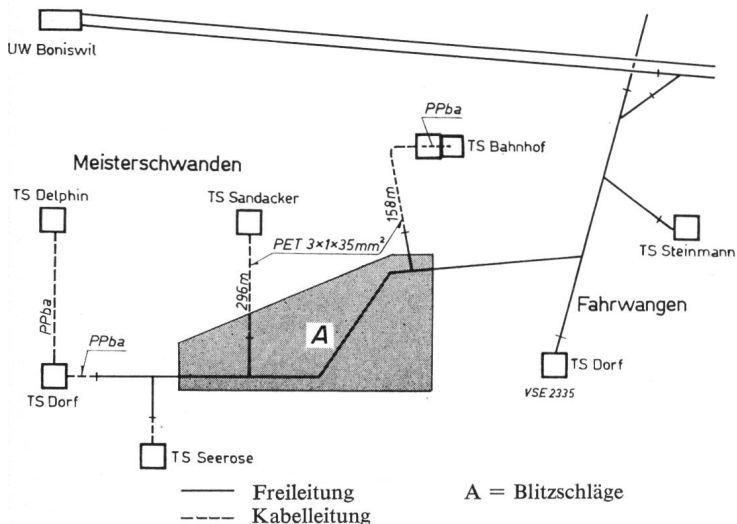
Wenn eine Überspannung mit einer Stirnsteilheit gleich S_1 in kV/ μ s durch die Freileitung auf dem Kabel ankommt, gibt es im Punkt C eine Reflexion, deren Reflexionsfaktor folgenden Wert hat:

$$\Gamma_C = -\frac{Z_1 - Z_c}{Z_1 + Z_c} = -\frac{300 - 54,5}{300 + 54,5} = -0,7$$

Da der Reflexionsfaktor gleich 0,7 ist, wird die ein Kabel durchlaufende Welle eine Stirnsteilheit von $S_e = 0,3 S_1$ haben. Die Spannung im Punkt C steigt mit der Zeit. Ihr Wert beträgt in jenem Moment:

$$U_C = t S_C = 0,3 t S_1$$

Nach der ersten Periode T_1 erreichen die Oberwellen den Überspannungsableiter im Punkt P . Solange der Ableiter nicht zündet, reflektiert sich die Welle im Punkt P mit dem Faktor: $\Gamma_P = 1$. Die Reflexion der Welle erlaubt dann eine Span-



nungssteigerung in dem Masse, dass am Ende der zweiten Periode T_2 das ganze Kabel auf dem gleichen Potential liegt.

$$U_C = U_P = 2 T \cdot S_C = 2 T \cdot 0,3 S_1$$

Während der dritten Periode steigt die Spannung im Punkt C weiter, währenddem die Spannung im Punkt P konstant bleibt usw., bei jeder Periode erhöhen sich die Spannungen stufenartig.

Da die Spannung im Ableiter auf ein bestimmtes Niveau begrenzt ist, wird früher oder später eine Zündung vorkommen. Aber es braucht noch eine ganze Periode T , bis diese Zündung im Punkt P am andern Ende des Kabels spürbar wird. Während dieser Periode steigt die Spannung im Punkt C weiter.

Dieses Beispiel zeigt eine Spannungsdifferenz zwischen dem Punkt C und P gleich $T \cdot 0,45 S_1$. Theoretisch kann diese Spannungsdifferenz $T \cdot 0,6 \cdot S_1$ erreichen.

Eine Überspannungswelle mit einer Frontsteilheit von 150 kV pro μs wäre dann genügend, um eine Spannungsdifferenz zwischen dem Anfang des Kabels und dem Ableiter von theoretisch 135 kV zu erreichen. Praktisch aber wäre diese Spannungsdifferenz zirka 100 kV. Diese Spannung addiert sich zur Zündspannung des Überspannungsleiters, deren Wert 75 kV erreichen kann. Man sieht daraus, dass es möglich ist, dass die Spannung am Anfang des Kabels eine Grössenordnung von 175 kV erreicht.

175 kV entsprechen der 50 % Stossdurchschlagspannung eines Polyäthylenkabels mit einer Isolation von 5,5 mm, während für ein Kabel mit einer Isolation von 6,6 mm diese Durchschlagspannung zirka 210 kV beträgt.

Auf alle Fälle wäre es vorzuziehen, die Schutzeinrichtung gegen Überspannungen durch Einsatz von Überspannungsableitern am Anfang des Kabels zu verbessern oder noch besser auf einem Mast in einem gewissen Abstand vor dem Kabel. Eine Schutzeinrichtung bestehend aus Überspannungsableitern nur in der TS hingegen ist absolut genügend, wenn die Kabellängen kürzer sind als zirka 100 m.

B. Kabeldefekt im Zuleitungskabel Mägenwil-Löwen

1. Daten des Kabels

255 m Polyäthylenkabel TTFB	$3 \times 1 \times 35 \text{ mm}^2$ 16 kV
3 Freiluftendverschlüsse	VFT 20-401
3 «Stress-cone»	SCJ 74-110

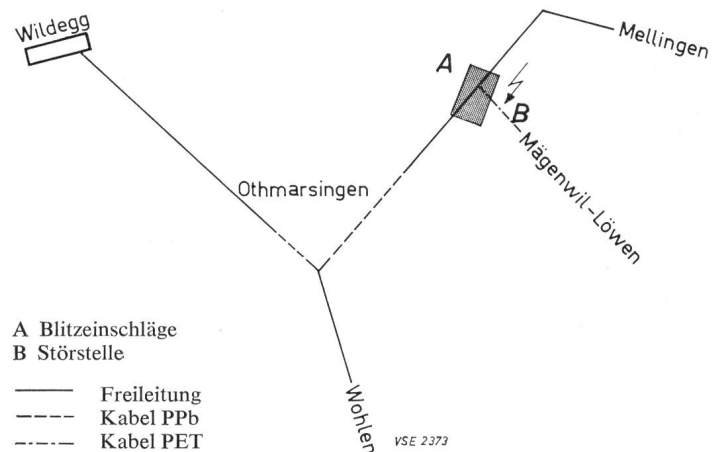
Lieferung vom 15. 11. 57

d_1	= 7,65 mm
d_a	= 18,05 mm
Betriebskapazität C	= 0,142 $\mu F/km$
Wellenwiderstand Z	= 38 Ω
Fortpflanzungsgeschwindigkeit	= 200 m/ μs

2. Art des Defektes

Der Kabelfehler, mittels Kapazitäts- und Resonanzmethode bestimmt, befand sich 153 m ab Transformatorenstation Löwen. Sämtliche Leiter waren abgeschmolzen. Irgendwelche Aussagen nach der Untersuchung der Durchschlagstelle konnten nicht gemacht werden, da die Polyäthylenisolation während des Kurzschlussvorganges weggeschmolzen ist.

Nach Angaben der Dorfbewohner schlug am 31. 7. 59, 15.00 h, der Blitz in einen in der Nähe befindlichen Birnbaum. Die Blitzspur in der Baumwurzel konnte festgestellt werden. Im Dorf Mägenwil mussten nach dem Blitzschlag an 41 Telefonapparaten die Grobsicherungen ersetzt werden.



Aus dem Trasseplan ist ersichtlich, dass die Einschlagstelle zirka 20 m von der Freileitung UW Wildeggen—Othmarsingen entfernt ist. Irgendwelche Schmelzperlen an den Zuleitungsdrähten oder zersplitterte Holzmasten, die auf einen direkten Blitzeinschlag hinweisen, konnten nicht festgestellt werden. Die weiteren Untersuchungen zeigten, dass der Durchschlag durch induzierte Spannungen erklärt werden kann. Der durch atmosphärische Überspannungen bedingte Kabeldefekt führte vorerst zum Erdschluss. Der Lichtbogen zwischen Cu-Leiter und Cu-Abschirmung bewirkte, dass die Polyäthylenisolation der gesunden Leiter in der Nähe der Durchschlagstelle ebenfalls zerstört wurde. Nachdem die Leiterisolation aller Leiter weggeschmolzen war, führte am 1. 8. 59, 11.00 h, der Erdschluss zum Kurzschluss.

3. Reparatur und Prüfung

Durch den Kabelmonteur sind 10 m Kabel TTFB $3 \times 1 \times 35 \text{ mm}^2$ eingesetzt und 2 Muffen montiert worden. Die anschliessende Gleichspannungsprüfung nach der Störung mit 37 kV während 30 Minuten hat das Kabel bestanden.

4. Erklärung des Kabeldurchschlages

Unter 2 wurde bereits darauf hingewiesen, dass der Durchschlag der Kabelisolation auf induzierte Überspannungen zurückzuführen ist. Nach der Theorie von Wagner und Mc. Cann sind bei Blitzstromstärken in der Grössenordnung 60 kA induzierte Spannungen bis 1,5 MV möglich, wenn die Freileitung 20 m von der Einschlagstelle entfernt ist.

Der Kabelüberführungspunkt befindet sich zirka 100 m von der Einschlagstelle entfernt, d. h. der Anstieg der Wanderwelle ist kleiner als 0,3 μs . Gegenüber Stosswellen mit Frontdauer $< 0,3 \mu s$ verhält sich der Endverschluss ähnlich wie eine Stabfunkenstrecke, d. h. die Stosskennlinie steigt mit zunehmender Steilheit der Stoßspannung stark an. Die Stosskennlinie der Kabelisolation verläuft mit kleiner werdenden Überschlagszeiten wesentlich flacher. Demzufolge ist das Kabel gegenüber Rechteckstössen durch den Endverschluss nicht mehr geschützt.

Ist U_1 die Spannung auf der Freileitung, so können wir für die Spannung U_0 am Kabelüberführungspunkt schreiben:

$$U_0 = \frac{2 Z_{\text{res}}}{Z_1 + Z_{\text{res}}} U_1 \quad Z_{\text{res}} = \frac{Z_1 \cdot Z_k}{Z_1 + Z_k}$$

Z_1 Wellenwiderstand der Freileitung 500 Ω .

Z_k Wellenwiderstand des Polyäthylenkabels 38 Ω .

Unter der Annahme, dass die induzierte Spannung auf der Freileitung 1,5 MV beträgt, erhalten wir für die in das Kabel einziehende Stosswelle nach vorstehender Gleichung:

$$U_0 = \frac{2 \cdot 36}{536} U_1 = 0,135 U_1 \sim 200 \text{ kV}$$

Diese Stosswelle durchläuft das Kabel und erreicht nach 1,3 μ s den Ableiter in der Transformatorenstation. Wird die Durchschlagsfeldstärke am Leiter während der Laufzeit der Stoßspannung überschritten, so erfolgt der Durchschlag im Kabel bevor der Ableiter angesprochen hat.

Die Feldstärke am Leiter ist:

$$E = \frac{U_0}{3,8 \ln \left(\frac{\text{da}}{\text{di}} \right)} = \frac{200}{3,8 \ln \left(\frac{1,8}{0,76} \right)} \sim 62 \text{ kV/mm}$$

Nach verschiedenen Messungen, z. B. Cigré-Bericht Nr. 205 1956, ist die Streuung der Durchschlagswerte für Polyäthylenkabel sehr gross. Für Isolationsdicken bis 5 mm variiert die Durchschlagsfeldstärke zwischen 40...70 kV/mm. Im vorliegenden Falle ist also ein Durchschlag des Polyäthylenkabels möglich.

5. Vergleich mit Papierkabel

Für das entsprechende Papierkabel $3 \times 1 \times 35 \text{ mm}^2$ 16 kV ist der Wellenwiderstand $Z_k = 29 \Omega$. Die Durchschlagsfeldstärke kann mit $\cong 75 \text{ kV/mm}$ angenommen werden.

Die in das Papierkabel einziehende Stosswelle ist nach den vorstehenden Gleichungen:

$$U_0 = \frac{2 \cdot Z_{\text{res}}}{Z_1 + Z_{\text{res}}} U_1 = \frac{2 \cdot 27,5}{527} \cdot 1500 \sim 155 \text{ kV}$$

Die höchste Beanspruchung am Leiter ist somit:

$$E = \frac{155}{3,8 \ln \left(\frac{1,95}{0,76} \right)} = 42 \text{ kV/mm}$$

Wie die Rechnung zeigt, verhält sich das Papierkabel gegenüber Stosswellen günstiger als das Polyäthylenkabel, da

- a) der Wellenwiderstand des Papierkabels kleiner ist,
- b) wegen der Schichtwirkung der Papierisolation die Streuung der Durchschlagswerte klein ist.

6. Thermische Beanspruchung des Polyäthylenkabels im Kurzschluss

Die damals verwendeten Polyäthylenqualitäten erweichen bei zirka 100 °C. Es ist daher notwendig, dass im Kurzschluss diese Grenze nicht überschritten wird. Durch die Wahl eines genügend grossen Kupferquerschnittes kann eine Erweichung des Dielektrikums am Leiter verhindert werden.

Die Berechnung des Kurzschlußstromes erfolgte unter folgenden Annahmen:

Kurzschlussleistung im 50 kV-Netz	$S = 800 \text{ MVA}$
Transformatorleistung	$S_{\text{Tr}} = 2 \times 8 \text{ MVA}$
Kurzschlußspannung der Transformatoren	$\varepsilon = 8 \%$
Freileitung 5,3 km 70 mm ² Cu	$X_F = 0,33 \Omega/\text{km}$
Kabel 100 m 3 \times 35 mm ² Cu	$X_k = 0,012 \Omega/\text{km}$

Mit diesen Angaben erhält man für den Kurzschlußstrom im 16 kV-Netz

$$I_k = 2800 \text{ A}$$

Die Leitungsschalter im Unterwerk Wildegge arbeiten mit Schnellwiedereinschaltung. Um die Zeitstaffelung zu gewährleisten, sind die Leitungsrelais für $I = \infty$ und $t \cdot 1,1 \text{ sec}$ eingestellt. Nach den Weisungen muss nach erfolgloser Wiedereinschaltung der Schaltwärter den Leitungsschalter von Hand nochmals betätigen, d. h. die totale Kurzschlusszeit beträgt:

$$t = \text{Eigenzeit} + 2 \cdot 1,1 \text{ sec} \sim 2,3 \text{ sec}$$

Mit diesen Angaben kann der Temperatursprung $s \vartheta$ des Cu-Leiters berechnet werden, denn es gilt:

$$A_{\text{cu}} = \frac{I_0 \cdot \sqrt{F}}{\sqrt{\frac{c}{\varrho \alpha} \ln(1 + \alpha s \vartheta)}}$$

Mit

$$C = 3,45 \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \quad A_{\text{cu}} = 35 \text{ mm}^2$$

$$\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}} \quad I_k = 2800 \text{ A}$$

$$\varrho = 1,75 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm} \quad t = 2,3 \text{ sec}$$

erhält man für die Übertemperatur $s \vartheta$ 88 °C.

Beträgt die Leitertemperatur 20 °C bei Beginn des Kurzschlusses, so wird demzufolge die Temperatur des Kupferleiters nach dem Kurzschluss $\vartheta = 108 \text{ } ^\circ\text{C}$ betragen, d. h. das Polyäthylen in der Nähe des Cu-Leiters wird vermutlich erweichen.

Eine grössere Anzahl Kabeldefekte trat bei Gewittern auf. Bei einem andern untersuchten Kabel konnten auf der Innenseite der Isolation Ionisationsspuren festgestellt werden, hingegen zeigte weder das Dielektrikum noch die übrigen Aufbauelemente Alterserscheinungen. Die schwache Ionisation der Isolation dürfte höchstwahrscheinlich die Folge starker Überspannungen sein, hervorgerufen durch atmosphärische Entladungen oder durch Erdschlüsse im Netz (starke Erdschlüsse ergeben verkettete Spannung, intermittierende können das Mehrfache der verketteten Spannung bewirken). Ob die Betriebstauglichkeit bzw. die Betriebssicherheit durch die leichte Ionisation beeinträchtigt wurde und, wenn ja, in welchem Masse, ist auf Grund eines visuellen Befundes schwer zu sagen. Nachdem das Kabel bis zum Ausbau störungsfrei funktioniert hat, steht zum mindesten fest, dass es während seiner mehr als 10jährigen Einsatzzeit den Betriebsbedingungen standgehalten hat und mit grosser Wahrscheinlichkeit auch weiterhin standgehalten hätte.

Nach neuerer Konstruktion wird auf dem Kupferleiter ein nahtloser halbleitender Polyäthylenmantel aufgespritzt, der Ionisation zwischen Leiter und Isolation mit grosser Sicherheit ausschliesst.

Die von einem Kabelwerk fabrizierten Kabelendabschlüsse ohne Porzellan entsprachen in Bezug auf die Stosshaltespannung anfänglich weder den SEV-Vorschriften noch den handwerklichen Voraussetzungen. Es entstanden infolge der Einwirkung der Gewitterüberspannungen, Regen und Feuchtigkeit zahlreiche Defekte, die meistens zu unliebsamen Stromunterbrüchen führten.

Wir haben zwei von diesen ausgeführten Endverschlüssen für Aussenmontage auf Grund der SEV-Vorschriften mit folgendem Ergebnis prüfen lassen:

a) Spannungsprüfung mit 50 Hz während 20 Minuten mit $2,5 \times 9,2 \text{ kV} = 23 \text{ kV}$.

Das Kabel samt den beiden Kabelenden hat die Prüfung bestanden. Glimmentladungen am Deflektor waren aber schon bei Tageslicht sichtbar.

b) Spannungsprüfung mit 50 Hz während einer Minute mit 64 kV (entsprechend dem Isolationsgrad I der Serie 20 kV). Das Kabel samt den beiden Kabelenden hat die Spannung gehalten. Es zeigten sich aber ausserordentlich starke Büschelentladungen.

Bestimmung der Überschlagnspannung, trocken:

Das Kabel hat bei 76 kV durchgeschlagen, und zwar im gleichen Moment, als der Überschlag an einem Kabelende eintrat.

Bestimmung der Überschlagspannung, nass:

Ein Kabelende wurde einem Regen von 3000 Ohm/cm ausgesetzt. Das Kabelende wurde etwas zu scharfen Prüfbedingungen unterzogen. Vergleichsversuche beim SEV an einem gleichen Kabelkopf haben folgende Unterschiede ergeben:

Regen 3000 Ohm/cm Überschlag bei 58 kV

Regen 10000 Ohm/cm Überschlag bei 67 kV

Es zeigten sich wiederum schon bei 23 kV Büschelentladungen.

Bei ungefähr 50 kV beginnt das Isolierband zu brennen, bereits nach wenigen Sekunden, als die Spannung am Kabel lag.

Die nach SEV-Vorschriften vorgesehene Spannung von 58 kV konnte nicht eingehalten werden, weil der Kriechstrom derart gross wurde, dass die Versuchsanlage abgeschaltet wurde.

Stoßspannungsprüfung an einem Kabelende:

Gemessene Stoßspannung: 140 kV positiv

190 kV negativ

Das Kabelende hat also die Stoßspannungsprüfung bestanden.

Schlussfolgerungen

Das Kabelende hat die vorgesehene SEV-Prüfung bestanden, jedoch lassen die Glimm- und Büschelentladungen eine kurze Lebensdauer des Kabelendes erwarten.

Die Kabelendabschlüsse wurden inzwischen verbessert, und es traten in den Zuleitungen keine Überschläge auf.

Die mit Porzellan hergestellten Endabschlüsse wurden anfänglich mit Araldit ausgegossen. Die im Laboratorium hergestellten Endabschlüsse entsprachen der SEV-Prüfbedingung in Bezug auf die Koordination der Isolation auf den Freileitungen. Hingegen entstanden an den Endabschlüssen der im Freien verlegten Kabel nach kurzer Zeit Totaldefekte, weil sich das Araldit mit Porzellan nicht zu einem monolithischen Körper verband und Feuchtigkeit eintrat, was zu Kriechströmen und schliesslich zu Erdschlüssen und Stromunterbruch führte. Die Endabschlüsse aus Porzellan werden seither mit Kabelmasse ausgegossen, und es traten an ihnen keine Defekte mehr auf.

Die 16 kV-Zuleitungen mit polyäthylenisolierten Kunststoffkabeln wurden im Laufe der Zeit mit Überspannungsableitern beim Übergang Freileitung-Kabel ausgerüstet. In sämtlichen Transformatorenstationen sind Überspannungsableiter von Anfang an montiert. Auch nach dem Einbau des Überspannungsschutzes auf den Freileitungen sind polyäthylenisolierte Kabel defekt gegangen.

Es ist zu hoffen, dass die Forschung auch auf dem Gebiet des Polyäthylens als Dielektrikum in Hochspannungskabeln wieder an Interesse gewinnt. Zwei Faktoren scheinen hauptsächlich dazu beizutragen, nämlich:

- die wirtschaftlichen Vorteile solcher Kabel für den Hersteller sowie für den Endverbraucher;
- die ständige Qualitätsverbesserung des Polyäthylen-Rohmaterials.

Das Problem der gefährlichen Abwanderung von Kabel-Tränkemasse der Papierbleikabel tritt bei den kunststoffisolierten Kabeln nicht auf.

Adresse des Autors:

E. Wernli, Veronikaweg 6, 5000 Aarau.

Der Verbrauch elektrischer Energie für industrielle Zwecke in der Schweiz im hydrographischen Jahr 1966/67

Mitgeteilt vom Eidgenössischen Amt für Energiewirtschaft, Bern

519.24:621.31:338.45(494)«1966/67»

Nach einigen einleitenden Bemerkungen unter Ziffer 1 wird unter Ziffer 2 die Aufteilung des industriellen Verbrauchs auf die verschiedenen Industriegruppen gemäss der schweizerischen Industriestatistik wiedergegeben, und unter Ziffer 3 werden die Verbrauchswerte der Schweiz denjenigen einiger europäischer Länder gegenübergestellt.

1. Vorbemerkungen

Die monatlich zusammengestellte und veröffentlichte schweizerische Elektrizitätsstatistik weist, abgesehen von den Verlusten, dem Verbrauch der Speicherpumpen und der Verwendung von Überschüssen in den Elektrokesseln, vier Verbrauchskategorien auf, nämlich die Gruppen: Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft; Bahnen; Allgemeine industrielle Anwendungen; Industrielle Anwendungen für Elektrochemie, Elektrometallurgie und Elektrothermie (vgl. Tabelle I). Am Ende eines Jahres wird jeweils der Gesamtverbrauch für industrielle Zwecke nach Industriegruppen aufgeteilt. Die vorliegende Veröffentlichung bezieht sich auf den industriellen Verbrauch im letzten hydrographischen Jahr, umfassend die Zeit vom 1. Oktober 1966 bis 30. September 1967.

Die Bestimmung der Industriegruppen und die Aufteilung der industriellen Konsumenten unter diese werden von der eidgenössischen Industriestatistik übernommen, welche vom Eidgenössischen Statistischen Amt geführt wird. Laut

Bundesgesetz vom 13. März 1964 über die Arbeit in Industrie, Gewerbe und Handel entscheidet das Bundesamt für Industrie, Gewerbe und Arbeit über die Unterstellung und Einreihung der industriellen Betriebe. Als industrielle Betriebe im Sinne des Gesetzes gelten Betriebe mit fester Anlage von dauerndem Charakter für die Herstellung, Verarbeitung oder Behandlung von Gütern oder die Erzeugung, Umwandlung oder Übertragung von Energie, sofern

a) die Arbeitsweise oder Arbeitsorganisation durch Maschinen oder andere technische Einrichtungen oder durch serienmässige Vorrichtungen bestimmt werden und für die Herstellung, Verarbeitung oder Behandlung von Gütern oder für die Erzeugung, Umwandlung oder Übertragung von Energie wenigstens sechs Arbeitnehmer beschäftigt werden, oder

b) die Arbeitsweise oder die Arbeitsorganisation wesentlich durch automatische Verfahren bestimmt werden, oder

c) Leben oder Gesundheit der Arbeitnehmer besonderen Gefahren ausgesetzt sind.

Unterstellt unter die Sondervorschriften betreffend die industriellen Betriebe und somit berücksichtigt für die Feststellung der Zahl der Arbeiter in der vorliegenden Statistik ist nur das Betriebspersonal ohne das technische und kaufmännische Büropersonal sowie die überwiegend ausserhalb