
Name der Forschungsstelle(n)

/
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

bis
Bewilligungszeitraum

Schlußbericht für den Zeitraum : _____ bis _____

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema :

Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	3
1 Einleitung	5
2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens	9
3 Zuverlässigkeitsberechnungen für ein Mittelspannungsnetz	10
3.1 Anforderungen	10
3.2 VPE-Kabelanlagen	11
3.3 Folgerungen für Papiermasse-Kabelanlagen	18
4 Vor-Ort-Untersuchungen an Papiermasse-Kabelanlagen	19
4.1 Auswahl der Spannungserzeugungsanlage	19
4.2 Eigenschaften der Resonanzprüfanlage	21
4.3 Konzept der Vor-Ort-Untersuchungen und Anwendungsbereiche des Resonanz-Prüfsystems	23
4.4 Teilentladungsmessung	27
4.5 Teilentladungsortung	28
4.6 Verlustfaktormessung	32
4.7 Anordnung der Prüf- und Messeinrichtungen vor Ort	33
5 Ergebnisse der Vor-Ort-Untersuchungen	36
5.1 Zusammenstellung der Untersuchungen	36
5.2 Untersuchungsprogramm	38
5.3 Teilentladungsmessungen	38
6 Bewertung der Untersuchungsergebnisse	55
7 Schrifttum	57

Zusammenfassung

Das in Deutschland vorhandene Mittelspannungs-Kabelnetz besteht zur Hälfte aus Papiermassekabeln und den dazugehörigen Garnituren. Seit den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden bei der Auswahl neuer Kabel vermehrt zu VPE-Kabeln gegriffen, die das Papiermassekabel im Laufe der Jahre nahezu völlig verdrängten. Das bestehende Kabelnetz blieb jedoch erhalten, so dass heute große Teile der Papiermasse-Kabelanlagen aus dieser älteren Zeit stammen. Es wird geschätzt, dass etwa ein Drittel des gesamten Kabelnetzes aus Papiermassekabeln besteht, die heute älter als 30 Jahre sind.

Während für die modernen VPE-Kabel aufgrund ihrer Anfälligkeit gegen die Alterung durch Wasserbäumchen umfangreiche Untersuchungen durchgeführt wurden und die Kenntnisse über dieses Phänomen groß sind, weiß man über die Qualität der älteren Papiermasse-Kabelanlagen wenig. Das Forschungsvorhaben hat sich daher die Aufgabe gestellt, hierüber erste Kenntnisse zu erarbeiten. Das Vorhaben bestand aus drei Teilaufgaben:

- durch Zuverlässigkeitsberechnungen die Eigenschaften der Kabel festzustellen, die für die Versorgungszuverlässigkeit in Verteilungsnetzen hauptsächlich zu beachten sind,
- durch Vor-Ort Untersuchungen an Papiermasse-Kabelanlagen die Häufigkeit von Fehlstellen und deren Ursache festzustellen und
- einen Zusammenhang zwischen der Intensität der Teilentladungen und der zu erwartenden Festigkeit im Betrieb zu ermitteln.

Die anhand der guten Kenntnisse der Alterung von VPE-Kabelanlagen durchgeführten Zuverlässigkeitsberechnungen zeigen, dass zwei Eigenschaften einer Kabelanlage von Bedeutung sind:

- die Wahrscheinlichkeit im Normalbetrieb des Netzes einen dielektrischen Fehler aufzuweisen, also im gelöschten Netz einen Erdschluss zu verursachen,
- die Wahrscheinlichkeit im Erdschlussfall aufgrund der höheren Spannungsbeanspruchung einen Folgefehler zu haben, und so einen Doppelerdschluss und eine Abschaltung der Versorgung zu verursachen.

Erst wenn beide Wahrscheinlichkeiten durch Alterungsvorgänge im Kabel ansteigen, kommt es zu dem rapiden Abfall der Versorgungszuverlässigkeit im Verteilungsnetz, wie er in den vergangenen Jahren in Netzen mit VPE-Kabeln bestimmter Fertigungsjahre beobachtet wurde. Um Aussagen über die Zuverlässigkeit der Papiermassekabel machen zu können, müssen diese beiden Wahrscheinlichkeiten bekannt sein.

Die Vor-Ort-Untersuchungen wurden mit einer Resonanzprüfanlage durchgeführt, die Prüfspannungen mit Frequenzen in der Nähe von 50 Hz erzeugt. Die Prüfanlage wurde beschafft und erprobt. Die Möglichkeiten und Einsatzgrenzen einer solchen Anlage wurden anhand ihrer Eigenschaften berechnet und die Ergebnisse im praktischen Einsatz betätigt. Die Teilentladungsmessung geschah mit einem auf dem Markt erhältlichen System und bewährte sich auch gut vor Ort. Die bekannten Verfahren zur Ortung von Fehlstellen wurden an die Eigenschaften der Resonanzprüfanlage angepasst und hat sich mit Einschränkungen bewährt.

In diesem Vorhaben wurden Teilentladungsmessungen an 39 Kabelstrecken mit insgesamt 117 Kabeladern durchgeführt. Die Hauptergebnisse der Vor-Ort-Teilentladungsmessungen waren:

- Der Grundstörpegel in den einzelnen Anlagen variierte zwischen den Teilentladungsintensitäten 20 pC und 250 pC. Die statistische Verteilung der zu erwartenden Grundstörpegel wurde aufgestellt und kann als Grundlage zukünftiger Messungen dienen.
- Von den 117 gemessenen Kabeladern hatten 4 Adern bei der Prüfspannung $1 U_0$ und 32 Kabeladern bei der Prüfspannung $2 U_0$ Teilentladungen. Die gemessenen Werte wurden mit dem Grundstörpegel bewertet und bewertete Wahrscheinlichkeitsverteilungen angegeben.
- Keine der Kabelstrecken wies bei der Vor-Ort-Untersuchung bis zur Prüfspannung $2 U_0$ einen Durchschlag auf.

Obwohl einige der Kabel sehr hohe Teilentladungen aufwiesen, wurde kein Kabel oder Garnitur ausgewechselt. Ein direkter Zusammenhang zwischen Teilentladungsintensität und Durchschlagspannung konnte somit nicht ermittelt werden. Er wurde aus den gemessenen Werten und dem Betriebsverhalten der Kabel abgeschätzt.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass das Forschungsvorhaben die Aufgabenstellungen im wesentlichen erfüllt hat. Die Papiermasse-Kabelanlagen wiesen aber eine gute Qualität auf und die Zahl kritischer Fehlstellen war für eine genaue Auswertung zu gering. Eine Erhöhung der Anzahl durchgeführter Messungen ist erforderlich. Zusätzlich wären für die eingesetzte Messtechnik Verbesserungen hinsichtlich der Möglichkeiten zur Ortung von Teilentladungen und der Verlustfaktormessung wünschenswert.

1 Einleitung

Die weitreichenden Folgen und Umbrüche aber insbesondere auch der rasante Energiepreisverfall, den die Liberalisierung des Energiemarktes mit sich brachte, haben sowohl die Erzeuger elektrischer Energie als auch deren Kunden in ihrem Ausmaß überrascht. Derzeit scheint, da mit einem Marktwachstum bei der Abnahme von elektrischer Energie in absehbarer Zeit nicht zu rechnen ist, das Gebot der Stunde die Kosteneinsparung unter allen Umständen und in allen Bereichen zu sein.

Im Gegensatz zu langfristigen Maßnahmen wie Personalabbau innerhalb der Unternehmen oder grundlegenden Änderungen bei der Ausgestaltung des Versorgungsnetzes wirken sich Einsparungen im Investitionshaushalt, wie sie zur Zeit von der überwiegenden Anzahl der Versorgungsunternehmen praktiziert werden, sofort auf das Unternehmensergebnis aus. Daneben können durch eine an den neuen Anforderungen orientierte Personaleinsatzplanung und Unternehmensorganisation aber auch durch reduzierte Instandhaltungsmaßnahmen ebenfalls erhebliche Einsparpotentiale aktiviert werden [1,2].

Der Großteil des von den Netzbetreibern investierte Wert liegt in den Verteilungsnetzen und die Bemühungen zur Investitions- oder Reinvestitionsoptimierung konzentriert sich auf diese Netze. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Versorgungszuverlässigkeit des Endkunden wesentlich durch Qualität und Zustand der hier eingesetzten Komponenten bestimmt ist. Die Energieverteilung in Deutschland geschieht über Netzkonfigurationen, die im Mittel die folgenden Komponenten beinhaltet:

- Schaltanlage mit zwei Sammelschienen, zwei Einspeisungen und Mess-/Kuppelfeld;
- drei Leitungsabgänge pro Sammelschiene, als Strahlennetz betriebene Ringe;
- 10 Ortsnetzstationen mit dreifeldriger Station und Ortsnetztransformator pro Abgang
- 10 km Kabel oder Freileitungen pro Abgang, d.h. 1 km Leitung zwischen Ortsnetzstationen.

Unter Berücksichtigung des Erfassungsgrads berichtet die VDEW-Störungs- und Schadensstatistik für die Jahre 1995 bis 1997 für die Anlagen in der Verteilebene in Deutschland durchschnittlich etwa 3500 Schäden. Darin sind die Ortsnetztransformatoren mit etwa 25% der Fehler mitenthalten. Die restlichen, die Anlagen selbst betreffenden Schäden sind nur für die Schaltgeräte und die Messwandler spezifiziert, jedoch kann aus der Statistik und der Erfahrung eine Aufteilung der Schäden auf die einzelnen Komponenten versucht werden:

- Mittelspannungskabel: 3 Schäden pro 100 km Kabelsystem und Jahr;
- Schaltanlagen : 800 Schäden pro Jahr
Diese Schadensrate entspricht 0,6% Schäden pro Feld und Jahr.
- Ortsnetzstationen: 1900 Schäden pro Jahr
entsprechend 0,2% Schäden pro Feld und Jahr
- Ortsnetztransformatoren: 800 Schäden pro Jahr
entsprechend 0,2% Schäden pro Jahr

Die Versorgung eines angeschlossenen Verbrauchers ist kurzzeitig unterbrochen, wenn in der Schaltanlage auf der betroffenen Sammelschiene oder auf dem ihn versorgenden Abgang ein Schaden auftritt. Die Häufigkeiten der Versorgungsunterbrechungen teilen sich mit den oben genannten Anlagenwerten und Schadensraten auf die betroffenen Komponenten entsprechend Tabelle 1.1 auf. Es zeigt sich, dass $\frac{3}{4}$ aller Versorgungsunterbrechungen durch Schäden an den Kabeln verursacht werden. Auch wenn berücksichtigt wird, dass ein großer Anteil dieser Schäden auf unvermeidbare Beschädigungen von außen verursacht wird, verbleibt ein maßgeblicher Anteil dieser Schäden aufgrund Alterung und mangelnde Qualität der Kabelisolation.

Schaden in	Häufigkeit pro Jahr
Kabelverbindung 10 km:	0,30
Schaltanlage, Sammelschiene Einspeise-, Abgangs- oder Kupfeld (4 Felder):	0,02
10 Ortsnetzstationen mit je 3 Feldern	0,06
10 Ortsnetztransformatoren	0,02
Summe:	0,40

Tabelle 1.1 Aufteilung der Versorgungs-Unterbrechungshäufigkeiten auf die Schadensursachen in einem mittleren Verteilungsnetz

Das Mittelspannungsnetz in Deutschland ist geprägt durch die insbesondere in den letzten Jahren vorgenommene Verkabelung des Mittelspannungsnetzes und durch den Wechsel von dem altbewährten Papier-Masse-Kabel zu den modernen VPE-Kabeln seit Beginn der 70er Jahre. Darüber hinaus bewirkt die große Einwohnerzahl Deutschlands, dass hier ein Netz beträchtlicher Ausdehnung vorliegt. Um eine Vorstellung über die bei der Instandhaltung eines solchen Netzes zu erwartenden Aufwendungen zu erhalten, sind die Leitungslängen des Mittelspannungsnetzes in Bild 1.1 zusammengefasst. Die Daten wurden der VDEW-Störungsstatistik 1997 entnommen, wobei die Aufteilung des Kabelnetzes in Papier-

Masse-Kabel und kunststoffisolierte Kabel anhand der in der Statistik erfassten Hälfte des Gesamtnetzes vorgenommen wurde. Das Mittelspannungsnetz umfasst insgesamt etwa 460.000 km Stromkreislänge, wobei die Spannungsebenen 10 kV und 20 kV vorherrschend sind.

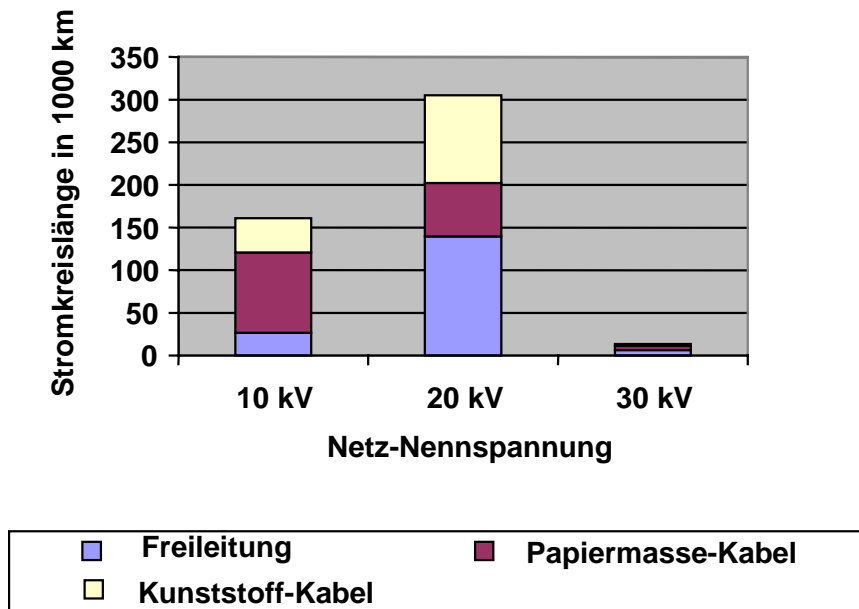


Bild 1.1 Stromkreislängen des Mittelspannungsnetzes in Deutschland 1997

Der Verkabelungsgrad in Deutschland liegt bei deutlich über 60% und das Kabelnetz umfasst eine Stromkreislänge von mehr als 300.000 km. Selbst unter Zugrundelegung von günstigen Verlegebedingungen und damit niedrigen Verlegekosten in Höhe von 50 TDM/km bedeutet dies einen Wert von über 15 Milliarden DM.

Die Anteile von Papier-Masse-Kabel und Kunststoffkabel halten sich in etwa die Waage. Im 10-kV-Netz sind Papier-Masse-Kabel vorherrschend, während im 20-kV-Netz das Kunststoffkabel, in der Mehrheit VPE-Kabel, aufgrund der in den letzten Jahren vorgenommenen Verkabelung der Freileitungen überwiegt. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass Papier-Masse-Kabel in der Regel eine wesentlich höhere Betriebszeit haben als VPE-Kabel, da letztere erst seit etwa 1970 in größerem Stil eingesetzt wurden.

Bild 1.2 zeigt die Altersstruktur der in Deutschland verlegten Kabel. Die Werte wurden aus den in der VDEW-Störungsstatistik für die einzelnen Kabeltypen gemachten Angaben abgeschätzt, wobei der dort enthaltene Erfassungsgrad und die in der Kabelfehlerstatistik des VDEW AA "Kabel" enthaltene Entwicklung der verlegten VPE-Kabel mit berücksichtigt sind. Die im Bild aufgezeigten Anteile mögen daher nicht sehr genau sein, sie können aber für die hier dargestellten Betrachtungen als ausreichende Information angesehen werden.

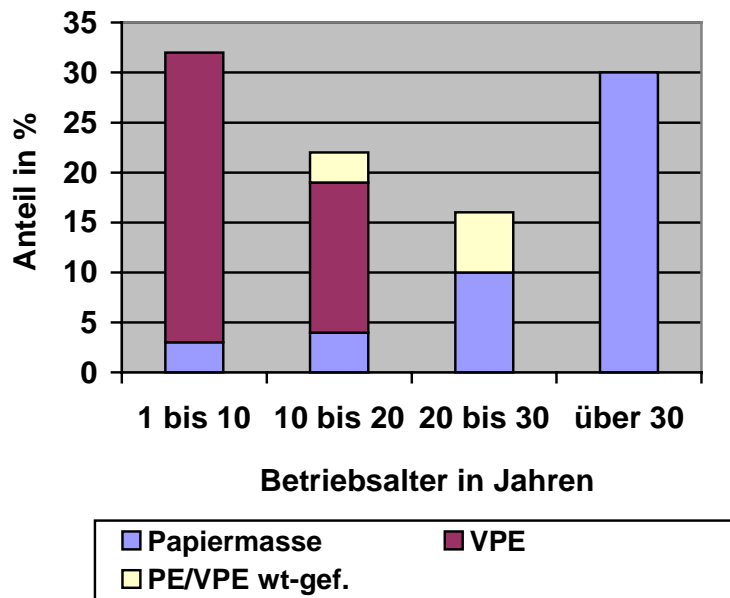


Bild 1.2 Altersstruktur der in den Mittelspannungsnetzen 10 kV und 20 kV eingesetzten Kabel

Etwa 30% der Kabel im Mittelspannungsnetz sind älter als 30 Jahre. Es sind dies nahezu ausschließlich Papiermassekabel, die vor 1970 das allgemein eingesetzte Standardkabel waren. Ein merklicher, jedoch schwer abschätzbarer Anteil hiervon wird sogar älter als 40 Jahre sein. Die Kabel der Legejahre vor 1970 werden in den nächsten 10 Jahren das Alter von 40 Jahren erreichen, also eine Betriebszeit aufweisen, die der üblicherweise angenommenen Lebensdauer entspricht.

Seit 1970 werden in steigendem Maße VPE-Kabel eingesetzt. Die bei den ersten Kabeln dieses Typs aufgetretene Alterung durch Wasserbäumchen ist bekannt. Man kann davon ausgehen, dass diese Kabelalterung durch die modernen Methoden der Kabelprüfung und der Fertigungskontrolle, die nach Auftreten der Fehler zu Beginn der 80er Jahre entwickelt wurden, beherrscht wird und bei den modernen Kabeln nicht mehr besteht. Bei den bis zu diesem Zeitpunkt verlegten Kabeln ist aber damit zu rechnen, dass eine Alterung durch Wasserbäumchen auftreten kann. Der hiervon betroffene Anteil der Kabel ist in Bild 1.2 als „wt-gef.“ gekennzeichnet. Es handelt sich um etwa 8% der insgesamt verlegten Kabel.

Als Folgerung aus dem Mengengerüst und der Altersstruktur der Kabel muss festgehalten werden, dass in den nächsten Jahren etwa 30% der Kabel ein über der erwarteten Lebensdauer von 40 Jahren liegendes Betriebsalter haben werden und dass bei etwa 8% der Kabel unter Umständen eine Alterung durch Wasserbäumchen auftreten könnte. Es sind damit insgesamt etwa 38% der verlegten Kabel, deren Betriebsverhalten die Aufmerksamkeit der

Netzbetreiber verdient. Dies entspricht einer Stromkreislänge von ca. 110.000 km mit einem Investitionswert von nahezu 6 Milliarden DM.

Aufgrund des ausgeprägten Schadensgeschehens an wt-gefährdeten VPE-Kabeln sind die Kenntnisse über die Gesetzmäßigkeiten der Alterung dieser Kabel weit entwickelt. Typspezifische Schadenstatistiken wurden aufgestellt und haben sehr zur Identifizierung gefährdeter Kabeltypen und Fertigungsjahre beigetragen [3]. Verfahren zur Ermittlung des Kabelzustands wurden entwickelt und zum Teil erfolgreich erprobt [4,5]. Für Papiermassekabel befinden solche eingehenden Messungen zur Ermittlung des Kabelzustands noch im Anfangsstadium und werden in der Regel nur dann durchgeführt, wenn das Fehlgeschehen hierzu Anlass gibt[4].

2 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Nach dem im Antrag formulierten Forschungsziel bestand das Forschungsvorhaben aus zwei Teilen:

- Bestimmung der erforderlichen Eingangsdaten für die Zuverlässigkeitsberechnung einer Mittelspannungsversorgung.

Hierdurch sollte anhand eines typischen Beispiels untersucht werden, welche Kenntnisse über die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Kabel im Normalbetrieb des Netzes und im Erdschlussfall vorhanden sein müssen, um eine aussagefähige Zuverlässigkeitsberechnung für ein gegebenes Netz durchführen zu können.

- Vor-Ort-Untersuchungen an Papiermasse-Kabelanlagen

Hierbei sollten als Ergebnis für das deutsche Kabelnetz Informationen über

- Anzahl der Fehlstellen mit hohen Teilentladungen pro km Kabelstrecke,
- Statistische Verteilung der Teilentladungspegel,
- Korrelation zwischen Teilentladungspegel und Durchschlagspannung,

erhalten werden. Aus diesen Informationen sollten Verfahren zur Abschätzung der zeitlichen Abhängigkeit der für die Zuverlässigkeitsberechnung erforderlichen Ausfallwahrscheinlichkeiten erarbeitet werden.

Für diese Untersuchungen wurde eine speziell für Papiermasse-Kabelanlagen zugeschnittene Resonanzprüfanlage beschafft, die die Erzeugung der notwendigen Prüfspannungen bis zur verketteten Spannung des Netzes mit Frequenzen zwischen etwa 30 Hz und 170 Hz erlaubt.

3 Zuverlässigkeitsberechnungen für ein Mittelspannungsnetz.

3.1 Anforderungen

Die Forderung nach einer unveränderten Qualität einer Kabelanlage ist allgemein akzeptiert [6]. Offen bleibt jedoch die Frage nach einer für den Betrieb erforderlichen Qualität, d. h. wie gut eine Kabelanlage nach Errichtung sein muss, oder welche Instandhaltungsstrategie für eine ältere Kabelanlage die geeignetste ist. Die Frage lässt sich sehr leicht beantworten, da die Qualität ausreichend sein muss, die von dem Betreiber des Netzes für notwendig gehaltene Versorgungszuverlässigkeit des Kunden zu sichern.

Die Verfahren zur Berechnung der Zuverlässigkeit eines Netzes sind heute verfügbar und können dazu verwendet werden, die für die Kabeldiagnose relevanten Fragen zu beantworten:

- Welche Fehlerhäufigkeit bei der Montage neuer Kabelanlagen kann toleriert werden?
- Wie wirkt sich die Alterung einer Kabelanlage auf die Zuverlässigkeit aus?
- Ist eine ereignisorientierte oder eine Kombination aus ereignisorientierter und zustandsorientierter Instandhaltungsstrategie für Kabelanlagen geeignet, oder ist eine vorbeugende Instandhaltung erforderlich?

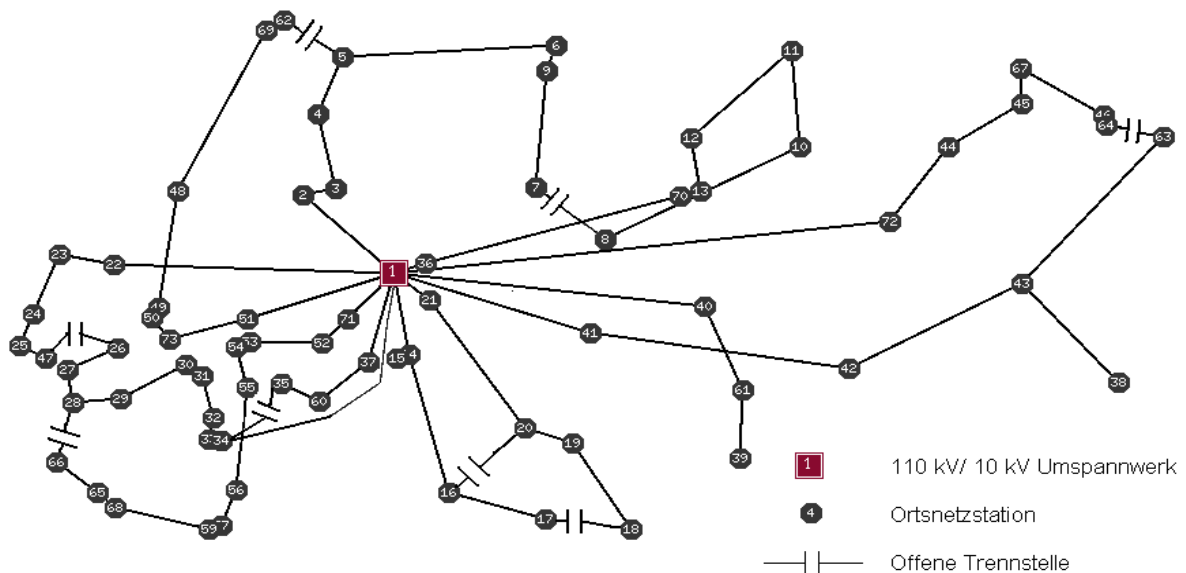


Bild 3.1 Konfiguration des Beispielnetzes für die Zuverlässigkeitsberechnung

Als Beispiel für die Zuverlässigkeitsberechnung wird ein reales Verteilungsnetz betrachtet, dessen Aufbau in Bild 3.1 dargestellt ist. Es handelt sich um ein vermaschtes, strahlenförmig betriebenes Netz mit Netztrennstellen, das über einen Transformator aus dem 110-kV-Netz gespeist wird [6]. Die Stromkreislänge beträgt etwa 27 km mit insgesamt 71 Ortsnetzstationen. Die Anzahl der vorhandenen Muffen ist nicht bekannt und wurde aus der mittleren, der VDEW-Schadens- und Störungsstatistik entnommenen Zahl von 2,75/km-Stromkreislänge angesetzt, was zu einer Gesamtzahl von 74 Muffen in diesem Netz führt. Diese Anzahl mag in Anbetracht der kurzen Kabellängen zwischen den Ortsnetzstationen etwas hoch sein, ergibt sich aber für die in diesem Bericht angestrebte Aussage. Die Spitzenlast am Einspeisetransformator beträgt 28 MVA.

Für die Berechnung der Versorgungszuverlässigkeit wurde das Rechenprogramm ZUBER im Programmpaket INTEGRAL der FGH verwendet. Hierzu war eine Anpassung an die hier bestehende Aufgabe einer zeitlich veränderlichen Ausfallrate im Netz erforderlich, die getrennt von diesem Vorhaben durchgeführt wurde [7].

3.2 VPE-Kabelanlagen

VPE-Kabelanlagen haben eine Fehlerhäufigkeit von durchschnittlich 3 Fehlern/100 km System. Nach der VDEW-Schadens- und Störungsstatistik wird etwa die Hälfte dieser Fehler durch äußere Beschädigungen verursacht, die durch die Qualität des Netzes nicht beeinflusst werden können. Etwa ein viertel der Fehler wird auf Überspannungen und unbekannte Ursachen zurückgeführt und lediglich das verbleibende viertel auf Versagen des Dielektrikums. Da die Zuordnung zu einer unbekanntem Ursache in der Regel aufgrund fehlender näherer Untersuchungen der Fehlerursachen geschieht, ist die Annahme, dass diese Kategorie auch Fehler aufgrund eines Versagens des Dielektrikums enthält, gerechtfertigt. Die Annahme, dass etwa ein Drittel der Fehler auf das Versagen des Dielektrikums zurückzuführen ist, kann als zumindest näherungsweise zutreffend zugrundegelegt werden. Mit den genannten Fehlerraten weisen Kabelanlagen eine den heutigen Ansprüchen der Kunden entsprechende Versorgungszuverlässigkeit auf.

VPE-Kabel haben in den 80er Jahren zu schwerwiegenden Netzausfällen geführt, die auf die Anfälligkeit der Kabel bestimmter Fertigungsjahre zur Ausbildung von Wasserbäumchen zurückzuführen waren. Nach Auftreten der ersten Vielfachfehler im Netz wurde eine große Anzahl von Untersuchungen zum Phänomen "Wasserbäumchen" durchgeführt, so dass die in ihrem Wachstum und in ihrem festigkeitsverringern Einfluss liegenden Gesetzmäßigkeiten hinreichend bekannt sind. Darüber hinaus hat eine vom VDE-Arbeitsausschuss "Kabel" initiierte Fehlerstatistik [3] wesentlich dazu beigetragen, die Anfälligkeit der Kabel abhängig von Hersteller und Fertigungsjahr zu kennen. Das VPE-Kabel eignet sich daher besonders für die hier angestrebten, grundsätzlichen Betrachtungen.

Der Alterungsmechanismus eines VPE-Kabels setzt sich aus drei Stadien zusammen.

- Vorwachsen des Wasserbäumchens
Während des Vorwachsens verändert sich die Spannungsfestigkeit des Kabels merklich. Sie liegt jedoch weit über dem betrieblich erforderlichen Maß, so dass Auswirkungen auf den Betrieb während dieses Stadiums nicht auftreten.
- Erreichen der gegenüberliegenden Leitschicht
Auch wenn das Wasserbäumchen bereits die gesamte VPE-Isolierung überbrückt, kann es noch eine für die betrieblichen Anforderungen ausreichende Festigkeit aufweisen. Eine Vielzahl nach Kabelfehlern festgestellter, durch die gesamte VPE-Isolierung reichender Wasserbäumchen, belegt diese Eigenschaft.
- Umschlag in elektrische Bäumchen
Ein durch die Isolierung wachsendes Wasserbäumchen weitet sich wegen der nicht unterbrochenen Wasserzufuhr aus, und der in ihm fließende Strom führt zu einer örtlichen Austrocknung und dadurch zu Hohlräumen und zur Bildung von elektrischen Bäumchen, die den Durchschlag einleiten. Der Umschlag in das elektrische Bäumchen erfolgt bei Erdschluss-Überspannungen wegen der nahezu doppelten Feldstärke zu einem früheren Zeitpunkt als bei normaler Betriebsspannung. Ebenso führt das elektrische Bäumchen hier schneller zum Durchschlag.

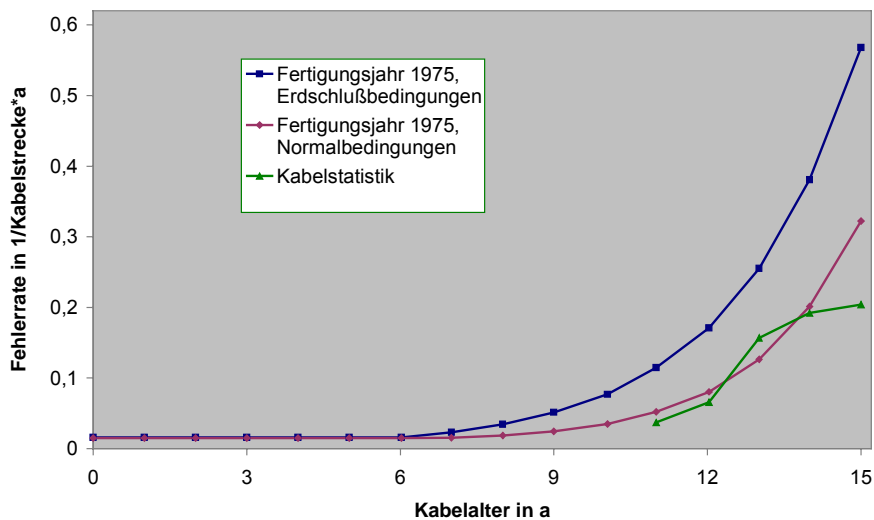


Bild 3.2 Anstieg der Fehlerraten 1975 gefertigter VPE-Kabel mit der Betriebszeit [9]

Die mit diesen Grundsätzen ermittelten Fehlerraten der Kabel sind in Bild 3.2 für VPE-Kabel aus dem Fertigungsjahr 1975 dargestellt. Die grüne Kurve (Dreiecke) gibt die im Betrieb beobachtete Fehlerrate bei Normalbetrieb wieder, wie sie aus der VDEW-Sonderstatistik ent-

nommen wurde. Da sich die Angaben der Kabelstatistik auf eine Kabelstrecke beziehen, muss die für die Zuverlässigkeitsberechnung benötigte längenabhängige Fehlerrate mit Hilfe der mittleren Länge einer Kabelstrecke von 1 km (Siehe Abschnitt 1) umgerechnet werden. Die durch diese Punkte verlaufende rote Kurve (Punkte) ist die Anpassung einer aus der Weibull-Verteilung der Durchschlagswahrscheinlichkeit entwickelten Rate, die in den Zuverlässigkeitsberechnungen zugrundegelegt ist.

Für den Betrieb eines, wie in Deutschland üblich, gelöscht betriebenen Verteilungsnetzes ist das Auftreten eines Erdschlusses für die Versorgungszuverlässigkeit von geringer Bedeutung. In der Regel wird ein festgestellter Erdschluss durch Verlegen der Netztrennstellen geortet und die erdschlussbehaftete Kabelstrecke abgeschaltet. Die Erdschlussdauer liegt zwischen 10 min und 3 Stunden abhängig davon wie schnell die Umschaltungen zur Fehlersuche durchgeführt werden können.

Die durch den Erdschluss verursachte Erdschluss-Überspannung kann nun dazu führen, dass an einer anderen Stelle ein weiteres Wasserbäumchen in ein elektrisches Bäumchen umschlägt und einen Doppelerdschluss verursacht. Die Wahrscheinlichkeit eines solchen Umschlags ist umso höher, je länger der Erdschluss ansteht. Genaue Untersuchungen zur Abhängigkeit dieser Wahrscheinlichkeit von der Dauer der Erdschluss-Überspannung wurden nicht durchgeführt. Hinweise hierzu ergeben sich jedoch aus den in den 80er Jahren durchgeführten, eingehenden Untersuchungen zur Erarbeitung eines Prüfverfahrens zur Ermittlung des Isolationszustands betriebsgealterter VPE/PE-Kabel [5]. Die untersuchten Kabelstrecken hatten bereits Fehler im Betrieb aufgezeigt. Das Verfahren bestand in

- TE-Messung bei $2 U_0$ über 5 min;
- 1. Wechselspannungsstufe bei $3 U_0$ über 1 Stunde
- 2. Wechselspannungsstufe bei $4 U_0$ über 15 min;
- folgende Wechselspannungsstufen über 5 min bis zum Durchschlag.

Die Prüfungen wurden an einer Vielzahl von Kabelproben mit einer Länge von etwa 15 m auch mit unterschiedlichen Zeiten der einzelnen Stufen durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich die folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- etwa 1% der Kabel hatten Teilentladungen und schlugen bereits während der TE-Messung durch. Diese Kabel hatten also Wasserbäumchen, die entweder bereits in elektrische Bäumchen umgeschlagen waren oder während dieser Zeit umschlugen.

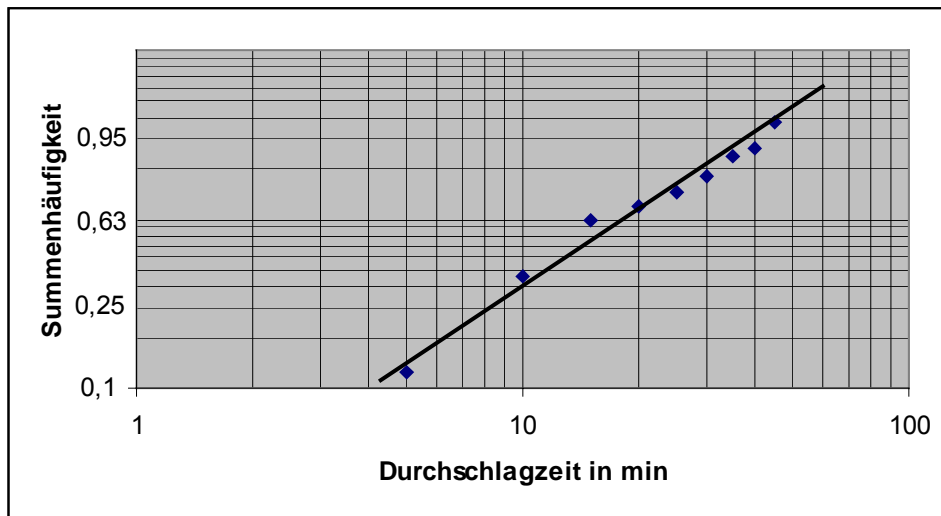


Bild 3.3 Summenhäufigkeit der Durchschlagzeiten im Stufentest bei 3 U₀ an betriebsgealterten VPE-Kabeln [5].

- 50% aller untersuchten Kabelstücke schlugen in der einstündigen Prüfung bei 3 U₀ durch. Sie zeigten bei der vorhergehenden TE-Messung keine Teilentladungen, d.h. das Wasserbäumchen ist in dieser Stufe in ein elektrisches Bäumchen umgeschlagen und dieses hat den Durchschlag herbeigeführt. Die hierbei festgestellten Durchschlagzeiten bekannt. Bild 3.1 zeigt die Summenhäufigkeit der festgestellten Durchschlagzeiten in der Achsen- teilung nach Weibull. Die Summenhäufigkeit folgt der Weibull-Gleichung

$$P_{3U_0} = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T_0}\right)^\gamma}$$

mit $T_0 = 18 \text{ min}$
 $\gamma = 1,5$

Die Durchschlagzeiten bei 2 U₀ sind nicht bekannt und müssen geschätzt werden. Hierfür kann die Beobachtung zugrundegelegt werden, dass keines der 43 geprüften Kabelstücke bei der fünfminütigen TE-Messung durchgeschlagen ist. Die Wahrscheinlichkeit hierzu ist

$$P = 1 - (1 - P_{2U_0})^n = 0,5$$

wobei P_{2U0} die Wahrscheinlichkeit, bei 2 U_0 nach 5 min durchgeschlagen zu haben, und n die Anzahl der geprüften Kabel gleich 43 ist. Es ergibt sich eine für die 5minütige Prüfzeit eine Wahrscheinlichkeit von $P_{2U0} = 1,6\%$, was gut mit dem erwähnten, gemessenen Wert von 1% übereinstimmt. Bei 3 U_0 lag nach 5 min die Wahrscheinlichkeit bei 11,6%, d.h. um einen Faktor von 7,3 höher. Unter der Annahme, dass dieser Faktor über dem gesamten Wahrscheinlichkeitsbereich gleich ist, folgt die Durchschlagwahrscheinlichkeit bei 2 U_0 der Weibull-Gleichung

$$P_{2U0} = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T_0}\right)^\gamma}$$

mit $T_0 = 131$ min und $\gamma = 1,5$.

Im Stufentest geprüft wurden Kabelstücke mit 15 m Länge. Im Netz sind bei einem Erdschluss zwei Leiter mit einer Länge von durchschnittlich 1000 m betroffen, d.h. 133 solcher Kabelstücke. Die Wahrscheinlichkeit, dass auf einem der beiden Leiter ein Folgefehler auftritt, wäre dann

$$P_{F2U0} = 1 - e^{-133\left(\frac{T}{T_0}\right)^\gamma} = 1 - e^{-\left(\frac{T}{T_{0F}}\right)^\gamma}$$

mit $T_{0F} = 5$ min.

Bei sehr kurzen Erdschlusszeiten wie im Netz mit geerdetem Sternpunkt oder bei Erdschlusswischern im Freileitungsnetz wäre die Wahrscheinlichkeit eines Folgefehlers praktisch 0, im Netz mit Erdschlusslöschung mit Erdschlussdauern größer 10 min praktisch gleich 1.

Die Ergebnisse aus den Stufentests an betriebsgealterten Kabeln eignen sich nicht, Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit eines Folgefehlers auf einer Kabelstrecke zu berechnen, da die geprüften Kabelproben aus Strecken stammten, die bereits mehrere Fehler während des Netzbetrieb, d.h. definitiv eine Fehlerwahrscheinlichkeit von 100%, hatten. Beim Auftreten eines einfachen Erdschlusses wurden die Kabel weiter betrieben und nicht ausgewechselt.

Hinweise zur Schätzung der Wahrscheinlichkeit eines Folgefehlers auf einer Kabelstrecke ergeben sich aus der betrieblichen Beobachtung, dass nach Auftreten eines ersten Fehlers im Normalbetrieb ein zweiter Fehler nach kurzer Zeit auftrat, wenn es sich um einen Kabeltyp mit hoher Fehlerrate handelte. Weitere Hinweise ergeben sich aus der Beobachtung, dass für den Durchschlag sowohl im Normalbetrieb als auch im Erdschluss das Wasserbäumchen bereits durch die VPE-Isolation des Kabels gewachsen sein muss. Für den Durchschlag bei Erdschluss muss das Wasserbäumchen im Volumen lediglich etwas geringer ausgeprägt sein. Beide Beobachtungen führen zu der Abschätzung, dass sich die Wahrscheinlichkeit eines Folgefehlers bei Erdschluss um einen konstanten Betrag zeitlich früher verläuft als die Fehlerwahrscheinlichkeit im Normalbetrieb. In dem hier betrachteten Beispiel wurde eine zeitliche Verschiebung der beiden Fehlerwahrscheinlichkeiten um ein Jahr abgeschätzt.

Die blaue Kurve (Vierecke) in Bild 3.2 gibt die Rate wieder, mit der ein solcher Folgefehler an einem Kabel gleichen Typs erfolgt, wobei in diesem Beispiel eine ausreichend lange Erdschlussdauer zugrundegelegt ist. Da der Umschlag eines Wasserbäumchens in ein elektrisches Bäumchen bei Erdschlussüberspannung zu einem früheren Stadium des Wasserbäumchens erfolgen muss als im Normalbetrieb, liegt diese Rate vor der Fehlerrate für den Normalbetrieb, was sich in einer höheren Wahrscheinlichkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt ausdrückt.

Unter der Annahme, dass das gesamte beschriebene Netz aus Kabeln des Fertigungsjahres 1975 besteht, ergeben sich zeitliche Verläufe der Zuverlässigkeitsparameter, Unterbrechungshäufigkeit und nicht zeitgerecht gelieferte Energie, wie sie in Bild 3.4

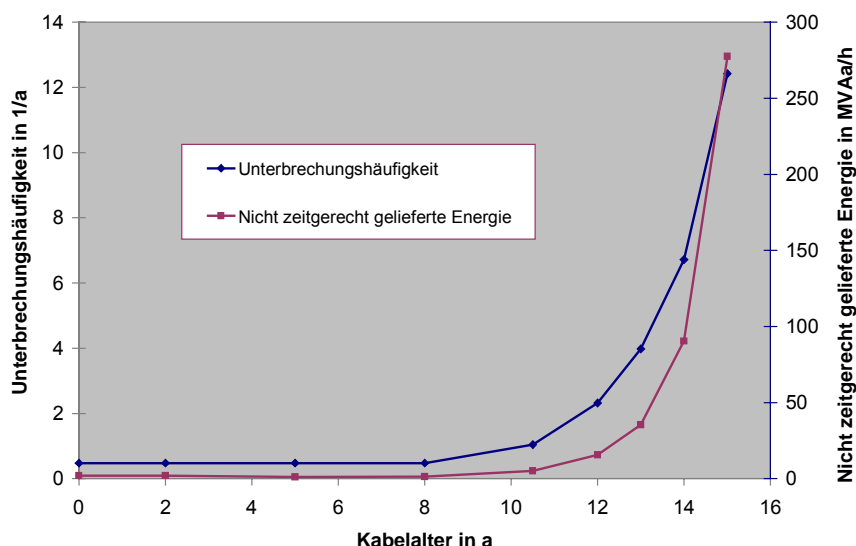


Bild 3.4 Anstieg der Unterbrechungshäufigkeit und der nicht zeitgerecht gelieferten Energie mit der Betriebszeit. VPE-Kabel nach Bild 5.

dargestellt sind. Es ist festzustellen, dass ab einem Alter von 12 Jahren ein rapider Anstieg der Unterbrechungshäufigkeit und etwas verzögert der nicht zeitgerecht gelieferten Energie ergibt. Aus den Ergebnissen verdienen zwei Gesichtspunkte hervorgehoben zu werden:

- Bis zu einem Kabelalter von 8 Jahren liegt die Unterbrechungshäufigkeit bei 0,5 pro Jahr. Sie ist bestimmt durch die Kabellänge von 27 km und der für Kabelnetze üblichen Fehler-rate von etwa 2 pro 100 km für Fehler mit Kurzschluss oder Doppelerdschluss.
- Nach 8 Jahren steigt die Unterbrechungshäufigkeit aufgrund der angenommenen Kabelalterung an und erreicht bei etwa 12 Jahren das Vierfache des Ausgangswertes. Der Vergleich der in Deutschland und im benachbarten Ausland üblichen Unterbrechungshäufigkeiten zeigt, dass ab diesem Zeitpunkt die Versorgungszuverlässigkeit nicht mehr dem anzustrebenden Standard entspricht [8].

Zum gleichen Zeitpunkt steigt auch die nicht mehr zeitgerecht gelieferte Energie im Netz merklich an.

- Nach dem merklichen Anstieg der Unterbrechungshäufigkeit bei einem Kabelalter von 12 Jahren sinkt die Zuverlässigkeit des Netzes so rapide, dass diese bereits zwei Jahre später als unannehmbar gering angesehen werden muss. Dies bedeutet, dass bereits zu einem Zeitpunkt, zu dem die Zuverlässigkeit des Netzes mit lediglich zwei Unterbrechungen pro Jahr noch ausreichend zu sein scheint, Maßnahmen zum Ersatz der Kabel entschieden werden müssten, da die Ausführung der beschlossenen Maßnahmen einige Zeit erfordern.
- Die Zuverlässigkeit des Netzes wird hauptsächlich durch die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der die Erdschlussüberspannung einen Folgefehler und somit einen Doppelerdschluss verursacht. In der Regel wird diese Wahrscheinlichkeit in den Statistiken nicht berichtet und man muss Ausnahmen machen, um sie aus den nachgehaltenen Daten abzuschätzen.

Die Annahme, dass das gesamte Netz aus Kabeln des gleichen Fertigungsjahres besteht, ist der "worst-case", da die zwischen 1975 und 1978 gefertigten Kabel sich als besonders anfällig gegen Wasserbäumchen erwiesen haben. Bei Kabeln unterschiedlicher Fertigungsjahre verlaufen die Kurven flacher, d. h. Unterbrechungshäufigkeiten und nicht zeitgerecht gelieferte Energien steigen für das Gesamtnetz nicht so rapide an wie in Bild 3.4. Der Netzteil, der über die Kabel von 1975 bis 1977 versorgt wird, verhält sich aber ähnlich.

Die Mitte der 80er Jahre an den Kabeln der Fertigungsjahre 1975 bis 1977 im Netz gemachten Erfahrungen bestätigen die in den Bildern 3.2 und 3.4 dargestellten Verhältnisse. Wenn die Entscheidung für eine Auswechslung der Kabel zu spät getroffen wurde, verblieb keine ausreichend lange Zeit für den Ersatz der Kabel, bevor die Unterbrechungshäufigkeit

bis in unakzeptabel hohe Werte anstieg. Hierbei kommt erschwerend hinzu, dass die in Bild 3.4 dargestellten Unterbrechungshäufigkeiten Erwartungswerte sind, die in Betrieb entstehenden Unterbrechungen dagegen ganze Zahlen um den Erwartungswert. Im betrachteten Beispielnetz mit 27 km Länge liegt der Erwartungswert der Unterbrechungshäufigkeit etwa bei 2 pro Jahr. Bei einem halb so großen Netz würde sich ein Erwartungswert von 1 Unterbrechung pro Jahr ergeben, ein Wert der üblich ist und kein Anlass zu Bedenken und daher Reaktionen gibt. Die zeitliche Weiterentwicklung ist aber gleich und nach zwei Jahren würden auch in diesem Netz unannehmbar hohe Unterbrechungshäufigkeiten auftreten. Dies heißt, dass das Abwarten ungewöhnlich hoher Fehlerzahlen umso kritischer wird, je kleiner ein betroffenes Netz oder Teilnetz ist, eine Tatsache, die ebenfalls aus der Betriebserfahrung bestätigt wird.

3.3 Folgerungen für Papiermasse-Kabelanlagen

Maßgebend für die Versorgungszuverlässigkeit sind zwei Eigenschaften eines Kabelnetzes:

- Die zeitliche Entwicklung der Fehlerwahrscheinlichkeit im Normalbetrieb des Netzes.
- Die zeitliche Entwicklung der Wahrscheinlichkeit eines Folgefehlers im Erdschlussfall des Netzes.

Beide müssen über das Normale ansteigen, um die Versorgungszuverlässigkeit rapide unter das vorhandene Niveau absinken zu lassen. Steigt zum Beispiel nur die Fehlerwahrscheinlichkeit im Erdschlussfall an, kann die Unterbrechungshäufigkeit maximal die Erdschluss-häufigkeit in einem Netz erreichen, wenn diese Wahrscheinlichkeit den höchstmöglichen Wert 1 annimmt. Sie würde in dem Beispielnetz nach Bild 3.1 lediglich zu einem Anstieg der Unterbrechungshäufigkeit auf das doppelte des ursprünglich vorhandenen Werts führen. Würde nur die Fehlerwahrscheinlichkeit im Normalbetrieb ansteigen und die im Erdschlussfall konstant bleiben, würde die Unterbrechungshäufigkeit proportional zu dieser Wahrscheinlichkeit verlaufen. Erst bei gleichzeitigen Anstieg kommt es zu dem dargestellten drastisch schnellen Anwachsen der Unterbrechungshäufigkeiten mit der Zeit.

Für VPE-Kabel der kritischen Fertigungsjahre sind ausreichend Kenntnisse über das Fehlerverhalten mit der Zeit vorhanden und die erforderlichen Eingangsdaten für eine Zuverlässigkeitsberechnung können mit guter Genauigkeit abgeschätzt werden. Für Papiermasse-Kabelanlagen fehlen solche Grundlagen noch völlig. Die Betriebserfahrungen scheinen darauf hin zu deuten, dass Ausfälle von Kabeln hauptsächlich auf

- fehlerhafte Garnituren wie undichte Muffen oder unzureichend mit Masse gefüllte Endverschlüsse oder
- Zerstörung des Bleimantels der Kabel durch Korrosion (Bleifraß)

zurückzuführen sind. Diese Gründe waren zumindest in der Vergangenheit maßgebend und es ist nicht bekannt, ob sich die Sachlage mit zunehmenden Alter dieser Kabel ändert.

Die notwendigen Eingangsdaten für die Bestimmung der Versorgungszuverlässigkeit sind bekannt. Die Verfahren hierzu sind vorhanden. Benötigt werden Hinweise zu den folgenden Abhängigkeiten:

- Die zeitliche Entwicklung der Fehlerwahrscheinlichkeit im Normalbetrieb;
- Die zeitliche Entwicklung der Fehlerwahrscheinlichkeit im Erdschlussfall;
- Die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers in Abhängigkeit von der Erdschlussdauer.

Im Grundsatz müssten diese Abhängigkeiten für jeden Kabeltyp getrennt erstellt werden. Bis heute sind jedoch typspezifische Fehlerraten nur für einige Muffentypen aufgetreten, die sich nicht mehr im Netz befinden. Hinweise, die auf ein besonders auffälliges Verhalten bestimmter Typen hindeuten, bestehen nicht. Es wird daher als vorläufig ausreichend angesehen, globale Angaben für das Papiermasse-Kabelnetz insgesamt zu erhalten. Diese Aufgabe soll durch Vor-Ort-Untersuchungen an solchen Kabelanlagen angegangen werden.

4 Vor-Ort-Untersuchungen an Papiermasse-Kabelanlagen

4.1 Auswahl der Spannungserzeugungsanlage

Bei der Planung des Forschungsvorhaben standen zur Erzeugung der Prüfspannung vor Ort drei Alternativen zur Auswahl:

- *50-Hz-Wechselspannungsanlage mit Hochspannungs- und Regeltransformator.*
Papiermassekabel haben Kapazitätsbeläge bis zu $0,5 \mu\text{F}/\text{km}$ und benötigen bei der angestrebten Prüfspannung von $2 U_0$ für ein 20-kV-Kabel eine Scheinleistung von etwa 100 kVA. Hochspannungs- und Regeltransformator müssen für solche Leistungen ausgelegt sein, und die Einspeiseleistungen müssen dem Regeltransformator vor Ort einphasig zur Verfügung gestellt werden. Die Gewichte der Prüfanlagen und insbesondere die benötigten Einspeiseleistungen aus dem Niederspannungsnetz sind so hoch, dass diese Alternative von vorneherein ausfallen musste.
- *Resonanzprüfanlage zur Erzeugung von Wechselspannungen mit Frequenzen um 50 Hz.*
Hierfür reduzieren sich die Gewichte der Prüfanlagen etwa um den Faktor 3. Insbesondere erniedrigt sich die benötigte Einspeiseleistungen um Faktoren, so dass ein Anschluss solcher Resonanzanlagen an das vorhandene Niederspannungsnetz keine Probleme bietet. Die Frequenz der Prüfspannung ist ausreichend nahe an 50 Hz, so dass keine wesentlichen Änderungen zu den Vorgängen im Dielektrikum im Vergleich zu 50 Hz befürchtet werden müssen.

- *0,1-Hz-Wechselspannungsprüfanlage.*

Solche Anlagen haben das geringste Gewicht und erfordern geringe Leistungen des Versorgungsnetzes. Die Frequenz der Prüfspannung liegt aber um den Faktor 500 unterhalb der Betriebsfrequenz und es musste überlegt werden, ob solche Anlagen für die hier zu lösende Aufgaben geeignet sein könnte.

Ältere Papiermassekabel haben bei Betriebsfrequenz Verlustfaktoren bis zu 0,1 oder mehr. Dies bedeutet in der Ersatzvorstellung, dass das Papiermasse-Dielektrikum durch die Parallelschaltung einer Kapazität und eines Widerstands angesehen werden kann, wobei der Widerstand bei 50 Hz um den Faktor 10 größer ist als der kapazitive Blindwiderstand. Bei dieser Frequenz ist der durch die Kapazität fließende Strom 10fach höher als der durch den Widerstand und die Potentialverteilung innerhalb der Isolierung folgt der kapazitiven Potentialverteilung, also der Dielektrizitätskonstanten der Isolation. Bei Gültigkeit des gleichen Ersatzschaltbildes wäre für 0,1-Hz-Wechselspannungen der Strom durch den Widerstand gleich dem bei 50 Hz, der Strom durch die Kapazität wäre aber 500fach geringer. Die Potentialverteilung würde damit dem ohmschen Strom, also der Leitfähigkeit der Kabelisolation folgen.

Obwohl nicht angenommen werden kann, dass der ohmsche Widerstand aufgrund der mit der Frequenz abfallenden Polarisationsverluste mit fallender Frequenz konstant bleibt, muss doch damit gerechnet werden, dass die Spannungsverteilung innerhalb des Kabels bei 0,1 Hz nicht dieselbe ist wie bei 50 Hz. Abhängig von der Aufgabenstellung mag dies nicht von Nachteil sein, da der erhöhte Verlustfaktor auf eine Degradierung der Papiermasseisolation zurückgeführt werden muss und die bei niedrigen Frequenzen ungünstiger werdende Potentialverteilung eher zu Entladungsvorgängen führt als die günstigere bei 50 Hz. Wenn man also davon ausgeht, dass ein Kabelnetz aufgrund erhöhter Fehlerraten bereits unzulässig gealtert ist und die Vor-Ort-Prüfung besonders kritische Stellen aufdecken soll, dann ist eine Prüfung mit 0,1 Hz durchaus vorteilhaft und wird angewendet [4].

In dem vorliegenden Forschungsprojekt soll jedoch festgestellt werden, ob eine Kabelstrecke bei Betriebsfrequenz unzulässige Eigenschaften oder gar Durchschläge aufweist. Das Risiko einer Verfälschung der Aussagen durch eine evtl. nicht dem Betrieb entsprechende Potentialaufteilung innerhalb der Isolation konnte nicht eingegangen werden. Aus diesem Grund wurde die Verwendung einer Resonanzprüfanlage entschieden.

4.2 Eigenschaften der Resonanzprüfanlage

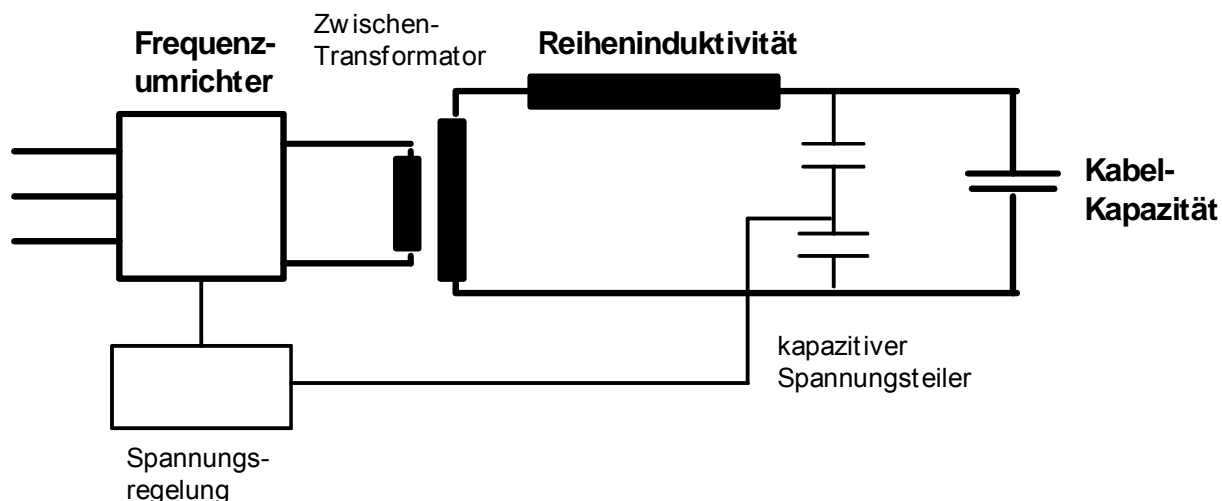


Bild 4.1 Hauptelemente des Resonanz-Prüfsystems WRV 6/50 der Firma HighVolt

Resonanzprüfanlagen sind für die Prüfung von Komponenten mit hohen Kapazitäten konzipiert und eignen sich daher insbesondere für die Prüfung von Kabeln. Sie besitzen eine Induktivität in Reihe mit dem zu prüfenden Kabel und bei Resonanz ergibt sich am Prüfling eine Spannungserhöhung, die abhängig von den Verlusten im Prüfling ist. Resonanz-Prüfanlagen können mit zwei Prinzipien arbeiten:

- Einspeisung einer Spannung mit konstanter Frequenz, z.B. 50 Hz, und Abstimmung der Reiheninduktivität auf Resonanz mit der Prüflingskapazität. Ältere Anlagen arbeiten mit diesem Prinzip.
- Verwendung einer konstanten Reiheninduktivität und Abstimmung der Frequenz der speisenden Spannung auf Resonanz. Nach dem heutigen Sprachgebrauch versteht man unter Resonanz-Prüfanlagen Anlagen, die nach diesem Prinzip arbeiten.

Die für dieses Forschungsprojekt eingesetzte Resonanz-Prüfanlage WRV 6/50 der Firma HighVolt, Dresden ist mit den Hauptelementen in Bild 4.1 dargestellt. Die Hauptdaten der Anlage sind:

Höchste Prüfspannung:	50 kV
Höchster Prüfstrom:	6 A
Frequenzbereich:	30 – 300 Hz

Die Arbeitsweise und die Kenndaten der wichtigsten Elemente der Anlage sind wie folgt:

- Frequenzumrichter

Der Frequenzumrichter ist ein klassischer Umrichter mit 6puls Gleichrichter, Gleichspannungs-Zwischenkreis und IGBT-Wechselrichter in Brückenschaltung. Die erzeugte Ausgangsspannung ist rechteckförmig und frequenzvariable. Bild 4.2 zeigt den typischen Verlauf der Ausgangsspannung. Die Einstellung der Prüfspannung geschieht durch Veränderung der Einschaltzeiten T_{ein} der Rechteckimpulse, die zwischen 2% und 85% der Halbperiode $T/2$ variiert werden kann. Die Amplitude der Spannung bleibt konstant.

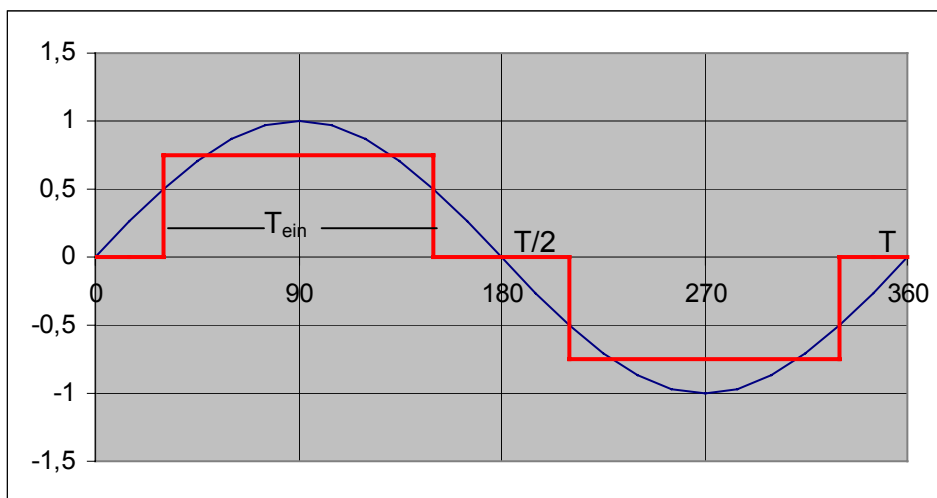


Bild 4.2 Ausgangsspannung des Frequenzumrichters der Resonanz-Prüfanlage

- Die Hauptdaten des Frequenzumrichters sind
 - Eingangsspannung: 400 V Drehstrom, 43 kVA max
 - Ausgangsspannung: 500 V max., (Effektivwert der Grundschwingung)
 - Frequenz: 30 – 300 Hz
 - Ausgangsstrom: 70 A max.

- Hochspannungstransformator
 - Primärspannung: 600 V
 - Sekundärspannung: 600 – 1800 – 2400 – 3600 V
 - Ausgangsstrom: 6 A max.
 - Leistung: 21,6 kVA

- Reihenresonanz-Drosselspule
 - Nennspannung: 50 kV
 - Nennstrom: 6 A
 - Nenninduktivität: 44 H

Die Hauptelemente des Resonanzprüfsystems sind in Bild 4.3 wiedergegeben. Das Gesamtgewicht der Anlage einschließlich Zubehör beträgt etwa 1,5 to.



Bild 4.3 Ansichten des Resonanz-Prüfsystems als Einzelelemente (links) und nach Einbau im Transport- und Messwagen (rechts)

4.3 Konzept der Vor-Ort-Untersuchungen und Anwendungsbereiche des Resonanz-Prüfsystems

Da es das Ziel der Untersuchungen war, Ergebnisse über den Zustand von betrieblichen Kabelanlagen zu erhalten, war es eine der Grundbedingungen, dass die Kabel und deren Garnituren durch die Vor-Ort-Untersuchungen nicht beeinträchtigt werden. Es wurde daher beschlossen, die Prüfspannungen nicht über die auch im Betrieb auftretenden Spannungsbeanspruchungen zu erhöhen, wobei jedoch die Spannungserhöhung im Erdschlussfall zu berücksichtigen war. Die höchste Prüfspannung gegen Erde ergab sich damit zu $2 U_0$, wobei dieser Wert im Mittelspannungsbereich der höchstzulässigen Betriebsspannung zwischen Leitern und damit der höchsten, im Erdschlussfall gegen Erde auftretenden Spannung ist.

Die maximal erforderlichen Prüfspannungen war damit zu 12 kV für 10-kV- und zu 24 kV für 20-kV-Kabelanlagen festgelegt. Bei der Planung von solchen Resonanzanlagen müssen zwei die Anwendbarkeit begrenzende Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- Die sich einstellende Prüffrequenz ist allein abhängig von der Größe der Kapazität. Bild 4.4 links, zeigt diese Abhängigkeit. Da die niedrigste Frequenz 30 Hz ist, ist die maximal zulässige Kapazität etwa gleich $0,6 \mu\text{F}$. Papiermassekabel haben einen hohen Kapazi-

tätsbelag von etwa 450 bis 480 nF/km, so dass die mit dieser Anlage maximal prüfbar Kabellängen bei 1,3 km liegen.

Der bei 24 kV fließende Strom beträgt für diese maximale Kapazität lediglich etwa 3 A. Der zulässige Strom von 6 A würde sich erst bei einer Prüfspannung von 50 kV einstellen.

- Die zweite begrenzende Bedingung ergibt sich aus der erforderlichen Spannungserhöhung bei der Serienresonanz. Die maximale Ausgangsspannung des Hochspannungstransformators beträgt 3,6 kV und eine vorgegebene Resonanzhöhung ist zum Erreichen der geforderten Prüfspannung erforderlich. Dies ist nur möglich, wenn der Verlustfaktor der Kabel bestimmte Werte nicht überschreitet. Die maximalen Verlustfaktoren sind in Bild 4, rechts, angegeben.

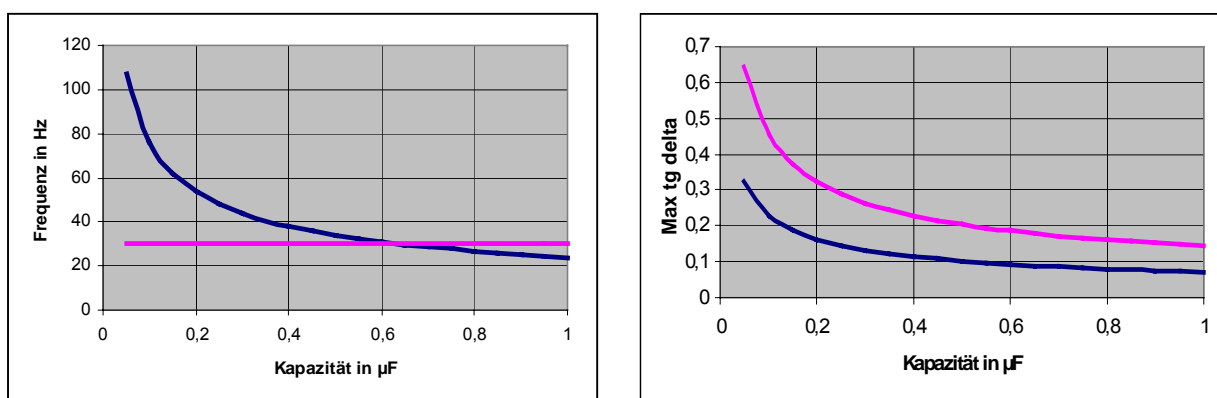


Bild 4.4 Grenzen für die maximal mögliche Prüflingskapazität aus:

Links: der sich einstellenden niedrigsten Prüffrequenz von 30 Hz

Rechts: dem höchstmöglichen Verlustfaktor $\text{tg } \delta$ für die Prüfspannung 24 kV (unten) und 12 kV (oben).

Bei Vor-Ort-Untersuchungen können sich die beiden begrenzenden Faktoren störend auswirken, da sie die Länge der zu prüfenden Kabel beschränken. Die Beschränkung in der niedrigst möglichen Prüffrequenz kann entweder durch die Parallelschaltung einer zweiten Drossel oder durch Reihenschaltung eines Kondensators zum Kabel erhöht werden. Beide Maßnahmen haben sich als wirksam erwiesen, doch wirken sie sich auch auf den höchstzulässigen Verlustfaktor aus.

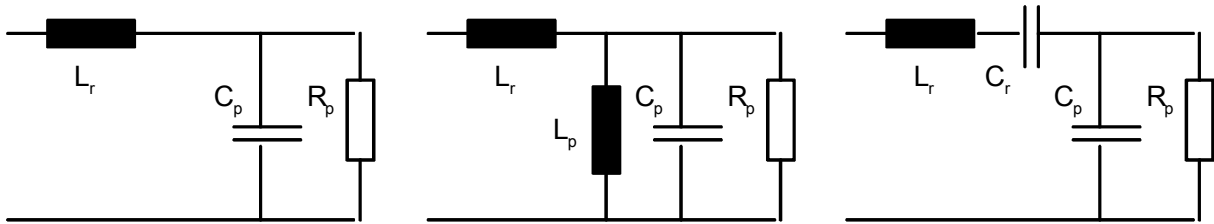


Bild 4.5 Möglichkeiten zur Erhöhung der Resonanzfrequenz

Links: Originalschaltung

Mitte: Erhöhung der Resonanzfrequenz durch Parallelinduktivität

Rechts: Erhöhung der Resonanzfrequenz durch Serienkapazität

Bild 4.5 zeigt die beiden Möglichkeiten zur Erhöhung der Resonanzfrequenz des Reihenschwingkreises:

- **Originalschaltung (Bild 4.5, links)**

Die Resonanzfrequenz liegt bei

$$f_{links} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_p}}$$

Die sich ergebende Spannungserhöhung ist

$$v = R_p \sqrt{\frac{C_p}{L_r}}$$

- **Paralleschaltung einer Induktivität zum Prüfling (Bild 4.5, mitte)**

Durch die parallel zum Prüfling liegende Induktivität erhöht sich die Resonanzfrequenz um einen Faktor

$$\frac{f_{mitte}}{f_{links}} = \sqrt{1 + \frac{L_r}{L_p}}$$

Die Spannungserhöhung bei Reihenresonanz erniedrigt sich jedoch um den gleichen Faktor. Der zweiten, aus den Verlustfaktoren resultierende Bedingung wirkt also mehr.

Das Verfahren wurde an einem 1940 m langen 20-kV-Kabel mit einer bei der FGH vorhandenen Induktivität von 59 H erprobt. Die Kabelkapazität war 0,94 μF und die sich ohne Beschaltung ergebende Resonanzfrequenz lag mit 24,8 Hz unterhalb der niedrigst möglichen Frequenz. Durch die Parallelinduktivität erhöhte sich die Resonanzfrequenz um einen Faktor von 1,31 auf 32,7 Hz und die Prüfung konnte begonnen werden. Die höchste erreichte Spannung war lediglich 20,6 kV, was bei einer Speisespannung von 3,6 kV einer Resonanzerhöhung von 5,7 entspricht. Dies würde einem Widerstand von $R_p=51 \text{ k}\Omega$ oder einem $\text{tg } \delta$ von 0,07 entsprechen. Verlustfaktoren in dieser Höhe sind zu erwarten und bei betriebstüchtigen Kabeln üblich.

- **Reihenschaltung einer Kapazität zum Prüfling (Bild 4.5, rechts)**

Durch die in Reihe zum Prüfling liegende Kapazität erhöht sich die Resonanzfrequenz um einen Faktor

$$\frac{f_{rechts}}{f_{links}} = \sqrt{1 + \frac{C_p}{C_r}}$$

Die Resonanzerhöhung erhöht sich um den gleichen Faktor. Der Nachteil der Schaltung ist, dass sich die Ausgangsspannung an der Ausgangseite der Reihen-Drosselspule um das Quadrat dieses Faktors erhöht. Für eine Prüfspannung von 24 kV muss die Reihenskapazität größer als die Prüflingskapazität sein, damit die Drosselspule zugelassene maximale Spannung von 50 kV nicht überschritten wird. Dies engt den zulässigen Bereich für die Reihenskapazität sehr ein, da sie einmal genügend klein sein muss, um die Resonanzfrequenz zu erhöhen, zum anderen höher als die Kapazität des Prüfkabels sein muss. Für das oben genannte Beispiel wäre eine Kapazität von maximal 2 μF nötig, um die Resonanzfrequenz in den gegebenen Bereich anzuheben. Sie darf aber aus Spannungsgründen nicht größer als 1 μF sein. Alle Kapazitäten in diesem Bereich wären geeignet. Das Konzept wurde bisher nicht am praktischen Beispiel erprobt, da eine geeignete Kapazität nicht zur Verfügung stand. Zukünftig wird diesem Konzept wegen der weniger ausgeprägten Bedeutung des Verlustfaktors mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden müssen.

Zum Abschluss muss angemerkt werden, dass die Verwendung einer Resonanzprüfanlage dann eingehende Überlegungen erfordert, wenn die Leistungsgrenzen der Anlage erreicht werden. Aufgrund der für eine Reihenresonanzanlage notwendigen Resonanz-erhöhungen der Ausgangsspannungen reichen hierfür einfache Spannungs- und Strom-überlegungen nicht aus.

4.4 Teilentladungsmessung

Die Teilentladungsmessung wurde mit dem Teilentladungsmesssystem LDS-6 der Lemke Diagnostics GmbH durchgeführt. Das Messgerät arbeitet nach dem Prinzip der phasenbezogenen Teilentladungsmessung, welches durch die folgenden Haupteigenschaften beschrieben ist:

Die Teilentladungsmessung erfolgt innerhalb von 256 gleichmäßig über eine Periode der Wechselspannung. Die innerhalb jedes Intervalls gemessene Teilentladungsintensität wird getrennt gespeichert und kann u.a. phasenbezogen dargestellt werden (phase resolved pd measurement).

Das Messgerät wird auf die Frequenz der Prüfspannung synchronisiert, so dass die Intervalle in der Zeitdauer veränderlich sind, in ihrer Phasenbezogenheit jedoch unverändert bleiben.

Die Teilentladungsmessung ist sehr breitbandig und eignet sich damit besonders für die TE-Messung an langen Kabeln, da hier bei Teilentladungen in der Nähe der Ankopplung sehr kurze Stromimpulse mit hoher Amplitude und bei entfernten Teilentladung aufgrund der Dämpfung im Kabel lange Strompulse mit kleiner Amplitude gemessen werden müssen.

Mit Ausnahme dieser Besonderheiten ist die TE-Messung konventionell und entspricht den Normen IEC 60270 (VDE 0434).

Teilentladungsmessungen werden durch die Ansteuerung der IGBT im Resonanzprüfsystem (Siehe Abschnitt 4.2) gestört. Aus diesem Grunde gibt dieses System kurz vor der Ansteuerung ein Signal mit einstellbarer Dauer ab, mit dem die TE-Messung ausgesetzt werden kann. Das TE-Messsystem ist hierfür ausgerüstet, so dass Störungen durch die IGBT-Ansteuerung ausgeschlossen sind.

Durch die Kombination der frequenzunabhängigen phasenbezogenen TE-Messung mit einer Resonanzprüfanlage mit Frequenzen, die verschieden von der Betriebsfrequenz sind, ergibt sich der Vorteil, dass äußere Störungen gut von einer Teilentladung im Kabel zu unterscheiden sind. Bild 4.6 gibt hierfür ein Beispiel aus den in Abschnitt 5 wiedergegebenen Messergebnissen. Durch die phasenbezogene Darstellung sind die im Kabel auftretenden Teilentladungen mit der Prüfspannung synchronisiert und treten dadurch gehäuft in bestimmten

Phasenlagen auf. Störungen sind in der Regel auf die Betriebsfrequenz der Anlage 50 Hz synchronisiert und verändern ihre Lage zur Prüfspannung stetig.

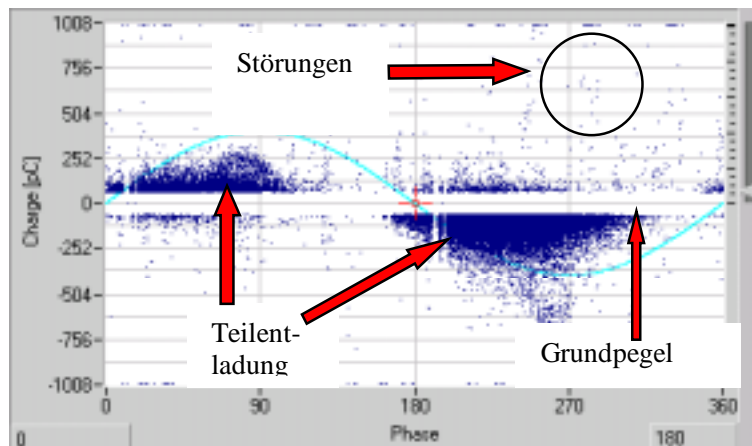


Bild 4.6 Beispiel einer phasenbezogenen TE-Messung an einem Kabel mit Unterdrückung des Grundstörpegels

Wenn die äußeren Störimpulse zu häufig auftreten, überdecken sie die tatsächlichen Teilentladungen. Messungen innerhalb dieses Pegels, in Bild 4.6 als Grundpegel gekennzeichnet, sind nicht möglich und werden normalerweise ausgeblendet.

Alle aufgezeichneten Teilentladungen innerhalb einer festgelegten Messperiode werden auf einer im Messgerät integrierten Festplatte gespeichert und stehen für spätere Auswertungen zur Verfügung.

4.5 Teilentladungsortung

Die Ortung einer Fehlstelle in einem Kabel geschieht unter Ausnutzung seines Laufzeitverhaltens. Das in Bild 4.7 dargestellte Prinzip beruht auf den folgenden Vorgängen innerhalb eines Kabels:

- An der Fehlstelle im Kabel entstehen durch Teilentladungen Spannungsimpulse auf dem Kabelleiter gegen den Kabelschirm. Teilentladungen sind schnelle Durchschläge über einen Teil der Isolation. Die Höhe der Teilentladungen hängt von der Durchschlagspannung und der dadurch kurzgeschlossenen Teilkapazität der Fehlstelle ab. Die scheinbare Ladung ist der Anteil, der über die sehr kleinen Kapazitäten von der Fehlstelle zum Leiter und zum Schirm ausgekoppelt wird. Der an der Fehlstelle entstehende Spannungsimpuls hat die Form einer abklingenden Exponentialfunktion mit einer Amplitude gleich der Durchschlagspannung der Fehlstelle, beträgt also einige kV. Die Zeitkonstante ist bestimmt durch den halben Wellenwiderstand des Kabels von etwa 30 Ohm und die wirk-

same Kopplungskapazität von wenigen pF, liegt also in der Größenordnung von einigen 10 ps.

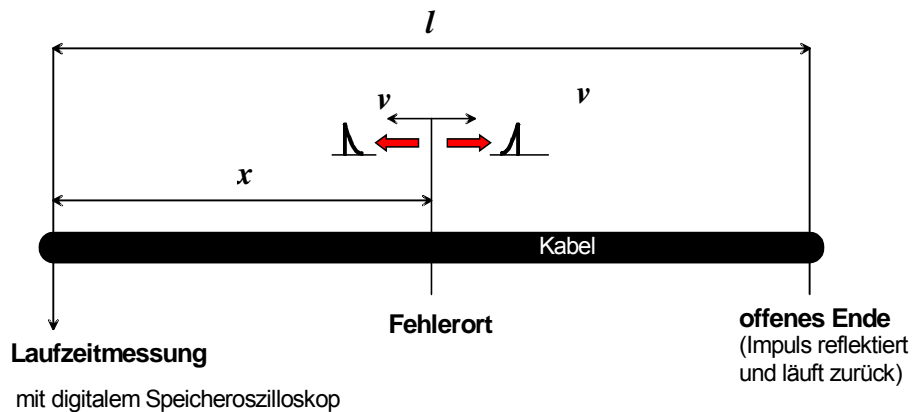


Bild 4.7 Prinzip der Ortung von Teilentladungen durch das Laufzeitverfahren

- Der Teilentladungsimpuls läuft mit der Wanderwellengeschwindigkeit des Kabels zum einspeisenden Anfang und zum offenen Ende des Kabels. Die Ortungseinrichtungen befindet sich in der Regel am einspeisenden Anfang des Kabels. Der dorthin laufende TE-Impuls erreicht den Kabelanfang nach der Zeit:

$$T_1 = \frac{x}{v}$$

- x: Entfernung vom Kabelanfang
- v: Wanderwellengeschwindigkeit des Kabels

- Der zum offenen Ende des Kabels laufende Impuls wird dort positiv reflektiert. Er läuft zurück und erreicht den Anfang des Kabels zur Zeit

$$T_2 = \frac{2l - x}{v}$$

- l: Länge des Kabels

- Das zur Ortung verwendete Oszilloskop wird zum Zeitpunkt T_1 getriggert und der zum Zeitpunkt T_2 ankommende Impuls aufgezeichnet. Aus der Zeitdifferenz kann die Entfernung x vom Kabelanfang bestimmt werden.

$$x = l - \frac{1}{2} v (T_2 - T_1)$$

Zur Bestimmung der Entfernung x ist es notwendig, die Kabellänge l und die Wanderwellengeschwindigkeit zu kennen. Die Kabellänge ist in der Regel aus dem Datenbestand des Netzbetreibers bekannt. Die Wanderwellengeschwindigkeit kann durch Einspeisung eines künstlichen TE-Impulses am Kabelanfang und Messung der Reflektionszeit bestimmt werden.

Das Prinzip der Fehlerortung durch das Laufzeitverfahren ist also vergleichsweise einfach und in der Regel erfolgreich, wenn die TE-Intensitäten ausreichend hoch sind. Bei der Ortung von betrieblichen Kabelfehlern, bei der hohe Stoßspannungen angewendet werden, hat es sich bewährt. Bei Teilentladungen kommen jedoch aufgrund der vergleichsweise niedrigen Amplituden Gesichtspunkte der messtechnischen Möglichkeiten hinzu, die die Anwendung des Verfahrens erschweren:

- a) Der TE-Impuls hat eine hohe Amplitude nur an der Fehlstelle selbst. Er wird durch die frequenzabhängige Dämpfung des Kabels schnell gedämpft und erreicht bei Papiermassekabeln bereits nach wenigen 10 m Amplituden um einige V, wobei die Spannungszeit-Fläche des Impulses konstant bleibt.
- b) Der zum Kabelanfang laufende TE-Impuls muss durch eine Messeinrichtung erfasst werden. Hierzu eignet sich ein kapazitiver Spannungsteiler, dessen Übersetzungsverhältnis nicht zu hoch sein darf, damit die kleinen Amplituden der gedämpften TE-Impulse gemessen werden können. Dazu ist es nötig, den Anteil der Prüfspannung zu unterdrücken, da dessen Amplituden wesentlich höher sind als die der TE-Impulse. Hierzu eignet sich eine Induktivität parallel zur Unterspannungskapazität des Spannungsteilers, die bei der Prüffrequenz einen geringen Widerstand bietet.

Da das Resonanz Prüfsystem über die Reiheninduktivität Rechteckimpulse auch auf den kapazitiven Spannungsteiler schaltet, entstehen Schwingungen, die zu Schwingungen auch in einem so konzipierten Unterspannungsteil führen. Diese Schwingungen können durch einen Parallelwiderstand gedämpft werden, der bei dem schließlich gewählten Teiler für die Messung der TE-Impulse gewählt wurde. Zusätzlich wurde ein Reihenwider-

stand von 30 Ohm hinzugefügt, der den Impuls verlangsamt, so dass er auch bei langen zu messenden Zeiten in einem digitalen Speicheroszilloskop sichtbar wird.

Die endgültige Ausführung des Systems zur Auskopplung der TE-Impulse ist in Bild 4.8 angegeben.

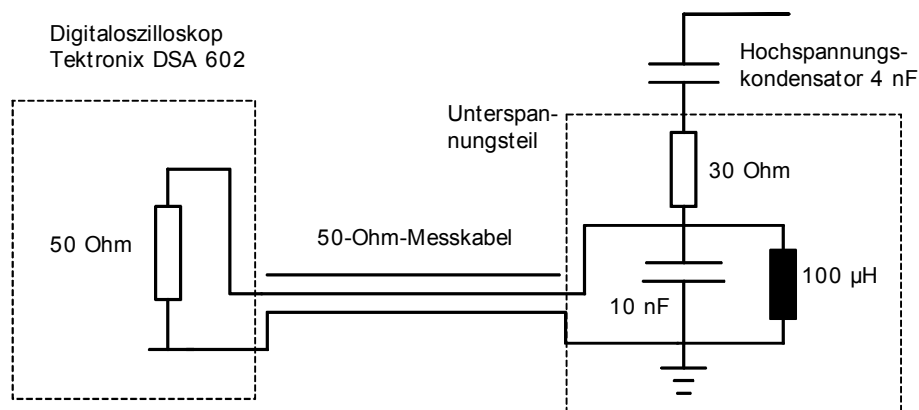


Bild 4.8 Auskopplung der Teilentladungsimpulse zur Ortung der Fehlstellen

Die so konzipierte Auskopplung hat den Nachteil, dass die Entladezeitkonstante der unterspannungsseitigen Kapazität von 10 nF mit dem Wellenwiderstand des Messkabels von 50 Ohm mit $0,5 \mu\text{s}$ sehr klein ist. Aus diesem Grunde wurde eine elektronische Ausgleichschaltung entwickelt, die den Frequenzgang der Auskopplung genau aufheben sollte. Das Prinzip-Schaltbild einer solchen Kompensationsschaltung ist in Bild 4.9 angegeben. Die Daten des Ankopplungskreises sind mit Ausnahme des Wellenwiderstands der Papiermassekabel bekannt und die Elemente der Kompensationsschaltung können mit dieser Ausnahme bestimmt werden. Die in Bild 4.9 angegebenen Werte gelten für einen Kabel-Wellenwiderstand von 30 Ohm. Wenn der Wellenwiderstand des Kabels nicht gleich 30 Ohm ist, verliert die Schaltung ihrer Wirkung und eine Anpassung an die vor Ort gegebenen Verhältnisse wäre sinnvoll. Sie konnte in diesem Vorhaben nicht verifiziert werden, da eine Anzahl von Voruntersuchungen erforderlich gewesen wären. Trotz der ungenauen Anpassung hat sich die Schaltung, insbesondere mit einem nachgeschalteten Tiefpass in einigen Fällen als vorteilhaft erwiesen und wurde verwendet.

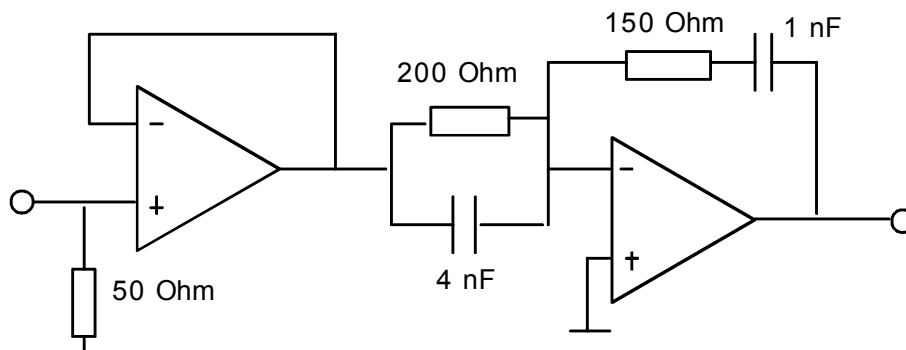


Bild 4.9 Kompensationsverstärker für den Ankopplungsvierpol nach Bild 4.8

4.6 Verlustfaktormessung

Die Messung des Verlustfaktors mit einer konventionellen $\text{tg } \delta$ -Messbrücke an Kabeln mit geerdetem Schirm ist nur mit besonders hierfür konzipierten Messbrücken möglich, die heute auf dem Markt nicht mehr erhältlich sind. Mit der heute verfügbaren Technik der Digitalrekorder ist es aber möglich, den Verlustfaktor aus einer Messung der Spannung und des Stroms zu bestimmen. Hierzu wurde ein Transientenrekorder Yokogawa Typ DL708 verwendet, der bereits im Forschungsvorhaben Nr. 13 ZN von der AIF unterstützt beschafft worden war. Die benötigten mathematischen Berechnungen wurden durch in diesem Rekorder eingebaute Mathematikfunktionen zur Verfügung gestellt. Die Spannung wurde mit dem vorhandenen kapazitiven Spannungsteiler des Resonanzprüfsystems und der Strom über einen induktiven Stromwandler im Erdrückführung des Prüfsystems. Die hierbei auftretenden Phasenverschiebungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen wurden ermittelt und die Messungen entsprechend korrigiert.

Aus den aufgezeichneten Verläufen der Spannung und der Ströme wurden deren Effektivwerte U und I durch eingebaute Funktionen berechnet. Die Wirkleistung P_w wurde als Mittelwert aus dem Produkt der Spannungs- und Stromverläufe gebildet. Der Verlustfaktor ergibt sich dann aus der Gleichung

$$\text{tg } \delta \approx \sin \delta = \frac{P_w}{U I}$$

Dabei ist zu berücksichtigen, dass der so gemessene $\text{tg } \delta$ für die Prüffrequenz gilt, für die Beurteilung der Kabel jedoch der bei Betriebsfrequenz 50 Hz. Es ist damit eine Umrechnung erforderlich, die nur dann exakt ist, wenn man den Widerstand R_p in Bild 4.5 frequenz-

unabhängig annimmt. Der Verlustfaktor bei Betriebsfrequenz ist unter diesen Voraussetzungen dann

$$\operatorname{tg} \delta_B = \frac{1}{\omega_B R_p C_p} = \frac{f_P}{f_B} \operatorname{tg} \delta_P$$

wobei der Index B für Betrieb und der Index P für Prüfung steht.

In dem Bereits in Abschnitt 4.2 betrachteten Beispiel für ein 1940 m langes Kabel wurden die folgenden Werte gemessen:

$$U = 20,6 \text{ kV} \quad I = 3,06 \text{ A} \quad P_w = 7,43 \text{ kW}$$

Der durch in diesem Versuch durch die parallel zum Prüfling geschaltete Strom wurde nicht mitgemessen, so dass die Werte für das Kabel allein gelten. Dies entspricht einem Phasenwinkel zwischen Strom und Spannung von 83° und nach Korrektur 82° voreilend. Dies entspricht einem Verlustfaktor von 0,14 bei Prüffrequenz 32 Hz und von 0,09 bei Betriebsfrequenz. Aus der Ausnutzung der Resonanzprüfanlage in Abschnitt 4.2 wurde ein Verlustfaktor von 0,07 für Betriebsfrequenz abgeschätzt. Im Rahmen der hier gegebenen Genauigkeiten ist die Übereinstimmung ausreichend.

Trotz der Kalibrierung der Messeinrichtungen im Labor traten bei den Vor-Ort-Untersuchungen Unregelmäßigkeiten in den Phasenverschiebungen zwischen Strom- und Spannung auf, die auf die in den Anlagen gegebenen verzeigten Erdungsverhältnisse zurückgeführt werden. Die gemessenen Verlustfaktoren sind daher nicht verlässlich. Darüber hinaus zeigen die gemessenen Kabel durchweg einen Verlustfaktor für Betriebsfrequenz um 0,1 und Differenzierung der Kabel untereinander ist nicht möglich. Die Verlustfaktormessungen wurden daher für eine Bewertung der Kabel nicht herangezogen. Für zukünftige Messungen ist eine Verbesserung der für die Verlustfaktormessung eingesetzten Messtechnik dringend erforderlich.

4.7 Anordnung der Prüf- und Messeinrichtungen vor Ort

Die Vor-Ort-Untersuchungen wurden in den Anlagen in Betrieb durchgeführt. Hierzu waren die folgenden vorbereitenden Maßnahmen erforderlich:

- Freischalten und Erdung der beiden Abgänge am Anfang und Ende der Kabelstrecke.
- Abklemmen der beiden Kabelenden von der Anlage. Hierbei waren in vielen Fällen weitere Maßnahmen zur Herstellung einer ausreichenden Spannungsfestigkeit zwischen Kabelendverschluss und geerdeter Anlagenseite notwendig, wie z.B. Entfernen von An-

schlusschienen oder das Aufstecken auf Blindbuchsen bei SF6-Anlagen mit Kabeleinführung über Kabelstecker.

- Anschluss der Prüfanlage für die Vor-Ort-Untersuchungen

Aus betrieblichen Gründen war es erforderlich, dass die Arbeiten schnellstmöglich durchgeführt werden können. Es schied daher von vorneherein aus, die gesamte Prüfanlage direkt am Messende des Kabels anzuordnen, was vom Gesichtspunkt einer einwandfreien Messung die beste Alternative gewesen wäre. In den meisten Fällen war dies auch aus Platzgründen und fehlenden Transportmöglichkeiten nicht durchführbar.

Die aus diesen Gründen gewählte Anordnung war, dass das Resonanzprüfsystem und alle Messeinrichtungen im Messwagen verblieben. Die Prüfspannung wurde über ein 50 m langes 30-kV-Trossenkabel von dort an den Endverschluss des zu untersuchenden Kabels geführt. Da für die Ortung der Fehlstelle nach Abschnitt 4.4 die Laufzeit zwischen der Fehlstelle und dem offenen Ende des Kabels bestimmt wird, spielt die Laufzeit im Trossenkabel keine Rolle.

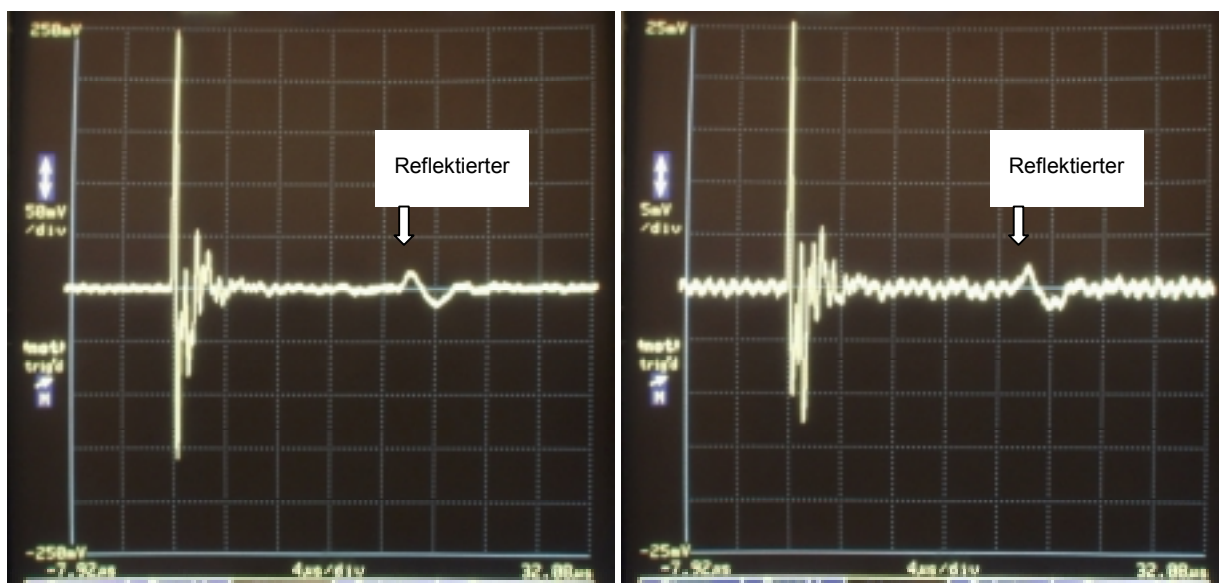


Bild 4.10 Bestimmung der Wanderwellengeschwindigkeit in einem Papiermassekabel, Länge 1360m.

Für die Spannungsprüfung und die TE-Messung hatte diese Anordnung keine nachteiligen Einflüsse. Für die Teilentladungsortung traten geringfügige Nachteile durch die unterschiedlichen Wellenwiderstände des Trossenkabels und des zu prüfenden Papiermassekabels auf. Bild 4.10 zeigt als Beispiel die aufgenommenen Spannungsverläufe bei der Bestimmung der Wanderwellengeschwindigkeit eines Dreibleimantelkabels NAEKBA durch Einspeisung einer

Kalibrier-Teilentladung direkt am Endverschluss des zu prüfenden Kabels. Die Länge des Kabels betrug 1360 m. Der in Bild 4.9 gezeigte Kompensationsverstärker ist hier nicht verwendet. Deutlich ist das Durchschwingen der TE-Impulse durch den Nulldurchgang zu erkennen.

Bei der Einspeisung eines Kalibrierimpulses von 10000 pC war der am offenen Ende reflektierte Impuls deutlich zu erkennen. Die Zeitdifferenz gleich der doppelten Laufzeit des Kabels betrug 17,63 μs , d.h. die Wanderwellengeschwindigkeit war damit

$$v = 154 \text{ m}/\mu\text{s}.$$

Dieser Wert deutet auf eine relative Dielektrizitätskonstante von 4 hin, also etwa das doppelte des bei VPE-Kabeln üblichen Werts. Dies wird durch die in Abschnitt 4.2 erwähnten Kapazitätsbeläge bestätigt, die ebenfalls etwa das doppelte des Werts eines VPE-Kabels betragen.

An anderen Kabeln durchgeführte Messungen ergaben Wanderwellengeschwindigkeiten von 147 $\text{m}/\mu\text{s}$, wenn es sich um reine Papiermassekabel handelte. Viele Kabelstrecken beinhalten jedoch Reparaturstücke aus VPE-Kabeln und bei solchen Kabeln wurden Geschwindigkeiten bis zu 200 $\text{m}/\mu\text{s}$ bestimmt, so dass Laufzeitmessungen durch künstliche Einspeisung von Impulsen immer durchgeführt werden müssen.

Bei der Einspeisung eines Kalibrierimpulses von 1000 pC wirken sich die in dieser Anlage vorhandenen Störungen durch Radiosender aus, die bei einer Frequenz von etwa 1 MHz liegen und damit in etwa die gleiche Schwingung aufweisen, wie der reflektierte TE-Impuls selbst. Dieser Wert muss für das hier gezeigte Kabelbeispiel als der niedrigste TE-Pegel angesehen werden, der noch geortet werden kann.

In den Zeitverläufen ist zu Beginn der Vorgänge deutlich eine hochfrequente Schwingung erkennbar, die auf die Fehlanpassung der Wellenwiderstände des Trossenkabels und des Papiermassekabels zurückzuführen ist. Diese Schwingungen sind nur dann störend, wenn die Einspeisung sehr hochfrequent ist, also aufgrund des dazwischen liegenden Trossenkabels nicht bei Teilentladungen aus dem Kabel. Tatsächlich geortete Teilentladungen in Kabeln zeigen diese Schwingungen nicht.

Die zeitliche Unsicherheit in der Messung der Zeiten in Bild 4.10 beträgt 0,1 μs . Dies entspricht einer Entfernung von 15 m was bei einer Kabellänge von 1360 m als ausreichend genau angesehen wird.

5 Ergebnisse der Vor-Ort-Untersuchungen

5.1 Zusammenstellung der Untersuchungen

In diesem ersten Forschungsvorhaben wurden Vor-Ort-Untersuchungen an insgesamt 39 Kabelstrecken bei vier Netzbetreibern durchgeführt. Eine Zusammenstellung der Kabeltypen findet sich in Tabelle 5.1.

Untersuchung Nr.	Typ	Baujahr	Betriebsspannung kV	Länge m
1	NEKBA	ca.1970	20	89
2	NAEKEBA		20	230
3	NAEKBA	1968-70	20	181
4	NAEKBA		20	119
5	NEKEBA		20	1215
6	NEKBA		20	949
7	NEKBA		20	555
8	NEKEBAY		20	1322
9	NEKEBAY		20	1192
10	NEKBA		20	987
11	NEKBA		20	403
12	NEKBA		20	910
13	NEKBA		20	40
14	NEKBA		20	294
15	NEKBA		20	417
16	NEKBA		20	1010
17			20	479
18	NEKBA		20	281
19	NAEKBA		20	337
20	NEKBA		20	184
21	NEKBA		20	493
22	NAEKBA;NEKB		20	735
23	NAKLEY		20	800
24			20	650
25			20	580
26			20	620
27			20	480
28			20	460
29			20	410
30			20	1240
31			20	360
32	NAEKBA	1964	20	1360
33	NAEKBA	1965	20	1940
34			10	303
35			10	250
36			10	441
37			10	478
38			10	527
39			10	405

Tabelle 5.1 Zusammenstellung der wichtigsten Daten der untersuchten Kabelstrecken

Wie aus der Zusammenstellung ersichtlich ist sind nicht alle Daten bei den Vor-Ort-Untersuchungen bekannt und müssen durch Abfrage in den Firmendatenbanken noch ermittelt und nachgeliefert werden. Es handelt sich durchweg um Kabelstrecken mit großem Anteil an Papiermassekabeln aus den Jahren bis 1975, da die hier betroffenen Netzbetreiber zu diesem Zeitpunkt auf VPE-Kabel umstellten.

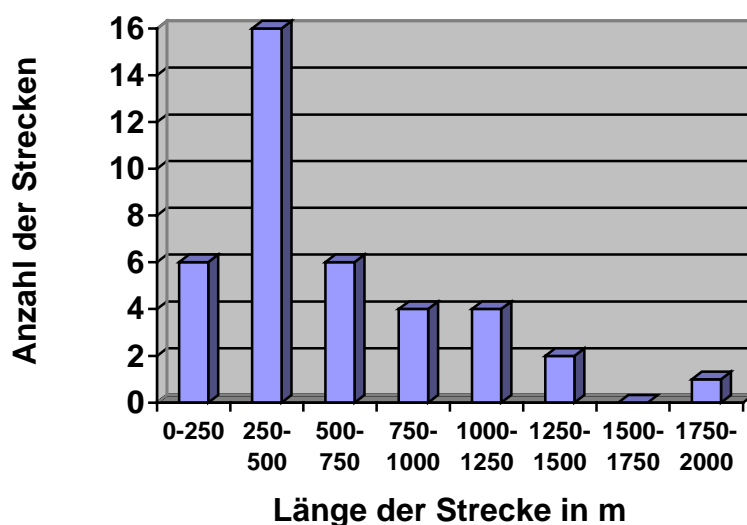


Bild 5.1 Histogramm der Längen der geprüften Kabelstrecken

Das in Bild 5.2 gezeigte Histogramm der untersuchten Kabelstrecken verdeutlicht, dass die häufigsten Streckenlängen zwischen 250 m und 500 m liegen. Die durchschnittliche Länge liegt bei 620 m. Dies ist etwa nur die Hälfte des in der VDEW Schadens- und Störungsstatistik ermittelten Durchschnittswerts von etwa 1 km. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in die hier betrachteten ersten Messungen hauptsächlich dicht besiedelte Gebiete betroffen waren, bei denen die Entfernungen zwischen den Stationen naturgemäß klein sind. Die Zahlen der VDEW-Statistik schließen auch ländliche Gebiete ein und die durchschnittlichen Kabellängen beinhalten auch VPE-Kabel. Die flächendeckende Verkabelung ländlicher Gebiete setzte erst mit der Verfügbarkeit der VPE-Kabel ein, so dass man auch heute noch davon ausgehen kann, dass Papiermasse-Kabelanlagen in der Hauptsache in städtischen Gebieten noch vorhanden sind. Die Zugrundelegung einer durchschnittlichen Länge der Kabelstrecke von etwa 0,6 km ist für diese Netze also durchaus realistisch. Es ist anzumerken, dass auch das in Abschnitt 3 behandelte Beispielnetz eine durchschnittliche Kabellänge von etwa 0,4 km aufweist.

5.2 Untersuchungsprogramm

Das für die Untersuchungen gewählte Programm stellt einen Kompromiss zwischen den für die Zielsetzung wünschenswerten Untersuchungszeiten und der Forderung des Netzbetreibers nach einer schnellen Durchführung der Messungen dar, damit die freigeschaltete Strecke möglichst schnell wieder in Betrieb genommen werden kann. Das Prüfprogramm bestand aus den folgenden Schritten:

- Prüfung mit der Prüfspannung $1 U_0$ gleich der Leiter-Erde-Betriebsspannung des Kabels für wenigstens 5 min. Messung der Teilentladungen nach Abschnitt 4.3
- Prüfung mit der Prüfspannung $2 U_0$ gleich der Beanspruchung des Kabels im Erdschlussfall für 15 min. Messung der Teilentladungen nach Abschnitt 4.3.
- Prüfung mit dazwischen liegenden Spannungswerten, wenn hohe Teilentladungsintensitäten bei $2 U_0$ festgestellt wurden.
- Ortung der Teilentladungen nach Abschnitt 4.4 bei Teilentladungen größer als 500 pC

5.3 Teilentladungsmessungen

5.3.1 Teilentladungs-Grundstörpegel

Der bei den Teilentladungsmessungen vorhandene Störpegel ist durch den Aufbau der Anlagen und die Art der angeschlossenen Verbraucher bestimmt. Er ist unabhängig davon, welcher Kabeltyp, Papiermasse- oder VPE-Kabel, geprüft würden. Er gilt jedoch nur für die Prüfung von Kabeln und könnte bei der Prüfung anderer Betriebsmittel unterschiedlich sein.

Der bei Untersuchungen vorhandene Grundstörpegel, wie er in Abschnitt 4.3 für die phasenbezogene TE-Messung definiert ist, schränkt die Möglichkeiten der TE-Messung an Kabeln ein. Die bei den hier untersuchten Strecken festgestellten Pegel sind also eine allgemeingültige, wertvolle Information zur Durchführbarkeit von TE-Messungen an Kabeln.

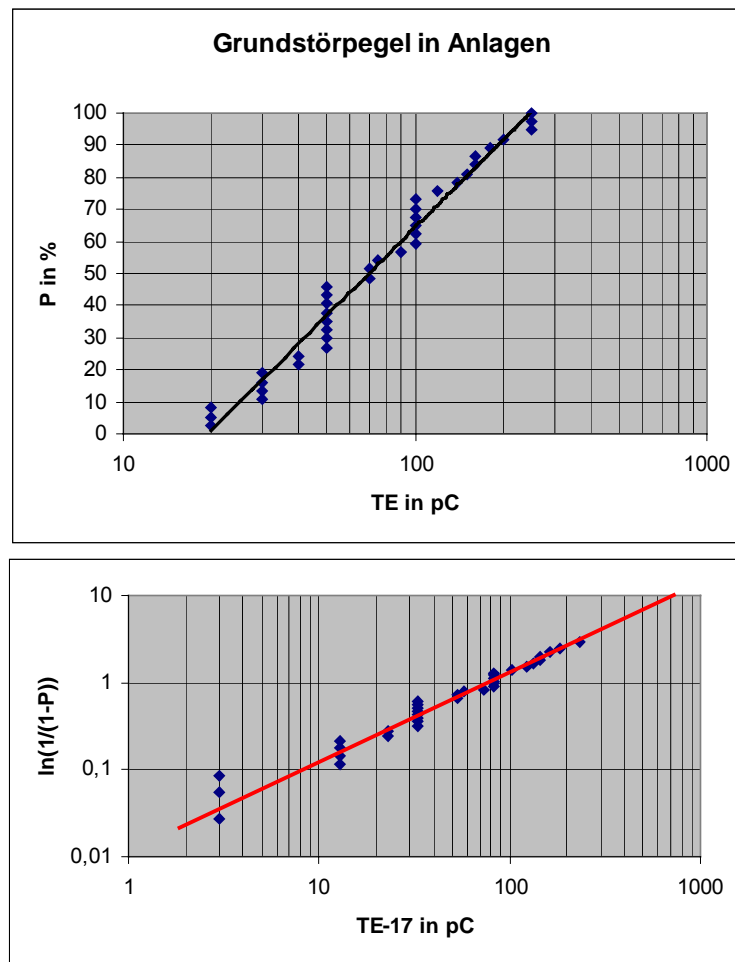


Bild 5.2 Summenhäufigkeit P der gemessenen Grundstörpegel an 39 Kabelstrecken
Oben: Lineare Achsenteilung für P
Unten: Achsenteilung für P nach Weibull

Bild 5.2 zeigt die Summenhäufigkeit der gemessenen Pegel, wobei die Teilentladungsachse in beiden Diagrammen logarithmisch geteilt ist. Im oberen Diagramm ist die Achse für die Summenhäufigkeit in linear aufgeteilt. Werte unter 20 pC wurden in keinem Fall gemessen, was daraufhin deutet, dass dies der Grundstörpegel des Prüfaufbaus ist. Im unteren Diagramm sind die Achsen nach der Weibull-Funktion geteilt. Die Messpunkte ergeben die mit eingezeichnete Gerade, wenn als Kleinstwert der TE ein Wert von 17 pC eingesetzt wird. Der vor Ort zu erwartende Grundstörpegel folgt also einer Wahrscheinlichkeitsfunktion nach Weibull:

$$P_S = 1 - e^{-\left(\frac{TE-17 \text{ pC}}{TE_{0S}}\right)} \quad (5.1)$$

mit $TE_{0S} = 80 \text{ pC}$. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% ist also mit einem Grundstörpegel von kleiner als 240 pC zu rechnen.

5.3.2 Teilentladungen an Kabeln

Wie bereits festgestellt, können nur Teilentladungen über dem kontinuierlich vorhandenen Grundstörpegeln festgestellt werden. Da aber für Papiermasse-Kabelanlagen ohnehin nur vergleichsweise hohe Teilentladungswerte von Interesse für deren betriebliches Verhalten sind, hat selbst der höchste Wert der gemessenen Störpegel von 250 pC nur eine geringe einschränkende Wirkung.

An den untersuchten 39 Kabelstrecken mit insgesamt 117 Einzelkabeln hatten

- 32 Kabeladern bei der Prüfspannung $2 U_0$ und
- 4 Kabeladern bei der Prüfspannung $1 U_0$

Teilentladungen die über dem Grundstörpegel lagen. Die geringe Anzahl der Kabeladern mit TE legt nahe, zunächst die Prüfung mit $2 U_0$ näher zu betrachten. Die Bilder 5.3 bis 5.12 zeigen die bei $2 U_0$ über 1 min. aufgezeichneten Teilentladungen in der beschriebenen phasenbezogenen Darstellung. Die Zuordnung der Teilentladungen zum zeitlichen Verlauf der Prüfspannung führt in allen Fällen zur Erkennung und Klassifizierung der Teilentladungsintensitäten.

Eine Besonderheit ergab sich in der Teilentladungsmessung nach Bild 5.13. Die Teilentladung verschwand nach etwa 5 min., setzte aber bei Erniedrigung der Prüfspannung auf $1,5 U_0$ wieder ein. Der hohe Pegel ergab sich durch einen nicht ausreichend mit Masse gefüllten Endverschluss an der Einspeisung der Prüfspannung. Nach der TE-Messung konnte er durch Augenscheinnahe sofort geortet werden.

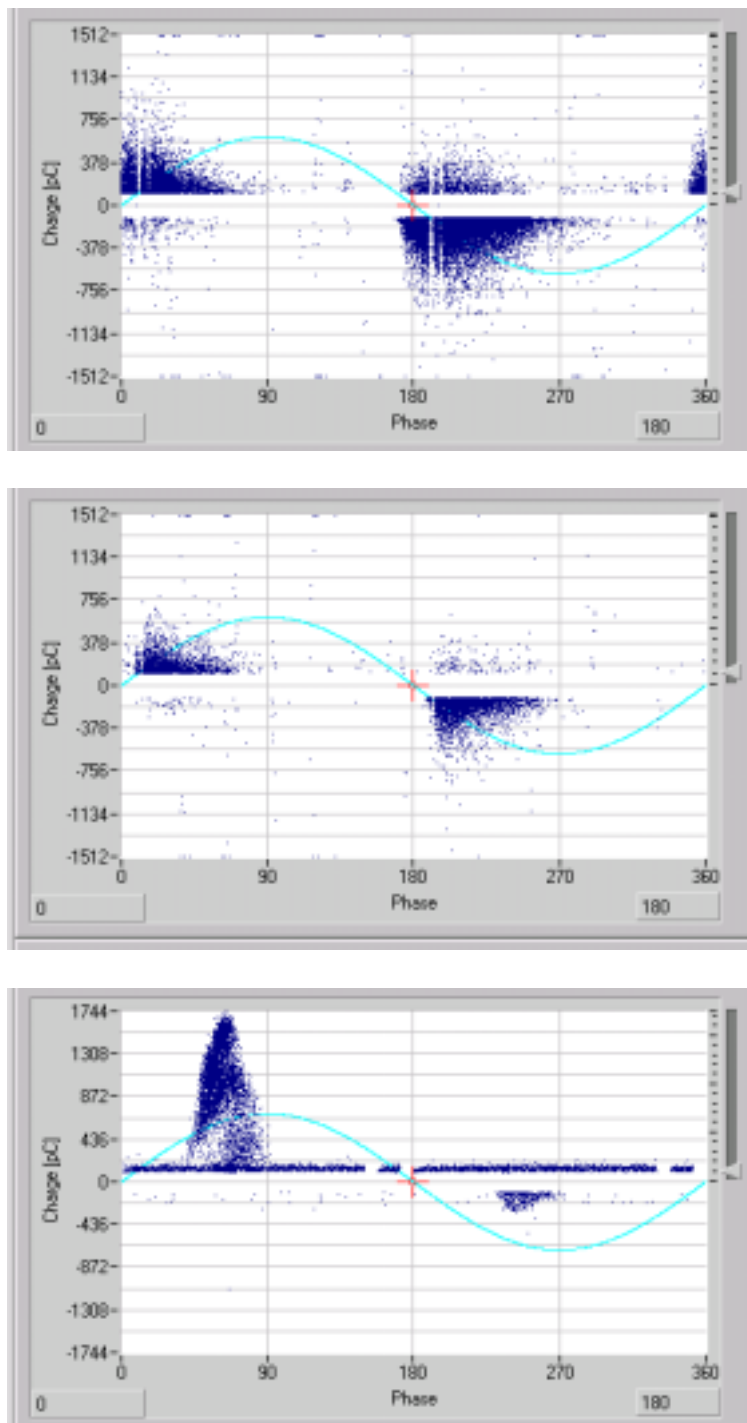


Bild 5.3 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 5 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L2, Leiter L3

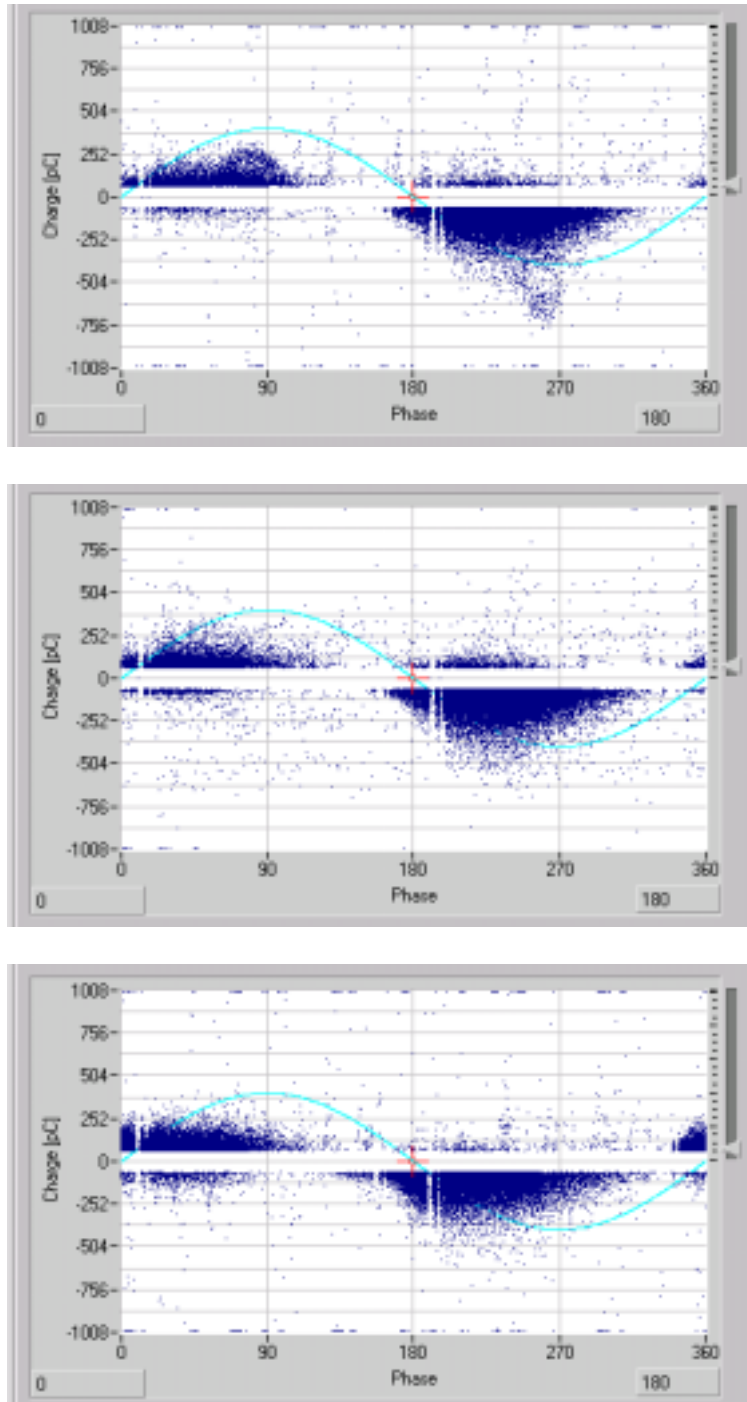


Bild 5.4 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 9 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L2, Leiter L3

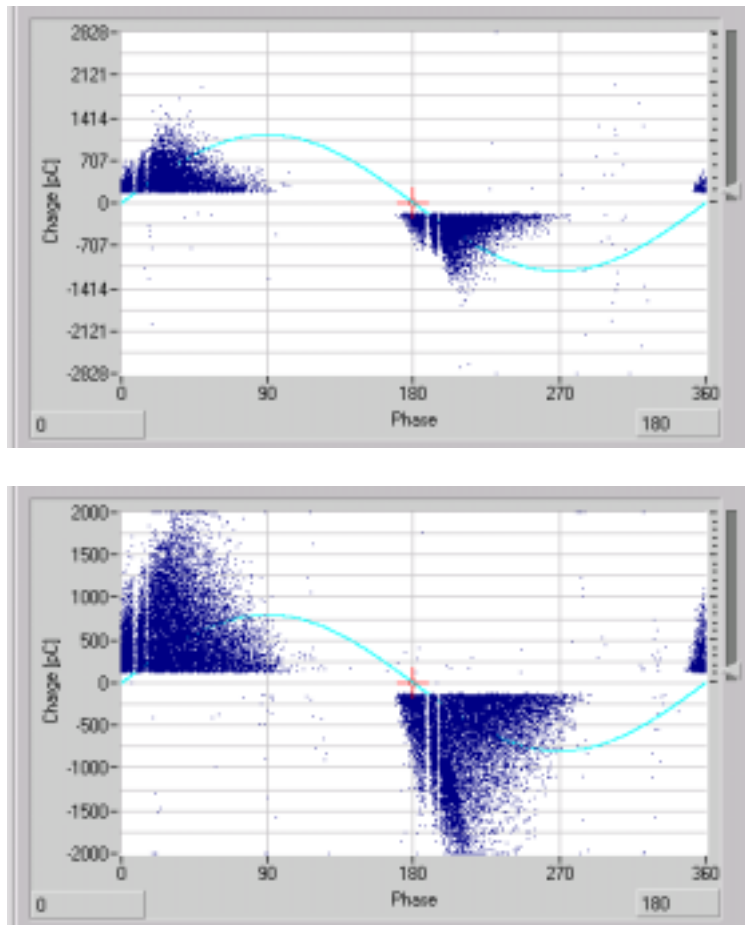


Bild 5.5 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 10 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L2, Leiter L3

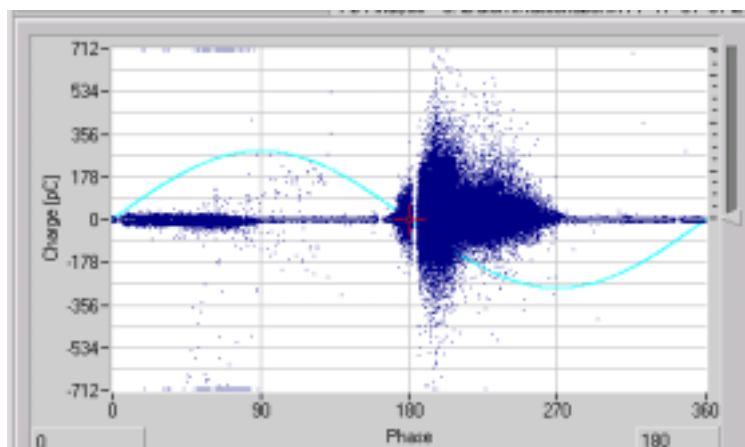


Bild 5.6 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 17 bei Prüfspannung $2 U_0$
Leiter L3

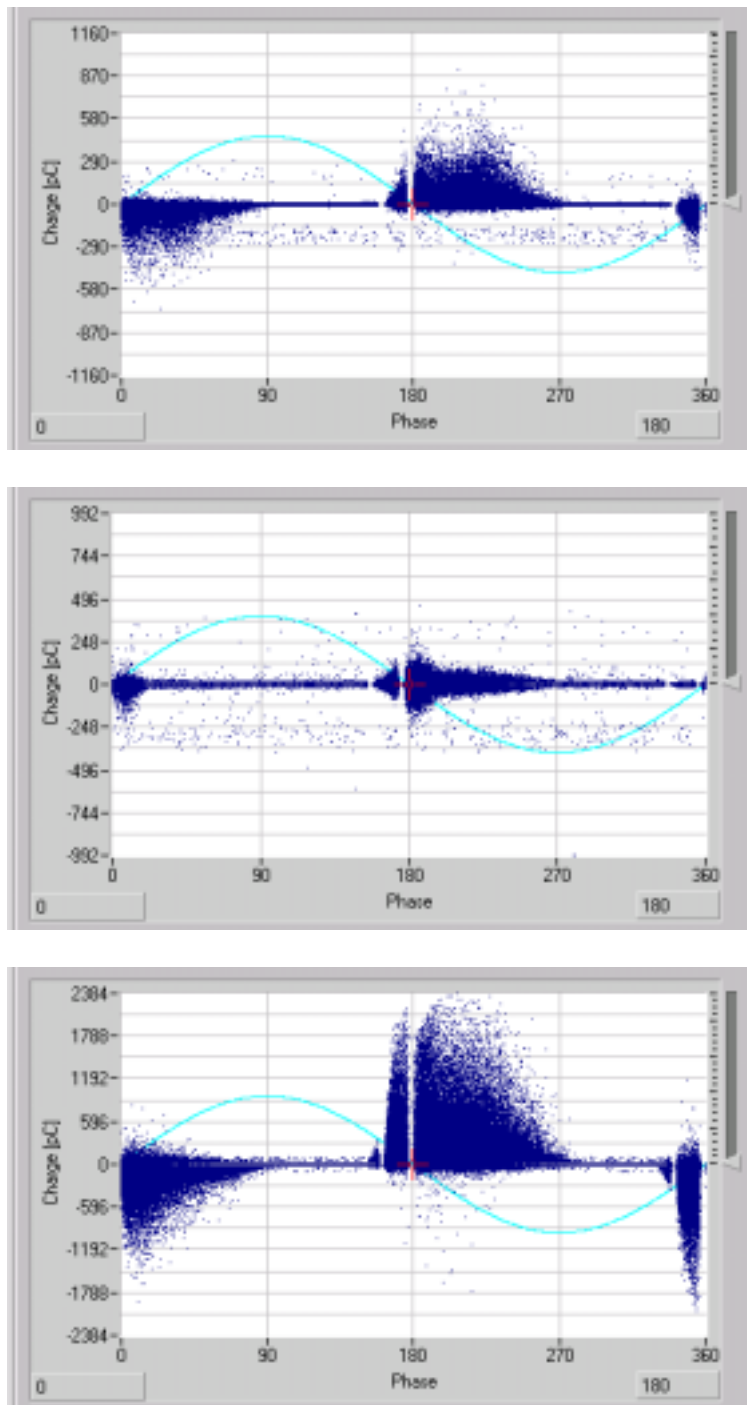


Bild 5.7 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 21 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L2, Leiter L3

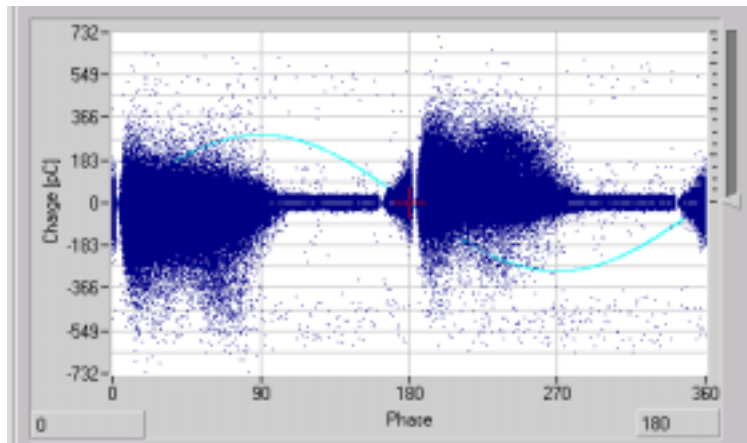


Bild 5.8 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 22 bei Prüfspannung $2 U_0$
Leiter L1

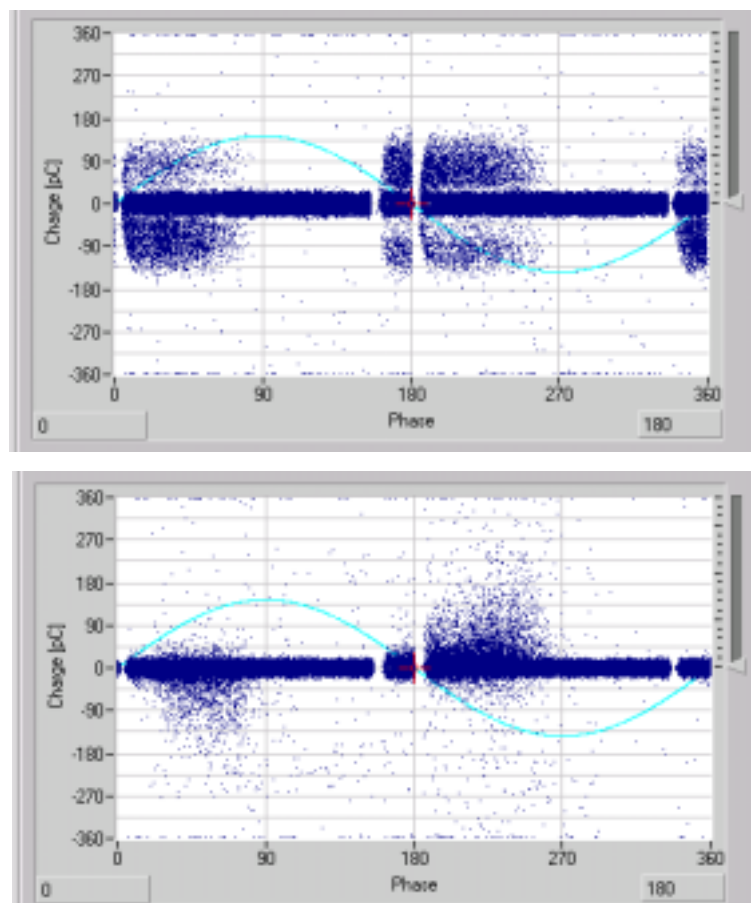


Bild 5.9 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 27 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L3

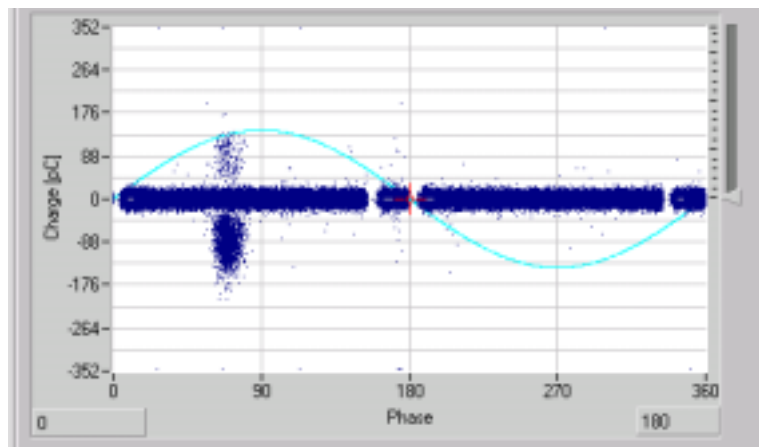
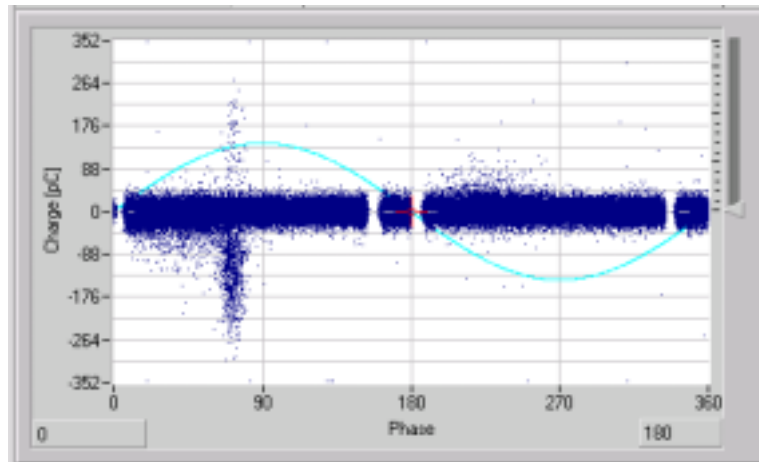


Bild 5.10 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 29 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L3

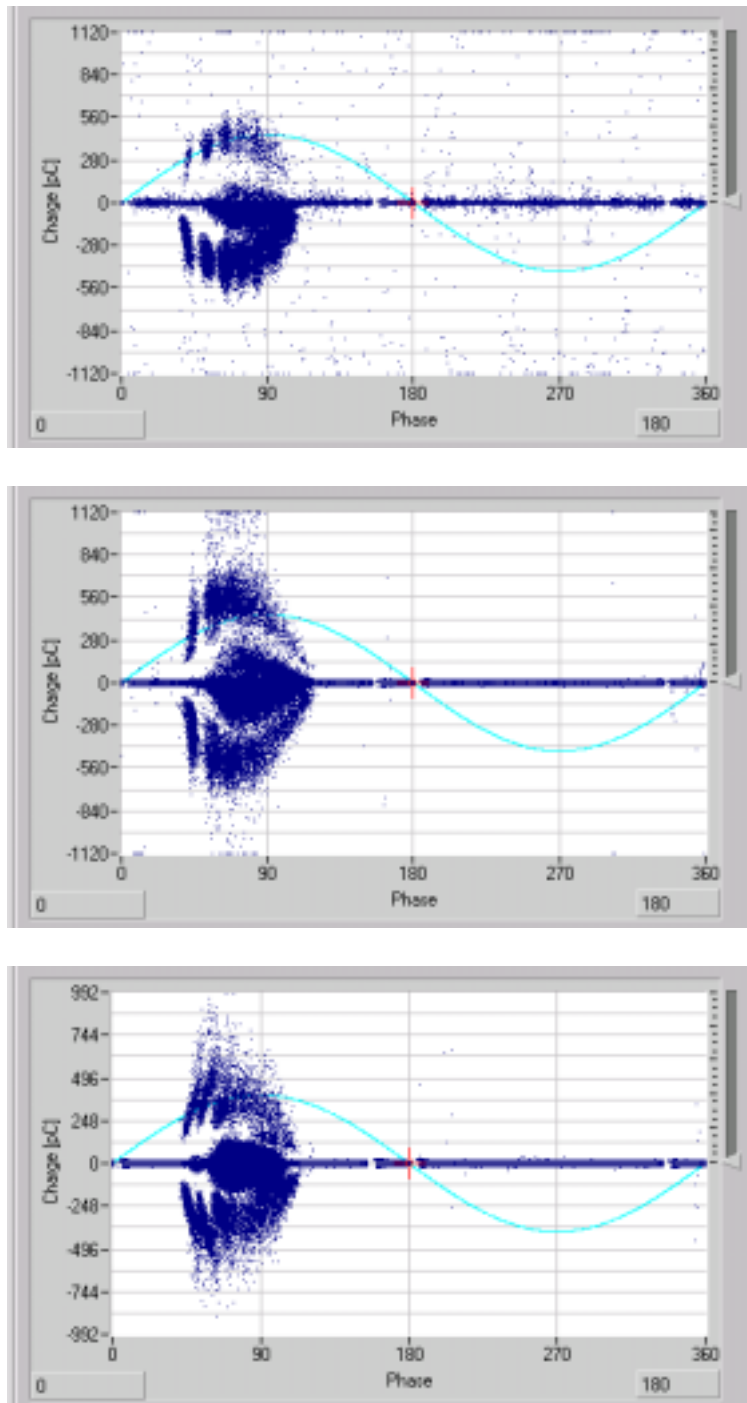


Bild 5.11 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 31 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L2, Leiter L3

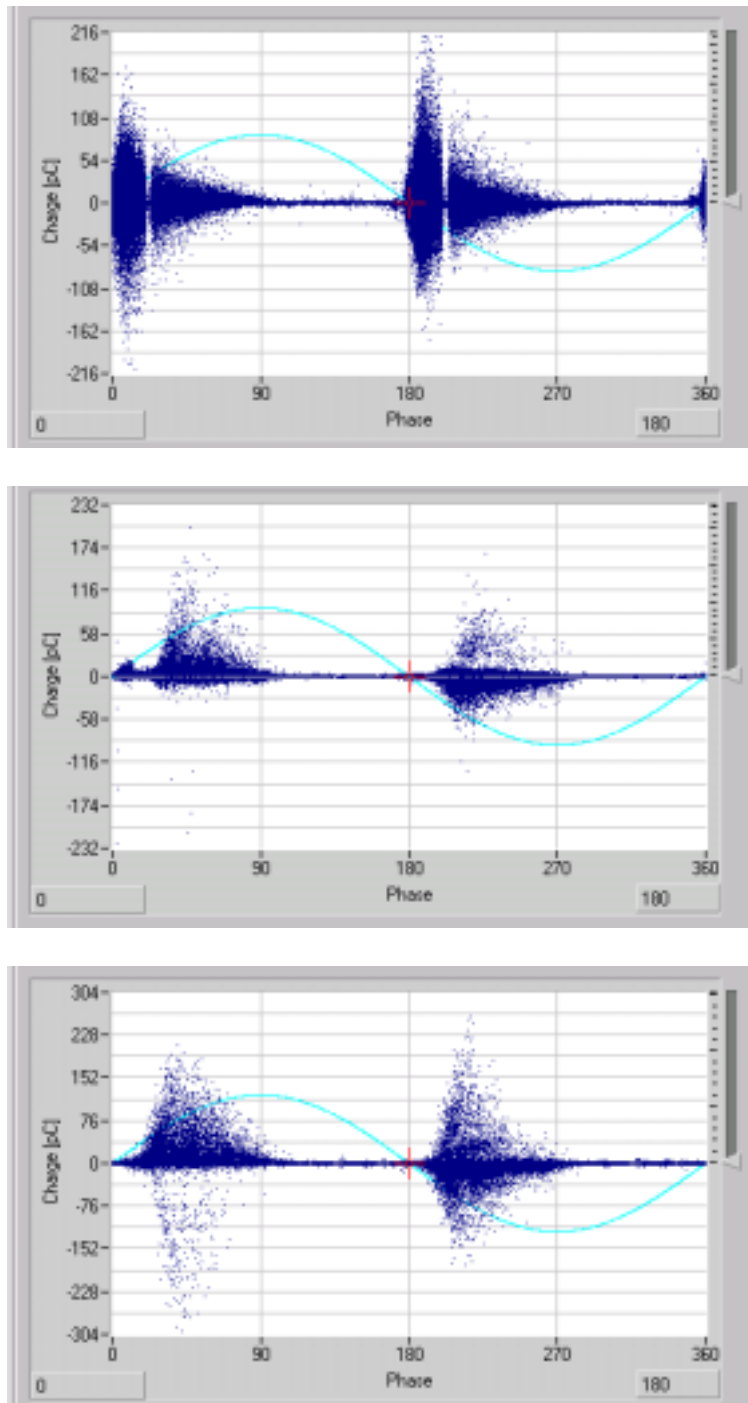


Bild 5.12 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 32 bei Prüfspannung $2 U_0$
Von oben: Leiter L1, Leiter L2, Leiter L3

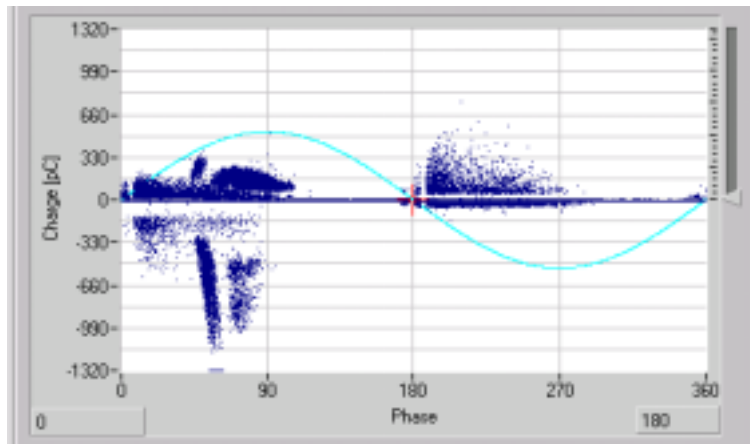


Bild 5.13 Teilentladungen in phasenbezogener Darstellung bei Untersuchung Nr. 35 bei Prüfspannung $2 U_0$
Leiter L1

Die gemeinsame statistische Behandlung der gemessenen Teilentladungsintensitäten ist schwierig, da die Messergebnisse aus Anlagen mit unterschiedlichen Grundstörspegeln stammen. Bild 5.13 zeigt die unbewertete Summenhäufigkeit aller an den 32 Kabeladern gemessenen Teilentladungen. Die gezeigte Verteilung selbst ist für weitere Anwendungen natürlich ungeeignet, da sie zwei Gesichtspunkte nicht beinhaltet:

- Die Verteilung berücksichtigt nicht, dass 85 Adern keine Teilentladungen hatten.
- Die Verteilungen beinhaltet Werte, die unterhalb des höchsten Grundstörspegels liegen. Solche Teilentladungen hätten auch bei den Kabeln mit den hohen Grundstörspegeln vorhanden sein können, ohne gemessen werden zu können.

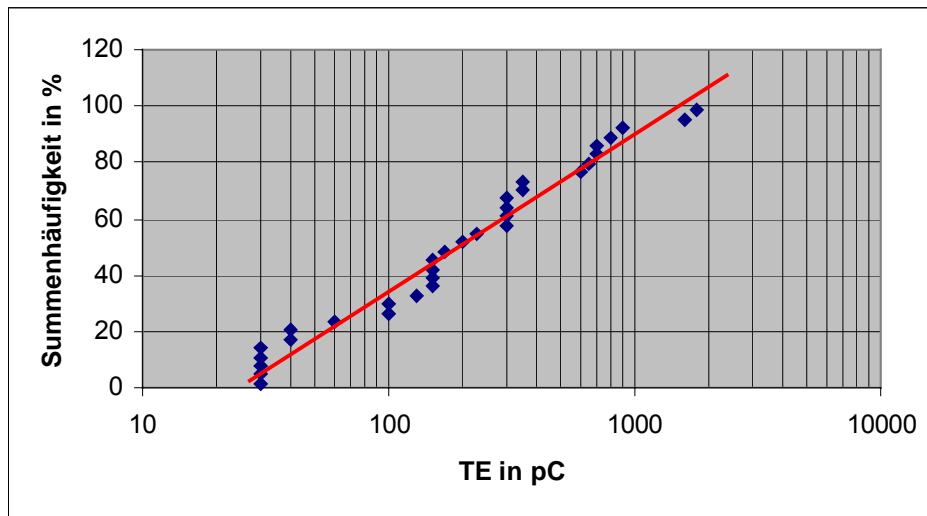


Bild 5.13 Summenhäufigkeiten der bei der Prüfspannung $2 U_0$ an 32 Kabeladern gemessenen Teilentladungen

Eine Möglichkeit zur korrekten statistischen Behandlung der Werte wäre, nur Teilentladungswerte oberhalb des höchsten Grundstörpegels auszuwerten, da diese TE bei allen Kabeln hätte entdeckt werden können. Es wären statistisch zu betrachten:

- 85 Adern ohne gemessene TE entsprechend 72,5% aller Adern
- 18 Adern mit gemessener TE kleiner 250 pC entsprechend 15,5% aller Adern
- 14 Adern mit gemessener TE über 250 pC entsprechend 12% aller Adern

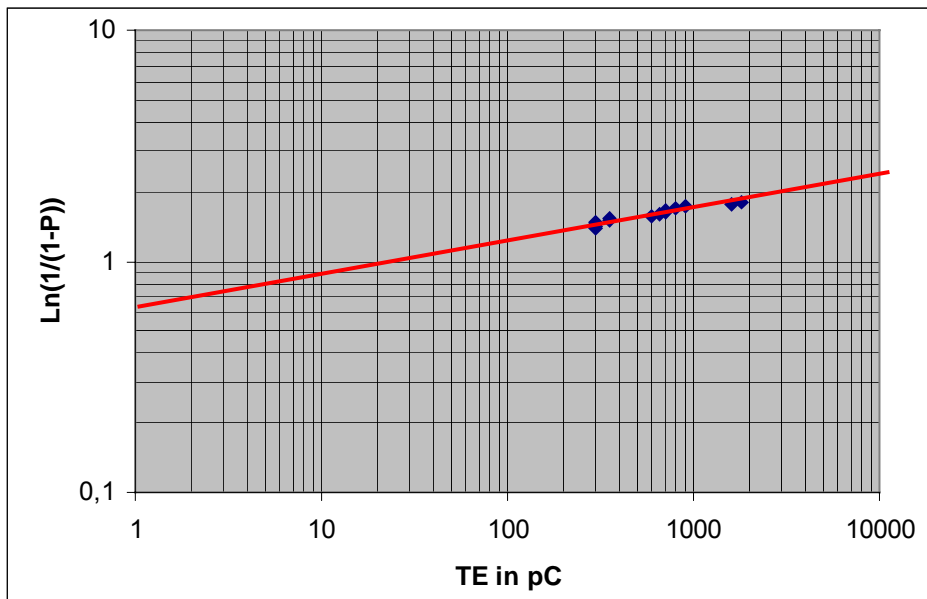


Bild 5.14 Wahrscheinlichkeit zur Messung einer Teilentladung in einer Kabelader in Weibull-Achsenteilung.

Punkte: Gemessene Teilentladungen über 250 pC
Linie: Lineare Interpolation der Weibull-Verteilung

Die aus diesen 14 Messwerten über 250 pC ermittelten Wahrscheinlichkeiten sind in Bild 5.14 als Weibulldarstellung angegeben. Die Ausgleichsgerade führt zu der Weibull-Funktion

$$P_K = 1 - e^{-\left(\frac{TE}{TE_0}\right)^\gamma} \quad (5.2)$$

mit $TE_0 = 25 \text{ pC}$ und $\gamma = 0,15$.

Die mit den wenigen Messpunkten bestimmten Abhängigkeiten sind den entsprechenden Ungenauigkeiten unterworfen. Die Abhängigkeiten lassen sich aber rückwärts überprüfen durch die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter TE-Pegel gemessen werden kann. Hierfür sind zwei Wahrscheinlichkeitsbedingungen zu erfüllen:

- Die im Kabel vorhandene TE muss größer als ein bestimmter TE-Pegel sein.
- Die vorhandenen Grundstörungen müssen kleiner sein.

Daraus ergibt sich eine Dichtefunktion der vor Ort messbaren TE, die aus der ursprünglichen Dichtefunktion der TE in den Kabeln, wie sie aus Gleichung 5.2 folgt, und der Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Grundstörpegel nach Gleichung 5.1 gebildet wird. Die sich damit ergebende Dichtefunktion ergibt integriert die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Teilentladungspegel gemessen werden kann. Die so berechnete Wahrscheinlichkeit ist in Bild 5.15 im Vergleich mit den Messergebnissen nach Bild 5.13 angegeben. Die ungefähre Richtigkeit der gefundenen Wahrscheinlichkeiten scheint damit im Rahmen der erzielbaren Genauigkeiten aus der vorhandenen Datenmenge bestätigt.

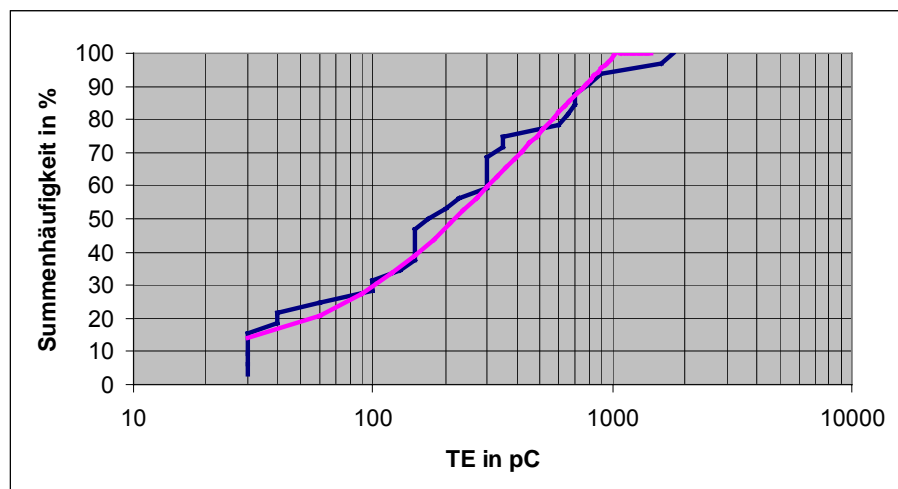


Bild 5.15 Vergleich der gemessenen Summenhäufigkeiten (blau) der Teilentladungen bei $2 U_0$ mit der nach den angegebenen Wahrscheinlichkeitsfunktionen berechneten Summenhäufigkeit (rot).

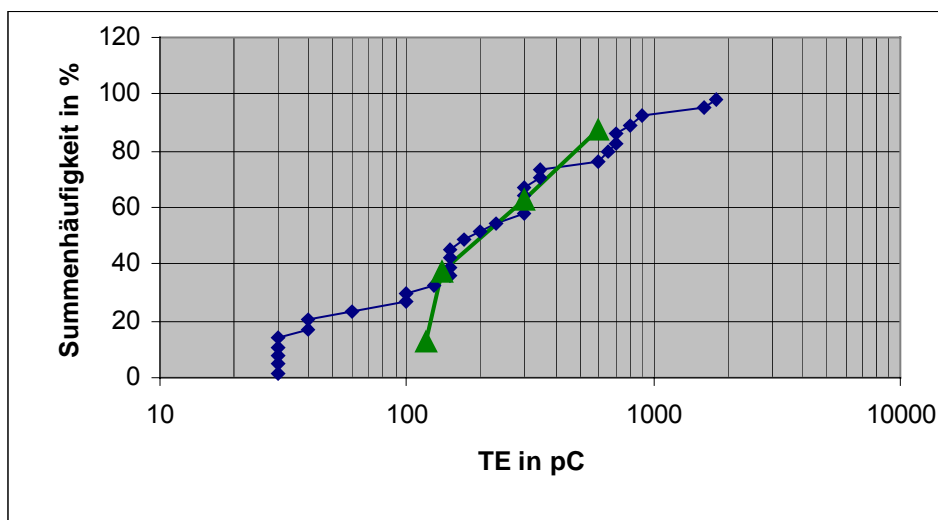


Bild 5.16 Vergleich der gemessenen Summenhäufigkeiten der Teilentladungen bei $1 U_0$ (grün) mit denen bei $2 U_0$ nach Bild 5.13 (blau).

Für die vier Ergebnisse der TE-Messung bei $1 U_0$ kann eine sinnvolle statistische Auswertung nicht erfolgen. Die vier Messpunkte sind in Bild 5.16 als Summenhäufigkeit im Vergleich zu den Messergebnissen bei $2 U_0$ aufgetragen. Die Häufigkeiten sind praktisch identisch, was aber darauf beruht, dass bei den kleinen TE-Intensitäten der Einfluss des Grundstörspegels stark und für beide Messreihen gleich ist.

Oberhalb des höchsten vorhandenen Grundstörspegels von 250 pC gibt es für $1 U_0$ nur zwei Messwerte im Gegensatz zu den 14 Messwerten bei $2 U_0$. Die Wahrscheinlichkeit, TE-Intensitäten größer 250 pC zu überschreiten, ist etwa um den Faktor 7 geringer. Allerdings stammen beide Werte aus einem Kabel, voraussichtlich aus einer Fehlstelle, so dass auch diese Aussage mit Vorsicht zu machen ist. Mit all den genannten Einschränkungen kann demnach nur grobe Schätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Teilentladungen bei $1 U_0$ gemacht werden. Aus dem Faktor 7 ergibt sich, dass Gleichung 5.2 mit $TE_0 = 200$ pC näherungsweise für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Teilentladungen bei $1 U_0$ gilt.

5.3.3 Ortung der Teilentladungen

Das in Abschnitt 4.4 beschriebene Verfahren arbeitete bei guten Umgebungsbedingungen zufriedenstellend. Bild 5.17 zeigt hierfür ein Beispiel aus der Messung Nr. 10. Die Wanderwellengeschwindigkeit im 987 m langen Kabel wurde zu 147 m/ μ s bestimmt. Die Entfernung der Fehlstelle vom Kabeleingang beträgt also 464 m und wurde als Muffe identifiziert.

Trotz dieses guten Ergebnisses muss bemerkt werden, dass das Verfahren bei bestimmten Gegebenheiten versagt oder Schwierigkeiten bereitet:

- Wenn die in einigen der TE-Bilder 5.3 bis 5.13 erkennbaren Teilentladungs-Störimpulse mit Amplituden größer als die zu ortende Teilentladung zu häufig auftreten, triggert das Oszilloskop hauptsächlich auf diese Störungen. Dies wäre nicht weiter schädlich, da die Reflektion vom Kabelende dann nach der doppelten Laufzeit kommt und ausgeschlossen werden könnte. Es geschieht aber zu häufig, dass ein Störimpuls innerhalb der zu messenden Laufzeit auftritt und damit Fehlinterpretationen verursacht. Solche Fehlinterpretationen sind nur durch vielfache Messung der Reflektionszeiten zu umgehen, wodurch die verstreut auftretenden fälschlichen Reflektionszeiten ausgeschlossen werden könnten.
- Wenn sich die Fehlstelle nahe am Ende des Kabels befindet ist die Reflektionszeit sehr kurz und beide Impulse erreichen das Messende praktisch zum gleichen Zeitpunkt. Eine ausreichend genaue Messung der Reflektionszeiten ist dann nicht mehr möglich. Hier wäre eine zweite Messung am entgegengesetzten Ende erforderlich, was den Untersuchungsaufwand verdoppelt.

Tabelle 5.2 stellt die georteten Fehlstellen mit den vermutlichen Schadensstellen zusammen. In einem hier nicht aufgeführten Fall wurde die Fehlstelle an der Einspeisung durch Besichtigung festgestellt. Es handelte sich um einen Endverschluss ohne Masse.

Untersuchung Nr.	Kabellänge m	Leiter	Reflektionszeit μs	Geschwindigkeit m/ μs	Entfernung m
5	1215	L1 L2	7,3 7,5	200	475 Muffe
9	1192	L1 L2 L3	6,8 6,5 6,6	204	515 Muffe
21	493	L1 L2	7,0 7,1	140	0 Übergangsmuffe
22	735	L1	7,7	150	158 Kabel?
31	360	L1	5,1	141	0 Übergangsmuffe

Tabelle 5.2 Zusammenstellung der georteten Fehlstellen in den Kabelverbindungen

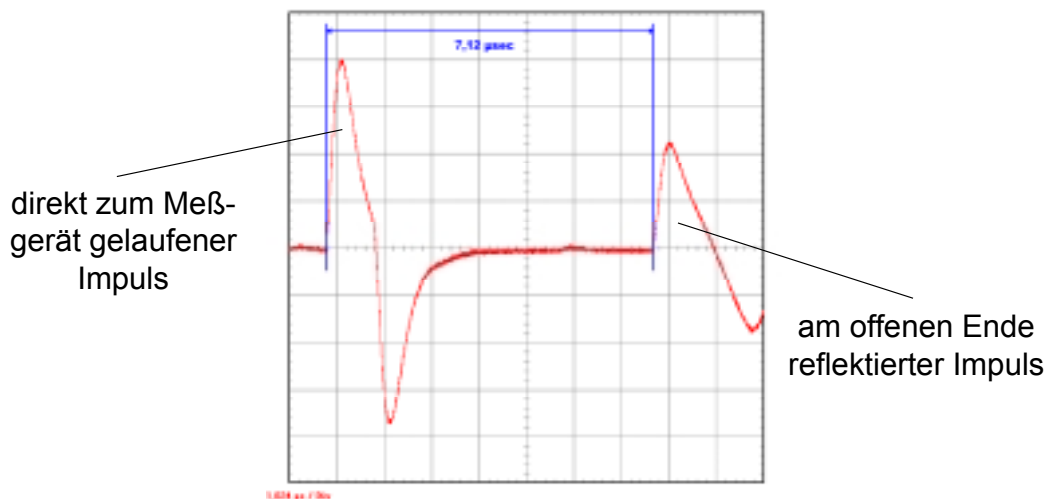


Bild 5.17 Ortung einer Teilentladung bei 2 U₀ in Messung Nr. 10 mit einer höchsten Teilentladung von 1500 pC.

6 Bewertung der Untersuchungsergebnisse

Aus den Versuchsergebnissen in Abschnitt 5 verdienen zwei Punkte hervorgehoben zu werden:

- Bei keinem der untersuchten Kabel kam es während der Untersuchungen zu einem Durchschlag. Die Kabelstrecken hätten auch einen Erdschluss im Netz ohne Fehler überstanden, zumindest wenn die Erdschlussdauer innerhalb der 15minütigen Prüfzeit gelegen hätte und zur Erdschlusssuche nicht zu viele Schalthandlungen durchgeführt worden wären.
- Bei keiner der Fehlstellen mit hohen Teilentladungen konnte sich der betroffene Netzbetreiber dazu entschließen, nur aufgrund der Messergebnisse eine Reparatur der Fehlerstelle durchzuführen. Dies ist dadurch begründet, dass ein einzelner Fehler in einer Kabelstrecke kein ungewöhnliches Ereignis ist und akzeptiert werden kann. Die dann entstehenden Reparaturkosten wären die gleichen wie bei einer Reparatur aufgrund eines Messergebnisses.

Die Folge dieser Ergebnisse ist, dass die ursprünglich geplante Feststellung eines Zusammenhanges zwischen einer gemessenen Teilentladung und der dielektrischen Durchschlagsfestigkeit weder aus den Ergebnissen der Vor-Ort-Untersuchungen noch aus nachträglich an den fehlerhaften Kabelstellen im Labor durchgeführte Spannungsprüfungen verwirklicht werden kann.

Ein angenäherter Zusammenhang kann aus den Schadenstatistiken der Papiermassekabel versucht werden. Diese Statistiken belegen, dass die Wahrscheinlichkeit eines Kabelfehlers als Folge eines stehenden Erdschlusses im Netz dreimal so hoch ist wie die den Erdschluss selbst zu verursachen. Kabelfehler werden also hauptsächlich durch die Erdschlussüberspannung entsprechend der Prüfspannung $2 U_0$ verursacht. Die im Betrieb beobachtete Fehlerrate aufgrund dielektrischer Fehler liegt bei 0,5 bis 1 pro 100 km und Jahr, wobei der Bereich wegen der Grauzone der nicht untersuchten Schadensursachen zustande kommt.

In den hier betrachteten Vor-Ort-Untersuchungen wurden 39 Kabelstrecken mit 24 km Kabelsystem untersucht. Nach den Schadenstatistiken hat diese Länge eine Fehlerrate von 0,12 bis 0,24. pro Jahr, also auch im Jahr der Untersuchungen. Um im Mittel einen Fehler aufgrund eines Erdschlusses in diesem Jahr festzustellen, hätten 100 km bis 200 km, also die 4 bis 8fache Systemlänge oder die 4 bis 8fache Zahl der Kabelstrecken untersucht werden müssen, um eine Teilentladung festzustellen, die zu einem Doppelerdschluss führen könnte.

Bei einem Erdschluss sind zwei Adern der betroffenen Kabelstrecken beansprucht. 100 km System beinhalten demnach 200 km betroffene Aderlänge was mit der hier festgestellten mittleren Länge von 620 m 322 Kabeladern mit der Abschnitt 5 untersuchten Länge bedeu-

ten würde. Die Wahrscheinlichkeit einer für den Doppelerdschluss kritischen Teilentladungintensität liegt also bei 1/322 bis 1/644 pro Kabelader.

Die zu dieser Wahrscheinlichkeit zugeordnete TE-Intensität könnte sich aus der Extrapolation der Wahrscheinlichkeitsgeraden in Bild 5.14 oder nach Gleichung 5.2 ergeben, wobei darauf zu achten ist, dass hier die Wahrscheinlichkeit kleinerer Pegel angegeben ist. Es ergibt sich damit:

$$e^{-\left(\frac{TE_{krit}}{TE_0}\right)^\gamma} = 1/322 \rightarrow 1/644$$

Es würden sich hiermit kritische TE- Intensität deutlich über 10^6 pC ergeben, die weit oberhalb der technisch vernünftigen Grenzen liegen. Die Extrapolation der bis jetzt vorhandenen TE-Werte in diesen Wahrscheinlichkeitsbereich hinein ist also zu ungenau und die Erhöhung der Grundgesamtheit ist dringend erforderlich.

Die Rate eines Fehlers im Normalbetrieb ist um den Faktor drei niedriger. Allerdings sind auch die festgestellten Wahrscheinlichkeiten einer bestimmten Teilentladung nach Abschnitt 5.2.2 geringer. Die Anwendung der gleichen Überlegungen wie für den Erdschlussfall führen hier zu Werten für eine kritische TE-Intensität, die noch höher als die oben genannten Werte liegen. Diese Werte sind ebenfalls mit Vorsicht zu behandeln, da Kabel mit solcher hoher Teilentladung bereit bei geringsten Netzunregelmäßigkeiten durchschlagen würden also gar nicht aufgefunden werden können. Ebenso wachsen Teilentladungen solcher Intensität sehr schnell vor und verursachen innerhalb kurzer Zeit den endgültigen Durchschlag.

7 Schrifttum

- [1] R. Windmüller: Die wirtschaftliche Bedeutung der Versorgungsqualität
Elektrizitätswirtschaft 97 (1998), H.25, S.14-22
- [2] E. Reichertz: Versorgungszuverlässigkeit – Entwicklungstendenzen im Verteilungsnetz
Fachtagung der FGH Mannheim am 30.11.- 1.12. 2000.
- [3] M. Fischer: VDEW-Umfrage zu Schäden an VPE-Kabeln.
Elektrizitätswirtschaft 96 (1997), S. 1154-1158
- [4] N. van Schaik e.a.: Diagnoseverfahren für Verteilkabel und Bedeutung für die Versorgungs-
zuverlässigkeit.
ETG-Fachbericht 79 (1999), S. 341-350
- [5] K.-H. Weck: Stufentest zur Ermittlung des Isolationszustands betrieblich vorbeanspruch-
ter PE- und VPE-Mittelspannungskabel.
Elektrizitätswirtschaft 88 (1989), S. 470-473
- [6] W. H. Wellßow e.a.: Versorgungszuverlässigkeit in Verteilungsnetzen – Instandhaltungs-
bzw. Reinvestitionsstrategien.
Elektrizitätswirtschaft 98 (1999), S. 30-35
- [7] M. Zdrallek: Zuverlässigkeitsanalyse elektrischer Energieversorgungssysteme.
Neue Aspekte der Modellbildung und Anwendung.
Dissertation Uni-GH Siegen, 2000
- [8] A. Schweer: Versorgungsqualität im internationalen Vergleich
Fachtagung der FGH Mannheim am 30.11.- 1.12. 2000.