

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst möchte ich mich bei meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Woschitz bedanken, der mir diese Arbeit ermöglicht und mich stets unterstützt hat.

Weiterer Dank gilt dem Leiter des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Schichler, für die Bereitstellung der für diese Arbeit benötigten Laborräumlichkeiten und Unterlagen.

Bedanken möchte ich mich bei meinen Studienkollegen, mit deren Unterstützung ich jede noch so schwierige Prüfung meistern konnte.

Ein besonderer Dank geht an Herrn Bernhard Windisch, der mir bei meiner Masterarbeit mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ich bedanke mich bei meiner Familie, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt hat.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Freundin Kerstin, die mir während meiner gesamten Studiendauer Kraft und Rückhalt gegeben hat und immer zu mir gestanden ist.

Kurzfassung

Die Qualitätssicherung von Mittelspannungskabelanlagen ist ein zentraler Bestandteil der in der Mittelspannungsebene eingesetzten Instandhaltungsstrategien. Um die längstmögliche fehlerfreie Betriebsdauer erreichen zu können, müssen alle eingesetzten Betriebsmittel den in den Normen festgelegten Qualitätsanforderungen entsprechen. In dieser Arbeit wird auf wichtige Bereiche der Qualitätssicherung eingegangen.

Die in der Norm festgelegten Prüfungen an Mittelspannungskabeln garantieren einen bestimmten Qualitätsstandard. Zur Optimierung der fehlerfreien Betriebsdauer können Kunden zusätzlich Präqualifikationsprüfungen durchführen. Präqualifikationsprüfungen werden in Anlehnung an die entsprechenden Normen durchgeführt und haben die Aufgabe, Schwachstellen in einem Kabelsystem zu erkennen und in weiterer Folge zu beseitigen.

Zusätzlich zu den Maßnahmen vor der Verlegung ist, bei bereits verlegten Kabelstrecken, die Diagnose ein unverzichtbares Hilfsmittel zur Zustandsbewertung. Beim Einsatz von Diagnosesystemen ist es wichtig ein genaues Diagnoseprogramm festzulegen, damit mit Hilfe der gewonnenen Messdaten der Zustand bestimmt werden kann.

Durch den Einsatz von Datenbanken können Mess-, Fehler- und Betriebsdaten statistisch ausgewertet und so der Zustand von Kabelstrecken bestimmt werden. Außerdem können durch die Betrachtung der aufgetretenen Fehler Verhaltensmuster und Trends von Betriebsmitteln erkannt werden.

Mit einem geeigneten Qualitätsmanagementsystem können Abläufe optimiert und somit die Qualität verbessert werden.

Stichwortverzeichnis:

- Mittelspannungskabel
- Qualitätssicherung
- Normprüfung
- Präqualifikationsprüfung
- Prüf- und Diagnosemethoden
- Zustandsbewertung

Abstract

The quality assurance of medium-voltage cable systems is a core component of the maintenance strategies at the medium-voltage level. In order to achieve the longest possible fault-free operating time, all components must comply with the quality requirements of the standard specifications. This master thesis deals with important areas of quality assurance.

Testing to standards in medium voltage cables guarantees a certain quality standard. For optimizing the error-free operating time, customers can additionally carry out prequalification tests. Prequalification tests are based on the corresponding standards. Their task is to identify weak spots in cable systems and subsequently rectify them.

In addition to actions before the laying of cables, the diagnosis is an indispensable tool for condition assessment of installed cables. When using diagnostic systems, it is very important to define a detailed diagnostic program. With the acquired measurement data, it is possible to determine the condition.

With the use of databases measurement, fault and operating data can be statistically evaluated and thus the condition of cable sections can be determined. In addition to the condition determination, it is possible to detect patterns and trends of the used components by observing the occurred faults.

With a suitable quality management, system processes can be optimized and the quality can be improved.

Keywords:

- medium voltage cable
- quality management
- standard testing
- prequalification tests
- test and diagnostic methods
- condition evaluation

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Mittelspannungskabel	2
2.1	Typen	2
2.2	Aufbau	2
2.2.1	Leiter	3
2.2.2	Elektrische Schirmung	4
2.2.3	Isolierung	5
2.2.4	Polster und Trennschichten	5
2.2.5	Schirm	6
2.2.6	Mantel	6
2.2.7	Bewehrung	6
2.2.8	Schutzhülle	6
2.3	Herstellung	7
2.4	Kennzeichnung und Kurzzeichen	7
2.5	Eigenschaften von Mittelspannungskabeln	8
2.5.1	Kabelverluste	10
2.5.2	Berechnungsbeispiel für Kabelverluste	13
2.6	Normen für Starkstromkabel	15
3	Garnituren	16
3.1	Verbindungssysteme	16
3.2	Feldsteuerung	16
3.3	Technik	16
3.4	Endverschlüsse	17
3.5	Muffen	17
3.6	Normen für Kabelgarnituren	18
4	Kabelprüfungen laut Norm	19
4.1	Stückprüfungen	19
4.1.1	Messung des elektrischen Leiterwiderstandes	19
4.1.2	Spannungsprüfung	20
4.1.3	Teilentladungsprüfung	20
4.2	Typprüfungen	25
4.2.1	Verlustfaktormessung in Abhängigkeit von der Temperatur	25

4.2.2	Lastwechselprüfung mit anschließender Teilentladungsprüfung	26
4.2.3	Stoßspannungsprüfung mit anschließender Wechselspannungsprüfung	26
4.2.4	Spannungsprüfung	27
4.2.5	Harmonisierte Langzeitprüfung	27
4.3	Auswahlprüfungen	29
4.3.1	Fertigungsbegleitende Prüfung	30
4.3.2	Nichtelektrische Auswahlprüfungen	30
5	Präqualifikationsprüfungen	31
5.1	Elektrische Prüfungen	31
5.1.1	Verträglichkeitsprüfung	31
5.1.2	Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit	33
5.2	Nichtelektrische Prüfungen.....	34
5.2.1	Geometrische Abmessungen der Isolierung.....	34
5.2.2	Transparenzprüfung	35
5.2.3	Mechanischer Aufbau des Kabels.....	36
5.2.4	Shore-D-Härtemessung des PE-Mantels	37
5.2.5	Schrumpfung des Kabelmantels	37
5.3	Ausgewählte Prüfungen bei Werksbesichtigungen (Audit).....	38
6	Prüf- und Diagnosemethoden	39
6.1	Spannungsprüfung	39
6.1.1	Gleichspannungsprüfung.....	39
6.1.2	Wechselspannungsprüfung	40
6.1.3	Spannungsprüfung bei 0,1 Hz	41
6.1.4	Gedämpfte Wechselspannung.....	41
6.2	Mantel- und Korrosionsschutzprüfung.....	41
6.3	Teilentladungsmessung.....	42
6.4	Verlustfaktormessung	44
6.4.1	Kalibrierung	46
6.4.2	Normalkondensator	46
6.5	Kabeltrassensuche.....	49
6.6	Kabelfehlerortung.....	50
6.6.1	Reflexionsverfahren	51
6.6.2	Lichtbogen-Stoßverfahren	52

6.6.3	Stromimpuls-Verfahren	53
6.6.4	Spannungsgekoppeltes Ausschwingverfahren	53
6.6.5	Schrittspannungsverfahren	54
6.6.6	Tonfrequenzverfahren	56
6.6.7	Stoßspannungsverfahren	57
7	Prüf- und Diagnoseprogramm	59
7.1	Prüfungen bei Werksabnahme	59
7.2	Inbetriebnahmeprüfungen	59
7.3	Wiederkehrende Prüfungen	60
7.4	Restfestigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen im Labor	60
7.4.1	Betriebsgealterte Kabelproben	61
7.4.2	Im Labor gealterte Kabelproben	66
8	Zustandsbewertung	69
8.1	Daten einer Kabelstrecke: Datenerfassung	69
8.2	Statistische Zustandsbewertung	70
8.2.1	Begriffe	71
8.2.2	Darstellungsmöglichkeiten	75
9	Trends in der Bewertung von Mittelspannungskabelanlagen	82
9.1	Qualitätsmanagement	82
9.2	Qualitätsmanagementsysteme in der Elektrizitätswirtschaft	83
9.3	Instandhaltungsstrategien	83
9.3.1	Ereignisorientierte Instandhaltung	83
9.3.2	Zeitorientierte Instandhaltung	84
9.3.3	Zustandsorientierte Instandhaltung	84
9.3.4	Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung	84
9.3.5	Risikoorientierte Instandhaltung	84
9.4	Beurteilungskriterien	85
10	Zusammenfassung	87
11	Literaturverzeichnis	88
12	Anhang	91

1 Einleitung

Seit Beginn der technischen Nutzung des elektrischen Stromes, Mitte des 19. Jahrhunderts, wächst der Strombedarf stetig an. Mit dem steigenden Strombedarf ist auch ein ständig größer werdendes Stromnetz verbunden.

In der Energietechnik werden Kabel und Freileitungen zur Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie verwendet. Der Einsatz von Kabelsystemen ist vor allem in urbanen Gebieten unverzichtbar, da hier, aufgrund des geringen Platzbedarfes, die Energieversorgung mit Freileitungen nicht wirtschaftlich durchführbar ist. Aufgrund der höheren sozialen Akzeptanz und der Tatsache, dass Kabel auf der Nieder- und Mittelspannungsebene Stand der Technik sind, erfolgt in diesen Spannungsebenen auch eine zunehmende Verkabelung in ländlichen Gebieten.

Mit der stetigen Zunahme der Anzahl von Mittelspannungskabelsystemen steigen auch die an die Kabelsysteme gestellten Qualitätsanforderungen, damit die längstmögliche fehlerfreie Betriebsdauer erreicht werden kann. Zugleich steigen auch die Anforderungen an Diagnosesysteme für die Zustandsbewertung von Kabelstrecken, um mögliche Schwachstellen frühzeitig erkennen und einen verfrühten Austausch verhindern zu können.

Durch die immer weiter voranschreitende Digitalisierung ergeben sich neue Möglichkeiten der Zustandsbewertung. Mit Hilfe von Datenbanken können Betriebs-, Betriebsmittel-, Fehler- sowie Prüf- und Diagnosedaten gesammelt und ausgewertet werden.

Im Zuge dieser Masterarbeit wird auf die Qualitätssicherung von Mittelspannungskabelsystemen eingegangen. Dabei liegt besonderes Augenmerk auf den Bereichen der Qualitätssicherung bei der Herstellung von Kabeln, den Prüf- und Diagnosemöglichkeiten an sich in Betrieb befindlichen Kabelsystemen sowie den Möglichkeiten der Datenauswertung von Kabelanlagen.

2 Mittelspannungskabel

In Österreich befindet sich das Mittelspannungsnetz in der Netzebene 5 und dient hauptsächlich der Verteilung der elektrischen Energie auf Strecken bis zu 100 km Länge. Im Mittelspannungsnetz sind Betriebsspannungen zwischen mehr als 1 kV bis einschließlich 36 kV sowie Zwischenspannungen zugelassen.

2.1 Typen

Mittelspannungskabel können, wie in Bild 2-1 dargestellt, grundsätzlich nach der Art des verwendeten Isolierwerkstoffes unterteilt werden. Bei Kunststoffkabeln werden heute hauptsächlich Isolierungen aus vernetztem Polyethylen (VPE) oder Ethylen-Propylen-Polymer (EPR) verwendet. In den Mittelspannungskabelnetzen sind heute noch viele Kabelstrecken mit Papier-Masse-isolierten oder Polyethylen (PE) isolierten Kabeln in Betrieb.

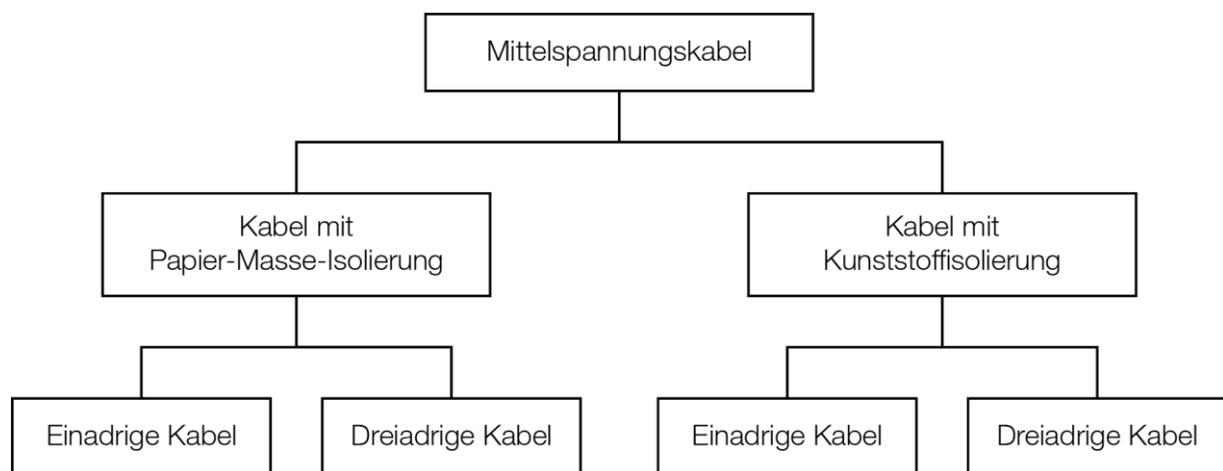


Bild 2-1: Bauarten Mittelspannungskabel

2.2 Aufbau

Ein Energiekabel besteht im Wesentlichen aus einem Leiter, der Isolierung mit innerer und äußerer Leitschicht, dem Schirm und einem Mantel. Bild 2-2 zeigt den grundsätzlichen Aufbau von Energiekabeln. [1], [2]

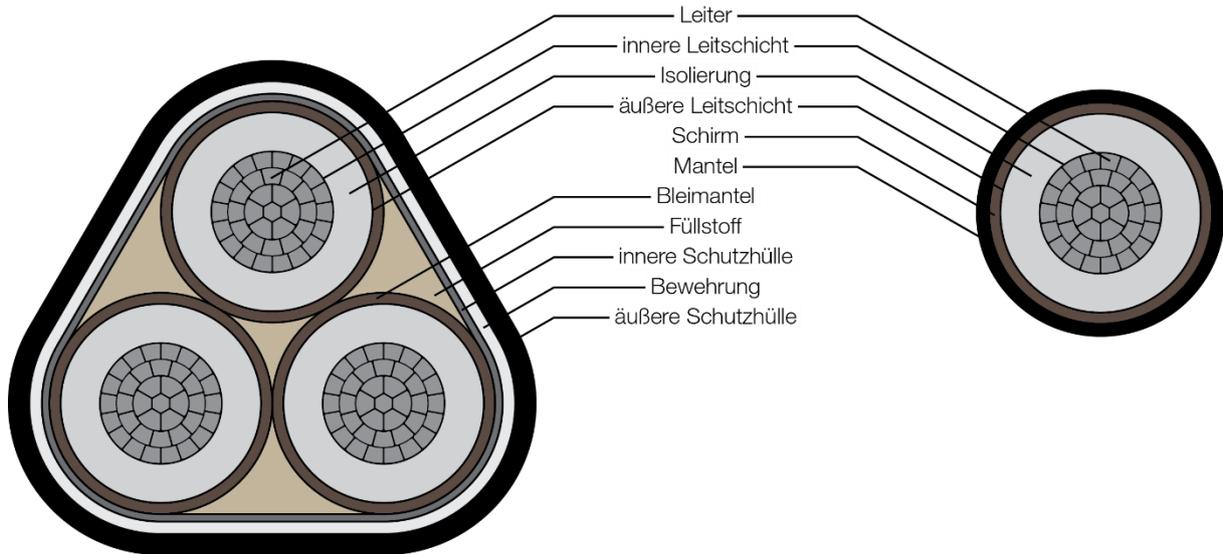


Bild 2-2: Aufbau Energiekabel, links: dreidriges Papier-Masse-isoliertes Mittelspannungskabel (Dreibleimantelkabel), rechts: einadriges kunststoffisoliertes Mittelspannungskabel [1]

2.2.1 Leiter

Der Leiter eines Energiekabels ist für den Leistungstransport zuständig. Als Materialien kommen entweder Kupfer oder Aluminium zum Einsatz. Der Leiterquerschnitt gibt nicht den geometrischen Querschnitt, sondern den elektrisch wirksamen Querschnitt an, welcher durch die Messung des elektrischen Widerstandes ermittelt wird. Im Bild 2-3 sind Querschnitte von Leiterformen für Energiekabel zu sehen, sie unterscheiden sich in der Art des Aufbaues und in ihrer Form. In Tabelle 2-1 sind einige Ausführungsformen von Leitern mit Typkurzzeichen aufgelistet. [3]

Tabelle 2-1: Leiterausführungen für feste Verlegung [3]

Leiterform	Ausführung	Typkurzzeichen
Rundleiter	eindrätig	RE
	mehrdrätig, unverdichtet oder verdichtet	RM
	segmentiert (Milliken-Leiter)	RMS
Sektorleiter	eindrätig	SE
	mehrdrätig, unverdichtet oder verdichtet	SM
Hohlleiter	mehrdrätig, unverdichtet oder verdichtet	RM/H
Ovalleiter	mehrdrätig, unverdichtet oder verdichtet	OM

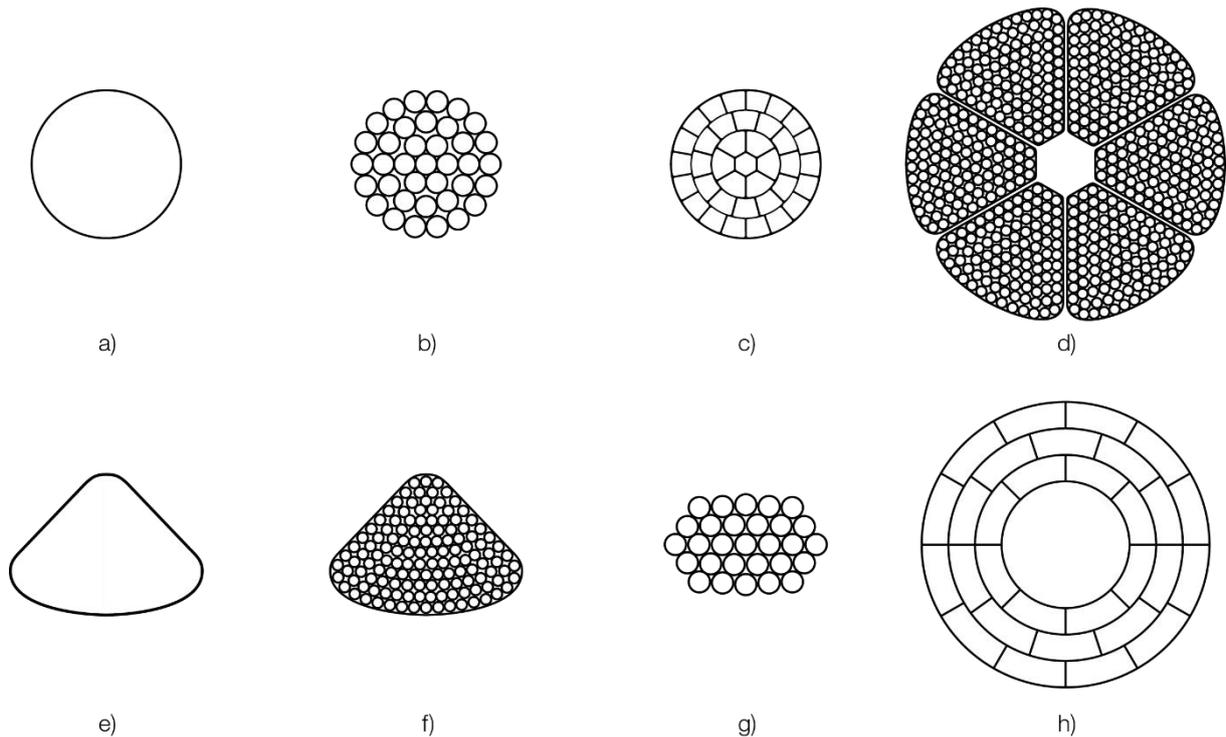


Bild 2-3: Leiterformen: a) Rundleiter eindrätig, b) Rundleiter mehrdrätig, c) Rundleiter mehrdrätig verdichtet, d) Rundleiter segmentiert (Milliken-Leiter), e) Sektorleiter eindrätig, f) Sektorleiter mehrdrätig (meist verdichtet), g) Ovalleiter, h) Hohlleiter verdichtet mit Hohlkanal [2], [3]

2.2.2 Elektrische Schirmung

Zum Schutz des Isolierwerkstoffes werden eine innere Leitschicht unter und eine äußere Leitschicht über der Isolierung angebracht. Durch diesen Aufbau wird eine Hohlräumbildung zwischen Leiter bzw. Schirm und Isolierung verhindert. Die Aufgaben der Leitschichten sind die Homogenisierung des Feldverlaufes an der Leiteroberfläche wie in Bild 2-4 dargestellt, die Potentialsteuerung des elektrischen Feldes und die Verhinderung von Teilentladungen am Übergang zwischen Leiter und Isolierung. [1], [3]

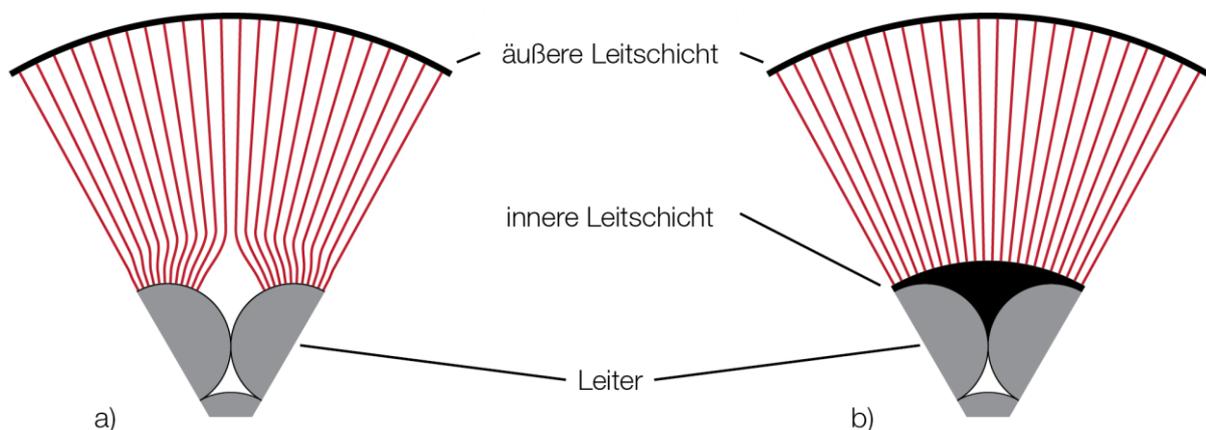


Bild 2-4: Beeinflussung des Feldlinienverlaufes durch die innere Leitschicht, a) ohne innerer Leitschicht, b) mit innerer Leitschicht [1]

Die innere Leitschicht besteht bei Kabeln mit Papierisolierung aus mehreren Lagen leitfähigem Papier und die äußere Leitschicht aus metallisiertem Papier, aus Höchststädter Folie (H-Folie) oder aus einer Kombination aus leitfähigem Papier mit Aluminiumbändern. [3]

Bei Kabeln mit Kunststoffisolierung werden die Isolierung und die Leitschichten in einer Dreifachextrusion auf den Leiter aufgebracht. Die leitfähige Schicht besteht aus einem Trägermaterial, welches mit homogen verteiltem Leitruß leitfähig gemacht wird. [3]

2.2.3 Isolierung

Für die Isolierung von Kabeln werden Polymere oder getränktes Papier verwendet. Die Dicke der Isolierschicht wird bei kleinen Nennspannungen nicht von der elektrischen Beanspruchung, sondern von der mechanischen Beanspruchung bei der Herstellung und Montage bestimmt. Erst bei höheren Spannungen ist die elektrische Beanspruchung für die Dicke der Isolierung maßgebend. [1]

Getränkte Papierisolierungen bestehen aus Isolierpapier, dies sind Bänder aus langfasriger Zellulose mit einer Stärke von ca. 0,1 mm bis 0,2 mm und einer Breite von 10 mm bis 30 mm. Das Isolierpapier wird schichtweise, nicht überlappend, um den Leiter gewickelt, damit es beim Biegen des Kabels zu keiner Faltenbildung des Isolierpapiers kommt. Die nachfolgende Lage Isolierpapier muss den Spalt der vorherigen Schicht abdecken. [1]

Im Bereich der Nieder- und Mittelspannungskabel wurde die getränkte Papierisolierung weitgehend von der Kunststoffisolierung abgelöst. Kunststoffisolierungen sind homogene, nicht selbstheilende Isolierungen, die nahtlos in einem Arbeitsschritt mit den leitfähigen Schichten auf den Leiter aufgebracht werden. Die Vorteile der Kunststoffisolierung bestehen in der vergleichsweise einfachen Herstellung von Isolierschicht und halbleitenden Schichten, dem geringeren Gewicht, der höheren Belastbarkeit und den verringerten dielektrischen Verlusten. [3]

2.2.4 Polster und Trennschichten

Bei Kunststoffkabeln werden gewickelte Lagen aus Vliesen, Faserstoffen, Kunststoff- oder Textilbändern als Polster und Trennschichten verwendet. Diese müssen den thermischen Beanspruchungen im ungestörten Betrieb und im Kurzschlussfall standhalten. [3]

Durch die Verwendung von Polstern wird das Eindringen der äußeren Leitschicht durch Schirmdrähte minimiert. Außerdem werden die Schirmdrähte durch Polster am Kabelumfang zur Einhaltung der Schirmdrahtabstände fixiert. Polster oder Trennschichten, die zwischen metallenen Hüllen und leitfähigen Schichten liegen, müssen leitfähig sein. [3]

Bei längswasserdicht ausgeführten Kunststoffkabeln muss die Trennschicht den Schirmbereich gegen das Eindringen von Wasser abdichten. Erreicht wird dies durch quellfähige Bänder, die beim Eindringen von Feuchtigkeit aufquellen und so alle Hohlräume und Spalten ausfüllen, wodurch sich weiteres eindringendes Wasser nur begrenzt in Längsrichtung ausbreiten kann. [3]

2.2.5 Schirm

Der Schirm besteht aus einer Lage Kupferdraht mit einer Querleitwendel und wird entweder über jede Kabelader oder die verseilten Kabeladern gelegt. Seine Aufgabe ist das Führen der Fehler- und Ableitströme. Die äußere Leitschicht und der Schirm müssen eine leitfähige Verbindung bilden, dies kann entweder durch eine leitfähige Polsterung oder durch direkten Kontakt sichergestellt werden. [3]

2.2.6 Mantel

Der Mantel dient als Schutz für die Kabelisolierung, er soll vor äußeren mechanischen und chemischen Beschädigungen sowie vor dem Eindringen von Feuchtigkeit und dem Austreten von Öl schützen.

Kabel mit getränkter Papierisolierung sind sehr feuchtigkeitsempfindlich, deshalb wird als Diffusionssperre ein Metallmantel aus Blei oder Aluminium verwendet. Zum Schutz vor äußeren Beschädigungen wird auf den Metallmantel noch eine Schutzhülle aufgebracht. [3]

Kabel mit Kunststoffisolierung benötigen keinen Metallmantel, als Mantelwerkstoff wird schwarz eingefärbtes UV-beständiges PVC oder PE verwendet. Um bei querwasserdichten Kabeln das diffundieren von Feuchtigkeit verhindern zu können, werden Schichtmäntel verwendet. Ein Schichtmantel besteht aus einer Aluminiumfolie die fest mit dem Mantel verklebt wird. [1]

2.2.7 Bewehrung

Eine Bewehrung hat die Aufgabe, Kabel gegen mechanische Einflüsse zu schützen. Kunststoffkabel mit Kupferschirm benötigen bei normaler mechanischer Beanspruchung keine Bewehrung, bei Kabeln mit Papierisolierung und Bleimantel ist stets eine Bewehrung zum Schutz des Bleimantels erforderlich. [3]

Für Kabel mit getränkter Papierisolierung und einem Bleimantel ist eine Bewehrung aus verzinkten Stahlbändern ausreichend, wird das Kabel jedoch erhöhten mechanischen Beanspruchungen wie bei der Verlegung im Rohr ausgesetzt, so ist eine Bewehrung aus verzinkten Stahldrähten (Flach- oder Runddraht) zu verwenden. [1], [3]

2.2.8 Schutzhülle

Kabel mit einem Metallmantel benötigen einen zusätzlichen Korrosionsschutz in Form einer Schutzhülle. Bei Kabeln mit Bewehrung wird zwischen einer inneren und äußeren Schutzhülle unterschieden. Die innere Schutzhülle befindet sich zwischen Mantel und Bewehrung, besteht meist aus bituminierten Faserstoffen und dient als Schutz für den Mantel. Über der Bewehrung befindet sich die äußere Schutzhülle, diese dient als Korrosionsschutz und besteht aus einer in Bitumen gebetteten Lage aus Kunststofffaser oder Jute. Die äußere Schutzhülle wird mit einer Schicht Kreide überzogen, damit das Kabel nicht verklebt. [1], [3]

2.3 Herstellung

Da Kabel mit getränkter Papierisolierung nicht mehr hergestellt werden, wird hier nur auf die Herstellung von modernen kunststoffisolierten Kabeln eingegangen.

Bei der Herstellung von VPE-isolierten Mittelspannungskabeln wird der Leiter von der Spule abgewickelt und über einen Speicher zur Extrusionsanlage geführt. In der Extrusionsanlage werden die innere Leitschicht, die Isolierung und die äußere Leitschicht durch Dreifachextrusion auf den Leiter aufgebracht. Anschließend wird das noch unvernetzte Polyethylen in einem Verfahren in das vernetzte Polyethylen umgewandelt. Die Vernetzung erfolgt durch Trockenvernetzung im Druckrohr, dabei durchläuft das Kabel ein, mit trockenem Stickstoff gefülltes, Druckrohr. Durch die Temperaturen von 200 °C und dem hohen Druck von ca. 10 bar bis 12 bar entsteht eine räumliche Vernetzung des Polyethylens. Anschließend wird das Kabel im Druckrohr abgekühlt, damit es zu keiner Blasenbildung kommt.

Die äußere Leitschicht wird zum Schutz gegen mechanische Beschädigungen mit leicht abreibbaren leitfähigen Bändern umwickelt, dabei ist auf die nötige Überlappung zu achten. Der Kupferschirm und die Querleitwendel werden anschließend um die Kabelader gesponnen und mit einer weiteren Lage leitfähiger Bänder fixiert. Auf diese Lage leitfähiger Bänder wird der Kabelmantel extrudiert und mit den, laut Norm vorgeschriebenen, Kennzeichnungen versehen. Bei querwasserdichten Kabeln wird vor dem Aufbringen des Kabelmantels schrittweise eine Metallfolie überlappend um die Kabelader gelegt und verklebt.

2.4 Kennzeichnung und Kurzzeichen

Die Beschreibung von Kabeln nach VDE- und ÖVE-Bestimmungen erfolgt mit Hilfe von Typkurzzeichen. Die Bauartbezeichnung setzt sich aus einzelnen Buchstabenkurzzeichen zusammen. In den Tabellen Tabelle 12-1 und Tabelle 12-2 sind die wichtigsten Buchstabenkurzzeichen für Kabel mit Papierisolierung und Kunststoffisolierung aufgelistet. Bild 2-5 zeigt die Anwendung der Kurzzeichen anhand der vollständigen Kabelbezeichnung eines Mittelspannungskabels.

Die vollständige Kabelbezeichnung setzt sich aus den folgenden Angaben zusammen:

- Bauartkurzzeichen
- Aderanzahl mal Nennquerschnitt in mm²
- Kurzzeichen für Leiterform und -art (Tabelle 2-1)
- Gegebenenfalls Nennquerschnitt des Schirms oder des konzentrischen Leiters in mm²
- Nennspannung U_0/U in kV

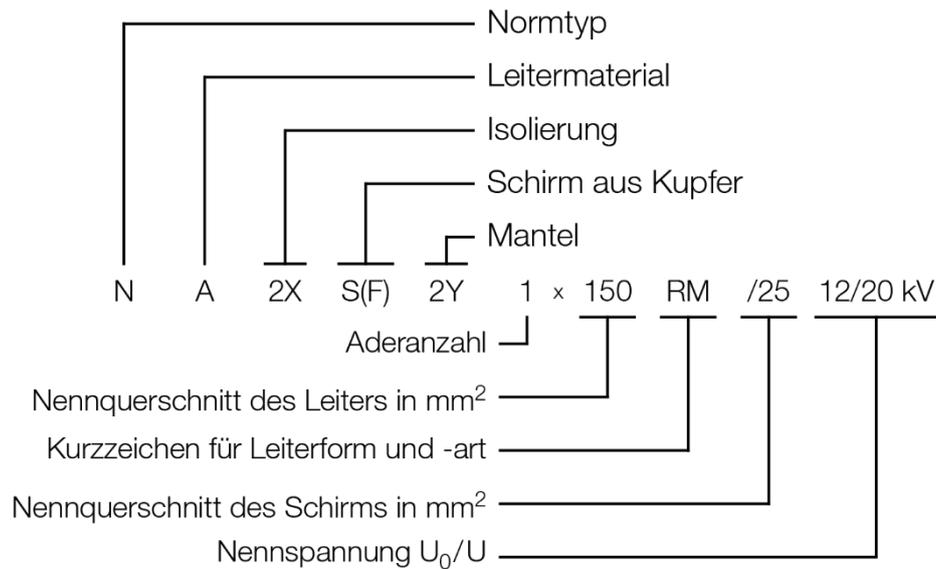


Bild 2-5: Beispiel für eine vollständige Kabelbezeichnung

Bei Kabeln mit Kunststoffisolierung erfolgt die Kennzeichnung der Kabel am Außenmantel, dabei sind folgende Daten periodisch anzugeben: Herstellerbezeichnung, Fertigungsjahr, vollständige Kabelbezeichnung und eine Längenmarkierung. Kabel mit getränkter Papierisolierung haben unter dem Metallmantel einen sich wiederholenden Kennstreifen mit Angaben zum Ursprung des Kabels.

2.5 Eigenschaften von Mittelspannungskabeln

Die Gleichungen (1) bis (8) zeigen Berechnungen verschiedener Kenngrößen für einadrige Radialfeldkabel. In Tabelle 12-3 sind elektrische, thermische und mechanische Eigenschaften für unterschiedliche Kabeltechnologien zusammengefasst.

Betriebskapazitätsbelag:

$$C'_b = C'_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \quad (1)$$

- C'_b Betriebskapazitätsbelag im Mitsystem in F/m
- C'_0 Nullkapazitätsbelag in F/m
- ϵ_0 Permittivität des Vakuums in F/m
- ϵ_r Permittivität der Isolierung
- D Durchmesser der Isolierung in mm
- d Durchmesser der inneren Leitschicht in mm

Erdschlussstrom:

$$I'_e = 3 \cdot U_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_b \quad (2)$$

I'_e	Erdschlussstrom in A/m
U_e	Betriebsspannung gegen Erde in V
f	Netzfrequenz in Hz

Ladestrom:

$$I'_C = U_e \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_b \quad (3)$$

I'_C	Ladestrom in A/m
--------	------------------

Ladeleistung:

$$P'_C = U_e^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_b \quad (4)$$

P'_C	Ladeleistung in W/m
--------	---------------------

Verlustfaktor:

$$\tan \delta = \frac{P_\delta}{Q_C} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U_R}{U_C} \quad (5)$$

$\tan \delta$	Verlustfaktor
P_δ	Dielektrische Verlustleistung in W
Q_C	Kapazitive Blindleistung in var
I_R	Wirkstrom in A
I_C	Kapazitiver Blindstrom in A
U_R	Wirkspannung in V
U_C	Kapazitive Blindspannung in V

Wellenwiderstand:

$$Z_W = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d} \approx \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d} \quad (6)$$

Z_W Wellenwiderstand in Ω

μ_0 Permeabilität des Vakuums in (V·s)/(A·m)

μ_r Permeabilität der Isolierung

Für ein 20 kV VPE-Mittelspannungskabel mit einem Querschnitt von 150 mm² beträgt der Wellenwiderstand ca. 24 Ω .

Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes:

$$R'(\vartheta) = R'_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\vartheta - 20 \text{ }^\circ\text{C})] \quad (7)$$

$R'(\vartheta)$ Temperaturabhängiger Widerstandsbelag in Ω/m

ϑ Temperatur in $^\circ\text{C}$

R'_{20} Widerstandsbelag bei 20 $^\circ\text{C}$ in Ω/m

α_{20} Linearer Widerstands-Temperaturkoeffizient bei 20 $^\circ\text{C}$ in 1/K

Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (8)$$

v Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/s

c_0 Lichtgeschwindigkeit in m/s

L' Induktivitätsbelag in H/m

C' Kapazitätsbelag in F/m

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit eines VPE-Kabels mit einer relativen Permittivität von 2,3 beträgt 197.677.293 m/s (197,68 m/ μs).

2.5.1 Kabelverluste

Die Gleichungen (9) bis (19) zeigen wie Kabelverluste von einadrigen Radialfeldkabeln berechnet werden. Außerdem wird veranschaulicht, wie sich die induzierten Spannungen bei einseitiger Schirmerdung für die Verlegung im Dreieck oder in der Ebene verhalten.

Spannungsabhängige Verluste:

$$P'_\delta = U_e^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C'_b \cdot \tan \delta \quad (9)$$

P'_δ Dielektrische Verlustleistung in W/m

Stromabhängige Verluste:

$$P'_i = I_r^2 \cdot R'_w(\vartheta) \quad (10)$$

- P'_i Stromwärmeverluste in W/m
 I_r Bemessungsstrom in A
 $R'_w(\vartheta)$ Temperaturabhängiger Wirkwiderstandsbelag in Ω/m

Im Kabelschirm induzierte Spannung:

$$U'_i = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I \cdot M' \quad (11)$$

- U'_i Induzierter Spannung in V/m
 M' Gegeninduktivitätsbelag in H/m
 I Leiterstrom in A

Gegeninduktivitätsbelag bei Verlegung im Dreieck mit einseitiger Schirmerdung:

$$M' = M'_R = M'_S = M'_T \quad (12)$$

$$M' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot \bar{a}}{d_m} \right)$$

- \bar{a} Mittlerer geometrischer Achsabstand in mm
 d_m Mittlerer Kabelschirmdurchmesser in mm

Gegeninduktivitätsbelag bei Verlegung in Ebene mit einseitiger Schirmerdung:

$$M'_R = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \ln \frac{\bar{a}}{d_m} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot \bar{a}}{d_m} \right\}$$

$$M'_S = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot \bar{a}}{d_m} \right) \quad (13)$$

$$M'_T = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left\{ -\frac{1}{2} \cdot \ln \frac{\bar{a}}{d_m} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot \bar{a}}{d_m} \right\}$$

Gegeninduktivitätsbelag bei beidseitiger Schirmerdung:

$$M' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot \bar{a}}{d_m} \right) \quad (14)$$

Mittlerer geometrischer Abstand bei Verlegung im Dreieck:

$$\bar{a} = \sqrt[3]{a_{RS} \cdot a_{ST} \cdot a_{TR}} = a$$

für: $a_{RS} = a_{ST} = a_{TR}$ (15)

a Achsabstand in mm

Mittlerer geometrischer Abstand bei Verlegung in Ebene:

$$\bar{a} = \sqrt[3]{2} \cdot a$$
 (16)

Schirmimpedanzbelag:

$$Z'_S = \sqrt{R'_S{}^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot M')^2}$$
 (17)

Z'_S Schirmimpedanzbelag in Ω/m

Schirmstrom bei Kabeln mit beidseitiger Schirmerdung:

$$I_S = \frac{U'_i}{Z'_S}$$
 (18)

I_S Schirmstrom in A

Gesamtverluste:

$$P'_{ges} = P'_\delta + P'_l + P'_S$$
 (19)

P'_l Stromwärmeverluste des Leiters in W/m

P'_S Stromwärmeverluste des Kabelschirms in W/m

2.5.2 Berechnungsbeispiel für Kabelverluste

Im folgenden Beispiel wird die Verlustberechnung eines in der Ebene verlegten, beidseitig geerdeten Mittelspannungskabels des Typs NA2XS(FL)2Y 1x300 RM /25 12/20 kV durchgeführt. Die für die Berechnung notwendigen Angaben sind in Tabelle 2-2 aufgelistet.

Tabelle 2-2: Angaben Berechnungsbeispiel

NA2XS(FL)2Y 1x300 RM /25 12/20 kV	
$I_l = 200 \text{ A}$	$U_e = 12000 \text{ V}$
$f = 50 \text{ Hz}$	$l = 0,7 \text{ km}$
$T_l = 75 \text{ °C}$	$T_s = 65 \text{ °C}$
$R_{20,l} = 0,1 \frac{\Omega}{\text{km}}$	$\alpha_{20 Al} = 0,00403 \frac{1}{\text{K}}$
$R_{20,s} = 0,517 \frac{\Omega}{\text{km}}$	$\alpha_{20 Cu} = 0,00393 \frac{1}{\text{K}}$
$\epsilon_r = 2,5$	$\tan \delta = 4 \cdot 10^{-4}$
$D = 32,5 \text{ mm}$	$d = 21 \text{ mm}$
$d_m = 35 \text{ mm}$	$a = 100 \text{ mm}$

Zuerst wird der Leiter- bzw. Schirmwiderstandsbelag auf die jeweilige Betriebstemperatur umgerechnet.

$$R'_l(75 \text{ °C}) = 0,0001 \frac{\Omega}{\text{m}} \cdot \left[1 + 0,00403 \frac{1}{\text{K}} \cdot (75 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \right] = 0,00012 \frac{\Omega}{\text{m}} \quad (20)$$

$$R'_s(65 \text{ °C}) = 0,000517 \frac{\Omega}{\text{m}} \cdot \left[1 + 0,00393 \frac{1}{\text{K}} \cdot (65 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \right] = 0,00061 \frac{\Omega}{\text{m}} \quad (21)$$

Anschließend erfolgt die Berechnung des Betriebskapazitätsbelags, der für die weitere Bestimmung der dielektrischen Verluste benötigt wird.

$$C'_b = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot 2,5}{\ln\left(\frac{32,5 \text{ mm}}{21 \text{ mm}}\right)} = 318,47 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad (22)$$

Aus der Phasenspannung und dem Betriebskapazitätsbelag wird die dielektrische Verlustleistung berechnet.

$$P'_\delta = 12000^2 \text{ V}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 318,47 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,0058 \frac{\text{W}}{\text{m}} \quad (23)$$

Mit dem Leiterwiderstandsbelag bei Betriebstemperatur und dem Leiterstrom werden die stromabhängigen Verluste im Leiter berechnet.

$$P'_l = 200^2 A^2 \cdot 0,00012 \frac{\Omega}{m} = 4,89 \frac{W}{m} \quad (24)$$

Im nächsten Schritt wird der Gegeninduktivitätsbelag bei beidseitiger Schirmerdung für die Verlegung in der Ebene bestimmt.

$$M' = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot 100 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} \right) = 0,395 \cdot 10^{-6} \frac{H}{m} \quad (25)$$

Mit dem Schirmwiderstandsbelag bei Betriebstemperatur und dem Gegeninduktivitätsbelag kann der Schirmimpedanzbelag berechnet werden.

$$Z'_S = \sqrt{0,00061^2 \left(\frac{\Omega}{m} \right)^2 + \left(2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,395 \cdot 10^{-6} \frac{H}{m} \right)^2} = 0,00062 \frac{\Omega}{m} \quad (26)$$

Der von der Länge des Kabels unabhängige Schirmstrom wird aus der im Schirm induzierten Spannung und dem Schirmimpedanzbelag bestimmt.

$$I_S = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 200 A \cdot 0,395 \cdot 10^{-6} \frac{H}{m}}{0,00062 \frac{\Omega}{m}} = 39,95 A \quad (27)$$

Die Stromabhängigen Verluste im Schirm können mit dem Schirmstrom und dem Schirmwiderstandsbelag berechnet werden.

$$P'_S = 39,95^2 A^2 \cdot 0,00061 \frac{\Omega}{m} = 0,97 \frac{W}{m} \quad (28)$$

Die gesamten längenabhängigen Verluste setzen sich aus den dielektrischen und stromabhängigen Verlusten der drei Leiter zusammen.

$$P'_{ges} = 3 \cdot \left(0,0058 \frac{W}{m} + 4,89 \frac{W}{m} + 0,97 \frac{W}{m} \right) = 17,59 \frac{W}{m} \quad (29)$$

Die Verluste der Kabelstrecke berechnen sich aus der Multiplikation der längenabhängigen Gesamtverluste mit der Kabellänge.

$$P_{ges} = 17,59 \frac{W}{m} \cdot 700 m = 12313 W \quad (30)$$

Die gesamten Verluste einer 700 m langen Kabelstrecke mit beidseitiger Schirmerdung betragen 12,3 kW.

2.6 Normen für Starkstromkabel

In Tabelle 2-3 sind Normen für die Auswahl und Prüfung von Mittelspannungskabeln zusammengefasst.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung Normen für Starkstromkabel

Norm	Titel	Bemerkung
DIN VDE 0276-1000 [4]	Starkstromkabel Teil 1000: Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren	Beschreibt die Regeln zur Auswahl des Leiterquerschnittes, in Abhängigkeit der Belastbarkeit (zulässige Erwärmung) für den ungestörten bzw. gestörten Betrieb (Kurzschluss).
DIN VDE 0276-620 [5]	Starkstromkabel - Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis einschließlich 20,8/36 (42) kV	Festlegung der allgemeinen Anforderungen, des Aufbaues, der Maße und der Prüfanforderungen von Starkstromkabeln mit extrudierter Isolierung
DIN VDE 0276-621 [6]	Starkstromkabel - Teil 621: Energieverteilungskabel mit getränkter Papierisolierung für Mittelspannung	Festlegung des allgemeinen Aufbaues, der Maße und der Prüfanforderungen an Energiekabel mit getränkter Papierisolierung
DIN VDE 0276-622 [7]	Starkstromkabel - Teil 622: Starkstromkabel mit Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis 20,8/36 (42) kV mit verbessertem Verhalten im Brandfall für Kraftwerke	Festlegung des allgemeinen Aufbaues, der Maße und der Prüfanforderungen von Starkstromkabeln mit verbessertem Verhalten im Brandfall
DIN VDE 0276-605 [8]	Starkstromkabel - Ergänzende Prüfverfahren	Zusammenfassung und Festlegung der Prüfverfahren von polymerisolierten und ummantelten Starkstromkabeln
DIN EN 60885-2 [9]	Elektrische Prüfverfahren für Starkstromkabel - Teil 2: Teilentladungsprüfungen	Beschreibt die Prüfung der Höhe der Teilentladungsintensität (Prüfgeräte, Kalibrierung und Überprüfung, Prüfverfahren)
DIN EN 60885-3 [10]	Elektrische Prüfverfahren für Starkstromkabel - Teil 3: Prüfverfahren zur Teilentladungsmessung an Längen von extrudierten Kabeln	Festlegung der Anforderungen für Teilentladungsmessungen an Längen von extrudierten Starkstromkabeln (Prüfgeräte, Aufbau der Prüfschaltung, Messverfahren, Spannungspegel/Teilentladungsgrenzwerte, Verhalten von Doppelimpulsen und Aufnahme von Doppelimpulsdiagrammen, Anforderungen an die Abschlussimpedanz)

3 Garnituren

Kabelgarnituren haben die Aufgabe, Teilstücke von Kabeln miteinander zu verbinden oder abzuschließen. Zum Abschließen eines Kabels werden Endverschlüsse, zum Verbinden einzelner Teillängen Muffen verwendet. Die Verwendung von Kabelgarnituren darf keinen Einfluss auf die Qualität einer Kabelstrecke haben. [3]

3.1 Verbindungssysteme

Verbindungssysteme können nach der Art wie die Verbindung hergestellt wird in Press- und Schraubverbinder unterschieden werden. Das Verbindungssystem muss den thermischen und mechanischen Beanspruchungen im Normalbetrieb sowie im Fehlerfall standhalten. [1]

Pressverbindungen werden nach der Formgebung in Sechskant-, Rund-, Tiefnutpressung, usw. unterschieden. Für jede Leiterform, jeden Leiterquerschnitt und -werkstoff, wird ein eigens abgestimmter Pressverbinder benötigt. Als Presswerkzeug kommen, in Abhängigkeit des Querschnittes, mechanische oder hydraulische Presszangen zum Einsatz. Bei der Montage ist die vorgegebene Anzahl und Reihenfolge der Pressungen einzuhalten, da die Verbinder oder Kabelschuhe durch die Pressungen länger werden. [3]

Die Ausführung von Schraubverbindern kann mit lösbaren oder nichtlösbaren Innen- oder Außensechskantschrauben erfolgen. Nichtlösbare Sechskantschrauben haben eine Abreißvorrichtung, die beim geforderten Kontaktdruck an der Sollbruchstelle abreißen. Für Übergangsmuffen von papierisolierten Kabeln auf Kunststoffkabel werden Schraubverbinder mit Trennsteg verwendet, dadurch soll ein Eindringen der Tränkmass in das Kunststoffkabel verhindert werden. Schraubverbinder können für einen Querschnittsbereich eingesetzt werden, dadurch ist es möglich unterschiedliche Leiterformen (Tabelle 2-1) miteinander zu verbinden. [3]

3.2 Feldsteuerung

Für die Montage von Kabelgarnituren müssen die Kabelenden abgesetzt werden, dadurch wird der Feldverlauf an der Kante der äußeren Leitschicht gestört und es kommt in diesem Bereich zu einer Erhöhung des elektrischen Feldes. Damit es auf Grund der erhöhten Feldstärke zu keinem elektrischen Durchschlag kommt, muss bei Endverschlüssen das elektrische Feld an der Absetzkante der äußeren Leitschicht gesteuert und bei Kabelmuffen die äußere Leitschicht wiederhergestellt werden. Die Feldsteuerung kann geometrisch-kapazitiv, resistiv oder refraktiv erfolgen. Die Bauform der resistiven und refraktiven Feldsteuerung ist schlanker als die der geometrisch-kapazitiven Feldsteuerung. Resistive Feldsteuerungen sind frequenzabhängig und deshalb unwirksam bei Gleichspannung. [3]

3.3 Technik

Bei Garnituren für Kabel mit Kunststoffisolierung wird hauptsächlich die Schrumpftechnik verwendet, bei der Verbindung von Kabeln mit getränkter Papierisolierung die Wickeltechnik. Die Schrumpftechnik kann in Warm- und Kaltschrumpftechnik unterschieden werden. [1] [3]

Die Basis der Warmschrumpftechnik sind peroxidisch vernetzte Formteile aus thermoplastischem Polyethylen. Diese Formteile werden erwärmt, mechanisch gedehnt und im ausgedehnten Zustand abgekühlt. Durch diese Vorgehensweise werden die mechanischen Spannungen im Formteil eingefroren und die gedehnte Form bleibt erhalten. Bei der Montage werden die eingefrorenen mechanischen Spannungen durch Wärmezufuhr gelöst und das Formteil passt sich beim Schrumpfen in Durchmesser und Form an das zu umhüllende Kabel an. [3]

Kaltschrumpfende Formteile werden aus Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM) oder Silikonkautschuk hergestellt. Im Gegensatz zur Warmschrumpftechnik müssen die Formteile bei der Kaltschrumpftechnik durch Stützelemente in ausgedehntem Zustand gehalten werden. Für die Montage wird das Stützelement entfernt und das Formteil passt sich an das zu umhüllende Kabel an. Da für die Montage keine zusätzlichen Wärmequellen benötigt werden, hat sich die Kaltschrumpftechnik vor allem in Bereichen, in denen keine offenen Flammen erlaubt sind, wie z.B. explosionsgeschützte Bereiche, durchgesetzt. [3]

Bei der Wickeltechnik werden leitfähige und isolierende Bänder aus massegetränktem Papier für Kabel mit getränkter Papierisolierung und selbstverschweißende Kunststoffbänder für Kunststoffkabel zur Verbindung der einzelnen Schichten verwendet. Die Wickeltechnik kann leicht an alle geometrischen Gegebenheiten angepasst werden, sie ist im Vergleich zur Schrumpftechnik zeitaufwändiger, da die Montage große Sorgfalt erfordert. [3]

3.4 Endverschlüsse

Kabelendverschlüsse können je nach Einsatzgebiet in Innenraum- und Freiluftendverschlüsse unterschieden werden. Der grundsätzliche Aufbau von Innenraum- und Freiluftendverschlüssen ist der gleiche, wobei bei Freiluftendverschlüssen der Kriechweg durch die Größe und Anzahl der Schirmkappen verlängert wird. Da Freiluftendverschlüsse den unterschiedlichsten Witterungseinflüssen ausgesetzt sind, ist besonders darauf zu achten, dass kein Wasser in den Leiter oder Schirmbereich eindringen oder eindiffundieren kann. [1]

3.5 Muffen

Muffen werden zur Verbindung von Kabelteillängen benötigt. Diese können für die Mittelspannung in Verbindungs- und Übergangsmuffen unterteilt werden. Zum Zusammenfügen Kabel gleicher Bauart werden Verbindungsmuffen, bei unterschiedlicher Bauart Übergangsmuffen, verwendet. Eine Muffe muss alle vorhandenen metallenen Aufbauelemente wie Leiter, Schirme, Mäntel und Bewehrungen, sowie die Isolierung und die leitfähigen Schichten miteinander verbinden. [3]

Bei Übergangsmuffen von Kabeln mit Papierisolierung auf Kabel mit Kunststoffisolierung muss das papierisolierte Kabel abgedichtet werden, damit keine Isolierflüssigkeit in das Kunststoffkabel eindringen kann. [3]

3.6 Normen für Kabelgarnituren

In Tabelle 3-1 sind Normen für die Prüfung von Mittelspannungsgarnituren zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Zusammenfassung Normen für Kabelgarnituren

Norm	Titel	Bemerkung
DIN VDE 0278-629-1 [11]	Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 1: Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung	Anforderungen für Typprüfungen von Kabelgarnituren in Verbindung mit Starkstromkabeln aus DIN VDE 0276-620 [5]
DIN VDE 0278-629-2 [12]	Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 2: Kabel mit massegetränkter Papierisolierung	Anforderungen für Typprüfungen von Kabelgarnituren in Verbindung mit Starkstromkabeln aus DIN VDE 0276-621 [6]
DIN EN 61442 [13]	Prüfverfahren für Starkstromkabelgarnituren mit einer Nennspannung von 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) bis 36 kV ($U_m = 42$ kV)	Festlegung der Prüfverfahren die zur Typprüfung von Starkstromkabelgarnituren für kunststoff- und papierisierte Kabel angewendet werden müssen

4 Kabelprüfungen laut Norm

In diesem Abschnitt werden Prüfungen der elektrischen Eigenschaften von Kabeln nach den VDE-Bestimmungen beschrieben. Dabei wird zwischen Stück-, Auswahl- und Typprüfungen unterschieden. Alle elektrischen und nicht elektrischen Normprüfungen nach DIN VDE 0276-620 [5] sind in Tabelle 12-4 und Tabelle 12-5 aufgelistet.

4.1 Stückprüfungen

Stückprüfungen müssen an allen Fertigungslängen durchgeführt werden und dienen als Nachweis für die Fertigungsqualität.

4.1.1 Messung des elektrischen Leiterwiderstandes

Der Leiterwiderstand muss an allen vorhandenen Leitern des Kabels, einschließlich des gegebenenfalls vorhandenen konzentrischen Leiters, bestimmt werden. Die Prüfung kann entweder an der vollständigen Fertigungslänge, oder an kurzen Kabelproben von mindestens 1 m Länge aus der vollständigen Fertigungslänge durchgeführt werden. [5], [8]

Das Verfahren zur Konditionierung der Kabelproben hängt von der Art des zu messenden Prüflings ab. Erfolgt die Prüfung an der vollständigen Fertigungslänge, so ist die Probe in einem Prüfraum mit konstanter Temperatur für mindestens 12 Stunden zu konditionieren. Sollte der Zweifel bestehen, dass die Leitertemperatur nicht der Raumtemperatur entspricht, so ist die Konditionierungszeit auf 24 Stunden zu verlängern. Bei der Prüfung an kurzen Kabelproben aus der vollständigen Fertigungslänge sind diese für mindestens 1 Stunde im temperaturgeregelten Flüssigkeitsbad zu konditionieren. Eine ausreichend lange Konditionierungsdauer ist notwendig, damit sichergestellt werden kann, dass die Leitertemperatur einen konstanten Wert erreicht, welcher der Umgebungstemperatur entspricht. Während der Messung des Widerstandes ist die Leitertemperatur mit aufzuzeichnen. [5], [8], [14]

Für die Bestimmung des Leiterwiderstandes werden die beiden Enden des Leiters an eine geeignete Gleichstromquelle angeschlossen und der Spannungsabfall spannungsrichtig gemessen. Der aus dem eingestellten Strom und der gemessenen Spannung berechnete Leiterwiderstand ist laut Gleichung (31) auf 20 °C und 1 km Länge zu korrigieren. [5], [8], [14]

$$R_{20} = R_t \cdot k_t \cdot \frac{1000}{L} \quad (31)$$

R_{20}	Leiterwiderstand bei 20 °C in Ω/km
R_t	Gemessener Leiterwiderstand in Ω
k_t	Korrekturfaktor aus EN 60228 Tabelle A.1 und Anhang B [14]
L	Länge des gemessenen Kabels in m

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn der Leiterwiderstand bei 20 °C jedes gemessenen Leiters den zulässigen Höchstwert gemäß DIN EN 60228 nicht überschreitet. In Tabelle 4-1 sind Höchstwerte für häufig verwendete Leiterquerschnitte von Mittelspannungskabeln angeführt. [5], [8], [14]

Tabelle 4-1: Zulässige Widerstandshöchstwerte für ausgewählte Leiterquerschnitte [14]

Nennquerschnitt	Höchstwert des Leiterwiderstandes bei 20 °C			
	Eindrähtige Leiter		Mehrdrähtige Leiter	
	Cu	Al	Cu	Al
mm ²	Ω/km	Ω/km	Ω/km	Ω/km
95	0,1930	0,3200	0,1930	0,3200
150	0,1240	0,2060	0,1240	0,2060
240	0,0775	0,1250	0,0754	0,1250
300	0,0620	0,1000	0,0601	0,1000

4.1.2 Spannungsprüfung

Die Spannungsprüfung ist eine Kurzzeitprüfung und soll sicherstellen, dass die Isolierung keine, den Betrieb gefährdenden, Fertigungsfehler besitzt.

Die Prüfung ist an der vollständigen Fertigungslänge mit einer netzfrequenten Prüfwechselspannung von $3,5 \cdot U_0$ für 5 Minuten an jeder Kabelader durchzuführen. Die Prüfwechselspannung wird zwischen Leiter und geerdetem Kabelschirm angelegt. Handelt es sich um ein ungeschirmtes einadriges oder nicht bewehrtes Kabel, so ist dieses für 1 Stunde in Wasser mit Raumtemperatur einzutauchen und danach die Prüfspannung zwischen Leiter und Wasser anzulegen. [5], [8]

Für ein erfolgreiches Bestehen der Spannungsprüfung darf es während dieser zu keinem Durchschlag kommen. [5]

4.1.3 Teilentladungsprüfung

Die in der DIN VDE 0276-620 [5] vorgeschriebene Teilentladungsprüfung ist gemäß den Vorgaben der DIN EN 60885-3 [10] durchzuführen. Diese beschreibt die elektrischen Prüfverfahren zur Teilentladungsmessung an Längen von extrudierten Kabeln.

Die Teilentladungsprüfung ist an der vollständigen Fertigungslänge durchzuführen und die Kalibrierung hat mit einem Kalibrierimpuls von 5 pC zu erfolgen. Vor der Prüfung ist die Kabelprobe mit $2,4 \cdot U_0$ für 1 Minute zu beaufschlagen. Die Prüfung selbst erfolgt mit einer netzfrequenten Prüfwechselspannung von $2 \cdot U_0$, mit der Anforderung, dass der Teilentladungspegel ≤ 2 pC zu betragen hat. [5]

Die Wahl der Prüfschaltung für die Teilentladungsmessung ist davon abhängig, ob der zu messende Kabelprüfling als kurze Länge (konzentrierte Kapazität) oder als lange Länge angesehen werden kann. Die maximale Länge, bis zu der ein Kabel noch als konzentrierte Kapazität angesehen werden kann, wird als l_k definiert. [10]

Durch die Aufnahme eines Doppelimpulsdiagramms wird die maximale Länge l_k bestimmt. Das Doppelimpulsdiagramm wird ausschließlich vom Prüfaufbau und durch das Messsystem bestimmt, deshalb hat die Aufnahme des Doppelimpulsdiagramms bei den gleichen Bedingungen wie bei der Hochspannungsprüfung zu erfolgen, mit der Ausnahme, dass der Kabelprüfling durch einen ohmschen Belastungswiderstand ersetzt wird. Der Wert des Belastungswiderstandes entspricht dem maximalen Wellenwiderstand eines extrudierten Kabels. Die Einspeisung der Doppelimpulse erfolgt mit einem Doppelimpulsgenerator an den gleichen Stellen an denen auch die Kalibrierimpulse eingespeist werden. [10]

Ein Doppelimpulsgenerator ist ein Gerät, welches zwei idente Impulse mit der gleichen scheinbaren Ladung erzeugt, dabei ist der Impulsabstand zwischen den beiden Impulsen einstellbar. Bei der Kurvenform darf die Anstiegszeit (10 % bis 90 % des Scheitelwertes) maximal 20 ns und die Zeit zwischen den 10 % Werten von Impuls-Stirn und -Rücken maximal 150 ns betragen. In Bild 4-1 ist der Signalverlauf eines Doppelimpulses dargestellt. [10]

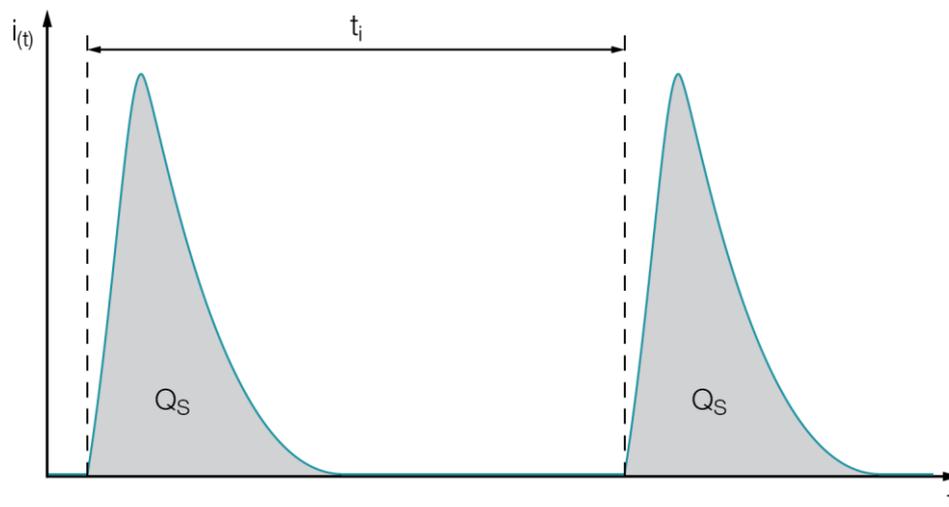


Bild 4-1: Signalverlauf eines Doppelimpulses

Für die Bestimmung des Doppelimpulsdiagramms wird der Impulsabstand des Doppelimpuls-generators auf $t = 100 \mu\text{s}$ eingestellt und die Stärke der beiden Impulse A_{100} mit dem Teilentladungsdetektor gemessen. Anschließend wird der Impulsabstand ausgehend von $t = 0,2 \mu\text{s}$ im Zeitintervall $0,2 \mu\text{s} \leq t_i \leq 100 \mu\text{s}$ variiert und die zum Impulsabstand zugehörige maximale Entladungsstärke A_t ermittelt. Zur Erstellung des Doppelimpulsdiagrammes werden die Impulsabstände t auf der Abszisse und die zugehörigen Werte A_t/A_{100} auf der Ordinate aufgetragen. In Bild 4-2 sind die unterschiedlichen Typen von Doppelimpulsdiagrammen dargestellt. [10]

Aus dem Doppelimpulsdiagramm werden der Zeitpunkt t_k für $A_t/A_{100} = 1,4$ im Bereich der positiven Überlagerung am Anfang und die Zeitpunkte t_1 und t_2 für $A_t/A_{100} \leq 1,0$ in allen Bereichen negativer Überlagerung, in denen die negative Überlagerung größer -10 % beträgt ermittelt. Mit Hilfe der Gleichung (32) können die Längen l_k , l_1 und l_2 für die entsprechenden Zeitwerte t_k , t_1 und t_2 berechnet werden. [10]

$$l_i = 0,5 \cdot t_i \cdot v \quad (32)$$

- l_i Kabellängen für Werte von A_t/A_{100} in m
 t_i Zeitpunkte für Werte von A_t/A_{100} in s
 v mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/s

Kabelprüflinge mit einer Länge $l < l_k$ können als konzentrierte Kapazität angesehen werden und ohne weitere Maßnahmen gemessen werden, Kabelprüflinge deren Länge im Bereich von $2 \cdot l_1 \leq l \leq 2 \cdot l_2$ liegt, müssen entweder mit einer Abschlussimpedanz oder mit geänderten Bedingungen der Prüfschaltung zur Vergünstigung der Werte von l_1 und l_2 geprüft werden. Außerdem ist es möglich, den Wert der maximalen Kabellänge l_k durch Verbinden beider Kabelenden zu verdoppeln. Der Bereich von $2 \cdot l_1 \leq l \leq 2 \cdot l_2$ ($t_1 \leq t \leq t_2$) ist als besonders kritisch zu betrachten, da es hier zu einer Abschwächung der angezeigten Teilentladungsimpulse kommt und somit unzulässige hohe scheinbare Ladungen wegen Abschwächung nicht detektiert werden. [10]

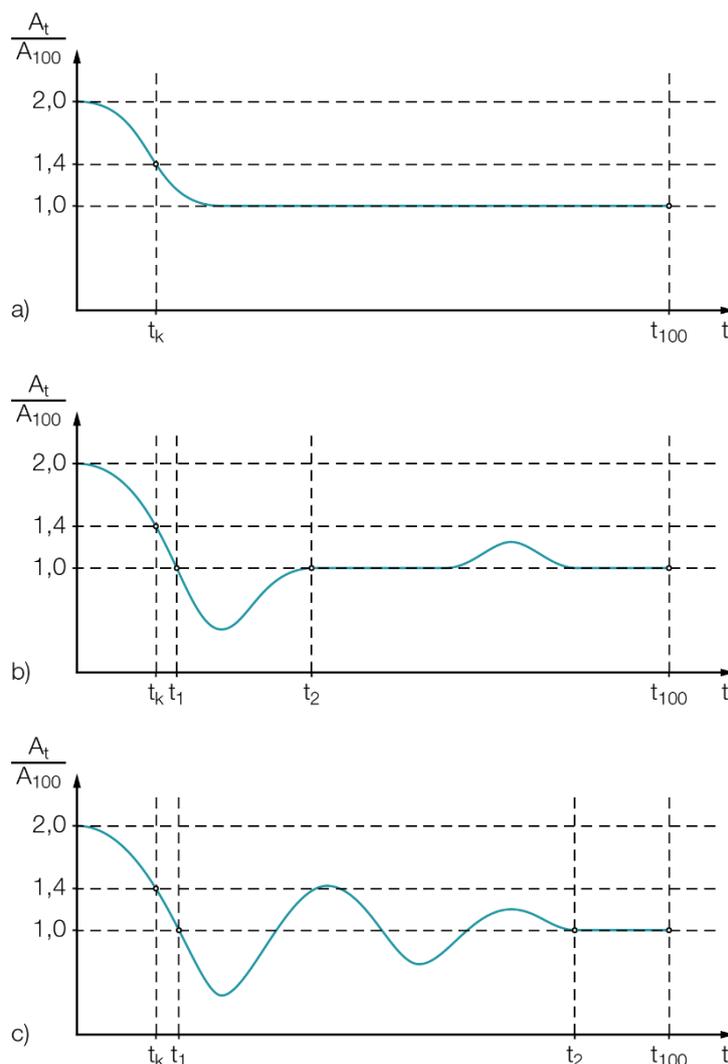


Bild 4-2: Doppelimpulsdiagramme, a) Typ 1 ohne negative Überlagerung, b) Typ 2 mit negativer Überlagerung zwischen t_1 und t_2 , c) Typ 3 mit negativen und positiven Überlagerungen zwischen t_1 und t_2 [10]

Kurze Kabellängen einschließlich Längen für Typprüfungen:

Verhält sich der Kabelprüfling wie eine konzentrierte Kapazität, dann sind Überlagerungen von reflektierten Wellen nicht zu berücksichtigen. Für die Messung können die Prüfschaltungen a), b) und c) aus Bild 4-3 verwendet werden. [10]

Vor der Messung ist die vollständige Prüfschaltung mit einem der IEC 60270 entsprechenden Teilentladungskalibrator, parallel zum Kabel, am detektorfernen Ende zu kalibrieren. Die Teilentladungsmessung erfolgt an einem Ende des Kabelprüflings. [10]

Lange Kabellängen geprüft ohne Abschlussimpedanz:

Bei langen Kabelprüflingen, die sich nicht wie eine konzentrierte Kapazität verhalten, ist es möglich, die Teilentladungsmessung ohne Abschlussimpedanz wie in Bild 4-3 a), b) und c) durchzuführen, wenn das Doppelimpulsdiagramm dem Typ 1 entspricht oder wenn es Typ 2 oder Typ 3 entspricht und die Länge des Kabelprüflings außerhalb des Bereiches von $2 \cdot l_1 \leq l \leq 2 \cdot l_2$ liegt, siehe Bild 4-2. [10]

Die Kalibrierung der vollständigen Prüfschaltung hat mit einem, der IEC 60270 entsprechenden, Teilentladungskalibrator parallel zum Kabel am detektornahen Kabelende zu erfolgen. [10]

Zur Bestimmung des Dämpfungskorrekturfaktors muss der Teilentladungskalibrator bei gleicher Einstellung des Verstärkers abwechselnd an beiden Kabelenden angeschlossen und die Anzeigewerte der Entladungen aufgezeichnet werden. Aus den Anzeigewerten der Entladungen mit dem Kalibrator kann der Dämpfungskorrekturfaktor nach Gleichung (33) berechnet werden. [10]

$$\begin{aligned}
 F &= 1 && \text{für } \alpha_2 \geq \alpha_1 \\
 F &= \sqrt{\alpha_1/\alpha_2} && \text{für } \alpha_2 < \alpha_1
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

F Dämpfungskorrekturfaktor

α_1 Anzeigewert der Entladung mit Kalibrator am detektornahen Ende in pC

α_2 Anzeigewert der Entladung mit Kalibrator am detektorfernen Ende in pC

Die Teilentladungsmessung wird durch Wechseln der Hochspannungselektrode des Koppelkondensators an beiden Kabelenden durchgeführt. Die Teilentladungsstärken der Messung am detektornahen Ende A_1 und am detektorfernen Ende A_2 sind zu ermitteln. Die tatsächliche Teilentladungsstärke wird nach Gleichung (34) berechnet. [10]

$$q = A_{max} \cdot F \tag{34}$$

q Wert der Teilentladung in pC

A_{max} Größerer Wert aus A_1 und A_2 in pC

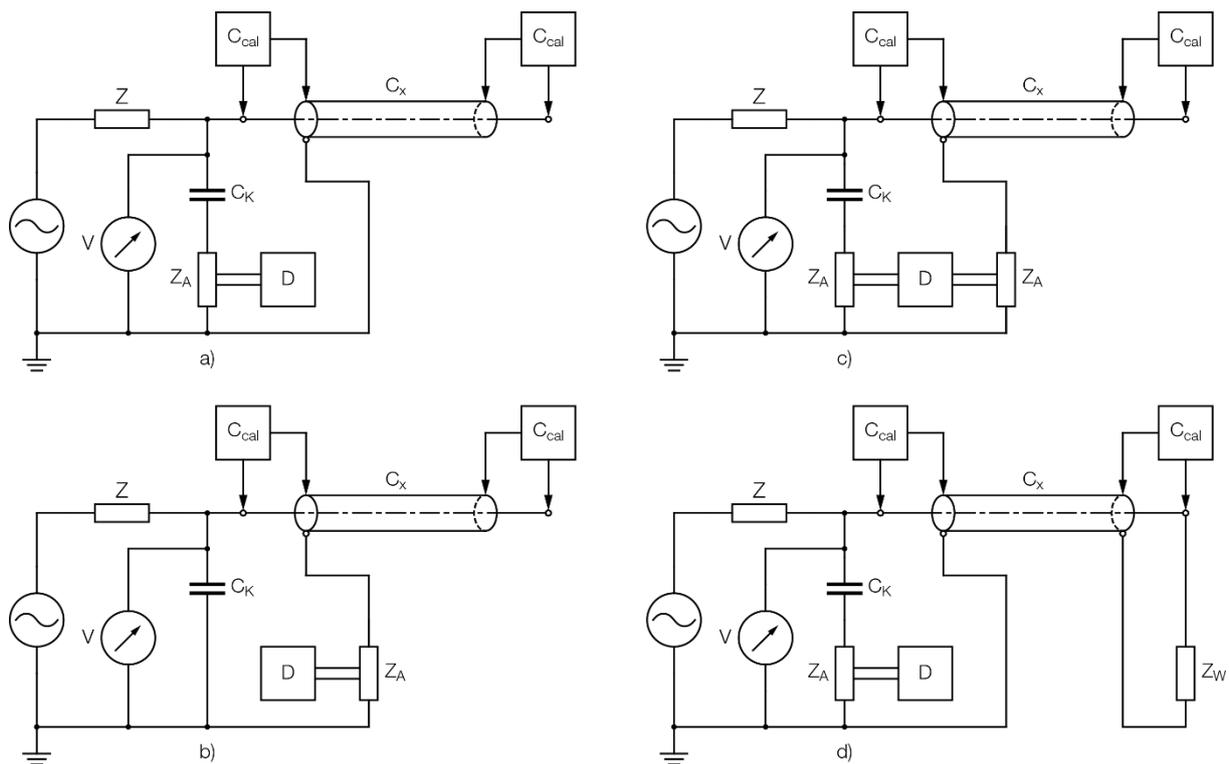
Lange Kabellängen geprüft mit Abschlussimpedanz:

Wenn die Teilentladungsmessung an langen Kabelprüfungen mit einer Abschlussimpedanz durchgeführt wird, ist es nicht notwendig ein Doppelimpulsdiagramm aufzuzeichnen. Damit die Messung mit einer Abschlussimpedanz durchgeführt werden darf, muss diese den Anforderungen der DIN EN 60885-3 entsprechen. Die Prüfschaltung zur Messung mit Abschlussimpedanz ist in Bild 4-3 d) dargestellt. [10]

Die Kalibrierung der vollständigen Prüfschaltung sowie die Teilentladungsmessung selbst erfolgt ident zur Prüfung langer Kabellängen ohne Abschlussimpedanz. Der tatsächliche Wert der Teilentladung kann aus den beiden Anzeigewerten der Entladung mit dem Kalibrator und den gemessenen Entladungstärken nach Gleichung (35) berechnet werden. [10]

$$q = q_{cal} \cdot \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2}} \quad (35)$$

q_{cal} Stärke des Kalibrierimpulses in pC



C_x Kabelprüfling	C_K Koppelkondensator	Z_W Abschlussimpedanz	V Spannungsmesseinrichtung
C_{cal} Kalibrator	Z_A Ankopplungsvierpol	Z Impedanz oder Filter	D Detektor

Bild 4-3: Prüfschaltungen zur Teilentladungsmessung, a) Ankopplungsvierpol in Reihe mit Koppelkondensator, b) Ankopplungsvierpol in Reihe mit Kabel, c) Brückenschaltung, d) Anschluss der Abschlussimpedanz [10]

4.2 Typprüfungen

Bei Typprüfungen ist die Reihenfolge der Prüfungen gemäß Tabelle 12-5 Nr. 3 einzuhalten. Die Prüfungen können entweder am vollständigen Kabel oder an 10 m bis 15 m langen Teillängen durchgeführt werden. Alle Prüfungen sind an den gleichen Kabelproben durchzuführen, mit Ausnahme der Verlustfaktormessung, für diese ist es erlaubt, separate Proben zu verwenden.

Es ist ausreichend die Prüfung an einer Leiterbauart mit einem Leiterschnitt zwischen 90 mm² und 400 mm² durchzuführen, da alle Leiterbauarten und -querschnitte aus Kupfer oder Aluminium im Geltungsbereich miteingeschlossen sind. Bei einem erfolgreichen Abschließen der Prüfungen an einer Kabelader schließt der Geltungsbereich alle Kabel mit der gleichen Kombination von Isolier- und Leitschichtwerkstoffen mit ein. Nach spätestens fünf Jahren ist die Typprüfung zu wiederholen.

4.2.1 Verlustfaktormessung in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Bestimmung des Verlustfaktors ist nach dem Prüfverfahren der IEC 60502-2, 18.1.5 [15] durchzuführen, es ist ein geeignetes Messverfahren wie z.B. C-tan δ -Messverfahren mit digitaler Datenerfassung zu verwenden. [5]

Der Verlustfaktor ist bei Raumtemperatur und bei einer Leitertemperatur von 95 °C bis 100 °C mit einer Prüfwechselfspannung von 2 kV zu messen. Die Erwärmung des Kabelprüflings kann entweder in einem elektrisch beheizten Wärmeschrank mit natürlicher Belüftung, in einem geheizten Flüssigkeitsbad oder durch elektrische Aufheizung des Leiters und/oder des Kupferschirmes erfolgen. Unabhängig vom verwendeten Verfahren ist die Leitertemperatur mit aufzuzeichnen. Dies kann entweder durch Messung des Leiterwiderstandes, der Temperatur des Wärmeschrankes bzw. des Flüssigkeitsbades, der Leitertemperatur oder der Temperatur des Kupferschirmes erfolgen. [5]

Für die Bestimmung des Verlustfaktors bei einer Leitertemperatur von 95 °C bis 100 °C ist der Kabelprüfling langsam auf diese Temperatur zu erwärmen und danach für mindestens 2 Stunden bei dieser zu belassen, bevor die Messung durchgeführt wird. Bei der Messung bei Raumtemperatur sind keine zusätzlichen Maßnahmen notwendig. [5]

Die Prüfung ist erfolgreich bestanden, wenn die gemessenen Verlustfaktoren kleiner sind als die Maximalwerte aus Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Anforderungen Verlustfaktormessung [5]

	Maximalwert tan δ
	$\cdot 10^{-4}$
Raumtemperatur	40
Leitertemperatur 95 °C bis 100 °C	80

4.2.2 Lastwechselprüfung mit anschließender Teilentladungsprüfung

Bei der Lastwechselprüfung durchläuft der Prüfling abwechselnd Heiz- und Abkühlphasen. Die Erwärmung der Kabelprobe hat mit einem geeigneten Verfahren zur Leiterheizung zu erfolgen. [5]

Die Prüfung beginnt mit einer Heizphase wie in Bild 4-4 dargestellt. In maximal 3 Stunden ist der Leiter auf die Prüftemperatur von 95 °C bis 100 °C aufzuheizen. Anschließend muss die Leitertemperatur für mindestens 2 Stunden auf Prüftemperatur gehalten werden. Nach der Heizphase beginnt die Abkühlphase, in der der Prüfling für 3 Stunden natürlich auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Insgesamt sind 20 Heizzyklen durchzuführen. [5]

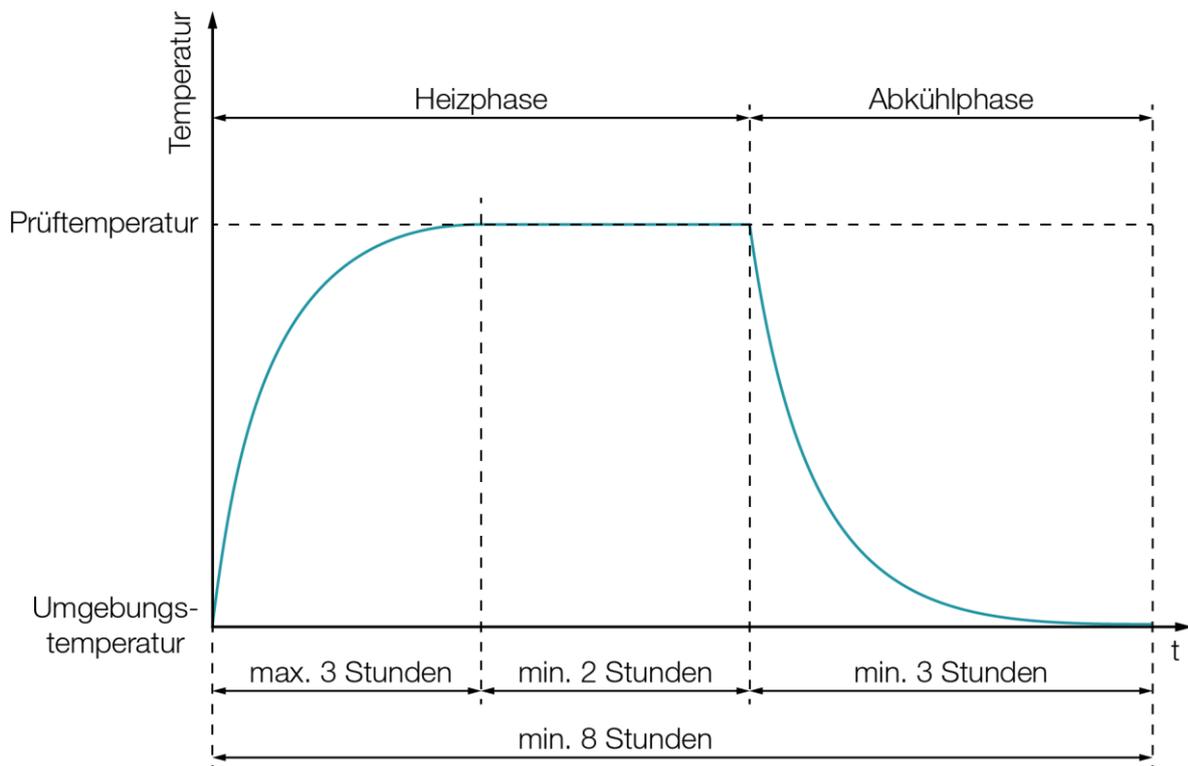


Bild 4-4: Ablauf eines Heizzyklus

Im Anschluss an die Lastwechselprüfung ist eine Teilentladungsprüfung nach den Vorgaben aus Kapitel 4.1.3 durchzuführen, dabei darf der Teilentladungspegel für ein erfolgreiches Bestehen der Prüfung nicht größer als 2 pC sein. [5]

4.2.3 Stoßspannungsprüfung mit anschließender Wechsellspannungsprüfung

Die Stoßspannungsprüfung ist nach den Vorgaben der DIN EN 60230 [16] durchzuführen. Vor der Prüfung ist die Kabelprobe mit einem geeigneten Verfahren aufzuheizen, sodass die Leitertemperatur während der Stoßspannungsprüfung zwischen 95 °C und 100 °C liegt. Die Kurvenform darf von der genormten Blitzstoßspannung (1,2 / 50 μ s) laut DIN EN 60060-1 [17] abweichen, die Stirnzeit muss zwischen 1 μ s und 5 μ s und die Rückenhalbwertszeit zwischen 40 μ s und 60 μ s liegen. [5], [16]

Für die Prüfung ist der Leiter des Kabelprüflings mit dem Stoßspannungsgenerator zu verbinden und der Kabelschirm zu erden. Bei der Prüfung wird der Kabelprüfling mit der festgelegten Prüfstoßspannung aus Tabelle 4-3 zuerst mit 10 positiven Stößen und unmittelbar danach mit 10 negativen Stößen beaufschlagt. Die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stößen wird durch die Ladezeit des Stoßspannungsgenerators bestimmt. [16]

Tabelle 4-3: Pegel der Prüfstoßspannungen [5]

Nennspannung U_0/U	Prüfstoßspannung
	kV
6/10 kV	75
12/20 kV	125
18/30 kV	170

Die Stoßspannungsprüfung gilt als bestanden, wenn bei keinem der insgesamt 20 Stöße ein Durchschlag auftritt. [5]

4.2.4 Spannungsprüfung

Die, an die Stoßspannungsprüfung anschließende, Spannungsprüfung ist gemäß den Vorgaben aus Kapitel 4.1.2 durchzuführen, dabei beträgt die Prüfwechselspannung bei dieser Prüfung $3 \cdot U_0$ und die Prüfdauer 4 Stunden. [5]

4.2.5 Harmonisierte Langzeitprüfung

Die harmonisierte Langzeitprüfung wird an Kabeladern mit extrudierter VPE- oder EPR-Isolierung und extrudierten Leitschichten zur Beurteilung der Beständigkeit gegen Wasser durchgeführt. [8]

Für die Prüfung werden zwei Kabeladern mit jeweils einer aktiven Prüflänge von 60 m benötigt. Die gesamte zu alternde Länge setzt sich aus der aktiven Prüflänge, den Längen der Enden die während der Alterungsperiode aus dem Wasserbad herausragen und den Längen die für die Montage der Endverschlüsse bei der Stufenwechselspannungsprüfung benötigt werden, zusammen. Die für die Alterungsprüfung benötigten Kabeladern dürfen in einer Länge oder in mehreren Teillängen gealtert werden. [8]

Nach der Entnahme werden die Kabeladern in einem Bad mit Leitungswasser bei einer Temperatur von 55 ± 5 °C für mindestens 500 Stunden konditioniert. Bei der Konditionierung werden die restlichen Vernetzungsprodukte entfernt und zugleich sollen Isolierung und Leitschichten Feuchtigkeit aufnehmen. [8]

Um Ausfälle, die nicht auf Water-Treeing zurückzuführen sind, ausschließen zu können, dürfen die Kabeladern vor Beginn der Alterungsprüfung einer Stehspannungsprüfung von mindestens 1 Minute unterzogen werden, die Spannungspegel für die unterschiedlichen Isolierwanddicken sind in Tabelle 4-4 aufgelistet. [8]

Die Kabeladern sind für die Alterungsprüfung, in einem mit Leitungswasser gefülltem Wasserbad, bei einer Temperatur von 40 ± 5 °C zu lagern, dabei müssen die Enden der Kabeladern aus dem Wasser herausragen. Zur Aufrechterhaltung des Wasserspiegels ist das Wasserbad mit Leitungswasser aufzufüllen. Damit das Wasser im Wasserbad genug Sauerstoff aufnehmen kann, muss die der Atmosphäre ausgesetzte Wasseroberfläche mindestens $0,5 \text{ m}^2$ pro m^3 betragen. Für die Spannungsbeaufschlagung müssen die Kabeladern mit geeigneten Endverschlüssen versehen werden und das Wasser im Wasserbad ist mit einer Elektrode zu erden. Die äußere Leitschicht ist niederohmig zu erden, hierfür dürfen entweder Kupferdrähte um die Kabelader gewickelt oder Natriumchlorid (NaCl) dem Wasser hinzugefügt werden. Während der gesamten Alterungsprüfung sind Wassertemperatur und Spannung aufzuzeichnen. Die Alterung der beiden Kabeladern dauert unterschiedlich lange, eine Kabelader ist für mindestens 8750 Stunden (ein Jahr), die andere für mindestens 17500 Stunden (zwei Jahre) zu altern. Während der Alterungsprüfung dürfen die Kabeladern den Kontakt zum Wasser im Einzelfall nicht länger als 24 Stunden und insgesamt nicht länger als 60 Stunden bzw. 120 Stunden, für die Alterungsperioden von 8750 Stunden bzw. 17500 Stunden verlieren. Kommt es während den Alterungsperioden zum Versagen eines Endverschlusses, so darf dieser ersetzt und die Alterung fortgesetzt werden. In Tabelle 4-4 sind die Stehspannungspegel für die unterschiedlichen Isolierwanddicken beim Alterungsverfahren aufgelistet. [8]

Nach den Alterungsperioden von einem Jahr bzw. zwei Jahren, sind die Kabeladern aus dem Wasserbad zu entnehmen und innerhalb von 72 Stunden für die Stufenwechselsspannungsprüfung vorzubereiten. Die gealterten Kabeladern sind in sechs Teilstücke mit jeweils einer aktiven Länge von 10 m zu schneiden, mit geeigneten Endverschlüssen zu versehen und in aufsteigender Reihenfolge zu nummerieren. Es wird empfohlen die aus dem Wasserbad herausragenden Enden sowie die ersten 150 mm der Kabelader, die sich unter der Wasseroberfläche befanden, nicht für die Prüfung zu verwenden, da die Alterung dieser Teillängen unter nicht kontrollierten Bedingungen stattgefunden hat. Die für die Prüfung benötigte Prüfelektrode wird durch Metallbänder oder -drähte, die um die Kabelader gewickelt werden, erzeugt. Bei Verzögerungen, die länger als 48 Stunden zwischen Ende der Vorbereitungen und Beginn der Prüfung dauern, sind die vorbereiteten Prüflinge in ein Wasserbad zurückzulegen. [5], [8]

Bei der Stufenwechselsspannungsprüfung werden die Kabelproben einzeln bei einer Temperatur von 20 ± 15 °C bis zum Durchschlag geprüft. Die Prüfspannung wird, ausgehend von der Startspannung, alle 5 Minuten um die Stufenspannung gesteigert, die von der Isolierwanddicke abhängigen Start- und Stufenspannungen sind in Tabelle 4-4 aufgelistet. Kommt es bei der Prüfung zum Versagen eines Endverschlusses, so ist dieser zu ersetzen und die Prüfung wieder bei der Startspannung zu beginnen. [8]

Tabelle 4-4: Prüfspannungspegel in Abhängigkeit der Nennwanddicke bei der harmonisierten Langzeitprüfung [8]

Isolierwanddicke	Stehspannungsprüfung		Stufenwechselspannungsprüfung	
	vor Beginn des Alterungsverfahrens	Alterungsverfahren	Startspannung	Stufenspannung
mm	kV	kV	kV	kV
3,4	60±3	18±3	18	6
4,5	90±3	27±3	27	9
5,5	120±5	36±3	36	12

Alle Prüfungen sind bei Netzfrequenz durchzuführen.

Die Werte der Durchschlagsspannungen sind aufzuzeichnen, bei einem Durchschlag zwischen zwei Spannungsstufen ist der Wert der nächsthöheren Spannungsstufe aufzuzeichnen. Von jedem Prüfling sind die Aderabmessungen gemäß DIN VDE 0276-605 zu messen. Die Durchschlagfeldstärken der einzelnen Kabelprüflinge sind aus den Durchschlagsspannungen und den Aderabmessungen zu berechnen. [8]

Während der gesamten harmonisierten Langzeitprüfung ist ein Ausfall wegen eines außergewöhnlichen Ereignisses erlaubt. Als außergewöhnliches Ereignis werden ein Durchschlag während der Alterungsperiode oder ein Stufenwechselspannungsprüfungsergebnis unter dem Grenzwert E_1 gewertet. Der betroffene Prüfling wird nicht gewertet, es ist jedoch das Water-Tree-Bild nach DIN VDE 0276-620 Anhang A zu dokumentieren. Für ein erfolgreiches Bestehen der harmonisierten Langzeitprüfung muss entweder die Anforderung i) oder ii) laut Tabelle 4-5 erfüllt werden. [5]

Tabelle 4-5: Prüfanforderungen der harmonisierten Langzeitprüfung [5]

Anforderung	Durchschlagfeldstärke	Anforderungen im Normalfall	bei Eintritt eines außergewöhnlichen Ereignisses
Nr.	kV/mm	Anzahl Prüflinge	Anzahl Prüflinge
i	$E_d \geq E_1$	6	5
	$E_d \geq E_2$	4	4
	$E_d \geq E_3$	2	2
ii	$E_d \geq E_2$	6	5

$E_1 = 23 \text{ kV/mm}$, $E_2 = 29 \text{ kV/mm}$, $E_3 = 35 \text{ kV/mm}$

4.3 Auswahlprüfungen

Auswahlprüfungen müssen an 10 % der Fertigungslänge eines Fertigungsloses des gleichen Kabeltyps, jedoch an mindestens einer Fertigungslänge, durchgeführt werden. Dadurch soll sichergestellt werden, dass gefertigte Kabel den geforderten Aufbaubestimmungen entsprechen.

4.3.1 Fertigungsbegleitende Prüfung

Bei der fertigungsbegleitenden Prüfung werden über das Jahr verteilt jeweils sechs Kabeladern für die Alterungszeiträume von einem Jahr und zwei Jahren, mit einer aktiven Prüflänge von mindestens 10 m, aus der Fertigung entnommen. Diese Kabeladern werden, wie in Kapitel 4.2.5, vorbereitet, konditioniert, gealtert, geprüft und ausgewertet. [5]

Für die Alterungszeiträume von einem Jahr und zwei Jahren werden getrennte Auswertungen durchgeführt. Es werden immer die letzten sechs Ergebnisse der Stufenwechselsspannungsprüfung eines Alterungszeitraumes bewertet, damit entspricht der Beobachtungszeitraum dem Fertigungszeitraum von einem Jahr. Für jedes neue Prüfergebnis ist eine neue Auswertung durchzuführen. Zu Beginn des Verfahrens werden die Ergebnisse aus der Typprüfung für die Auswertung verwendet. Bei jedem weiterem Prüfergebnis entfällt entweder das Ergebnis mit der niedrigsten Nummer aus der Typprüfung oder das älteste Ergebnis aus der fertigungsbegleitenden Prüfung. [5]

Für ein erfolgreiches Bestehen der fertigungsbegleitenden Prüfungen muss die Anforderung i) oder ii) laut Tabelle 4-5 erfüllt werden. Bei nicht bestandener Prüfung ist die Wiederholung an einem zusätzlichen Probenstück aus der gleichen Fertigungslänge zulässig. [5]

4.3.2 Nichtelektrische Auswahlprüfungen

Wie aus Tabelle 12-4 (Anhang) zu entnehmen ist, werden bei den Auswahlprüfungen, bis auf die fertigungsbegleitende Prüfung, ausschließlich nichtelektrische Prüfungen durchgeführt. Bei diesen Prüfungen werden alle Abmessungen des Kabels, die Kennzeichnung am Außenmantel, die Wärmedehnung der Isolierung und die Schrumpfung des Mantels untersucht.

5 Präqualifikationsprüfungen

Präqualifikationsprüfungen werden vom Kunden zur Qualitätssicherung in Auftrag gegeben. Die Prüfabläufe und Anforderungen können dabei von der Norm abweichen und Zusatzanforderungen des Kunden beinhalten. Durch diese Prüfungen soll sichergestellt werden, dass die verwendeten Garnituren und Kabel auch harmonisieren und den geforderten Qualitätsstandards entsprechen.

5.1 Elektrische Prüfungen

Die vorgesehenen elektrischen Prüfungen werden in Anlehnung an die entsprechenden Kabel- bzw. Garniturnormen durchgeführt. Die Durchführung der Prüfungen erfolgt dabei nach den Richtlinien der entsprechenden Normen, die Prüfpegel, Prüfdauern und Anforderungen können von den vorgesehen Werten abweichen.

5.1.1 Verträglichkeitsprüfung

Bei der Verträglichkeitsprüfung wird ein Kabelsystem, bestehend aus Kabel, Endverschlüssen und Muffen, geprüft. Die Prüfung sollte in Zusammenarbeit mit den Kabel- und Garniturenhernstellern erfolgen, um Montagefehler auszuschließen und auf mögliche, während der Prüfung auftretende, Probleme reagieren zu können. Die Komponenten, der im Labor aufgebauten Versuchskabelstrecken, sind so zu kombinieren, sodass diese, zukünftig geplante oder sich im Betrieb befindende, Kombinationen von Kabeln, Muffen und Endverschlüssen widerspiegeln. Eine Versuchskabelstrecke besteht aus zwei unterschiedlichen Kabelteilstücken, die mit einer Muffe verbunden und mit Endverschlüssen abgeschlossen werden. Zur Untersuchung der Verträglichkeit der einzelnen Teilkomponenten werden unterschiedliche Prüfungen durchgeführt. Ein Beispielprüfprogramm ist in Tabelle 5-1 aufgelistet. Die einzelnen Prüfungen spiegeln dabei unterschiedliche im Betrieb auftretende Belastungen einer Kabelstrecke wieder. Nach erfolgreichem Abschluss aller Prüfungen sollte der Zustand der Laborkabelstrecke dem einer 60 Jahre betriebsgealterten Kabelstrecke entsprechen. Aufgrund ständiger Veränderungen und Weiterentwicklungen im Bereich der Garniturentechnik, ist eine periodische Verträglichkeitsprüfung alle 5 Jahre zu empfehlen.

Tabelle 5-1: Beispielprüfprogramm für Mittelspannungskabelsysteme

Nr.	Prüfung	Prüfwerte	Anforderung
1	Wechselspannung DIN VDE 0278-629-1 [11]	5 min bei $4,5 \cdot U_0$	kein Durch- bzw. Überschlag
2	Teilentladungsmessung DIN VDE 0276-620 [5]	1 min bei $2,4 \cdot U_0$	max. 10 pC bei $2 \cdot U_0$
3	Blitzstoßspannung DIN VDE 0276-620 [5]	75 kV/125 kV/170 kV 10 Stöße pos. 10 Stöße neg.	kein Durch- bzw. Überschlag
4	Dauerwechselspannung mit Lastwechseln Prüfstrom gemäß DIN VDE 0278-629-1 [11]	3 Zyklen bei $2,5 \cdot U_0$ 5 °C bis 10 °C über höchstzulässiger Kabelleitertemperatur	kein Durchschlag
5	Teilentladungsmessung	1 min bei $2,4 \cdot U_0$	max. 5 pC bei $2 \cdot U_0$
6	Dauerwechselspannung mit Lastwechseln Prüfstrom gemäß DIN VDE 0278-629-1 [11]	60 Zyklen bei $2,5 \cdot U_0$ 5 °C bis 10 °C über höchstzulässiger Kabelleitertemperatur	kein Durchschlag
7	Teilentladungsmessung	1 min bei $2,4 \cdot U_0$	max. 5 pC bei $2 \cdot U_0$
8	Prüfung der thermischen Kurzschlussfestigkeit Prüfstrom gemäß DIN VDE 0278-629-1 [11]	2 x je Leiter Strom gemäß DIN VDE 0278-442	kein Ausfall
9	Dauerwechselspannung mit Lastwechseln, Dichtheitsprüfung der Muffen im Wasserbad (Mantelschnitt)	63 Zyklen bei $2,5 \cdot U_0$ 5 °C bis 10 °C über höchstzulässiger Kabelleitertemperatur	kein Durchschlag
10	Teilentladungsmessung	1 min bei $2,4 \cdot U_0$	max. 5 pC bei $2 \cdot U_0$
11	Blitzstoßspannung DIN VDE 0276-620 [5]	Prüfspannung laut DIN VDE 0276-620 10 Stöße pos. 10 Stöße neg.	kein Durch- bzw. Überschlag
12	Gleichspannung DIN VDE 0278-629-1 [11]	15 min bei $6 \cdot U_0$	kein Durch- bzw. Überschlag
13	Stufenwechselspannungsprüfung	von 40 kV bis 55 kV Steigerung um 5 kV pro Woche	kein Durch- bzw. Überschlag
14	Prüfung unter Feuchtigkeitseinfluss DIN VDE 0278-629-1 [11]	1000 h bei $1,25 \cdot U_0$	gemäß VDE 0278-629-1

5.1.2 Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit

Die Stoßspannungsprüfung nach der Richtlinie zur Qualitätsuntersuchung vom 01.03.2004 Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit an VPE-isolierten Energiekabeln [18] ist ein zerstörendes Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle der Isolierung neuer Kabel.

Durch die Prüfung werden Einflüsse auf die Lebensdauer, durch Verunreinigungen, Einschlüsse, Hohlräume etc. in der Isolierung, welche bei der Fertigung auftreten können, überprüft. Zusätzlich erfolgt eine optische Kontrolle der äußeren Aufbauelemente des Kabels (Mantel, Schirm, Papierlagen, Druckstellen in halbleitenden-Schicht, etc.).

Die Prüfung erfolgt an fünf eindeutig gekennzeichneten Kabelprüflingen, welche, gemäß den Vorgaben in Bild 5-1 und Tabelle 5-2, vorzubereiten sind. Um eine ausreichende Diversität gewährleisten zu können, sollten die Proben aus unterschiedlichen Abschnitten der Produktion stammen und von der Muttertrommel des Kabelwerks oder einer Auslieferungstrommel entnommen werden. [18]

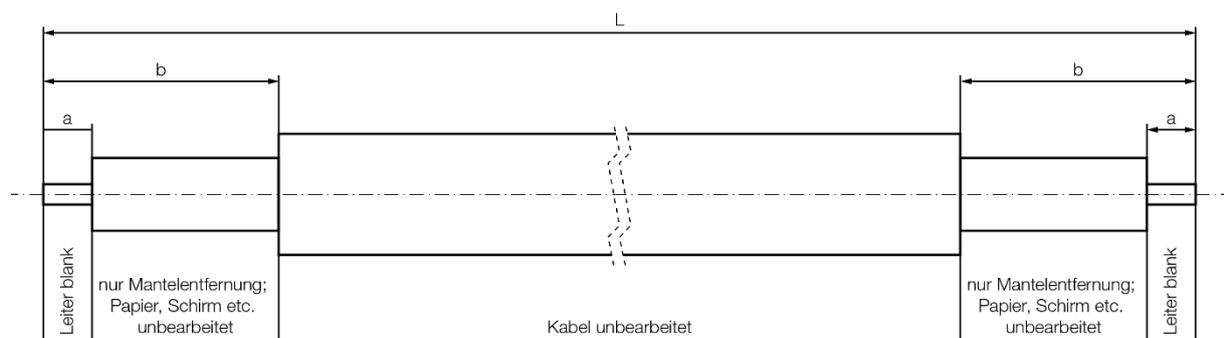


Bild 5-1: Vorbereitung der Kabelprüflinge für die Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit [18]

Tabelle 5-2: Maße zur Vorbereitung der Kabelprüflinge [18]

Nennspannung U_0/U	L	a	b
	m	m	m
6/10 kV	≥ 19	$0,10 \pm 0,01$	$4,00 \pm 0,1$
12/20 kV	≥ 20	$0,10 \pm 0,01$	$4,50 \pm 0,1$
18/30 kV	≥ 21	$0,10 \pm 0,01$	$5,00 \pm 0,1$

Tabelle 5-3: Start- und Haltespannungen [18]

Nennspannung U_0/U	Startspannung	geforderte Haltespannung
	kV	kV
6/10 kV	150	400
12/20 kV	350	600
18/30 kV	350	800

Bei der Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit wird der Kabelschirm beidseitig geerdet und der Leiter mit Blitzstoßspannung ($1,2 / 50 \mu\text{s}$) beaufschlagt. Die Stirnzeit der Stoßspannung muss zwischen $1 \mu\text{s}$ und $5 \mu\text{s}$ und die Rückenhalbwertszeit zwischen $40 \mu\text{s}$ und $60 \mu\text{s}$ liegen. Ausgehend vom Startwert in Tabelle 5-3 werden jeweils fünf Stöße negativer Polarität bei jeder Spannungsstufe abgegeben. Tritt bei keinem der fünf Stöße ein Durchschlag auf, wird die Spannung um 50 kV erhöht und die Prüfung mit der erhöhten Spannung fortgesetzt. Dies wird so lange wiederholt, bis es zu einem Durchschlag der Isolierung kommt. Die Stoßspannungsprüfung ist bestanden, wenn die Haltespannung aller Prüflinge größer als die geforderte Haltespannung in Tabelle 5-3 ist. Als Haltespannung wird die letzte Spannungsstufe bezeichnet, bei der der Prüfling alle fünf Stöße ohne einen Durchschlag gehalten hat. Wird die Prüfung aufgrund einer zu geringen Durchschlagsspannung nicht bestanden, erfolgt eine optische Untersuchung der Fehlerstelle durch eine Transparenzprüfung. [18]

5.2 Nichtelektrische Prüfungen

Die nichtelektrischen Prüfungen werden wie die elektrischen Prüfungen entweder in Anlehnung an die entsprechenden Normen oder nach den jeweiligen Normen durchgeführt. Sie werden zur Überprüfung der geometrischen Abmessungen, Materialanforderungen sowie zur optischen Untersuchung von Kabelfehlern durchgeführt.

5.2.1 Geometrische Abmessungen der Isolierung

Bei Untersuchung der Aderabmessungen werden die Wanddicken von Leitschichten und Isolierung, die Durchmesser von Isolierung und äußerer Leitschicht und die Rundheit der Kabelader überprüft. [5], [8]

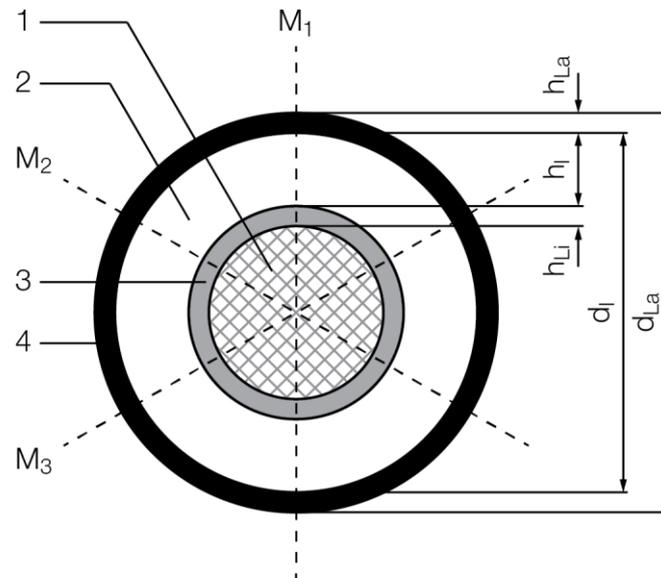
Die Messung darf mit einem Mikroskop oder Profilprojektor mit einer mindestens 10-fachen Vergrößerung durchgeführt werden. Die Halteeinrichtung der Proben muss drehbar gelagert sein und die Ablesung der Messwerte hat mit einer Genauigkeit von 0,001 mm zu erfolgen. [5], [8]

Für die Prüfung ist jeweils eine Probe, von den beiden Kabelenden des zu prüfenden Kabels, zu entnehmen. Der Leiter und sämtliche Kabelelemente über der Kabelader sind zu entfernen. Die Probe wird in Scheiben geschnitten und die Schnittflächen so vorbereitet, dass die Grenzen der einzelnen Schichten klar erkennbar sind. [5], [8]

Ausgehend von der dünnsten Stelle der Isolierhülle werden die Messungen der Durchmesser und Wanddicken in 60° -Schritten entlang des Umfangs, wie in Bild 5-2 dargestellt, durchgeführt.

Somit ergeben sich sechs Wanddickenwerte und drei Durchmesserwerte je Probe. Bei mehrdrähtigen Leitern ist die Wanddicke der inneren Leitschicht an der dünnsten Stelle zu messen. Sollte die Oberfläche der äußeren Leitschicht Unebenheiten aufweisen, so sind alle Durchmesser und Wanddicken bis zur halben Höhe dieser Unebenheiten zu messen. [5], [8]

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn alle in der Norm für Starkstromkabel festgelegten Grenzwerte nicht unter- oder überschritten werden. [5], [8]



1	Leiter	d_{La}	Durchmesser der äußeren Leitschicht
2	Isolierung	d_I	Durchmesser der Isolierung
3	innere Leitschicht	h_{La}	Wanddicke der äußeren Leitschicht
4	äußere Leitschicht	h_I	Wanddicke der Isolierung
M_1, M_2, M_3	Messpunkte	h_{Li}	Wanddicke der inneren Leitschicht

Bild 5-2: Messpunkte für die Untersuchung der Aderabmessungen [8]

5.2.2 Transparenzprüfung

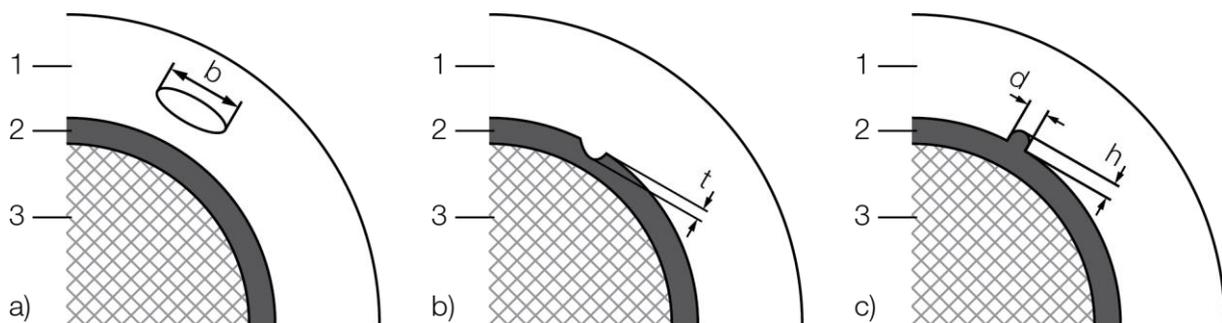
Bei der Transparenzprüfung werden die innere Leitschicht und Isolierung auf Unregelmäßigkeiten untersucht. Die Messungen werden mit den gleichen Messeinrichtungen wie in Kapitel 5.2.1 durchgeführt. [5] [8]

Für die Messung ist eine 300 mm lange Probe von einem Kabelende zu entnehmen. Alle Kabelelemente über der äußeren Leitschicht sowie die äußere Leitschicht selbst sind zu entfernen. [5] [8]

Die Probe ist für 1 bis 2 Stunden in einem Wärmeschrank bei ca. 80 °C zu lagern, danach wird sie aus diesem entnommen und in ca. 130 °C heißes Silikonöl getaucht, bis die Isolierschicht vollständig durchsichtig ist. Anschließend erfolgt die visuelle Untersuchung der durchsichtigen Probe mit einer Lampe, dabei sind sichtbare Unregelmäßigkeiten zu markieren. [5] [8]

Nach der visuellen Untersuchung wird die Probe auf Raumtemperatur abgekühlt und an den markierten Stellen in Scheiben oder Spiralen geschnitten. Die Vermessung der Unregelmäßigkeiten erfolgt mit einem Mikroskop oder Profilprojektor, dabei werden die folgenden Abmessungen bestimmt: [5], [8]

- größte Ausdehnung einer Unregelmäßigkeit in der Isolierung (Bild 5-3 a))
- größte Ausdehnung einer Unregelmäßigkeit in der inneren Leitschicht (Bild 5-3 b))
- größte Ausdehnung einer Unregelmäßigkeit in der Berührungsfläche zwischen innerer Leitschicht und Isolierung, die in die Isolierung zeigt (Bild 5-3 c))



- | | | | |
|---|--------------------|---|------------------------------------|
| 1 | Isolierung | b | Ausdehnung der Unregelmäßigkeit |
| 2 | innere Leitschicht | t | Eindringtiefe der Unregelmäßigkeit |
| 3 | Leiter | d | Basis der Unregelmäßigkeit |
| | | h | Höhe der Unregelmäßigkeit |

Bild 5-3: Unregelmäßigkeiten in der Isolierung und inneren Leitschicht [8]

Die Prüfung ist bestanden, wenn alle Messwerte mit den vorgegebenen Werten übereinstimmen. [5] [8]

Die Transparenzprüfung kann auch zur Untersuchung von Durchschlagskanälen verwendet werden. Der Durchschlagskanal verläuft bei Kabeln ohne Fertigungsfehler vom Leiter zum Kabelschirm. Bei Kabeln mit groben Fertigungsfehlern kann der Kanal auch vom Kabelschirm zum Leiter verlaufen.

5.2.3 Mechanischer Aufbau des Kabels

Leiterabmessungen:

Durch die Überprüfung der Leiterabmessungen soll die Kompatibilität von Leitern und Verbindern sichergestellt werden.

Die Messung von Leiterdurchmessern bis 25 mm hat mit einer Mikrometerschraube oder einem Profilprojektor zu erfolgen. Bei Leiterdurchmessern größer 25 mm ist der Umfang des Leiters zu messen und daraus der Durchmesser zu errechnen. Leiterdurchmesser bis 25 mm sind auf zwei Dezimalstellen und Leiterdurchmesser über 25 mm auf eine Dezimalstelle zu runden. [5], [8]

Für ein erfolgreiches Bestehen der Prüfung dürfen die in der DIN EN 60228 [14] festgelegten Mindestwerte nicht unterschritten und die Höchstwerte nicht überschritten werden. [5], [8]

Drähte und Bänder des Schirms:

Zur Überprüfung der Abmessungen und des Aufbaues des Kabelschirms wird eine ca. 500 mm lange Probe vom Kabelprüfling entnommen. Die Vorbereitung der Probe hat mit einem geeigneten Werkzeug zu erfolgen, dabei dürfen Drähte und Bänder nicht beschädigt werden. Nach der Vorbereitung ist die Probe zu reinigen. [5], [8]

Mit einer Messschraube oder einer Messuhr werden die Durchmesser von Drähten oder die Wanddicken von Bändern gemessen. Die Messeinsätze des Messgerätes müssen ebene Messflächen und einen Durchmesser von 4 mm bis 8 mm aufweisen. Die Messung ist an drei, gleichmäßig entlang der Probe verteilten, Stellen durchzuführen. [5], [8]

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Mittelwerte der Durchmesser und Wanddicken über den geforderten Mindestwerten liegen und die Mindestabstände zwischen zwei benachbarten Querleitwendeln bzw. Drähten nicht unterschritten werden. [5], [8]

5.2.4 Shore-D-Härtemessung des PE-Mantels

Für die Härtemessung des PE-Mantels werden ein Härteprüfgerät nach Shore-D, ein Eindringkörper, eine Auflage für die Kabelprobe und ein Thermometer benötigt. [5], [8]

Die Messung erfolgt an einer ca. 200 mm langen Probe des zu prüfenden Kabels. Bei der Entnahme ist darauf zu achten, dass die Probe keine Krümmungen aufweist und die Oberfläche des Mantels glatt und riefenfrei ist. [5], [8]

Die Probe ist anschließend für mindestens 16 Stunden bei einer Temperatur von $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ zu konditionieren. Nach der Konditionierung wird die Probe in die Auflage gelegt und die Härtemessung bei einer Anpresskraft von 50 N durchgeführt. Der Wert der Härte ist drei Sekunden nach der Berührung zwischen Härteprüfgerät und Probe abzulesen. Insgesamt werden sieben Messungen durchgeführt, vier an einer Mantellinie und drei an einer diametral entgegengesetzten Mantellinie. Alle Messwerte sind auf ganze Zahlen zu runden. [5], [8]

Die Messung gilt als bestanden, wenn der Median der sieben Messwerte über dem geforderten Mindestwert liegt. [5], [8]

5.2.5 Schrumpfung des Kabelmantels

Zur Bestimmung der Schrumpfung des Kabelmantels werden eine elektrisch beheizbare Wärmekammer und ein Maßband mit einer Skalenteilung von 1 mm benötigt. [5], [8]

Das zu prüfende Kabel ist für mindestens 24 Stunden bei einer Temperatur von $23\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ zu konditionieren. Nach der Konditionierung ist eine $500\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ lange Kabelprobe in einem Abstand von 2 m vom Kabelende zu entnehmen. Nach dem Schneiden wird die genaue Länge L_1 der Kabelprobe aus dem Mittelwert von zwei Messungen an entgegengesetzten Seiten des Kabels bestimmt. Weist die Probe eine Krümmung auf, so hat die Messung an der Außen- und Innenseite zu erfolgen. [5], [8]

Im Anschluss an die Bestimmung der genauen Länge muss die Probe fünf Temperaturzyklen durchlaufen. Bei einem Temperaturzyklus wird die Kabelprobe für mindestens 5 Stunden bei $80\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ in der Wärmekammer gelagert und anschließend an der Luft auf eine Umgebungstemperatur von $23\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ abgekühlt. [5], [8]

Nach den Temperaturzyklen ist die Länge L_2 des Kabelmantels auf die gleiche Weise wie vor der Prüfung zu messen. Aus den beiden Mantellängen kann die Schrumpfung nach Gleichung (36) berechnet werden. [5], [8]

$$L = \frac{L_1 - L_2}{2} \quad (36)$$

L	Schrumpfung in m
L_1	Mantellänge vor den Temperaturzyklen in m
L_2	Mantellänge nach den Temperaturzyklen in m

Die Prüfung ist bestanden, wenn der Wert der Schrumpfung geringer ist als der laut Norm maximal zulässige Wert. [5], [8]

5.3 Ausgewählte Prüfungen bei Werksbesichtigungen (Audit)

Im Zuge einer für die Präqualifikation wichtigen Werksbesichtigung sollten bestimmte Normprüfungen vorgeführt oder begutachtet werden. Für eine sinnvolle Evaluierung der vorgeführten Prüfungen ist es unerlässlich, die genauen Abläufe, die zulässigen Prüf- und Messgeräte sowie die Prüfanforderungen zu kennen. Dabei sollte großes Augenmerk auf den Prüfaufbau, den Ablauf, sowie die verwendeten Prüf- und Kalibriergeräte gerichtet werden.

Die Stückprüfungen aus Kapitel 4.1 müssen an allen gefertigten Längen durchgeführt werden, bei einer Werksbesichtigung sind diese Prüfungen unbedingt vorzuführen.

Da Auswahl- bzw. Typprüfungen nicht immer durchgeführt werden, sollte der Besichtigungstermin so abgestimmt werden, dass alle für wichtig erachteten Prüfungen vorgeführt werden können. Sonstige als wichtig erachtete Prüfungen müssen vom Kunden selbst bestimmt werden.

Empfohlene Prüfungen:

- Nichtelektrische
 - Messung der Schichtdicke von Leitschichten, Isolier- und Mantelhüllen
 - Prüfung der Wärmedehnung der Isolierung
 - Prüfung des Leiter- bzw. Schirmaufbaues
 - Shore-D-Härtemessung des PE-Mantels
- Elektrische
 - Spannungsprüfung an einer Lieferlänge (Trommel) mit TE-Messung
 - Widerstandsmessung des Kabelschirms

6 Prüf- und Diagnosemethoden

Im folgenden Abschnitt werden einige Prüf- und Diagnosemethoden, die für die Zustandsbewertung von Kabelstrecken sowie Methoden die zur Kabel- und Kabelfehlerortung eingesetzt werden, erklärt. In vielen österreichischen Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) wird für die Kabeldiagnose die Teilentladungs- und Verlustfaktormessung mit einer 0,1 Hz Prüfspannung eingesetzt. Es gibt noch weitere Kabeldiagnosemethoden, auf diese wird in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen.

6.1 Spannungsprüfung

Die Spannungsprüfung nach den DIN VDE-Bestimmungen dient der Erkennung von Isolationsfehlern und kann mit unterschiedlichen Prüfspannungsformen durchgeführt werden. In Tabelle 6-1 sind die Prüfspannungen und die Prüfdauern für Mittelspannungskabel mit getränkter Papierisolierung und extrudierter Isolierung zusammengefasst.

Tabelle 6-1: Prüfspannungen und Prüfdauern für Mittelspannungskabelanlagen nach DIN VDE

	Energiekabel mit getränkter Papierisolierung DIN VDE 0276-621 [6]			Energiekabel mit extrudierter Isolierung DIN VDE 0276-620 [5]	
	U_{DC}	U_{AC}	U_{VLF}	U_{AC}	U_{VLF}
	kV	kV	kV	kV	kV
Prüfspannung	$5,6 \cdot U_0 \dots 8 \cdot U_0$	$2 \cdot U_0$	$3 \cdot U_0$	$2 \cdot U_0$	$3 \cdot U_0$
Prüfdauer	20 ... 30 min	30 min	30 min	60 min	60 min
U_{DC}	Prüfgleichspannung				
U_{AC}	Netzfrequente Prüfwechselfspannung 45 Hz - 65 Hz				
U_{VLF}	VLF-Prüfwechselfspannung 0,1 Hz				

Spannungsprüfungen werden vor der Inbetriebnahme, nach Reparaturen und in periodischen Abständen durchgeführt, die Prüfspannung wird für die Prüfdauer zwischen Leiter und Kabelschirm angelegt.

6.1.1 Gleichspannungsprüfung

Bei Energiekabeln mit getränkter Papierisolierung hat sich die Gleichspannungsprüfung über viele Jahrzehnte bewährt und wird für alle Bauarten und Spannungsebenen eingesetzt. Betriebsgefährdende Kabelfehler werden bei der Prüfung mit ausreichender Sicherheit erkannt. Ein Vorteil gegenüber der Prüfung mit netzfrequenter Wechselfspannung ist die wesentlich geringere erforderliche Ladeleistung. Wegen der fehlenden Polaritätswechsel muss die Prüfspannung bei der Gleichspannungsprüfung höher gewählt werden, als bei einer Prüfung mit netzfrequenter Wechselfspannung.

Bei VPE-isolierten Kabeln wird die Prüfung mit Gleichspannung nicht eingesetzt, da diese eine sehr geringe Gleichstromleitfähigkeit aufweisen und somit Prozesse zur Einleitung eines Durchschlages an einer Störstelle stark verzögert ablaufen. Außerdem können Raumladungen

nur sehr langsam abfließen, deshalb kann es zu lokalen Erhöhungen oder Verringerungen der Feldstärke kommen. Wegen dieser lokalen Feldstärkenveränderungen ist es nicht möglich den Zustand des Kabels zu bestimmen, da auch die für einen Durchschlag erforderlichen Spannungen lokal beeinflusst werden.

6.1.2 Wechselfspannungsprüfung

Die Prüfung mit einer sinusförmigen 50 Hz Wechselfspannung bildet die Belastung unter Betriebsbedingungen perfekt nach. Bei langen Kabelstrecken wird es schwierig die erforderliche Ladeleistung bei der Prüfspannung aufzubringen.

Resonanzprüfsysteme stellen eine Alternative zur netzfrequenten Wechselfspannungsprüfung dar. Dabei wird mit Hilfe einer Hochspannungsdrossel und dem als Kapazität betrachteten Kabel ein Reihenschwingkreis, wie in Bild 6-1 zu sehen ist, gebildet. Die Resonanzabstimmung kann entweder über die Veränderung der Induktivität der Hochspannungsdrossel oder der Frequenz im Bereich von 45 Hz bis 65 Hz erfolgen. Im abgestimmten Zustand lässt sich die Resonanzfrequenz nach Gleichung (37) berechnen und der rechte Term der Gleichung (38) entspricht der Kabelkapazität. Der Energiebedarf der Prüfschaltung wird bei optimalem Resonanzabgleich ausschließlich von der Güte des Schwingkreises bestimmt. Gleichung (39) beschreibt die Güte bzw. die maximal erreichbare Spannungsüberhöhung des Schwingkreises.

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 = \frac{1}{\sqrt{L_D \cdot C_P}} \quad (37)$$

ω_0	Resonanzkreisfrequenz in 1/s
f_0	Resonanzfrequenz in Hz
L_D	Variable Induktivität in H
C_P	Kapazität des Prüflings in F

$$C_P = \frac{1}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot f^2 \cdot L_D} \quad (38)$$

$$Q = \frac{S_P}{P_V} = \frac{\frac{1}{\omega_0 \cdot C_P} \cdot I^2}{R_V \cdot I^2} = \frac{U_P}{U_E} \quad (39)$$

Q	Güte
S_P	kapazitive Prüfblindleistung in VA
P_V	Verlustleistung in W
R_V	Ersatzwiderstand für die Verluste im Resonanzkreis in Ω
U_P	Spannung am Prüfling in V
U_E	Sekundärseitige Spannung des Erregertransformators in V

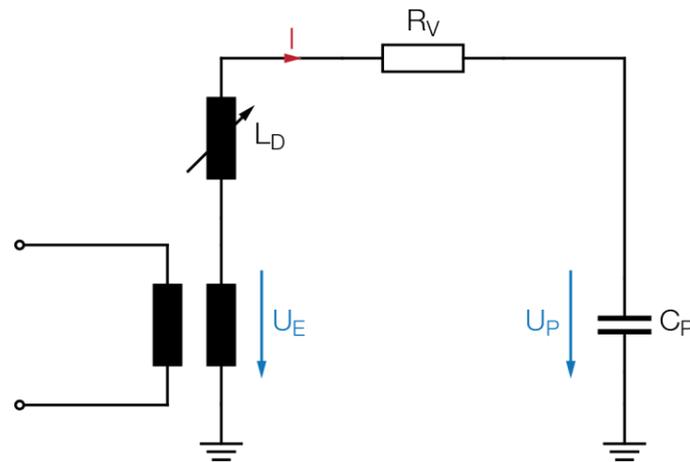


Bild 6-1: Ersatzschaltbild Reihenschwingkreis

Ein weiterer Vorteil von Resonanzprüfanlagen ist das Verhalten im Falle eines Durchschlages, dabei wird der Resonanzkreis verstimmt und die Spannung bricht zusammen.

6.1.3 Spannungsprüfung bei 0,1 Hz

Spannungsprüfungen bei 0,1 Hz (VLF-Spannungsprüfungen) sind eine Alternative zur Prüfung mit netzfrequenter Wechselspannung. Der Vorteil gegenüber der netzfrequenten Prüfspannung ist die um den Faktor 500 geringere Ladeleistung. Der empfohlene Prüfpegel aus Tabelle 6-1 wurde durch unterschiedliche Modellanordnungen bestimmt und entspricht dem Prüfpegel einer netzfrequenten Wechselspannung. Der Prüfspannungsverlauf entspricht entweder einer sinusförmigen Wechselspannung oder einer Cosinus-Rechteckspannung.

6.1.4 Gedämpfte Wechselspannung

Eine weitere Möglichkeit bietet die Prüfung mit einer gedämpften Wechselspannung. Die erzeugte Spannungsform kann entweder unipolar oder bipolar sein. Durch die zeitliche Änderung der Spannungsform werden Raumladungseffekte vermieden.

Die zur Wechsel- bzw. VLF-Spannungsprüfung äquivalente Prüfspannung wurde durch Vergleichsuntersuchungen bestimmt und beträgt auf der Basis von 50 Impulsen $4 \cdot U_0$. In den Normen ist die Prüfung mit gedämpften Wechselspannungen noch nicht als Alternative zur Gleich- und Wechselspannungsprüfung enthalten.

6.2 Mantel- und Korrosionsschutzprüfung

Ergänzend zur Spannungsprüfung wird die Mantel- und Korrosionsschutzprüfung zur Bestimmung des Zustands des Außenmantels durchgeführt. Ein unversehrter Kabelmantel dient dem Schutz der Isolierung und verhindert das Eindringen von flüssigem Wasser. Bei querwasserdicht ausgeführten Kabeln wird zusätzlich das Eindringen von Diffusionsfeuchte in die Kabelisolierung verhindert.

Eine Mantelprüfung ist nur möglich, wenn das Kabel erdfühlig verlegt wurde. Die Prüfung wird mit Gleichspannung durchgeführt, diese wird zwischen Kabelschirm oder Metallmantel und Erde für ca. 1 Minute angelegt. Der Prüfspannungspegel ist vom Kabelmantelmaterial abhängig und

beträgt bei PVC-Mänteln 3 kV und bei PE-Mänteln 5 kV bis 10 kV. Vor Beginn der Prüfung müssen alle Erdverbindungen des Kabelschirmes oder des Metallmantels sowie aller verbundenen Garnituren aufgetrennt werden.

Vorhandene Mantelfehler werden sofort durch einen Durchschlag erkannt, die Position des Fehlers kann mit einem geeigneten Kabelfehlerortungsverfahren aus Kapitel 6.6 bestimmt werden.

6.3 Teilentladungsmessung

Teilentladungen sind Entladungen bei denen die Isolierung nur teilweise überbrückt wird. Sie werden durch lokale Feldstärkenerhöhungen verursacht und können in innere und äußere Entladungen unterschieden werden.

Mit Hilfe der Messung von Teilentladungen können singuläre Schwachstellen in der Isolierung und den Garnituren erfasst, geortet und bewertet werden. Die Messung kann entweder im Betrieb oder mit Hilfe einer Prüfspannungsquelle durchgeführt werden. Bei der Messung im Betrieb ist auch eine Langzeitüberprüfung (Monitoring) eines Kabelabschnittes möglich, wird aber bei Mittelspannungskabelanlagen nicht eingesetzt.

Die Teilentladungsmessung kann bei 50 Hz Wechselspannung, bei 0,1 Hz Sinus VLF oder bei einer gedämpften Wechselspannung angewendet werden. Das Teilentladungsverhalten ist jedoch abhängig von der Spannungsform.

Als Prüfschaltung wird hauptsächlich die Schaltung a) Ankopplungsvierpol in Reihe mit Koppelkondensator aus Bild 4-3 verwendet. Die Kalibrierung erfolgt dabei mit einem Teilentladungskalibrator am Koppelkondensator.

Für die Auswertung der Teilentladungsmessung können folgende Kennwerte betrachtet werden: Teilentladungspegel, Einsetz- und Aussetzspannung, phasenauflösendes Teilentladungspattern und Laufzeit der Teilentladungsimpulse.

Der Teilentladungspegel und die Einsetz- und Aussetzspannung geben Auskunft über den Zustand der Kabelanlage, das Teilentladungspattern ermöglicht die Charakterisierung der Fehlerart, so kann z.B. zwischen inneren und äußeren Teilentladungen unterschieden werden. Über die Laufzeitmessung der Teilentladungsimpulse kann der Ort der auftretenden Teilentladungen bestimmt werden (z.B. Muffe oder Kabel).

Im Bild 6-2 ist das phasenauflösende Teilentladungspattern einer Laborkabelstrecke mit einem nachgebildeten internen Kabelfehler zu sehen. Aus der Phasenlage der Teilentladungsimpulse kann erkannt werden, dass es sich um einen internen Fehler handelt. Bild 6-3 zeigt die Zeitbereichsreflektometrie (TDR, Time Domain Reflectometry) der fehlerbehafteten Laborkabelstrecke und die Entfernung zur Fehlerstelle (Δx).

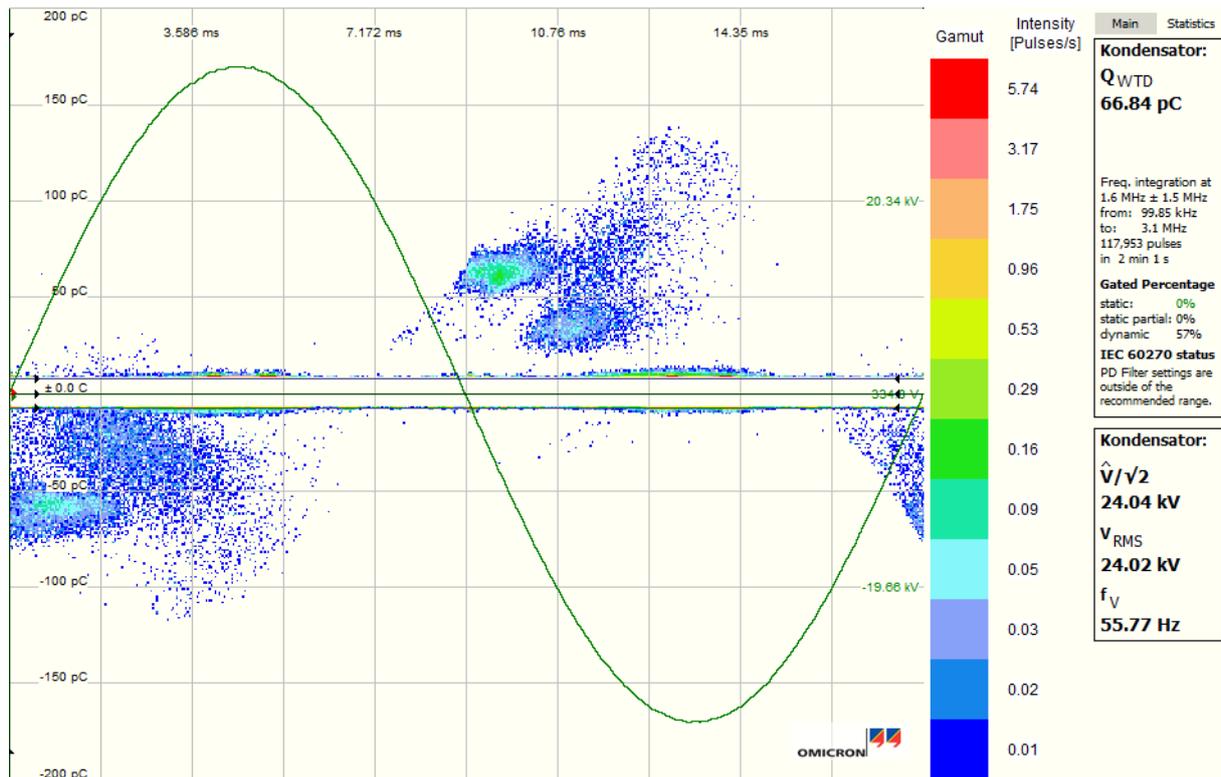


Bild 6-2: Phasenauflösendes Teilentladungsmessungsmuster eines an einer Laborkabelstrecke nachgebildeten internen Kabelfehlers bei U = 24 kV und f = 55,77 Hz

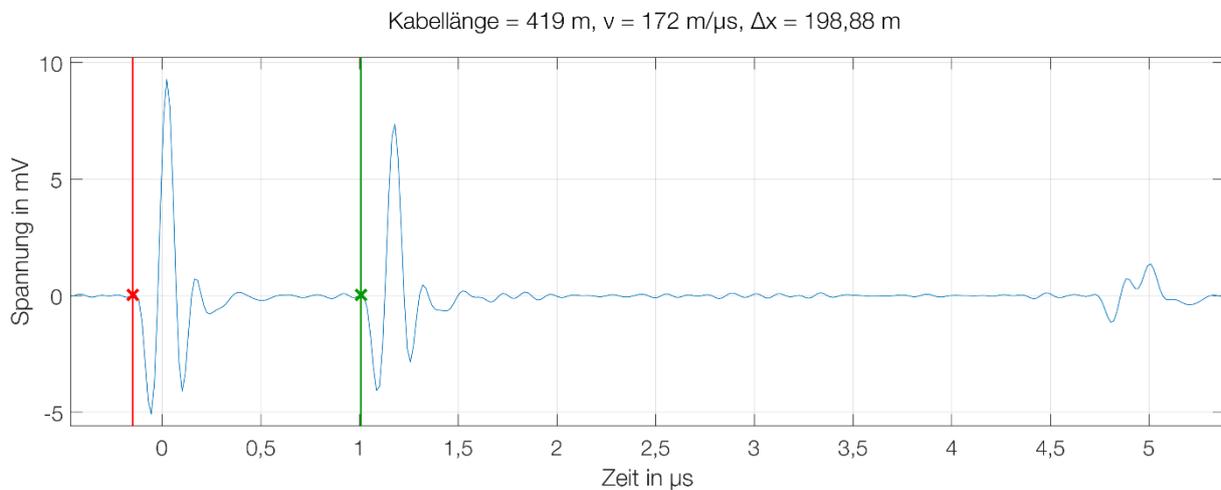


Bild 6-3: Zeitbereichsreflektometrie eines an einer Laborkabelstrecke nachgebildeten internen Kabelfehlers

Durch Vergleichsmessungen und Erfahrungswerte können Zustand und Gefährdungsgrad einer Kabelanlage abgeschätzt werden. Aussagen bezüglich der Restlebensdauer von Kabeln und deren Garnituren sind mit der Teilentladungsmessung jedoch nicht möglich. Sehr wohl lassen sich Trends bei Wiederholungsprüfungen erkennen. Daher ist zu empfehlen, bei der Inbetriebnahmeprüfung neben der Spannungsprüfung begleitend eine Teilentladungsmessung durchzuführen (Referenzmessung).

6.4 Verlustfaktormessung

Die Verlustfaktormessung ist ein Diagnoseverfahren zur Qualitätssicherung von neuen und Zustandsbewertung von sich im Betrieb befindenden Energiekabeln.

Kabelisolierungen können als verlustbehaftete Dielektrika angesehen werden. Verlustbehaftete Dielektrika lassen sich durch ein Parallel- oder Reihenersatzschaltbild wie in Bild 6-4 darstellen, wobei für Kabel das Parallelersatzschaltbild verwendet wird. Der Verlustfaktor beschreibt das Verhältnis von Wirk- zu Blindleistung, beim Parallelersatzschaltbild entspricht dies dem Verhältnis von Wirk- zu kapazitivem Strom und beim Reihenersatzschaltbild dem Verhältnis von Wirk- zu kapazitiver Spannung wie in Gleichung (5). Die dielektrische Verlustleistung und die kapazitive Blindleistung können nach den Gleichungen (40) und (41) berechnet werden.

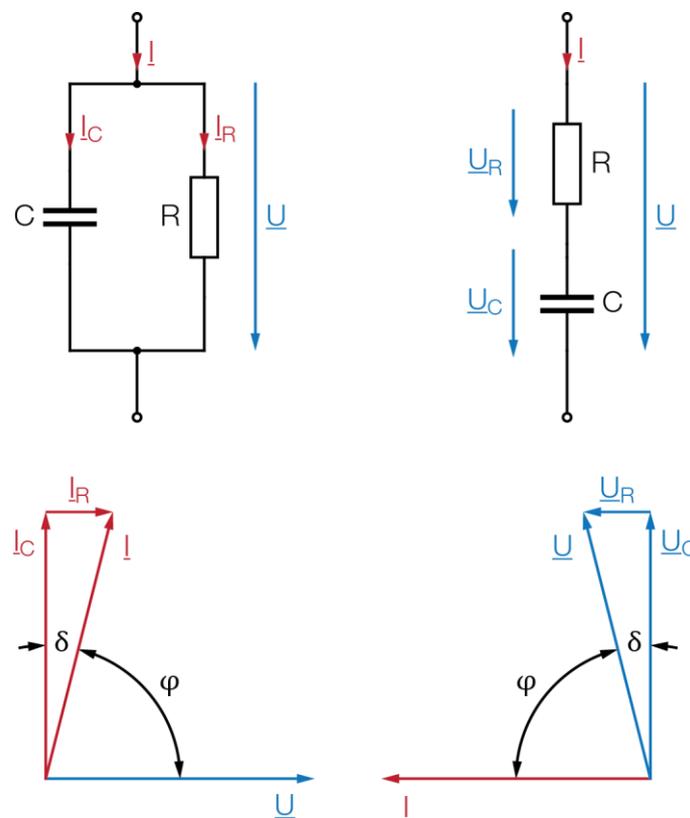


Bild 6-4: Parallel- und Reihenersatzschaltbild mit zugehörigen Zeigerdiagrammen eines verlustbehafteten Dielektrikums

$$P_{\delta} = U \cdot I_R \text{ bzw. } P_{\delta} = I \cdot U_R \quad (40)$$

$$Q_C = U \cdot I_C \text{ bzw. } Q_C = I \cdot U_C \quad (41)$$

In der Kabelisolierung werden Verluste durch den endlichen Isolationswiderstand und bei Wechselspannung durch den ständigen Wechsel der Polarisationsrichtung der im Dielektrikum vorhandenen Dipole hervorgerufen.

Während des Betriebs mit Wechselspannung fließt ein Wechselstrom I durch die Kabelisolierung, dieser setzt sich aus dem Ohm'schen Strom I_R und dem kapazitiven Strom I_C zusammen. Der Winkel zwischen den Zeigern von I und I_C wird als Verlustwinkel δ bezeichnet, das zugehörige Zeigerdiagramm ist in Bild 6-4 zu sehen.

Der Verlustfaktor ist nicht konstant, sondern wird von der Frequenz, Feuchtigkeit, Temperatur und Ionenleitfähigkeit beeinflusst. Deshalb sind bei Messungen Frequenz und Temperatur zu dokumentieren. Auch Teilentladungen haben einen Einfluss auf den Verlustfaktor, bei Überschreiten der Teilentladungseinsatzspannung kommt es zu einer spannungsabhängigen Veränderung des Verlustfaktors.

Die Verlustfaktormessung ist ein integrales Messverfahren und betrachtet immer den Zustand des gesamten Kabels bzw. der gesamten Kabelstrecke, es ist nicht möglich lokal begrenzte Abschnitte zu untersuchen.

Bei Messungen von langen Kabelstrecken mit netzfrequenter Wechselspannung kann das Bereitstellen der benötigten Blindleistung problematisch sein, weshalb in der Mittelspannung der Verlustfaktor gerne bei 0,1 Hz gemessen wird. Der Blindleistungsbedarf ist bei der Messung mit 0,1 Hz um den Faktor 500 geringer, als bei der mit 50 Hz. Die Umrechnung der Werte des Verlustfaktors bei 0,1 Hz auf die der Netzfrequenz von 50 Hz ist nicht möglich.

Heutzutage wird der Verlustfaktor von Kabeln hauptsächlich mit einem C-tan δ -Messverfahren mit digitaler Datenerfassung bestimmt. Bei diesem Messverfahren werden Verlustfaktor und Kapazität des Prüfobjekts direkt aus den gemessenen Strömen berechnet.

Die prinzipielle Messbrückenschaltung ist in Bild 6-5 dargestellt und besteht aus einem Referenz- und Messzweig. Der Messzweig besteht aus der Serienschaltung von Kabelprüfling C_x und Stromsensor S_x und der Referenzzweig aus der Serienschaltung von verlustlos angenommenen Normalkondensator C_N und Stromsensor S_N .

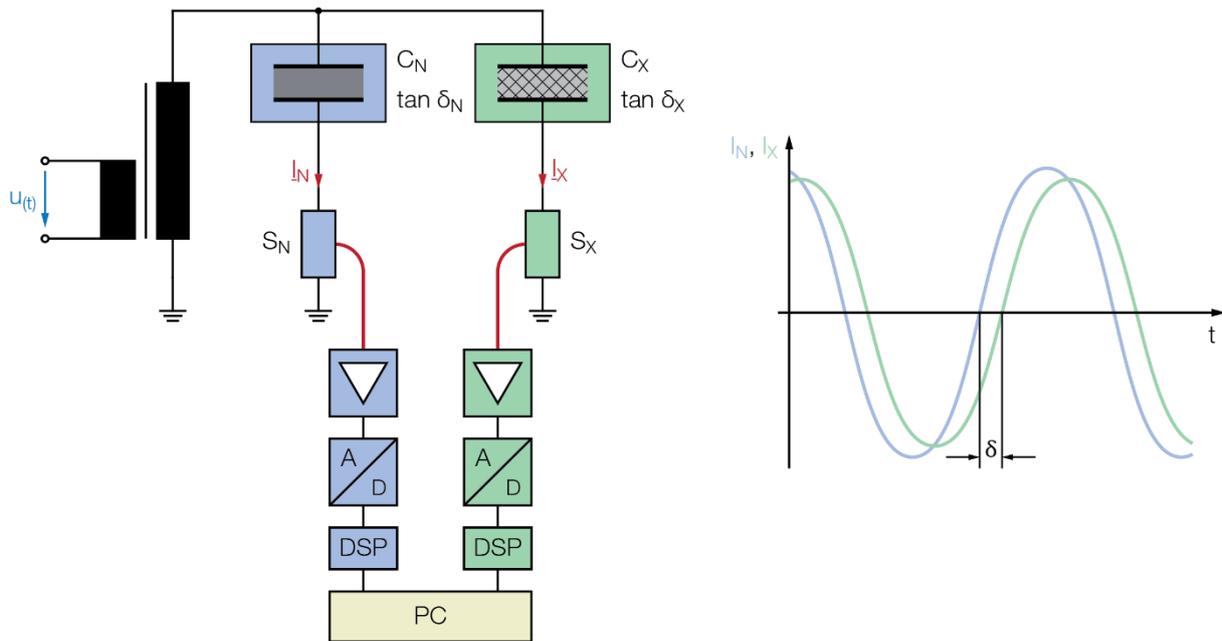


Bild 6-5: C-tan δ -Messverfahren mit digitaler Datenerfassung, links: prinzipielle Messschaltung, rechts: schematischer Verlauf der digital verarbeiteten Ströme [19]

Die beiden kontinuierlich gemessenen Stromsignale I_x und I_N werden integriert, verstärkt, digitalisiert und potentialfrei über Lichtwellenleiter dem digitalen Signalprozessor (DSP) zugeführt. Nach Durchlaufen des DSP erfolgt die Signalauswertung am PC, mit Hilfe der Diskreten Fourier-Transformation (DFT) werden die Grundswingungen der Ströme I_C und I_N bestimmt.

Aus dem Amplitudenverhältnis wird die Kapazität des Kabels und aus der Phasenverschiebung der Grundswingungen der Ströme der Verlustwinkel δ bestimmt.

Das Messsystem eignet sich auch aufgrund seiner hohen Genauigkeit und der kurzen Messzeit sehr gut zum Monitoring von Betriebsmitteln.

6.4.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung von C-tan δ -Messgeräten erfolgt durch direkte Einspeisung von Kalibrierströmen in die Brückenzweige. Die Erzeugung der in Betrag und Phase genau einstellbaren Kalibrierströme I_x und I_N erfolgt aus dem Niederspannungsnetz durch Wandler und induktive Teiler. Bei der Kalibrierung werden die Ströme des Prüflings C_X und des verlustlos angenommen Normalkondensators C_N nachgebildet. Aus den eingespeisten Kalibrierströmen werden Messabweichungen und Fehlerwinkel des Messgerätes im abgeglichenen Zustand erfasst und als Korrekturfaktoren berücksichtigt. [19]

Die Genauigkeit von C-tan δ -Messgeräten ist stark von der Qualität des verwendeten Normalkondensators abhängig. [19]

6.4.2 Normalkondensator

Bei Hochspannungsmessungen werden üblicherweise Druckgaskondensatoren nach Schering und Vieweg als Normalkondensatoren eingesetzt. Diese sind durch ihre koaxiale Anordnung der Zylinderelektroden sehr gut gegen elektromagnetische Störungen geschützt. [19]

Bei dieser Bauart können Kapazitäten von maximal 100 pF und Bemessungsspannungen von bis zu 1500 kV erreicht werden. Als Isoliergas wird heute hauptsächlich Schwefelhexafluorid (SF_6) eingesetzt, früher wurden auch Stickstoff (N_2) oder Kohlenstoffdioxid (CO_2) verwendet. [19]

Grundsätzlich bestehen Druckgaskondensatoren nach Schering und Vieweg aus zwei oder mehreren konzentrischen Elektroden, die in einem gasgefüllten Isolierzylinder aus Hartpapier, Polymethylmethacrylat (PMMA) oder glasfaserverstärktem Epoxidharz untergebracht sind. Bild 6-6 zeigt den schematischen Aufbau eines Druckgaskondensators in der 2- und 3-Elektrodenanordnung. [19]

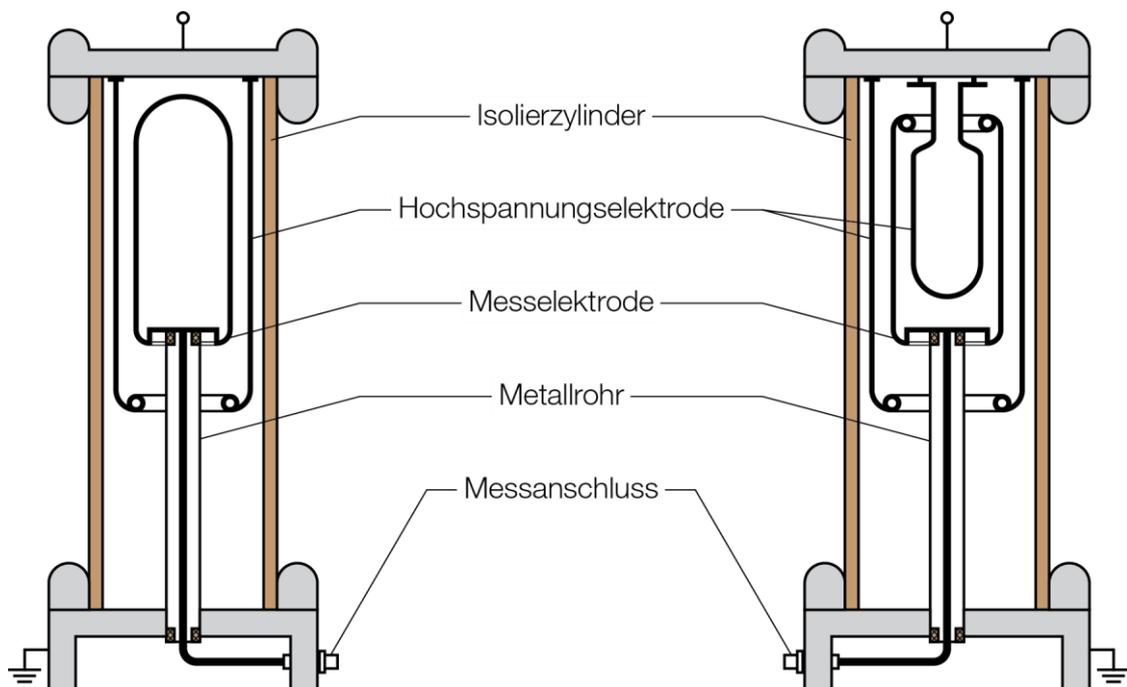


Bild 6-6: Schematischer Aufbau Druckgaskondensator nach Schering und Vieweg, links: 2-Elektrodenanordnung, rechts: 3-Elektrodenanordnung [19]

Der Isolierzylinder ist an den Enden mit gasdichten Metallflanschen verbunden, am oberen Metallflansch ist die Hochspannungselektrode und am unteren das Metallrohr auf dem die Messelektrode isoliert angebracht ist, befestigt. Die Verbindungsleitung von der Messelektrode zum Messanschluss verläuft im Metallrohr und wird durch dieses geschirmt. Zur Kontrolle des Gasdruckes ist am Fuß des Kondensators ein Manometer angebracht. [19]

Druckgaskondensatoren in der 3-Elektrodenanordnung besitzen zwei Hochspannungselektroden, zwischen denen sich die Messelektrode befindet, durch diese Bauart können im Vergleich zur 2-Elektrodenanordnung höhere Kapazitäten bei gleicher Bauhöhe erreicht werden. [19]

Die Betriebskapazität von Druckgaskondensatoren wird vom Gasdruck, der Temperatur, der Exzentrizität der Elektrodenanordnung, der Spannung und von Schwingungen beeinflusst. Zu diesen Einflüssen auf die Betriebskapazität wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt,

die nachfolgend der Vollständigkeit halber auch angegeben werden. Es wurde dabei nachgewiesen, dass die Kapazitätsänderungen gering sind. Der Einfluss auf die Messung ist vernachlässigbar. [19]

Druckabhängigkeit der Kapazität:

Die Betriebskapazität wird beim Betriebsdruck angegeben. Bei einer Abweichung des Gasdruckes vom Betriebsdruck verändert sich die Kapazität des Kondensators entsprechend der Druckdifferenz wie in Gleichung (42). Der Druckkoeffizient kann durch Messungen der Kapazität bei unterschiedlichen Drücken experimentell bestimmt oder durch Umformung der Gleichung (43) berechnet werden. Die experimentell bestimmten Werte weichen jedoch um bis zu 20 % von den berechneten Werten ab. Es wird vermutet, dass diese Abweichungen durch Verunreinigungen im Gas, z.B. durch Feuchtigkeit ($\epsilon_r \approx 80$), entstehen. Die durch die Temperaturänderung verursachte Druckänderung hat keinen Einfluss auf die Kapazität, da die Anzahl der im Druckgasbehälter vorhandenen Gasmoleküle konstant bleibt. [19]

$$C(p) = C_0 \cdot (1 + \alpha_p \cdot \Delta p) \quad (42)$$

$C(p)$ Kapazität in Abhängigkeit des Gasdruckes in F

C_0 Kapazität bei Betriebsdruck in F

α_p Druckkoeffizient in 1/kPa

Δp Abweichung vom Betriebsdruck in kPa

$$\epsilon_r = 1 + \alpha_p \cdot \frac{273}{100} \cdot \frac{p}{T} \quad (43)$$

p Gasdruck in kPa

T Temperatur in K

Temperaturabhängigkeit der Kapazität:

Der Einfluss der Temperatur auf die Kapazität ist hauptsächlich auf unterschiedliche Wärmedehnungen der verwendeten Materialien zurückzuführen. Der Hauptanteil wird durch die Längsausdehnung der Messelektrode und ein kleinerer Anteil durch die unterschiedliche Längenausdehnung des Isolierzylinders und des Metallrohrs verursacht. Abhängig vom überwiegenden Anteil der Ausdehnung ändert sich der Abstand zwischen Kopf der Messelektrode und hochspannungsseitigen Metallflansch und entsprechend die Kapazität des Kondensators. [19]

Exzentrizität:

Die Kapazität einer konzentrischen Elektrodenanordnung entspricht der eines einadrigen Radialfeldkabels aus Gleichung (1), vorausgesetzt es treten keinen Randeffekte an den Enden des Zylinderkondensators auf. Die Kapazität der konzentrischen Anordnung weist im Vergleich

zu einer exzentrischen Anordnung ein Minimum auf. Für eine exzentrische Zylinderelektrodenanordnung kann die Kapazität in Abhängigkeit der Exzentrizität laut Gleichung (44) berechnet werden. [19]

$$C'(e) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{D^2 - 4 \cdot e^2}{D \cdot d}\right)} \quad (44)$$

$C'(e)$ Kapazitätsbelag in Abhängigkeit der Exzentrizität in F/m

e Exzentrizität in mm

Spannungsabhängigkeit der Kapazität:

Eine spannungsabhängige Änderung der Kapazität tritt bei Druckgaskondensatoren auf, wenn die zylindrischen Elektroden exzentrisch angeordnet sind. Durch die exzentrische Anordnung wirken elektrostatische Kräfte auf die Elektroden, die Messelektrode wird dadurch ausgelenkt und die Exzentrizität vergrößert sich. Die elektrostatischen Anziehungskräfte nehmen mit steigender Spannung zu, dadurch verringert sich der Abstand zwischen den beiden Elektroden und die Kapazität nimmt zu. [19]

Resonanz:

Der Aufbau eines Druckgaskondensators stellt ein schwingungsfähiges System dar. Ein Stoß auf den Kopf des Kondensators wird auf die Messelektrode übertragen, wodurch diese zu einer gedämpften mechanischen Schwingung angeregt wird. Die Schwingung der Hochspannungselektrode kann wegen der mechanischen Verbindung zum Isolierzylinder und der damit verbundenen wesentlich höheren Steifigkeit vernachlässigt werden. Durch die mechanische Schwingung ändert sich die Kapazität des Kondensators in Abhängigkeit der Auslenkung der Messelektrode. [19]

Die mechanische Eigenfrequenz nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Bemessungsspannung, durch die zunehmende Länge des Tragrohres der Messelektrode und die größere Masse der Messelektrode, ab. Zusätzlich zur mechanischen kann auch eine elektrische Resonanz die Kapazität aufgrund der elektrostatischen Kraftwirkung beeinflussen. Dabei entzieht die mechanische Schwingung Energie aus dem elektrischen Feld, wodurch der Verlustfaktor zunimmt. Untersuchungen haben gezeigt, dass die elektrischen Resonanzfrequenzen von Druckgaskondensatoren deutlich unter der Netzfrequenz liegen. [19]

6.5 Kabeltrassensuche

Die Kabeltrassensuche wird zur Einmessung der Lage eines Kabels für die Dokumentation und Aktualisierung des Netzplans, zur Einweisung von Firmen vor Grabungsarbeiten und zur Bestimmung des genauen Trassenverlaufes bei der Fehlerortung eingesetzt.

Es wird zwischen zwei Messverfahren unterschieden, einem aktiven mit Sender und einem passiven ohne Sender.

Beim aktiven Messverfahren wird mit einem Tonsender ein Signal im Frequenzbereich zwischen 0,5 kHz und 80 kHz erzeugt. Die Einspeisung des Signales in das zu bestimmende Kabel kann entweder direkt über den Leiter oder induktiv durch eine Anlegezange oder Rahmenantenne erfolgen. Bei der direkten Ankopplung muss das Kabel freigeschaltet werden, dies ist bei der induktiven Ankopplung nicht erforderlich.

Das passive Messverfahren verwendet im Gegensatz zum aktiven keinen Sender, als Signal können entweder der netzfrequente Strom oder die von Funknavigationssendern erzeugten elektromagnetischen Felder im Frequenzbereich von 14 kHz und 22 kHz genutzt werden.

Bei beiden Messverfahren wird mit einer Suchspule das erzeugte magnetische Wechselfeld über der Kabeltrasse lokalisiert. Direkt über dem Kabel ergibt sich bei senkrechter Lage der Suchspule ein Signalminimum (Minimummethode Bild 6-7 links) und bei waagrechter Lage der Spulenachse ein Signalmaximum (Maximummethode Bild 6-7 rechts).

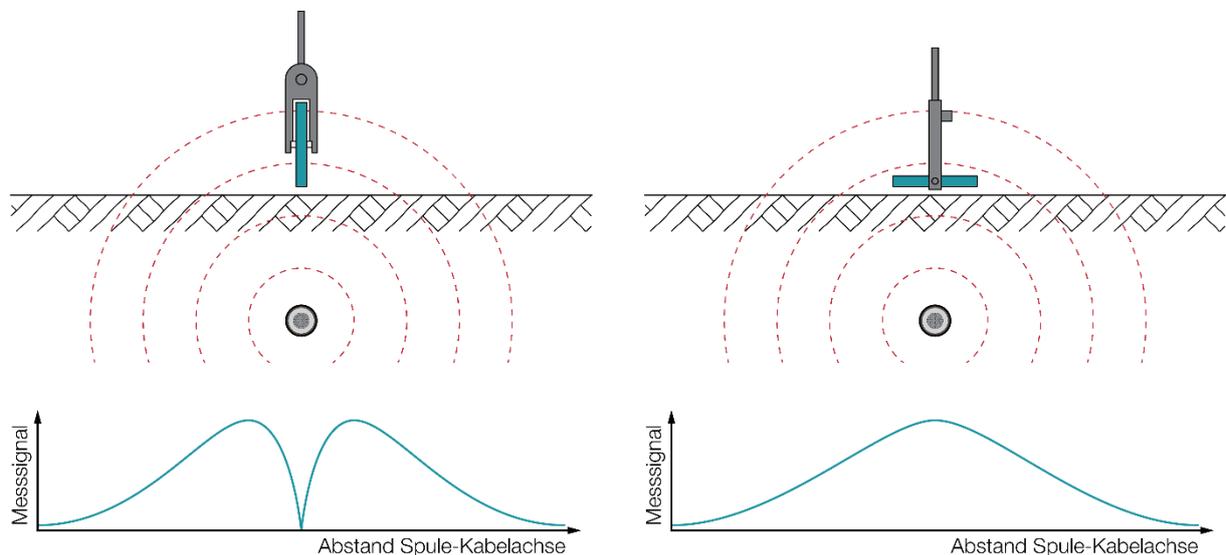


Bild 6-7: Kabeltrassensuche, schematische Darstellungen und Signalverläufe, links: Suchspule senkrecht über dem Kabel (Minimummethode), rechts: Suchspule waagrecht über dem Kabel (Maximummethode)

Zur Bestimmung der Legetiefe wird zuerst das Signalminimum bei senkrechter Lage der Spulenachse direkt über dem Kabel lokalisiert. Anschließend wird die Spulenachse auf eine 45°-Stellung gedreht und ein zweites Signalminimum in seitlicher Richtung zur Kabeltrasse bestimmt. Der Abstand zwischen den beiden Signalminima entspricht der Legetiefe des Kabels.

6.6 Kabelfehlerortung

Bei der Kabelfehlerortung ist die Wahl des geeigneten Messverfahrens von der Art des vorliegenden Fehlers abhängig. Zur Feststellung der Art des Fehlers ist eine Untersuchung auf Unterbrechung und Erd- oder Kurzschluss notwendig. Eine Übersicht und Zuordnung der unterschiedlichen Kabelortungsverfahren zeigt Tabelle 6-2.

Tabelle 6-2: Übersicht und Zuordnung der Kabelortungsverfahren

	Kabelfehlerortung		Unterbrechung	Mantelfehlerortung
	Erd- oder Kurzschluss niederohmig	hochohmig		
Vorortung	Reflexionsverfahren Schrittspannungsverfahren (Erdschluss)	Lichtbogen-Stoßverfahren mit Reflexionsbild Stromimpulsverfahren Spannungsgekoppeltes Ausschwingverfahren Schrittspannungsverfahren (Erdschluss)	Reflexionsverfahren	Schrittspannungsverfahren
Nachortung	Tonfrequenzverfahren Schrittspannungsverfahren (Erdschluss)	Stoßspannungsverfahren Schrittspannungsverfahren (Erdschluss)	Stoßspannungsverfahren	Schrittspannungsverfahren

6.6.1 Reflexionsverfahren

Das Reflexionsverfahren, auch Impuls-Echo-Verfahren genannt, eignet sich zur Vorortung von niederohmigen Fehlern und Leiterunterbrechungen. Dabei werden Reflexionen von hochfrequenten Impulsen, die sich an Stellen mit Wellenwiderstandsänderungen wie z.B. Muffen, Endverschlüssen oder Fehlerstellen ergeben, ausgewertet.

Bei der Messung werden in periodischen Abständen elektrische Impulse zur Fehlerstelle gesendet und dort abhängig vom Reflexionskoeffizienten reflektiert. Die Polarität des reflektierten Signales ist vom Verhältnis der Wellenwiderstände vor und nach der Reflexionsstelle abhängig. Aus dem Verhältnis der Wellenwiderstände kann der Reflexionskoeffizient nach Gleichung (45) berechnet werden. Das reflektierte Signal ist bei einem Erd- oder Kurzschluss positiv und bei einer Unterbrechung negativ.

$$r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (45)$$

r Reflexionskoeffizient

Z_1 Wellenimpedanz vor der Reflexionsstelle in Ω

Z_2 Wellenimpedanz nach der Reflexionsstelle in Ω

Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der gemessenen Laufzeit kann die Entfernung zur Fehlerstelle nach Gleichung (46) berechnet werden.

$$x = \frac{1}{2} \cdot t_x \cdot v \quad (46)$$

- x Fehlerentfernung in m
 t_x Impulslaufzeit in s
 v Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses in m/s

Bei der Auswertung wird das Signal einer fehlerbehafteten mit dem einer fehlerfreien Kabelader überlagert, eine schematische Darstellung der Impulse ist in Bild 6-8 ersichtlich. Der Fehlerort kann durch die überlagerte Darstellung eindeutig bestimmt werden.

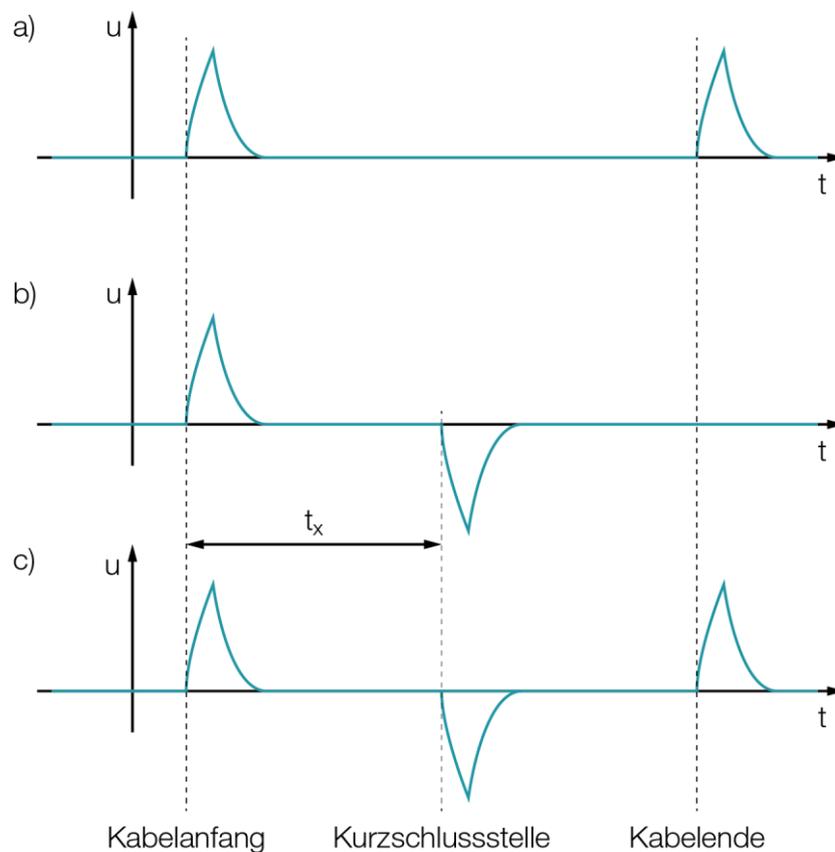


Bild 6-8: Reflexionsverfahren, schematische Darstellung der Impulse, a) Signal der fehlerfreien Kabelader, b) Signal der fehlerbehafteten Kabelader, c) überlagerte Darstellung der Impulse

6.6.2 Lichtbogen-Stoßverfahren

Das Lichtbogen-Stoßverfahren nutzt die Tatsache, dass sich der Widerstand an der Fehlerstelle unter Einwirkung eines Lichtbogens stark verringert.

Es wird zuerst ein Reflexionsbild der Kabelader mit hochohmigem Fehler aufgenommen. Anschließend wird mit einem Hochspannungsimpuls an der Fehlerstelle ein Lichtbogen gezündet

und ein weiteres Reflexionsbild mit niederohmigem Fehler aufgezeichnet. Durch einen Energietrennfilter werden die Hochspannungsimpulse und Messimpulse des Reflexionsmessgerätes getrennt. Der prinzipielle Messaufbau ist in Bild 6-9 dargestellt.

Bei der Auswertung werden die beiden aufgenommenen Reflexionsbilder überlagert, an der Stelle an der die beiden Kurven auseinanderlaufen befindet sich die Fehlerstelle.

Die Entfernung zur Fehlerstelle kann aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der gemessenen Laufzeit nach Gleichung (46) berechnet werden.

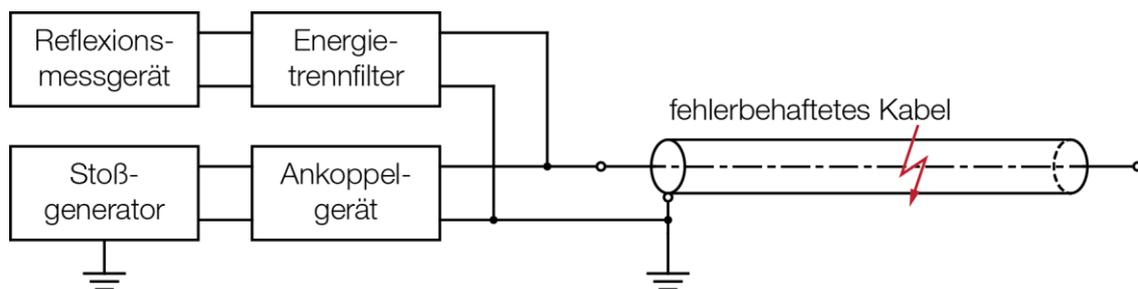


Bild 6-9: Lichtbogen-Stoßverfahren, prinzipielle Darstellung

6.6.3 Stromimpuls-Verfahren

Beim Stromimpuls-Verfahren wird ein mit Gleichspannung aufgeladener Stoßkondensator über eine Funkenstrecke wie in Bild 6-10 dargestellt in das fehlerbehaftete Kabel entladen. Der so erzeugte Stromimpuls wird an der Fehlerstelle reflektiert und läuft als gedämpfte Wanderwelle zwischen Kabelanfang und Fehlerstelle. Mit einem induktiv angekoppelten Reflexionsmessgerät wird die Laufzeit der Wanderwelle bestimmt.

Aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der gemessenen Laufzeit kann die Entfernung zur Fehlerstelle nach Gleichung (46) berechnet werden.

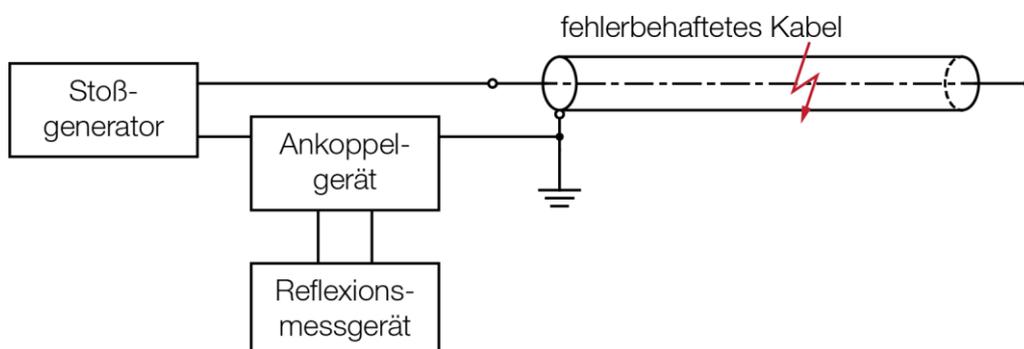


Bild 6-10: Stromimpuls-Verfahren, prinzipielle Darstellung

6.6.4 Spannungsgekoppeltes Ausschwingverfahren

Beim spannungsgekoppelten Ausschwingverfahren wird am fehlerhaften Kabel eine Gleichspannung angelegt und so lange erhöht, bis ein Überschlag an der Fehlerstelle erfolgt. Die

prinzipielle Darstellung des Messaufbaues ist in Bild 6-11 zu sehen. Durch den Überschlag wird eine zu beiden Kabelenden laufende Reflexionswelle ausgelöst. Die periodisch verlaufende Schwingung wird am Kabelanfang über einen Ankopplungskondensator mit einem Reflexionsmessgerät aufgezeichnet.

Die Entfernung zur Fehlerstelle kann aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der gemessenen Laufzeit nach Gleichung (46) berechnet werden.

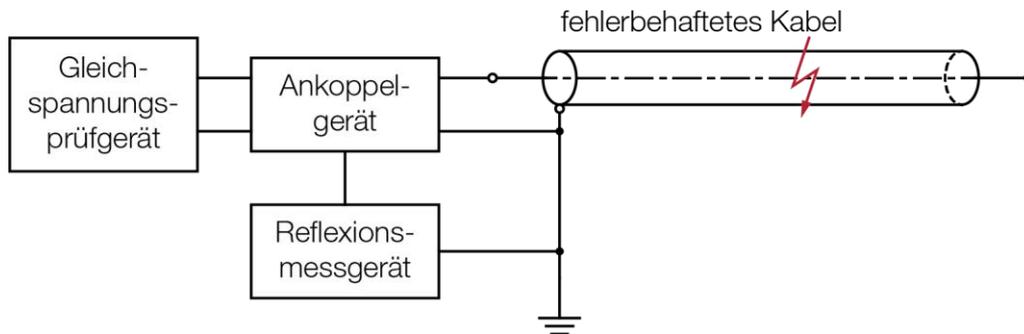


Bild 6-11: Spannungsgekoppeltes Ausschwingverfahren, prinzipielle Darstellung

6.6.5 Schrittspannungsverfahren

Das Schrittspannungsverfahren wird vorzugsweise zur Vor- und Nachortung von Mantelfehlern eingesetzt. Das Verfahren kann nur angewendet werden, wenn ausschließlich an der Fehlerstelle eine leitende Verbindung zwischen Leiter und Schirm oder Erde besteht. Bei Kabeln mit leitfähigen Mänteln kann dieses Ortungsverfahren aus diesem Grund nicht angewendet werden.

Vorortung:

Bei der Vorortung von Kabel- oder Mantelfehlern werden eine Gleichspannungsquelle mit einer maximalen Spannung von ca. 5 kV und ein Millivoltmeter benötigt. Für die Messung müssen zwei Phasenleiter mit dem Schirmende der fehlerbehafteten Ader verbunden werden. In Bild 6-12 ist der Messaufbau prinzipiell dargestellt. Es werden zwei getrennte Messungen bei konstant gehaltenem Schirmstrom durchgeführt und die Spannungen U_1 auf dem vorderen Abschnitt zwischen Kabelanfang und Fehlerstelle und U_2 auf dem hinteren Abschnitt zwischen Fehlerstelle und Kabelende getrennt voneinander gemessen. Die gemessenen Spannungen U_1 und U_2 verhalten sich zueinander wie die Strecken L_1 und L_2 , bei bekannter Gesamtkabellänge L_g kann der Fehlerort nach Gleichung (47) berechnet werden.

$$L_1 = L_g \cdot \frac{U_1}{U_1 + U_2} \quad (47)$$

- L_1 Kabellänge vom Kabelanfang bis zur Fehlerstelle in m
- L_g Gesamtkabellänge in m
- U_1 Spannungsabfall vom Kabelanfang bis zur Fehlerstelle in V
- U_2 Spannungsabfall vom Kabelende bis zur Fehlerstelle in V

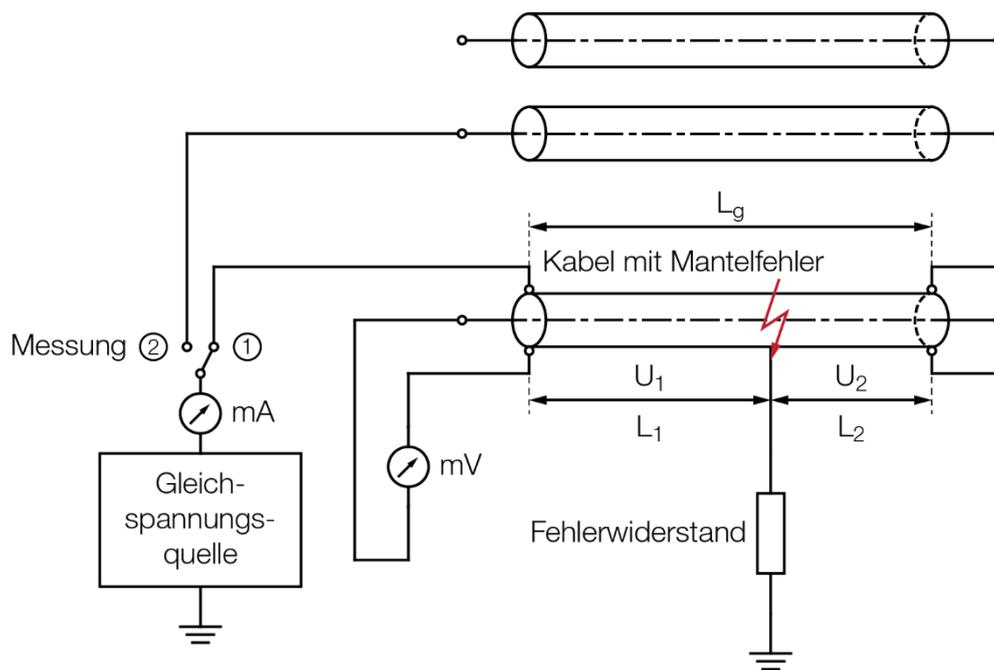


Bild 6-12: Mantelfehlervorortung, prinzipielle Darstellung

Nachortung:

Für die Nachortung mit dem Schrittspannungsverfahren wird eine Gleichspannung zwischen abgetrenntem Schirm und Erde angelegt. An der Fehlerstelle bildet sich, durch den ins Erdreich fließenden Gleichstrom, ein Spannungstrichter. Bei der Fehlerortung entlang der Kabeltrasse wird die Spannungsdifferenz zwischen zwei Erdspießen abgegriffen und mit einem Spannungsmessgerät angezeigt. Die abgegriffene Spannung steigt bei Annäherung an die Fehlerstelle, an der Fehlerstelle wechselt die abgegriffene Spannung die Polarität. Der prinzipielle Messaufbau und eine schematische Darstellung des Signalverlaufes sind in Bild 6-13 dargestellt.

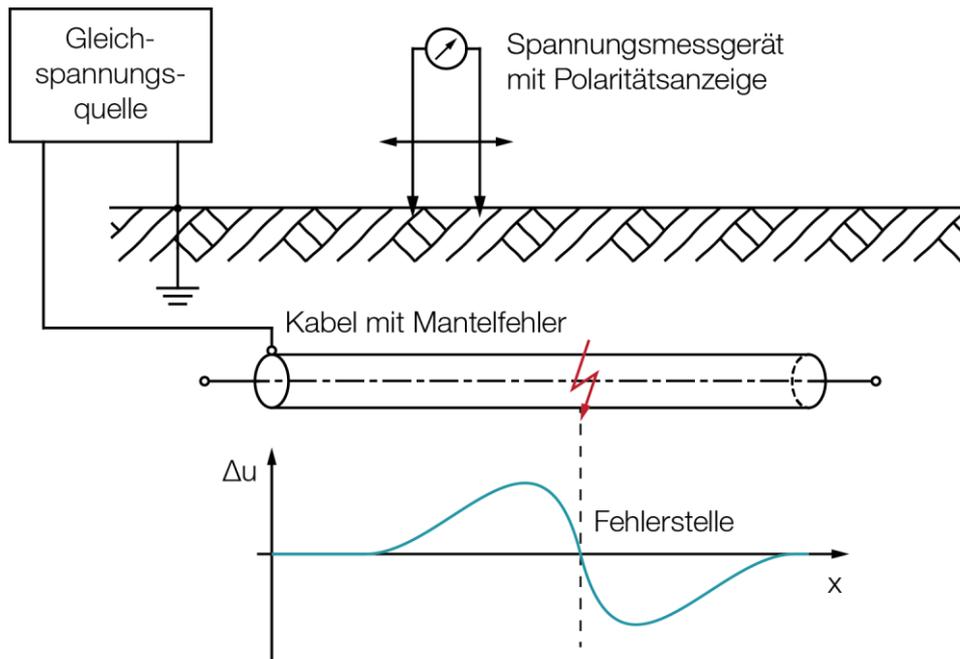


Bild 6-13: Mantelfehlernachortung, prinzipielle Darstellung

6.6.6 Tonfrequenzverfahren

Bei der Kabelfehlerortung mit dem Tonfrequenzverfahren wird zwischen der Dralfeld-Methode und dem Minimumübertragungs-Verfahren unterschieden. Die Dralfeld-Methode wird hauptsächlich bei Mehrleiterniederspannungskabeln verwendet, deshalb wird in dieser Arbeit nur das Minimumübertragungs-Verfahren beschrieben.

Beim Minimumübertragungs-Verfahren wird mit einem Tonfrequenzgenerator ein tonfrequenter Wechselstrom zwischen fehlerbehafteten Leiter und Kabelschirm oder Metallmantel eingespeist.

Bei der Messung mit einer Suchspule in senkrechter Position wird das vom Tonfrequenzgenerator erzeugte magnetische Wechselfeld unmittelbar über dem Kabel längs entlang der Kabelstrecke zu einem Minimum.

An der Fehlerstelle wird der normale Feldlinienverlauf infolge des Stromflusses vom Leiter zum Kabelschirm oder Metallmantel gestört, dies hat ein Ansteigen des Messsignals im Bereich der Fehlerstelle zur Folge. Eine genaue Vorortung der Fehlerstelle ist sehr wichtig, da das Messverfahren sehr anfällig für Störungen des Feldlinienverlaufes ist. Diese Störungen können durch Muffen oder Eisenteile im Erdreich verursacht werden. Bild 6-14 zeigt den prinzipiellen Aufbau und den schematischen Verlauf des Messsignals.

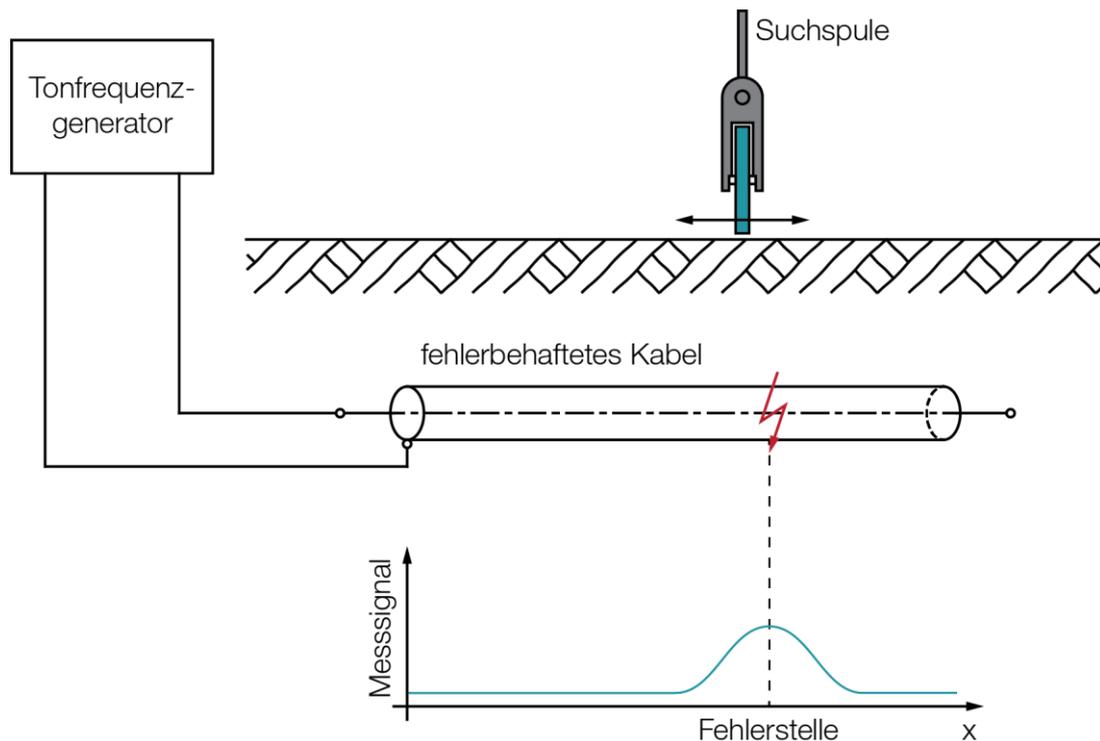


Bild 6-14: Minimumübertragungs-Verfahren, prinzipielle Darstellung

6.6.7 Stoßspannungsverfahren

Beim Stoßspannungsverfahren handelt es sich um ein akustisches Ortungsverfahren, bei dem an der Fehlerstelle ein Überschlag entstehen muss. Bei diesem Verfahren wird ein Stoßspannungsgenerator an der defekten Kabelader wie in Bild 6-15 dargestellt angeschlossen. Die auf das Kabel abgegebenen Stoßspannungsimpulse führen an der Fehlerstelle zu Überschlägen mit starkem Entladungsgeräusch. Das Entladungsgeräusch kann mit einem Körperschallmikrofon und angeschlossenem Detektor geortet und dargestellt werden. Die Fehlerstelle befindet sich an der Stelle an der das Entladungsgeräusch am lautesten ist. Neue Empfänger werten zusätzlich zum akustischen Signal auch das elektromagnetische Signal des Stromimpulses mit aus. Diese Kombination der Signalauswertung erleichtert die Ortung von in Rohren verlegten Kabeln, bei der aufgrund der Schallübertragung in Längsrichtung des Rohres eine rein akustische Bestimmung der Fehlerstelle sehr schwierig ist.

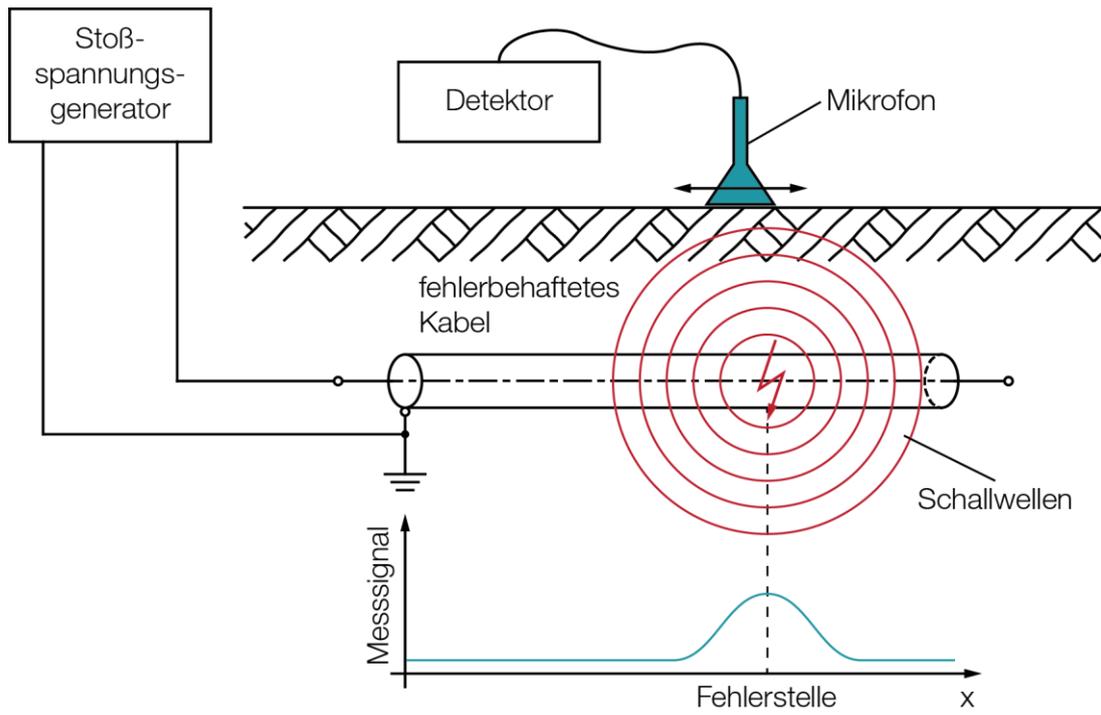


Bild 6-15: Stoßspannungsverfahren, prinzipielle Darstellung

7 Prüf- und Diagnoseprogramm

Die Durchführung einer umfangreichen Zustandsbewertung setzt ein Prüf- und Diagnoseprogramm voraus. Vor der Einführung eines Prüf- und Diagnoseprogrammes muss festgelegt werden, welche Prüfungen und Diagnosen durchgeführt und welche Messwerte aufgezeichnet werden. Der Ablauf und die zu verwendenden Mess- und Prüfgeräte jeder Prüf- und Diagnosemethode sind vor der Einführung zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der einzelnen Untersuchungen festzulegen.

7.1 Prüfungen bei Werksabnahme

Kabel werden bei der Herstellung gemäß den Vorgaben der Norm geprüft, nach der Auslieferung ist die Sichtkontrolle die erste Prüfung, die der Kunde durchführt. Durch die Sichtkontrolle soll festgestellt werden, ob der Kabelmantel bei der Fertigung oder beim Transport beschädigt wurde.

Eine zusätzliche Prüfung bei der Werksabnahme ist die Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit, wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben. Gleichzeitig ist auch die Überprüfung der geometrischen Abmessungen, wie in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.3 beschrieben, durchzuführen.

7.2 Inbetriebnahmeprüfungen

Die erste elektrische Prüfung, die vom Kunden durchgeführt wird, ist die Inbetriebnahmeprüfung. Sie hat die Aufgabe das verlegte Kabelsystem auf seine ordnungsgemäße Funktion und die Einhaltung der Qualitätsanforderungen zu überprüfen. In der DIN VDE 0276-620 [5] wird nach der Verlegung des Kabelsystems eine Spannungsprüfung der Isolierung und eine Mantelprüfung empfohlen.

Zusätzlich zu den in der Norm empfohlenen Prüfungen sollte auch eine Teilentladungsmessung und Verlustfaktormessung durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind die Vergleichsbasis für alle wiederkehrenden Prüfungen. In Tabelle 7-1 sind für unterschiedliche Prüf- und Diagnosemethoden, die als notwendig erachteten, für die Zustandsbewertung zu dokumentierenden, Kennwerte aufgelistet.

Tabelle 7-1: Zu dokumentierende Kennwerte

	Spannungsprüfung	Mantelprüfung	Teilentladungsmessung	Verlustfaktormessung
Kennwerte	Prüfspannung (Pegel, Frequenz, Kurvenform)	Prüfspannung (Pegel, Frequenz, Kurvenform)	Prüfspannung (Pegel, Frequenz, Kurvenform)	Prüfspannung (Pegel, Frequenz, Kurvenform)
	Prüfdauer	Prüfdauer	Grundstöörpegel, Teilentladungspegel	Temperatur
	Widerstand der Isolierung	Widerstand des Mantels	Phasenauflösendes Teilentladungspattern, Ein- & Aussetzspannung, Zeitbereichsreflektometrie	Verlustfaktor, Kabelkapazität
	Messequipment	Messequipment	Messequipment	Messequipment

Die Referenzwerte für zukünftige Messungen werden bei der Inbetriebnahmeprüfung aufgenommen. Bei dieser Messung können Kabelgarnituren erhöhte Teilentladungspegel aufweisen, diese erhöhten Pegel beruhigen sich normalerweise nach einer bestimmten Betriebszeit. Werden bei der Teilentladungsmessung erhöhte Teilentladungspegel festgestellt, so sind alle Referenzmessungen nach ein bis drei Monaten zu wiederholen.

Die Verlustfaktor- und Teilentladungsmessungen sollten bei unterschiedlichen Prüfspannungspegeln durchgeführt werden. Dies ist für spätere, wiederkehrende Prüfungen von Bedeutung, da durch die TEAM-Beanspruchung (Thermal, Electrical, Ambient, Mechanical) das Isoliersystem älterer Kabelstrecken geschwächt sein kann.

Mit Hilfe der Verlustfaktormessung ist es möglich, die Restlebensdauer einer Kabelstrecke abzuschätzen, hierfür werden der Verlustfaktor und die Änderung des Verlustfaktors betrachtet.

Für die Abschätzungen der Restlebensdauer und die Beurteilung des Alterungszustandes ist es wichtig, dass alle Messdaten mit einer Referenzmessung, vor der Inbetriebnahme, verglichen werden können.

7.3 Wiederkehrende Prüfungen

Auf die Inbetriebnahmeprüfung folgen wiederkehrende Prüfungen. Die Durchführung von wiederkehrenden Prüfungen kann entweder zeitbasiert oder ereignisbasiert erfolgen. Bei der zeitbasierten wiederkehrenden Prüfung werden die erforderlichen Prüfungen und Diagnosen zu festgelegten Zeiten durchgeführt. Die Zeit zwischen den Prüfungen wird von Zustand, Wichtigkeit und Risiko der Kabelstrecke bestimmt. Ereignisbasierte Messungen und Prüfungen erfolgen nach Reparaturen oder Veränderungen der Kabelstrecke.

Bei älteren Kabelstrecken sind die Prüfspannungspegel zu verringern, da das Isoliersystem durch die TEAM-Beanspruchung geschwächt ist und es durch zu hohe Spannungspegel beschädigt werden kann. Der genaue Zeitpunkt, ab dem der Prüfspannungspegel zu verringern ist, kann nicht vorhergesagt, sondern muss von den Verantwortlichen auf Basis von Erfahrungswerten und Prüfergebnissen festgelegt werden.

Durch den Vergleich der Messdaten der wiederkehrenden Prüfungen mit den Messdaten der Referenzmessung können der Alterungszustand und die Restlebensdauer, der Kabelstrecke, beurteilt werden.

7.4 Restfestigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen im Labor

Zusätzlich zu den Diagnosemessungen an Kabeln im Betrieb, ist es in ausgewählten Fällen sinnvoll, die Restfestigkeit von ausgetauschten Kabeln zu bestimmen. Dies bietet sich vor allem bei Kabeln an, die aus strategischen Gründen ausgetauscht werden müssen, vorausgesetzt es sind noch entsprechend lange Restlängen dieses Kabeltyps vom gleichen Hersteller und Fertigungsjahr in Betrieb. Durch die Ergebnisse der Restfestigkeitsuntersuchung kann auf den Zustand der restlichen, sich in Betrieb befindlichen, Kabellängen geschlossen werden. Außerdem geben Restfestigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen Aufschlüsse über die Alterung von Kabeln im Allgemeinen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Restfestigkeitsuntersuchungen an betriebsgealterten und beschleunigt im Labor gealterten Mittelspannungskabeln durchgeführt. Bei den betriebsgealterten Kabelproben handelte es sich um zehn jeweils drei Meter lange Kabelproben des Typs E-A2YHC2Y 1x95 RM /16 20 kV der Firma PENTHOR. Die Kabelstrecke, in der dieses Kabel eingebaut war, wurde aufgrund mehrerer Fehler ausgetauscht. Die zehn im Labor gealterten Kabelproben stammen aus einer Präqualifikationsprüfung, das Prüfprogramm war dabei ähnlich dem in Tabelle 5-1 aufgelisteten Programm.

7.4.1 Betriebsgealterte Kabelproben

Vor der Stufenwechselspannungsprüfung wurde bei acht Proben eine Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung durchgeführt. Die Verlustfaktormessung wurde mit zwei unterschiedlichen Messverfahren bestimmt, dem Verfahren der dielektrischen Antwortmessung und dem C-tan δ -Messverfahren mit digitaler Datenerfassung. Die Verlustfaktorbestimmung mithilfe der dielektrischen Antwortmessung wurde mit dem Messgerät DIRANA der Firma OMICRON durchgeführt.

Für die Bestimmung des Verlustfaktors durch das C-tan δ -Messverfahren mit digitaler Datenerfassung und die gleichzeitige Teilentladungsmessung wurde ein modulares Messsystem der Firma OMICRON, bestehend aus einem Glasfaser-Buskontroller (MCU 502), zwei universellen Strom-Messsystemen (MI 600), einem High-End Mess- und Analysesystem für Teilentladungen (MPD 600) und einem Ankopplungsvierpol (CPL 542/543) verwendet. In Bild 7-1 ist der schematische Aufbau für die gleichzeitige Messung von Verlustfaktor und Teilentladungen dargestellt, Bild 7-2 zeigt den Messaufbau im Hochspannungslabor.

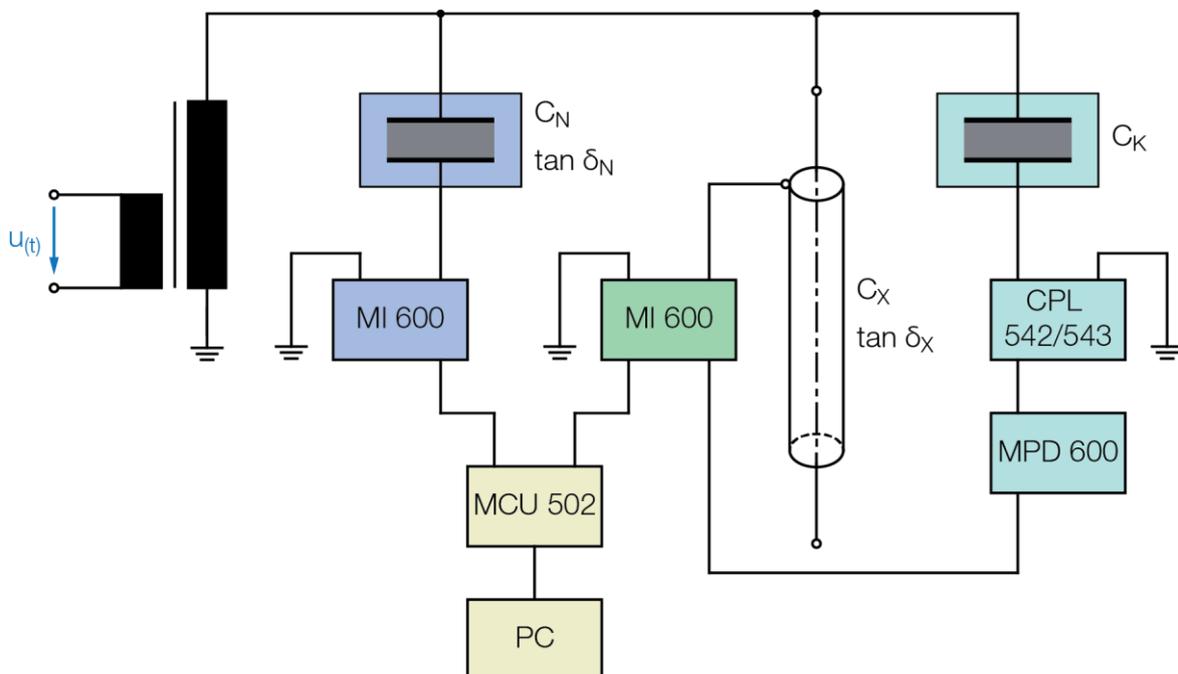


Bild 7-1: Schematische Darstellung des Messaufbaues für die Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung



Bild 7-2: Messaufbau für die Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung im Hochspannungslabor

Beim Normalkondensator C_N handelte es sich um einen SF_6 gefüllten Pressgaskondensator nach Schering und Vieweg mit einer Kapazität von $37,3 \text{ pF}$, bei einem Druck von $3,73 \text{ bar}$, der Öl-Papierisolierte Koppelkondensator C_K hat eine Kapazität von 1200 pF .

Die Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung wurde wie folgt durchgeführt: Zuerst wurde die Spannung auf 12 kV eingestellt und der Teilentladungspegel sowie der Verlustfaktor und die Kapazität aufgezeichnet. Anschließend wurde die Spannung auf 20 kV gesteigert und für 1 Minute gehalten, dabei wurden Verlustfaktor und Kapazität sowie die Teilentladungspegel zu Beginn und am Ende der Minutenmessung aufgezeichnet. Nach der Minutenmessung wurde die Spannung auf 12 kV verringert und der Teilentladungspegel ein zweites Mal aufgezeichnet.

In Tabelle 7-2 sind die Ergebnisse der Verlustfaktormessungen aufgelistet, alle Messergebnisse liegen unter dem, in der DIN VDE 0276-620 [5] bei Raumtemperatur zugelassenen, Höchstwert von $40 \cdot 10^{-4}$. Beim Vergleich der Messwerte bei 12 kV und 20 kV ist eine Spannungsabhängigkeit des Verlustfaktors zu erkennen, außerdem zeigte die Kabelprobe Nr. 3 zusätzlich eine zeitliche Veränderung des Verlustfaktors. Die Zunahme des Verlustfaktors mit steigender Prüfspannung tritt laut [20] vorwiegend bei gealterten PE-Kabeln auf, bei VPE-Kabeln wurde keine oder eine sehr geringe Spannungsabhängigkeit nachgewiesen. Die zeitliche Veränderung des Verlustfaktors während der Prüfdauer tritt nur bei PE-Kabeln auf und kann in drei Fälle unterschieden werden, dabei kann der Verlustfaktor abnehmen, gleichbleiben oder zunehmen. Ein gleichbleibender Verlustfaktor weist auf eine intakte Isolierung hin. Durch die plötzliche Feldstärkeneinwirkung tritt bei lange außer Betrieb gestandenen Kabeln, aufgrund von Ausgleichsvorgängen in der Isolierung, eine zeitliche Abnahme des Verlustfaktors auf. Ein zunehmender Verlustfaktor tritt nur bei gealterten Kabeln auf.

Tabelle 7-2: Messergebnisse der Verlustfaktormessungen

Kabel Nr.	OMICRON DIRANA 200 V		OMICRON MI 600			
	tan δ_x bei 50 Hz	C_x	12 kV		20 kV	
			tan δ_x bei 50 Hz	C_x	tan δ_x bei 50 Hz	C_x
	$\cdot 10^{-4}$	pF	$\cdot 10^{-4}$	pF	$\cdot 10^{-4}$	pF
1	–	–	–	–	–	–
2	–	–	–	–	–	–
3	1,24	631,72	1,42	650,38	1,82	650,40
4	1,18	723,80	0,93	745,10	1,02	745,08
5	0,95	689,88	0,88	710,20	1,00	710,17
6	1,02	742,08	0,82	764,48	0,94	764,45
7	1,59	694,41	1,32	715,45	1,50	715,44
8	1,45	654,85	0,99	674,39	1,43	674,37
9	1,50	646,69	1,01	665,83	1,41	665,81
10	1,19	671,43	0,82	691,38	0,85	691,36
Umgebungstemperatur: 23 °C						

Die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen sind in Tabelle 7-3 aufgelistet. Bei der Messung wiesen die Kabelproben Nr. 4 und 10 erhöhte Teilentladungsaktivitäten bei einer Prüfspannung von 20 kV auf. Keines der Kabel wies eine Teilentladungsaktivität bei einer Prüfspannung von 12 kV auf.

Tabelle 7-3: Messergebnisse der Teilentladungsmessungen

Kabel Nr.	Spannung			
	12 kV	20 kV (1 min)		12 kV
		Start	Ende	
	pC	pC	pC	pC
1	–	–	–	–
2	–	–	–	–
3	< 1	< 1	< 1	< 1
4	< 1	70	120	< 1
5	< 1	2	1,8	< 1
6	< 1	10	10	< 1
7	< 1	< 1	< 1	< 1
8	< 1	5	8	< 1
9	< 1	2	1,2	< 1
10	< 1	140	100	< 1
Grundstörpegel: < 1				
Umgebungstemperatur: 23 °C				

Im Anschluss an die Diagnosemessungen wurde eine Stufen-Wechselspannungsprüfung an den Kabelproben durchgeführt. Die Spannung wurde, ausgehend von 12 kV, auf 20 kV und in weiterer Folge in 5 kV Schritten bis zum Durchschlag gesteigert, dabei betrug das Zeitintervall pro Stufe 5 Minuten. Die Durchschlagsspannungen der einzelnen Kabelproben sind in Bild 7-3 dargestellt. Zwei Kabelproben konnten nicht ausgewertet werden, bei der Prüfspannung von 100 kV traten bei der Kabelprobe Nr. 3 Überschläge über den Endverschluss auf und bei der Kabelprobe Nr. 5 erfolgte ein Durchschlag des Endverschlusses bei 95 kV.

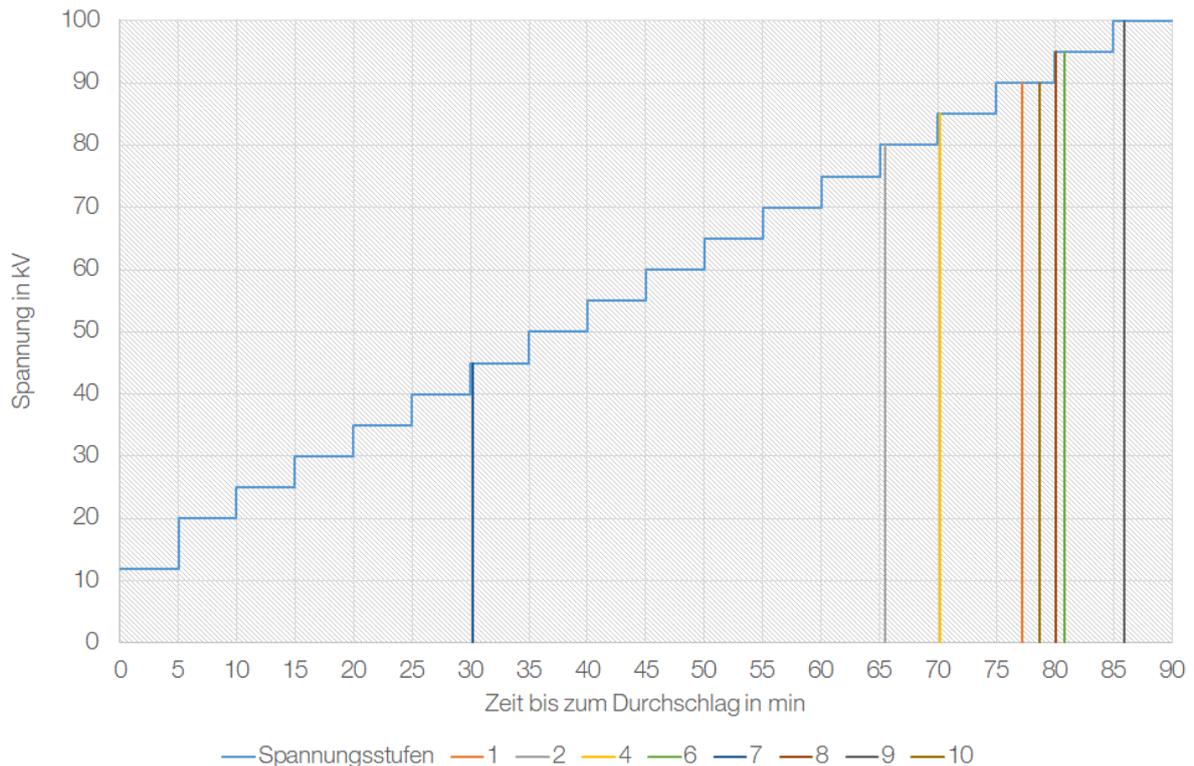
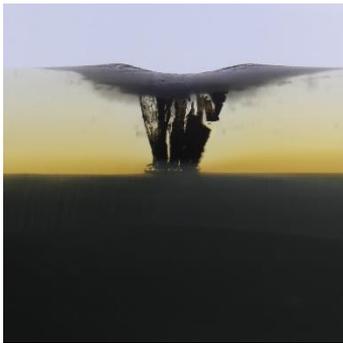


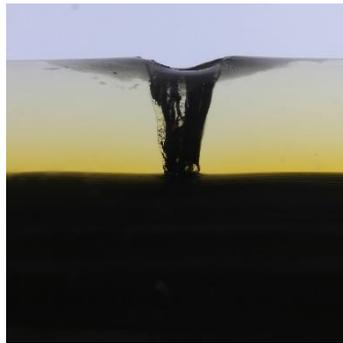
Bild 7-3: Durchschlagsspannungen der Stufen-Wechselspannungsprüfung, betriebsgealterte Kabelproben

Die Ergebnisse der Stufen-Wechselspannungsprüfung haben gezeigt, dass die Entscheidung richtig war, die Kabelstrecke auszutauschen. Für die Bewertung der Ergebnisse ist der kleinste Wert der Durchschlagsspannung mit 45 kV der Kabelprobe Nr. 7 ausschlaggebend.

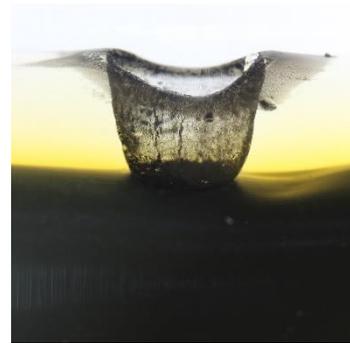
Nach der Stufenwechselspannungsprüfung wurde noch eine Transparenzprüfung zur Untersuchung der Durchschlagskanäle durchgeführt. Bild 7-4 zeigt die Durchschlagskanäle der einzelnen Kabelproben.



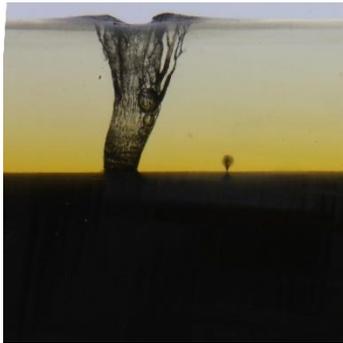
Nr. 1



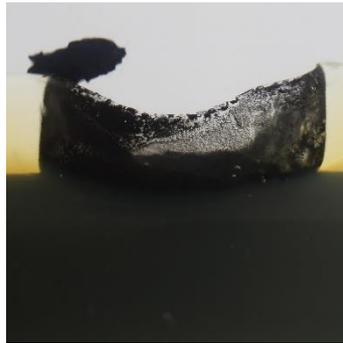
Nr. 2



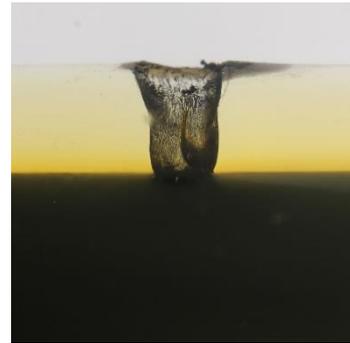
Nr. 4



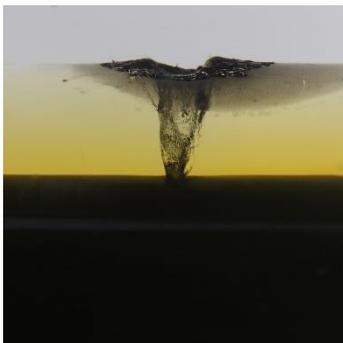
Nr. 6



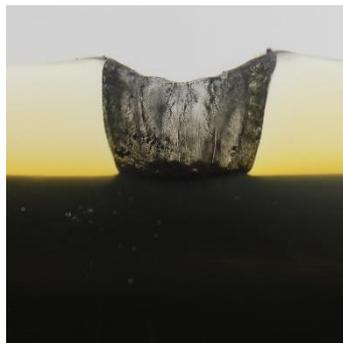
Nr. 7



Nr. 8



Nr. 9



Nr. 10

Bild 7-4: Transparenzuntersuchungen der Durchschlagskanäle

Die Durchschlagskanäle weisen keine besonderen Vorkommnisse auf, alle verlaufen vom Leiter zum Kabelschirm. Wird das Bild der Kabelprobe Nr. 6 genauer betrachtet, so ist rechts neben dem Durchschlagskanal ein sich ausbildender Electrical-Tree zu erkennen.

Beim Entfernen der äußeren Leitschicht für die Transparenzprüfung zeigten sich bei allen Kabelproben, über die gesamte Kabellänge verteilt, kleine Leitschicht-Protrusionen, siehe Bild 7-5.



Bild 7-5: Leitschicht-Protrusionen, links: Isolierung, rechts: äußere Leitschicht

7.4.2 Im Labor gealterte Kabelproben

Die im Labor gealterten Proben bestanden aus unterschiedlichen Kombinationen von Kabeln, davon waren sieben mit Garnituren des gleichen Typs in der Kaltschrumpftechnik (Proben Nr. 1 bis Nr. 6 und Nr. 9) und drei mit Garnituren des gleichen Typs in der Warmschrumpftechnik (Nr. 7, Nr. 8 und Nr. 10) verbunden und abgeschlossen. Vor der Stufenwechselspannungsprüfung wurde eine Stoßspannungsprüfung zur Überprüfung der Isolationsfestigkeit mit 10 Stößen positiver und 10 Stößen negativer Blitzstoßspannung ($1,2 / 50 \mu\text{s}$) mit 125 kV gemäß Normvorgaben aus der DIN VDE 0276 620 [5] durchgeführt. Eine Kabelprobe mit Garnituren in der Warmschrumpftechnik hat die Stoßspannungsprüfung nicht bestanden.

Bei der Stufenwechselspannungsprüfung wurde die Spannung, ausgehend von 55 kV, in 5 kV Schritten bis zum Durchschlag gesteigert, dabei betrug das Zeitintervall pro Stufe 5 Minuten. Der Aufbau für die Stufenwechselspannungsprüfung im Hochspannungslabor ist in Bild 7-6 zu sehen. Die Ergebnisse der Stufenwechselspannungsprüfung sind in Bild 7-7 dargestellt.



Bild 7-6: Aufbau Stufenwechselspannungsprüfung

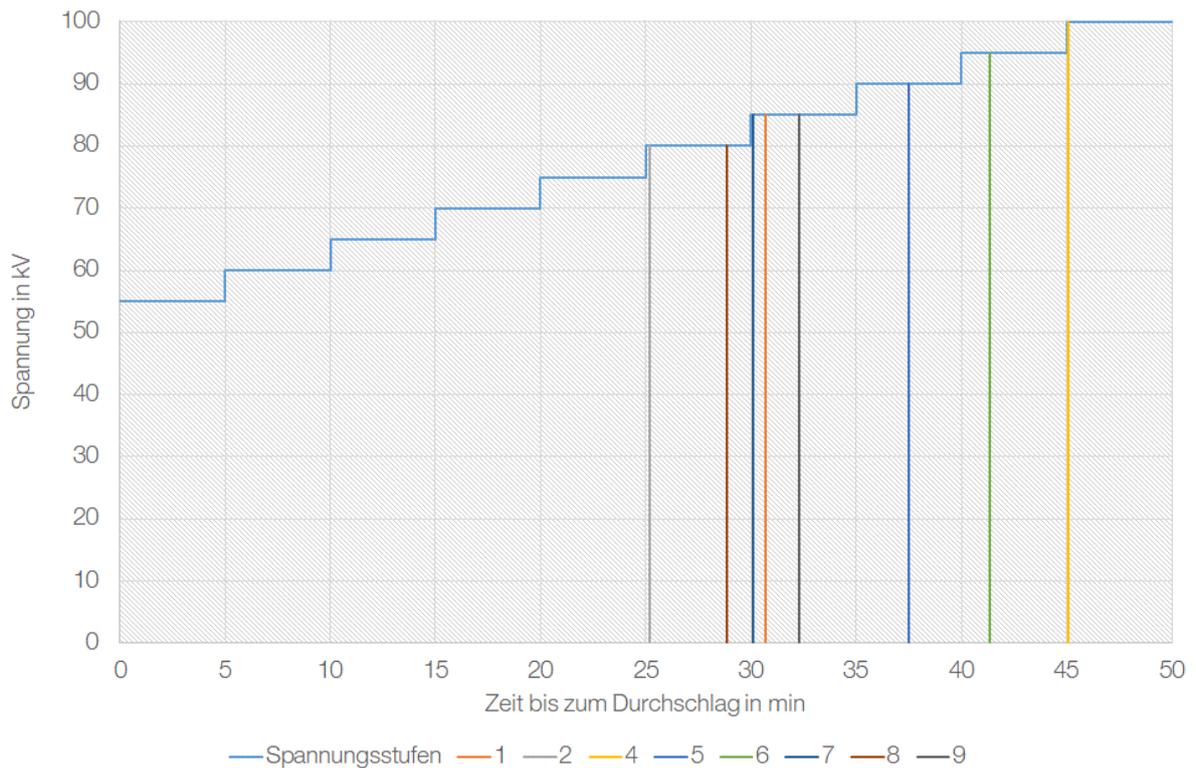


Bild 7-7: Durchschlagsspannungen der Stufen-Wechselspannungsprüfung, im Labor gealterte Kabelproben

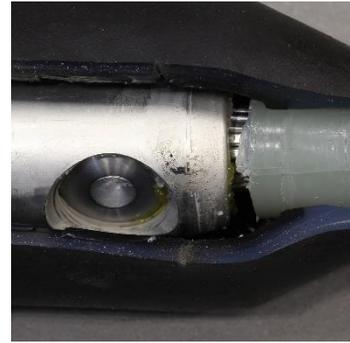
Alle Prüflinge haben bei der Stufenwechselspannungsprüfung eine Durchschlagsspannung von mindestens 80 kV erreicht. Nur bei den Proben Nr. 1 und Nr. 5 erfolgten die Durchschläge nicht im Garniturenbereich, sondern in der Kabelisolierung. Bei der Probe Nr. 9 erfolgte der Durchschlag im Bereich der Kabelmuffe an der Absetzkante der äußeren halbleitenden Schicht, wie in Bild 7-8 Nr. 9 zu erkennen ist. Bei den restlichen Proben mit Garnituren in der Kaltschrumpftechnik erfolgten die Durchschläge im Feldsteuerteil, in Bild 7-8 Nr. 2, Nr. 3, Nr. 4 und Nr. 6 sind die am Durchschlagskanal aufgeschnittenen Feldsteuerteile zu sehen. Nur bei den Proben mit Garnituren in der Warmschrumpftechnik erfolgten die Durchschläge im Bereich der Endverschlüsse, genau am Ende des Feldsteuerteils wie in Bild 7-8 Nr. 7 und Nr. 8 zu erkennen ist.



Nr. 2



Nr. 3



Nr. 4



Nr. 6



Nr. 7



Nr. 8



Nr. 9

Bild 7-8: Durchschlagskanäle der im Labor gealterten Kabelproben

8 Zustandsbewertung

Eine Zustandsbewertung für Kabelsysteme kann auf zwei Arten erfolgen, strategisch oder operativ. Die Bestimmung des strategischen Zustandes eines Betriebsmittels erfolgt durch die Auswertung von Alter, Auslastung, Wichtigkeit und Risiko. Bei der Betrachtung des operativen Zustandes eines Betriebsmittels werden Mess- und Prüfergebnisse, durchgeführte Reparaturen, Ausfall- und Störstatistiken sowie Betriebsdaten ausgewertet.

Eine gepflegte Datenbank ist aufgrund der Vielzahl an Daten für eine Zustandsbewertung unerlässlich. Die Auswertung dieser Daten und Bestimmung des Zustands eines Betriebsmittels erfolgt bei richtiger Implementierung automatisch, wenn alle relevanten Daten im entsprechenden Umfang vorhanden sind.

8.1 Daten einer Kabelstrecke: Datenerfassung

Eine Datenbank zur Zustandsbewertung von Kabeln muss das vorhandene Kabelnetz schematisch und phasenselektiv abbilden. Dabei sind alle Teilelemente einer Kabelstrecke getrennt zu betrachten, da es sich um eigenständige Betriebsmittel handelt. Für die statistische Zustandsbewertung von Kabelstrecken werden Basisdaten benötigt. Tabelle 8-1 zeigt eine Empfehlung für Basisdaten einer Datenbank.

In der Datenbank werden die einzelnen Betriebsmittel zu einer Kabelstrecke zusammengefasst. Dadurch ist es möglich Prüf- und Diagnosedaten sowie Betriebsdaten den richtigen Betriebsmitteln zuzuweisen.

Durch die phasenselektive Betrachtung ist eine korrekte Nachbildung des Kabelnetzes möglich, außerdem können so den einzelnen Betriebsmitteln Montage-, Betriebs- sowie Prüf- und Diagnosedaten phasenrichtig zugewiesen werden.

Tabelle 8-1: Basisdaten die in einer Kabeldatenbank vorhanden sein sollten mit kurzer Erklärung

Kabelabschnitt	
Abschnitt	Kabelstrecke bestehend aus Kabel und Garnituren
Kabeldaten	
Kabelhersteller	Hersteller
Kabeltyp	vollständige Kabelbezeichnung
Fertigungsjahr	Jahreszahl
Einbaujahr	Jahreszahl
Länge	berechnet und gemessen
Garnituredaten	
Garniturenhersteller	Hersteller
Garniturentyp	vollständige Garniturenbezeichnung
Garniturentechnik	Warm-, Kaltschrumpftechnik, Aufschiebetechnik
Verbindungs- und Anschlusstechnik	Schraub-, Pressverbinder
Fertigungsjahr	Jahreszahl
Einbaujahr	Jahreszahl
Montagedaten	
Montage-, Verlegefirma	Firmenname
Monteur	Personenangabe
Verwendetes Werkzeug	Montagewerkzeug (Serien-, Inventarnummer)
Verlegungsart	Anordnung, Bettung, etc.
Bilddokumentation	Montageschritte
Muffenplan	Position der Muffen
Betriebsdaten	
Fehler, Reparaturen	Datenbank & Protokoll, Personen
Prüfung nach Reparatur	Datenbank & Protokoll, Personen
Belastungsgrad	jährlicher Verlauf
Betrieb bei Erdschluss	Stunden/Jahr (Phasenangabe)
Prüf- und Diagnosedaten	
Inbetriebnahmeprüfungen	Protokoll
Prüfung des Istzustandes mit Bewertung	Lt. Prioritätenliste, Maßnahmen, Prüfinderintervalle
Wiederholungsprüfung	Lt. Prioritätenliste, Maßnahmen, Prüfinderintervalle
Prüfberichte	Prüfbericht

8.2 Statistische Zustandsbewertung

Die statistische Zustandsbewertung ist eine Möglichkeit zur Abschätzung der Lebensdauer von Betriebsmitteln. Durch die statistische Auswertung von Fehlern, Diagnosemessergebnissen oder Restfestigkeitsuntersuchungen, kann auf die Lebensdauer von vergleichbaren Betriebsmitteln geschlossen werden.

Für die Erstellung von Statistiken werden Basisdaten, wie in Tabelle 8-1 aufgelistet, benötigt. Abhängig vom Umfang und Detailgrad der erfassten Daten, können unterschiedliche Auswertungen durchgeführt werden. In der Praxis werden üblicherweise alle in Tabelle 8-1 aufgelisteten Basisdaten erfasst, die Sammlung und Verwaltung dieser Daten erfolgt in vielen Fällen jedoch nicht zentral, wodurch die Zusammenführung der einzelnen Teildaten erschwert wird.

Statistiken zu Fehlern erfordern eine genaue Unterteilung der aufgetretenen Fehler. Für die Beurteilung des Zustandes eines Kabels werden ausschließlich Daten von Kabelfehlern benötigt. Extern verursachte Fehler durch z.B. Bauarbeiten oder höhere Gewalt haben keinen Bezug zu Qualität und Zustand des Kabels und würden bei Berücksichtigung nur den statistisch bestimmten Zustand verschlechtern.

8.2.1 Begriffe

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von elektrischen Betriebsmitteln, mit Hilfe der Zustandsbewertung anhand statistischer Daten, werden die folgenden grundlegenden Kenngrößen benötigt.

Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$:

Die Ausfallwahrscheinlichkeit kann durch eine Verteilungsfunktion nach Gleichung (48) beschrieben werden und gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Betriebsmittel im Zeitintervall $[0,t]$ ausfällt. Das Ergebnis der Funktion ist von der Zeitdauer t abhängig und liegt zwischen 0 und 1. Die Verteilungsfunktion besitzt folgende Eigenschaften: [21]

- $\lim_{t \rightarrow 0} F(t) = 0$
- $\lim_{t \rightarrow \infty} F(t) = 1$

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(\tau) d\tau, \quad t \geq 0 \quad (48)$$

$F(t)$ Verteilungsfunktion

$f(\tau)$ Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Zuverlässigkeit $R(t)$:

Die Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit nach Gleichung (49) ist das Gegenstück zur Ausfallwahrscheinlichkeit und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Betriebsmittel im Zeitintervall $[0,t]$ nicht ausfällt. [21]

$$R(t) = 1 - F(t), \quad t \geq 0 \quad (49)$$

$R(t)$ Zuverlässigkeit

Wahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$:

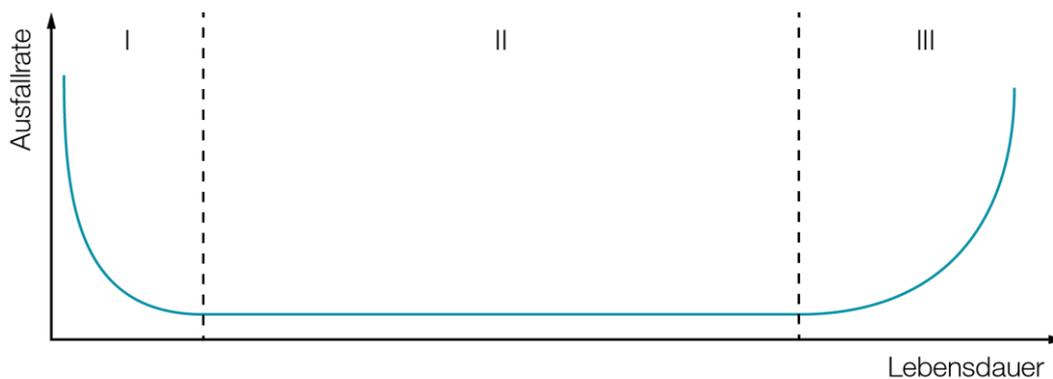
Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion laut Gleichung (50) ist die zeitliche Ableitung der Verteilungsfunktion, wenn diese differenzierbar ist. Die Differenzierbarkeit ist bei allen, für die Lebensdaueranalyse verwendeten, Verteilungsfunktionen gegeben, da diese monoton wachsend sind. [21]

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad t \geq 0 \quad (50)$$

Ausfallrate $\lambda(t)$:

Die Ausfallrate wird aus der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und der Verteilungsfunktion laut Gleichung (51) berechnet und gibt an, wie viele Betriebsmittel in einem Zeitintervall durchschnittlich ausfallen. Im Laufe der Betriebsdauer ändert sich die Ausfallrate, dabei entspricht ihr Verlauf der sogenannten, im Bild 8-1 dargestellten, Badewannenkurve. [21]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, \quad t \geq 0 \quad (51)$$



Phase I: abnehmende Ausfallrate, Frühausfälle (Fehler bei Montage und Inbetriebnahme)

Phase II: konstante Ausfallrate, zufällige Ausfälle

Phase III: ansteigende Ausfallrate, altersbedingte Ausfälle

Bild 8-1: Badewannenkurve

Risiko $r(t)$:

Für den Begriff des Risikos gibt es viele Definitionen. In der Technik wird darunter, wie in Gleichung (52) beschrieben, das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und der daraus resultierenden Schadenshöhe verstanden. Bei dieser Betrachtung entspricht die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses der Ausfallwahrscheinlichkeit. [21]

$$r(t) = F(t) \cdot H(t) \quad (52)$$

$r(t)$ Risiko

$H(t)$ resultierende Schadenshöhe

Weibull-Verteilung:

Bei der Weibull-Verteilung handelt es sich um eine stetige Extremwertverteilung, die für Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen von elektrischen Betriebsmitteln verwendet wird. Die Gleichungen (53) und (54) beschreiben die Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Weibull-Verteilung.

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha} \quad (53)$$

$$\alpha > 0, \beta > 0, 0 \leq t < \infty$$

α Formparameter
 β Skalierungsparameter

$$f(t) = \frac{\alpha}{\beta^\alpha} \cdot t^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)^\alpha}, \quad t \geq 0 \quad (54)$$

Durch den Formparameter wird das Maximum der Dichtefunktion verschoben, für $\alpha \leq 1$ befindet sich das Maximum bei $t = 0$ und für $\alpha > 1$ verschiebt sich das Maximum zu größeren Werten von t . Bei spezieller Wahl des Formparameters von 1 bzw. 2 geht die Weibull-Verteilung in die Exponential- bzw. in die Rayleigh-Verteilung über. Im Bild 8-2 sind für unterschiedliche Werte des Formparameters die Dichte- und Verteilungsfunktion dargestellt.

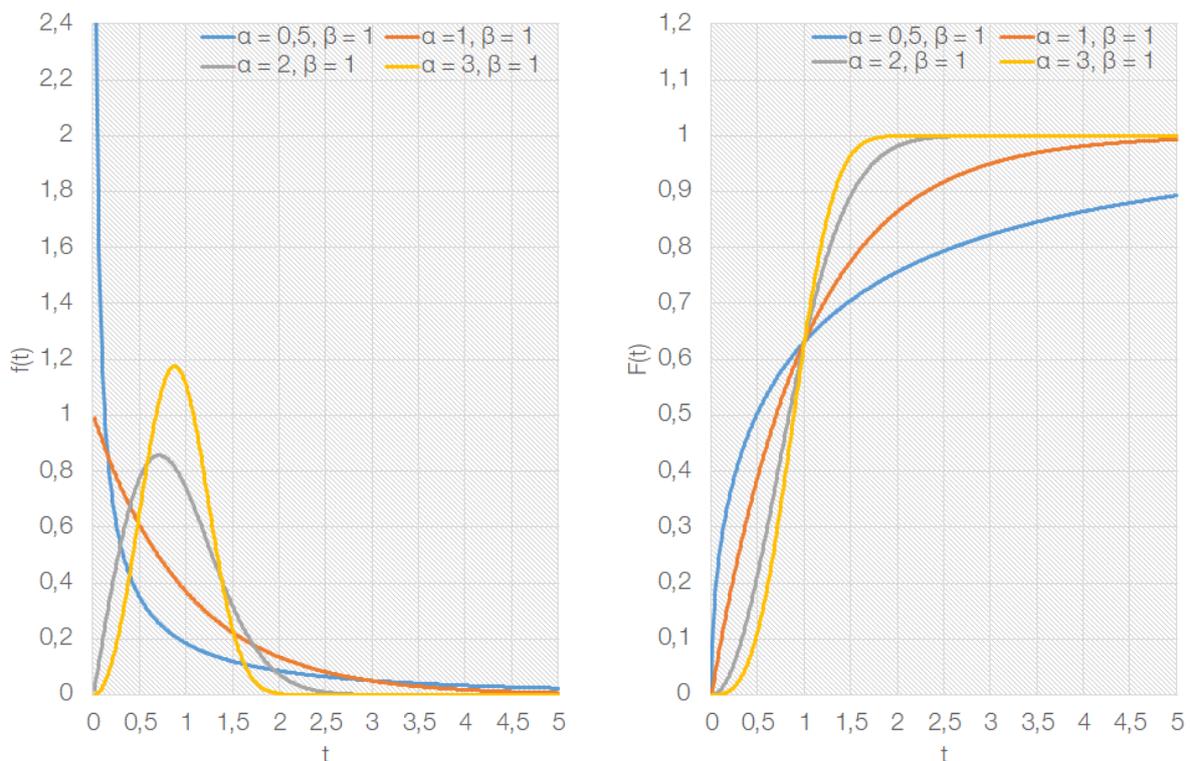


Bild 8-2: Weibullverteilung für unterschiedliche Werte des Formparameters, links: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, rechts: Verteilungsfunktion

Anwendung der Weibull-Verteilung:

Mit Hilfe der Weibullverteilung ist es möglich, Lebensdauer kennlinien für Isolierstoffe zu bestimmen. Für die Erstellung der Lebensdauer kennlinie müssen zuerst Konstantspannungsversuche an einer entsprechenden Anzahl von Prüflingen bei unterschiedlichen Spannungen u_d durchgeführt werden. Aus den Ergebnissen der Konstantspannungsversuche werden die empirischen Verteilungsfunktionen der Durchschlagszeiten aus dem Weibull-Netz bestimmt. Aus den Verteilungsfunktionen der Durchschlagszeiten kann durch Übertragen der zugehörigen Spannungswerte in das Durchschlagsspannung-Durchschlagszeit-Diagramm die Lebensdauer kennlinie in Abhängigkeit der Durchschlagswahrscheinlichkeiten p konstruiert werden. Die Lebensdauer kennlinie in Abhängigkeit der Durchschlagswahrscheinlichkeit wird durch die Funktion aus Gleichung (55) beschrieben. Im Bild 8-3 ist die Konstruktion der Lebensdauer kennlinie für zwei Durchschlagswahrscheinlichkeiten dargestellt. [22]

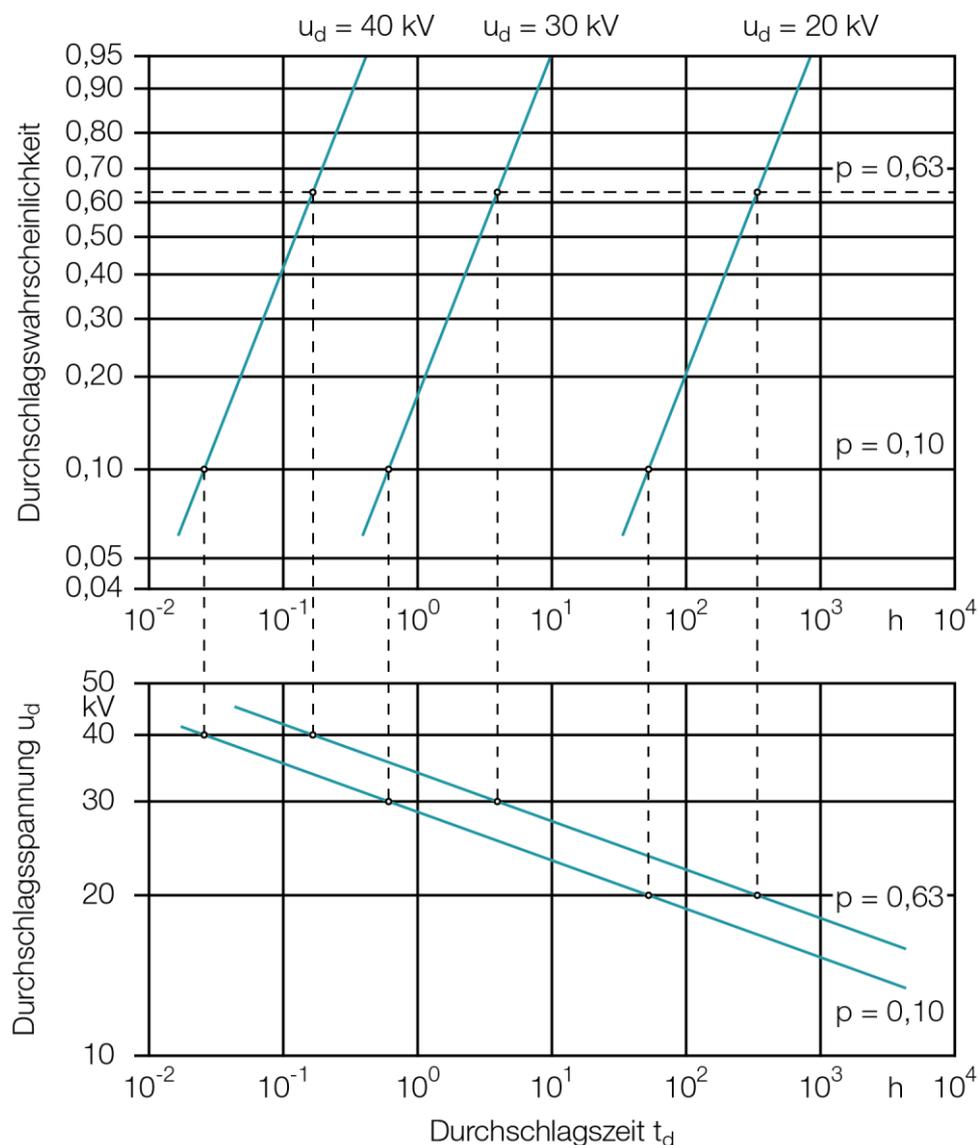


Bild 8-3: Ermittlung der Lebensdauer kennlinie mit Konstantspannungsversuchen, oben: Verteilungsfunktion der Durchschlagszeit (Weibull-Netz), unten: Lebensdauer kennlinie nach Gleichung (55) [22]

$$u_d^N \cdot t_d = k_d \quad (55)$$

u_d	Durchschlagsspannung in V
k_d	Konstante
t_d	Durchschlagszeit in h
N	Lebensdauerexponent

8.2.2 Darstellungsmöglichkeiten

Für die Veranschaulichung unterschiedlicher Darstellungsmöglichkeiten wurde ein Excel-Modell für die Auswertung von Kabel Fehlern erstellt. Als Eingabefelder wurden die in Tabelle 8-1 aufgelisteten Basisdaten verwendet. Die im Modell verwendeten Fehlerdaten wurden, basierend auf den Veröffentlichungen [23], [24], [25] und [26] angenommen. Der einfache Aufbau in Tabellenform sollte zusätzlich Aufschlüsse darüber geben, wie bestimmte Daten in einer Datenbank hinterlegt und berücksichtigt werden müssen, damit diese für statistische Auswertungen verwendet werden können.

Abhängig von Umfang und Detailgrad der vorhandenen Basisdaten, ergeben sich für die statistische Zustandsbewertung unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten. In Tabelle 8-2 sind einige Darstellungsmöglichkeiten in Abhängigkeit der benötigten Parameter aufgelistet.

Tabelle 8-2: Darstellungsmöglichkeiten und benötigte Parameter für statistische Untersuchungen

Kategorie	Darstellungsmöglichkeit	Parameter
I	<ul style="list-style-type: none"> (kumulierte) Anzahl *) der Betriebsmittel unterteilt auf Technologien über die Zeit Fehler unterteilt auf Technologien (kumulierte) Fehler unterteilt auf Technologien über die Zeit 	<ul style="list-style-type: none"> Betrachtungszeitraum Anzahl der Betriebsmittel im Betrachtungszeitraum Anzahl der aufgetretenen Fehler im Betrachtungszeitraum
II	<ul style="list-style-type: none"> (kumulierte) Fehler unterteilt in Betriebsmitteltypen bezogen auf die Anzahl *) und Zeit der Betriebsmittel Ausfallraten von Betriebsmitteltypen Trendanalysen von Betriebsmitteltypen 	<ul style="list-style-type: none"> Parameter der Kategorie I Unterscheidung in einzelne Kabeltypen
III	<ul style="list-style-type: none"> zeitlicher Verlauf der (kumulierten) Fehler unterteilt auf Betriebsmitteltypen bezogen auf Anzahl *) und Alter der Betriebsmittel Ausfallraten von Betriebsmitteltypen und Einbaujahren Trends & Prognosen für einzelne Betriebsmitteltypen gleichem Einbaujahres 	<ul style="list-style-type: none"> Parameter der Kategorien I & II Einbauzeitpunkte Zeitliche Dokumentation der Fehler
*)	Bei Kabeln wird anstelle der Anzahl die verlegte Länge betrachtet	

Bei den Darstellungsmöglichkeiten der Kategorie I handelt es sich um grundlegende Statistiken, welche sehr einfach zu erheben sind. Darstellungsmöglichkeiten der Kategorien II & III erfordern einen höheren Detailgrad der erfassten Parameter. Durch diesen erhöhten Detailgrad ist es möglich, Tendenzen und Trendabschätzungen bezüglich des Zustandes von Kabeln durchzuführen.

Bild 8-4 zeigt die jährliche Verteilung der verlegten und der verlegten kumulierten Kabellängen, unterteilt in Kabeltechnologien sowie die kumulierte verlegte Gesamtkabellänge. Diese Darstellung zeigt sehr gut in welchen Jahren ein Wechsel der bevorzugten verwendeten Kabeltechnologie bezüglich der verlegten Länge durchgeführt wurde.

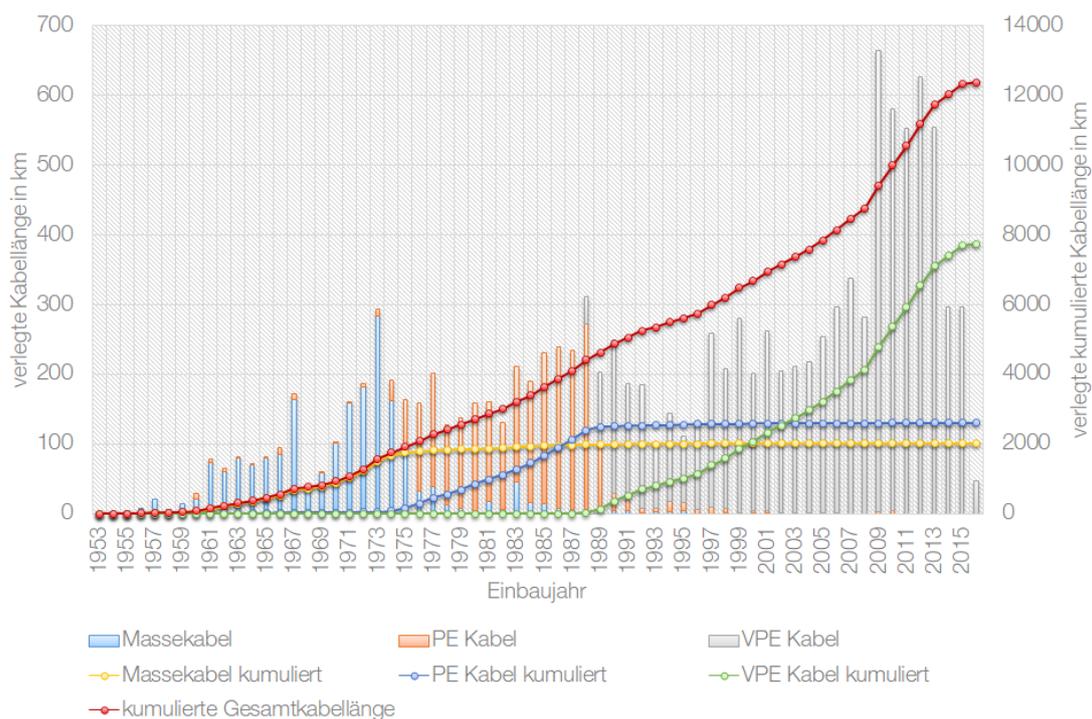


Bild 8-4: Verlegte Kabellänge

Eine Darstellung der aufgetreten Fehler je Jahr unterteilt nach den Kabeltechnologien ist in Bild 8-5 zu sehen. Beim Vergleich der Bilder Bild 8-4 und Bild 8-5 ist zu erkennen, dass die verlegte kumulierte Gesamtkabellänge und die Anzahl der Fehler dasselbe Verhalten aufweisen.

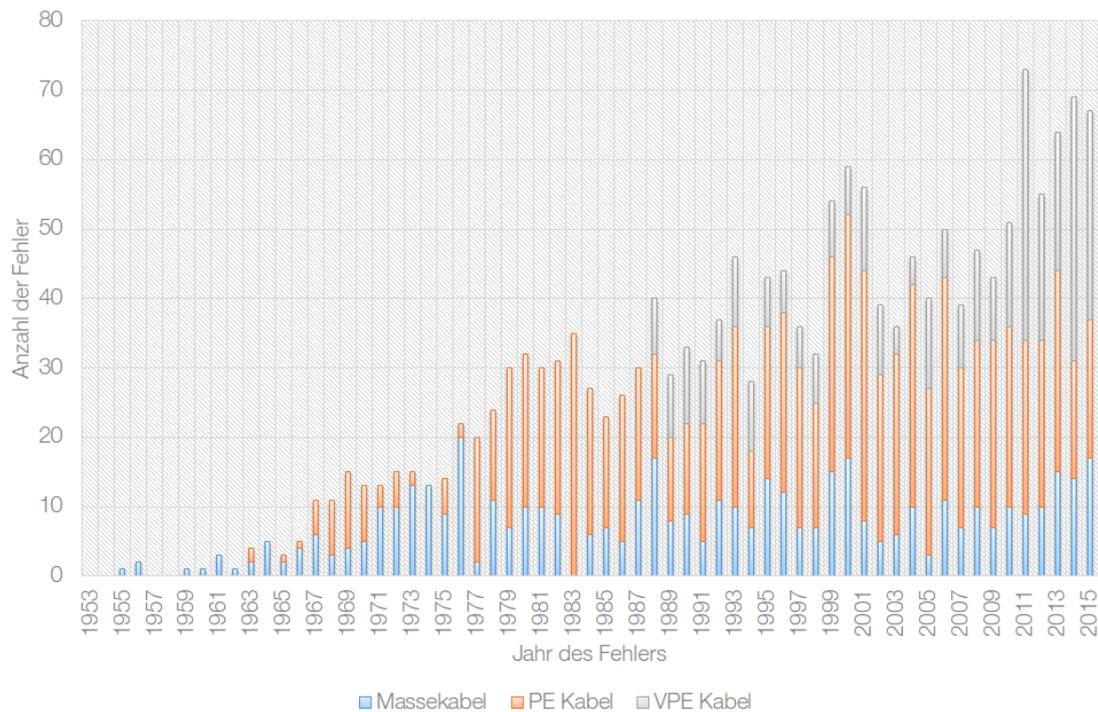


Bild 8-5: Anzahl der Fehler pro Jahr

Werden die aufgetretenen Fehler auf die verlegte kumulierte Kabellänge bezogen, so ergibt sich ein annähernd linearer Zusammenhang, die daraus resultierende Größe wird als Ausfallrate im Normalbetrieb bezeichnet. Im Bild 8-6 wurde nicht zwischen den unterschiedlichen Kabeltypen, sondern zwischen der Art des aufgetretenen Fehlers unterschieden. Der Einfachheit halber erfolgte die Unterteilung in zwei Fehlerarten, Fehler durch externen Einfluss und Kabelfehler.

Bei der Betrachtung der einzelnen Ausfallraten zeigt sich, dass die Ausfallrate für alle Fehler ca. 0,83 Fehler pro Jahr und 100 km beträgt. Werden ausschließlich Kabelfehler betrachtet, so verringert sich die Ausfallrate auf ca. 0,45 Fehler pro Jahr und 100 km.

Die Extremwerte der Ausfallraten in den Jahren 1955 und 1956 ergeben sich durch die kurzen verlegten Kabellängen, bei denen 1 bzw. 2 Fehler aufgetreten sind. Aus diesen Daten lassen sich keine Aussagen bezüglich des Alterungsverhaltens der Kabel treffen, da nicht in einzelne Kabeltypen unterschieden wird. Sie veranschaulichen sehr gut die Wichtigkeit der genauen Unterscheidung von Fehlern, da ausschließlich Kabelfehler Informationen über die Qualität und den Zustand von Kabeln liefern können. Für die Auswertung der Häufigkeit von Fehlern durch externe Einflüsse sind diese Daten ausreichend, da diese Fehler keinen Bezug zum verlegten Kabeltyp haben, eine Unterscheidung in einzelne Gebiete ist in diesem Fall sinnvoller.

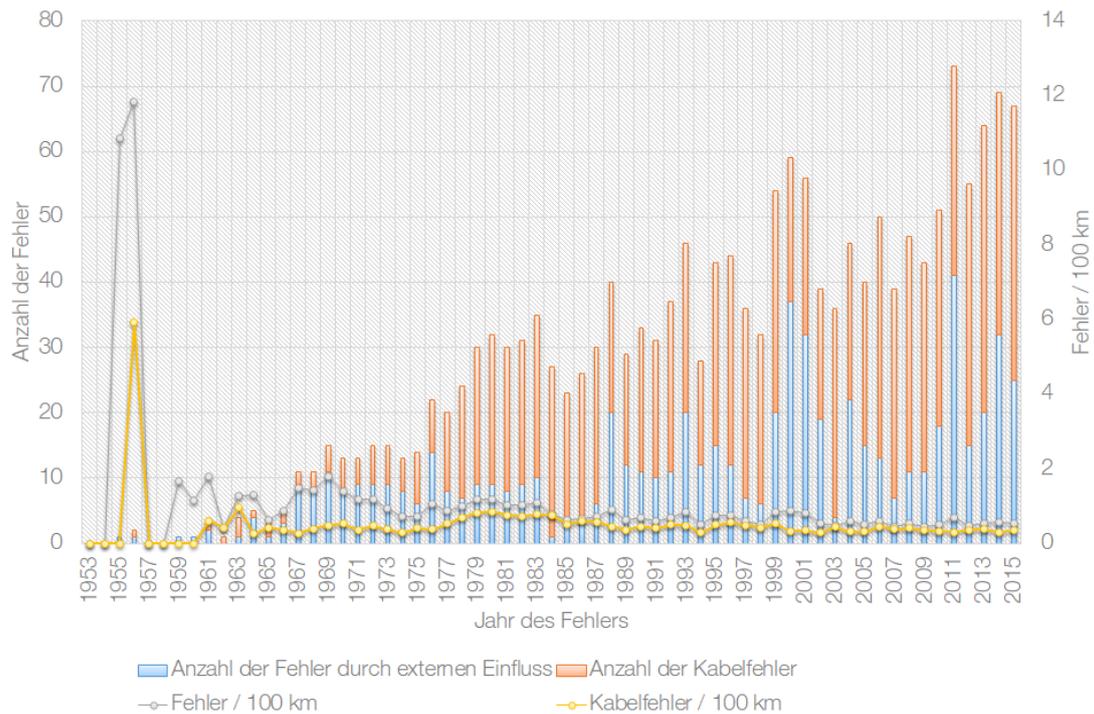


Bild 8-6: Ausfallraten und zugehörige Anzahl der Fehler

Damit Statistiken für die Zustandsbewertung verwendet werden können, müssen einzelne Kabeltypen betrachtet werden. Dabei ist es wichtig, dass alle benötigten Daten in entsprechender Qualität vorliegen. Alle weiteren Veranschaulichungen bezüglich der Anzahl der aufgetretenen Kabelfehler werden an den Kabeltypen APHMEBU, A2YHC2Y und XA2XHC2Y durchgeführt. In Bild 8-7 sind die verlegten kumulierten Längen sowie die Anzahl der dazugehörigen aufgetretenen Kabelfehler dargestellt.

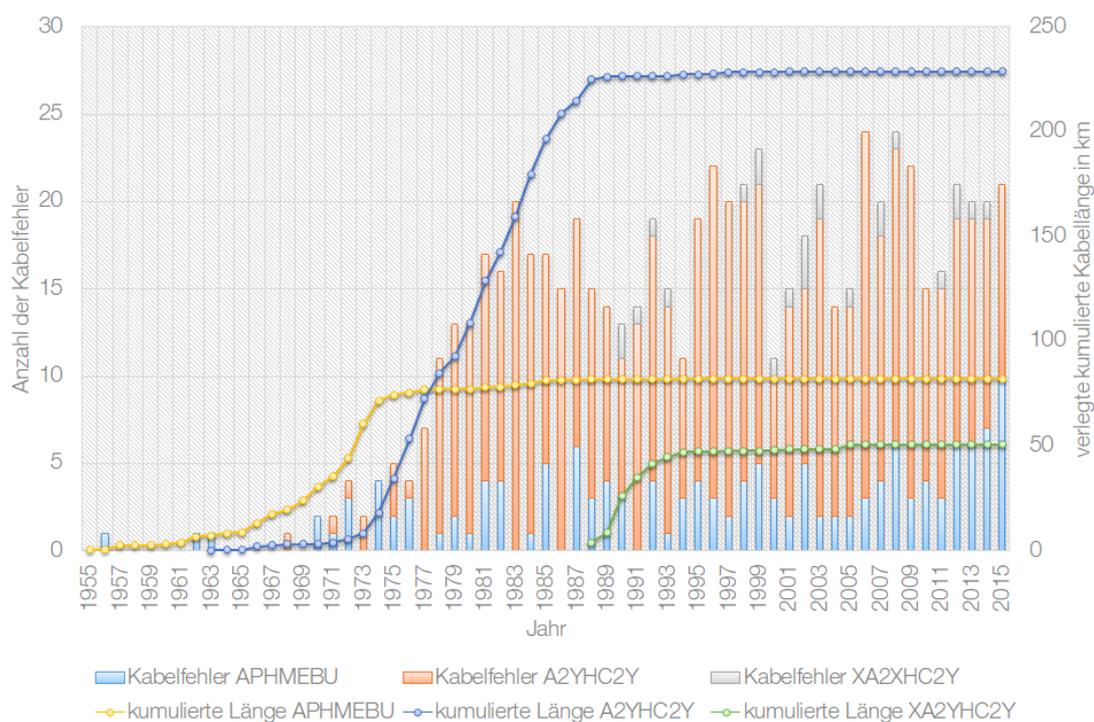


Bild 8-7: Anzahl der Kabelfehler und verlegte kumulierte Kabellängen für ausgewählte Kabeltypen

Bei der getrennten Betrachtung der Ausfallraten unterschiedlicher Kabeltypen werden die aufgetretenen Kabelfehler auf die jeweiligen verlegten kumulierten Kabellängen bezogen. Die Verläufe der Ausfallraten sind in Bild 8-8 zu sehen. Bei Vergleichen von Ausfallraten müssen die verlegten kumulierten Kabellängen mitberücksichtigt werden, da wenige Fehler bei einer geringen kumulierten Kabellänge hohe Ausfallraten zur Folge haben. Damit eine sinnvolle Auswertung der Ausfallraten durchgeführt werden kann, sollte die verlegte kumulierte Kabellänge einem statistisch sinnvollen Mindestmaß entsprechen.

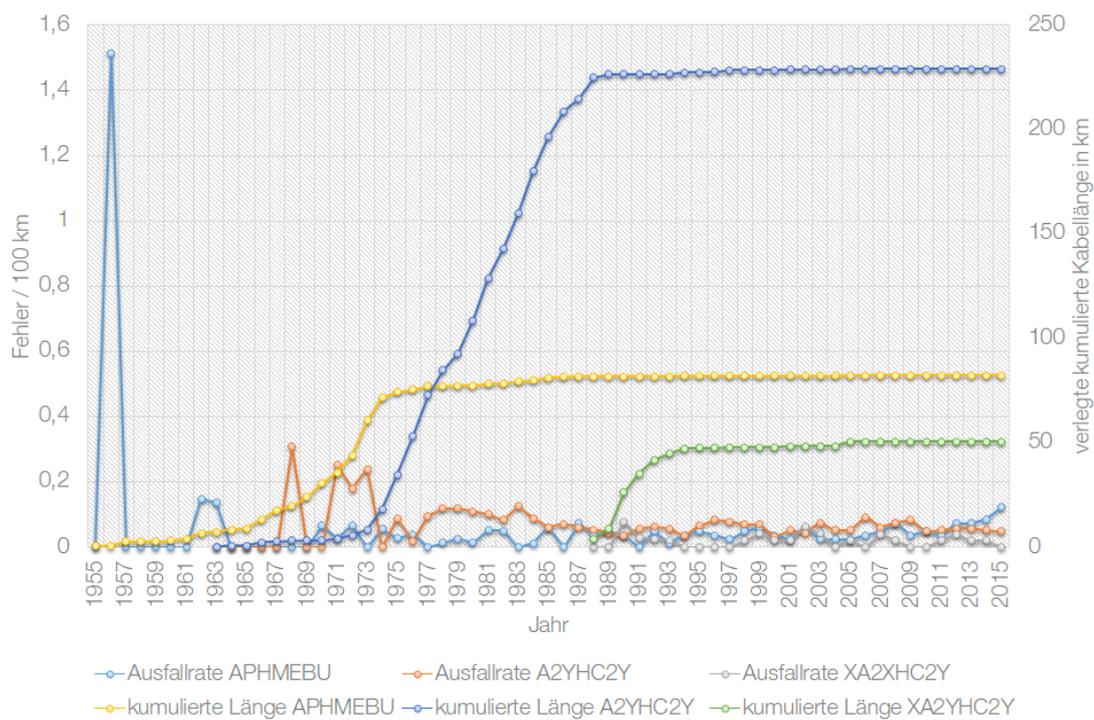


Bild 8-8: Ausfallraten und verlegte kumulierte Kabellängen für ausgewählte Kabeltypen

Zur Erkennung von Trends oder Tendenzen müssen Kabel in Kabeltypen getrennt und in die einzelnen Einbaujahre unterteilt betrachtet werden. Dies wurde für den Kabeltyp A2YHC2Y durchgeführt. In Bild 8-9 ist eine Darstellung der spezifischen Kabelfehler, bezogen auf die jeweilige verlegte Kabellänge, für unterschiedliche Einbaujahre zu sehen. Beim Vergleich der einzelnen Einbaujahre ist zu erkennen, dass die Jahrgänge 1973 bis 1977 eine höhere Ausfallrate aufweisen als die Jahre 1978 bis 1988. Die Darstellung der einzelnen Ausfallraten lässt noch keine konkreten Aussagen bezüglich des Verhaltens der einzelnen Einbaujahre zu. Für den Vergleich der Tendenzen der Einbaujahre sind die kumulierten Ausfallraten zu betrachten.

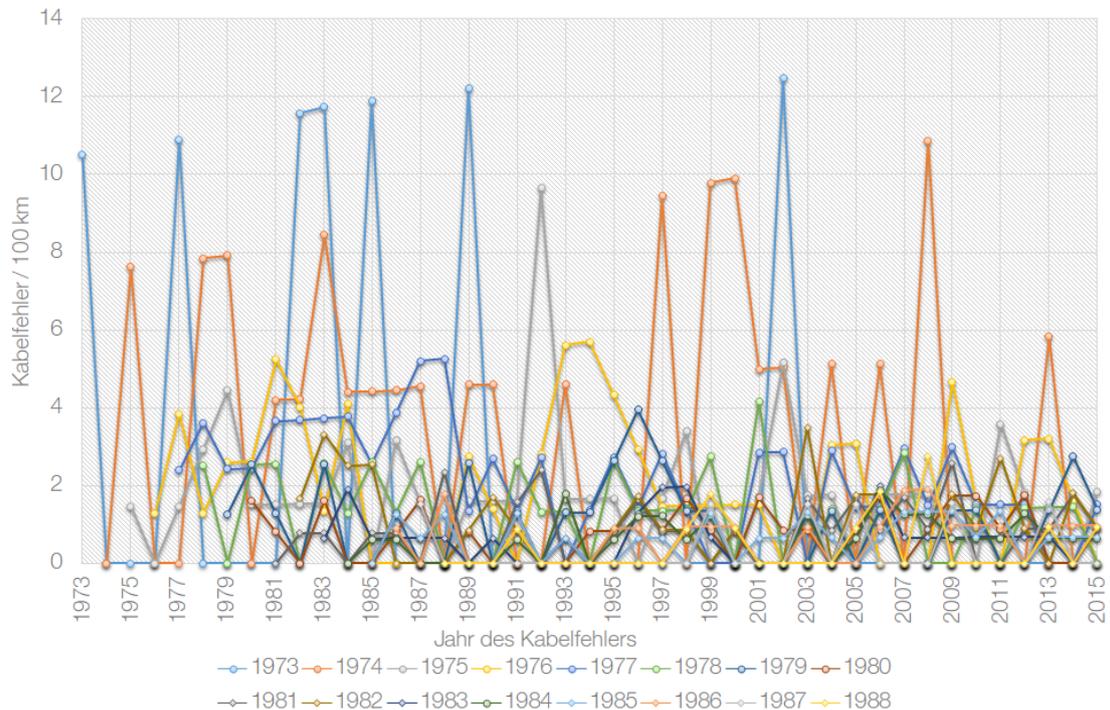


Bild 8-9: Kabelfehler je Jahr und 100 km des Typs A2YHC2Y für unterschiedliche Einbaujahre

Die in Bild 8-10 dargestellten spezifischen kumulierten Ausfallraten zeigen, dass Kabel der Einbaujahre 1973 bis 1977 wesentlich höhere kumulierte Ausfallraten und höhere Steigungen der kumulierten Ausfallraten aufweisen als Kabel der restlichen Einbaujahre. Die Entwicklung der Ausfallraten sowie der kumulierten Ausfallraten zeigen, dass die Qualität der verlegten Kabel über die Jahre gestiegen ist. Diese Qualitätssteigerung könnte auf Verbesserungen in der Herstellung von Kabeln zurückzuführen sein.

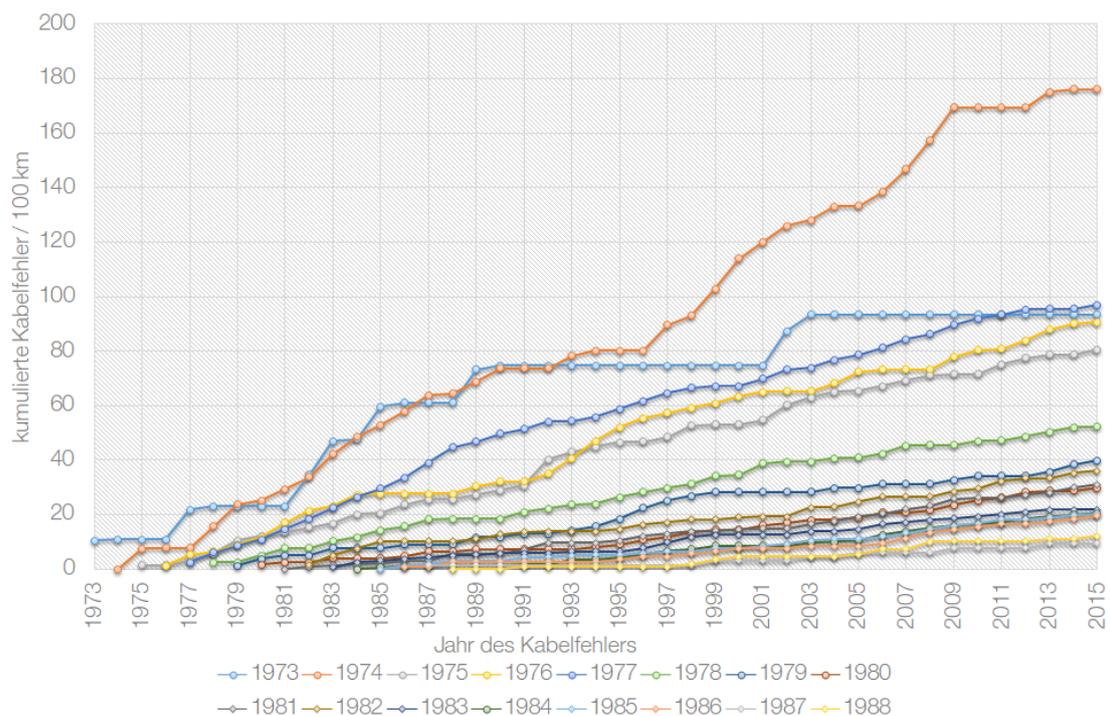


Bild 8-10: Kumulierte Ausfallraten des Kabeltyps A2YHC2Y für unterschiedliche Einbaujahre

Aufgrund der geringen Häufigkeit von Kabelfehlern ist es nicht möglich die Lebensdauer einzelner Kabel genau vorherzusagen. Dies ist auch nicht die Aufgabe der Zustandsbewertung, sondern das Aufzeigen von Schwachstellen im Kabelsystem. Für die Instandhaltung und Netzplanung sind Informationen bezüglich des operativen Zustandes von großer Bedeutung, da so die Planung der Zeitpunkte wiederkehrender Prüfungen oder des Austausches von bestimmten Kabeltypen und Einbaujahren erleichtert wird.

9 Trends in der Bewertung von Mittelspannungskabelanlagen

Durch die stetigen Verbesserungen im Bereich der Kabeldiagnosesysteme haben sich die Möglichkeiten der Zustandsbewertung von Mittelspannungskabelanlagen weiterentwickelt. Durch ein geeignetes Qualitätsmanagement und die richtige Wahl der Instandhaltungsstrategie können der Einsatz von Diagnosemessungen optimiert und Kosten eingespart werden.

9.1 Qualitätsmanagement

Qualitätsmanagement-Systeme dienen der Sicherstellung bestimmter Qualitätsstandards von Dienstleistungen und Produkten. Der Vergleich oder das Messen von Qualität ist nicht ohne weiteres möglich, deshalb werden einheitliche Standards in Form von Richtlinien, Gesetzen oder Normen benötigt. Diese einheitlichen Standards ermöglichen den Vergleich und das Messen von Qualität.

Der Prozess des Qualitätsmanagements ist ein in sich geschlossener Kreislauf, bei dem großer Wert auf kontinuierliche Qualitätsverbesserung gelegt wird. Die aus dem Prozess gewonnenen Erfahrungen fließen zurück in die Planung. Dieser Kreislauf (Demingkreis) wird auch als Regelkreis des Qualitätsmanagements bezeichnet und ist in Bild 9-1 dargestellt. [27]

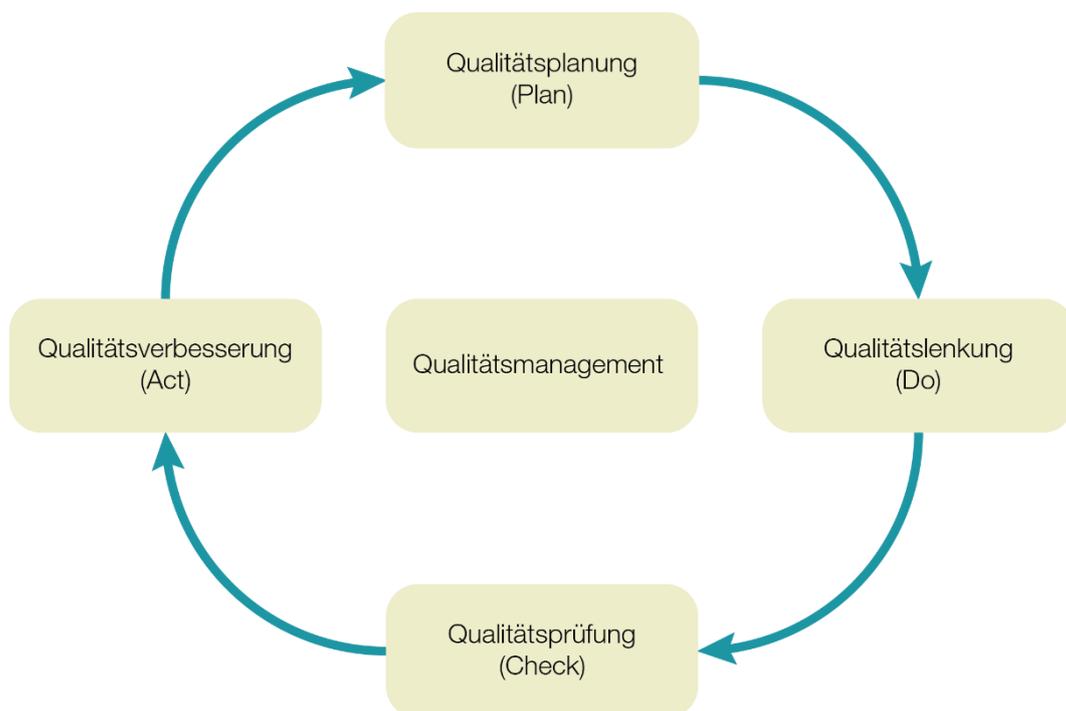


Bild 9-1: Regelkreis des Qualitätsmanagements

Qualitätsplanung:

Bei der Qualitätsplanung wird der Ist-Zustand ermittelt und die Rahmenbedingungen für das Qualitätsmanagement festgelegt. Im Anschluss erfolgt die Erarbeitung von Abläufen und Konzepten. [27]

Qualitätslenkung:

In der Qualitätslenkungsphase erfolgt die Umsetzung von, in der Qualitätsplanung festgelegten, Qualitätsanforderungen. Die Qualitätslenkung umfasst dabei überwachende, vorbeugende und korrigierende Tätigkeiten bei der Realisierung. [27]

Qualitätsprüfung:

Bei der Qualitätsprüfung erfolgt die Sicherstellung der geforderten Qualitätsanforderungen durch unterschiedliche Maßnahmen und Ansätze. Dabei können nicht nur absolute Kriterien wie Grenzwerte, sondern auch subjektive Kriterien wie das Aussehen überprüft werden. [27]

Qualitätsverbesserung:

In der Phase der Qualitätsverbesserung erfolgt die Analyse der, in den vorhergegangenen Prozessen gewonnenen, Erkenntnisse. Aus den gewonnenen Ergebnissen können Maßnahmen zur Verbesserung von Strukturen und zur Optimierung von Prozessen eingeleitet werden. [27]

9.2 Qualitätsmanagementsysteme in der Elektrizitätswirtschaft

Im Bereich der österreichischen Elektrizitätswirtschaft haben sich zwei Qualitätsmanagementsysteme etabliert, die Zertifizierung nach ISO 9001 und die Zertifizierung durch ein technisches Sicherheitsmanagement (TSM).

Beide Managementsysteme umfassen die Bereiche: Organisation, Qualifikation, Umweltschutz, Arbeitssicherheit, Ablauforganisation und Korrekturmaßnahmen. Sie unterscheiden sich in Aufwand und Umfang bei der Einführung und Aktualisierung.

Die TSM-Zertifizierung wird durch Österreichs Energie durchgeführt, die zu erfüllenden Anforderungen für einen positiven Zertifizierungsbescheid sowie Leitfäden für die Vorbereitung für ein Audit sind in der TSM-Prüfrichtlinie P100 festgehalten. Im Gegensatz zur ISO 9001 ist die TSM-Zertifizierung stark praxisorientiert.

Die ISO 9001 stellt ein standardisiertes Grundgerüst zur Erstellung eines branchenunabhängigen Qualitätsmanagementsystems dar. Die Anforderungen müssen selbst festgelegt, dokumentiert, umgesetzt und kontinuierlich verbessert werden. Wie bei der TSM-Zertifizierung erfolgt die Überprüfung des Qualitätsmanagementsystems durch ein Audit.

9.3 Instandhaltungsstrategien

Grundsätzlich können unterschiedliche Instandhaltungsstrategien angewendet werden, die Wahl der Strategie ist dabei vom Betriebsmitteltyp, dessen Eigenschaften und von den Konsequenzen im Fehlerfall abhängig.

9.3.1 Ereignisorientierte Instandhaltung

Bei der ereignisorientierten Instandhaltung (IBM, Incident Based Maintenance) wird ein Betriebsmittel bis ans Ende seiner Lebensdauer betrieben. Reparaturen an oder der Austausch von Betriebsmitteln erfolgen erst nach Eintritt eines Fehlers und dem damit verbundenen Ausfall des Betriebsmittels. Diese Strategie führt zu den geringsten Instandhaltungskosten, wenn die

Betriebsmittelkosten sowie die Folgekosten einer Störung gering sind und die Fehlerrate des Betriebsmittels konstant niedrig ist. Damit die Folgen eines Fehlerfalles vernachlässigt werden können, muss Ersatz für die jeweiligen Betriebsmittel vorhanden sein. Die ereignisorientierte Instandhaltung wird vor allem im Niederspannungsnetz eingesetzt, da hier der Aufwand für die Zustandsbestimmung nicht wirtschaftlich ist. [27], [28]

9.3.2 Zeitorientierte Instandhaltung

Die zeitorientierte Instandhaltung (TBM, Time Based Maintenance) zeichnet sich dadurch aus, dass Wartungen und Inspektionen nach festgelegten Zeitintervallen durchgeführt werden. Der Austausch des Betriebsmittels erfolgt nach einer vorgegebenen Zeit, unabhängig vom aktuellen Betriebsmittelzustand. Für die Planung der optimalen Wartungs- und Inspektionsintervalle wird die erwartete mittlere Zeit zwischen zwei Fehlern, die aus Ausfallstatistiken oder Erfahrungswerten gewonnen werden kann, benötigt. Die Kosten bei dieser Instandhaltungsstrategie können im Vorhinein gut abgeschätzt werden, jedoch ist diese Methode wirtschaftlich gesehen nicht optimal, da der Austausch eines Betriebsmittels vor dem Ende seiner Lebensdauer erfolgt. [27], [28]

9.3.3 Zustandsorientierte Instandhaltung

Bei der zustandsorientierten Instandhaltung (CBM, Condition Based Maintenance) wird der technische Zustand der Betriebsmittel mit Hilfe von Monitoring oder Diagnoseverfahren bestimmt. Der Austausch oder die Wartung von Betriebsmitteln erfolgt in Abhängigkeit des vorher bestimmten Zustandes. Diese Methode setzt voraus, dass ein Zusammenhang zwischen dem technischen Zustand und den für die Zustandsbewertung beobachteten Kenngrößen besteht. Für die Zustandsbewertung wird der Ist-Zustand mit einem früheren Zustand verglichen und ausgewertet. [28] [27]

Bei dieser Instandhaltungsstrategie fallen vor dem Eintreten eines Fehlers Kosten für die Zustandsbewertung an, diese Kosten sind jedoch den durch die Instandhaltungsmaßnahmen vermiedenen Fehlerkosten gegenüberzustellen. Bei dieser Strategie wird die Lebensdauer eines Betriebsmittels besser ausgenutzt als bei der zeitorientierten Instandhaltung. [27], [28]

9.3.4 Zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung

Die zuverlässigkeitsorientierte Instandhaltung (RCM, Reliability Centered Maintenance) betrachtet die Zuverlässigkeit und den Zustand eines Betriebsmittels. Die Zuverlässigkeit kann im Zuge einer statistischen Zustandsbewertung bestimmt werden. Bei dieser Instandhaltungsstrategie können alle vorher genannten Strategien IBM, TBM und CBM zum Einsatz kommen. Durch eine Zuverlässigkeitsanalyse werden Instandhaltungsstrategie und Umfang der durchzuführenden Maßnahmen für die einzelnen Betriebsmittel bestimmt. [27], [28]

9.3.5 Risikoorientierte Instandhaltung

Bei der risikoorientierten Instandhaltung (RBM, Risk Based Maintenance) handelt es sich um eine Erweiterung der zuverlässigkeitsorientierten Instandhaltung, dabei wird ein mögliches Risiko im Falle eines Betriebsmittelfehlers mitberücksichtigt. Das Risiko ist in diesem Fall definiert als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und des daraus resultierenden Schadensausmaßes.

Zusätzlich zur Zuverlässigkeitsanalyse muss eine Risikoanalyse durchgeführt werden, in dieser werden Zustand und Wichtigkeit der einzelnen Betriebsmittel ausgewertet. [27], [28]

9.4 Beurteilungskriterien

Die Verlustfaktormessung ist eine Möglichkeit zur Bestimmung des Gesamtzustandes eines Kabelsystems. Für die Beurteilung der Diagnoseergebnisse wird eine Referenzmessung benötigt, mit dieser werden alle weiteren Messergebnisse verglichen. Die Beurteilung kann dabei über den Verlustfaktor und/oder über die Änderung des Verlustfaktors in Abhängigkeit der Prüfspannung erfolgen. Durch den Vergleich mit der Referenzmessung können betriebsbedingte Änderungen des Verlustfaktors erkannt werden. Auch der Vergleich der einzelnen Phasen kann Aufschlüsse über den Zustand geben, dabei müssen zusätzlich die Betriebsdaten mitberücksichtigt werden.

In der IEEE 400.2-2013 [29] Richtlinie sind Auswertekriterien für betriebsgealterte Kabel bei VLF-Spannungen definiert. Hersteller von Kabeldiagnosesystemen (z.B. Baur oder Megger) verwenden diese Kriterien für eine automatische Zustandsbewertung von Kabelstrecken. In den Tabellen Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 sind die Auswertekriterien nach IEEE 400.2-2013 für VPE- und Papier-Masse-Kabel aufgelistet.

Tabelle 9-1: Auswertekriterien der Verlustfaktormessung für PE- und VPE-Kabel [29]

Zustandsbewertung	VLF-tan δ Zeitstabilität gemessen mit Standardabweichung bei U_0		VLF- Δ tan δ Anstieg Differenz der Mittelwerte VLF-tan δ zwischen $0,5 \cdot U_0$ und $1,5 \cdot U_0$		Mittelwert VLF-tan δ bei U_0
	$\cdot 10^{-3}$		$\cdot 10^{-3}$		$\cdot 10^{-3}$
betriebsbereit	< 0,1	und	< 5	und	< 4
betriebsgealtert	0,1 bis 0,5	oder	5 bis 80	oder	4 bis 50
nicht betriebsbereit	> 0,5	oder	> 80	oder	> 50

Tabelle 9-2: Auswertekriterien der Verlustfaktormessung für Papier-Masse-Kabel [29]

Zustandsbewertung	VLF-tan δ Zeitstabilität gemessen mit Standardabweichung bei U_0		VLF- Δ tan δ Anstieg (Differenz der Mittelwerte VLF-tan δ zwischen $0,5 \cdot U_0$ und $1,5 \cdot U_0$)		Mittelwert VLF-tan δ bei U_0
	$\cdot 10^{-3}$		$\cdot 10^{-3}$		$\cdot 10^{-3}$
betriebsbereit	< 0,1	und	-35 bis 10	und	< 85
betriebsgealtert	0,1 bis 0,4 oder 5 bis 80	oder	-35 bis -50 oder 10 bis 100	oder	85 bis 200
nicht betriebsbereit	> 0,4	oder	< -50 oder > 100	oder	> 200

Die Teilentladungsmessung an Mittelspannungskabeln dient nach heutigem Stand der Technik hauptsächlich der Lokalisierung von Fehlerstellen. Diese befinden sich häufig im Bereich von Kabelmuffen und Endverschlüssen, wobei die Lokalisierung von Fehlern am Kabelende schwierig ist. Für die Bewertung der Teilentladungsdiagnose sind folgende Kenngrößen zu betrachten: Grundstörpegel, Höhe der Teilentladungen, Phasenlage sowie Ein- und Aussetzspannung.

Die Bewertungskriterien lassen sich, abhängig von der Einsetzspannung der Teilentladungsimpulse, in drei Kriterien unterteilen:

- Einsetzspannung < Nennspannung → Sofortiger Handlungsbedarf (Reparatur oder Austausch des fehlerbehafteten Abschnitts oder Betriebsmittels)
- Einsetzspannung = Nennspannung → Abhängig vom Teilentladungspegel:
Prüfintervall verkürzen oder Reparatur/Tausch
- Einsetzspannung > Nennspannung → Maßnahmen abhängig von Aussetzspannung:
Gilt Aussetzspannung > Nennspannung,
Prüfintervall verkürzen. Für die restlichen Fälle gelten die Kriterien der Einsetzspannung.

10 Zusammenfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Qualitätssicherung von Mittelspannungskabelanlagen.

Nach einem kurzen Überblick über den Aufbau von aktuell verwendeten Mittelspannungskabeln und deren Garnituren werden die an Mittelspannungskabeln durchzuführenden elektrischen Normprüfungen gemäß der DIN VDE 0276-620 [5] zusammengefasst.

Das Verständnis von Normprüfungen ist für Präqualifikationsprüfungen von großer Bedeutung, diese werden meist in Anlehnung an die entsprechenden Normen mit abweichenden Prüfparametern durchgeführt. Präqualifikationsprüfungen haben die Aufgabe, Kunden bei der Auswahl von Betriebsmitteln zu unterstützen. Außerdem dienen sie als zusätzliche Qualitätskontrolle beim Kauf von Kabeln.

Mit den, in dieser Arbeit beschriebenen, Prüf- und Diagnosemethoden kann der Zustand von Kabelstrecken bestimmt werden, vorausgesetzt es wird ein passendes Prüf- und Diagnoseprogramm angewendet und eingehalten.

Die Restfestigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen im Labor haben veranschaulicht, dass auch bei optimalen Diagnosebedingungen eine Eingangsmessung unerlässlich ist. Nur mit den Ergebnissen der Verlustfaktormessung, ohne Bezug zu einer Referenzmessung, ist es nicht möglich den Zustand eines Kabels zu bestimmen. Die Ergebnisse der Stufenwechselspannungsprüfung, der im Labor gealterten Proben, haben sehr gut veranschaulicht, dass bei aktuellen Kabelsystemen nicht die Kabelisolierung, sondern die Kabelgarnituren sowie die für die Garniturenmontage durchgeführten Eingriffe in die Kabelisolierung die lebensdauerbegrenzenden Schwachstellen des Systems darstellen.

Beim Erstellen des Excel-Modells für die Darstellungsmöglichkeiten in der statistischen Zustandsbewertung hat sich gezeigt, wie wichtig der Detailgrad der erfassten Daten ist. Abhängig vom Detailgrad der Daten können unterschiedliche statistische Untersuchungen durchgeführt und dargestellt werden. Außerdem hat sich gezeigt, dass eine Datenbank für die statistische Zustandsbewertung aufgrund der Vielzahl an Daten unerlässlich ist.

Durch die heutigen Diagnose- und Datenauswertemöglichkeiten hat sich auch die Art der Instandhaltung stark verändert. Dabei geht der Trend bei Mittelspannungskabelanlagen in Richtung zuverlässigkeitsorientierter oder risikoorientierter Instandhaltung.

11 Literaturverzeichnis

- [1] R. R. Cichowski, M. Kliesch und F. Merschel, „Kabelhandbuch“, EW Medien und Kongresse GmbH, 8. Auflage, 2012.
- [2] D. Oeding und B. R. Oswald, „Elektrische Kraftwerke und Netze“, Springer-Verlag, 7. Auflage, 2011.
- [3] L. Heinhold und R. Stubbe, „Kabel und Leitungen für Starkstrom“, Publicis MCD Verlag, 5. wesentlich überarbeitete und erweiterte Auflage, 1999.
- [4] DIN VDE 0276-1000, „Starkstromkabel - Teil 1000: Strombelastbarkeit, Allgemeines, Umrechnungsfaktoren“, DIN VDE 0276-1000:1995-06, 1995.
- [5] DIN VDE 0276-620, „Starkstromkabel - Energieverteilungskabel mit extrudierter Isolierung für Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis einschließlich 20,8/36 (42) kV“, DIN VDE 0276-620:2017-02, 2010.
- [6] DIN VDE 0276-621, „Starkstromkabel - Teil 621: Energieverteilungskabel mit getränkter Papierisolierung für Mittelspannung“, DIN VDE 0276-621:1997-05, 1997.
- [7] DIN VDE 0276-622, „Starkstromkabel - Teil 622: Starkstromkabel mit Nennspannungen von 3,6/6 (7,2) kV bis 20,8/36 (42) kV mit verbessertem Verhalten im Brandfall für Kraftwerke“, DIN VDE 0276-622:2006-05, 2006.
- [8] DIN VDE 0276-605, „Starkstromkabel - Ergänzende Prüfverfahren“, DIN VDE 0276-605:2009-07, 2009.
- [9] DIN EN 60885-2, „Elektrische Prüfverfahren für Starkstromkabel - Teil 2: Teilentladungsprüfungen“, DIN EN 60885-2:2004-11, 2004.
- [10] DIN EN 60885-3, „Elektrische Prüfverfahren für Starkstromkabel - Teil 3: Prüfverfahren zur Teilentladungsmessung an Längen von extrudierten Kabeln“, DIN EN 60885-3:2015-11, 2015.
- [11] DIN VDE 0278-629-1, „Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 1: Kabel mit extrudierter Kunststoffisolierung“, DIN VDE 0278-629-1:2009-07, 2009.
- [12] DIN VDE 0278-629-2, „Prüfanforderungen für Kabelgarnituren für Starkstromkabel mit einer Nennspannung von 3,6/6(7,2) kV bis 20,8/36(42) kV - Teil 2: Kabel mit massegetränkter Papierisolierung“, DIN VDE 0278-629-2:2009-07, 2009.
- [13] DIN EN 61442, „Prüfverfahren für Starkstromkabelgarnituren mit einer Nennspannung von 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) bis 36 kV ($U_m = 42$ kV)“, DIN EN 61442:2006-01, 2006.

- [14] DIN EN 60228, „Leiter für Kabel und isolierte Leitungen“, DIN EN 60228:2005-09, 2005.
- [15] IEC 60502-2, „Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)“, IEC 60502-2:2014, 2014.
- [16] DIN EN 60230, „Stoßspannungsprüfungen an Kabeln und Leitungen und deren Garnituren“, DIN EN 60230:2003-03, 2003.
- [17] DIN EN 60060-1, „Hochspannungs-Prüftechnik - Teil 1: Allgemeine Begriffe und Prüfbedingungen“, DIN EN 60060-1:2011-10, 2011.
- [18] R. Woschitz, „Richtlinie zur Qualitätsuntersuchung Prüfung der Stoßspannungsfestigkeit an VPE-isolierten Energiekabeln“, Graz, 2004.
- [19] K. Schon, „Hochspannungsmesstechnik Grundlagen – Messgeräte – Messverfahren“, Springer Vieweg, 2016.
- [20] F. Schreiter und U. Jilek, „Spannungs-, Zeit- und Frequenzabhängigkeit von Teilentladungen und Verlustfaktor bei diagnostischen Messungen an kunststoffisolierten Mittelspannungskabeln“, ETG-Fachtagung, Köln, 2004.
- [21] B. Körbler, „Zustandsbewertung von Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik“, Dissertation, TU Graz, Graz, 2004.
- [22] W. Hauschild und W. Mosch, „Statistik für Elektrotechniker: Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik“, VEB Verlag Technik, 1984.
- [23] J. Z. Hansen, „Results from Danish failure statistics for medium voltage XLPE cables“, CIREN, Stockholm, 2013.
- [24] Group of Experts on Synthetically Insulated Cables, „International cable fault statistics on synthetically insulated MV-cables“, CIREN, Brighton, 1989.
- [25] H. Ying, „Study and Analysis of Distribution Equipment Reliability Data“, Stockholm, 2010.
- [26] H. Orton, N. Hampton, R. Hartlein, H. Lennartsson und R. Ramachandran, „Long-life XLPE-insulated Power Cable“, Jicable, Versailles, 2007.
- [27] C. Sumereder, „Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik“, Habilitationsarbeit, TU Graz, Graz, 2010.
- [28] G. Balzer und C. Schorn, „Asset Management für Infrastrukturanlagen – Energie und Wasser“, Springer Vieweg, 2. Auflage, 2014.
- [29] IEEE Std 400.2-2013, „IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz)“, 2013.

- [30] MEINHART Kabel Österreich GmbH, „Kabel und Leitungen: Preisliste und technischer Katalog“, 22. Ausgabe, 2014.
- [31] nkt cables GmbH & Co. KG, „Mittelspannungskabel“, 2014.
- [32] Schwechater Kabelwerke GmbH, „Produkt-Katalog-Export“, 2012.
- [33] Österreichische Kabelwerke GmbH, „Lieferprogramm und technische Informationen“, 1995.

12 Anhang

Tabelle 12-1: Kurzzeichenschlüssel für Energiekabel Teil 1 [3], [30], [31], [32], [33]

Aufbauelemente	Kabel mit Papierisolierung		Kabel mit Kunststoffisolierung	
	VDE	ÖVE	VDE	ÖVE
Typ				
• Normtyp	N	-	N	-
• Energiekabel	-	E-	-	E-
• Sonderausführung	-	X	-	X
Leiter				
• Kupfer	kein Zeichen	kein Zeichen	kein Zeichen	kein Zeichen
• Aluminium	A	A	A	A
• Leiteroberfläche verzinkt	-	-	-	V
• Leiterbedeckung (Bebänderung)	-	-	-	F
Isolierung				
• Papier mit Massetränkung	kein Zeichen	P	-	-
▪ bei Gasaußendruckkabeln	P	-	-	-
▪ bei Gasinnendruckkabeln	I	-	-	-
• Papier mit Öltränkung	Ö	-	-	-
• bei Hochdruckkabeln im Stahlrohr	ÖI	-	-	-
• PVC	-	-	Y	Y
• PE	-	-	2Y	2Y
• VPE	-	-	2X	2X
• Vernetztes, halogenfreies Polymer	-	-	HX	NG, 3G
• Unvernetztes, halogenfreies Polymer	-	-	-	NY
Feldbegrenzende leitfähige Schichten				
• Einzeladerschirmung mit metallisiertem Papier (Höchstädter-Folie)	H	H	-	-
• Feldbegrenzende leitfähige Schichten über dem Leiter und über der Isolierung	-	-	kein Zeichen	H
Konzentrischer Leiter aus Kupfer				
• im Längsschlag	-	-	C	C
• wellenförmig	-	-	CW	C
Schirm aus Kupfer				
• bei einadrigen Kabeln oder bei mehradrigen Kabeln mit gemeinsamem Schirm	-	-	S	C
• bei mehradrigen Kabeln mit Einzeladerschirmen	-	-	SE	CE
• Längswasserdichter Schirm	-	-	S(F)	CJ
Metallmantel aus Blei				
• bei einadrigen Kabeln oder bei mehradrigen Kabeln mit gemeinsamem Mantel	K	M	K	M
• bei einadrigen Kabeln oder bei mehradrigen Kabeln mit gemeinsamem Mantel mit Erhärtungszusatz	-	2M	-	2M
• bei Dreibleimantelkabeln mit Korrosionsschutz auf jedem Mantel	EK	ME	-	-

Tabelle 12-2: Kurzzeichenschlüssel für Energiekabel Teil 2 [3], [30], [31], [32], [33]

Aufbauelemente	Kabel mit Papierisolierung		Kabel mit Kunststoffisolierung	
	VDE	ÖVE	VDE	ÖVE
Metallmantel aus Aluminium				
• glatt	KL	L	-	-
• gewellt	KLD	LW	-	-
Innere Schutzhülle				
• PVC	Y	-	Y	Y
• PE	-	-	2Y	2Y
• gewickelte Schutzhülle mit eingebetteter Schicht aus Kunststofffolien	E	-	-	-
Bewehrung				
• Stahlband	B	B	B	B
• Stahlflachdraht	F	F	F	F
• Stahlrunddraht	R	R	R	R
• Stahlbandgegen- oder Haltewendel	G	G	G	G
• Aldrey-Runddrähte	R(AY)	R(AY)	R(AY)	R(AY)
• Gleitdrähte (unmagnetisch)	GL	-	-	-
• Stahlrohr	St	-	-	-
Unmagnetische Druckschutzbandage	UD	DN	-	-
Äußere Schutzhülle				
• Faserstoffe in Masse	A	U	-	-
• PVC	Y	-	Y	Y
• PVC verstärkt	-	-	YV	Y3V
• PE	-	-	2Y	2Y
• PE verstärkt	-	-	2YV	2Y3V
• Aluminiumband mit PE-Mantel verklebt (Al-/PE-Schichtenmantel)	-	-	(FL)2Y	JA2Y
• vernetztes, halogenfreies Polymer	-	-	HX	NG
• unernetztes, halogenfreies Polymer	-	-	H	NY
Kabel mit $U_0/U = 0.6/1$ kV ohne konzentrischen Leiter				
• mit grün-gelber Ader	-J	-J	-J	-J
• ohne grün-gelbe Ader	-O	-O	-O	-O

Beim Bauartkurzzeichen wird laut VDE-Bestimmungen folgendes nicht angegeben:

- Kupferleiter
- Isolierung aus getränktem Papier
- Innere und äußere Leitschicht bei Kabeln mit Kunststoffisolierung
- Gemeinsame Aderumhüllung
- Zwickelausführung
- Innere Schutzhülle aus Faserstoffen

Tabelle 12-3: Eigenschaften von Energiekabeln

		Papier (getränkt)	PVC	PE	VPE	EPR
elektrische Eigenschaften	Dielektrizitätszahl	3,3 ... 4,2	5 ... 8	2,3	2,3 ... 2,5	3 ... 3,5
	Verlustfaktor bei 50 Hz	< 10	< 100	< 1	< 1	< 5
	spezifischer Durchgangswiderstand	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{13}$	$\sim 10^{17}$	$\sim 10^{16}$	$\sim 10^{14}$
	ρ	$\Omega \cdot \text{cm}$				
thermische Eigenschaften	zulässige Leitertemperatur	65-80	70	70	90	90
	Dauerbetrieb					
	Kurzschluss	135-180	140-160	150	250	250
	Versprödungstemperatur	-	-10	-60	-60	-50
	v	$^{\circ}\text{C}$				
mechanische Eigenschaften	Spez. Wärmewiderstand	6	6	3,5	3,5	5 ... 6
	Wärmekapazität	-	1,7	2,4	2,4	2
	Dichte	1	1,2 ... 1,5	0,91 ... 0,97	0,91 ... 0,98	1,2 ... 1,3
	Zugfestigkeit (Mindestwert)	-	10 ... 15	10	12,5	7 ... 10
	Reißdehnung (Mindestwert)	-	125 ... 175	300	200	50 ... 300
	Flexibilität	gering	mäßig	mäßig	mäßig	sehr gut

Tabelle 12-4: Stück- und Auswahlprüfungen gemäß DIN VDE 0276-620 [5]

Nr.	Prüfung	Prüfverfahren
1	Stückprüfungen an Mittelspannungskabeln	
1.1	Messung des elektrischen Leiterwiderstandes	EN 60228; HD 605, 3.1.1
1.2	Spannungsprüfung	HD 605, 3.2.1
1.3	Teilentladungsprüfung	EN 60885-3
2	Auswahlprüfungen an Mittelspannungskabeln	
2.1	Prüfung des Leiters	EN 60811-1-1, 8.3 und Sichtprüfung
2.2	Isolierung	
2.2.1	Wanddicke	HD 605, 2.1.11.1; EN 60811-1-1, 8.1
2.2.2	Differenz zwischen größtem und kleinstem Wert der Wanddicke	HD 605, 2.1.11.1
2.2.3	Unregelmäßigkeiten	HD 605, 2.1.10.2
2.3	Aderschirmung	
2.3.1	innere Leitschicht	HD 605, 2.1.11.1; EN 60811-1-1, 8.2; HD 605, 2.1.10.2
2.3.2	äußere Leitschicht	HD 605, 2.1.11.1; EN 60811-1-1, 8.2
2.4	Durchmesser über der Isolierung (nur bei Kabeln mit mehrdrähtigen Rundleitern)	HD605, 2.1.11.1
2.5	Gemeinsame Aderumhüllung	
2.6	Metallschirm	
2.6.1	Maße	HD 605, 2.1.4.2
2.6.2	Drahtschirm: Abstand zwischen benachbarten Drähten	HD 620, 2, Nr.6.5
2.6.3	Spezifischer Widerstand des Kupfers	HD 605, Abschnitt (in Vorbereitung)
2.7	Außenmantel Wanddicke	EN 60811-1-1, 8.2
2.8	Außendurchmesser	EN 60811-1-1, 8.3
2.9	Kennzeichnung am Außenmantel	Sichtprüfung
2.10	Wärmedehnung der Isolierung	EN 60811-2-1, Abschnitt 9
2.11	Schrumpfung des Mantels (nur bei PE-Mänteln)	HD 605, 2.4.4.1
2.12	Fertigungsbegleitende Prüfung	HD 605, 5.4.15, ohne 5.4.15.3.4 c)

Tabelle 12-5: Typprüfungen gemäß DIN VDE 0276-620 [5]

Nr.	Prüfung	Prüfverfahren
3	Typprüfungen an Mittelspannungskabeln (elektrische Eigenschaften)	
3.1	Teilentladungsprüfung	EN 60885-3
3.2	Biegeprüfung mit anschließender Teilentladungsprüfung	HD 605, 2.4.1.6; EN 60885-3
3.3	tan δ Messung in Abhängigkeit der Temperatur	IEC 60502-2, 18.1.5
3.4	Lastwechselspannungsprüfung mit anschließender Teilentladungsprüfung	EN 60885-3
3.5	Stoßspannungsprüfung mit anschließender Wechselspannungsprüfung	EN 60230
3.6	Spannungsprüfung	IEC 60502-2, 18.1.8
3.7	Langzeitprüfung (an Kabeladern)	HD 605, 5.4.15, ohne 5.4.15.3.4 c)
4	Typprüfungen an Mittelspannungskabeln (nicht-elektrische Eigenschaften)	
4.1	Prüfung an der Isolierung	
4.1.1	Mechanische Eigenschaften	EN 60811-1-1, 9.1; EN 60811-1-2, 8.1
4.1.2	Wasseraufnahme	EN 60811-1-3, 9.2
4.2	Prüfung an der Ader	
4.2.1	Schrumpfung	EN 60811-1-3, Abschnitt 10
4.2.2	Wärmedehnung der inneren und äußeren Leitschicht	EN 60811-2-1, 9 und EN 60811-1-1, 9.1.3
4.3	Prüfung am Außenmantel	
4.3.1	Mechanische Eigenschaften	EN 60811-1-1, 9.2; EN 60811-1-2, 8.1
4.3.2	Wärme-Druckbeständigkeit	EN 60811-3-1, 8.2
4.3.3	Kälte-Dehnung beim PVC-Mantel	EN 60811-1-4, 8.4
4.3.4	Masseverlust im Wärmeschrank beim PVC-Mantel	EN 60811-3-2, 8.2
4.3.5	Wärme-Schockverhalten des PVC-Mantels	EN 60811-3-1, 9.2
4.3.6	Thermische Stabilität des PVC-Mantels	EN 60811-3-2, Abschnitt 9
4.3.7	Spannungsbeständigkeit des PE-Mantels	EN 60811-4-1, Abschnitt 8
4.3.8	Rußgehalt des PE-Mantels	EN 60811-4-1, Abschnitt 11
4.4	Prüfungen am vollständigen Kabel	
4.4.1	Kälte-Schlagbeständigkeit bei Kabeln mit PVC-Mantel	EN 60811-1-4, 8.5
4.4.2	Alterung am vollständigen Kabel	EN 60811-1-2, 8.1.4
4.4.3	Shore-D-Härte des PE-Mantels	HD 605, 2.2.1
4.4.4	Brennverhalten	EN 60332-1-2
4.4.5	Eindringen von Wasser bei Kabeln mit längswasserdichtem Schirmbereich	HD 605, 2.4.9.3 f), aber 126 Zyklen