



# Kapitel 1

## Einleitung

Die zuverlässige und sichere Versorgung mit elektrischer Energie stellt eines der wichtigsten Kriterien für wirtschaftliches Wachstum und Wohlstand dar. Betrachtet man die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes und des Bruttostromverbrauches in Deutschland, so erkennt man die annähernd proportionale Verknüpfung dieser beiden Größen. Der technologisch hohe Standard, wie er beispielsweise im deutschen Energienetz gehalten wird, erfordert gut durchdachte Investitions- und Instandhaltungsmaßnahmen, um im liberalisierten Strommarkt wettbewerbsfähig zu bleiben.

Gerade im Bereich der Übertragungs- und Verteilnetze sind deshalb Werkzeuge notwendig, die es ermöglichen, Anlagen zu diagnostizieren und zu überwachen. Allein in Deutschland sind Hunderttausende von Kilometern verschiedenster Energiekabel unterschiedlicher Bauart, Spannungsebene und unterschiedlichen Alters verlegt. Ein Großteil der eingesetzten Kabel ist mittlerweile deutlich über 40 Jahre alt, weshalb eine aussagekräftige Zustandsbewertung nicht zuletzt aus wirtschaftlichen Gründen immer dringlicher wird. Energiekabelnetze kommen vor allem im 20 kV Mittelspannungsnetz zum Einsatz, um elektrische Energie in dicht besiedelten Gebieten unterirdisch an Industrie und Haushalte zu verteilen. Je nach geforderter Streckenlänge werden einzelne Kabelsegmente an den Stoßstellen mittels Muffen verbunden. Dabei handelt es sich häufig um Mischkabelsysteme, das heißt es werden unterschiedliche Kabeltypen, wie beispielsweise moderne kunststoffisolierte Kabel, mit papierisolierten Kabeln (Papiermassekabeln) älterer Bauart kombiniert. Da eine Neuverlegung von Energiekabeln eine enorme Kostenfrage ist, werden bestehende Kabelstrecken so lange wie möglich betrieben.

Die Ausreizung der Übertragungskapazität und der Einsatzdauer solcher Kabelnetze kann zu Fehlern im Kabel führen. Die Alterung der Kabelisolierung, bedingt durch thermische Beanspruchung, Oxidation, Eindringen von Wasser oder Abwandern von Imprägniermasse in Papiermassekabeln, ist nur eine mögliche Ursache von Kurzschlüssen in Energiekabeln. Auch Beschädigungen des Kabelmantels durch äußere Einflüsse, Montagefehler, insbesondere bei Muffen, oder andere mechanische

Einwirkungen können nach einer gewissen Zeit zu Ausfällen führen. Solche Phänomene können sich durch das Auftreten von Teilentladungen (TE) bemerkbar machen, die als Wanderwellen entlang des Kabels laufen und an den Kabelenden messbar sind.

In dieser Arbeit soll die Teilentladungsdiagnose zur zerstörungsfreien Lokalisierung von Schwachstellen in Energiekabeln sowie die Analyse und Auswertung der anfallenden umfangreichen Messdaten untersucht und verbessert werden. Für Vor-Ort-Messungen sollen hardware- und softwareseitige Maßnahmen zur Störunterdrückung implementiert und der Automatisierungsgrad sowie die Ortungsgenauigkeit erhöht werden. Auf Basis von Modellen und Simulationen sollen neuartige Verfahren für die automatisierte Teilentladungsdiagnose an realen Energiekabeln erprobt und verifiziert werden.

### 1.1 Einsatz von Energiekabeln im Energieversorgungsnetz

Die Versorgung mit elektrischer Energie in Deutschland wird im städtischen Bereich vor allem mit Energiekabeln realisiert. Eine starke Vermaschung und, bei höheren Spannungsebenen, das (n-1)-Prinzip, sorgen für eine hohe Sicherheit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der elektrischen Energieversorgung [85].

Energiekabel oder Starkstromkabel werden zur Übertragung und Verteilung von elektrischer Energie im Energieversorgungsnetz eingesetzt. Im Gegensatz zu Freileitungen werden Kabel zumeist im Erdreich, in Rohren, Schächten oder Tunneln verlegt und erfordern aus diesem Grund umfangreiche Tiefbaumaßnahmen zur Verlegung und Reparatur. Außerdem kommt bei Kabeln ein Feststoffisolator (Dielektrikum) zum Einsatz, der den spannungsführenden Innenleiter zylinderförmig umgibt und vom geerdeten Außenleiter (Schirm) trennt. Bei Freileitungen stellt die umgebende Luft das quasi selbst reparierende Dielektrikum zwischen Hochspannungspotential und Erde dar.

Eine Erhöhung der Spannung und/oder des Leiterquerschnitts ermöglicht die Vergrößerung der über das Kabel transportierbaren Leistung. Gleichzeitig muss eine erfolgreiche Abfuhr von Wärme, die maßgeblich durch Stromwärmeverluste im Leiter entsteht, sowie ein sicherer Abbau des elektrischen Feldes innerhalb des Dielektrikums gewährleistet werden.

Im Mittelspannungsbereich kommen hauptsächlich papier- und kunststoffisolierte Kabel zum Einsatz.

Allein das Kabelnetz in Deutschland umfasst eine Gesamtsystemlänge in der Größenordnung von 300.000 km im Mittelspannungsbereich und rund 900.000 km im Niederspannungsbereich. Die Energiekabel sind jedoch teilweise in die Jahre gekommen. So wird geschätzt, dass im Mittelspannungsbereich etwa ein Drittel der

verlegten Kabel über 30 Jahre alt ist [105]. Während vor 1965 ausschließlich Papiermassekabel (bis ca. 30 kV) installiert wurden, begann zwischen 1965 und 1980 der Umstieg auf kunststoffisolierte Kabel, die heute nahezu ausschließlich in Form von VPE-Kabeln (Vernetztes Polyethylen) eingesetzt werden. Doch der Umstieg brachte auch Probleme mit sich. Kunststoffkabel aus den Jahren ab 1968 bis etwa 1983 erwiesen sich als sehr anfällig gegenüber der Ausbildung von Wasserbäumchen (*engl: water-treeing*). Dadurch kam es bei vergleichsweise jungen Anlagen zu Kabelfehlern und damit verbundenen Versorgungsausfällen. Auch heute sind solche fehleranfälligen Strecken noch teilweise im Einsatz. Hinzu kommt, dass man nur schwer abschätzen kann, wie lange die alten Papiermassekabelstrecken noch in Betrieb sein werden, da sie die erwartete Lebensdauer teilweise schon überschritten haben [104].

## 1.2 Schädigungs- und Alterungsmechanismen bei Kabeln

Die Alterungsmechanismen bei Energiekabeln sind vielfältig [23, 108] und werden im Folgenden nur grob beschrieben. Prinzipiell ist ein Kabel im Betrieb hohen thermischen Beanspruchungen ausgesetzt (zulässige Betriebstemperatur: Papiermassekabel 60-70 °C, VPE-Kabel 90 °C [23]), die abhängig von Tages- und Jahreszeit stark variieren und chemische Zersetzungsprozesse begünstigen. Abhängig von der Beschaffenheit und Zusammensetzung des umgebenden Mediums, z. B. Feuchtigkeitsgehalt oder Kontamination des umgebenden Erdreichs, wird ein Kabel auch von außen stark beansprucht.

Kommt es zu lokalen Überhöhungen der elektrischen Feldstärke (z. B. in einem Hohlraum), so kann die elektrische Festigkeit des Dielektrikums überschritten werden und Teilentladungen zünden. Diese Funkenentladungen führen zu weiteren thermischen, chemischen und strahlungsbedingten Alterungsprozessen und beschleunigen die Degradation des Isolierstoffs zusätzlich.

Ist der Alterungsprozess weit fortgeschritten, und ist die elektrische Festigkeit nicht mehr gegeben, kommt es zu einem lokalen Durchschlag des Dielektrikums. Man spricht dann von einem Kabelfehler.

Ein papierisoliertes Kabel besteht im Wesentlichen aus einem Leiter, auf den mehrlagig imprägnierte Papierstreifen aufgewickelt werden. Die Imprägniermasse besteht in der Regel aus einem Gemisch aus Mineralöl und Harzen (Papiermassekabel) oder dünnflüssigem Mineralöl (Ölkabel) [31]. Zum Schutz vor äußeren Einflüssen und zur Schirmung des Feldes wird ein Bleimantel eingesetzt. Dieser wird wiederum durch weitere Papierschichten und Metallarmierungen oder teer-getränktes Jutegewebe gegenüber der Umgebung vor äußeren Einflüssen geschützt.

Die chemische Alterung der Papierschichten und der Imprägniermasse sorgt für die Bildung von Spaltprodukten (z. B. Wasser), die sich negativ auf die Polarisationsverluste und die weitere Zersetzung der Zellulose (*engl.: degree of polymerization, DP*) auswirken. Dadurch wird die elektrische Festigkeit der Papierisolation beeinträchtigt [77, 62, 63]. Eine Korrosion des Bleimantels (hervorgerufen z. B. durch Bleifraß, vgl. Abb. 1.1) kann zu Leckagen führen, die bei thermischer Belastung Imprägniermasse austreten oder Wasser eindringen lassen können. Dies kann das Auftreten von inneren Teilentladungen begünstigen. Durch den geschichteten Aufbau papierisolierter Kabel sowie durch Ausgleichs- und Fließprozesse der Tränkmassse, weisen Papiermasssekabel eine hohe Robustheit gegenüber TE auf.



Abb. 1.1: Bleifraß am Bleimantel eines Papiermasssekabels

Energiekabel mit Kunststoffisolierung sind sehr empfindlich gegenüber Teilentladungen in Hohlräumen, da sich ausbildende elektrische Entladungskanäle schnell zu einem Volldurchschlag weiterentwickeln können. Hier muss während des Herstellungsprozesses größte Sorgfalt verwendet werden, um bei der Mehrfachextrusion der Kunststoffschichten auf den Leiter keine Fremdkörper oder Hohlräume im Bereich des elektrischen Feldes zu erhalten [31]. Bei mit Polyethylen (PE) isolierten Kabeln der ersten Generation kann es unter Einwirkung von Feuchtigkeit und elektrischem Feld zu elektrochemischen Prozessen kommen, die so genannte Wasserbäumchen (*engl. water trees*) in Feldrichtung vorwachsen lassen. An die Wasserbäumchen können sich feine Entladungskanäle (*engl. electrical trees*) in Richtung der Gegenelektrode anschließen, die im Regelfall innerhalb eines kurzen Zeitraums zu einem Volldurchschlag der Kabelisolation führen [67, 59]. Heute wird nahezu ausschließlich vernetztes Polyethylen (VPE, *engl.: cross-linked polyethylene, XLPE*) eingesetzt, welches, aufgrund der hervorragenden elektrischen und chemischen Eigenschaften, eine Kabellebensdauer von 40 bis 50 Jahren erwarten lässt [31].

An modernen Kunststoffkabeln wird nach der Fertigung eine Teilentladungsmessung durchgeführt, die das Vorhandensein von Hohlräumen oder Fremdkörpern in

der Kabelisolation erkennen lässt. Somit kann ein neues Kunststoffkabel als TE-frei angesehen werden, wenn es das Kabelwerk verlässt.

Jedoch gibt es andere Einflüsse, die zu Schäden am Kabel führen können.

Beim Transport der Kabel von der Produktionsstätte zum Verlegeort können Transportschäden auftreten [99]. Jede Kabelstrecke besteht, abhängig von der verlegten Länge, in der Regel aus mehreren hintereinander geschalteten Kabelstücken. Diese sind mit Kabelmuffen verbunden, die im Wesentlichen aus einem Verbinder und einem Muffenkörper mit eingebrachter Feldsteuerung bestehen. Weiterhin besitzt jede Kabelstrecke an beiden Kabelenden einen Endverschluss, der die elektrische Feldstärke sicher absteuert. Bei diesen Kabelgarnituren spielt, je nach verwendeter Technologie, die sorgfältige Montage eine große Rolle. Fehlerhaft montierte Garnituren können Teilentladungen verursachen, die zu einem Ausfall der Anlage führen können. Aus diesem Grund setzen Kabelnetzbetreiber häufig die TE-Messung als Inbetriebnahmeprüfung an Kabelstrecken ein.

Auch Schäden, hervorgerufen durch Erdarbeiten, sind mögliche Auslöser für eine vorzeitige lokale Alterung einer Kabelanlage. Laut [28] sind etwa 70 % der Fehlerfälle bei unterirdisch verlegten Kabeln auf mechanische Einwirkungen zurückzuführen. Solche Schäden an im Boden verlegten Energiekabeln entstehen hauptsächlich durch Baggerarbeiten und horizontale oder vertikale Bohrungen. Wird ein Kabel nur leicht beschädigt, ohne dass es unmittelbar zu einem Ausfall kommt, besteht die Möglichkeit, dass sich der Zustand nach einer gewissen Zeit verschlechtert (z. B. durch Feldüberhöhungen, Eindringen von Wasser) und der Fehler erst verzögert auftritt [106].

### 1.3 Energiekabeldiagnostik

Die Energiekabeldiagnostik bietet eine ganze Reihe von Möglichkeiten, Energiekabel auf Schwachstellen, Schädigungen, Montagefehler und Alterungsgrad zu untersuchen. Es stehen verschiedene diagnostische Methoden zur Einschätzung des Betriebsmittelzustands zur Verfügung, denen sich Netzbetreiber im Rahmen der eigenen Inbetriebsetzungs-, Instandhaltungs- und Wartungsstrategie bedienen. In Zeiten des liberalisierten Strommarktes liegt es in starkem Interesse, das Netz möglichst kosteneffektiv zu nutzen und zu fahren. Während Kabelnetze vor der Liberalisierung meist gemäß einem zeitbasierten Instandhaltungsplan ausgetauscht wurden, versuchen Netzbetreiber heute Kabelstrecken so lange wie möglich zu betreiben und zustandsorientiert zu handeln (*engl.: condition based maintenance, CBM*) [108]. Das führt dazu, dass Kabelstrecken heute nicht selten weit über die Design-Lebensdauer hinweg und nahe der Leistungsgrenze betrieben werden. Neben der übertragenen Leistung und der Spannungsebene spielt auch die Wichtigkeit und

Priorität eines Energiekabels bezüglich der angeschlossenen Verbraucher eine maßgebliche Rolle. Die Energiekabeldiagnostik kann nun dort zum Einsatz kommen, wo eine Priorisierung von Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden soll oder intervallartige Untersuchungen an wichtigen Kabelstrecken von Interesse sind.

Im Folgenden sollen verschiedene auf elektrischer Prüf- und Messtechnik basierende Methoden der Energiekabeldiagnostik kurz angesprochen werden, um einen Überblick zu verschaffen. Zur vertiefenden Literatur der einzelnen Verfahren sei auf die jeweils angegebene Fachliteratur verwiesen. Auf die Teilentladungsmessung und -ortung an Energiekabeln wird in dieser Arbeit näher eingegangen.

### 1.3.1 Spannungsprüfungen

Um geschädigte Energiekabel zu erkennen, werden bei Spannungsprüfungen bestimmte Prüfspannungen an den Kabelprüfling angelegt, die, im Falle einer Vorschädigung, zu einem Durchschlag des Kabels führen. Bei Papiermassekabeln und bei PVC-isolierten Nieder- und Mittelspannungskabeln hat sich die Gleichspannungsprüfung bis zu einem Pegel von  $8 \cdot U_0$  bewährt. Vorteil dabei ist, dass die erforderlichen Gleichspannungsquellen aufgrund der geringeren Ladeleistung deutlich einfacher als Wechselspannungsquellen realisierbar sind. Anders sieht es jedoch bei PE isolierten Kunststoffkabeln aus. Wegen der niedrigen Gleichspannungsleitfähigkeit wird bei PE/VPE-isolierten Kabeln mittlerweile von einer Gleichspannungsprüfung abgeraten, da einerseits während der Prüfung entstandene Raumladungen vor Störstellen einer Isolierung zu einer erhöhten Beanspruchung bei plötzlichen Polaritätswechseln führen können, und andererseits solche Störstellen während der Prüfung oft unerkannt bleiben [67]. Hier kommen dagegen hauptsächlich netzfrequente Prüfspannungen im 50/60-Hz-Bereich [49, 82, 59], 0,1-Hz-Wechselspannungen (*engl.: very low frequency, VLF*) [43] oder schwingende, gedämpfte Spannungsimpulse (*engl.: oscillating voltages*) [22, 68] zum Einsatz. Als maximale Prüfpegel sind  $2 \cdot U_0$  für die netzfrequenten Spannungen und  $3 \cdot U_0$  für die VLF-Prüfwechselspannung festgelegt. Natürlich können solche Wechselspannungsprüfungen auch bei Papiermassekabeln und PVC-Kabeln eingesetzt werden [23, 142].

Solche Spannungsprüfungen sind in der Regel destruktiv, d. h. Schwachstellen innerhalb des Kabels entwickeln sich zu Isolationsfehlern. Diese Fehler müssen anschließend durch den Einsatz der Kabelfehlerortung geortet und durch partielle Reparatur beseitigt werden [23, 99].

Bei der Mantel- oder Korrosionsschutzprüfung wird die Unversehrtheit des Metall- oder Kunststoffmantels mittels einer Spannungsprüfung zwischen Metallmantel oder Schirm gegen Erde durchgeführt. Dadurch kann beispielsweise ein möglicher Feuchteintritt in das Kabelinnere (Vorbeugung gegen *water-treeing*) oder ein Öl- oder Masseaustritt in die Umwelt festgestellt werden. Je nach Materialart des

Schutzmantels wird eine hohe Gleichspannung bestimmten Pegels für etwa eine Minute angelegt. Bei einem schadhafte Mantel tritt ein Durchschlag auf und der Fehler kann mittels Fehlerortungsmethoden lokalisiert werden.

### 1.3.2 Nicht-destruktive Diagnostik

Um den Zustand von Energiekabeln zerstörungsfrei diagnostizieren zu können, gibt es verschiedene Messmethoden, die integrale oder örtlich aufgelöste Informationen über die Güte der Isolation liefern. Dabei werden, im Gegensatz zu den Spannungsprüfungen in Abschnitt 1.3.1, Spannungspegel und -formen verwendet, die das Energiekabel möglichst nicht weiter schädigen oder zerstören.

#### 1.3.2.1 Verlustfaktormessung ( $\tan \delta$ )

Die Verlustfaktormessung erweist sich bei Kunststoffkabeln als geeignetes Werkzeug, um eine *water-treeing* Diagnose durchzuführen. Hier zeigt sich eine starke Spannungsabhängigkeit des  $\tan \delta$  bei Kabeln, die stark mit *water-trees* durchsetzt sind [23]. Während der Verlustfaktor bei neuwertiger Isolation über der Prüfspannung nahezu konstant bleibt, steigt er bei einem *water-tree* behafteten Kabel mit der Spannung an.

#### 1.3.2.2 Wiederkehrspannungsmessung (RVM)

Auch die Wiederkehrspannungsmessung (*engl.: return voltage measurement*, RVM) kann für die *water-tree* Diagnose eingesetzt werden. Hier wird das Dielektrikum auf mäßig hohe Gleichspannung aufgeladen, kurzzeitig geerdet und anschließend die Wiederkehrspannung am Leiter gemessen. Es unterscheiden sich *water-tree* behaftete von *water-tree* freien Kunststoffen durch die Abhängigkeit der Wiederkehrspannung von der Ladespannung [23].

#### 1.3.2.3 Impedanzspektroskopie (PDC/IRC/FDS)

Bei der Polarisationsstrommessung (*engl.: polarization/depolarization current*, PDC) wird eine Gleichspannung im Bereich um 1 kV über einen längeren Zeitraum an das Dielektrikum angelegt und der Polarisationsstrom im Zeitbereich gemessen. Danach wird die Spannungsquelle abgeschaltet und über den gleichen Zeitraum der Depolarisationsstrom erfasst. Aus den so erhaltenen Kurven lassen sich über geeignete Modelle Aussagen über den Alterungszustand, wie zum Beispiel der Feuchtegehalt der Papierisolation, gewinnen [31].

Bei der Isothermen Relaxationsstromanalyse (IRC) wird ebenfalls der Depolarisationsstrom nach vorheriger Gleichspannungsbeanspruchung aufgezeichnet. Hier wird aber der Prüfling zwischen Spannungsbeanspruchung und Depolarisationsstrom für kurze Zeit kurzgeschlossen, um die geometrische Kapazität zu entladen. Die Interpretation erfolgt mittels geeigneter Approximationsverfahren [71].

Bei der Impedanzspektroskopie im Frequenzbereich (*engl. frequency domain spectroscopy*, FDS) wird der Prüfling mit einem Frequenz-Sweep beaufschlagt und der Strom über der Frequenz gemessen [31]. Dadurch lässt sich die komplexe Kapazität bestimmen sowie die komplexe Permittivität und der Verlustfaktor in Abhängigkeit der Frequenz ableiten.

### 1.3.2.4 Teilentladungsmessung (TE-Messung)

Die Teilentladungsdiagnostik von Energiekabeln ist einer weitere Methode, elektrische Betriebsmittel zerstörungsfrei zu prüfen und zu überwachen. Unter Teilentladungen (TE) versteht man Entladungen, die das Dielektrikum zwischen zwei Elektroden nur teilweise überbrücken. Die TE-Intensität gehört zu den wichtigsten international anerkannten Kenngrößen über den Zustand einer Hochspannungsisolierung [88]. Die konventionelle TE-Messung ist durch den Standard IEC 60270 [140] genormt.

Innere Teilentladungen regen im Dielektrikum mit der Zeit Erosionsprozesse an, die zu einer Alterung führen. Auch wenn das Vorhandensein von TE nur eines von vielen qualitätsmindernden Mechanismen ist (siehe Abschnitt 1.2), ist eine weitestgehende TE-Freiheit damit eine absolut notwendige Forderung, die vor der Inbetriebnahme zu erfüllen ist [64].

Eine Teilentladung innerhalb eines Energiekabels führt zu einem lokalen Einbruch der Spannung an einer bestimmten Stelle, was zu hochfrequenten Impulsen führt, die sich als Wanderwellen in Richtung beider Kabelenden ausbreiten. Diese Signale lassen sich mit geeigneter Messtechnik an den zugänglichen Kabelenden erfassen. Mittels Laufzeitmessungen ist der Ursprungsort der Entladung feststellbar.

Zur Sicherstellung der Kabelqualität werden die aufgerollten Teillängen einzeln auf TE geprüft [64], bevor sie dann das Kabelwerk in einem einwandfreien Zustand verlassen. Vor Ort ist nach der Kabellegung eine weitere TE-Prüfung erforderlich, da Garnituren wie Verbindungsmuffen und Endverschlüsse nur dort montiert werden können. Die Ergebnisse der Vor-Ort-TE-Messung dienen als Forderungsgrundlage bei Garantieansprüchen des Anlagenbetreibers gegenüber dem Anlagenbauer [75]. Alterungsprozesse, wie das Eindringen von Feuchtigkeit in Kunststoffkabel der ersten Generation (*water trees*, [59]), das Auslaufen von Imprägniermasse bei papierisolierten Kabeln oder Beschädigungen durch äußere Einflüsse wie Erdarbeiten, können durch wiederkehrende TE-Messungen oder durch TE-Überwachungssysteme im laufenden Betrieb erkannt werden.



Sowohl bei Stück- als auch Vor-Ort-Prüfungen spielt neben der TE-Intensität auch der Ursprungsort der TE eine große Rolle. Gerade die Möglichkeit der Ortung macht die TE-Messung an Energiekabeln zu einem geeigneten Werkzeug zur partiellen Instandsetzung einer Kabelstrecke. Ist der Ort der Schwachstelle erst einmal bekannt, so kann das Kabel gezielt freigelegt und die fehlerhafte Stelle herausgetrennt und ersetzt werden. Hierdurch lassen sich die immensen Kosten für die erforderlichen Erdarbeiten deutlich reduzieren.

Für die Ortung von TE-Quellen nach dem Impulsabstandsverfahren ist eine breitbandige Erfassung der Signale notwendig [30, 80]. Damit treten jedoch insbesondere bei der Vor-Ort-Prüfung Schwierigkeiten auf, da die gesamte Messanordnung vielen Störquellen ausgesetzt ist.

Grundlagen und Verfahren bei der Teilentladungsmessung an Energiekabeln finden sich in Kapitel 2. Kapitel 3 befasst sich mit der genauen Modellierung von Kabeln und Teilentladungen auf Kabeln. Der Aufbau eines geschirmten Kabel-TE-Messsystems wird in Kapitel 4 beschrieben. In Kapitel 5 werden Verfahren und Algorithmen aus der Signalverarbeitung für die Aufbereitung der Messdaten und Ortung der Kabel-TE vorgestellt. Schließlich werden die Verfahren in Kapitel 6 in eine Kabel-TE-Software integriert und für die Auswertung von realen Kabel-TE-Messdaten eingesetzt.

## **1.4 Stand der Technik bei der Kabel-TE-Messung**

Die TE-Messtechnik hat sich als Prüf- und Diagnoseverfahren für Kabel bewährt. Für Typ- und Stückprüfungen im Hochspannungslabor findet dies auf der Grundlage von Normen statt [140, 141, 31]. So wird die TE-Messung an Energiekabeln unter geschirmten Bedingungen im Labor schon seit langem eingesetzt und erforscht [41, 74, 47, 48, 8].

Auch bei der Messung von Teilentladungen vor Ort an verlegten Kabelanlagen sind Systeme im Einsatz, die mittels mobiler Prüfspannungsquellen und entsprechender Messtechnik Teilentladungen erfassen [43, 58, 22, 82, 68]. Ein Vergleich verschiedener auf dem Markt erhältlicher Systeme ist in [12] zu finden.

In weiteren Publikationen wurde über die Entwicklung und den Test unkonventioneller Messmethoden mit kapazitiven und induktiven Sensoren an Kabeln berichtet (z. B. [80, 75, 16]). Feldsensoren sind entweder in den Garnituren fest integriert oder werden nachträglich montiert.

Die Messung von Teilentladungen im laufenden Betrieb wird z. B. in [109, 111, 102] beschrieben. Hier kommt in der Regel die Zweiendmessung zum Einsatz, bei der an beiden Kabelenden Sensoren zur TE-Auskopplung angebracht werden.

Das Thema Kabel-TE-Diagnostik erfährt in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit, da sich zum Einen durch die rasante Entwicklung der Computertechnik neue rechnergestützte Verfahren anbieten, zum Anderen das Alter weltweit installierter Kabelanlagen vielerorts die maximale Design-Lebensdauer erreicht oder überschritten hat, und die Gefahr der Ausfälle wächst.

### 1.5 Herausforderungen bei der Kabel-TE-Messung

Nicht alle Herausforderungen der Kabel-TE-Messung sind schon gemeistert. Insbesondere die Erfassung, Messung und Ortung von Kabel-TE-Impulsen und -Reflektogrammen unter Vor-Ort-Bedingungen birgt einige Schwierigkeiten, die im Folgenden erläutert werden.

#### 1.5.1 Dämpfung und Dispersion von Impulsen

Die frequenzabhängige Dämpfung und Verzerrung von Impulsen wird in Energiekabeln hauptsächlich durch die zur Homogenisierung des elektrischen Feldes eingebrachten inneren und äußeren Leitschichten begünstigt, vgl. Abschnitt 3.1 [93, 42, 60]. Dies hat zur Folge, dass sich bei schnellen Impulsen, wie im Fall von Teilentladungen gegeben, abhängig von der durchlaufenen Wegstrecke, die Amplitude verringert, während sich die Impulsanstiegszeit und -breite vergrößert (siehe Abb. 1.2). Daraus ergibt sich zum Einen die Schwierigkeit, dass Impulse, die lange Kabelstrecken durchlaufen haben, im Grundstörpegel verschwinden, zum Anderen kann es durch das Verschleifen der Impulse zu Ortungsfehlern kommen, da Laufzeitunterschiede unter Umständen zu groß gemessen werden [42]. Die Ladung der TE-Impulse bleibt dagegen annähernd erhalten [64].

#### 1.5.2 Methoden zur Ankunftszeitbestimmung

Die Ortung von TE in Kabeln wird durch die Messung von Laufzeitdifferenzen zwischen Impulsen realisiert.

Zur Bestimmung der zeitlichen Impulsabstände innerhalb der Reflektogramme gibt es verschiedene Vorgehensweisen. Eine einfache Möglichkeit stellt die Zeitdifferenzmessung mittels der Maxima des direkten und indirekten Impulses dar. Diese Methode ist einfach in Ortungssoftware implementierbar, birgt aber das Problem, dass Vergrößerungen der Impulsanstiegszeiten und Impulsverzerrungen durch frequenzabhängige Ausbreitungscharakteristik, Abtastung mit zu geringer Samplerate oder Überlagerung von Störungen und Rauschen im Bereich des Impulspeaks zu Ortungsungenauigkeiten führen können [35, 92, 42, 100]. Darum ist es notwendig, neue alternative Methoden zur Ankunftszeitbestimmung zu finden, die robust und

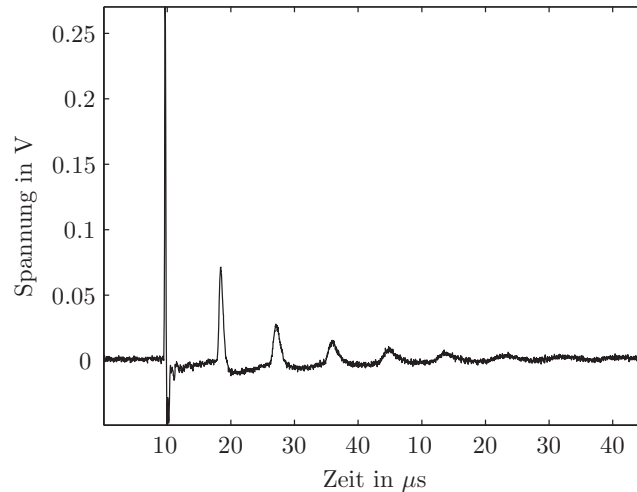


Abb. 1.2: Dämpfung und Dispersion eines mehrfach durch ein Energiekabel gelaufenen Kalibrierimpulses

leicht in automatisierte Kabel-TE-Auswertesoftware integrierbar sind. Verfahren, die in der akustischen Materialforschung [21, 46, 45] und Seismologie [1, 114] sowie der akustischen Lokalisierung von TE in Transformatoren [56, 55] eingesetzt wurden, sind im Rahmen dieser Arbeit erstmals an Offline-Kabel-TE-Messdaten erprobt und eingesetzt worden [121, 122]. Auch bei der Online-Kabel-TE-Messung kommen solche Verfahren zur Ankunftszeitbestimmung zum Einsatz [103, 102]. In Abschnitt 5.2 werden die Algorithmen vorgestellt.

### 1.5.3 Blindlänge

Unter Blindlänge versteht man bei der Offline-Kabel-TE-Messung jene Bereiche in der Nähe der Kabelenden, in denen eine Lokalisierung von Teilentladungen aufgrund von Impulsüberlagerungseffekten nicht mehr möglich ist [35, 92, 42].

Im Folgenden wird eine RG58 Koaxialkabelstrecke  $\overline{AB}$  der Länge 530 m betrachtet.  $A$  bezeichnet jenes Kabelende, an dem die Messeinrichtung angeschlossen ist. Kabelende  $B$  wird im Leerlauf betrieben, wodurch eine Totalreflektion auftritt. Auch an Stelle  $A$  tritt eine Reflektion auf, da das Messsystem nicht an den Wellenwiderstand des Kabels angepasst ist.

Im Falle einer (hier: simulierten) TE in der Nähe des fernen Kabelendes  $B$  überlagern sich bei der Messung der direkte und der indirekte Impuls (siehe Abb. 1.3(a)). Tritt eine TE dagegen in der Nähe des nahen Kabelendes  $A$  auf, so überlagert sich der indirekte Impuls mit der Reflektion des direkten Impulses, wie in Abb. 1.3(b) zu sehen.

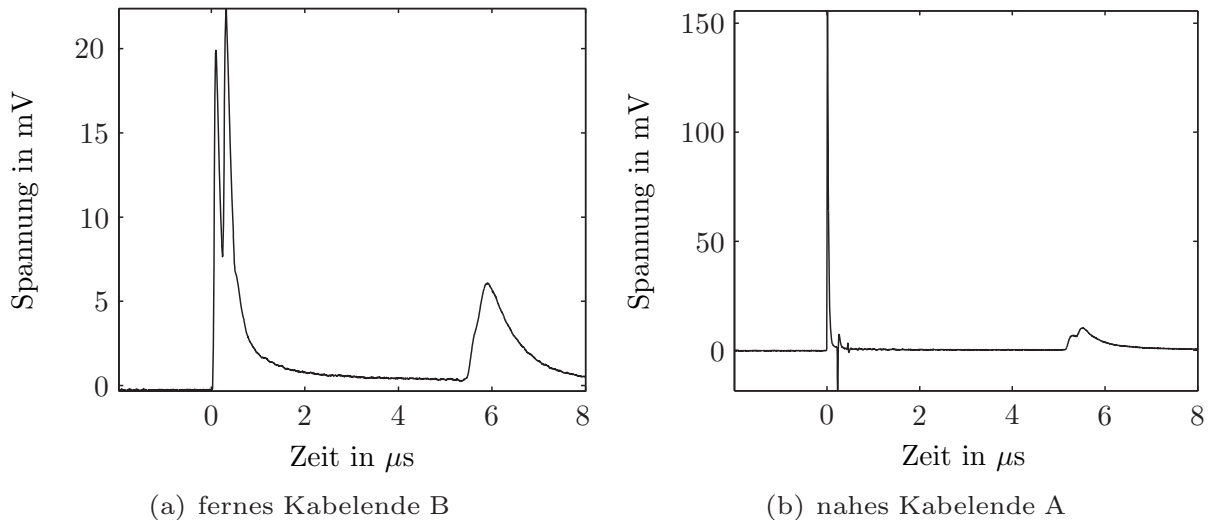


Abb. 1.3: Simulationen einer TE in der Nähe der Kabelenden

In beiden Fällen wird sowohl die Separation und Identifikation der einzelnen Impulse als auch die Messung der Laufzeitdifferenz erschwert. Ab einem gewissen Grad der Überlagerung verschmelzen die Impulse zu einem Impuls, wodurch nicht mehr genau differenziert werden kann, ob eine TE aus dem Endverschluss oder aus dem Kabel kommt. Dieser Effekt ist in Abb. 1.4 dargestellt. Weiterhin beeinträchtigen überlagerte Störungen die Auswertung solcher Reflektogramme.

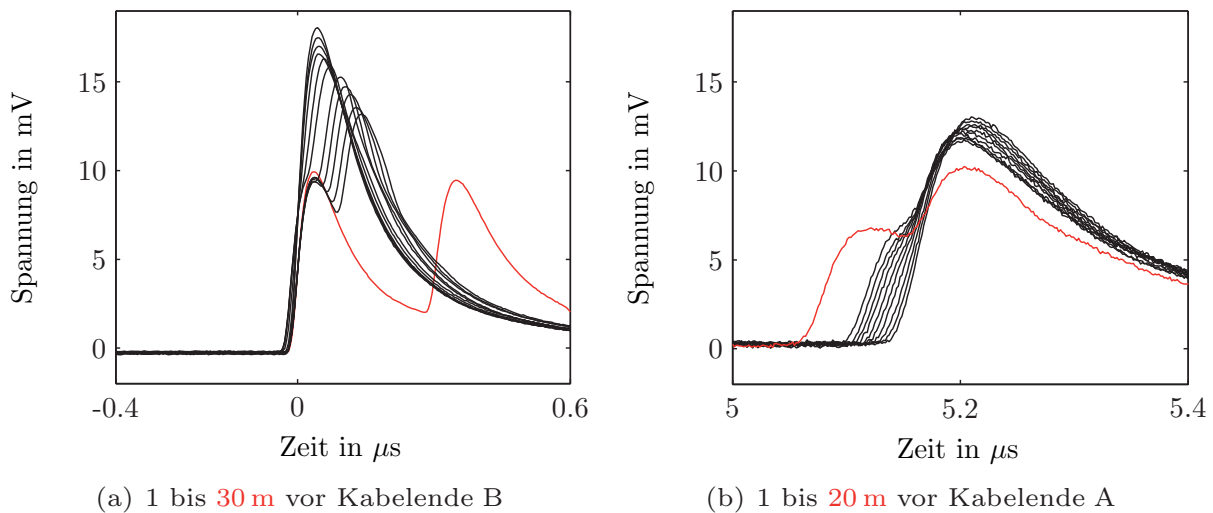


Abb. 1.4: Überlagerungseffekte im Blindlängenbereich (schwarze Kurven: 1-m-Schritte)

Bezüglich der Blindlänge lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Bei der Online-Kabel-TE-Messung tritt, bei reflektionsfreiem Übergang, keine Blindlänge auf.

- Bei der Offline-Kabel-TE-Messung tritt immer eine Blindlänge auf. Dadurch können mit analogen TE-Messgeräten nur TE aus dem Bereich von etwa 5 bis 95 % der Kabellänge sicher geortet werden.
- Durch Variation der Methoden zur Ankunftszeitbestimmung ergeben sich Vorteile, je nachdem welcher Blindlängenbereich betrachtet wird. Bei TE im Bereich des Kabelendes  $B$  erscheint die Lokalisierung mittels der Impulsamplituden sinnvoll, während bei TE aus dem Bereich des Kabelendes  $A$  eher der Impulsfußpunkt für die Ortung verwendet werden sollte.
- Bei TE im Bereich der Endverschlüsse (z. B. Korona an der Sammelschiene) muss anhand der Impulsbreite unterschieden werden, ob es sich um Korona an Stelle  $A$  oder  $B$  handelt. Dies kann über die Analyse der Impulsbreite geschehen. So erzeugt ein TE-Impuls nahe dem Detektor ein sehr steilflankiges und schmales Signal, wohingegen eine TE am fernen Kabelende durch die gesamte Kabelstrecke läuft, bevor sie mit deutlich größerer Impulsbreite gemessen wird.

#### 1.5.4 Überlagerung von Reflektogrammen

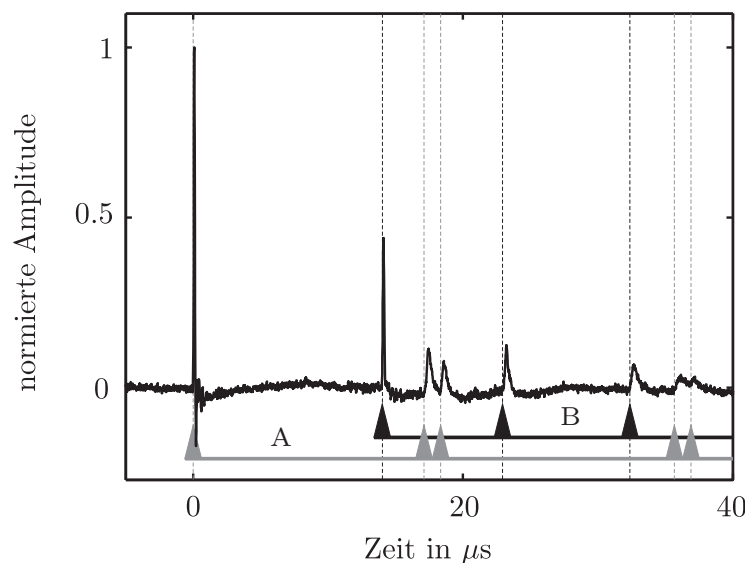


Abb. 1.5: Überlagerung von Reflektogrammen

Die Kabellaufzeit eines Impulses auf einem Energiekabel liegt, wenn man von üblichen Kabellängen ausgeht, im Bereich bis zu einigen  $10 \mu\text{s}$ . Bei der Offline-Messung wird diese Laufzeit zusätzlich verdoppelt, da, bedingt durch die Reflexion am offenen Kabelende, die Kabelstrecke zweimal durchlaufen wird. Hierbei ist es möglich, dass innerhalb der Laufzeit eines Reflektogramms weitere TE-Impulse zünden und sich mehrere Reflektogramme überlagern. Superponieren die einzelnen Impulse der

jeweiligen Reflektogramme nicht, so kann mittels Berücksichtigung der Dämpfungseigenschaften und der Gesamtlaufzeit des Kabels eine Zuordnung zum jeweiligen Reflektogramm erfolgen. Abb. 1.5 zeigt überlagerte Reflektogramme zweier unterschiedlicher TE-Stellen innerhalb eines ca. 1,5 km langen VPE-Kabels.

### 1.5.5 Mischkabelstrecken

Durch das partielle Ersetzen von Kabelteilabschnitten entstehen in elektrischen Verteilnetzen Mischkabelstrecken, das heißt Kabelanlagen, die aus Segmenten unterschiedlichen Kabeltyps bestehen [108, 109]. So werden beispielsweise häufig alte Papiermasssekabelstrecken partiell durch kunststoffisolierte Kabel erneuert. Als Verbindungsgarnituren kommen Übergangsmuffen zum Einsatz [99]. Die Herausforderung für die Ortung von Kabel-TE besteht nun darin, dass sich durch den unterschiedlichen Aufbau der Kabeltypen eine unterschiedliche Ausbreitungseigenschaft innerhalb der einzelnen Kabelabschnitte ergibt.

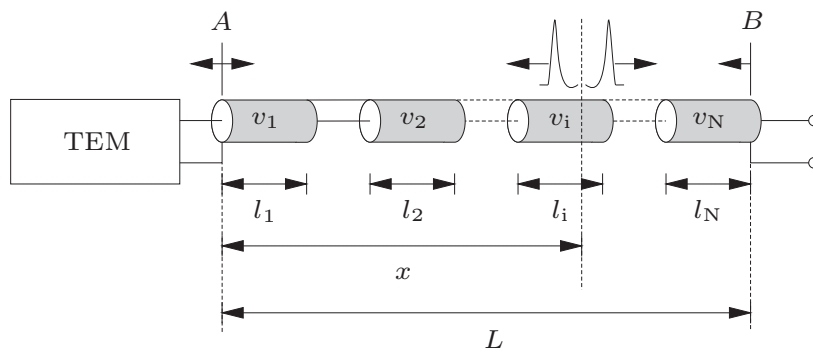


Abb. 1.6: Allgemeiner Aufbau einer Mischkabelstrecke

Eine Kalibrationsmessung gemäß Abb. 2.5 ergibt also eine durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v'_0$ , die sich, ähnlich Gl. (2.5), aus

$$v'_0 = \frac{2L}{\delta t'_{\text{kal}}} \quad (1.1)$$

berechnen lässt. Die bei der Kalibration gemessene Zeitdifferenz  $\delta t'_{\text{cal}}$  setzt sich aber nun aus den einzelnen Teillängen  $l_1, \dots, l_i, \dots, l_N$  und den Ausbreitungsgeschwindigkeiten  $v_1, \dots, v_i, \dots, v_N$  der einzelnen Kabelsegmente zusammen, und man erhält

$$\delta t'_{\text{kal}} = 2 \sum_{k=1}^N \frac{l_k}{v_k}. \quad (1.2)$$

Tritt nun eine TE auf, so ist eine Schätzung notwendig, in welchem Segment des Mischkabels die TE gestartet ist. Hierzu wird zunächst die Zeit  $\delta t'_x$  zwischen dem

direkten und indirekten Impuls gemessen. Der indirekte Impuls läuft gegenüber dem direkten Impuls einen Mehrweg, und zwar die doppelte Strecke vom Fehlerort bis zum Kabelende  $B$ . Dadurch lässt sich für jedes mögliche Startsegment  $i = N, N - 1 \dots 1$  eine geschätzte Laufzeit

$$\delta t'_x(i) = 2 \cdot \sum_{k=i}^N \frac{l_k}{v_k} \quad (1.3)$$

berechnen. Jede geschätzte Laufzeit  $\delta t'_x(i)$  wird nun mit der gemessenen Laufzeit  $\delta t'_x$  verglichen. Das gesuchte Startsegment  $i$  ist gefunden, wenn  $\delta t'_x(i) > \delta t'_x$  gilt. Für  $\delta t'_x(i) = \delta t'_x$  ist der Impuls in der Muffe zwischen Segment  $(i - 1)$  und  $i$  gestartet.

Daraus ergibt sich der Fehlerort zu

$$x = \sum_{k=1}^i l_k + v_i \cdot \left( \sum_{k=i}^N \frac{l_k}{v_k} - \frac{l_i}{v_i} \right) - \frac{v_i \cdot \delta t'_x}{2}. \quad (1.4)$$

Während die Längen der einzelnen Kabelsegmente in der Regel gut dokumentiert sind, so ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kabeltypen meist nur in Größenordnungen als Erfahrungswert bekannt. Gerade bei gealterten Kabeln kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit stark variieren. Bei Mischkabelstrecken, die nur aus zwei verschiedenen Kabeltypen bestehen, reicht die Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines verbauten Kabeltyps (z. B. VPE-Strecke) aus. Die andere Ausbreitungsgeschwindigkeit lässt sich im Rahmen der Kalibration aus Gl. (1.2) berechnen.

Eine weitere Möglichkeit, Mischkabelstrecken zu analysieren, ist die Verwendung eines Kabelmodells, vgl. Kapitel 3. Hierfür ist der genaue Aufbau der einzelnen Kabelsegmente notwendig.

### 1.5.6 Einkopplung von Störsignalen

Ein großes Problem bei der Vor-Ort-Messung von Teilentladungen sind einkoppelnde Störsignale, die eine Auswertung des Messsignals erschweren. Prinzipiell unterscheidet man zwischen breitbandigen und schmalbandigen Störquellen, bezogen auf die Messbandbreite des Empfängers. Beispiele für schmalbandige Störquellen sind Rundfunksignale, Oberschwingungen oder das Stromversorgungsnetz. Breitbandige Störquellen lassen sich nochmals in Rauschstörer (z. B. kosmische Strahlung, thermisches Rauschen elektrischer Bauteile), und transiente Störer unterteilen. Transiente Störimpulse können statistisch verteilt (z. B. Koronaentladungen), periodisch (z. B. Phasenanschnittschaltung) oder nicht-periodisch (z. B. Relais-Schaltvorgang, Blitzeinschlag) auftreten [86].

Abb. 1.7 zeigt ein phasenaufgelöstes TE-Histogramm während einer Kalibrierung des Prüfkreises mit einer Ladung von 500 pC. Auf dem Bild markiert sind die gemessenen Kalibrierimpulse (a), zwei phasenstabile Störimpulse aus einem benachbarten Dauerversuch mit Phasenanschnittsteuerung (b) und Störimpulse aus einem über einen Frequenzumrichter gespeisten Heizkreis (c), der sich einige Räume abseits des Messaufbaus befand. Eine vorübergehende Abschaltung der Anlagen ist oft die einzige Möglichkeit, um den Störpegel zu senken.

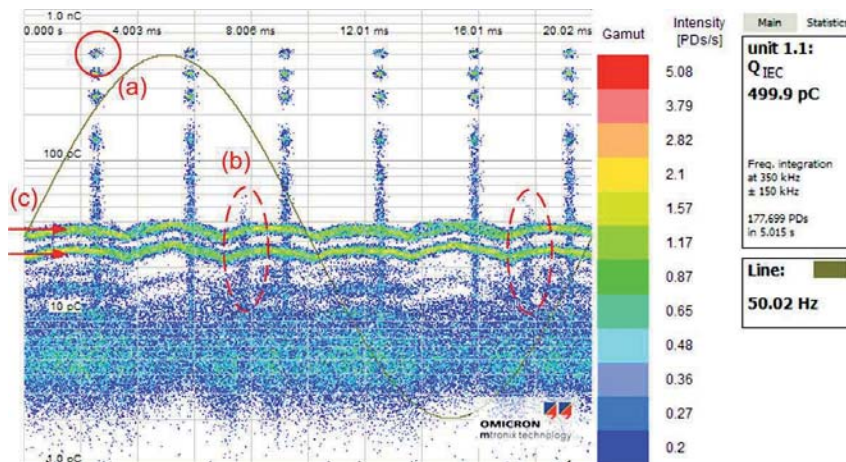


Abb. 1.7: TE-Histogramm während einer Kalibrierung im ungeschirmten Labor  
 (a) Kalibrierimpulse  
 (b) Phasenanschnittsteuerung  
 (c) Frequenzumrichter

Für die Vor-Ort-Kabel-TE-Messung ist vor allem der Frequenzbereich bis zu etwa 20 MHz kritisch. Im Vergleich zu konventionellen TE-Messkreisen, die in der Regel Bandbreiten im Bereich bis zu 400 kHz besitzen, ist dieser Frequenzbereich sehr groß, für die Ortung allerdings notwendig, um eine genügend hohe Zeitauflösung der Reflektogramme zu erhalten.

Gerade bei der Auswertung eines gemessenen Kabel-TE-Reflektogramms tritt, aufgrund des großen Dynamikunterschieds zwischen direktem und indirektem Impuls, häufig die Schwierigkeit auf, den durch die Ausbreitung auf dem Kabel stark gedämpften indirekten Impuls zu erfassen, der für die Ortung von Teilentladungen im Rahmen von Offline-Kabel-TE-Messungen erforderlich ist.

Die Reduktion von Störsignalen wurde im Rahmen dieser Arbeit in zwei Bereichen untersucht. Zum Einen wurden Untersuchungen und konstruktive Maßnahmen des Messsystem im Hinblick auf verbesserte Schirmung, Signalübertragung und Signalverstärkung zur Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses (SNR) des Messsignals untersucht. Ziel hierbei war die Entwicklung eines geeigneten Messsystems zur praxisingerechten Erfassung von Offline-Kabel-TE-Messdaten an Energiekabeln (bis 20 kV) in gestörter Vor-Ort-Umgebung. Zum Anderen wurden Methoden der



Signalverarbeitung eingesetzt, um das SNR auch bei bereits aufgezeichneten Messdatensätzen zu verbessern.

#### 1.5.6.1 Störunterdrückung im Bereich des Messaufbaus

Um Störungen im Bereich des Messaufbaus zu verringern, werden in [30, 88, 110, 80] verschiedene Maßnahmen genannt. Eine Grundvoraussetzung stellt die TE-Freiheit des Messaufbaus dar. Hier ist je nach Spannungsebene auf geeignete Verrundung, Schirmelektroden und Abstände zu achten, um Korona zu vermeiden. Um leitungsgebundene Störer aus der Prüfspannungsquelle zu unterdrücken, kommt ein LC-HochspannungsfILTER zum Einsatz. Da eine komplette Schirmung des Kabel-TE-Prüfkreises vor Ort nicht möglich ist, wird zumindest eine teilweise Schirmung von Koppelkondensator und den Kabelenden empfohlen. Problematisch sind, speziell bei der Schirmung der Kabelenden, die meist erschwerte Zugänglichkeit und die verschiedenen Endverschlüsse der zu untersuchenden Kabelstrecken. Eine komplette Schirmung des Ankoppelkreises kann aufgrund von Größe und Gewicht auch die Mobilität einer solchen Messeinrichtung einschränken. Bei der Erdung des Messaufbaus sollten Erdschleifen vermieden oder verkleinert werden. Die Erdverbindungen sollten niederinduktiv ausgeführt sein. Bei Prüfungen an dreiphasigen Kabelstrecken kann eine Brückenmessung zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen und Erhöhung der Empfindlichkeit eingesetzt werden, bei der eine Phase als Koppelkondensator fungiert. Da hier nicht von einer TE-Freiheit der als Koppelkondensator eingesetzten Kabelphase ausgegangen werden kann, muss durch gegenseitiges Vermessen der drei Phasen die TE-Herkunft identifiziert werden [70].

#### 1.5.6.2 Störunterdrückung am TE-Messsystem

Durch Einsatz analoger und/oder digitaler frequenzselektiver Sperrfilter kann eine Unterdrückung von schmalbandigen Störsignalen bei der Erfassung des Messsignals erfolgen [37, 39, 81, 107]. Hierbei wird im Rahmen einer Nullmessung vor Messbeginn die Störumgebung unterhalb der TE-Einsatzspannung erfasst, um die Filterparameter für das TE-Messsystem zu erhalten. Dabei ist zu beachten, dass sich der Einsatz von Filtern auch auf die Impulsform der TE-Impulse auswirkt, was im ungünstigsten Fall die Ortungsgenauigkeit negativ beeinflusst. Um breitbandige Störsignale zu unterdrücken, kann eine Ausblendung (*engl.: Gating*) um den Auftrittszeitpunkt des Störimpulses innerhalb der Prüfspannungsperiode eingesetzt werden [39, 95]. Während phasenstabile Störimpulse mit einem fixen Gating-Fenster ausgeblendet werden können, bietet die Triggerung mittels eines externen Gating-Kanals (z. B. Antenne) die Möglichkeit, stochastisch auftretende Störimpulse dynamisch auszublenden. TE-Impulse, die aus dem Prüfling kommen, werden mit dieser Methode allerdings auch ausgeblendet, falls sie zum gleichen Zeitpunkt wie die

Störimpulse auftreten. Aus diesem Grund schreibt die Norm [140] eine maximale Ausblendezeit von 10 % der Prüfspannungsperiode vor.

### 1.5.6.3 Störunterdrückung durch digitale Signalverarbeitung

Störunterdrückung im Bereich der Signalverarbeitung wird benötigt, um einerseits bereits aufgezeichnete Messdatensätze zu bearbeiten und andererseits Störsignale zu reduzieren, die nicht durch Maßnahmen am Messaufbau oder dem TE-Messsystem unterdrückt werden können.

Gängige Methoden sind z. B. Analogfilter und Digitalfilter [81], adaptive Filter [18, 37], Optimalfilter (*engl.: matched filter*) [91, 109] oder die Wavelet-Analyse. [9, 73].

Da sich die Wavelet-Analyse eignet, Rauschanteile aus einem Signal zu entfernen, wird die Methode in Kap. 5.1 beschrieben. Aufbauend darauf, wurde die Wavelet-Transformation durch [97] mit Hilfe des so genannten *Liftings* in die *Wavelet-Transformation zweiter Generation* (SGWT) weiterentwickelt. Beide Verfahren wurden bereits von diversen Autoren auf Kabel-TE-Messdaten angewandt. Auch in dieser Arbeit tragen die Verfahren erfolgreich zur „Entrauschung“ (*engl.: de-noising*) von Messdaten bei.

Eine weitere neuartige Methode, die so genannte *Empirische Moden Dekomposition* (EMD) [26], wurde im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit erstmals auf Kabel-TE-Messdaten angewandt [123]. Eine Beschreibung erfolgt in Kap. 5.1.3. Auch hiermit lassen sich bei der Rausch- und Störunterdrückung sehr gute Ergebnisse erzielen.

### 1.5.7 Mechanische Fehlerquellen

Viele Kabelanlagen im Mittelspannungsbereich sind schon sehr lange in Betrieb (Alter  $> 30 - 50$  a), teilweise auch bei verschiedenen Betreibern. So kann es bei einer Messung vor Ort durchaus vorkommen, dass Angaben zu Kabellänge und Muffenpositionen, verwendeten Kabeltypen und Muffen nur unzureichend verfügbar sind. In solchen Fällen sollte durch eine Vorortung versucht werden, die Muffenpositionen anhand von eventuell sichtbaren Teilreflektionen an den Muffen zu detektieren. Ist der Kabeltyp und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit bekannt, so kann mittels Kalibrationsmessung und Gleichung 2.5 auf die Gesamtkabellänge geschlossen werden. Im Zweifelsfall ist allerdings nur eine auf die Gesamtlänge bezogene Ortung möglich.

### 1.5.8 Objektive Verarbeitung der Daten

Nicht zuletzt sorgt der Mensch selbst, z. B. durch unsachgemäße Bedienung, für Fehler im Bereich der Auswertung und Interpretation der Messdaten. Hier wäre

es sehr wünschenswert, eine zumindest in Bereichen automatisierte Unterstützung durch ein rechnerbasiertes Expertensystem zu erhalten.

## 1.6 Ziele der Arbeit

Folgende Ziele sollen im Rahmen dieser Arbeit erreicht werden:

- Aufbau eines Offline-Kabel-TE-Messsystems.
- Verwendung einer geschirmten Ankopplung und Aufbau einer Vorrichtung zur Messung von TE-Impulsen in Kabeln.
- Rechnergestützte Erfassung und Verarbeitung von Kabel-TE-Messdaten.
- Einsatz moderner De-noising Verfahren, um Rauschen und Störsignale aus den Messdaten heraus zu filtern.
- Einführung von neuartigen robusten Ortungsalgorithmen zur Erhöhung der Ortungsgenauigkeit der Zeitbereichsreflektometrie.
- Entwicklung eines automatisierten Expertensystems zur objektiven Analyse und Auswertung von Kabel-TE-Messdaten.
- Entwicklung eines Modells zur Analyse von Mischkabelstrecken, Blindlängenbereichen und überlagerten Reflektogrammen sowie zur Durchführung einer modellbasierten Ortung.