

# Monitoring von Kabelsystemen - Möglichkeiten und Wirtschaftlichkeit

Ernst Gockenbach, Universität Hannover

## 1 Einführung

Der Begriff Monitoring bezeichnet im allgemeinen die kontinuierliche Erfassung von Betriebsdaten, die für eine Bewertung des Zustandes der überwachten Komponenten erforderlich sind. Die Erfassung der Daten soll dabei unter Betriebsbedingungen erfolgen, das heißt während des normalen Betriebs. In vielen Fällen wird auch eine periodische Prüfung bestimmter Eigenschaften mit Beeinträchtigung des Betriebs z.B. in Form des Freischaltens, als Monitoring bezeichnet. Die Auswertung der Daten unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten, Referenzwerten, Trendentwicklung des aufgezeichneten Parameters und Einflüssen von Systemgrößen führt dann zu einer Diagnose der Komponenten des Betriebssystems [1]. Das Monitoring von Kabelsystemen soll sich in diesem Beitrag auf polymerisierte Kabelsysteme beschränken und auf die Erfassung der für die Isolation entscheidenden Parameter. Diese Beschränkung hat keinen Einfluß auf die Allgemeingültigkeit der Aussagen, sondern führt lediglich zu einer Reduktion bzw. Konzentration auf die für polymerisierte Kabel wichtigen Parameter.

Ein Monitoringsystem besteht in der Regel aus einem Sensor zur lokalen Erfassung der Meßsignale, einem Übertragungssystem zur Weiterleitung der Signale und einem Erfassungs- und Speichersystem. Die Auswertung, Bewertung, Risikoanalyse und Festlegung von Maßnahmen ist dann Aufgabe eines Diagnosesystems, das sich an das Monitoringsystem anschließt. Die Integration eines Monitoringsystems in ein Diagnosesystem kann in vielen Fällen sinnvoll sein, da der für die Erfassung der zahlreichen Daten des Monitoringsystems erforderliche Rechner auch gleichzeitig die Aufgaben der Diagnose übernehmen kann. Im Rahmen eines dezentralen Monitoringsystems wird allerdings die Trennung von Monitoring und Diagnose erforderlich sein, da dann die erfaßten Daten lokal erfaßt und gespeichert werden und für die Aufgaben des Monitoring ausgewertet werden. Die Diagnose erfolgt dann an einem zentralen Rechner mit Hilfe der bereits ausgewerteten und komprimierten Daten der verschiedenen Monitoringsysteme. Bild 1 zeigt ein Schema für ein Monitoringsystem mit angeschlossenem Diagnosesystem.

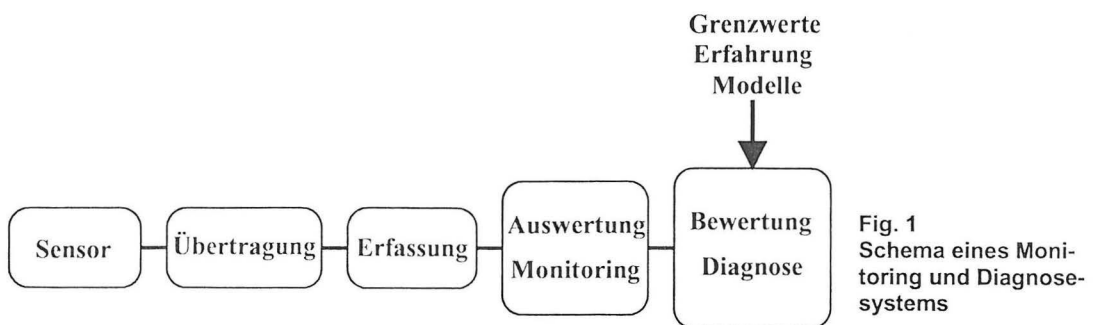


Fig. 1  
Schema eines Monitoring und Diagnosesystems

Die in Fig. 1 gezeigten Komponenten eines Monitoringsystems können in Abhängigkeit ihrer Aufgabe sehr unterschiedlich sein. Bei den Sensoren ist grundsätzlich noch zu unterscheiden zwischen Sensoren, die bereits im Zuge der Fabrikation des überwachten Gerätes eingebaut werden müssen, und Sensoren, die nachträglich installiert werden

können. Ein Beispiel für den ersten Typ Sensor ist der Wassersensor für ein Hochspannungskabel [2]. Hier muß der Sensor bereits während der Kabelfertigung eingefügt werden, da eine nachträgliche Installation unmöglich ist.

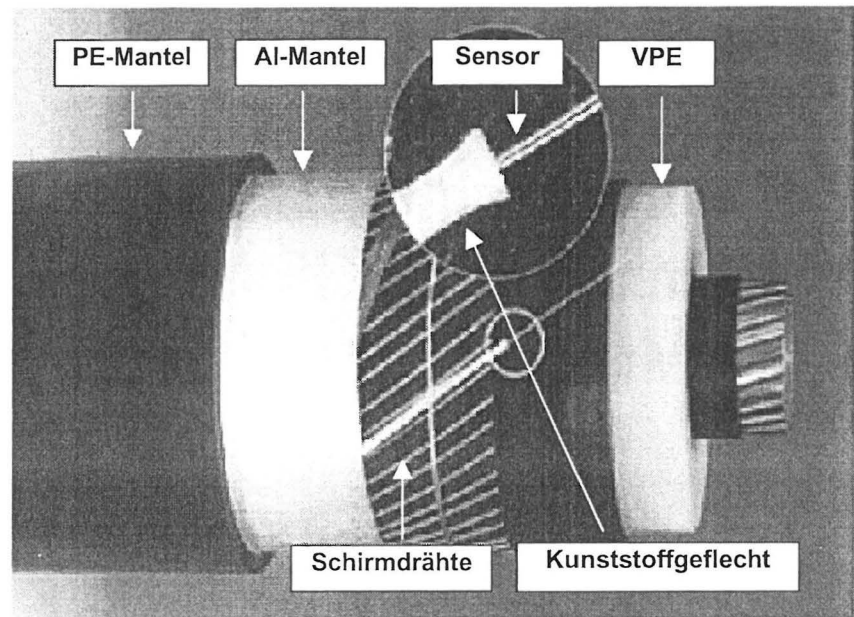


Fig. 2  
Wassersensor

Ein Beispiel für den zweiten Typ Sensor ist die Erfassung von Teilentladungen (TE) mit Hilfe eines induktiven oder kapazitiven Sensors in der Muffe oder am Kabelendverschluß [3]. Wenn die Durchführung bereits eine kapazitive Steuerung mit einem herausgeführten kapazitiven Belag besitzt, dann kann dieser für die TE Erfassung benutzt werden. Wenn dieses nicht der Fall ist, kann nachträglich ohne Schwierigkeiten ein kapazitiver Sensor angebracht werden. In Fig. 3 sind beispielhaft Sensoren an einem Freiluftendverschluß zu sehen.

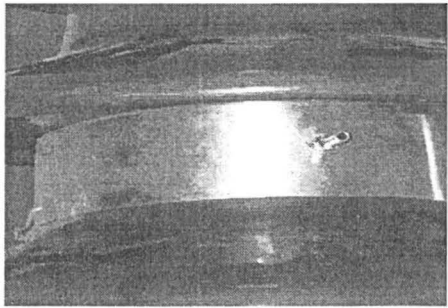
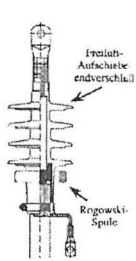


Fig. 3  
Sensoren an einem Freiluftendverschluß  
li: - induktiver Sensor  
re: - kapazitiver Sensor

Die Aufgabe der Sensoren ist es, die zu messende Größe möglichst störungsfrei und mit hoher Empfindlichkeit zu erfassen. Diese Anforderungen ist sehr wichtig, da eine spätere Bearbeitung des gemessenen Signals zwar eine Verbesserung hinsichtlich der Identifizierung der zu messenden Größe ermöglicht, aber eine störungsfreie Erfassung des Meßsignals nicht vollständig ersetzen kann. Weiterhin ist zu beachten, daß die Sensoren hinsichtlich ihrer Frequenzeigenschaften dem zu messenden Signal angepaßt sind, so daß keine Informationen bereits an der Stelle der Signalerfassungen verloren gehen. Ein im Hinblick auf eine kontinuierliche Erfassung von Signalen im Rahmen des Monitoring sehr wichtiger Punkt ist die Zuverlässigkeit des Sensors, insbesondere bei den in ein Gerät integrierten Sensoren. Die Zuverlässigkeit des gesamten Systems darf durch den Einsatz eines Sensors nicht so stark vermindert werden, daß der Nutzen des Monitorings durch diese Minderung der Zuverlässigkeit aufgehoben wird. Streng genommen erhöht jede

Komponente durch ihre eigene Ausfallrate, die nicht Null ist, die Ausfallrate eines Systems, aber durch geeignete Wahl und Erprobung kann die Erhöhung der Ausfallrate auf ein vertretbares Maß begrenzt werden. Grundsätzlich sollte der Ausfall eines Sensors nicht die Betriebstüchtigkeit des zu überwachenden Gerätes beeinträchtigen.

Das vom Sensor erfaßte Signal muß über eine Übertragungsstrecke der Meßwerterfassung zugeführt werden. Diese Übertragung kann durch ein einfaches Kabel oder einen Lichtwellenleiter erfolgen. Die Anforderungen an die Übertragung ergeben sich aus der einfachen Forderung der Signaltreue. Das vom Sensor kommende Signal soll ohne zusätzliche Störungen und Änderungen formtreu zur Meßwerterfassung übertragen werden. Die jeweils erforderlichen Vorkehrungen zur Erfüllung dieser Forderung sind sehr stark Geräte abhängig. Für den Einsatz in einem Monitoringsystem ist zu beachten, ob die Übertragung passiv oder aktiv erfolgt, so daß im letzten Fall für eine ausreichende und zuverlässige Energieversorgung zu sorgen ist.

Die dauerhafte Meßwerterfassung kann je nach Konzept des Monitoringsystems dezentral in der Nähe des Sensors oder zentral in einer Warte erfolgen. Die heute zur Verfügung stehenden digitalen Speichermöglichkeiten lassen für diese Komponente des Monitoringsystems keine Probleme erwarten. Ein Ausfall beeinträchtigt nicht den Betrieb des zu überwachenden Gerätes sondern lediglich die Aussagen des Monitoringsystems.

Der in Fig. 1 dargestellte Block „Auswertung, Monitoring“ soll verdeutlichen, daß eine einfache Auswertung wie Erreichen eines Grenzwertes bereits durch das Monitoringsystem selbst erfolgen kann. In Abhängigkeit der Systemphilosophie kann durch das Monitoringsystem auch bereits eine Aktion ausgelöst werden. In der Regel werden aber die durch das Monitoringsystem erfaßten Werte einem Diagnosesystem zugeführt, das unter Einbeziehung von weiteren Informationen wie Erfahrungen aus anderen Systemen, Plausibilitätskontrolle durch Modellbildung, Beachtung weiterer Meß- und Grenzwerte eine Analyse vornehmen kann. Die Ergebnisse dieser Analyse können dann zu Aktionen führen, die in Abhängigkeit der Systemphilosophie automatisch oder nach Kontrolle durch eine verantwortliche und erfahrene Person umgesetzt werden.

## 2 Komponenten eines Kabelsystems

Für ein Monitoringsystem eines Hochspannungskabels kann das Kabelsystem in die Komponenten Isolierung des Leiters, Kabelverbindungen (Muffen) und Kabelenden (Endverschluß) aufgeteilt werden. In allen drei Komponenten spielt der Zustand der Isolierung die wichtigste Rolle für die Betriebstüchtigkeit, so daß sich das Monitoringsystem auf die Erfassung dieser Eigenschaften konzentriert. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der Isolierung des Leiters und der Muffe sowie dem Endverschluß besteht darin, daß die räumliche Ausdehnung der Leiterisolierung eine zusätzliche Erschwernis für das Monitoring der dafür relevanten Parameter darstellt. Aufgrund der in der Regel vorhandenen großen Länge der Leiterisolierung werden lokal erzeugte Signale verändert und gedämpft, so daß die Erfassung und die Bewertung der nur an den jeweiligen Enden des Kabels zu erfassenden Signale erheblich erschwert wird. Zusätzlich ist oft nur eine integrale Erfassung der Signale möglich, so daß mit Hilfe des Monitoring zwar eine Aussage über den allgemeinen Zustand der Leiterisolierung, aber eine Aussage über möglicherweise vorhandenen lokale Schwachstellen nur bedingt möglich ist. Eine daraus abzuleitende Konsequenz ist die Forderung nach einer möglichst hohen Qualität des Isolierstoffes bei der Fertigung des Hochspannungskabels.

Muffe und Endverschluß sind räumlich begrenzt, so daß an diesen Komponenten ein Monitoringsystem auch Aussagen über den Zustand der jeweils überwachten Komponenten ermöglicht. Diese Komponenten können auch kritischer als die Leiterisolierung sein, da sie Vor-Ort montiert werden müssen. Eine Verbesserung und damit Absenkung des Gefährdungspotentials hat die Fertigung von sogenannten Aufschiebemuffen oder -endverschlüssen gebracht, die im Werk hergestellt und geprüft werden können und damit die Vor-Ort noch zu erledigenden Arbeiten erheblich reduzierten. Trotzdem bleiben die Muffen und Endverschlüsse die kritischsten Komponenten eines Kabelsystems [4]. Bezüglich der Übertragung der gemessenen Signale ist noch zu ergänzen, daß die räumliche Ausdehnung eines Kabels auch für die Erfassung der Signale an den Muffen eine besondere Aufgabe darstellt, da in der Regel Muffen nicht zugänglich sind und im Zuge der Kabelstrecke liegen, so daß für die Signalübertragung zusätzliche Aufwendungen erforderlich sind. Bei einer aktiven Signalübertragung ist dann eine zusätzliche Energieversorgung notwendig.



Zur Entwicklung eines Monitoringsystems für Hochspannungskabel ist es erforderlich, den Zweck und das Ziel des Monitoring bzw. der Diagnose zu definieren. In der Regel wird von einem Monitoringsystem erwartet, daß es Hinweise auf die Veränderungen der elektrischen Isolierung liefert und damit eine Bewertung des aktuellen Zustandes und der noch zu erwartenden Lebensdauer ermöglicht. Unter diesen Randbedingungen ist es erforderlich, die Parameter, die für die Isolationseigenschaften wichtig sind, sowie die Signale von Fehlern zu kennen, die möglicherweise die Isolationseigenschaften im Laufe der Zeit unzulässig beeinträchtigen.

Ein für Polymerisierungen bekanntes Verhalten ist die Empfindlichkeit auf geringste Verunreinigungen und Feldstärkeerhöhungen im Isolierstoff. Bei einem entsprechenden Temperaturgradienten und vorhandener Feuchtigkeit bilden sich an diesen Stellen die sogenannten „water trees“, die sich langsam vergrößern und bei entsprechender elektrischer Beanspruchung zu „electrical trees“ wandeln und dann zu einem Durchschlag der Isolierung führen. Eine weitere mögliche Ursachen für eine Absenkung der Lebensdauer sind lokale Zerstörungen des Isolierstoffes durch Teilentladungen in kleinen Hohlräumen. Die Feldstärke in den im allgemeinen mit einem Gas gefüllten Hohlräumen ist ein Vielfaches der Feldstärke im festen Isolierstoff in Abhängigkeit des Verhältnisses der Dielektrizitätszahlen. In Fig. 4 sind beispielhaft die verschiedenen Ursachen für eine Reduktion der Isolierfähigkeit eines polymeren Isolierstoffes dargestellt.

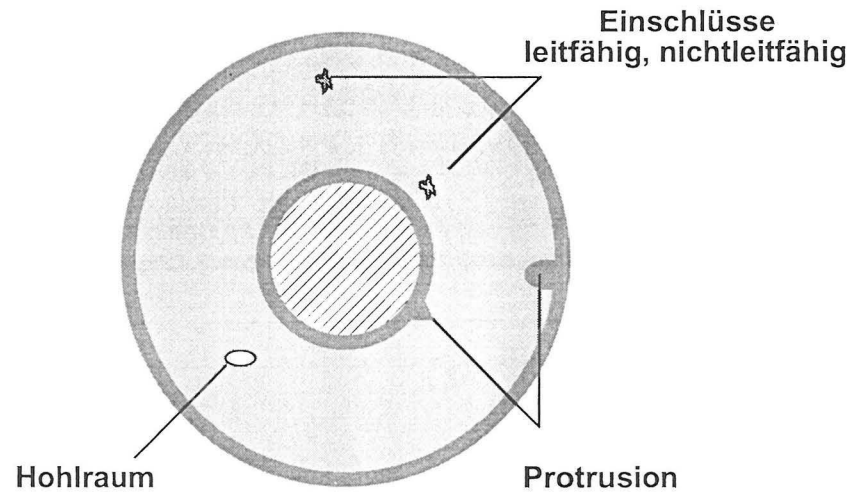


Fig. 4  
Querschnitt eines polymerisolierten Kabels

Eine weitere wichtige Größe ist die Temperatur des Isolierstoffes. Die elektrische Festigkeit von polymeren Isolierstoffen sinkt mit der Beanspruchungszeit, wobei die elektrische Feldstärke und die Temperatur die bestimmenden Parameter sind. In einem Hochspannungskabel tritt die höchste Temperatur am Innenleiter auf, da dort die größten Verluste entstehen. Aufgrund der coaxialen Anordnung ist auch die Feldstärke an dieser Stelle am höchsten, so daß beide die Alterung mitbestimmenden Parameter an derselben Stelle ihr Maximum aufweisen. In Fig. 5 ist der Verlauf der elektrischen Durchschlagfestigkeit eines polymeren Isolierstoffes über der Zeit aufgetragen. Diese Gerade gilt für polymere Isolierstoffe mit geringem Verlustfaktor, bei denen ein Wärmedurchschlag in der Regel nicht auftritt. Aufgrund der einfachen Beziehung ist eine Extrapolation von Zeiten geringer Beanspruchungsdauer zu den Zeiten möglich, die für eine Lebenszeit eines Hochspannungskabels verlangt werden, und die langjährigen Erfahrungen und die fertigungsbegleitenden Prüfungen haben gezeigt, daß sich der in Fig. 5 dargestellte Zusammenhang zwischen Durchschlagfeldstärke und Betriebszeit bei fehlerfreien Hochspannungskabeln auf den reinen Isolierstoff gut anwenden läßt.

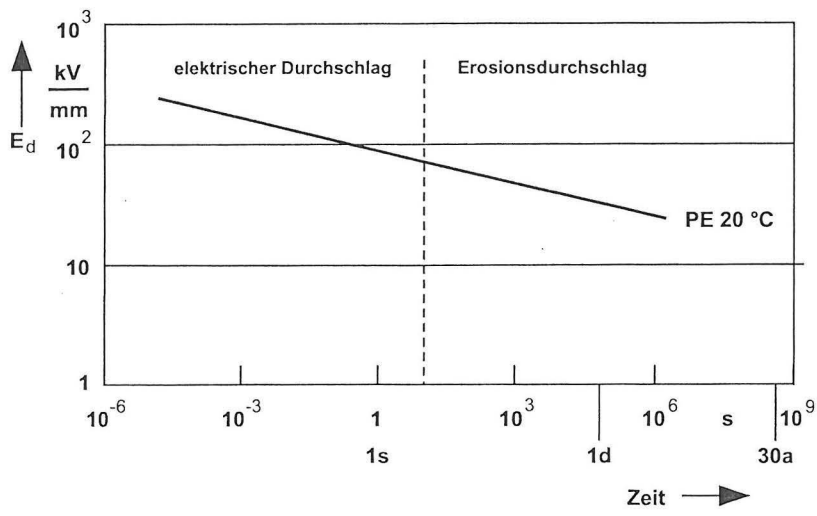


Fig. 5  
Durchschlagfeldstärke  
von PE in Abhängigkeit  
der Zeit

Eine Erhöhung der Temperatur bedeutet, daß sich ein etwa gleicher Verlauf der Feldstärke über der Zeit ergibt, die Kurve sich aber zu niedrigeren Feldstärkewerten verschiebt. Eine Berücksichtigung der kombinierten thermischen und elektrischen Beanspruchung mit Grenzwerten der Feldstärke und der Temperatur  $E_o$  und  $T_o$ , unterhalb derer keine Alterung mehr auftritt, ist in Fig. 6 dargestellt [4]. Diese Annahme ist für technische Anordnungen von geringer Bedeutung, da in der Regel diese Grenzwerte erst bei Betriebszeiten erreicht werden, die außerhalb der üblichen Lebensdauererwartung liegen.

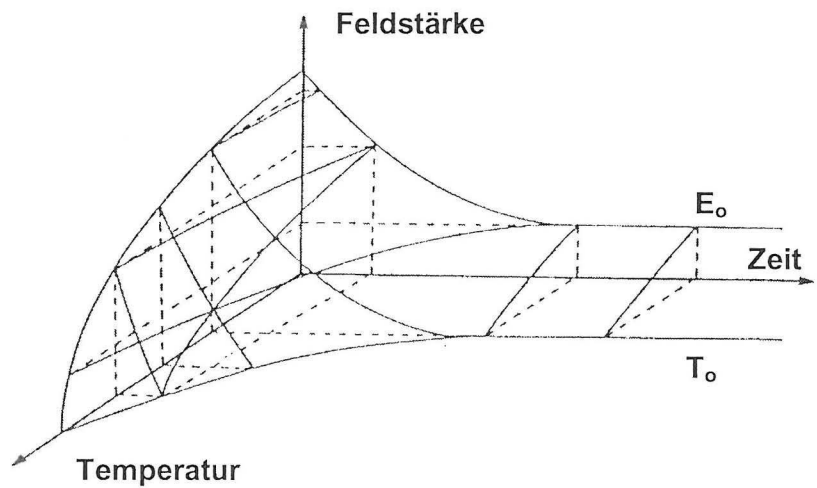


Fig. 6  
Feldstärke in Abhän-  
gigkeit der Temperatur  
und der Zeit

In den letzten Jahren sind weitere Parameter für das Monitoring hinzugekommen, die sich auf das Ladungs- und Entladungsverhalten des Dielektrikums stützen [6]. Eine seit langem bekannte Größe zur Beurteilung eines Dielektrikums ist der Verlustfaktor, der im allgemeinen durch den  $\tan \delta$  ausgedrückt wird. Der Verlustfaktor stellt ein Maß für die Verluste innerhalb des Isolierstoffes dar, die sich aus der Art des Isolierstoffes aber auch aus dem aktuellen Zustand der Polymermatrix ergeben. Diese Effekte treten bei Wechselspannung und auch bei Gleichspannung auf, wobei sich die Veränderungen z.B. durch Feuchtigkeitsanlagerung stärker bei niedrigen Frequenzen bemerkbar machen. Fig. 7 zeigt vereinfacht das Ersatzschaltbild eines polymeren Isolierstoffes, wobei jede Kombination von Widerstand und Kondensator einem Polarisationsmechanismus, - Elektronenpolarisation, Ionenpolarisation, Orientierungspolarisation und Grenzflächenpolarisation -, entspricht.

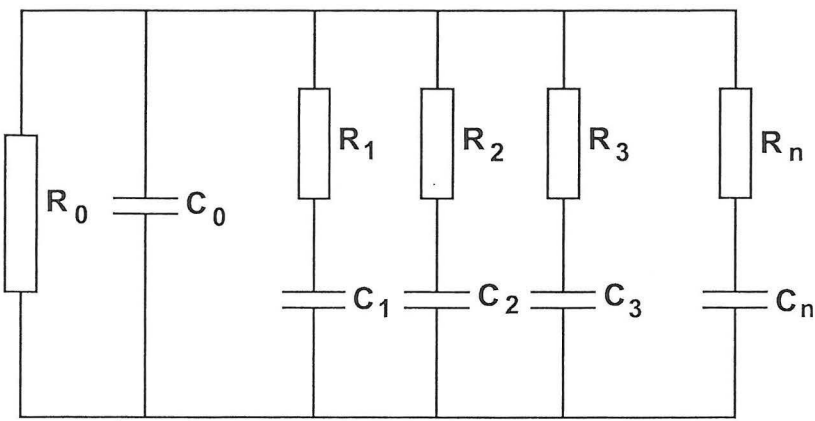


Fig. 7  
Ersatzschaltbild eines  
polymeren Isolierstoffes

Je nach Art des Meßsystems für die jeweilige dielektrische Größe wird bei hochohmigem Abschluß die sich durch die Polarisierung bzw. Depolarisation aufbauende Wiederkehrspannung oder bei niederohmigem Abschluß der durch die Wiederkehrspannung getriebene Polarisations- bzw. Depolarisationsstrom gemessen.

Die Elemente  $R_0$  und  $C_0$  stellen den Widerstand und die Kapazität der Anordnung Leiter - Außenleiter dar, die vor Beginn der Messung des Polarisationsstromes oder der Wiederkehrspannung entladen wird.

## 4 Beschreibung der Monitoringsysteme

Die im folgenden beschriebenen Monitoringsysteme werden in drei Gruppen eingeteilt:

- Monitoringsysteme mit Sensoren, die in das zu überwachende Gerät integriert sind, und bei denen keine Nachrüstung der Sensoren möglich ist,
- Monitoringsysteme mit nachträglich einzubringenden Sensoren,
- Monitoringsysteme mit Beeinflussung des Betriebes

Diese Einteilung unterscheidet zugleich zwischen Monitoringsystemen für bereits vorhandene Kabelsysteme und Monitoringsystemen für neue Kabelsysteme.

### 4.1 Monitoringsysteme mit integrierten Sensoren

Die Erfassung der Temperatur entlang der Kabelstrecke kann durch einen Lichtwellenleiter erfolgen, der im Kabel integriert ist. In Abhängigkeit der Position des Lichtwellenleiters zur Isolierung ist zur Beurteilung der Temperatur im Isolierstoff eine Modellierung der thermischen Verhältnisse im Kabel erforderlich. Der Lichtwellenleiter wird während der Kabelfertigung in der Regel im Bereich der Schirmdrähte untergebracht. Zum Schutz gegen mechanische Beanspruchungen ist der Lichtwellenleiter mit einem metallischen Schutzröhrchen versehen.

Die Wirkungsweise der Temperaturmessung und der Ortung der Stellen mit relevanter Temperaturveränderung basiert auf dem sogenannten Raman-Effekt, bei dem sich in Abhängigkeit der Temperatur Brechung und Streuung des Lichtes ändern. Der Einsatz dieses Temperaturmonitoringsystems verlangt neben der Installation des Lichtwellenleiters eine hochwertige Lichtquelle und empfindliche Erfassung der reflektierten Lichtsignale. Fig. 8 zeigt das Ergebnis einer Temperaturmessung mit einem Lichtwellenleiter [7].

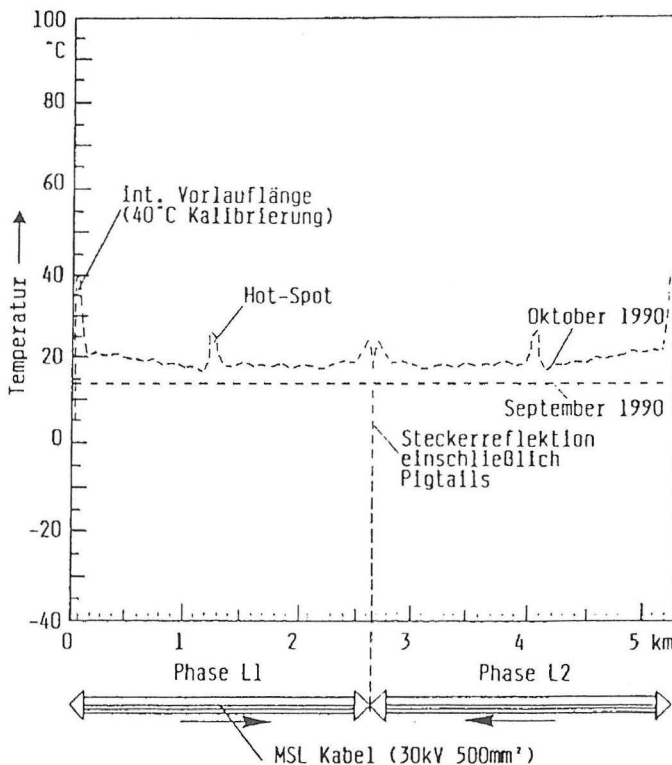


Fig. 8  
Temperaturverlauf  
entlang einer  
Kabelstrecke

Es ist gut der in beiden Phasen auftretende sogenannte „Hot-Spot“ zu erkennen. An dieser Stelle ist die Wärmeabfuhr für das Kabel gestört und stellt möglicherweise für die Beanspruchung des Kabelsystems die kritische Stelle dar, falls keine Abhilfe bezüglich der Wärmeabgabe geschaffen werden kann.

Das Wassermonitoringsystem dient zur Feststellung und der Ortung eines möglichen Wassereindringens in den Schirmbereich. Dieser Vorgang kann z.B. durch einen schadhaften Mantel oder durch Beschädigung des Mantels bei Erdarbeiten hervorgerufen werden. Da das eindringende Wasser die Bildung von „water trees“ sehr stark fördert, ist ein rechtzeitiges Erkennen und Lokalisieren eine hervorragende Schutzmaßnahme gegen diese Ausfallursache. Der Wassersensor wird während der Kabelfertigung an Stelle eines Schirmdrahtes eingebracht. Er besteht aus einem dünnen Widerstandsdraht mit einer wasserdurchlässigen Umhüllung. Aufgrund des geringen Durchmessers fügt er sich wie ein Schirmdraht in die Konstruktion des Kabels ein, so daß hier keine Veränderung der Kabelsystemeigenschaften zu erwarten sind. Fig. 9 zeigt ein Hochspannungskabel mit integriertem Wassersensor.

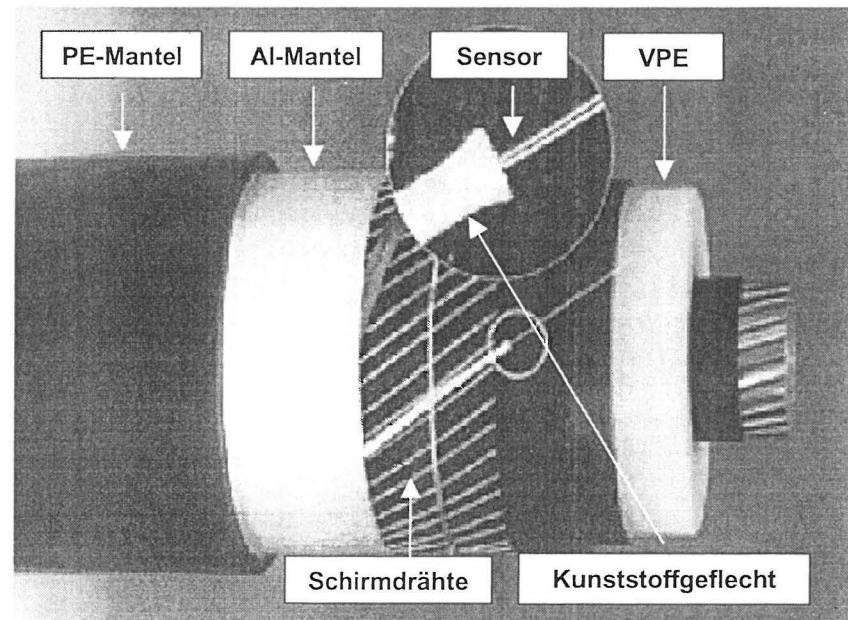
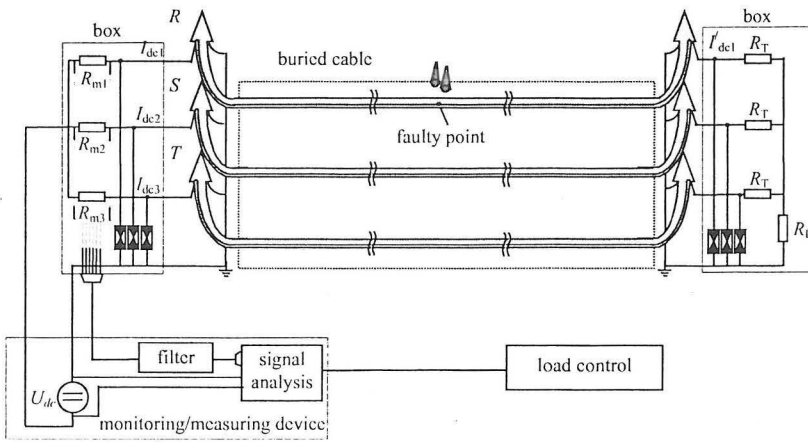


Fig. 9  
Polymerisoliertes Kabel  
mit Wassermonitoring-  
system

Die Vergrößerung des Sensordrahtes zeigt deutlich die Isolierhülle, die wasserdurchlässig ist, und somit im Falle des Eindringens von Wasser in den Bereich der Schirmdrähte einen Kurzschluß zwischen dem Sensordraht und den übrigen Drähten des Schirmes hervorruft.

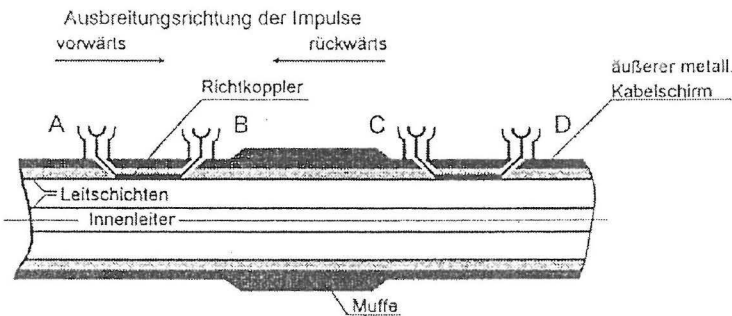
Die Detektion des Wassers erfolgt durch eine kontinuierliche Messung des Widerstandes und die Ortung durch ein Bestimmen der Widerstandsverhältnisse zwischen Meßort und Fehlerstelle. Es sind eine Spannungsquelle und eine Meßeinrichtung zur Ermittlung der Widerstände bzw. des Fehlerortes erforderlich. Da bei der Kabelinstallation die Schirmdrähte mit der Betriebserde verbunden werden, ist die Behandlung des Sensordrahtes nur eine sehr geringe zusätzliche Arbeit. Fig. 10 zeigt das Schaltbild für ein dreiphasiges Wassermonitoringsystem [2].



**Fig. 10**  
Ersatzschaltbild für ein  
drei-phasiges Wasser-  
monitoringsystem

Durch die entsprechende Beschaltung der Wassersensoren in den drei Phasen sind die Einrichtungen zur Erfassung des Fehlers bzw. zur Bestimmung des Fehlerortes nur an einem Kabelende erforderlich.

Ein Monitoringsystem für die Erfassung von Teilentladungen im Isolierstoff mit integrierten Sensoren ist in Fig. 11 dargestellt. In den Kabelmuffen sind an beiden Seiten je zwei Sensoren integriert, die hochfrequente Signale der TE erfassen[8].



**Fig. 11**  
Richtungsselektive TE-  
Sensoren

Diese Sensoren können aufgrund der Laufzeit und Richtung der Sensorsignale zwischen TE in der Muffe und in der Kabelisolierung unterscheiden, wobei die Entscheidungsfindung anhand einer Matrix vorgenommen wird. Da die in der Kabelisolierung auftretenden TE-Signale auf ihrem Weg zum Sensor gedämpft werden, die Muffen aber bezüglich der Ausfallrate infolge TE die kritischeren Elemente darstellen, werden durch diese Anordnung zwei Vorteile erreicht:

- der kritische Teil des Kabelsystems, die Muffe, kann aufgrund der räumlichen Nähe der Sensoren sehr empfindlich überwacht werden,
- der unkritische Teil des Kabelsystems, die Leiterisolierung, wird ebenfalls mit angemessener Empfindlichkeit überwacht.

Da die TE-Signale impulsförmig sind und stochastisch verteilt auftreten, ist eine kontinuierliche Messung und eine daraus abgeleitete Auswertung erforderlich. Dazu ist eine sinnvolle Datenreduktion mit einer Erfassung der wichtigsten Parameter der Messung notwendig. In diesem Monitoringsystem für TE wird gegenüber dem Temperaturmonitoring mit seiner kontinuierlich anstehenden Information sowie dem Wassermonitoring mit seiner ereignisorientierten Information eine aus sehr vielen Einzelereignissen bestehende und aus der Auswertung dieser Einzelereignisse sich ergebende Information benötigt. Neben der Behandlung der sehr großen Datenmengen ist daher auch eine gewichtete Bewertung der



Ergebnisse des Monitoring notwendig. Ein weiteres Problem beim Monitoring von TE ist die Trennung von Nutz- und Störsignalen, das aber hier nicht weiter ausgeführt werden soll, da es nicht eine Frage des Monitorings sondern allgemein der TE-Messung darstellt [9, 10].

## 4.2 Monitoringsysteme mit nachrüstbaren Sensoren

TE-Monitoring ist in Kabelsystem auch mit nachrüstbaren Sensoren möglich. Voraussetzung ist ein Zugang zum ungeschirmten Kabelbereich, in dem dann die Sensoren angebracht werden können. Fig. 12 zeigt eine einfache Anordnung eines kapazitiven Sensors an einer Freiluftdurchführung. Die Signalübertragung erfolgt über einen Lichtwellenleiter. Die Energie für den Ankopplungsvierpol kann entweder durch eine Batterie oder durch Solarzellen zur Verfügung gestellt werden.

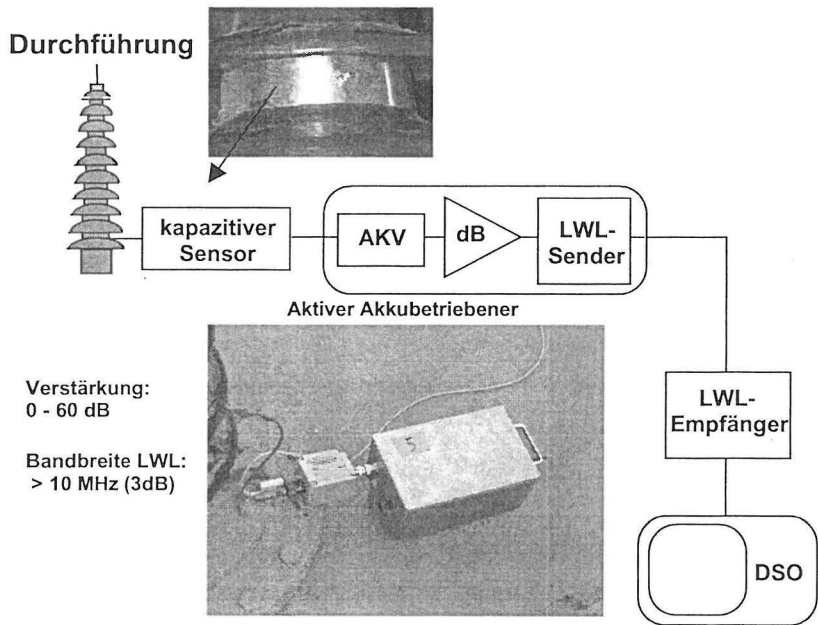


Fig. 12  
Kapazitiver TE-Sensor

Eine andere Möglichkeit für nachrüstbare Sensoren stellt die sogenannte Rogowskispule dar, mit der ein richtungsselektiv ein TE-Signal erfasst werden kann [10]. Zur Verdeutlichung der Funktionsweise ist in Fig. 13 zunächst eine einfache Skizze dargestellt.

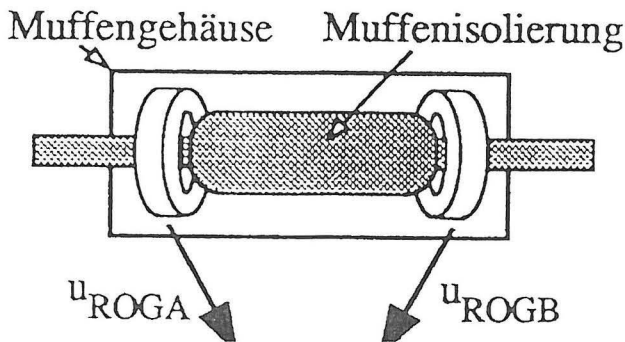
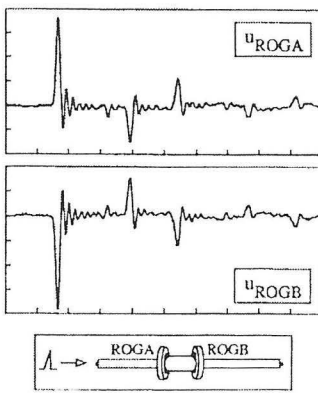


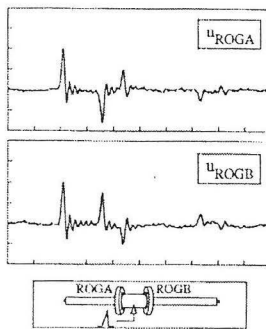
Fig. 13  
Skizze der Anordnung  
der Rogowskispulen für  
TE-Messung

In Abhängigkeit der Laufrichtung des zu messenden Signals sind die von den beiden Rogowskispulen abgegebenen Messsignale  $u_{RogA}$  und  $u_{RogB}$  positiv oder negativ. Durch eine Kalibration kann die Signalpolarität ermittelt werden. In den beiden folgenden Fig. 14 und 15 sind Beispiele für Signale der Rogowskispulen in Abhängigkeit des Ortes der TE-Quelle und der Orientierung der Sensoren dargestellt.



**Fig. 14**  
Messung eines TE-Signals, dessen Quelle außerhalb der mit Sensoren ausgestatteten Muffe liegt

Aufgrund der Orientierung der Sensoren ergibt sich für die Spule A ein positives und für die Spule B ein negatives Signal, wenn die Laufrichtung des zu messenden TE-Signales für beide Sensoren gleich ist. Eine einfache Addition der Signale führt für diesen Fall zu einem Summensignal von etwa Null, wenn beachtet wird, daß sich die Signale der beiden Sensoren nicht vollständig gleichen.



**Fig. 15**  
Messung eines TE-Signals, dessen Quelle innerhalb der mit Sensoren ausgestatteten Muffe liegt

In Fig. 15 ist gut zu erkennen, daß die Sensoren so orientiert sind, daß bei ungleicher Laufrichtung des zu messenden TE-Signales die Sensorsignale die gleiche Polarität aufweisen. In diesem Fall führt die einfache Addition der Signale zu einem hohen Summensignal, da sich die Signale der Sensoren addieren.

Es ist zu beachten, daß die Signale bei einem Vor-Ort eingesetzten Monitoringsystem durchaus nicht immer so eindeutig zu erkennen sind, wie es in den Messungen in Fig. 14 und 15 gezeigt wird, denn auch hier gilt es, die bereits erwähnte Problematik bezüglich der Beeinflussung des Nutzsignals durch Störsignale bei Vor-Ort Bedingungen zu lösen.

### 4.3 Monitoringsysteme mit Beeinflussung des Betriebes

Die folgenden Monitoringsysteme verletzen eigentlich eine Grundvoraussetzung eines Monitoringsystems, nämlich die Erfassung der Daten unter Betriebsbedingungen. Sie sollen aber in diesem Beitrag trotzdem dargestellt werden, da der Begriff Monitoring auch auf diese Systeme erweitert werden kann, wenn darunter die regelmäßige Beschaffung von Informationen zur Beurteilung des Zustandes der Isolierung eines Kabelsystems verstanden wird. Das zu bewertende Kabelsystem muß für diese Art von Monitoring außer Betrieb genommen werden. Die Beanspruchung während der Erfassung der für die Bewertung erforderlichen Daten ist sehr gering und kann vernachlässigt werden. Es ist auch zu beachten, daß diese Art des Monitoring nur sich langsam verändernde Größen sinnvoll

erfassen kann, denn aufgrund der Betriebsbeeinträchtigung ist eine Aufnahme der für das Monitoring erforderlichen Daten nur in hinreichend großen Zeitabständen vernünftig.

Das in Fig. 7 dargestellte Ersatzschaltbild des Dielektrikums eines Kabelsystems stellt die Basis für die folgenden Monitoringsysteme dar, die den Relaxationsstrom oder die Wiederkehrspannung als Monitoringparameter benutzen. Das Dielektrikum wird zunächst mit einer Gleichspannung eine bestimmte Zeit aufgeladen, damit sich die im Dielektrikum befindlichen Dipole der Feldrichtung entsprechend ausrichten können. Nach der Aufladung erfolgt ein Kurzschließen des Prüflings, um die Kabelkapazität  $C_0$  zu entladen. Anschließend wird der Kurzschluß aufgehoben und der Entladestrom gemessen und zur besseren Interpretation der Vorgänge im Isolierstoff als Produkt Strom x Zeit bzw. Ladung über der Zeit aufgetragen [11]. Fig. 16 zeigt zunächst den isothermen Relaxationsstrom als Funktion der Zeit. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitkonstanten der Vorgänge im Isolierstoff ist hier nur ein exponentieller Abfall des Stromes zu erkennen. Es ist daher für das Monitoring wichtig, den Stromverlauf zu Beginn der Entladung zu analysieren und daraus auf eine Änderung des Zustandes der Isolierung zu schließen.

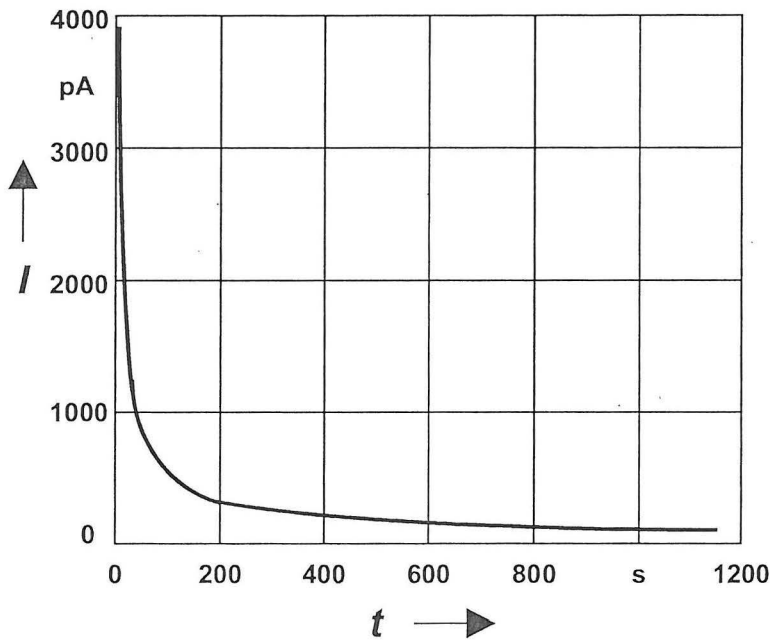


Fig. 16  
Isothermer  
Relaxationsstrom

Die Temperatur spielt eine wichtige Rolle für die jeweiligen Werte Polarisationsmechanismen, so daß darauf zu achten ist, daß nicht durch unterschiedliche Bedingungen bei der Erfassung des Relaxationsstromes eine fehlerhafte Aussage entsteht. In Fig. 17 ist die zeitliche Auflösung des Relaxationsstromes in Form des Produktes Strom x Zeit über der Zeit in logarithmischer Teilung und in Fig. 18 der Vergleich zwischen den Ergebnissen der Restfestigkeitsmessungen nach DIN VDE 0276-620 (1996-12) und dem aus den isothermen Relaxationsstrommessungen ermittelten Alterungsfaktor dargestellt.

Nach den hier dargestellten Ergebnissen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der Restfestigkeit und dem Alterungsfaktor, so daß eine Bewertung der Kabelisolierung möglich erscheint. Die Abnahme der elektrischen Festigkeit von Kabelisolierungen innerhalb von 2 Jahren ist bekannt und durch viele Prüfungen der Kabelhersteller bestätigt [12]. Für das Monitoring ist aber der Zeitbereich nach 2 Jahren von Bedeutung, in dem sich die Alterung nicht mehr so deutlich in der Abnahme der Restfestigkeit bemerkbar macht. Es ist daher zu klären, ob diese Methode empfindlich genug für Aussagen bezüglich der Alterung ist, ob sie sich auf Kabel unterschiedlicher Konstruktion und Hersteller erweitern läßt, oder ob lediglich eine vergleichende Aussage anhand von Referenzmessungen und sich daran anschließenden Messungen und Bewertungen möglich ist.

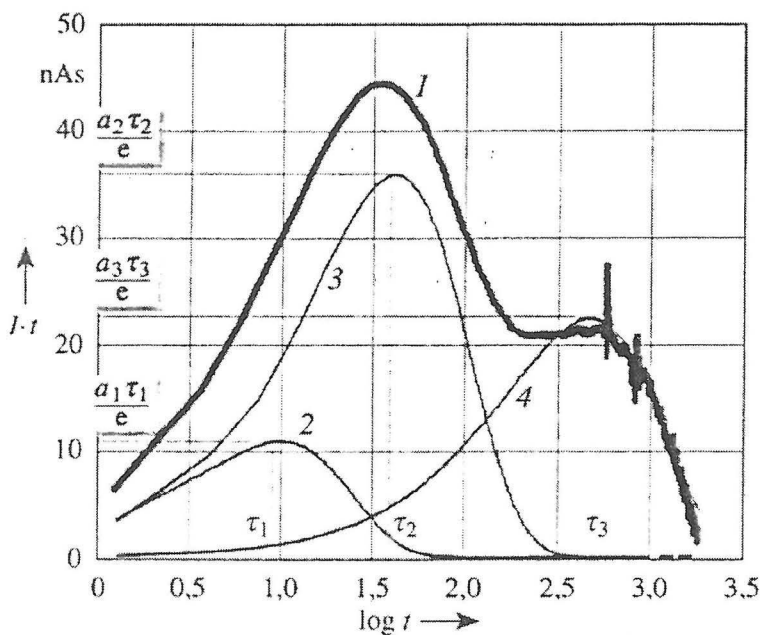


Fig. 17  
Isothermer  
Ladungsausgleich

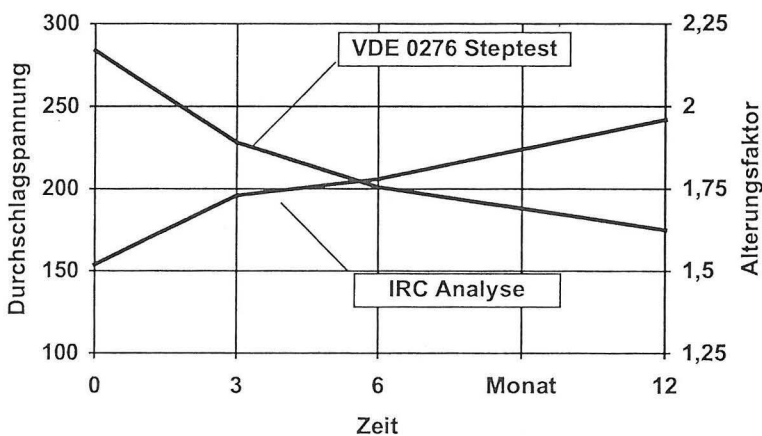


Fig. 18  
Ergebnisse der  
Langzeitprüfung und  
des Alterungsfaktors

Bei der Wiederkehrspannungsmessung erfolgt nach der Aufladung ebenfalls eine Entladung, deren Dauer häufig in einem bestimmten Verhältnis zur Aufladezeit steht. Diese Entladung dient dazu, die Kapazität des Dielektrikums zu entladen, die sich auch ohne Dielektrikum aus dem Aufbau des Kabels, Leiter - äußere Leitschicht in coaxialer Anordnung, ergibt. Nach dieser ersten Entladung wird das Dielektrikum sich selbst überlassen und es baut sich mit der Zeit eine Spannung auf, die sich aus der Umorientierung der im Dielektrikum befindlichen Dipole und des damit verbundenen Ladungsaustausches ergibt. Dieser Effekt klingt mit der Zeit ab, so daß nach einer hinreichend langen Zeit das Dielektrikum als elektrisch neutral angesehen werden kann, wobei die Zeitkonstante von der Art des Isolierstoffes und dem Zustand abhängt.

Es ist gut in Fig. 19 zu erkennen, daß eine starke Veränderung der Wiederkehrspannung bei der Aufnahme von Wasser erfolgt. Eine thermische Alterung allein hat nur geringen Einfluß auf die Wiederkehrspannung, die Wirkung einer kombinierten elektrischen und thermischen Alterung bezüglich der Änderung der Wiederkehrspannung ist nicht bekannt. Für

Transformatoren und Generatoren scheint die Wiederkehrspannung ein möglicher Parameter für Monitoring zu sein, wobei Amplitude der Wiederkehrspannung und die Zeit bis zum Scheitelwert in die Bewertung einbezogen und die Lade- und Entladezeiten variiert werden. Für polymerisierte Kabel scheint dieses Verfahren nur bedingt tauglich zu sein, da die Änderungen nach Fig. 19 nur bei erheblichem Einfluß von Wasser deutlich erkennbar sind. Es ist allerdings noch zu untersuchen, ob hinsichtlich einer Alterung die Änderung der Wiederkehrspannung hinreichend groß ist, um durch vergleichende Messungen wenigstens eine Abschätzung der Restlebensdauer zu ermöglichen. Fig. 19 zeigt den typischen Verlauf einer Wiederkehrspannung eines polymerisierten Kabels [13].

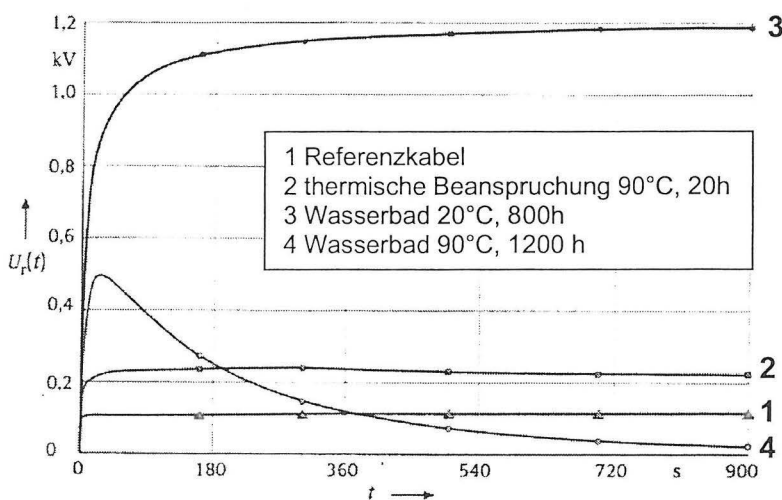


Fig. 19  
Wiederkehrspannung

In die gleiche Gruppe der Monitoringsystem gehört die Messung des Verlustfaktors  $\tan \delta$ . Zur Erhöhung der Empfindlichkeit wird bei dieser Methode eine sehr niedrige Frequenz von z.B. 0,1 Hz gewählt, so daß auch hier eine Abschaltung des Kabels und eine externe Spannungseinspeisung erforderlich ist. Die für das Monitoring gewählte Spannung ist in der Regel relativ niedrig, so daß auch hier eine Beeinträchtigung der Isolierstoffeigenschaften durch das Monitoring vernachlässigt werden kann. Die Bewertung des Isolierstoffes ist ebenfalls von den jeweiligen Grundeigenschaften des untersuchten Kabelsystems abhängig, so daß eine vergleichende Aussage im Hinblick auf eine Veränderung des Dielektrikums möglich ist, aber eine absolute Aussage nur in groben Unterteilungen erfolgen kann [14].

## 5 Wirtschaftliche Bewertung

Zur wirtschaftlichen Bewertung von Monitoringsystemen sind zunächst die Randbedingungen festzulegen, unter denen die Wirtschaftlichkeit beurteilt wird. Die Deregulierung der elektrischen Energieversorgung in Deutschland hat dazu geführt, daß auf dem elektrischen Energiemarkt eine gewisse Konkurrenzsituation entstanden ist. Die Energieversorgungsunternehmen haben ihre Monopolsituation bezüglich der vereinbarten und festgelegten Versorgungsgebiete verloren, so daß in den neuen Angeboten der Energieversorgungsunternehmen Begriffe wie sichere Energieversorgung, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Ausfallzeiten usw. zu finden sind oder zukünftig enthalten sein werden. Zusätzlich haben die Betriebsmittel im Bereich der Energieübertragung und -verteilung ein gewisses Alter erreicht, so daß eine Verlängerung der Nutzungsdauer und bei Investitionen für Ersatzanlagen die Auswahl der zu erneuernden Kabelsysteme von hoher wirtschaftlicher Bedeutung ist [15]. Die Qualität der elektrischen Energie bezüglich der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit wird zukünftig eine sehr wichtige Rolle für bestimmte strategisch bedeutsame Kabelsysteme spielen. Ergänzend können durch ein Monitoringsystem in der Regel der Schaden und die Kosten für die Beseitigung des Schadens begrenzt werden.

Die Investition in ein Monitoringsystem ist z.B. für folgende Situationen denkbar:

- Errichtung eines neuen Kabelsystems mit einem integrierten Wassersensor in einem Industriegebiet mit hoher Bautätigkeit oder hohem Feuchtigkeitsgehalt des Erdreiches
- Errichtung eines neuen Kabelsystems mit TE-Erfassung in den Muffen mit sehr hoher Bedeutung für die Versorgungssicherheit und mit technologischem Risiko
- Ermittlung der Restlebensdauererwartung der Kabelsysteme zur Planung der Investitionen für Ersatzbeschaffungen in einem größeren Netzbereich
- Ermittlung der Restlebensdauererwartung eines Kabelsystems, welches einen besondere strategische bzw. versorgungstechnische Bedeutung hat

Im ersten Fall des Monitoring eines möglichen Wassereintrittes und einer kontinuierlichen Ermittlung der Kabelmanteleigenschaften sind die Kosten für die Investitionen für das Kabelsystem mit Sensor gering und liegen im Bereich von einigen Prozent der Kabelkosten. Die zusätzlichen Arbeiten an den Endverschlüssen und die Installation der Meßeinrichtung sind ebenfalls nicht aufwendig, so daß die Anfangsinvestitionen um einige Prozent höher sind im Vergleich zu einem Kabelsystem ohne Monitoring. Die vor der ersten Inbetriebnahme durchzuführende Kabelmantelprüfung ist zwar bezüglich ihrer Empfindlichkeit auf einen Mantelfehler besser, aber sie liefert nur eine Aussage für den Moment der Prüfung. Die im Verlauf der Nutzung des Kabelsystems auftretenden Mantelfehler können jedoch nur durch das Monitoringsystem erfaßt werden.

Die Kosten für eine Reparatur der Fehlerstelle sind zunächst unabhängig davon, ob das Kabelsystem mit oder ohne Monitoringsystem ausgestattet ist. Der Vorteil der Monitoringsystems liegt in der Vorwarnung des Wassereintrittes und des Verhinderns der Ausbreitung der Fehlerstelle. Damit lassen sich die Reparaturen planen und nur auf den betroffenen Bereich beschränken. Im Falle einer Beschädigung des Kabelsystems durch Bauarbeiten können in der Regel auch die Verursacher ermittelt werden. Eine Kostenabschätzung zur wirtschaftlichen Bewertung eines Monitoringsystems mit einem Wassersensor ist sehr schwierig, da viele Annahmen getroffen werden müssen und die Kosten für bestimmte Arbeiten sich auch stark ändern können. Eine vereinfachte Abschätzung soll hier aber trotzdem versucht werden.



Ein 110 kV polymerisiertes Kabel kostet etwa 50.000 EUR pro km. Die Kosten für das Monitoringsystem werden zu 5 % der Kabelkosten angenommen, so daß sich ein Investitionsbetrag von 125.00 EUR für eine angenommene Kabellänge von 50 km ergibt. Für eine Betriebsdauer von 10 Jahren ergibt sich somit ein Betrag von etwa 200.000 EUR bei einer angenommenen Verzinsung des Kapitals mit 5 %. Diese Kosten werden unmittelbar durch die Vermeidung eines einzigen Ausfalls der Energieübertragung über das 110 kV Kabelsystem kompensiert, da bei einer Übertragungsleistung von etwa 100 MW und einem Preis von 10 ct pro kWh bereits die Energielieferung eines Tages diesen Betrag ausmacht. Das Wassermontoring ist somit eine Art Versicherung mit einer niedrigen Investition, und einer bereits durch die Vermeidung eines einzigen Ausfalls der Energieversorgung möglichen Rückzahlung.

Das zweite Beispiel ist die TE Überwachung innerhalb eines neuen Kabelsystems, die für die Prüfung bei der Inbetriebnahme und für das spätere Monitoring während des Betriebes genutzt werden kann. Für ein polymerisiertes Kabel mit einer Betriebsspannung von 400 kV liegen die Kosten pro km bei ca. 400.000 EUR. Für eine ähnliche Fehlerrate und Verzinsung wie im Beispiel für ein 110 kV polymersioliertes Kabel ergibt sich bei einer Länge von 5 km ein Betrag von ca. 65.000 EUR. Bei einer Übertragungsleistung von 400 MW und einem Preis von 10 ct pro kWh ergibt sich für dieses Beispiel eine Rückzahlung der Investitionskosten bei einem Ausfall von ca. 2 Stunden.

Ausschlaggebend für den Einsatz des TE-Monitoring der Muffen waren neben wirtschaftlichen Aspekten auch die strategische Bedeutung des Kabelsystems sowie die technologische Herausforderung in Form des Einsatzes polymerisierter Kabel für höchste Übertragungsspannungen. Die für die Erfassung erforderlichen Meßeinrichtungen wurden in der Menge beschafft, daß bei der Prüfung jeweils die in einem Prüfabschnitt liegenden Muffen erfaßt werden konnten. Im späteren Betrieb können dann die Meßeinrichtungen auf die gesamte Kabelstrecke verteilt, so daß nicht mehr alle Muffen, aber eine hinreichende repräsentative Zahl kontinuierlich überwacht wird. Falls Unregelmäßigkeiten auftreten oder ein Monitoring aller Muffen vorgesehen ist, bleiben zwei Möglichkeiten:

- die Anschaffung weiterer Meßsysteme ohne Sensoren, da diese bereits in allen Muffen bis zum Meßanschluß vorhanden sind
- das zeitversetzte Monitoring mit der entsprechenden Anzahl der zur Verfügung stehenden Meßeinrichtungen.

Das dritte Beispiel betrifft die Ermittlung der Restlebensdauer eines Kabelsystems durch die Anwendung eines Monitoringsystems zur Beurteilung des Dielektrikums. Hier sind gegenüberzustellen die Kosten für die Ermittlung der notwendigen Daten, die sich aus der Freischaltung der Kabelsysteme, der Erfassung der Daten, der Wiedereinschaltung sowie der Bewertung der Kabelsysteme ergeben, und die infolge der Klassifizierung möglichen Einsparungen durch eine geplante und zeitlich gestreckte Investition für die Ersatzbeschaffung der Kabelsysteme. Dafür sind leider keine Abschätzungen möglich, da die Kosten von der Netzkonfiguration, den jeweils erforderlichen Arbeiten und der Bewertung der Finanzmittel abhängen.

## 6 Zusammenfassung

Das Monitoring von polymerisolierten Kabeln ist die Grundlage für die Diagnose, die im wesentlichen ein Ziel hat:

- Die Beurteilung des Zustandes der Kabelisolierung im Hinblick auf Ausfallwahrscheinlichkeit und Restlebensdauer.

Trotz der sehr hohen Qualität der polymeren Isolierstoffe sind Fehler, insbesondere in den Komponenten, die Vor-Ort montiert werden müssen, nicht ausgeschlossen, so daß das Monitoring im Sinne einer Versicherung zur Schadensvermeidung oder wenigstens zur Schadensbegrenzung sinnvoll ist.

Die Monitoringsysteme lassen sich unterteilen in Systeme mit integrierten Sensoren, bei denen eine nachträgliche Ausrüstung der zu überwachenden Komponente nicht mehr möglich ist, und in Systeme mit nachträglich zu installierenden Sensoren. Eine weitere Unterteilung ist durch die Betriebsart gegeben, indem das Monitoring während des Betriebes kontinuierlich erfolgen kann oder aber durch Freischalten des Kabels außerhalb des Betriebes erfolgen muß.

Die wichtigsten durch ein Monitoringsystem zu erfassenden Größen sind Temperatur entlang des Leiters, Wassereintritt in den Schirmbereich eines Kabels, TE im Isolierstoff des Kabels und TE in den Muffen und Endverschlüssen. Zusätzlich kann die Veränderung des Dielektrikums durch die Erfassung des Relaxationsstromes, Polarisationsstromes oder der Wiederkehrspannung ermittelt werden.

Die Beispiele zeigen, daß hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit die Investitionen für ein Monitoringsystem nicht sehr hoch sind und die Kosten im Falle eines Fehlers sehr schnell zurückgezahlt werden können. Die Anwendung von Monitoringsystemen wird trotzdem in den kommenden Jahren auf strategisch wichtig und/oder technologisch neue Kabelsysteme begrenzt bleiben. Die Nutzung der von den Monitoringsystemen zur Verfügung gestellten Daten für eine Diagnose durch richtige und zuverlässige Interpretation der erfaßten Daten benötigt noch einigen Forschungsaufwand, aber mit zunehmender Erfahrung werden die Aussagen der Diagnose sicher besser, so daß sich Monitoringsysteme dann auch für weniger kritische Anlagen lohnen werden.

- [1] E. Gockenbach: „Testing and Monitoring as basis of the dielectric diagnostic“, 11. Intern.Symposium on High Voltage Engineering, London 1999, paper 5.1.S10
- [2] W. Rungseewijitprapa, E. Gockenbach, L. Goehlich, H. Vemmer: „Principle and Practical Experiences with a Three-phase Water Monitoring System for XLPE High-Voltage Cables“, 11. Intern.Symposium on High Voltage Engineering, London 1999, paper 1.86.S23
- [3] U. Schichler: „Erfassung von Teilentladungen an polymerisolierten Kabeln bei der Vor-Ort-Prüfung und im Netzbetrieb“, Dissertation Universität Hannover, 1996
- [4] N.N.: „BEWAG – Langzeitversuch an 380 kV-Kunststoffkabeln bei CESI“, Elektrizitätswirtschaft Jg. 96 (1997), Heft 9, S. 436 – 439
- [5] G. C. Montanari, L. Simoni: „Aging Phenomenology and Modelling“, IEEE Trans. on Electr. Insulation, Vol. 28 (1993), No. 5, p. 755 – 776
- [6] W. Zaengl: „Dielectric Spectroscopy in time and frequency domain for HV Equipment (Transformers, Cables etc.)“, 12. Intern.Symposium on High Voltage Engineering, Bangalore 2001, Session 9, Invited paper
- [7] B. Harjes: „Lichtwellenleiter zur Überwachung von Energiekabeln“, Elektrizitätswirtschaft Jg. 90 (1991), Heft 8, S. 418 – 424
- [8] D. Pommerenke, I. Krage, W. Kalkner, E. Lemke, P. Schmiegel: „Verfahren zur ortsselktiven TE-Detektion an Hochspannungs-Kabelgarnituren unter Vor-Ort Bedingungen mittels integrierter Sensoren“, ETG-Fachtagung „Teilentladungserfassung an elektrischen Isoliersystemen“, Esslingen (1995), Band 56
- [9] D. Wenzel: „Teilentladungsmessungen an Transformatoren im Netz mit Verfahren der digitalen Signalverarbeitung und Mustererkennung“, Dissertataion Universität Hannover, 1998
- [10] K. Feser, U. Köpf, M. Lauersdorf: „Probleme der TE-Messung Vor-Ort“, ETG-Fachtagung „Teilentladungserfassung an elektrischen Isoliersystemen“, Esslingen (1995), Band 56
- [11] M. Beigert, H.-G. Kranz, D. Kaubisch, D. Meurer: „Computergestützte zerstörungsfreie Alterungsdiagnose für VPE-isolierte Mittelspannungskabel“, Elektrizitätswirtschaft, Jg. 93, 1994, Heft 11, S. 615 - 618
- [12] H. Klockhaus, F. Merschel: „Langzeitverhalten VPE isolierter Mittelspannungskabel - Prüfverfahren, Normung, Ergebnisse“, Elektrizitätswirtschaft Jg. 96 (1997), Heft 20, S. 1159 – 1163
- [13] R. Porzel, M. Sturm: „Dielektrische Diagnostik von Hochspannungs-Isolierungen“, etz, 1995, Heft 10, S. 18 - 29

- [14] R. Bach, W. Kalkner, H. Oldehoff: „Verlustfaktormessung bei 0,1 Hz an betriebsgealterten PE/VPE Kabelanlagen“  
Elektrizitätswirtschaft Jg. 96 (1997), Heft 20, S. 1076 – 1080
- [15] M. Fischer: „VDEW-Umfrage zu Schäden an VPE-Kabeln“  
Elektrizitätswirtschaft Jg. 96 (1997), Heft 20, S. 1154 – 1158
- [16] K.-H. Weck: „Instandhaltung von Mittelspannungsverteilungsnetzen - Erfordernisse, Diagnoseverfahren, Instandhaltungsstrategien“  
Haefely Symposium Stuttgart 2000, Beitrag Nr. 16