

- **Autarkes Zustandsmonitoring von Kabelmuffen auf Basis integrierter Teilentladungs- und Temperatursensorik**

**M.Sc. Daniel Passow**

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter:

Prof. Dr. Myriam Koch

TU Darmstadt

Tag der mündlichen Prüfung:

15.12.2023

Die Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit der Kabelnetze in der Hoch- und Höchstspannung hängt direkt von den Zustandsparametern der verbauten Komponenten ab. Aufgrund der bei der Landverlegung eines Erdkabels aus Gewichtsgründen beschränkten Transportkapazität setzen sich Kabeltrassen meist aus einer Vielzahl von Kabelabschnitten und deren Verbindungselementen, den sogenannten Kabelmuffen zusammen. Als grober Richtwert kann dabei in der Regel mit ungefähr einer Kabelmuffe pro Kilometer Kabel gerechnet werden. Im Fall von Kabeltrassen mit einer Länge von mehreren Kilometern führt dies zu einer hohen Quantität der Komponente und somit zu einer starken Gewichtung für die einwandfreie Funktionalität des Kabelnetzes. Vor diesem Hintergrund untersucht die hier vorliegende Arbeit die Möglichkeit, konventionelle Aufschiebekabelmuffen mit einem direkt integrierten und selbst entwickelten Zustands-Monitoringsystem auszustatten. Besonderer Fokus wird auf die Auslegung des Systems zur Erfassung der Zustandsparameter im Online- und Livebetrieb gelegt.

Ein wichtiger Baustein im Konzept des Monitoringsystems ist dabei die Beurteilung des Isolationszustands von Kabel und Muffe auf Basis der Erfassung von Teilentladungen (TE) mit direkt in der Kabelmuffe integrierter Sensorik. Gerade in Kabelnetzen ist die Detektion von TE durch die besonders lange Ausdehnung des Betriebsmittels und den dadurch bei der TE-Impulsausbreitung wirkenden Tiefpass- und Dämpfungseffekten erschwert. Infolgedessen stellt die direkte Integration von Sensorik in der Kabelmuffe eine Möglichkeit dar, die Auswirkungen der Dämpfungs- und Tiefpassproblematik bei der TE-Detektion im Kabel zu limitieren. Um die Vor- und Nachteile der integrierbaren kapazitiven und induktiven Sensortypen abzuwägen, werden sowohl deren Frequenzgang als auch deren Verhalten im Zeitbereich näher betrachtet und charakterisiert. Außerdem wird die Sensitivität der untersuchten Sensorik im Labor überprüft und deren Effektivität nachgewiesen.

Um darüber hinaus in Zukunft eine akkurate Sensorauslegung ohne den Aufwand zusätzlicher Qualifizierungsmessungen zu ermöglichen, werden Modelle für die kapazitiven und induktiven Sensorvarianten entwickelt. Da hierbei unterschiedliche Simulationstools zum Einsatz kommen, werden die aus den Simulationen resultierenden Ergebnisse miteinander verglichen und das Für und Wider der

einzelnen Simulationsmethoden gegeneinander abgewogen. Anhand der zuvor im Labor ermittelten Ergebnisse wird dabei die Genauigkeit der Modellierungsansätze validiert und der zukünftige Einsatz der Simulationen als effektive Auslegetools legitimiert.

Neben der Sensormodellierung und -charakterisierung wird zusätzlich mit Hilfe eines selbst entwickelten Prototyps aufgezeigt, wie ein TE-Monitoringsystem unter Ausnutzung mehrerer Frequenzbänder nicht nur TE detektieren, sondern gleichzeitig eine grobe Ortsinformation generieren kann. Diese Ortsinformation kann dann zur begrenzten Lokalisierung der Fehlerquelle genutzt werden. Neben der Validierung des Lokalisierungsprinzips wird außerdem die Sensitivität des gesamten Monitoringsystems anhand einer Kabelmuffe mit definierten TE-Fehlstellen in einem Versuchsaufbau nachgewiesen.

Abgesehen von der Messung und Analyse der TE stellt die Erfassung der Muffentemperatur einen weiteren wichtigen Baustein im Konzept des Monitoringsystems dar. Die Erfassung der Temperatur ermöglicht es, thermische Fehler zu detektieren und eine Aussage über den Auslastungszustand der Kabelmuffe zu treffen. Da die Leitertemperatur in der Muffe unter Hochspannung messtechnisch nicht direkt erfasst werden kann, wird zur Beurteilung des Auslastungszustands und zur Angabe der Temperatur in der Muffe ein thermisches Modell benötigt. In Ermangelung solcher Modelle wird deswegen zunächst das thermische Verhalten einer Kabelmuffe im Labor messtechnisch evaluiert. Daran angeschlossen werden in einem zweiten Schritt thermische Modelle der Kabelmuffe abgeleitet.

Für den Einsatz im Monitoringbetrieb wird dabei ein auf einem linearen Netzwerk basierendes thermisches Modell entwickelt und dessen Genauigkeit anhand der Labormessungen validiert. In Kombination mit einer dezidierten thermischen Sensorik sowie einer integrierten Laststrommessung ermöglicht das lineare Netzwerkmodell die Beurteilung der Muffentemperatur im Rahmen des thermischen Monitorings von Kabelmuffen.

Zusätzlich dazu wird ein auf der Finiten Elemente Methode (FEM) basierendes Modell für komplexere und weiterführende Analysen entwickelt und ebenfalls durch die experimentell ermittelten Messdaten validiert. Mit Hilfe des validierten FEM-Modells wird in einem weiteren Schritt sowohl der Einfluss der Kabelmuffen als auch der Einfluss des Muffenbuchtdesigns auf die Stromtragfähigkeit einer Kabeltrasse unter variierenden Umgebungsbedingungen bei Erdverlegung analysiert. Anhand der daraus gewonnen Erkenntnisse wird außerdem aufgezeigt, wie unter Einbezug der thermischen Zeitkonstante des Erdbodens bei Beachtung des (n-1)-Prinzips, eine verbesserte Nutzung der Übertragungskapazität und Überlastung des Kabels möglich sind.

Abschließend wird auf Basis eines im Rahmen der Arbeit entwickelten Prototyps auf praxisrelevante Fragen in der realen Applikation eingegangen. Zusätzlich werden bisher nicht betrachtete Komponenten des Monitoringsystems, wie die Kommunikation oder die autarke Energieversorgung, näher beleuchtet

- **Autonomous Condition Monitoring of Cable Joints Based on Integrated Partial Discharge and Temperature Sensors**

**M.Sc. Daniel Passow**

The reliability and performance of high-voltage and extra-high-voltage cable networks depend directly on the condition parameters of the individual installed components. Due to the limited transport capacity of underground cables in on-shore applications, cable routes consist of several cable segments. These segments are usually connected by so called cable joints. As a rough guideline, about one cable joint per kilometer can be expected. In the case of cable routes with a length of several kilometers, this leads to a high quantity of components and a strong weighting for fault free cable networks. With that in mind, this thesis investigates the possibility of integrating a self developed self sufficient condition monitoring system into the design of a conventional slip-on joint. Particular focus is placed on the system design concerning the online operability of the condition monitoring.

An important component in the concept of the system is the assessment of the insulation condition of joints and cables based on the detection and analysis of partial discharges (PD) with directly integrated sensors. Particularly in cable networks, the detection of PD is complicated due to the extended length of the equipment and the resulting side effects. The extended length of the equipment leads to low-pass behavior and attenuation. In this context, the direct integration of PD sensors in the joint presents a possibility of limiting the effects of the attenuation and low-pass characteristics. To evaluate the advantages and disadvantages of capacitive and inductive sensor designs, their behavior is characterized in terms of frequency response and time domain behavior. In addition, the sensor sensitivity is evaluated and effectively demonstrated in the laboratory.

Furthermore, to permit accurate sensor design in the future without the expense of additional qualification measurements, simulation models for the different sensors are developed and validated. For this purpose, different simulation tools and concepts are used, and from the results pros and cons for each concept are derived and compared. In addition, the accuracy of the modeling approaches is validated based on the previously acquired measurement results, legitimizing the future use of the simulations as effective design tools.

Besides modeling and characterization of the sensors, a self-developed prototype is used to demonstrate how PD monitoring in cables can not only detect PD using multiple frequency bands but can also generate coarse location information at the same time, which can be used to determine the fault location within certain limits. In

addition to validating the localization principle, the sensitivity of the monitoring system is demonstrated using a cable joint with defined artificial PD faults.

Aside from the measurement and detection of PD, the evaluation of the joint temperature is another important component in the concept of the monitoring system. Whether it might be a defective conductive connection or any other kind of degradation that can lead to increased power loss within the equipment, evaluation of the temperature makes it possible to analyze the operating and load condition. Since the conductor temperature cannot be measured directly during operation under high voltage, a thermal model is inevitably required to evaluate the actual load condition and to evaluate the temperature in the joint. In the absence of thermal models, the thermal behavior of a cable joint is evaluated by measurement in the laboratory, and thermal models are derived.

For the usage in the monitoring system a thermal model built on a linear network is developed and its accuracy is validated based on laboratory measurements. Combined with dedicated integrated thermal sensors and an integrated load current measurement, this model enables the thermal monitoring of the cable joint during online operation.

In addition, a model based on the finite element method (FEM) is developed for more complex and advanced analyses. This model is also validated by the experimentally determined measurement data. In a further step with the help of the validated FEM model, the influence of cable joints on the ampacity of a cable route under varying boundary conditions in a buried application is analyzed. Including the resulting findings, it is also shown how the thermal time constant of underground cables can be used to increase the load and ampacity while still relying on the (n 1) principle, thus contributing to an increase in the efficiency of existing cable networks.

Finally, based on a developed prototype practical questions for real applications are addressed. Furthermore, components that have not been addressed so far, like the communication or the self-sufficient energy supply, will be analyzed in more detail.