

Neuartige Messmethode zur Kabeldiagnose mit Impedanzspektroskopie

Qinghai Shi, Olfa Kanoun

Professur für Mess- und Sensortechnik, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz
Tel.: 0371-53137788, E-Mail: qinghai.shi@etit.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

In dieser Arbeit wurde eine neue Methode zur Kabeldiagnose theoretisch entwickelt, realisiert und getestet. Die Kabeldiagnose wird als inverses Identifikationsproblem betrachtet: Im Frequenzbereich wird die Eingangsimpedanz des Kabelsystems, welche die Übertragungsfunktion darstellt, genutzt, um die Kabelfehler zu lokalisieren. Mit dem neuen Messverfahren sollen nicht nur der Einzel- und Mehrfachfehler detektiert werden, sondern auch die Arten des Kabelfehlers sollen identifiziert werden.

Impedanzspektroskopie (IS) Methode wird erstmalig zur Detektion des Kabelfehlers verwendet. Das inverse Problem für die Kabeldiagnose wird durch den Einsatz des modellbasierten globalen Optimierungsverfahrens gelöst. In dieser Arbeit wurde eine effiziente und exakte Methode zur Leitungsmodellierung beschrieben, die das frequenzabhängige ABCD-Modell nutzt. Parallel zur Leitungsmodellierung wird die Eingangsimpedanz des Kabelsystems durch IS gemessen. Die Modellparameter werden mittels globaler Optimierungsverfahren bestimmt. Damit lassen sich Kabelfehler lokalisieren, sowie die Fehlerarten und die Netzwerktopologie identifizieren. Die maximale absolute Abweichung beträgt etwa 30 cm für verschiedene Kabellängen. Diese Abweichung kann durch neue Einstellung des Frequenzschrittes Δf verbessert werden.

1 Einleitung

Mit dem Anstieg der Komplexität elektrischer Systeme in verschiedenen Verkehrsmitteln, technischen Anlagen und Kommunikationssystemen steigt die

Anzahl der Kabelverbindungen und die Kabellänge in technischen Systemen ständig. Das sichere Erkennen des Zustands elektrischer Leitungen ist entscheidend bei der Inbetriebnahme und Wartung von industriellen Kommunikationssystemen im Anlagenbau.

Um dem steigenden Bedarf an Kabeldiagnose nach zu kommen, besteht die Notwendigkeit zur Entwicklung neuartiger und effizienter Messmethoden. Hierfür existieren zwar mehrere Methoden zur Kabeldiagnose, wie z.B. Time-Domain Reflectometry (TDR), Time-Frequency-Domain Reflectometry (TFDR) und Frequency-Domain Reflectometry (FDR). Eine besondere Herausforderung dabei ist aber die Detektion der Mehrfachfehler und Identifikation der Fehlerarten. In diesem Beitrag wird eine Lösung auf der Basis von Impedanzspektroskopie (IS) vorgestellt. Hierfür sollen die neuen entwickelten Methoden einen wesentlichen Nutzen für die Betreiber von Automatisierungsanlagen anbieten, dass Stillstandzeiten kurz gehalten werden.

2 Stand der Technik

Für die Kabeldiagnose kommen häufig die Reflektometrie-Methoden zum Einsatz (Bild 1). Hierbei werden Kabel mit verschiedenen Signalen elektrisch ange-regt. Aus der Systemantwort können dann Informationen bezüglich der Beschaffenheit des Kabels gewonnen werden. Für die Signalverarbeitung sind Methoden im Zeit- und Frequenzbereich eingesetzt.

Bei der TDR Methode wird ein Pulssignal als das Anregungssignal implementiert. Diese Methode ist prinzipiell technisch leicht realisierbar und kann für die Fehlerlokalisierung und für die Identifikation der Arten von Kabelfehlern eingesetzt werden. Problematisch ist aber die relative hohe Rauschempfindlichkeit [1]. Aufgrund der Dämpfung und der Dispersion der Signale im Kabel ergeben sich Begrenzungen für die erreichbare Genauigkeit bei der Fehlerlokalisierung. Bei kleinen Impedanzänderungen oder langen Energieverlustbehafteten Kabeln können die reflektierten Signale schwer detektiert werden, da sie mit Rauschen behaftet sind [2, 5, 6].

Bei der TFDR Methode werden ein Breitband-Signal als das Anregungssignal und die Kreuzkorrelation Technik zur Kabelfehlerlokalisierung eingesetzt [3]. Bei der FDR Methode wird ein Sinus-Sweep Signal als Anregungssignal eingesetzt [4]. Die Fourier-Transformation wurde zur Kabeldiagnose verwendet.

Bei TFDR und FDR lassen sich mittel Signalverarbeitungen eine bessere Ortsauflösung und Genauigkeit als bei TDR realisieren. Damit kann eine kleine Impedanzänderung detektiert werden. Durch den Einsatz unterschiedlicher Anregungssignale und der Signalverarbeitung können die Ortsauflösung und der Messbereich des Messgerätes bedarfsgerecht optimiert werden. Der Typ des Kabelfehlers kann jedoch aufgrund der fehlenden Phaseninformation nicht identifiziert werden.

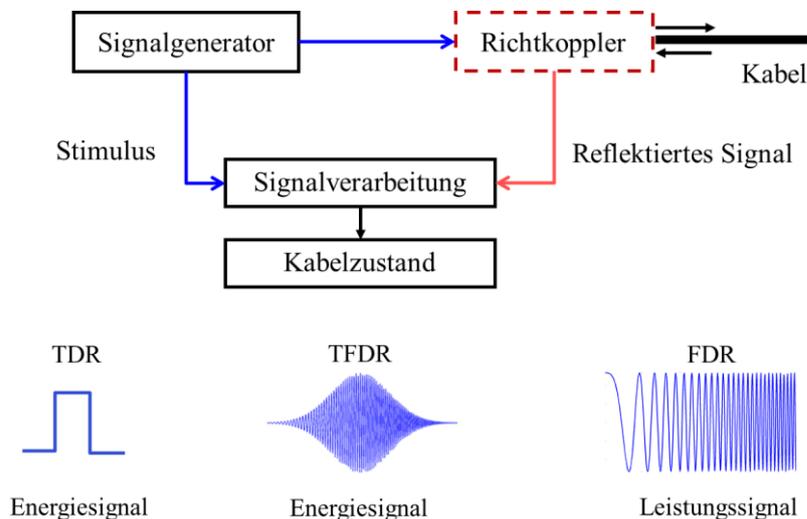


Bild 1. Generelles Prinzip der Reflektometrie in den Zeit- und Frequenzbereichen.

Die Vor- und Nachteile der oben beschriebenen Messmethoden werden in Tab. 1 zusammengefasst.

Tabelle. 1. ÜBERSICHT ZUM STAND DER TECHNIK (+: POSITIVE, -: NEGATIVE)

Method	Einzel- fehler	Mehrfach- fehler	Fehler- arten	SNR	Genauigkeit	Messbereich (m)
TDR	Ja	Nein	Ja	-	1% des Messbe- reichs	5-2000
TFDR	Ja	Nein	Nein	+	0,4-5 m	<500
FDR	Ja	Nein	Nein	+	0,4-5 m	2-2000

Speziell bei der Detektion von Mehrfachfehler bzw. Identifikation der Fehlerarten ergibt sich ein hoher Bedarf für ein geeignetes Messverfahren. Diese Fälle sind besonders anspruchsvoll, weil im Falle von Mehrfachfehler und Kabelverzweigungen die reflektierten Wellen Mehrfachreflexionen beinhalten.

3 Neuartige Messmethode

Eine neuartige modellbasierte Methode zur Kabeldiagnose auf der Basis der Impedanzspektroskopie (IS) wurde entwickelt. Für die Kabelmodellierung wurde ein effizientes und akkurates Leitungsmodell auf der Basis der ABCD-Methode mit den frequenzabhängigen Parametern in dieser Arbeit entwickelt. Das modifizierte ABCD Modell wurde für die gleiche Bandbreite wie die gemessene Eingangsimpedanz des Kabelsystems konfiguriert, damit eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messdaten realisiert werden kann. Dies führt zu einer schnellen Konvergenz bei der Parameterextraktion und einer Verbesserung der Genauigkeit des Messsystems.

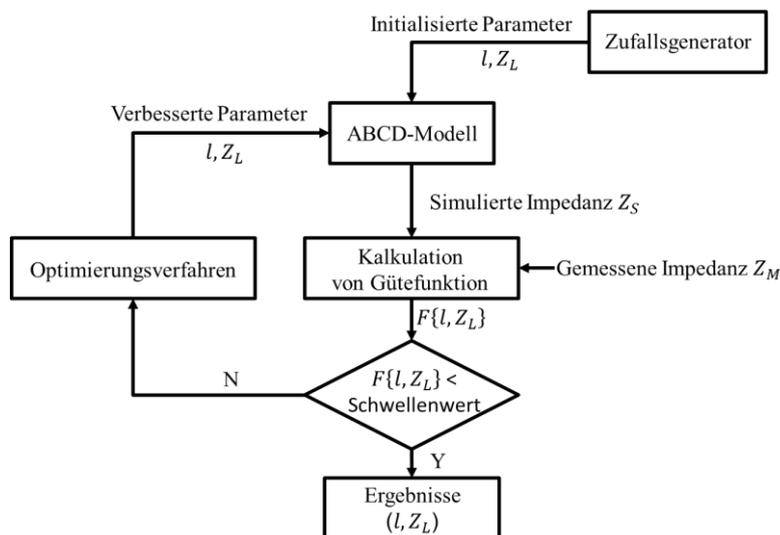


Bild 2. Flussdiagramm von modellbasierten Algorithmen.

Die gemessenen und modellierten Ergebnisse der Eingangsimpedanz des Koaxialkabelsystems werden nicht nur zur Erkennung, sondern auch zur Lokalisierung der Kabelfehler sowie zur Identifikation der Kabelfehlerarten genutzt. Für die Kabelfehlerlokalisierung und Identifikation der Arten von Kabelfehlern ist

ein inverses Problem zu lösen und die Modellparameter zu extrahieren (Bild. 2). Ein globales Optimierungsverfahren auf der Basis der differentiellen Evolution wurde vorgeschlagen.

Ein Sweep-Anregungssignal mit N Frequenzen, sowie einem konstanten Frequenzschritt Δf wird zur Impedanzmessung eingesetzt. Die Gütefunktion zum Optimierungsverfahren wird in folgender Gleichung definiert:

$$F\{l, Z_L\} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{n=1}^N \left(\frac{|Z_M\{f_n\}| - |Z_S\{f_n, l, Z_L\}|}{|Z_M\{f_n\}|} \right)^2} \quad (1)$$

wobei $Z_M\{f_n\}$ die gemessene gesamte Impedanz des Kabelsystems ist. $Z_S\{f_n, l, Z_L\}$ ist die simulierte gesamte Impedanz des Kabelsystems. f_n ist die Frequenz der Anregungssignale der IS. l ist die Position von Kabelfehlern im Kabelsystem. Z_L ist die Lastimpedanz von Kabelfehlern.

4 Ergebnisse

Die Koaxialkabel RG58 C/U mit einer Länge von 2 m bis 400 m, die mit verschiedenen Kabelfehlern behaftet sind, wurden zur Prüfung des modellbasierten Optimierungsverfahren untersucht.

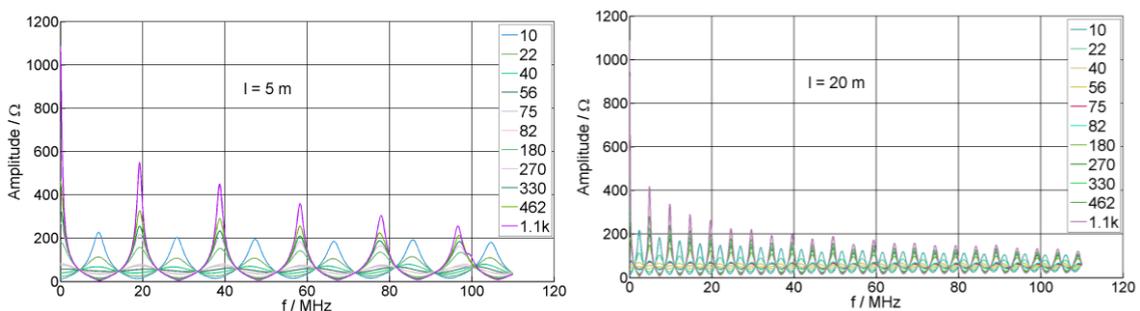


Bild 3: Die Amplitude der Eingangsimpedanz des 5 und 20 m Koaxialkabels bei verschiedenen Lastimpedanzen.

Bild 3 die Amplituden der Eingangsimpedanz des Koaxialkabels im genannten Frequenzbereich. Aus den Abbildungen wird klar, dass die Periodenanzahl der Signale im Frequenzbereich proportional zu der Entfernung zwischen Ein-

gangspunkt und dem Kabelfehler ist. Je größer die Entfernung ist, desto stärkere Dämpfung und Dispersion treten bei den Signalen auf. Die Periode der gemessenen Signale ist dennoch nutzbar, um den Kabelfehler zu lokalisieren. In dieser Arbeit wird der Kabelfehler durch ein Kabelende dargestellt. Damit entspricht die Entfernung zwischen Eingangspunkt und Fehler der Kabellänge. Die verschiedenen Arten der Kabelfehler werden durch die unterschiedlichen Abschlusswiderstände realisiert.

Bild 4 zeigt die Ergebnisse der absoluten Abweichung der Kabelfehlerlokalisierung. Die maximale absolute Abweichung beträgt etwa 30 cm für verschiedene Kabellängen. Diese Abweichung kann durch neue Einstellung des Frequenzschritts Δf verbessert werden. Je größer Δf ist, desto kleiner ist die absolute Abweichung der Lokalisierung der Kabelfehler. Bild 4 zeigt, dass diese absolute Abweichung relativ konstant in den untersuchten Kabellängen von 2 bis 400 m ist. Sie ist von der Kabellänge unabhängig.

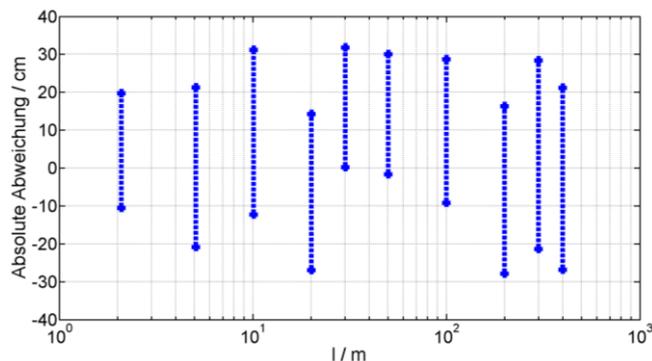


Bild 4: Abweichung der Lokalisierung der Kabelfehler.

Wenn die Lastimpedanz der Kabelfehler sich dem Wellenwiderstand des Koaxialkabels (50Ω) annähert, ergibt sich beim Messsystem die maximale Abweichung zur Kabelfehlerlokalisierung. Das reflektierte Signal ist in diesem Lastbereich am kleinsten und damit auch das Signal-Rausch-Verhältnis.

Bild 5 zeigt die Ergebnisse der relativen Abweichungen der Lastimpedanz von Kabelfehlern. Die maximale Abweichung der Kabelfehlerlokalisierung und die maximal relative Abweichung der Kabelfehlerlastimpedanzen treten im glei-

chen Bereich auf. In diesem Bereich ist der Lastimpedanzwert annähernd gleich dem Kabelwellenwiderstandwert.

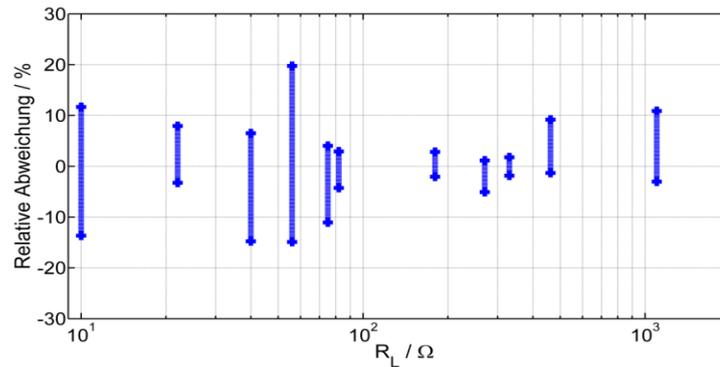


Bild 5: Relative Abweichung der Lastimpedanz der Kabelfehler.

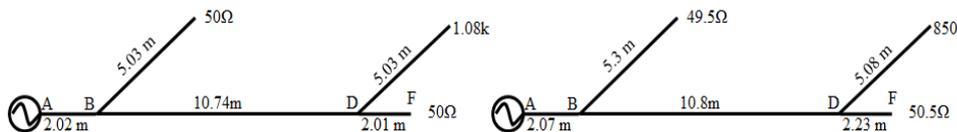


Bild 6: Originale (Links) und rekonstruierte (Rechts) Topologie des Kabelnetzwerks.

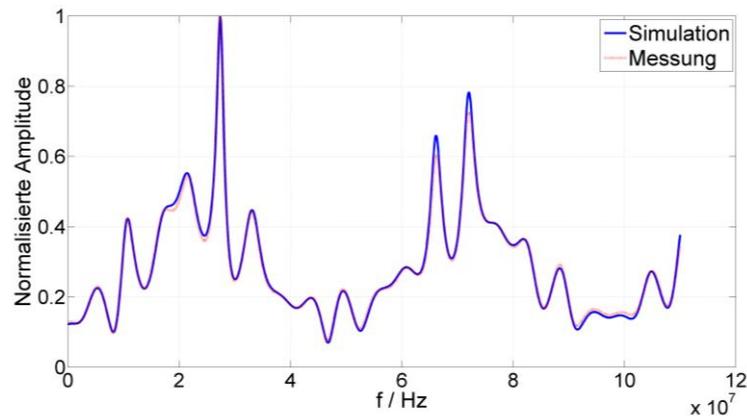


Bild 7: Normalisierte Amplitude der Eingangsimpedanz des Kabelnetzwerks.

Bild 6 zeigt das untersuchte und rekonstruierte Kabelnetzwerk. Bild 7 stellt die Amplitude der Eingangsimpedanz des Kabelsystems dar. Dadurch wird das Kabelnetzwerk genau beschrieben. Die Eingangsimpedanz nach der Optimierung ist sehr gut an die gemessene Eingangsimpedanz angepasst. Die Verarbeitungszeit für die Detektion des Mehrfachfehlers in einem 2T Kabelnetzwerk ist weniger als 5 Minuten.

4 Zusammenfassung

Der Kern der neuen Methoden ist die automatische Fehlererkennung in den Kabeln durch den Einsatz des modellbasierten globalen Optimierungsverfahrens zur Auflösung inverser Probleme. Mit dem neuen Messverfahren werden nicht nur der Einzel- und Mehrfachfehler detektiert werden, sondern auch die Arte des Kabelfehlers werden identifiziert.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Reproduzierbarkeit und schnelle Verarbeitungszeit dieses Messsystems. Für die Detektion des Einzelfehlers dauert dieses Messsystem auf einem 64-Bit-4×3,4-GHz-Windows-PC in unter 30 Sekunden. Für die Detektion des Mehrfachfehlers dauert es in unter 20 Minuten, die von der Komplexität des Kabelnetzwerks abhängig ist.

Literatur

- [1] Shi, Qinghai und Kanoun, Olfa: A New Algorithm for Wire Fault Location Using Time-Domain Reflectometry, *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 1171-1178, April, 2014, DOI: 10.1109/JSEN.2013.2294193.
- [2] Shi, Qinghai und Kanoun, Olfa: Wire fault location in coaxial cables by impedance spectroscopy, *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 11, pp. 4465-4473, 2013, DOI: 10.1109/JSEN.2013.2269218.
- [3] Shin, Y.-J. et al.: Application of time-frequency domain reflectometry for detection and localization of a fault on a coaxial cable, *IEEE Trans. Instrument and Measurement*, vol. 54, no. 6, pp. 2493-2500, 2005.
- [4] Furse, C. et al.: Frequency-domain reflectometry for on-board testing of aging aircraft wiring, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, no. 2, pp. 306-315, 2003, DOI: 0.1109/TEMPC.2003.811305.
- [5] Shi, Qinghai und Kanoun, Olfa: Model-Based Identification of Wire Network Topology, *Measurement Journal*, Elsevier, May, 2014, DOI: 10.1016/j.measurement.2014.05.008.
- [6] Shi, Qinghai und Kanoun, Olfa: Detection and Location of Single Cable Fault by Impedance Spectroscopy, *IEEE I2MTC Proceedings*, ISBN: 978-1-4673-6385-3, Montevideo, Uruguay, pp. 595-599, 12-15, May, 2014.