

Schadensdetektion an Rohrleitungen mittels Zeitbereichsreflektometrie

Fault Locating in Pipelines via Time Domain Reflectometry

Christoph von der Ahe
Ludger Overmeyer

Institut für Transport und Automatisierungstechnik
Leibniz Universität Hannover

Zur Untersuchung der Anwendbarkeit der Zeitbereichsreflektometrie zur Fehlstellenortung an isolierten Rohrleitungen werden analytische Simulationen und experimentelle Laborversuche durchgeführt. Analog zum Einsatz der Zeitbereichsreflektometrie (engl.: Time Domain Reflectometry (TDR)) zur Fehlerortung in elektrischen Leitungen und Schaltungen kann das TDR-Verfahren zur Identifikation von Fehlstellen an isolierten Rohrleitungen dienen. Zur Analyse des Zusammenhangs zwischen Reflexionsverhalten und dem Ausmaß der Beschädigung an der Isolation der Rohrleitung werden verschiedene Simulationen durchgeführt. An einem Labormodell einer isolierten Rohrleitung werden Versuchsmessungen mit einem TDR-Messgerät durchgeführt. Insbesondere für die Überwachung von Horizontalbohrungen und dem damit verbundenen Einzugsprozess von Pipelines kann das TDR-Messverfahren einen deutlichen Fortschritt gegenüber den konventionellen Verfahren bieten.

[Schlüsselwörter: Zeitbereichsreflektometrie, Pulsmesstechnik, Fehlstellenortung, Monitoring von Rohrleitungen, Einzugsprozess]

Simulation processes and an experimental test are performed to investigate the practicability of using the time domain reflectometry (TDR) for the detection of defects in pipelines. Similar to the employment of TDR in checking electrical wiring it may serve to evaluate the position and the degree of a defect. Various simulation models are used to learn about the correlation between the quality of the defect and the reflected signals. A simplified laboratory model is set up for conducting trials with a TDR measurement device. Especially for online monitoring of horizontal pipeline drillings the method could provide an improvement over conventional approaches.

[Keywords: Time Domain Reflectometry, TDR, fault locating, pipeline monitoring, pulling process]

1 EINLEITUNG

Wenn bei der Konstruktion von Pipelinenetzen natürliche oder künstliche Hindernisse, wie Flüsse, Autobahnen oder Kanäle, die Pipelineroute blockieren, werden Horizontalbohrungen durchgeführt. Mit einer gerichteten Horizontalbohrung wird das Hindernis unterquert und die Voraussetzung für das Einziehen der Rohrleitung geschaffen. Hinter dem gesteuerten Bohrkopf ist der sogenannte Zugkopf angekoppelt. Am Zugkopf wird das erste Rohrstück eingespannt und durch den geschaffenen Bohrkanal eingezogen. Die folgenden Rohrsegmente werden nacheinander angeschweißt und die Schweißstelle mit einer nachträglichen Umhüllung isoliert. Die Umhüllung dient zum Schutz der Rohrleitung vor Korrosion. Besonders bei sehr langen und gut isolierten Pipelines kann sich ein hohes Korrosionspotential einstellen. Daraus resultieren hohe Korrosionsströme, sollten Beschädigungen an der Isolation auftreten. Damit verbunden ist ein starker Materialabtrag am Stahlrohr, der schnell zu einem Leck der Pipeline führen kann.

Der Einzugsprozess der Rohrleitung wird idealerweise Messtechnisch überwacht, um so früh wie möglich auf auftretende Beschädigungen an der Isolierung reagieren zu können. Die Beschädigungen können beispielsweise durch größer Steine oder Felsen am Rand des Bohrkanals verursacht werden. Aus den Messdaten können Informationen über die Position und das Ausmaß der Beschädigung gewonnen werden. Ausgehend von diesen Informationen lassen sich entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten [Sop09]. Eine schnelle Reaktion auf das Auftreten von Fehlstellen in der Isolierung ist besonders wichtig, da diese zwar nachträglich durch kathodischen Korrosionsschutz geschützt werden können, jedoch ist dies ab einer gewissen Größe nicht mehr ökonomisch machbar. Wird der Schaden nicht in einem frühen Stadium erkannt, kann dies zu einem hohen wirtschaftlichen Verlust führen, da die Rohrleitung geborgen und die Umhüllung repariert werden muss. Bei kapitalen Schäden ist auch eine Aufgabe der eingezogenen Pipeline möglich.

2 STAND DER TECHNIK

Das aktuell gebräuchliche Standardmessverfahren zur Fehlstellendetektion kann erst nach Fertigstellung des Rohreinzuges und nicht bereits während des Prozesses zum Einsatz kommen. Dies ist dadurch bedingt, dass beide Rohrenden zugänglich sein müssen, um Messungen durchführen und auswerten zu können [Zha96][Tsu88]. Aufgrund der eingangs genannten Gründe ist dies bei Horizontalbohrungen problematisch. Daher sind Weiterentwicklungen der existierenden Fehlstellendetektionsverfahren, die auf der Messung von Fehlerströmen basieren, unternommen worden [Ste15]. Die Messgeräte werden dabei in den Zugkopf integriert, sodass auch am unterirdischen Rohrende Messungen durchgeführt werden können. Zur Aufzeichnung der Messdaten muss jedoch ein Datenkabel durch das Rohrinne bis zur Oberfläche geführt werden. In der rauen Baustellenumgebung unterliegt das Datenkabel jedoch der ständigen Gefahr beschädigt zu werden. Ein hoher Aufwand muss also mit dieser Methode betrieben werden, um die Messungen zur Fehlstellendetektion durchzuführen.

Verschiedene Methoden zur Fehlstellendetektion basierend auf der Erzeugung von Ultraschallwellen sind in der Vergangenheit entwickelt worden und werden zur Wartung von bestehenden Rohrleitungen verwendet [All98][Ros92]. Bei diesen Techniken wird davon ausgegangen, dass eine mögliche Beschädigung in der Rohrleitung einen erhöhten Wellenwiderstand darstellt. Dieser erzeugt reflektierte Wellen und somit eine Verzerrung in der Wellenausbreitung. Die Verzerrung kann erfasst und somit auf die Fehlstellenposition zurückgeschlossen werden. Auch wenn diese Ansätze weiter erforscht und eingesetzt werden, besitzen sie Schwächen in Bezug auf die begrenzte Reichweite und die hohe Empfindlichkeit des Messequipments in der rauen Umgebung eines Rohreinzugs.

Diese Arbeit untersucht die Ausbreitung von elektrischen Signalen entlang einer metallischen Rohrleitung und deren Reflexion an Fehlstellen in der Isolierung der Pipeline. Bekannt ist das sogenannte TDR-Verfahren aus dem Bereich der Elektroinstallation, zur Fehlstellenortung in Kabelnetzen [Fus05], und aus der Geologie, zur Bestimmung des Wassergehalts und der Leitfähigkeit von Bodenschichten [11]. Neuere Forschungsvorhaben, die das TDR-Verfahren zum Einsatz an bereits installierten Pipelines betrachten, haben gute Ergebnisse erzielt, indem neben der Rohrleitung ein zweiter Hilfsleiter verwendet wird. So kann die Pipeline wie ein zweipoliges Koaxialkabel behandelt werden. Der Hilfsleiter ist entweder ein Draht, der an der Oberfläche parallel zur Rohrleitung verlegt wird [Cat12], oder ein Kabel, das direkt auf der Isolation der Pipeline befestigt wird [Ara05]. Diese Ansätze sind jedoch nicht praktikabel für die Überwachung der Pipelineisolation beim Einzugsprozess einer Horizontalbohrung.

Die Zeitbereichsreflektometrie wird intensiv zur Detektion von Fehlstellen in Datenleitungen, Wellenleitern und optischen Lichtwellenleitern eingesetzt. Radar beispielsweise kann als ein TDR-Instrument bezeichnet werden, welches die Atmosphäre als Übertragungsmedium nutzt. Ein TDR-Messinstrument besteht aus einem elektrischen Schaltkreis, der zunächst einen Energiepuls in das Testobjekt aussendet und dann die an den zurück Sender reflektierte Energie aufzeichnet. Die Amplitude der reflektierten Energie ist proportional zur Größe der Unstetigkeit im Übertragungsweg und die Laufzeit des reflektierten Impulses gibt die Distanz zur Störstelle an [Pal90].

3 SIMULATION VON TDR-IMPULSEN AN PIPELINE MODELLEN

Um das Verhalten und die Eigenschaften von TDR-Signalen auf Pipelines mit Umhüllungsschäden abschätzen zu können, werden kleinskalige Modelle in der Simulationssoftware ANSOFT HFSS erstellt. Die Modelle bestehen aus einem Stahlrohr, dessen Polyethylen-Umhüllung in der Mitte eine Beschädigung aufweist. Das isolierte Rohr ist eingebettet in Sand, wobei ein Rohrende frei bleibt. Das Anregungssignal wird am freien Rohrende in die Pipeline eingebracht. Das Simulationsmodell ist in Abbildung 1 dargestellt.

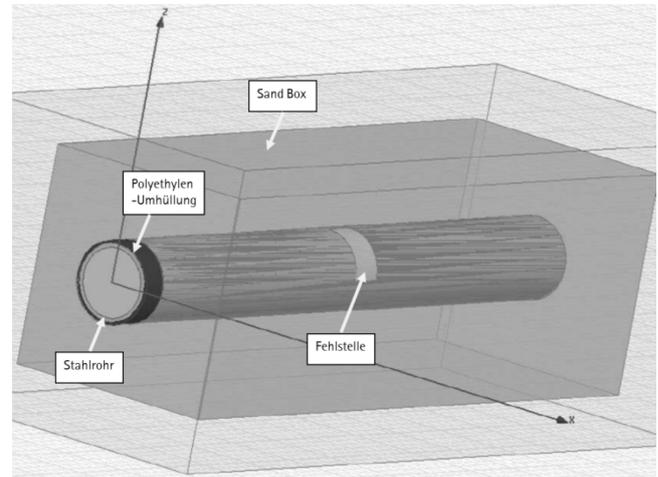


Abbildung 1: Aufbau des Simulationsmodells in ANSOFT HFSS

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Fehlstellenposition ohne weiteres in den TDR-Signalverläufen ausgemacht werden kann (vgl. Abbildungen 2-7). Mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Impulses entlang der Rohrleitung von $2 \cdot 10^8$ m/s kann die Position berechnet werden.

Um den bei verschiedenen Randbedingungen auftretenden Reflexionscharakteristika näher zu kommen, werden die sowohl die Fehlstelle als auch die Pipeline betreffenden Parameter variiert.

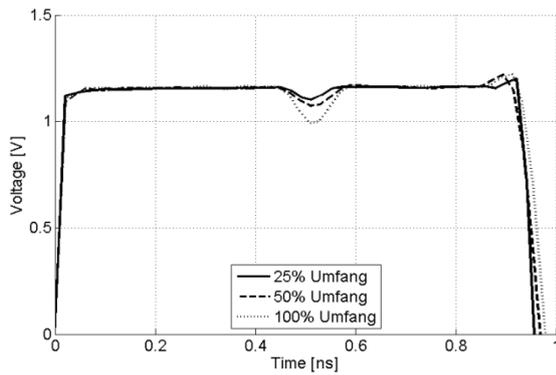


Abbildung 2: Variation der Fehlstellengröße

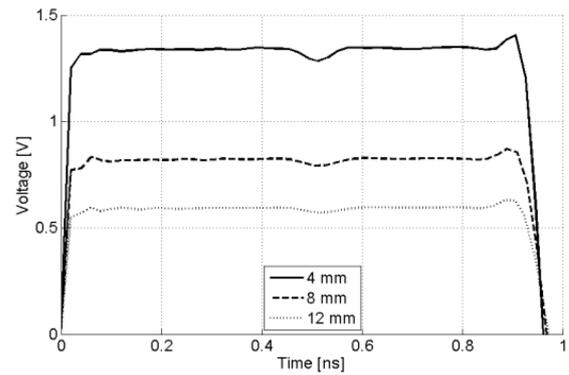


Abbildung 5: Variation des Rohrdurchmessers

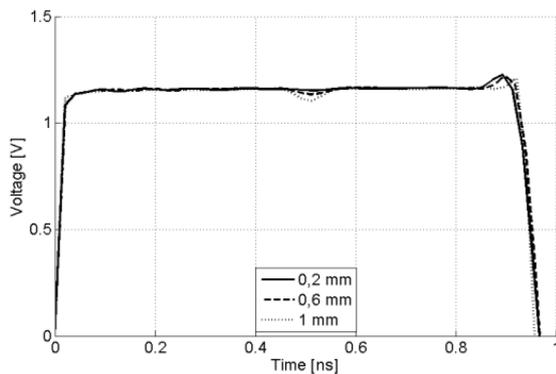


Abbildung 3: Variation der Fehlstellentiefe

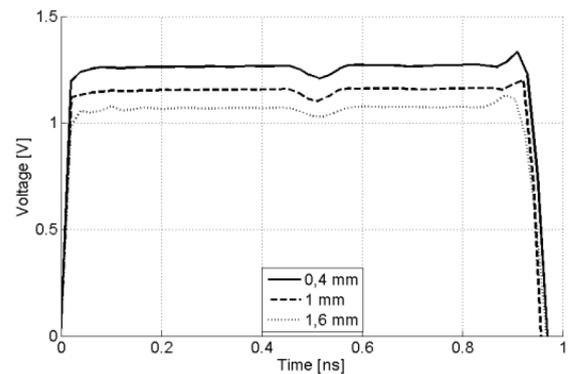


Abbildung 6: Variation der Rohrdicke

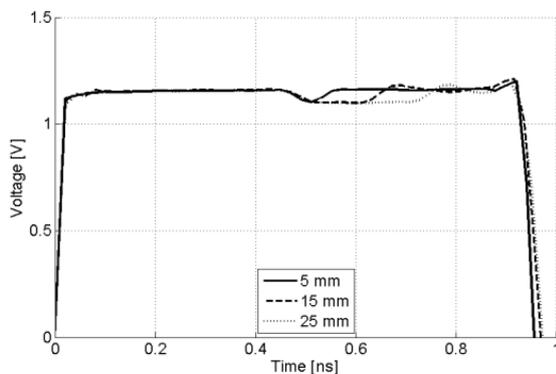


Abbildung 4: Variation der Fehlstellenlänge

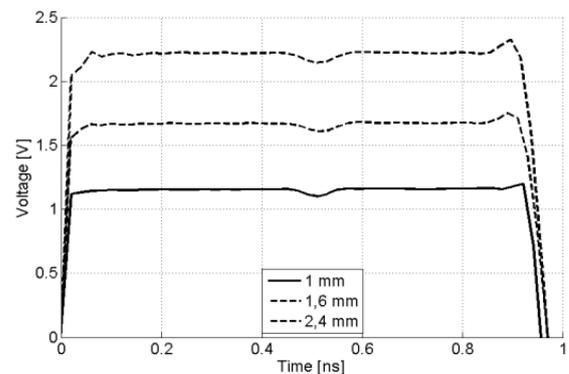


Abbildung 7: Variation der Umhüllendicke

Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen TDR-Signalverläufe bei Variation der Fehlstellengröße um den Umfang des Rohres. Je größer die Fehlstellenfläche ist, desto größer ist die Reflexion und desto tiefer ist der Einbruch im Spannungsverlauf. Wird die Umhüllung, die eine Dicke von 1 mm besitzt, nur zum Teil beschädigt, kann auch dies in der Signalkurve festgestellt werden. Je tiefer die Beschädigung der Isolation ist, desto stärker ist hier die Reflexion (vgl. Abbildung 3).

Wenn die Länge der Fehlstelle entlang des Rohrverlaufs vergrößert wird, zeichnet sich dies ebenfalls im Signalverlauf ab. Mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des TDR-Impuls und der aus dem Diagramm ablesbaren Zeitspanne kann die Fehlstellenlänge berechnet werden. Die Amplitude der Reflexion ändert sich wie in Abbildung 4 zu sehen ist nicht. Für die Stärke der Reflexion ist also nicht die Fläche der Fehlstelle auf der Rohroberfläche entscheidend, sondern die Fläche auf dem Rohrumfang.

Eine Vergrößerung des Rohrdurchmessers führt zu einem Sinken des TDR-Signalpegels (vgl. Abbildung 5). Das Rohr stellt mit größerem Durchmesser einen kleineren Widerstand für den Impuls dar, wodurch eine geringere Spannung abfällt. Je niedriger der Signalpegel fällt, desto schwieriger wird es den charakteristischen Einbruch im Spannungsverlauf auszumachen. Das gleiche gilt bei Variation der Rohrdicke. Auch in Abbildung 6 lässt sich der Einbruch des TDR-Signals mit fallendem Signalpegel schlechter erkennen. Wird die Umhüllung der Rohrleitung verstärkt, zeigt sich ein Anstieg des Spannungspegels, da eine dickere Isolation einen höheren Widerstand bewirkt (vgl. Abbildung 7). Dadurch wird wiederum die Identifikation der Fehlstellenposition vereinfacht.

4 EXPERIMENTELLE TDR-UNTERSUCHUNGEN AN LABORMODELLEN

Die Simulationen zeigen ermutigende Ergebnisse, sodass weiterführende experimentelle TDR-Untersuchungen an vereinfachten Labormodellen durchgeführt werden. Der Versuchsaufbau und das verwendete Messequipment ist in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt.

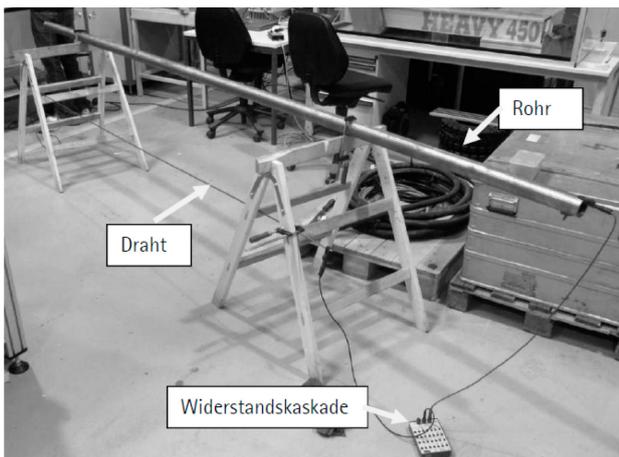


Abbildung 8: Aufbau des Labormodells

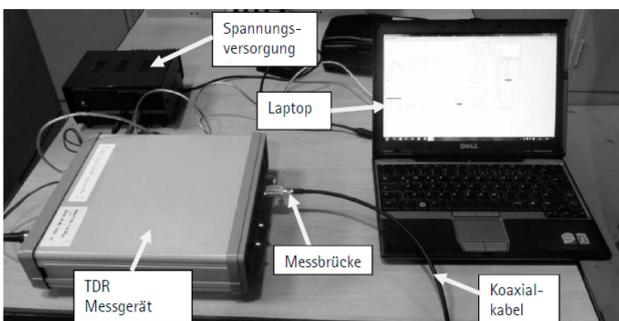


Abbildung 9: Messequipment des Laborversuchs

Ein Koaxialkabel verbindet das TDR-Messgerät mit dem Labormodell. Dabei ist der Innenleiter an das Rohr und der Außenleiter an den Draht angeschlossen. Bei dem TDR-Messgerät handelt es sich um das TDR-3000 der Firma SYMPULS, das in erster Linie für Radarmessungen eingesetzt wird. Eine vorgeschalteter Richtkoppler dient als Messbrücke, sodass sowohl der durch das Messgerät erzeugte Anregungsimpuls als auch die reflektierten Signale erfasst werden können. Aufgezeichnet werden die Messdaten mit einem Laptop auf dem eine LabView Oberfläche von National Instruments installiert ist.

Eine Beschädigung der Umhüllung und dem damit einhergehenden Kontakt zwischen Stahlrohr und Erdreich wird durch einen Kurzschluss über die Widerstandskaskade zwischen Rohr und Draht nachgebildet. Der Kurzschluss wird an verschiedenen Positionen auf der Rohrlänge eingebracht und die entsprechende TDR-Messkurve aufgezeichnet. Abbildung 10 zeigt den relevanten Bereich der aufgezeichneten TDR-Signale.

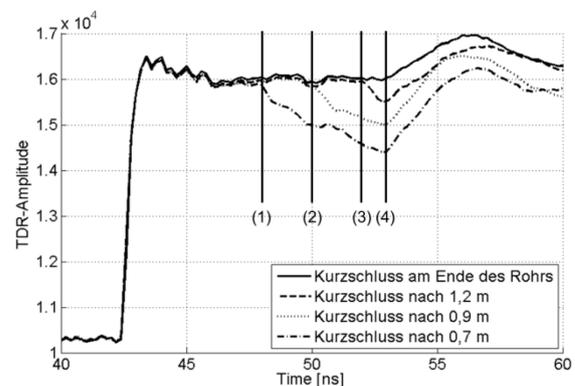


Abbildung 10: TDR-Signale für verschiedene Kurzschluss-Positionen

Die Kurzschlüsse können an den vorgegebenen Positionen in den TDR-Signalverläufen identifiziert werden. Es zeigt sich ein Abfallen des Messsignals aufgrund der Reflexion an der Fehlstelle (vgl. Abbildung 10, Detail 1-3). Das Rohrende ist ebenfalls in allen Messreihen erkennbar. Hier steigt das Messsignal an, da das Anregungssignal am offenen Rohrende mit der gleichen Polarität reflektiert wird (vgl. Abbildung 10, Detail 4).

Ausgehend von den Ergebnissen der ersten Labormessungen wird ein Prüfstand aufgebaut, der Messungen unter Bedingungen ermöglicht, die den realen Bedingungen beim Einzugsprozess von Rohrleitungen wesentlich näher kommen. Der Prüfstand ist in Abbildung 11 dargestellt.

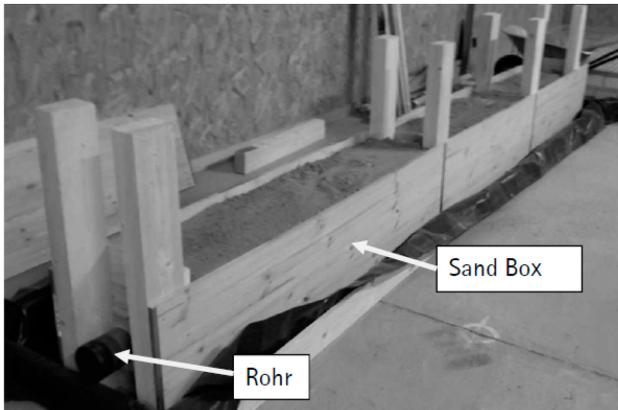


Abbildung 11: Prüfstand zur Untersuchung des TDR-Verfahrens an realen Rohrleitungen

Der Prüfstand besteht aus einem Becken, das mit Sand oder anderem Bodenmaterial gefüllt werden kann. In das Sand-Becken ist ein 5m langes Stück einer Pipeline eingebettet. Die Isolierung der Pipeline wird im Abstand von 3m vom vorderen Rohrende auf einer Fläche von etwa 50cm² abgeschält. Beide Rohrenden ragen aus dem Becken heraus. Mit dem Messequipment des Laborversuchs werden Messungen an beiden Rohrenden durchgeführt, sodass sich einmal ein Abstand von 3m und einmal ein Abstand von 2m zur Fehlstelle ergibt. Die aufgezeichneten Signale sind in Abbildung 12 dargestellt.

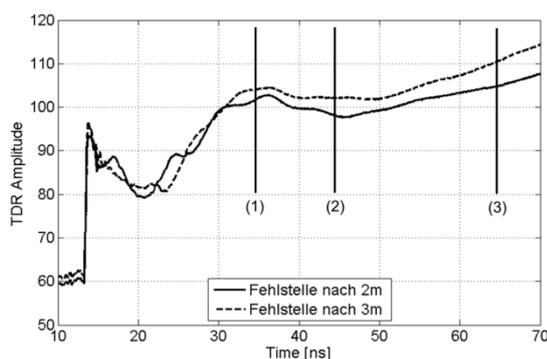


Abbildung 12: TDR. Signale für unterschiedliche Fehlstellenpositionen

Es zeigt sich, dass die Fehlstellen ohne vorherige Kenntnis der Position nicht so einfach aus den Signalverläufen abzulesen sind, wie im vorherigen Versuch. Wieder sind zwar leichte Einbrüche in den Kurven an den Fehlstellenpositionen zu erkennen (vgl. Abbildung 12, Detail 1&2), diese sind aber nicht so charakteristisch, dass sie von anderen unterschieden werden können. Auch die

Reflexion am Rohrende zeichnet sich nicht so deutlich ab. Hier sind weitergehende Untersuchungen notwendig. Diese beinhalten Methoden zur Messdatenfilterung. Beabsichtigt sind im weiteren Verlauf des Projektes vergleichende Messungen zwischen beschädigter und unbeschädigter Rohrleitung und anschließendem Vergleich der Messreihen mittels Kreuzkorrelation. Eine weitere Möglichkeit besteht im Einsatz eines TDR-Messgeräts, welches in der Lage ist einen stärkeren Anregungsimpuls in die Rohrleitung zu senden, um so eine stärkere Reflexion zu erhalten.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Die simulativen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass das TDR-Verfahren ein gutes Erfolgspotential für die Überwachung von Einzugsprozessen von Rohrleitungen bietet. Rückschlüsse sowohl auf die Fehlstellenposition als auch auf das Ausmaß der Beschädigung können aus den TDR-Signalen gewonnen werden. Aufgrund der ermutigenden Ergebnisse aus Simulation und Laborversuch werden Test an einem realitätsnahen Prüfstand durchgeführt. Hier wird deutlich, dass die Entwicklung spezieller Filteralgorithmen zur Datenanalyse notwendig ist, um die Charakteristika einer Fehlstelle in den Messsignalen identifizieren zu können. Hierzu sind zusätzliche Versuchsreihen notwendig, anhand derer im weiteren Verlauf des Projektes ein sicheres Verfahren zur Detektion von Fehlstellen entwickelt werden kann.

Förderhinweis

Diese Arbeit entstand im Rahmen des Projekts "InDaMonRo – Infrastrukturelle Datenübertragung zum prozessbegleitenden Schadensmonitoring beim Einzugsprozess von Rohrleitungen", welches durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Programm "Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)" gefördert wird.

LITERATUR

- [All98] Alleyne, D. N., Lowe, M. J. S. and Cawley, P., *The reflection of guided waves from circumferential notches in pipes*, ASME J. Applied Mechanics vol 65, 1998
- [Ara05] Araneo, R., Celozzi, S. et al., *Fault Detection in Conductive Pipelines by Time Domain Reflectometry*, Proceedings of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on SYSTEMS THEORY and SCIENTIFIC COMPUTATION, 2005
- [Cat12] Cataldo, A., Cannazza, G. et al., *A New Method for Detecting Leaks in Underground Pipelines*, IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 6, 2012
- [Fus05] Furse, C., Lo, C., *Reflectometry for Locating Wiring Faults*, IEEE Transactions on Electro-magnetic Compatibility, February, 2005
- [Pal90] Pal, Z. M., Johnston, R. H., *Simulation of pipe-line holiday detection by time domain reflectometry*, IEEE Transcript on Industry Applications, vol 26, no.5,1990
- [Ros92] Rose, J. L. and Ditri, J., *Pulse-echo and through transmission Lamb wave techniques for adhesive bond inspection*, British J. NDT, vol.34, 1992.
- [Sop09] Soppa, T., Qualitätssteigerung bei Horizontalbohrungen, Fachbericht in 3R international (48) Heft 5, 2009
- [Sta96] Stacheder, M., *Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik. Messung von Wassergehalt, elektrischer Leitfähigkeit und Stofftransport*, AGK, Karlsruhe, 1996
- [Ste15] [1] Steffel KKS GmbH, *Infoblatt Pull and Check*, http://www.kks.de/uploads/media/Infoblatt_PullCheck_Rev02_web.pdf, downloaded 28.04.2015
- [Tsu88] Tsuboi, H., Misaki, T., Kikuta, T., *Computation of three-dimensional electromagnetic field in the eddy-current testing of steel pipes*, IEEE Transcript on Magnetism, vol. 24, 6, 1988
- [Zha96] Zhao, Y., Wang, Y. *Three-dimensional finite element computation of electromagnetics for nondestructive testing*, Antennas and Propagation Society Int. Symposium, 1996

Christoph von der Ahe, M.Sc., Research Assistant at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.
Christoph von der Ahe was born 1985 in Paderborn, Germany. Between 2006 and 2013, he studied Mechatronics at PHWT Oldenburg and at Leibniz University Hannover.

Address: Leibniz University Hannover, Institute of Transport and Automation Technology, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany
Phone: +49 511 762-3843, Fax: +49 511 762-4007
E-Mail: christoph.vonderahe@ita.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer, Head of the the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Ludger Overmeyer was born 1964 in Recke, Germany. Between 1984 and 1991, he studied electrical engineering at the University of Hannover. In 1996 he finished his doctorate in mechanical engineering at the University of Hannover. From 1997 to 2001 he worked as project manager, division manager and head of research and development at Mühlbauer AG in Roding. Since 2001 Ludger Overmeyer is Professor at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Address: Leibniz University Hannover, Institute of Transport and Automation Technology, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany
Phone: +49 511 762-3524, Fax: +49 511 762-4007
E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de