

Verfahren zum Erkennen von externen Einflüssen auf Rohrleitungen

durch kontinuierliches Monitoring auf Basis des KKS und in Kombination mit zusätzlicher Sensorik

Von Raimund Tietz, Daniel Steller und Holger Brauer

Der Schutz von Stahlrohrleitungen gegen äußere Korrosion wird in der Praxis durch eine Kombination von zwei sich optimal ergänzenden und aufeinander abgestimmten Schutzverfahren realisiert. Der passive Korrosionsschutz wird durch die hochwertige Rohrumhüllung sichergestellt, den aktiven Korrosionsschutz übernimmt dabei der klassische kathodische Korrosionsschutz (KKS). Der KKS kann aber noch viel mehr. Er ist auch unverzichtbarer Bestandteil von zustandsorientierter Instandsetzung und leistet somit einen wertvollen Beitrag für Managementsysteme zur Bewertung der Rohrleitungsintegrität (PIMS). Die Rohrleitungsintegrität kann mit Hilfe des KKS und durch kontinuierliches Monitoring aber auch vorbeugend dahingehend überwacht werden, dass beispielsweise externe Beanspruchungen, Beschädigungen oder auch direkte Angriffe auf die Integrität einer Rohrleitung immer sicher erkannt werden. Bisher gab es zwar auch schon in begrenztem Umfang mit Hilfe des KKS die Möglichkeit, größere Angriffe (z. B. durch schweres Gerät wie Bagger) zu detektieren, diese waren in ihrer Aussagekraft jedoch sehr eingeschränkt. Durch die heute zur Verfügung stehende Technik, in Bezug auf energiesparendste Sensorik und Softwarelösungen die in Echtzeit Daten liefern, sind die Möglichkeiten, selbst kleinste Manipulationen zeitnah zu erkennen und örtlich genau einzuordnen, gegeben. In dem vorliegenden Fachbericht wird ein von der Firma Steffel KKS GmbH entwickeltes Konzept vorgestellt, das unterschiedliche Sensorik mit dem KKS kombiniert. An einer Versuchsleitung der Mannesmann Line Pipe GmbH wurde dieses Verfahren getestet. Das Besondere an diesem Konzept ist, dass es ein Verfahren beschreibt, das eine einfachere Ankopplung der Messtechnik an den Rohrkörper erlaubt. Neben den Messdaten und den daraus resultierenden Informationen über die Rohrleitungen, die dieses Verfahren liefert, können zusätzlich weitere Optimierungen erzielt werden. Die bereits ab Rohrwerk vorinstallierte Messtechnik-Aufnahme reduziert in Zukunft bei neuen Rohrleitungen nicht nur die Kosten auf der Baustelle, sie ermöglicht auch eine flexible Erweiterung und Integration weiterer Sensoren neben dem KKS. Damit wird das intelligente Rohr Realität.

Der Korrosionsschutz ist ein wichtiges Element zum Erhalt der Pipeline-Infrastruktur. Die Gesamtschäden, die durch Korrosion verursacht werden, belaufen sich in Deutschland auf etwa 4 % des Bruttoinlandsprodukts. In Zahlen ausgedrückt entspricht das Schäden in einer Gesamthöhe von etwa 90 Mrd. Euro [1].

Aus diesem Grund ist der kathodische Korrosionsschutz (KKS) seit vielen Jahren ein unverzichtbarer Bestandteil von zustandsorientierter Instandsetzung und leistet einen wertvollen Beitrag für Managementsysteme zur Bewertung der Rohrleitungsintegrität (PIMS).

Neben den Schäden, die durch Korrosion verursacht werden, zählen die sogenannten „3rd-Party-Damages“ zu den häufigsten Ursachen für Leitungsbeschädigungen, die nicht selten zu einem Austritt des transportierten Mediums führen. Neben unbeabsichtigter Beschädigung z. B. im Rahmen von Erdarbeiten durch Dritte oder landwirtschaftlichen Feldbearbeitungen im Bereich einer Rohrleitungstrasse, spielt auch Mediendiebstahl eine nicht unerhebliche Rolle.

Es gibt seit ein paar Jahren mit Hilfe des KKS Möglichkeiten, in begrenztem Umfang solche „Angriffe“ von Dritten auf die Rohrleitung (z. B. durch schweres Gerät wie Bagger) zu detektieren. Die Patente zu den bestehenden Verfahren beschreiben Überwachungsmöglichkeiten mit den im Folgenden beschriebenen Ansätzen.

Ein Ansatz beschreibt das Verfahren, bei dem zu vorgegebenen Zeitpunkten an wenigstens zwei Messstellen an einer Rohrleitung jeweils ein, für den an der Messstelle entlang der Rohrleitung fließenden Schutzstrom, repräsentativer Messwert erfasst wird. Für jeden vorgegebenen Zeitpunkt wird aus den Messwerten jeweils zweier beabstandeter Messstellen ein für die Differenz der an den Messstellen entlang der Pipeline fließenden Schutzströme repräsentativer Differenzwert gebildet. Aus der zeitlichen Änderung der für die vorgegebenen Zeitpunkte gebildeten Differenzwerte wird wenigstens ein Wert abgeleitet, der eine Annäherung eines leitfähigen Körpers an die Rohrleitungen zwischen den beiden Messstellen anzeigen kann [2].

Ein weiteres Verfahren zeigt Schritte auf, nach denen ein elektrisches Prüfsignal bezüglich des Objekts gemessen und der Zustand des Objekts in Abhängigkeit von einem zeitlichen Verlauf eines Frequenzspektrums des elektrischen Prüfsignals ermittelt wird. Insbesondere wird der Zustand des Objekts in Abhängigkeit von einem zeitlichen Verlauf einer Amplitude im Bereich einer Prüffrequenz des Frequenzspektrums des elektrischen Prüfsignals ermittelt. Vorzugsweise geschieht dies in Abhängigkeit von einem Überschreiten eines Amplitudenschwellwerts durch die Amplitude des Prüfsignals. Durch das Messen eines elektrischen Prüfsignals bezüglich des Objekts und durch das Ermitteln eines Zustands des Objekts in Abhängigkeit von einem zeitlichen Verlauf eines Frequenzspektrums des elektrischen Prüfsignals soll die Erkennung und Ermittlung eines bestimmten Zustands des elektrisch leitfähigen und durch kathodischen Korrosionsschutz geschützten Objekts verbessert werden. Insbesondere soll durch die Beobachtung des Frequenzspektrums über der Zeit eine frequenzspezifische Eigenschaft beobachtet werden können, ohne dass Störsignale einen negativen Einfluss auf die Zustandsermittlung haben [3].

Die Aufgabe des im Folgenden vorgestellten neu entwickelten kombinierten Messverfahrens war es, neueste Sensor-Technologien und Softwarelösungen zu kombinieren. Es wurde so die Möglichkeit geschaffen, mit Hilfe energiesparender Sensorik in Echtzeit selbst kleinste Manipulationen von unterschiedlichem Charakter zu erkennen und örtlich genau einzuordnen.

Das grundlegende Verfahren

Der kathodische Korrosionsschutz erlaubt es, Aussagen zur Beschaffenheit und dem Zustand einer Rohrleitung zu geben. Beschädigungen der Umhüllung einer Rohrleitung etwa können durch diverse Messmethoden festgestellt

und lokalisiert werden. Kontinuierliches Monitoring mit Sensoren, die entlang einer Rohrleitung installiert sind, macht es möglich, Veränderungen, Beanspruchungen und Beschädigungen einer Rohrleitung sicher zu erkennen.

Mit den beschriebenen Möglichkeiten ist es aber im Fall der Beschädigung durch Dritte erst zu einem nachgelagerten Zeitpunkt möglich diese zu erkennen. Aus diesem Grund geht das folgende Verfahren einen Schritt weiter und schafft eine Echtzeiterkennung von Beschädigungen an einer Rohrleitung.

Das System benötigt für die Erkennung nur nachrangig absolute DC-Messwerte. Die denkbaren „Angriff-Szenarien“ hinterlassen ein typisches Frequenzspektrum (**Bild 1**), das sich in unterschiedlicher Ausprägung in den Strom- und Spannungsverläufen widerspiegelt. Durch digitale Filterung der Signale (**Bild 2**) nach den charakteristischen Frequenzen, die bei den verschiedenen Kontakten mit dem Erreich entstehen, können Angriffe detektiert und charakterisiert werden.

Zusätzlich zum Frequenzspektrum werden statistische Auswertungen der Signalverläufe über bestimmte Zeiten zur Auswertung herangezogen. Die gewonnenen Ergebnisse der Frequenzanalyse, der Statistikmodule und des Korrelationsmoduls für Strom und Spannung werden einem, als künstliche Intelligenz fungierenden, Fuzzy-Controller zugeführt. Eine typische Eigenschaft eines Fuzzy-Controllers ist eine „weiche“ Betrachtung der aufgenommenen Signale. Diese Logik erlaubt eine Erkennung eines „Angriff-Szenarios“ aufgrund von individueller Beurteilung.

Für die gesamte Erkennung ist kein übergeordnetes System erforderlich. Das Verfahren der Erkennung kann vom KKS-Sensor vor Ort durchgeführt werden. Sollten sich mehrere Sensoren auf der Leitung befinden, so können sich diese untereinander verständigen und ihre Ergebnisse

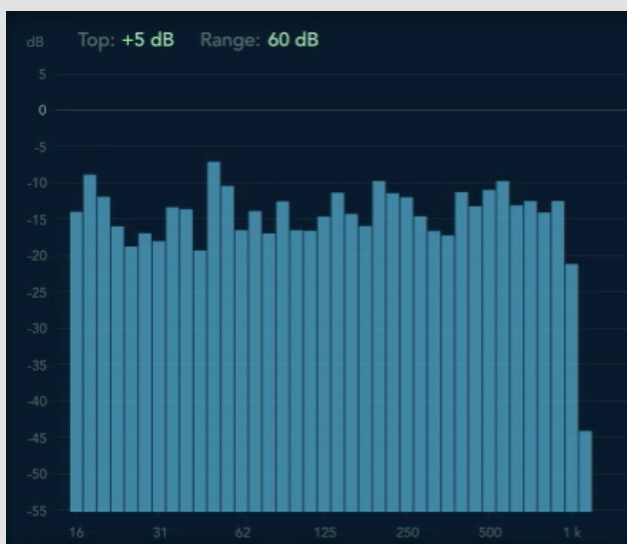


Bild 1: Vor Filterung

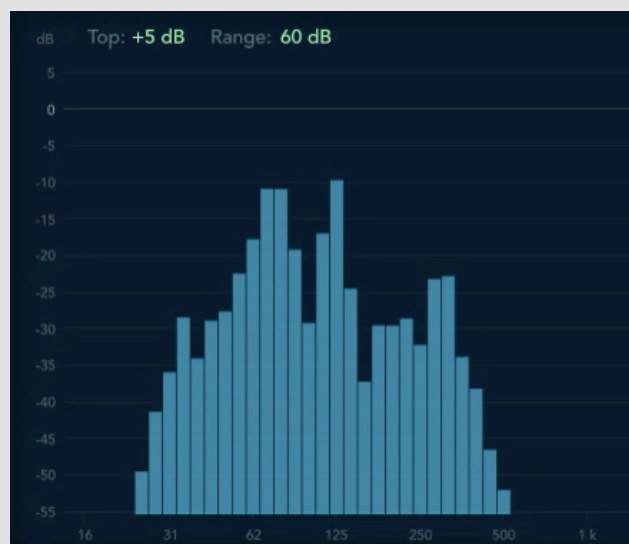


Bild 2: Frequenzspektrum des Angriffs

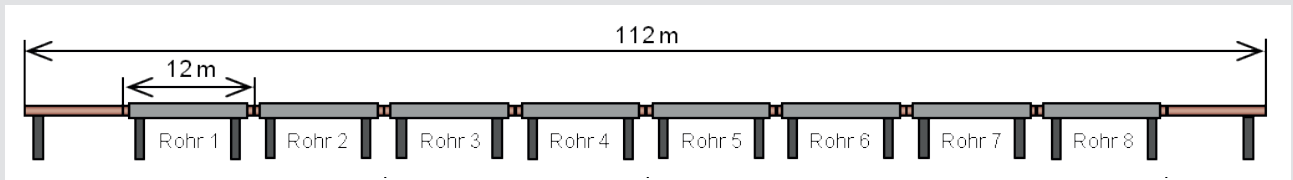


Bild 3: Aufbau der Testleitung

zur Korrelation einem, als Master definierten, Sensor zur Verfügung stellen. Ein als Master definierter Sensor beurteilt erneut mit Hilfe der Fuzzy-Logik die Gesamtheit der Ereignisse, um eine noch sicherere Erkennungsrate zu gewährleisten. Zudem erlaubt die Fuzzy-Logik die Einbeziehung von Daten KKS-fremder Sensorik.

Grundsätzliche Anforderungen an die Messtechnik

Für die Aufnahme der relevanten Messwerte werden an die einzusetzende Messtechnik spezifische Anforderungen gestellt.

Die verwendete Messtechnik benötigt potentialfreie Messkanäle mit einer Abtastrate von 2 kHz und 24 Bit Genauigkeit. Die Messkanäle sollten möglichst hochohmig ($30\text{ M}\Omega$) sein und Messwerte in den Bereichen $< \pm 1\text{ }\mu\text{V}$ bis $\pm 150\text{ V}$ sicher erfassen können. Für die kleineren Messbereiche gilt eine Genauigkeit von $1\text{ }\mu\text{V}$ und in den Messbereichen von $\pm 150\text{ V}$ betragen Auflösung und Genauigkeit 1 mV .

Für die effektive Berechnung der Wechsellspannung und dem Einsatz von notwendigen digitalen Filtern muss die Messtechnik über entsprechend schnelle Analog-Digital-Wandler verfügen. Zudem sollte die Sensorik die Aufnahme und Verarbeitung von zusätzlichen Messsignalen ermöglichen. So lassen sich Messgrößen in Korrelation stellen, die bisher nur unabhängig voneinander oder gar nicht betrachtet wurden.

Kombination mit zusätzlicher Sensorik

Um die Ergebnisse der Erkennung zu verifizieren und zu verfeinern, können Messsignale unterschiedlichster Sensoren, die an der Rohrleitung installiert werden, Verwendung finden.

Es ist etwa möglich, den sich durch die Rohrleitung ausbreitenden Schall (Körperschall) zur Absicherung der Erkennung heranzuziehen. Der Einsatz von empfindlichsten Sensoren (Geophone) erlaubt es, nach entsprechender Filterung die gewonnenen Signale der Auswertung dem Fuzzy-Controller zuzuführen. Über die Laufzeit des Schalls kann, je nach Position und Reichweite, eine Ortsbestimmung vorgenommen werden. Da alle Sensoren absolut zeitsynchron (GPS) ihre Messungen vornehmen, können beim Einsatz von mehreren Körperschallsensoren auch diese Ergebnisse verifiziert werden.

Auch Informationen von Dehnungssensoren, die schon bei geringen Verformungen ihren elektrischen Wider-

stand ändern, oder die Messdaten von Temperatur-, pH-Wert-, Lage- und Beschleunigungssensoren, ergänzen das System, damit selbst kleinste Manipulationen nicht unerkannt bleiben.

Die Auswertung all dieser Messsignale in Korrelation erhöht die Aussagekraft der Erkennung direkter Angriffe auf die Integrität einer Rohrleitung und hilft, diese zu charakterisieren.

Die Erprobung des Verfahrens in Kombination mit Körperschallsensorik

Aufbau der Testleitung

Für die im Folgenden vorgestellten Versuche bezüglich Körperschallsensorik, wurde eine Demonstrations-Testleitung aus Hochfrequenz-Induktions- (HFI-) geschweißten Rohren der Mannesmann Line Pipe GmbH verwendet (**Bild 3** und **Bild 4**) [4]. Der Rohrdurchmesser beträgt DN 300, bei einer Wanddicke von 6 mm. Umhüllt sind die Rohre mit einer MAPEC®-Kunststoff-3-Lagen-Umhüllung.

Eingesetzte Messtechnik

Für die Erfassung des Körperschalls wurden an der Testleitung zwei Piezo-Sensoren installiert, die für spätere Praxisanwendungen eingesetzt werden sollen. Um die Wirksamkeit dieser Sensoren zu verifizieren, wurden zusätzlich hochwertige Geophone (**Bild 5**) als Referenz verwendet. Die erfassten Signale aller Körperschallsensoren wurden mit Steffel iCorrLog-Messgeräten und professioneller Audio-Studioteknik parallel aufgezeichnet. Die für KKS-Messungen bewährten iCorrLog-Messgeräte von Steffel wurden ebenfalls für die Aufzeichnung aller elektrischen Signale, z. B. dem Rohrstrom, verwendet.

Versuchsdurchführung

Die Sensorik für die Erfassung der relevanten Messdaten wurde auf einer Seite der Testleitung befestigt (**Bild 5**). Für die Simulation unterschiedlichster Angriffsszenarien wurden im Anschluss ca. alle 20 m folgende Aktionen durchgeführt:

- » Hammerschläge mit einem 50-g-Hammer mit unterschiedlicher Intensität. Ausgeführt direkt auf isolierten und nicht isolierten Teilen des Rohrkörpers.
- » Sägevorgänge mit einer Bügelsäge mit unterschiedlicher Zahnung. Ausgeführt direkt auf isolierten und nicht isolierten Teilen des Rohrkörpers.



Bild 4: Testleitung



Piezosensoren
mit Magneten beschwert

Geophone

Bild 5: Anbringung der Körperschallsensoren

» Bohrversuche entlang der Rohrleitung mit Bohrern von unterschiedlichem Durchmesser.

Auswertung der aufgezeichneten Messsignale

Die Ergebnisse der aufgezeichneten Daten der Körperschallsensoren wurden in einer DAW (Digital Audio Workstation) weiterverarbeitet. Hierfür wurden die Daten der akustischen und elektrischen Signale, die mit den Steffel iCorrLog-Messgeräten erfasst wurden, in ein Audio-Format (WAV) konvertiert. Die Auswertung der Daten der iCorrLog-Messgeräte (**Bild 6** und **Bild 7**) und der Referenzaufzeichnung mit der hochwertigen Audiotechnik zeigten dieselben signifikanten Signale der simulierten Angriffsszenarien. Zusätzliche Signale der Audiotechnik, die in einem höheren Frequenzbereich

erfasst wurden, können keinen zusätzlichen Beitrag für die Angriffsdetektion leisten und sind somit nicht relevant.

Die eingesetzten Piezo-Sensoren sind nach Auswertung aller Daten und dem Vergleich zum höherwertigen Geophon optimal für die Erfassung des Körperschalls geeignet. Unter Verwendung aller gewonnenen Daten zeigt sich, dass über die Detektion hinaus zusätzlich eine Ortung des Angriffs möglich ist. Zudem bestätigen die Versuche, dass die Körperschall-Erfassung eine optimale Ergänzung zu der schon auf Basis von elektrischen KKS-Daten nachgewiesenen Erkennung von Angriffsszenarien ist. Durch die Korrelation von elektrischen Signalen mit akustischen kann eine sichere Erkennung von Angriffen noch effizienter werden.

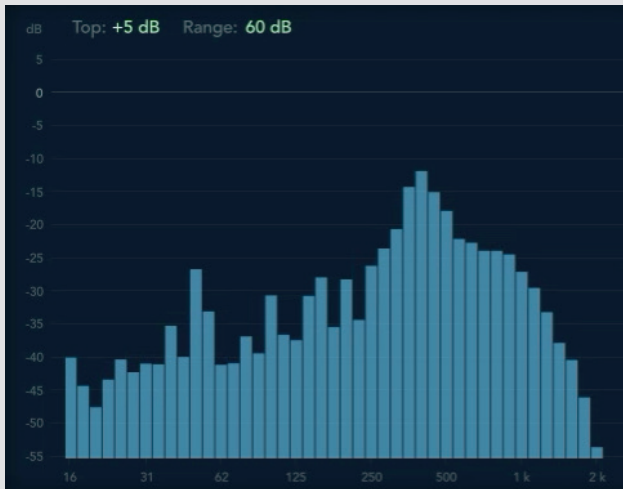


Bild 6: Vor Filterung

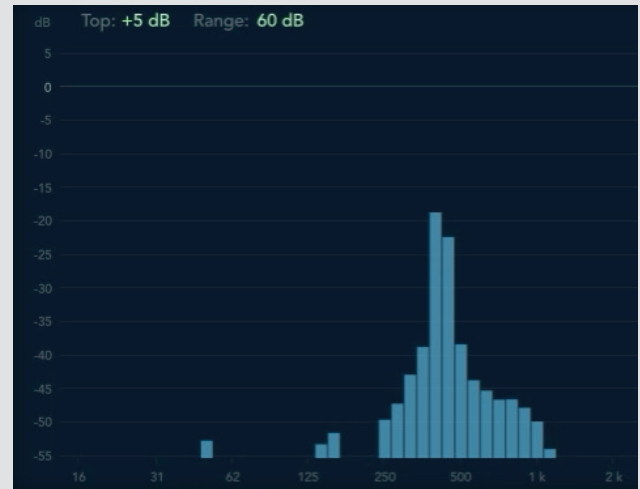


Bild 7: Bohrversuch mit 3-mm-Bohrer

Messtechnik-Interface

Der Einsatz von Körperschallsensoren ist wirtschaftlich jedoch meist auf den Leitungsneubau beschränkt. Um die Installationskosten und -zeit auf möglichst niedrigem Niveau zu halten, wurde von Mannesmann Line Pipe und Steffel ein intelligentes Leitungsinterface entwickelt. Dieses besteht aus einer Grund- und einer passenden Trägereinheit. Die Grundeinheit wird bereits im Rohrwerk vor dem Aufbringen der werksseitigen Mehrlagenbeschichtung (z. B. dreilagigen Polyethylen-Beschichtung) mit integrierter Korrosionsschutzschicht am Rohr dauerhaft befestigt (**Bild 9**).

Auf der Baustelle wird dann die Oberseite der vollständig beschichteten Grundeinheit freigelegt. Die korrosionsgeschützte Trägereinheit mit einer Dichtung und der Sensorik kann dann über einfache Befestigungsverfahren mit der Grundeinheit verbunden werden (Bild 9). Hierdurch entfallen auf der Baustelle eine aufwändige Freilegung der

Stahloberfläche, die Befestigung der Sensoreinheit(en) sowie die Nachumhüllung.

Der für den KKS notwendige Kathodenanschluss, der sonst auf der Baustelle durch Bolzenschweißen und Nachumhüllung hergestellt werden musste, wird auch durch das vorbereitete Interface bereitgestellt. Eine flexible Erweiterung und Integration weiterer Sensoren neben dem KKS wird durch die vorgestellte Technologie ebenfalls ermöglicht.

Zusätzlich integrierbare Sensorik

Neben den vorgestellten integrierbaren Anschlüssen für die Sensoren des KKS mit Angriffsüberwachung und dem Körperschall bietet das intelligente Leitungsinterface vielfältige Möglichkeiten der Adaption zusätzlicher Sensorik. Jede der folgenden Anwendungen kann mit seinen Messwerten einen weiteren Beitrag für die Angriffsüberwachung liefern. Für die Überwachung von mechanischen Spannungen der Rohrleitung werden Dehnmessstreifen verwendet, die bisher nur sehr aufwändig installiert werden konnten. Mit dem intelligenten Leitungsinterface ist es möglich, diese schon vor Auslieferung des Rohres zu installieren und zu überprüfen. So kann ab Werk der Lebenszyklus und Zustand der Rohrleitung erfasst werden.

Die Integration von Lage- und Beschleunigungssensoren in tektonisch aktiven Regionen könnten mechanische Belastungen sowie Lageveränderung der Leitung aufzeichnen und diese Daten der Angriffsüberwachung zur Verfügung stellen. Das gleiche gilt für Temperatursensoren, die besonders bei flüssigen Medien von besonderem Interesse sind.

Zukunftsweisend für den kathodischen Korrosionsschutz ist die Integration von langlebiger pH-Wert-Messsensorik. Denn anhand des Pourbaix-Diagramms, das den Zusammenhang zwischen Schutzpotential und pH-Wert beschreibt, kann sicher bewiesen werden, ob Korrosion stattfindet oder nicht.

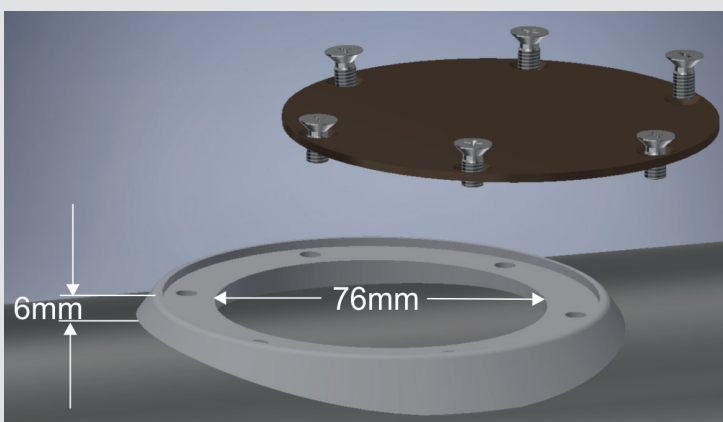


Bild 8: Am Rohr befestigte Grundeinheit des Sensor-Interfaces vor der Werksbeschichtung und Schutzdeckel (schematische Darstellung)

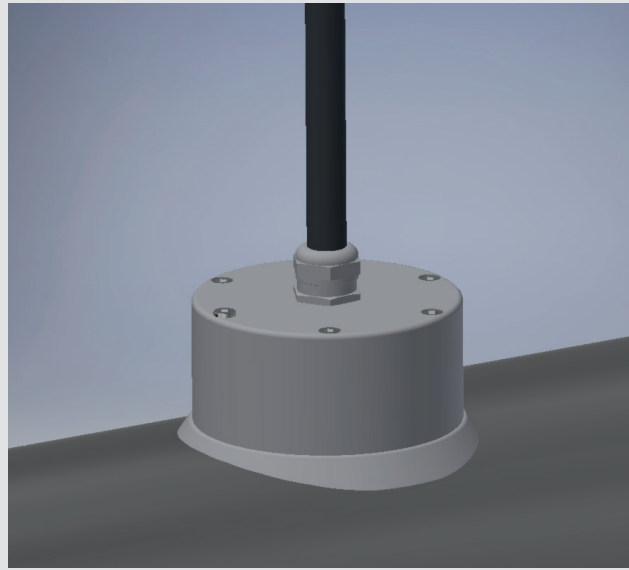
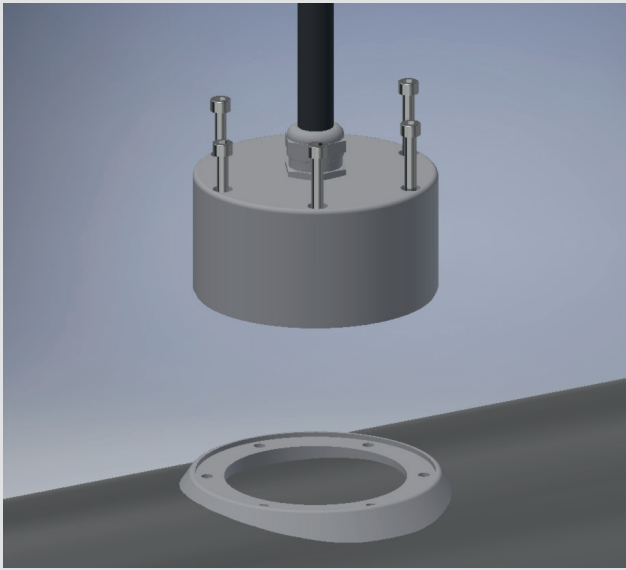


Bild 9: Am Rohr befestigte Grundeinheit des Sensor-Interfaces nach der Werksbeschichtung und Entfernung des Schutzdeckels, mit passender Trägereinheit für die Sensorik (schematische Darstellung)

Zusammenfassung und Ausblick

Der beschriebene Versuch hat gezeigt, dass die auf Basis von elektrischen KKS-Daten nachgewiesene Erkennung von 3rd-Party-„Angriffen“ effizient durch die Erfassung von Körperschall ergänzt werden kann.

Für die effektive und wirtschaftliche Installation von KKS- und Körperschallsensoren am Rohrkörper wurde eine bereits ab Rohrwerk vorinstallierte Messtechnik-Aufnahme vorgestellt. Dieses intelligente Leitungsinterface reduziert in Zukunft bei neuen Rohrleitungen nicht nur die Kosten auf der Baustelle, es ermöglicht auch eine flexible Erweiterung und Integration weiterer Sensoren neben dem KKS. Im nächsten Schritt ist geplant, das Interface zu optimieren und einen Prototypen herzustellen.

Dieser Prototyp soll zusammen von der Mannesmann Line Pipe GmbH und der Steffel KKS GmbH im Rahmen des 32. Oldenburger Rohrleitungsforums präsentiert werden. Das intelligente Rohr wird Realität!

Literatur

- [1] Korrosion und Kathodischer Korrosionsschutz (2007):
Quelle: http://kks.steffel.com/uplo-ads/media/KKS-Broschuere_08_2007_2_.pdf.
- [2] Patent der OGE - EP 1 728 895 B1 (OGE, 2009)
- [3] Patent der EnBW - EP 2 995 930 A1 (EnBW, 2015)
- [4] Brauer, H.; Karbasian, H.; Krix, D.; Kammann, F.; Hill, W.: Messtechnische Zustandsbewertung von Rohrleitungen – Dehnungs- und Temperaturüberwachung. Oldenburger Rohrleitungsforum 2017 (Proc. Conf.)

SCHLAGWÖRTER: Kathodischer Korrosionsschutz, KKS, Körperschall, HFI, Third-Party-Damage, Überwachung, Intelligentes Rohr

AUTOREN



Dr. **HOLGER BRAUER**

Mannesmann Line Pipe GmbH, Siegen
Tel. +49 2381 420-447
holger.brauer@mannesmann.com



RAIMUND TIETZ

Steffel KKS GmbH, Lachendorf
Tel. +49 5145 9891-264
Raimund.tietz@steffel.com



DANIEL STELLER

Steffel KKS GmbH, Lachendorf
Tel. +49 5145 9891-200
daniel.steller@steffel.com
www.kks.de