

Überwachung von Abrasion in doppelwandigen Rohrleitungen mit Schallemissionsanalyse und geführten Wellen

Tobias GAUL¹, Kilian TSCHÖKE¹, Alexander PIETZSCH¹, Lars SCHUBERT¹,
Thomas KIPPERT²

¹ Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden

² KRONOS TITAN GmbH, Leverkusen

Kontakt E-Mail: tobias.gaul@ikts.fraunhofer.de

Kurzfassung. Bei der Produktion von Titandioxid werden doppelwandige Rohrleitungen in der Herstellungslinie verwendet. Das abrasive Titandioxid wird dabei in der inneren Rohrleitung transportiert, während die äußere Rohrleitung ein Medium zur Kühlung der inneren Rohrleitung führt. Im Herstellungsprozess kommt es durch die abrasive Wirkung des titanhaltigen Pulvers zu Wanddurchbrüchen und einem Vermischen der Medien aus der inneren und äußeren Rohrleitung. Eine zerstörungsfreie Prüfung der inneren Rohrleitung ist mit dem Stand der Technik nur im ausgebauten Zustand an den Randbereichen eines Rohrabschnittes möglich und liefert keine zuverlässigen Aussagen über den innenliegenden Bereich.

In einem mehrmonatigen Feldversuch wurde an zwei Rohrabschnitten das Potential von Messverfahren basierend auf geführten elastischen Wellen zur frühzeitigen Erkennung von Abrasion und Wanddurchbrüchen untersucht. Dabei wurde ein Rohrabschnitt mit einem Schallemissionsmesssystem und ein Rohrabschnitt mit einem Messsystem für geführte Wellen instrumentiert.

Das verwendete Schallemissionssystem befand sich an der äußeren Rohrleitung und hat kontinuierlich Schallemissionssignale aufgezeichnet. Für die Bewertung der Abrasion wurden unterschiedliche Schallemissionsparameter wie Events, Hits, Energie und Frequenzinhalt betrachtet und ihre Anwendbarkeit für die untersuchte Aufgabe bewertet. Eine Überwachung der inneren Rohrleitung erfolgte mittels aktiv angeregter geführter Wellen, welche über Wellenleiter eingekoppelt wurden. Dabei konnte gezeigt werden, dass die voranschreitende Abrasion mit einer wanddickeabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeit korreliert. Mit klassischen NDT-Prüfmethoden wurde die Messkampagne begleitet und die Ergebnisse abschließend validiert.

1. Einleitung und Motivation

Die großflächige Überwachung von Korrosion und Abrieb stellt in vielen industriellen Bereichen immer noch eine Herausforderung dar. Der Transport von korrosiven oder abrasiven Materialien führt zu einem kontinuierlichen Verschleiß der Rohrleitung, welcher durch wiederkehrende Ultraschallwanddickenmessungen überwacht wird. Besonders aggressive Prozesse können dazu führen, dass ein unzulässiger Verschleiß einer Rohrleitung oder eines Behälters zwischen zwei Messzyklen auftritt.

Bei der KRONOS TITAN GmbH werden zur Herstellung von Titandioxid doppelwandige Rohre verwendet. Der untersuchte Rohrleitungsabschnitt ist Teil eines



Kühlsystems zur Abkühlung des Produkts nach der Verbrennung. Das abrasive Medium wird im inneren Rohr transportiert, während das äußere Rohr zur Kühlung des inneren Mediums verwendet wird. Dabei soll der Abrieb an der inneren Rohrleitung frühzeitig erkannt werden, um eine Wanddurchdringung und Vermischung beider Medien zu vermeiden. Eine zerstörungsfreie Prüfung der Wanddicke des Innenrohres ist derzeit nur im ausgebauten Zustand des Rohrleitungsabschnittes möglich. Dazu muss der ausgebauten Rohrleitungsabschnitt in regelmäßigen Abständen an zugänglichen Stellen geprüft werden.

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurden zwei verschiedene akustische Methoden zur Überwachung des Wandabtrags untersucht. Beide Methoden basieren auf geführten elastischen Wellen, wobei sie sich in Anregung und Auswertung unterscheiden. Bei der passiven Methode (Acoustic Emission, kurz AE) werden elastische Wellen im Prozess erzeugt und durch den voranschreitenden Abrieb beeinflusst, während die aktive Methode (Acousto Ultrasonic, kurz AU) geführte Wellen anregt und die Laufzeiten zwischen benachbarten Sensoren auswertet. Insbesondere die AE-Prüfung wird seit vielen Jahren in verschiedenen industriellen Bereichen zur Überwachung von Schädigungsprozessen an kritischen Anlagen eingesetzt [1, 2, 3]. Auch beim aktiven Einsatz geführter Wellen existieren unterschiedliche Konzepte zur Wanddickenmessung [4, 5, 6]. Aufgrund der geometrischen Randbedingung des Messobjekts und des verwendeten Wellenmodes wurde in dieser Machbarkeitsstudie eine Bestimmung der Laufzeit untersucht.

Für die eingesetzten Verfahren entstanden während der Messung unterschiedliche Herausforderungen. Zur aktiven Anregung von geführten Wellen auf dem Innenrohr musste der zu überwachende Bereich konstruktiv angepasst werden. Bedingt durch den Eingriff in das Kühlkonzept der Rohrleitung stehen nur wenige Messstellen zur Verfügung. Dem gegenüber werden die passiven Messungen auf der äußeren Rohrleitung aufgenommen. Entstehende Schallemissionen auf dem Innenrohr müssen durch das Kühlmedium an die Sensoren auf dem Außenrohr übertragen werden. Dabei ist eine Unterscheidung zwischen Signalen von Außen- und Innenrohr und eine korrekte Ortung entscheidend.

2. Durchgeführte Messungen und Ergebnisse

2.1 Messaufbau

Die Messsysteme für aktive und passive Messungen wurden an einem 6 m langen Rohrabschnitt hinter der Brennkammer installiert. Für beide Verfahren wurde jeweils ein eigenständiger Rohrabschnitt mit einer Länge von 3 m vorgesehen. Beide Rohrabschnitte sind in Abb. 1 dargestellt. Über einen Zeitraum von 4 Monaten wurden periodisch Messdaten an den installierten Sensoren aufgenommen.

Für die aktiven und passiven Messungen kam das am Fraunhofer IKTS entwickelte MAS2-System [7] mit Vorverstärkern vom Typ PreAmp MCE 6.3 und einer Verstärkung von 40 dB zum Einsatz.

Bei den passiven Messungen wurden insgesamt 14 Sensoren verwendet, welche sich auf der Oberfläche des äußeren Rohres befanden. Über einer Länge von 3 m verteilen sich 7 Sensorringe mit jeweils 2 Sensoren, welche abwechselnd um 90° zueinander verdreht sind. Mit Sensoren vom Typ KAR601S erfolgt die Aufzeichnung und Ortung der Schallemissionssignale in verschiedenen Ortungsebenen.

Die aktiven Messungen wurden mit drei Aktor-Sensor-Paaren durchgeführt. Diese Paare haben jeweils einen Abstand von 1100 mm zueinander und sind über einen Wellenleiter an die Oberfläche des inneren Rohrs angeschweißt. Der Wellenleiter ist so dimensioniert, dass sich die Oberflächentemperatur von 160°C auf 35°C am Ende des Wellenleiters verringert. Somit können herkömmliche piezoelektrische Keramiken zum Senden und Empfangen verwendet werden. Am Ende des Wellenleiters dient ein

Piezostapel PICA P-010.00P von PICeramic als Aktor und eine Keramikscheibe als Sensor. Beide Keramiken sind in einem druckfesten Gehäuse vor mechanischen Einflüssen geschützt und können auch im Explosionsschutzbereich verwendet werden. Um den Wellenleiter herum wurde ein Trichter zwischen Innen- und Außenrohr geschweißt, sodass kein Kühlmittel aus der Rohrleitung entweichen kann.



Abb. 1: Rohrabschnitte mit installierter Messtechnik für aktive (oben) und passive (unten) Messungen

2.2 AE-Ergebnisse

Die Datenerfassung erfolgte durch 14 AE-Sensoren, die paarweise über 7 Sensorringe am Rohr angebracht waren. Durch Abrollen der Rohroberfläche entstehen 4 Ortungsebenen, welche eine flächige Ortung der Schallereignisse ermöglichen und jeweils ein Viertel der Rohroberfläche abdecken. Ein Schallereignis wird einer der vier Ebenen zugeordnet, in der sich der auslösende AE-Sensor möglichst mittig befindet. Eine detaillierte Beschreibung zur Ortung der Ergebnisse findet sich auch in [3].

Zur Ortung wird der asymmetrische A0-Wellenmode verwendet, welcher im niederfrequenten Bereich eine größere Amplitude als der S0-Mode aufweist. Zusätzlich wurden symmetrische Moden durch einen dynamischen Bandpassfilter unterdrückt. Als Schallgeschwindigkeit für die Lokalisierung wurde 3000 m/s angenommen. Die Lokalisierung und Parameterberechnung basiert auf den aufgezeichneten Zeitsignalen, wobei Stillstandszeiten und An- und Abfahrprozesse der Anlage aussortiert wurden. Aus den Schallemissionsereignissen wurden zur Auswertung und Korrelation die Parameter Events, die Signalenergie bezogen auf den Quellort und die kumulative Energie der Schallemissionsereignisse berechnet.

Ausgehend von diesen Parametern wurde untersucht, inwieweit die AE-Daten genutzt werden können, um die Schallemissionsereignisse und damit die Orte eines möglichen Wandabtrags, in Längs- und Querrichtung des Rohrs zu lokalisieren. Abb. 2 zeigt die Anzahl der aufgetretenen Schallereignisse entlang der Rohrlängsachse, aufsummiert über die Umfangsposition. Eine besonders große Anzahl von Ereignissen ist im Abschnitt bei $X=2300$ mm zu beobachten, die bereits in den ersten Wochen sichtbar

sind. Generell ist nach der ersten Inspektion nach 6 Wochen eine Zunahme der AE-Ereignisse zu beobachten. Dabei wurden durch den Anlagenbetreiber Betriebsparameter angepasst, was neben dem voranschreitendem Wandabtrag zu zusätzlichen Schallemissionen führen kann.

AE_210909_180421-220110_000000_AIC_KD_LIM_EVT_X0_[mm]-Timediff_[s]-Event-Density_DENS

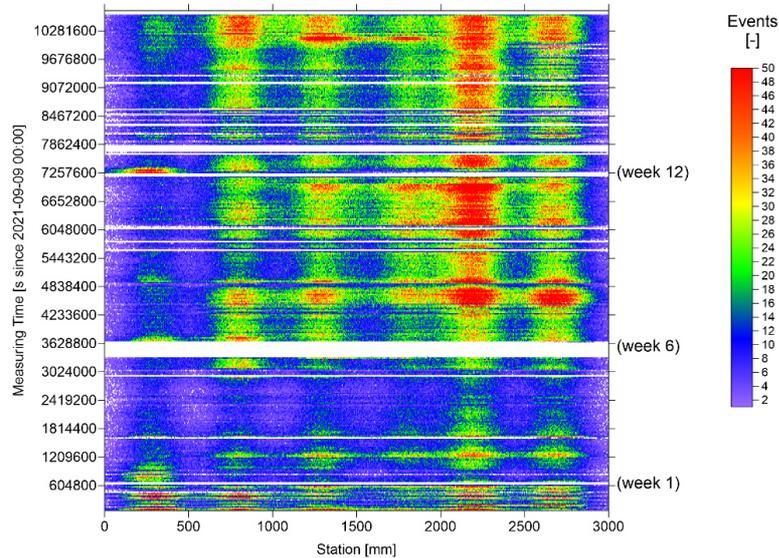


Abb. 2: AE-Ereignisse im gesamten Messzeitraum in Abhängigkeit der georteten Position auf der Rohrlängsachse

Neben der Betrachtung von Häufigkeit und Verteilung der Schallereignisse wurde im Folgenden untersucht, an welcher Stelle in Umfangsrichtung des Rohres Ereignisse mit den höchsten Energien auftreten. Zu diesem Zweck wurde die X-Koordinate in Abb. 2 in festgelegten Bereichen gemittelt. Die Energie der akustischen Signale in Abschnitten von je 500 mm Länge wurden addiert und über ihre Umfangskoordinate aufgetragen.

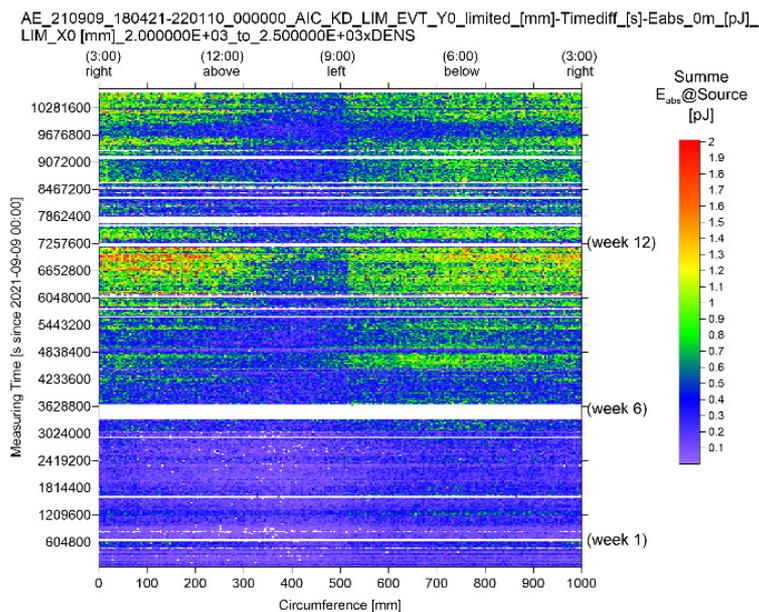


Abb. 3: Kumulierte AE-Energie im Rohrabschnitt zwischen 2000 und 2500 mm im gesamten Messzeitraum in Abhängigkeit vom Rohrumfang

Die Darstellung in Abb. 3 zeigt das Ergebnis für den besonders aktiven Teilabschnitt zwischen der X-Koordinate von 2000 mm bis 2500 mm. Es ist zu erkennen, dass die größten Energien an einer Umfangsposition zwischen 800 und 200 mm auftreten,

was dem oberen Viertel der Rohrleitung mit der Schweißnaht entspricht. Weiterhin nimmt die summierte Energie im Verlauf der Messung bis Woche 12 kontinuierlich zu. Nach 12 Wochen fand eine weitere Inspektion mit Ausbau der Rohrleitung statt. Durch den Wiedereinbau und Anpassung der Prozessparameter kommt es zunächst zu einer geringeren Schallaktivität. Diese nimmt jedoch bis zur Außerbetriebnahme der Rohrleitung wieder kontinuierlich zu und weist auf eine fortschreitende Abrasion hin. Das tatsächliche Ausmaß des Wandabtrags konnte an dieser Stelle nicht untersucht werden, da diese Bereiche (im Gegensatz zum Einlaufbereich am Stutzen) für ZfP-Messungen nicht zugänglich sind.

2.3 AU-Ergebnisse

Bei der Auswertung der aktiv angeregten Wellen wird die Dispersion der geführten Wellen ausgenutzt, um die Wandstärke der Rohrleitung zu ermitteln. Mit bekanntem Abstand zwischen je zwei Aktor-Sensor-Paaren und bekannter Anregungsfrequenz kann aus der gemessenen Ausbreitungsgeschwindigkeit die Wanddicke ermittelt werden. Die dafür notwendige Dispersionskurve wurde im Vorfeld mit dem eingesetzten Material Inconel 600 berechnet und an einem ausgebauten Passstück bei Raumtemperatur verifiziert. Die verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Des Weiteren wurden mit temperaturabhängigen Materialkennwerten Dispersionskurven für unterschiedliche Oberflächentemperaturen der Rohrleitung berechnet. Daraus konnte eine Dispersionskurve für die Betriebstemperatur der Rohrleitung mittels Interpolation ermittelt werden, welche die Wanddickenbestimmung bei beliebigen Temperaturen ermöglicht.

Bei der Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit muss zusätzlich der Wellenleiter berücksichtigt werden. Der Wellenleiter wurde ebenfalls aus Inconel 600 gefertigt. In diesem breitet sich eine nicht-dispersive Wellenform mit konstanter Geschwindigkeit aus, welche im Vorfeld im Labor für unterschiedliche Temperaturen ermittelt wurde. Bedingt durch die Oberflächentemperatur der inneren Rohrleitung bildet sich im Wellenleiter eine Temperaturverteilung aus. Zur Vereinfachung wurde für die Geschwindigkeit im Wellenleiter ein Mittelwert aus der Geschwindigkeit bei der Temperatur am Fußpunkt und am Kopf gebildet. Diese Geschwindigkeit wurde als durchschnittliche Ausbreitungsgeschwindigkeit im gesamten Wellenleiter angenommen.

Tabelle 1: Zur Berechnung der Dispersionskurve verwendete Materialparameter für Inconel 600 (Werkstoffnummer 2.4816)

Temperatur [°C]	E-Modul [GPa]	G-Modul [GPa]	Poissonzahl [-]
22	214	80,8	0,324
100	210	79,6	0,319
200	205	78,0	0,314
300	199	76,2	0,306

Im Betrieb der Rohrleitung wurden über 17 Wochen hinweg Messungen durchgeführt. Dabei erfolgte eine Messung alle 4 h, sodass 6 Messwerte je Tag ermittelt werden konnten. Die Messungen erfolgten mit Frequenzen zwischen 60 und 100 kHz, welche bei den verwendeten Wanddicken die größte Änderung in der Gruppengeschwindigkeit mit abnehmender Wandstärke aufweisen. In diesem Messzeitraum erfolgten weiterhin zwei Inspektionen, wobei das Passstück ausgebaut und visuell inspiziert wurde. In den Ein- und Auslassbereichen des Passstückes wurden zusätzlich Ultraschallwanddickenmessungen durchgeführt. Durch die begrenzte Zugänglichkeit konnten Messungen nur bis zu einem Abstand zum Stutzen von 30 cm durchgeführt werden und geben keine zuverlässige Aussage über die Wanddicke im mittleren Teil der Rohrleitung.

Abb. 4 zeigt die berechnete Wanddicke für alle Messfrequenzen über dem gesamten

Messzeitraum. In der Darstellung wird für jeden Tag ein Messpunkt der Wandstärke je Frequenz abgebildet. Dieser ergibt sich aus dem Mittelwert der Wandstärken aller an einem Tag durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse zeigen frequenzabhängig eine Ausgangswanddicke zwischen 5,9 und 6,2 mm, was im Bereich der Wandstärke des Innenrohres von 6 mm liegt. Bis zur 2. Inspektion bleibt die Wanddicke annähernd konstant und reduziert sich danach, bis zum Austausch der Rohrleitung, stetig auf einen Wert unter 5,5 mm. Nach einer Inspektion traten sprunghafte Änderungen der Wanddicke auf, deren Grund nicht abschließen geklärt werden konnten.

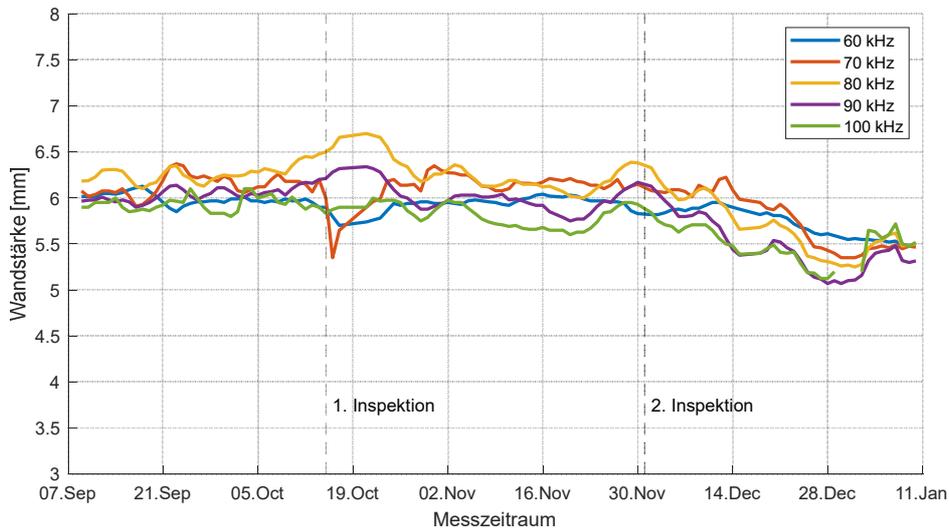


Abb. 4: Tageweise gemittelte Werte der berechneten Wanddicke für alle Messfrequenzen

In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Wandstärkenbestimmung tageweise für die ausgewählte Frequenz von 60 kHz als Box-Whisker-Plot dargestellt. Dabei beschreibt der rote Strich den Median der Wanddicke über alle Messergebnisse eines Tages. Die blaue Box wird aus den Werten des oberen (75%) und unteren (25%) Quantils gebildet. Die roten Kreuze beschreiben Ausreißer, welche deutlich von den Ergebnissen der anderen Messungen abweichen. Die zunächst ermittelten Abweichungen zwischen erwarteter theoretischer Geschwindigkeit und der tatsächlich gemessenen Geschwindigkeit betragen weniger als 1%. Die Messungen können somit als stabil betrachtet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass über den Messzeitraum von 4 Monaten eine Reduktion der Wandstärke von 6 mm auf 5,5 mm ermittelt wurde. Dabei streuen die Ergebnisse bis zur ersten Inspektion um bis zu $\pm 0,2$ mm und verringern sich nach der ersten Inspektion auf maximal $\pm 0,1$ mm. Da die Messung als stabil betrachtet wird, können Änderungen nach der zweiten Inspektion auf einen voranschreitenden Wandabtrag zurückgeführt werden.

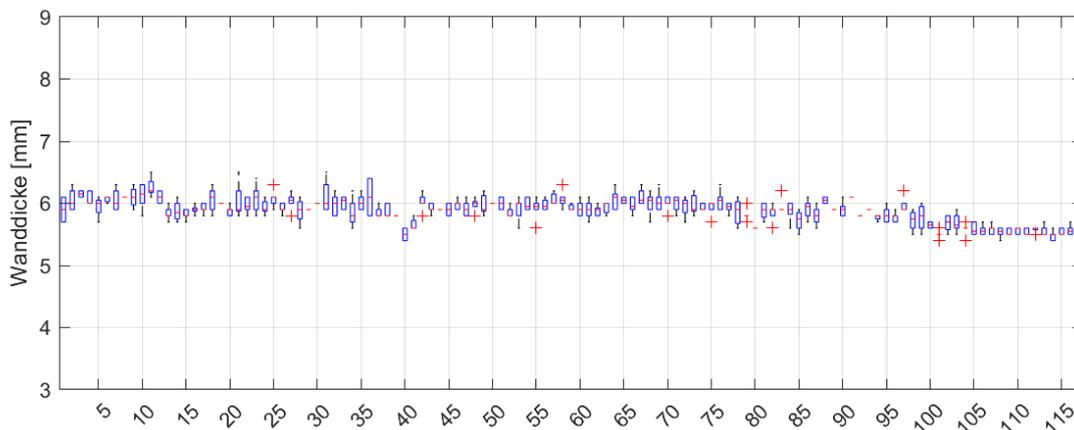


Abb. 5: Berechnete Wanddicken als Box-Whisker-Plot für jeden Tag der Messkampagne

3. Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der aktiven und passiven Messungen deuten auf eine Veränderung der Rohrleitung über den Messzeitraum hin. Während sich Events und Signalenergie für die passiven Messungen mit zunehmendem Verschleiß erhöhen, ändert sich bei den aktiven Messungen die Ausbreitungsgeschwindigkeit der verwendeten A0-Mode, was in direktem Zusammenhang mit der Änderung der Wandstärke steht.

Die dargestellten AE-Diagramme zeigen eine Zunahme von Ereignis- und Energiedichte über den Messzeitraum. In axialer Richtung ist der Bereich zwischen $2200 \text{ mm} < X < 2400 \text{ mm}$ besonders signifikant und zeigt über die gesamte Dauer der Messkampagne die höchste Anzahl von AE-Ereignissen. Die Energie der Burstsignale ist am Eingang des Rohres am höchsten. Bei der Auswertung der Energie der Burstsignale über die Umfangsrichtung ist eine stetige Zunahme der kumulierten Energie zwischen der "12 Uhr" und "3 Uhr"-Position zu erkennen. Dabei tritt diese Zunahme neben dem Ein- und Auslassbereich auch in den dazwischenliegenden Abschnitten auf. Mit fortschreitender Messdauer nimmt die Energie der Schallereignisse kontinuierlich zu. Besonders nach der 2. Inspektion in Woche 12 wird dies deutlich, was neben einem kontinuierlichen Wandabtrag auch auf eine Veränderung im Prozess oder in der Anlage hinweist. Dies deutet darauf hin, dass Ereignisse mit hohen Energien auf höheren Abrieb oder Verschleiß im Rohr hinweisen.

Reihe	15.10.21	01.12.21	09.01.22
R1	5,05 mm	4,30 mm	3,58 mm
R2	5,45 mm	4,93 mm	4,43 mm
R3	5,35 mm	5,48 mm	5,08 mm
R4	5,83 mm	5,58 mm	5,30 mm
R5	5,83 mm	5,53 mm	5,25 mm
R6	5,73 mm	5,50 mm	5,20 mm
R7	5,80 mm	5,45 mm	5,18 mm
R8	5,75 mm	5,43 mm	5,15 mm

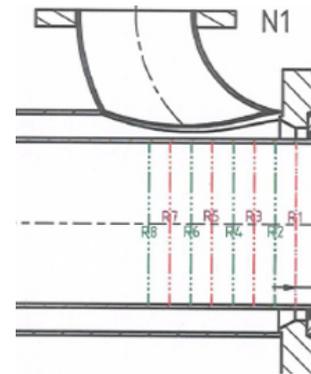


Tabelle 2: Gemittelte Wanddicke an den Messpositionen zu den drei Inspektionszeitpunkten **Abb. 6:** Positionen der Ultraschallmessungen

Die Wandstärke der Rohrleitung betrug zu Beginn des Tests an allen Punkten 6 mm. Nach 6, 12 und 17 Wochen wurden im Rahmen der Routineinspektion Ultraschallwanddickenmessungen im Bereich des Zulaufs durchgeführt. Dabei wurde die Wanddicke wiederholt in verschiedenen Reihen (R1–R8) an mehreren Positionen gemessen. In Tabelle 2 sind die Messwerte der Inspektionen gemittelt über mehrere Messpunkte zusammengefasst. Über den Messzeitraum kann im Einlassbereich eine stetige Wanddickenabnahme beobachtet werden. Nach 17 Wochen betrug die mittlere Wanddicke der Messreihe R1 3,58 mm und die Rohrleitung wurde getauscht, da die minimale Wanddicke von 2,9 mm an einer Position der Reihe R1 das kritische Maß zum Weiterbetrieb unterschritten hat.

Es ist zu beobachten, dass der größte Wandabtrag am Anfang des Rohres am Zufluss auftritt und mit zunehmender X-Koordinate abnimmt. Abb. 7 vergleicht die gemittelte Restwanddicke am Ring R1 mit den akustischen Summenenergien der gesamten Rohrleitung. Dabei weist eine Interpolation der Summenenergie über der Wanddicke einen exponentiellen Verlauf auf. Eine Auswertung des Anstiegs der einzelnen Abschnitte ergibt einen Änderungsrate zwischen 80.000 pJ und 90.000 pJ pro mm Wandabtrag. Dieser Wert kann jedoch nicht verallgemeinert werden und hängt vom verwendeten Messsystem und den spezifischen Mess- und Datenauswerteeinstellungen ab.

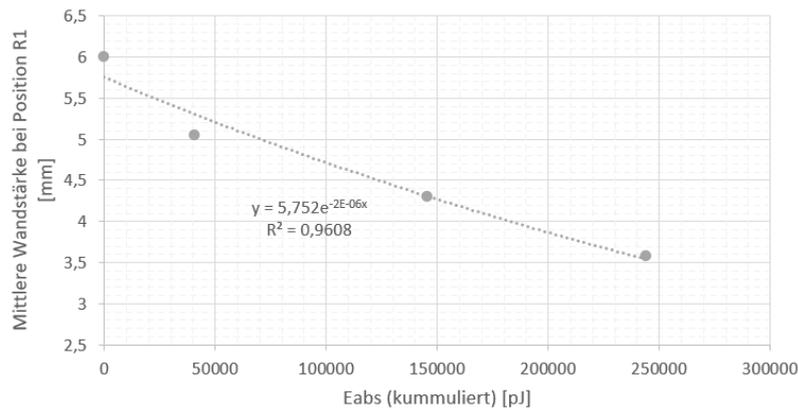


Abb. 7: Korrelation zwischen der gemittelten Wanddicke an Position R1 und der Summe der kumulierten Energie alle AE-Ereignisse

Zusätzlich zu den Wanddickenmessungen am Rohreingangsstutzen wurde nach Außerbetriebnahme der Rohrleitung für die innenliegende Rohrleitung eine Phased-Array-Prüfung über den Umfang und die gesamte Länge durchgeführt. Dies ermöglicht einen Vergleich mit denen im Betrieb ermittelten Messwerten. Abb. 8 zeigt die Einbausituation an der inneren Rohrleitung und die Ergebnisse der Phased-Array-Prüfung. Das Innenrohr ist mit einer Längsnaht verschweißt, welche sich bezogen auf die Sensorpositionen auf 1-Uhr-Position befindet. Durch den produktionsbedingten Drall, mit dem das Produkt durch die Rohrleitung befördert wird, kommt es entlang der Längsnaht immer wieder zu Verwirbelungen und es wird der größte Wandabtrag im Bereich der Schweißnaht erwartet.

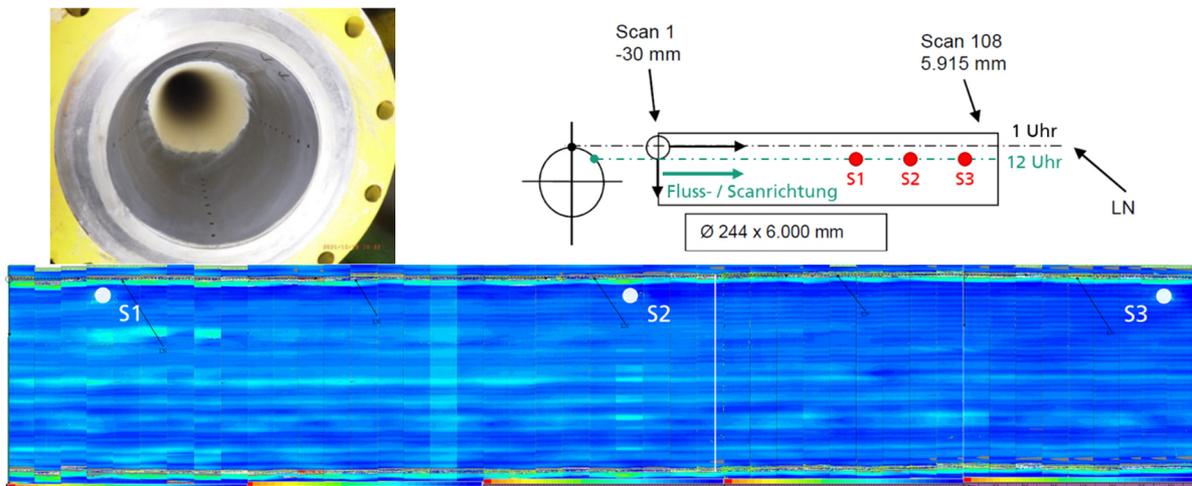


Abb. 8: Ergebnisse der Phased-Array-Prüfung für den Rohrabschnitt mit dem AU-Messsystem (unten) und Foto der inneren Rohrleitung (oben links) mit prinzipieller Messanordnung

Dies konnte durch die Phased-Array-Prüfung bestätigt werden, wobei im Betrieb eine Verringerung der Restwanddicke zwischen 3,8 und 4,6 mm entstanden ist. Dicht neben der Schweißnaht tritt bereits ein geringerer Wandabtrag auf. Auf der 12-Uhr-Position, welche auch mit Sensoren instrumentiert wurde, beträgt dieser zwischen 5,0 und 5,5 mm. Im Phased-Array-Plot sind auch die Positionen der geschweißten Wellenleiter zu erkennen. Verglichen mit den Ergebnissen der aktiven Messungen kann für den 12-Uhr-Pfad eine Übereinstimmung beobachtet werden. Abhängig von der Messfrequenz wird in der letzten Woche der Messkampagne eine Wanddicke zwischen 5,3 und 5,5 mm ermittelt. Im Gegensatz zur Phased-Array-Prüfung wird jedoch die Dicke über die Messstrecke integral ermittelt. Lokale Wanddickenänderungen, welche größer oder kleiner sein können, werden über die Messstrecke gemittelt. Durch die Abrasion wird entlang der Rohrlängsachse ein gleichmäßiger Abtrag erwartet, was mit der Phased-Array-Prüfung bestätigt werden konnte. Aufgrund der verwendeten Sensoranordnung konnte die Wanddickenänderung nur über die

Längsachse und nicht über die Umfangsrichtung ermittelt werden. Durch die Anbringung der Sensoren am Innenrohr und dem damit verbundenen Eingriff in das Kühlkonzept der Rohrleitung, sollte die Anzahl der Sensoren so gering wie möglich gehalten werden.

4. Zusammenfassung

In dieser Machbarkeitsstudie wurde an einem doppelwandigen Rohrabschnitt der Wandabtrag am Innenrohr mit Schallemissionsanalyse und aktiv angeregten geführten Wellen überwacht. Parallel dazu wurde während regulären Inspektionszyklen der Wanddickenabtrag am Einlassstutzen mit konventionellen Ultraschallwanddickenmessungen ermittelt. Trotz der indirekten Messung der Schallemissionen am Außenrohr ist die Anwendung der AE-Technik möglich. Während des Messzeitraums wurden zahlreiche AE-Ereignissen aufgezeichnet. Zunehmende AE-Anzeigen und -Energien im gesamten Rohr deuten auf eine Wanddickenreduktion hin, die durch konventionelle Wanddickenmessungen bestätigt werden konnte. Ebenso lassen sich indirekt aus den AE-Daten Veränderungen im Betrieb der Anlage oder des Prozesses ablesen. Durch die Auswertung der Energieniveaus konnte eine zunehmende Wanderosion festgestellt werden. Im vorliegenden Fall stieg die kumulierte Schallemissionsenergie um 80-90 nJ je Millimeter Wanderosion.

Die parallel dazu durchgeführten Messungen mit aktiv angeregten geführten Wellen ermöglichen ebenfalls die Überwachung der Wanddicke. Der instrumentierte Rohrabschnitt neben der Schweißnaht weist über die Länge einen gleichmäßigen Abtrag auf, welcher besonders in den letzten sechs Wochen der Messkampagne auftrat. Alle verwendeten Messfrequenzen zeigen einen fallenden Trend der Wanddicke um 0,5 mm, welcher in der Größenordnung durch nachgelagerte Ultraschallwanddickenmessungen auf dem Messpfad bestätigt werden konnte. Bedingt durch die verwendete Anordnung ergibt sich die Wanddicke dabei integral über die Ausbreitungsstrecke zwischen den Sensoren.

Referenzen

- [1] B. Weihnacht, T. Klesse, R. Neubeck und L. Schubert, „Monitoring of hot Pipes at the power plant Neurath using guided waves,“ *Sensors and Smart Structures for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2013.
- [2] K. Tschöke, T. Gaul, A. Pietzsch, E. Schulze und L. Schubert, „On the Application of Actively and Passively Excited Guided Elastic Waves for the Monitoring of Fiber-Reinforced Plastics,“ *MPDI Aerospace*, pp. 1-12, 2020.
- [3] K. Tschöke, A. Pietzsch, T. Kippert und L. Schubert, „Acoustic Emission Monitoring of abrasion and corrosion in double-walled pipelines,“ *35th EWGAE*, 2022.
- [4] N. Meyendorf, B. Frankenstein und L. Schubert, „Structural health monitoring for aircraft, ground transportation vehicles, wind turbines and pipes - prognosis,“ *World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT)*, 2012.
- [5] R. Howard und F. Cegla, „Detectability of corrosion damage with circumferential guided waves in reflection and transmission,“ *NDT and E International*, pp. 108-119, 2017.
- [6] S. Heinlein, S. Mariani, J. Milewczyk, T. Vogt und P. Cawley, „Improved thickness measurement on rough surfaces by using guided wave cut-off frequency,“ *NDT and E International*, 2022.
- [7] M. Sause, S. Schmitt, H. Trattning, D. Altmann, A. Pietzsch, M. Stephan und L. Schubert, „Vergleich von Messsystemen zur Schallemissionsprüfung von Faserverbundwerkstoffen,“ *22. Kolloquium Schallemission und 3. Anwenderseminar Zustandsüberwachung mit geführten Wellen*, März 2019.