

Schlussbericht zum Vorhaben  
**„Korrosionsmodelle zur Stahlrohrintegritätsbewertung“**

im Rahmen des Eurostars Projekts  
**E! 409 CUIDTECT**  
**„Erkennung und Vorhersage von Korrosionsvorgängen in beschichteten Stahlrohren“**

**Christian Feiler, Garima Kapoor und Daniel Höche**

Helmholtz-Zentrum Hereon  
Institut für Oberflächenforschung  
Max-Planck-Str. 1  
21502 Geesthacht

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin / beim Autor.

Förderkennzeichen: 01QE2203C  
Projektlaufzeit: 01.08.2022 – 31.01.2025

---

Strukturmaterialien sind während ihrer gesamten Lebensdauer einer Vielzahl von Umweltbedingungen ausgesetzt, wobei die damit einhergehende korrosionsbedingte Schädigung metallischer Bauteile ein erhebliches Problem für die Industrie darstellt. Die durch Korrosion verursachten Defekte führen häufig zu kostspieligen direkten und indirekten Schäden in verschiedenen Sektoren und (Infra-)Strukturen (z. B. Flugzeuge, Automobile, Züge, Schiffe, Haushaltsgeräte, Trinkwassersysteme, Rohrleitungen, Brücken, Offshore-Konstruktionen und viele mehr). Die jährlichen direkten Kosten korrosionsbedingter Schäden werden weltweit auf über 1,32 Billionen Euro geschätzt (etwa 3–4 % des „weltweiten Bruttoinlandsprodukts“). In vielen dieser Bereiche ist jedoch nicht nur die Korrosionskontrolle von zentraler Bedeutung, ein wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang sind zudem prädiktive Wartungsstrategien. Die oben genannten Bereiche sind einige Beispiele von vielen möglichen Einsatzorten. Die aktuelle Strategie zur ganzflächigen Überwachung ist eine Mischung aus reaktiver und präventiver zustandsorientierter Instandhaltung, wobei die Überwachung üblicherweise festgelegten Zeitintervallen folgt. Durch diese zum Teil diskontinuierliche Überwachung ist die derzeitige Vorgehensweise jedoch nur bedingt präventiv und es kann schlimmstenfalls erst im Falle eines Schadens reagiert werden, oder es werden im Gegensatz hierzu unnötige Ressourcen für die übertriebene Schadensprävention verbraucht. Die meisten Schäden fallen derzeit erst bei Ausfall des Bauteils oder der intervallmäßigen optischen Kontrolle durch Fachpersonal oder Ingenieurbüros auf. Aus diesem Grund ist meist mit erheblichen Reparaturkosten und großflächigen Korrosionsschutzmaßnahmen zu rechnen, da viele Schäden optisch nicht oder zu spät erkannt werden. Im Rahmen des CUIDETECT Projekts stehen Korrosionsvorgängen in thermisch isolierten Anlagen in der Onshore- und Offshore-Öl- und Gasindustrie im Vordergrund bei denen Korrosionsvorgänge oft unerkannt unterhalb der Isolationsbeschichtung geschehen. Die Wartung sieht daher gegenwärtig vor, dass große Teile der Beschichtung abgetragen werden, damit das Rohr auf Schäden untersucht werden kann. Während dieser Untersuchung muss zudem der Betrieb eingestellt werden. Genau hier setzt das CUIDETECT Projekt in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern „Innerspec Technologies UK“, „Design, Business & Verification Services“, „S.L., Robolan Ingenieria Robotica, S. L.“ und „Nuromedia GmbH“ an, indem es einen Beitrag zur Entwicklung eines automatisierten Systems zur Zustandsüberwachung von Rohrleitungen entwickelt. Diese umfasst die Erkennung und Bewertung der Schwere von Korrosionsschäden in Stahlrohren durch die Integration von maschinellem Lernen und zerstörungsfreier Prüfung unter Verwendung der Finite-Elemente-Analyse und experimenteller Daten. Mithilfe der COMSOL Multiphysics-Plattform wurden Defekte mit unterschiedlichen Eigenschaften (einschließlich Größe, Form, Korrosionsprodukte) simuliert, um korrosionsbedingte Anomalien nachzubilden. Anschließend wurde die Long-Range Ultrasonic Testing (LRUT) Methode eingesetzt, um die Wechselwirkungen der Ultraschallwellen mit diesen Defekten zu erfassen und einen umfassenden Datensatz

---

zu generieren. Die transformierten Signale dienen anschließend als Eingabe für die datengetriebenen Modelle, um eine Korrelation zwischen den Signalmerkmalen und dem Schweregrad der Korrosion (niedrig, mittel, hoch) herzustellen. Die Leistung verschiedener Modelle wurde verglichen. Dieser integrierte Ansatz zielt darauf ab, ein zuverlässiges und automatisiertes System zur Echtzeitüberwachung des strukturellen Zustands von Stahlrohren bereitzustellen. Die vorgeschlagene Methodik bietet eine vielversprechende Lösung für die frühzeitige und präzise Identifikation sowie Klassifikation der Schwere von Korrosionsschäden und unterstützt damit proaktive Wartungsstrategien in kritischen Infrastrukturanwendungen, ohne dass der Betrieb dafür eingestellt werden müsste. Das Hauptziel des Projektvorhabens CUIDETECT ist also die Entwicklung einer Ultraschallprüftechnik mit hoher Reichweite, bei der der Schall im zu prüfenden Teil und nicht im Schallwandler erzeugt wird, um lokale Korrosion in frühen Stadien unter isolierten Rohrleitungen zu erkennen. Um den Wartungsbedarf der untersuchten Anlage besser abschätzen und gegebenenfalls priorisieren zu können, werden Vorhersagen aus Korrosionsmodellen zur Schadensartenkennung mit in das Zielgerät implementiert und in den Entscheidungsprozess einbezogen. Im Teilprojekt „Korrosionsmodelle zur Stahlrohrintegritätsbewertung“ beschäftigte sich das Helmholtz-Zentrum Hereon dabei zunächst damit die Rahmenbedingungen für die Computersimulationen festzulegen und die Datengrundlage für die benötigten Korrosionsmodelle zu schaffen. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden mit experimentellen Spektren aus den Ultraschallmessungen von Korrosionsschäden korreliert und die synthetischen Daten wurden im Anschluss als Grundlage für die Entwicklung eines datengetriebenen Modells verwendet, das über das LRUT Verfahren detektierte Signalanomalien einstufen kann.

Korrosion unter Isolierungsschichten (engl. Corrosion under Insulation (CUI)) ist ein kritisches Problem in Industriezweigen, die über isolierte und brandschutzbeschichtete Anlagen verfügen. CUI kann durch verbesserte Beschichtungen, Isolierungen und Wetterschutzmaßnahmen kontrolliert werden, jedoch lässt sich ihr Auftreten nicht vorhersagen. Die Erkennung von CUI stellt eine große Herausforderung für die Industrie dar, da sie verborgen ist und oft unbemerkt bleibt, bis es zu einem katastrophalen Ausfall kommt. Isolierungen sind vor allem im Energiesektor erforderlich, um den Wärmefluss zu verlangsamen und die mit Energieverlusten verbundenen Kosten zu reduzieren. Sie werden auch eingesetzt, um Dampfdruck und Wasserkondensation auf kalten Oberflächen zu verhindern. Eine typische Konfiguration eines isolierten Rohrs ist in Abbildung 1 dargestellt.

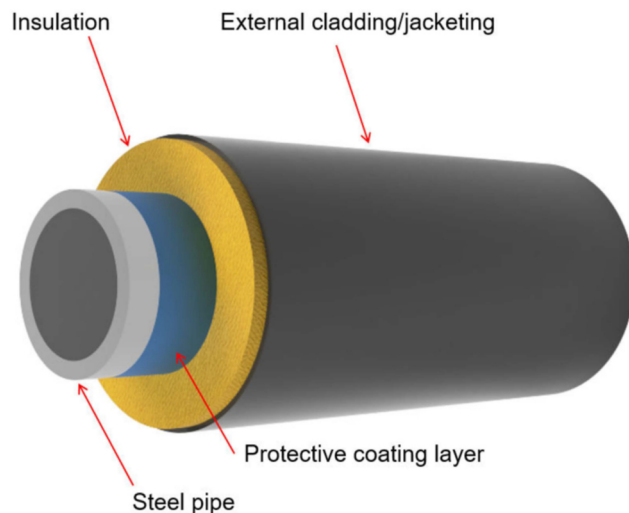


Abb. 1: Aufbau eines beschichteten Stahlrohrs.

Die Dicke der Schutzbeschichtung beträgt dabei nur wenige Millimeter und besteht meist aus organischen Beschichtungen oder thermisch gespritztem Aluminium. Diese Beschichtungen dienen als Schutzbarriere zur Verhinderung von CUI. Die durchschnittliche Lebensdauer eines Beschichtungssystems liegt im Bereich von 5 bis 13 Jahren. In einigen Fällen kann bei korrekt ausgewähltem und aufgetragenem Beschichtungssystem eine Lebensdauer von bis zu 20 Jahren erreicht werden. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Arten und Dicken von Isolierungen an Rohrleitungen verwendet. Die am häufigsten eingesetzten Isoliermaterialien sind Steinwolle, Schaumglas, Elastomerschaum (in letzter Zeit zunehmend verwendet) oder Schalldämmmatten. Die typische Isoliertdicke variiert zwischen 50 mm und 100 mm. Innerhalb der Isolierung können sich auch metallische Materialien befinden, z. B. in Form von Drahtgeflecht („Hühnerdraht“) oder perforierten Hülsen. Die äußere Verkleidung oder Ummantelung besteht meist aus Metall. Die wichtigsten Arten metallischer Außenverkleidungen sind aluminierter Stahl, aluminium-zink-beschichteter Stahl, verzinkter Stahl, Edelstahl oder Aluminium. Nichtmetallische Ummantelungen werden ebenfalls zunehmend verwendet, sind jedoch in der Industrie noch nicht weit verbreitet. Jedoch CUI stellt eine erhebliche Bedrohung für isolierte Anlagen dar und entsteht, wenn die Schutzbeschichtung oder äußere Ummantelung beschädigt ist und Feuchtigkeit eingeschlossen wird. Weitere Informationen zu CUI werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

CUI ist eine schwerwiegende Form der lokalen Korrosion, die an Anlagen aus Kohlenstoffstahl, niedriglegiertem Stahl und austenitischem Edelstahl (z. B. Rohrleitungssysteme, Druckbehälter und Tanks) auftritt, die mit Wärmedämmung umhüllt sind. Sie entsteht durch das Eindringen von Wasser oder kondensierter Feuchtigkeit infolge beschädigter Wetterschutzverkleidung/Ummantelung. Die in API RP 57 aufgeführten kritischen Faktoren für CUI sind dabei wie folgt zusammenzufassen. CUI betrifft extern isolierte Rohrleitungen und Anlagen, insbesondere solche mit intermittierendem Betrieb oder Betriebstemperaturen zwischen  $-12\text{ °C}$  und  $175\text{ °C}$  für Kohlenstoff- und niedriglegierte Stähle sowie zwischen  $60\text{ °C}$  und  $205\text{ °C}$  für austenitische Edelstähle. Die Korrosionsrate steigt dabei mit zunehmender Metalltemperatur bis zu dem Punkt, an dem Wasser schnell verdampft und CUI wird besonders kritisch bei Metalltemperaturen zwischen  $100\text{ °C}$  und  $120\text{ °C}$ , da Wasser hier weniger wahrscheinlich verdampft und die Isolierung länger feucht bleibt. Die Konstruktion des Isolierungssystems, der Isolierungstyp, die Temperatur und die Umgebung sind entscheidende Faktoren. Eine schlechte Konstruktion und/oder Installation, die das Eindringen und Einschließen von Wasser ermöglicht, erhöht das Risiko von CUI. Zyklischer thermischer Betrieb oder intermittierender Dienst kann die Korrosion verstärken. Anlagen, die unterhalb des Taupunkts betrieben werden, neigen zur Kondensation von Wasser auf der Metalloberfläche, was eine feuchte Umgebung schafft und das Korrosionsrisiko erhöht. Schäden und ihre Entwicklung werden durch aus der Isolierung ausgewaschene Verunreinigungen wie Chloride weiter verstärkt bzw. beschleunigt. Anlagen in Regionen mit hoher jährlicher Niederschlagsmenge oder in warmen, maritimen Gebieten sind stärker von CUI betroffen als solche in kühleren, trockeneren Binnenregionen und Umgebungen mit luftgetragenen Verunreinigungen wie Chloriden (z. B. Meeresnähe, Kühlturm-Aerosole) oder  $\text{SO}_2$  (Abgasemissionen) können die Korrosion beschleunigen. Der größte Anteil der Rohrleitungen in der petrochemischen und Raffinerieindustrie besteht aus Kohlenstoff- und niedriglegierten Stählen (z. B. A53/A106, A335) sowie aus Edelstahl (z. B. 3XX-Serie wie 304 und 316 sowie Duplex-Edelstahl). ExxonMobil Chemical und die National Association of Corrosion Engineers (NACE) berichteten, dass die häufigsten Leckagen in der Raffinerie- und Chemieindustrie auf CUI zurückzuführen sind. Von 30 untersuchten Anlagen nannten dem Konsortialführer 17 CUI als die größte Herausforderung in ihrer Branche. CUI ist also ein erhebliches Problem in der petrochemischen und verarbeitenden Industrie, da sie verborgen ist und nicht leicht erkannt werden kann. Die sogenannte „Force-Brute“-Methode zur visuellen Inspektion von CUI erfordert die Entfernung der Isolierung. Dies verursacht nicht nur hohe Inspektionskosten, sondern beschädigt auch die Isolierung und die Ummantelung, was die Korrosionsgefahr in Zukunft weiter erhöht. Die Korrosionsrate ist aufgrund der Betriebsbedingungen der isolierten Komponenten ebenfalls sehr hoch. Die Korrosionsrate von isoliertem Kohlenstoffstahl ist bis zu 20-mal höher als bei demselben Material unter belüfteten Bedingungen. Wenn CUI nicht erkannt und bekämpft wird, kann sie zu katastrophalen Ausfällen führen, die finanzielle und ökologische Schäden sowie Gefährdungen für Menschenleben verursachen. CUI kann

dabei als galvanische Korrosion, alkalische Korrosion oder Chloridkorrosion auftreten – abhängig von Branche und Einsatzbedingungen. In typischen Fällen führt das Eindringen von mineralhaltigem Wasser zu einem Stromfluss zwischen ungleichen Metallen, abhängig vom Potentialunterschied und der Kontaktfläche. Alkalische oder saure Korrosion entsteht, wenn Alkali oder Säure zusammen mit Feuchtigkeit in bestimmten faserigen oder körnigen Isoliermaterialien vorhanden ist. Bei heißem Betrieb kann Wasserdampf am Rand der Isolierung kondensieren und dort vorhandene Chemikalien lösen, was zur Korrosion der Aluminium- oder Stahlummantelung führt. Alkalisches Wasser kann Aluminium angreifen und zu Grübchenkorrosion führen – besonders bei Anwesenheit von Chloridionen. Chloridkorrosion tritt häufig auf, wenn Isolierungen auswaschbare Chloride enthalten und mit Edelstahl der 300er-Serie bei Temperaturen über 60 °C in Kontakt kommen. Die Chloridkonzentration entsteht meist durch Verdunstung von Regen-, Lösch- oder Prozesswasser. Diese Salze lagern sich in der Nähe von Trockenzonen ab und treffen bei Stillstand oder Prozessänderung auf die Metallwand, was Spannungsrisskorrosion auslösen kann. In Küstenregionen ist diese Art der Korrosion durch luftgetragene Salze besonders verbreitet. Die Wahrscheinlichkeit eines Versagens und die Rissausbreitungsgeschwindigkeit hängen von der Temperatur des Edelstahls und der Chloridkonzentration an der Metalloberfläche ab. Lösungen mit weniger als 1 ppm gelten als sicher. Unter 80 °C sind selbst 100 ppm bei kontinuierlicher Benetzung nicht besonders gefährlich, aber bei höheren Temperaturen können bereits geringere Konzentrationen zu Schäden führen. Wasser, das in die Isolierung eindringt, diffundiert nach innen und erreicht schließlich eine Trockenzone an der heißen Rohr- oder Geräte wand. Neben dieser Zone befindet sich ein Bereich, in dem die Poren der Isolierung mit einer gesättigten Chloridlösung gefüllt sind. Bei einem Stillstand sinkt die Wandtemperatur, und diese Lösung gelangt an die Metalloberfläche. Beim Wiederhochfahren kommt das Metall kurzzeitig mit der Lösung in Kontakt – Spannungsrisskorrosion kann einsetzen.

Die Ausführungen in den vorherigen Abschnitten verdeutlichen die Schwere von CUI in der Industrie. Der Hauptgrund dafür ist das Versagen bei der frühzeitigen Erkennung und Eindämmung von Korrosions-Hotspots in Anlagen. Das Ziel von CUIDETECT war die Entwicklung eines automatisierten Systems mit Hard- und Softwarekomponenten zur Integritätsüberwachung von Rohrleitungen und Anlagen, die von CUI betroffen sind. Dabei sollte eine Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren (NDT) zur frühzeitigen Erkennung und Quantifizierung von Korrosion eingesetzt werden und das ganze Konzept über eine Nutzeroberfläche, die Hotspots für CUI in einer Anlage identifiziert und die verbleibende Lebensdauer der betroffenen Komponenten abschätzt, für Dritte zugänglich machen. CUIDETECT richtet sich an Industriezweige, in denen CUI ein kritisches Problem darstellt. Darin ist auch die Grundidee für das CUIDETECT begründet: Ein intelligenter Ansatz zur Integritäts- und digitalen Zustandsüberwachung zur Erkennung von CUI. **CUIDETECT** ist eine Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren (engl. Non-destructive testing (NDT)) wie die bereits

erwähnte LRUT und nach der Identifikation eine Quantifizierung des Schadens durch eine Puls-Wirbelstromprüfung (engl. Pulse eddy current (PEC)). Die entwickelte Plattform nutzt dabei Daten aus integrierten Systemen und einem digitalen Zwilling, um die Anlage virtuell abzubilden und so die Korrosionsminderung und Zuverlässigkeit über den gesamten Lebenszyklus der Anlage zu gewährleisten und Schäden rechtzeitig entgegenzuwirken.

Um die Grundlage für die Entwicklung der Computersimulationen zu schaffen, wurden zunächst die Randbedingungen für die Modellierungsstrategien gemeinsam mit den Verbundpartnern definiert und die zu modellierenden Zieleigenschaften festgelegt. Für die Entwicklung des Modells werden drei Bausteine benötigt. (1) Materialeigenschaften des untersuchten Stahls, (2) Daten aus der Ultraschallprüfung sowie Umweltparameter aus Feldversuchen und (3) zeitaufgelöste Daten aus Inspektionen der Stahlrohrleitungen. Dabei haben qualitative Parameter, die die Beschichtungsqualität, die Verarbeitung, die Vorbehandlung usw. beschreiben einen erheblichen Einfluss auf die Beschichtungsqualität, die Degradationsrate des Basismaterials und damit einhergehend, dem Wartungsbedarf. Konstruktionsparameter, wie Geometrie und Ausrichtung der Rohrleitungen, wirken sich ebenfalls stark auf die Beständigkeit der Beschichtung aus und müssen berücksichtigt werden. Die gesammelten Daten werden in einer Datenbank dargestellt. Für die Erstellung des Korrosionsmodells am Hereon wurde ein hybrider Ansatz aus Simulation und Evaluation realer Messdaten gewählt. In Zusammenarbeit mit INNERSPEC wurde eine Auswertung der relevanten LRUT Messdaten durchgeführt. Dazu wurden von INNERSPEC Messungen an bereits untersuchten Pipelines zur Verfügung gestellt und mit Methoden des maschinellen Lernens am HEREON analysiert. Zusätzlich wurde die Art und Qualität der Daten hinsichtlich ihrer Reproduzierbarkeit mit einem analytischen Modell bewertet. Anhand der Daten konnte die Eignung verschiedener Algorithmen untersucht werden, die je nach Anwendungsfall und Datenlage im weiteren Projektverlauf umgesetzt werden können. Grundsätzlich hat sich jedoch gezeigt, dass für das Training eines datengetriebenen Modells, insbesondere für Methoden des überwachten Lernens wie z.B. künstliche neuronale Netze, eine deutlich umfangreichere Bibliothek an Mess-/Simulationsdaten der verschiedenen Schadensarten mit einer genauen Bewertung/Quantifizierung der Schadensintensität erforderlich ist. Darüber hinaus ist der Einfluss dieser Schäden bei unterschiedlichen Rohrdurchmessern und Rohrwandstärken von Interesse, um eine Abstraktionsfähigkeit des Modells zu generieren. Die vorliegenden Messdaten klassifizieren die vorhandenen Schäden jedoch anhand der maximalen Amplitude im Signal und der integrierten Signalantwort des maximal gemessenen Signals. Für das Training eines Modells ist jedoch die Kombination von Signal und realer Korrosion aus möglichst vielen Messungen an unterschiedlichen Rohrdurchmessern, Rohrwandstärken und auftretenden Schäden notwendig. Aus diesem Grund wurde in der aktuellen Projektphase zunächst der Fokus auf die Simulation der möglichen Schadensbilder mit unterschiedlichen Schädigungsintensitäten gelegt. Auf Basis der

synthetischen Daten wird anschließend ein datengetriebenes Modell trainiert, das anhand der im Projekt generierten Demonstratoren zu einem späteren Zeitpunkt evaluiert und angepasst wird. Zu diesem Zweck arbeitet das HEREON Team derzeit an der Entwicklung eines Korrosionssimulationsmodells in COMSOL Multiphysics basierend auf Lambwellen, die bei der strukturellen Gesundheitsüberwachung (eng. Structural health monitoring (SHM)) und NDT. Lamb-Wellen reagieren sehr sensitiv auf Änderungen der Materialdicke und eignen sich daher gut für die Erkennung von Korrosionsvorgängen und Defekten, da diese häufig mit einem Materialverlust einhergeht. Außerdem führt die Wechselwirkung von Lambwellen mit Defekten zu einer Signalumwandlung und damit zu einer Veränderung der Welleneigenschaften, die zur Erkennung und Charakterisierung von Defekten analysiert werden können. Hierfür wurde zunächst ein in COMSOL verfügbares Basismodell verwendet, das ursprünglich für die Simulation der Wechselwirkung einer Stahlplatte mit einer Lamb Welle entwickelt wurde und dieses für die Ausbreitung der Lamb Wellen in einem Stahlrohr zu adaptieren. Die Stärke des Basismodells liegt in der umfassenden Darstellung der Wellenausbreitung in der Stahlplatte und der Erstellung von Ausbreitungskurven, die für das Verständnis des Verhaltens von Lambwellen und die Auswahl des für die Korrosionserkennung am besten geeigneten Schwingungsmoden unerlässlich sind.

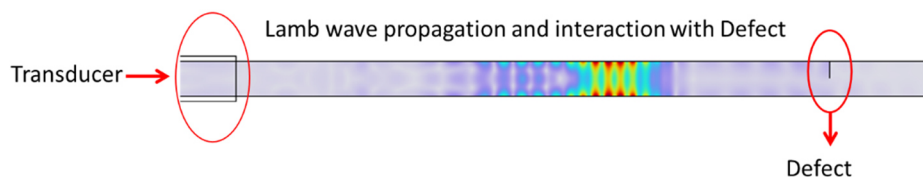


Abb. 2: Lambwellenausbreitung in einer Stahlplatte zur Inspektion von Materialdefekten (COMSOL).

Das Basismodell simuliert, wie in Abb. 2 dargestellt, die Wellenausbreitung in einer Stahlplatte und liefert wertvolle Erkenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Lambwellen und der Struktur des Materials. Das Modell erzeugt zudem Ausbreitungskurven, welche in Abb. 3 dargestellt sind. Diese sind für das Verständnis des Verhaltens von Lambwellen von entscheidender Bedeutung, da sie die Auswahl geeigneter Schwingungsmoden und Frequenzen für bestimmte Anwendungen erleichtern.

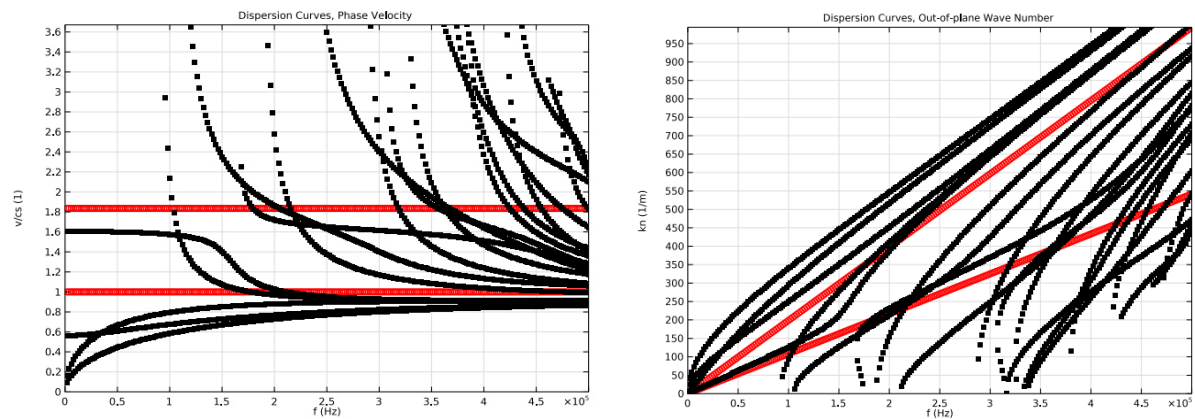


Abb. 3: Ausbreitungskurven der Lambwellen in der in Abb. 1 dargestellten Stahlplatte. Normierte Phasengeschwindigkeit (links) und out-of-plan Wellenzahlen (rechts).

Für die Simulation der Korrosionserkennung in Stahlrohren wurde zunächst eine geeignete Geometrie in COMSOL Multiphysics entworfen, um ein Rohr darzustellen (siehe Abb.4). Außerdem wurden die Materialeigenschaften und die nötige Änderung an den Randbedingungen des Basismodells entsprechend angepasst.

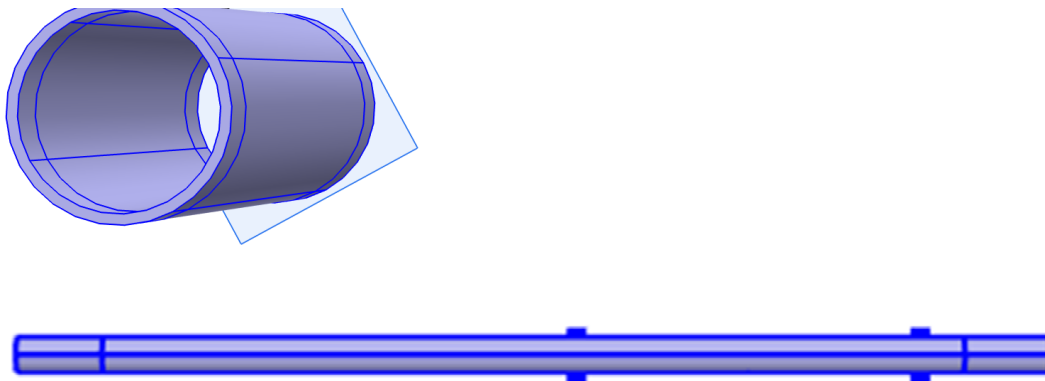


Abb. 4: Darstellung einer einfachen Rohrgeometrie.

Des Weiteren wurde ein kompatibles Anregungssignal (siehe Abb. 5) in das Modell integriert, um die für die Simulation benötigten Lambwellen im Stahlrohrmodell zu erzeugen. Dabei werden Lambwellen, die sich in dünnen Strukturen ausbreiten, in zwei Hauptkategorien unterteilt: symmetrische (S) und antisymmetrische (A) Schwingungsmoden. In der Anfangsphase der Modellentwicklung stand die antisymmetrische A0-Schwingungsmode im Fokus der Modellentwicklung, da diese aufgrund ihrer relativ geringen Dispersion, ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Defekten und ihrer Ausbreitungsfähigkeit über große Entfernungen die wichtigste Schwingungsmoden für die Korrosionserkennung darstellt. Bei der Entwicklung eines Korrosionssimulationsmodells für Stahlrohre müssen mehrere Herausforderungen bewältigt werden, um die Wechselwirkung zwischen Wellenausbreitung und

Korrosionsdefekten verlässlich zu erfassen: Zunächst muss ein Messwertaufnehmer entwickelt werden, der für die Geometrie des Stahlrohrs geeignet ist. Die Geometrie des Wandlers, der für das Stahlplattenmodell vom COMSOL bereitgestellt wird, um

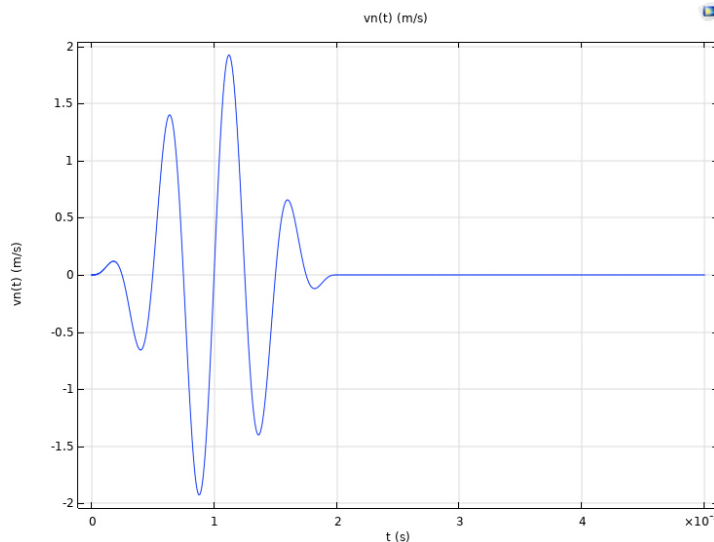


Abb. 5: Four-cycle tone burst Anregungssignal.

Lambwellen in das modellierte Werkstück zu schicken, kann aufgrund von Kontaktproblemen, die sich aus der unterschiedlichen Geometrie ergeben, nicht direkt an Rohre angepasst werden. Daher wurde die Geometrie des Wandler, zunächst so angepasst, dass ein optimaler Kontakt zwischen dem Rohr und dem Wandler gewährleistet ist, um die Interaktion zwischen Lambwellen und Korrosionsdefekten zu maximieren und gleichzeitig die Störung durch andere Quellen zu minimieren (siehe Abb. 6). Außerdem ist das Gitter, welches für ein Rohr erzeugt werden muss, um Geometrie des Stahlrohrs und seiner Defekte genau zu modellieren, signifikant komplexer als bei einer Stahlplatte.

Auch der Zeitaufwand für die Durchführung von Simulationen stellt derzeit eine Herausforderung dar, da hochgenaue Modelle rechenintensiv und zeitaufwändig sind. Um diese zu bewältigen, wird ein systematischer Ansatz verfolgt, der sich auf die Optimierung des Wandlerdesigns, die Verfeinerung der Gittererzeugung und die Nutzung von Rechenressourcen konzentriert, um effiziente und genaue Simulationen für die spätere Anwendung zu gewährleisten. Im nächsten Schritt wird parallel zur Anpassung und Optimierung des Basismodells, von den Partnern erzeugte, experimentelle Daten in die Modellierungsansätze integriert, um die Simulationsdatenbank um weitere Fälle zu vergrößern und die erzeugten Computermodelle zu validieren. Dadurch wird sichergestellt, dass unsere Datenbank reale Korrosionsdefekte genau abbildet und die Leistung der auf diesen Daten trainierten ML-Modelle verbessert. Die größte Herausforderung, stellte die unzureichende Datenlage für das Training datenbasierter Modelle dar. Dies wurde die Entwicklung eines numerischen Modells zur Erzeugung einer Datenbank aus

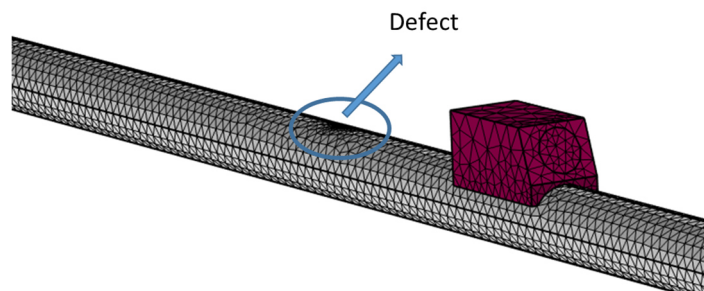


Abb. 6: Initiale Geometrie des Schallwandlers.

die unzureichende Datenlage für das Training datenbasierter Modelle dar. Dies wurde die Entwicklung eines numerischen Modells zur Erzeugung einer Datenbank aus

synthetischen Daten abgedeckt. Zu diesem Zweck wurden in enger Zusammenarbeit mit Innerspec Technologies UK Modelle für die im Projekt eingesetzten NDT Verfahren in COMSOL Multiphysics entworfen, um die Wechselwirkungen von Ultraschall- und Wirbelstromsignalen mit Stahlproben zu untersuchen. Darüber hinaus wurde die Grundlage für ein datengetriebenes Modell zur Vorhersage und Quantifizierung von Korrosion unter isolierenden Schichten entwickelt. Die Entwicklung des Ultraschallprüfungsmodells (US) beinhaltet den Entwurf eines Simulationssystems zur Analyse der Ausbreitung von Ultraschallwellen in Stahlrohrleitungen und die Bewertung des Modells unter einer Vielzahl von Bedingungen. Im Laufe unserer Arbeit haben wir verschiedene US-Modelle entwickelt und getestet, einschließlich eines Lamb-Wellenmodells sowie 3D-Modellen für die Langstrecken-Ultraschallprüfung (engl.: long range ultrasonic testing (LRUT)), zusätzlich zu den von den Projektpartnern bereitgestellten Ansätzen. Diese Modelle

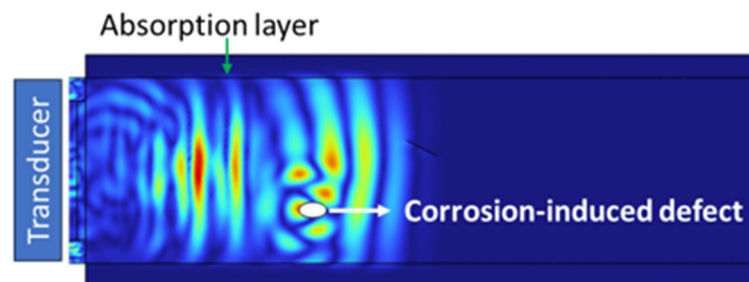


Abb. 7: Grafische Darstellung eines 2D Modells zur Simulation von Ultraschalltestverfahren basierend auf dem Softwarepaket COMSOL Multiphysics.

waren auf Grund hoher Rechenzeiten unbrauchbar, da ein einzelner Datenpunkt in der Regel Rechenzeiten von mehr als einer Woche verursacht. Diese Modellierungsansätze waren daher für die Erzeugung einer Eingangsdatenbank zur Entwicklung datengetriebener Modelle unbrauchbar, da diese auf große Datensätze angewiesen sind. Daher wurde letztendlich das am wenigsten komplexe 2D-Modell, das vom Hereon Team entwickelt wurde, aufgrund seiner überlegenen Effizienz mit deutlich kürzerer Verarbeitungszeit im Vergleich zu anderen getesteten Modellen für die Datenbankgenerierung ausgewählt. Das ausgewählte Ultraschallprüfungsmodell (UT), das in Abb. 7 dargestellt ist, wurde mit einer 2D-rechteckigen Geometrie in COMSOL implementiert, die die Dicke des Rohrs darstellt.

Die Schnittstelle "Elastische Wellen, Zeitexplizit" wurde zur Modellierung der Wellenausbreitung im Stahlrohr verwendet. Ein Wandler wurde an einem Ende der Probe positioniert und fungierte sowohl als Sender als auch als Empfänger von Signalen. Die Kopplung zwischen den Schnittstellen "Elastische Wellen, Zeitexplizit" und "Elektrostatik" gewährleistete eine umfassende Darstellung der Reaktion des Wandlers während der Simulation. Im Anschluss wurde eine zeitabhängige Studie durchgeführt, um das dynamische Verhalten von Ultraschallwellen zu untersuchen, die mit diesen Defekten interagieren. Verschiedene Arten, Größen und Formen von Korrosionsschäden wurden in den Stahlproben erzeugt, um verschiedene Defektbedingungen zu simulieren. Die resultierenden Ausgangssignale wurden aufgezeichnet und analysiert. Die Ausgangssignalplots für Proben mit unterschiedlichen Defektanmessungen zeigten deutliche Änderungen in der Spitzenamplitude und Form, was den starken Einfluss verschiedener Defekte auf die Ultraschall-Ausgangssignale hinweist (siehe Abb 8.). Im Allgemeinen kann LRUT dabei effizient für die Lokalisierung von Schäden in längeren Bauteilen wie Rohren

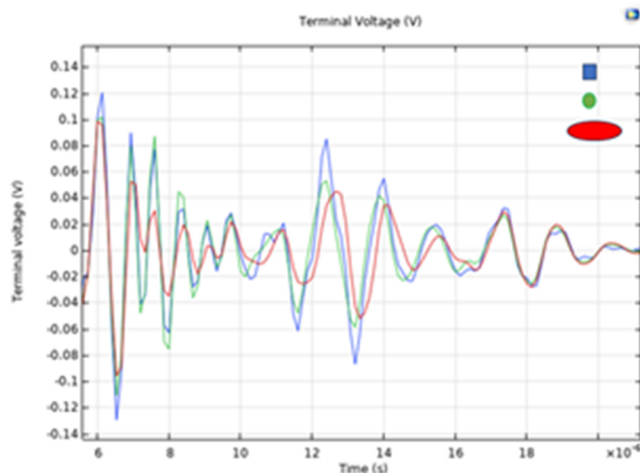


Abb. 8: Auftragung der zeitaufgelösten Ausgangsspannung für die Simulation von LRUT Messungen in Gegenwart verschiedener Schadensgeometrien.

eingesetzt werden, sie kann jedoch keinen Aufschluss über die genaueren Eigenschaften des detektierten Schadens (Typ und Schwere) unter der Isolierung geben. Daher wird diese durch lokale Messung mittels Pulse Eddy Current (PEC) ergänzt. Folglich wurde es notwendig, ein geeignetes PEC-Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, die Änderungen in den PEC-Signalen aufgrund des Vorhandenseins von Korrosionsdefekten im Stahl zu erfassen. Hier konnte während der Projektlaufzeit signifikante Fortschritte bei der Entwicklung eines

numerischen Modells für PEC-Tests gemacht. In enger Zusammenarbeit mit den europäischen Partnern wurden verschiedene PEC Modellierungsansätze entwickelt und validiert. Während der Testphase waren die meisten dieser Modelle eingeschränkt, da die Auflösung zu gering war oder das entwickelte Modell zu lange Rechenzeiten in Anspruch genommen hat, wodurch bei den ersten Modellansätzen keine Abschätzung der Rohrwanddicke möglich war. Durch verschiedene Optimierungsschritte konnte das Hereon Team jedoch ein angepasstes Modell für diesen Anwendungsfall implementiert, das eine hohe Auflösung bei geringen Rechen-

zeiten ermöglicht. Die Detektionssonde des Modells besteht hauptsächlich aus drei Teilen: einem U-förmigen Bügel, einer Anregungsspule sowie dem Detektionsabschnitt (siehe Abb. 9). Die Modellgeometrie der verwendeten Probe wurde dabei mit drei unterschiedlichen Schichten entworfen: einer äußeren Schicht bestehend aus einer Aluminiumverkleidung,

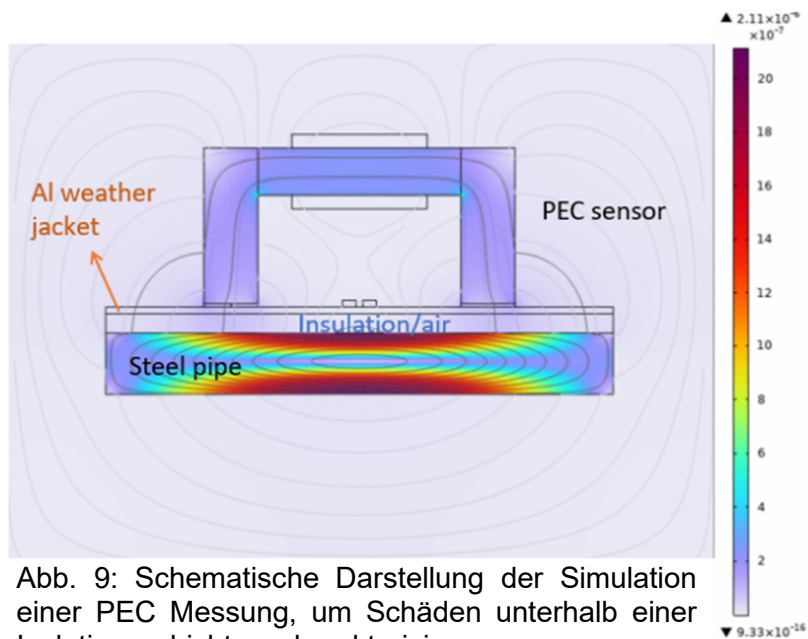


Abb. 9: Schematische Darstellung der Simulation einer PEC Messung, um Schäden unterhalb einer Isolationschicht zu charakterisieren.

einer mittleren, isolierenden Schicht (Luft oder Isolierung) und einer inneren Schicht (dem eigentlichen Stahlrohr). Korrosionsbedingte Schäden führen zu Verzerrungen im Wirbelstromfeld, die dann von den Empfangsspulen detektiert werden. Gemäß dem Forschungsplan wurde eine Analyse durchgeführt, um die Auswirkungen variierender Eigenschaften von Korrosionsdefekten auf das PEC-Signal zu untersuchen. Das zeitabhängige Ausgangsspannungssignal zeigte deutliche Signalvariationen bei variierender Rohrdicke und Schadensmerkmalen, wie in Abb. 10 gezeigt. Die Implementierung dieses Modells hat die Genauigkeit und Effizienz der Materialintegritätsprognose erheblich verbessert und so die Erzeugung einer entsprechenden, synthetischen Datenbank ermöglicht. Die Genauigkeit des Modellansatzes wurde von durch von den Projektpartnern durchgeführten

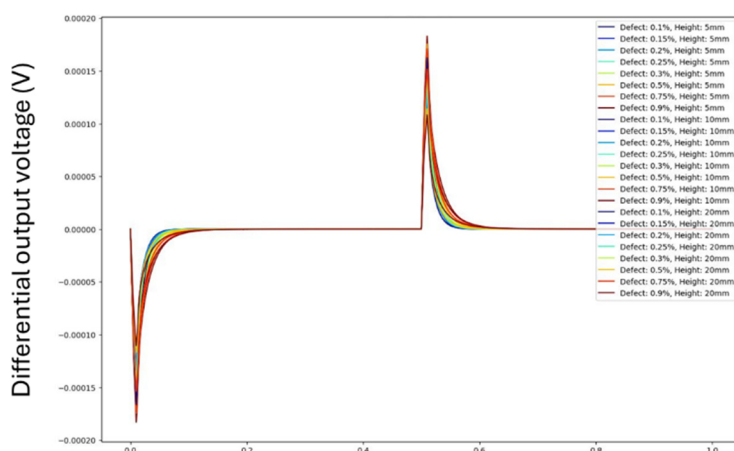


Abb. 10: Auftragung verschiedener, simulierter PEC Signalkurven im Zusammenhang mit verschiedenen Korrosionsschäden in Stahlrohren unter Verwendung des im Berichtszeitraums entwickelten Modells.

Validierungsexperiment bestätigt. Aufgrund der guten Übereinstimmung mit den experimentellen Daten und hoher Recheneffizienz wurde das entwickelte Modell für die Datenbankgenerierung ausgewählt. Weitere Arbeiten zur Verbesserung der Erkennung, Vorhersage und Quantifizierung von CUI in Stahlrohren wurden durch die Integration von maschinellem Lernen (ML) mit herkömmlichen NDT-Techniken durchgeführt.

Aus synthetischen Daten, die mehrere Szenarien umfassen, wurden relevante statistische und spektrale Merkmale extrahiert.

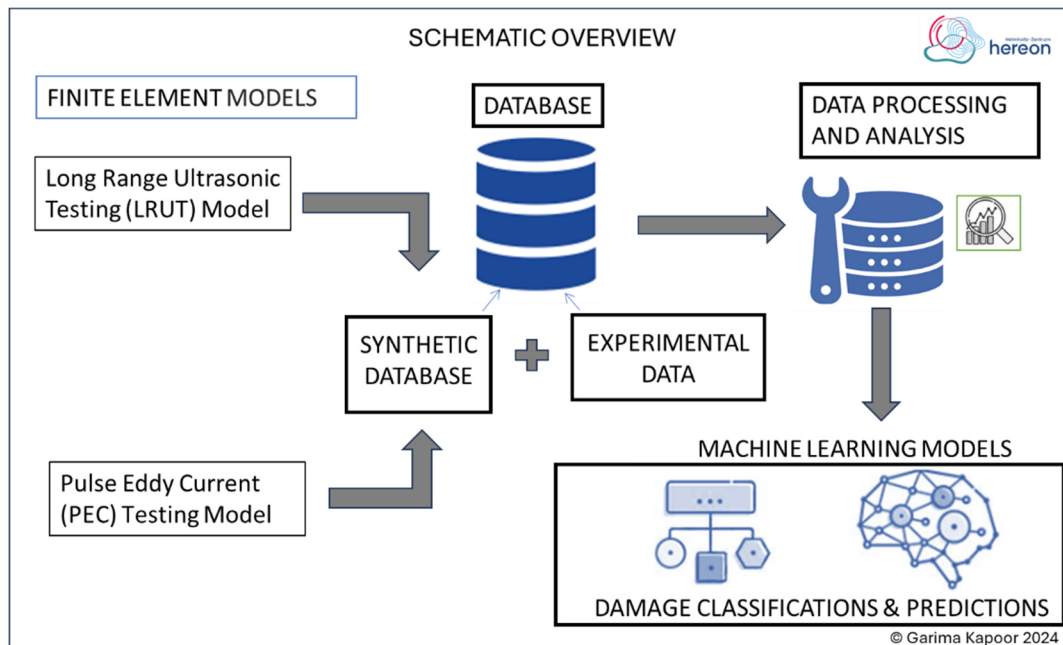


Abb. 11: Arbeitsablauf zur Verknüpfung von numerischen Simulationen, maschinellem Lernen und experimentellen Daten zur Vorsage von durch Korrosion verursachten Schäden.

Die relevanten Merkmale wurden dann verwendet, um datengetriebene Vorhersagemodelle zu trainieren. Abb. 11 veranschaulicht den Ansatz, der für die Vorhersage von korrosionsbedingten Schäden in isolierten Stahlrohrleitungen aus NDT-Ausgangssignalen entwickelt wurde. Ein solcher hybrider Ansatz verbessert die prädiktive Wartung, indem er die Dateninterpretationsprozesse automatisiert und beschleunigt. Folglich wird die Einbeziehung von ML in das Überwachungssystem die für die Analyse erforderliche Zeit und Ressourcen reduzieren und gleichzeitig die Effizienz des Überwachungsprozesses verbessern. Daher wird die bestehende Datenbank erweitert, um die Daten zu verschiedenen Eigenschaften der Rohrkomponenten (Isolierung, Witterungsschutz, Probe) und Korrosionsdefekte aufzunehmen. Sobald die Daten aus den Experimenten am Demonstrator verfügbar sind, werden die Modelle anschließend an die experimentellen Ergebnisse angepasst. Die Datenbank und die Modelle werden auch mit Details über die Eigenschaften der Korrosionsprodukte optimiert, die aus den Experimenten gewonnen wurden. Insgesamt planen wir, die prädiktive Genauigkeit und Effizienz der Erkennung von CUI unter Nutzung der jüngsten Entwicklungen im Bereich der NDT und ML zu verbessern und die in diesem Zusammenhang entwickelten Modellansätze gemeinsam mit den Projektpartnern zu validieren. Um aus den gemessenen Ultraschallspektren und Signalen Korrosionsphänomene ableiten zu können, wurden für die LRUT Untersuchung und Simulation zwei Größen berücksichtigt: Die maximale Amplitude und die Fläche unter der Kurve (engl. AUC – Area Under the Curve). Die Fläche unter

der Kurve (AUC) kann dabei direkt auf eine größere Korrosionsfläche entlang der Rohrachse hinweisen, da eine Kerbe im Material ein kurzes Signal mit hoher Amplitude erzeugt und sich so sehr schnell verschiedene Schadenstypen quantifizieren lassen. Die Verlustfläche des Querschnitts (engl.- CSA – Cross-Sectional Area) sowie das Ausmaß der Korrosion sollten so quantifiziert werden. Großflächige Korrosionen und kleinflächige, aber schwere Korrosionen erzeugen jedoch ähnliche Amplituden. Daher wird ein 2D-Diagramm in welchem AUC über der maximalen Amplitude aufgetragen wurde, um die verschiedenen Defekttypen besser voneinander abgrenzen zu können. Von Innerspec zur Verfügung gestellte Messdaten wurden dazu verwendet ein initiales datengetriebenes Modell zu trainieren, um die erhaltenen Signale zu klassifizieren und zu quantifizieren (siehe Abbildung 12).

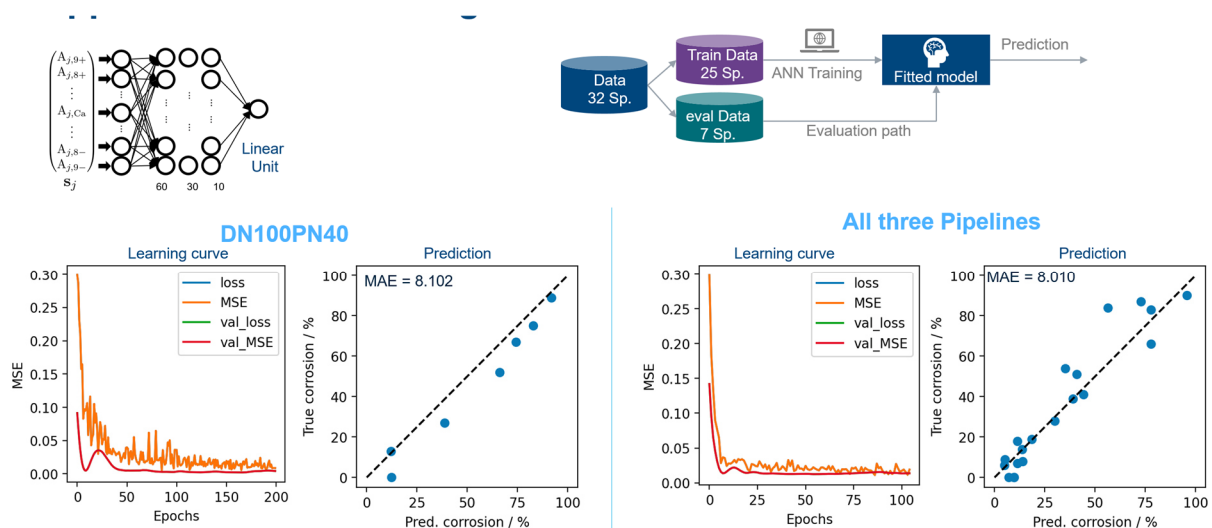


Abb. 12: Lernkurven und Vorhersagegenauigkeit eines trainierten künstlichen neuronalen Netzes für Daten von einem Stahlrohr (links) und Daten aus drei unterschiedlichen Rohren (rechts).

Die erhaltenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die automatisierte Einschätzung des Korrosionsgrades auf Basis von maschinellem Lernen sehr vielversprechend ist, da sich der Vorhersagefehler für das einzelne Rohr in derselben Größenordnung bewegt wie für gemischte Daten aus mehreren Rohren. Die beschriebenen Ergebnisse wurden in Auszügen auf der Jahrestagung 2024 der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik e.V. unter dem Titel „Integrated Approach for Automated Structural Health Monitoring of Steel Pipes through Long-Range Ultrasonic Testing and Machine Learning“ im Rahmen eines Vortrags präsentiert. Ein Manuskript zur Veröffentlichung der im Projekt erhaltenen Ergebnisse in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift ist zur Zeit in Vorbereitung. Die Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten ist darin begründet, dass sie einen essentiellen Bestandteil für die Erreichung der angestrebten Projektziele sowie der zu entwickelten Technologie darstellen, da durch die entwickelten Modelle eine datenbasierte Quantifizierung des Korrosionsgrades erst ermöglicht wird. Die erhaltenen Fördermittel wurden für die Finanzierung der für die durchzuführenden Arbeiten eingestellten Postdoktorandin

---

(222.028,64 €) eingesetzt sowie anteilig die verursachten Verwaltungskosten (20.851,05 €) zu absorbieren. Hinzu kommen die Kosten für Projekttreffen (3.564,18 €) mit den Konsortialpartnern, um den Fortschritt des Projekts und nächste Schritte zur Erreichung der Projektziele zu besprechen sowie Teile der von den Projektpartnern entwickelten Demonstratoren zu besichtigen. Während der Durchführung des Vorhabens sind dem Hereon Team und den am Projekt beteiligten Konsortialpartnern keine das Projekt gefährdenden Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden. Die entwickelte Technologie ermöglicht Firmen, die von CUI betroffen sind, einen unkomplizierten Zugang zu fortschrittlichen Computersimulationen, um unternehmerische Entscheidungen zu treffen und der Konsortialführer arbeitet nach unserer Kenntnis, zurzeit an der kommerziellen Verwertung der erhaltenen Ergebnisse von der das Hereon über Royalty Fees zur Nutzung der erarbeiteten Modelle profitieren wird.