

ZERSTÖRUNGSFREIE WERKSTOFFPRÜFUNG BEI BAU, INSTANDHALTUNG UND WIEDERKEHRENDER UNTERSUCHUNG VON ANLAGEN – BESCHREIBUNG DER WICHTIGSTEN PRÜFVERFAHREN, TEIL 2

Von Wirbelstromprüfung bis Prüfmethodik

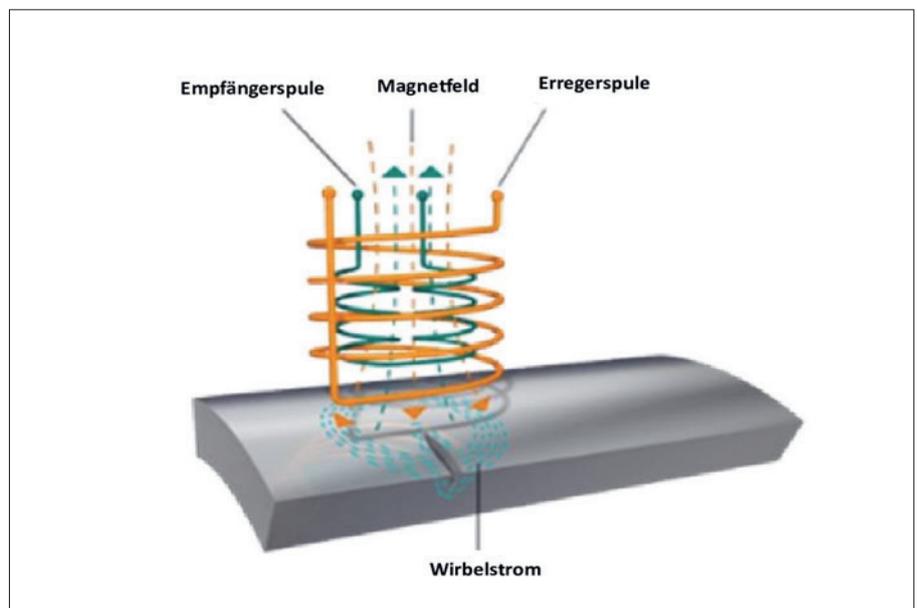
Ulrich Killing, Nerdlen

Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) für das Auffinden von Fehlstellen, die durch Fehler beim Schweißen, durch mechanische Überlastung oder durch Korrosion im Inneren oder auf den Außenoberflächen von Bauteilen aus Metallen oder Kunststoffen hervorgerufen wurden, gibt es einige. Nachdem sich Teil 1 dieses Beitrags in Ausgabe 10/2023 mit den Sicht-, Farbeindring-, Magnetpulver-, Durchstrahlungs- und Ultraschallprüfungen beschäftigt hatte, thematisiert der vorliegende zweite Teil die Wirbelstromprüfung, ZfP mit elektromagnetisch induziertem Ultraschall, die Schallemissionsprüfung, die Thermografie und die Prüfmethodik.

Die Wirbelstromprüfung (ET-Prüfung) ist ein Prüfverfahren, das das Prinzip des Elektromagnetismus verwendet. Durch elektromagnetische Induktion können dabei Diskontinuitäten in leitfähigen Werkstoffen gefunden werden. Dabei wird eine mit Wechselstrom angeregte Spule in der Nähe der zu prüfenden Werkstoffoberfläche platziert, die im Werkstoff Wirbelströme erzeugt. Diese wiederum erzeugen ein sich änderndes Magnetfeld auf der zu testenden Oberfläche. Das Magnetfeld an der Werkstoffoberfläche wird von einer sogenannten Messspule empfangen. Hierbei entsteht ebenfalls ein Wechselstrom, der sich vom Erregerwechselstrom in der Höhe der Spannungsamplitude und der Phasenlage unterscheidet (Bild 1) [1].

So werden Fehlstellen im Werkstoff wie Verunreinigungen (Einschlüsse, andere Werkstoffzusammensetzungen usw.) oder auch oberflächenoffene Beschädigungen (zum Beispiel Risse, Poren, Lunker oder Korrosionsmulden) sichtbar. Weist die zu prüfende Oberfläche keine Fehlstellen auf, fließen die Wirbelströme gleichmäßig im Werkstoff. Sobald aber ein Einschluss oder ein Riss in der Oberfläche des Prüfteils auftaucht, verändert sich der elektrische Widerstand, und der Wirbelstrom wird kleiner oder muss „ausweichen“. Dadurch ändert sich die Wirbelstromdichte, sodass diese Änderung von der Messspule erfasst und ausgewertet wird.

Die Eindringtiefe der Wirbelströme in den Werkstoff ist abhängig von der Frequenz, der elektrischen Leitfähigkeit und der Fähigkeit eines Werkstoffs, sich einem Magnetfeld anzupassen. Die magnetische Permeabilität



▲ Bild 1. Messprinzip der Wirbelstromprüfung

ist verantwortlich für die Durchlässigkeit des Prüfobjekts für magnetische Felder. Die Eindringtiefe nimmt mit zunehmender Frequenz und zunehmender Leitfähigkeit ab [2]. In der Praxis werden je nach Anwendung Frequenzen zwischen 10 kHz und 100 MHz eingesetzt. Abhängig von der jeweiligen Stahlqualität können bei niedrigen Prüffrequenzen durchaus Fehler, die etwa 1 mm unterhalb der Oberfläche liegen, mit der ET-Prüfung detektiert werden. Je tiefer die Ungängen liegen, desto kleiner werden die resultierenden Wirbelstromsignale, bis sie ab einer von der Prüftechnik und dem Werkstoff abhängigen Tiefe nicht mehr auswertbar sind.

Im Vergleich zu anderen ZfP-Verfahren arbeitet die ET-Prüfung berührungslos, das

heißt, es ist kein direkter Kontakt zwischen Werkstück und Messsonde erforderlich. Dementsprechend sind mit diesem Prüfverfahren auch Messungen bei hohen Wandtemperaturen von >600 °C möglich. Bewährt haben sich Wirbelstromsonden für die Prüfung von Wärmetauscherrohren oder aber in Verbindung mit intelligenten Rohrmolchsystemen in unterirdischen Pipelines. Bild 2 zeigt das Ergebnis einer Wirbelstromprüfung von Wärmetauscherrohren aus dem Werkstoff St35.8. Der Betreiber benutzt diesen Apparat als Kühler, wobei als Kühlmedium Kühlturmwater auf der Mantelseite Verwendung findet. Von den insgesamt 969 Rohren wurden stichprobenhaft 105 Rohre von Innen mit einer Wirbelstromsonde überprüft. Dabei konnten an

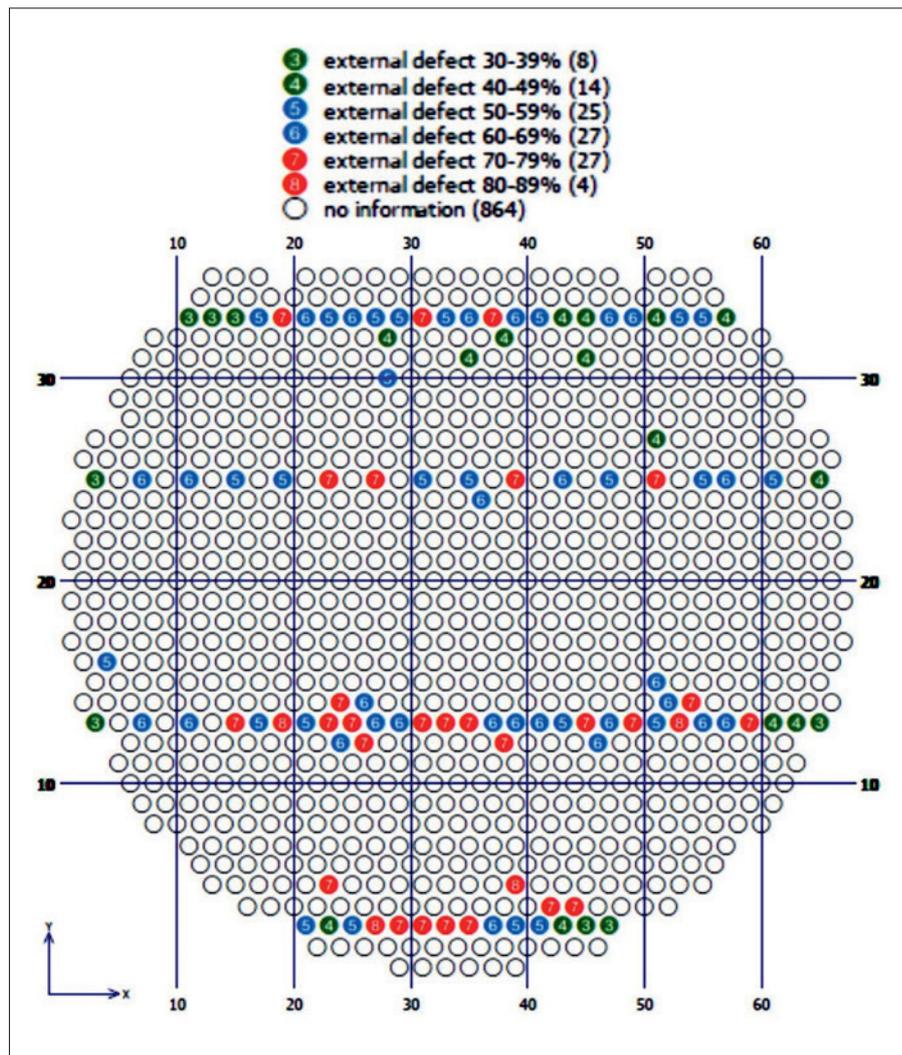
allen Rohren mehr oder weniger starke Korrosionserscheinungen auf der Außenoberfläche (wasserseitig) festgestellt werden, wobei an insgesamt 31 geprüften Rohren schon mehr als 70% der Wanddicke durch Korrosion verloren gegangen ist. Bedingt durch die Tatsache, dass dem Betreiber ein baugleicher Ersatzapparat zur Verfügung stand, wurde der überprüfte Wärmetauscher außer Betrieb gesetzt.

Neuere Inspektionsverfahren kombinieren das Wirbelstromprinzip mit einem Magnetfeld. Durch die überlagerte Gleichstrommagnetisierung wird die Eindringtiefe erhöht, sodass Korrosionsangriffe (Metallverluste) auch im Untergrund von der Oberflächenseite aus erkannt werden können. Die Technologie ist eine Inspektionsmethode zur Erkennung von Korrosion auf der Ober- und der Unterseite von dünn- und dickwandigen Platten und Rohren. Sie wird bevorzugt zur Überprüfung von Tankbauwerken eingesetzt [3].

Eine weitere Verfahrensvariante ist das Prüfen mit gepulsten Wirbelströmen. Hierbei besteht der Vorteil, dass Korrosionserscheinungen unter Wärme-/Kälte­dämmung oder Brandschutzverkleidung (corrosion under insulation, CUI) detektiert werden können, ohne dass die Dämmungen entfernt werden müssen. Das Verfahren kann während des Betriebs an Anlagen aus ferritischen Stählen eingesetzt werden und liefert semiquantitative Größenbestimmungen (Abstufung in Bereichen, nicht in Absolutwerten) von Korrosionserscheinungen. Angewendet wird das Verfahren im Wand­dickenbereich von 6 bis 65 mm und mit einer Dämmdicke von maximal 150 mm. Dabei sollte die Dicke der äußeren Schutzbleche 1 mm nicht überschreiten [4]. Allerdings sind Prüfungen an Dämmungen mit Schutzblechen aus verzinktem ferritischen Stahl nur eingeschränkt möglich.

ZfP mit elektromagnetisch induziertem Ultraschall (EMUS/EMAT)

Im Gegensatz zu der konventionellen Wirbelstromprüfung können mit dem EMUS/EMAT-Verfahren (EMUS/EMAT = elektromagnetische Ultraschallwandler) auch Wand­dickenmessungen und Fehlerdetektionen an dickwandigen Bauteilen vorgenommen werden. Da dieses Verfahren ebenfalls berührungslos zur Werkstoffoberfläche arbeitet, können die Messungen auch bei hohen Wandtemperaturren von $>600^{\circ}\text{C}$ durchgeführt werden.



▲ Bild 2. Ergebnis von Wirbelstromprüfungen an ferritischen Wärmetauscherrohren

Das Verfahrensprinzip kann folgendermaßen beschrieben werden [5]: Die zentralen Bestandteile eines EMUS-Wandlers sind – ähnlich einem Wirbelstromsensor – eine Magnetisierungseinrichtung (bestehend aus Permanentmagneten oder Elektromagneten) und eine oder mehrere Spulen (Bild 3). Mithilfe einer Sendespule wird durch einen Stromimpuls ein Wirbelstrom in der Oberfläche des leitfähigen Prüfobjekts induziert. Dieser Wirbelstrom erzeugt mit seinem Magnetfeld eine Lorentz-Kraft im Werkstoff, die wiederum eine gerichtete Schallwelle in der Metalloberfläche verursacht. Die Lorentz-Kraft entsteht durch Wechselwirkung zwischen einem elektrischen Strom, der durch eine Wirbelstromspule induziert wird, und dem magnetischen Fluss der Magnetisierungseinrichtung. Es gibt auch die Möglichkeit, den magnetostruktiven Effekt, das heißt die Deformation von magnetischen Werkstoffen infolge eines angelegten

Magnetfelds, zu nutzen. Beide Phänomene wirken auf das Atomgitter des Bauteils, so dass die akustische Welle berührungslos direkt im Bauteil erzeugt wird. Im Empfangsfall wird durch die (zurückkehrende) Schallwelle die Oberfläche im Magnetfeld bewegt und generiert dadurch wiederum einen Wirbelstrom, der über sein Wechselfeld einen (Mess-)Strom bzw. eine Spannung in der (Mess-)Spule induziert, die der Ultraschallamplitude proportional sind.

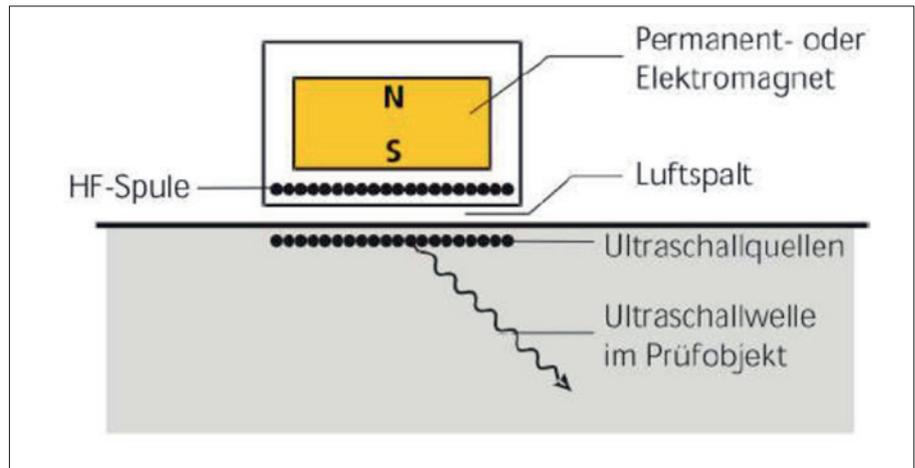
Die EMUS-Technologie hat seit ihrer ersten Vorstellung Ende der 1960er Jahre eine ganze Reihe von Anwendungen aufzuweisen. Allein in der jüngeren Vergangenheit sind folgende Anwendungsbeispiele zu nennen: Pipeline-Inspektion, berührungslose Fehlerprüfung an Dampfkesselrohren [6], Prüfen von Plattierungen und Mischnähten sowie Korrosionsprüfung von Gaspipelines. Ein besonderes Anwendungsgebiet ist die mechanisierte

Wanddickenmessung an großflächigen Bauteilen wie Kessel- oder Tankwänden sowie der Böden von Flachbodentanks. Dabei können Wanddickenminderungen mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,15$ mm festgestellt werden.

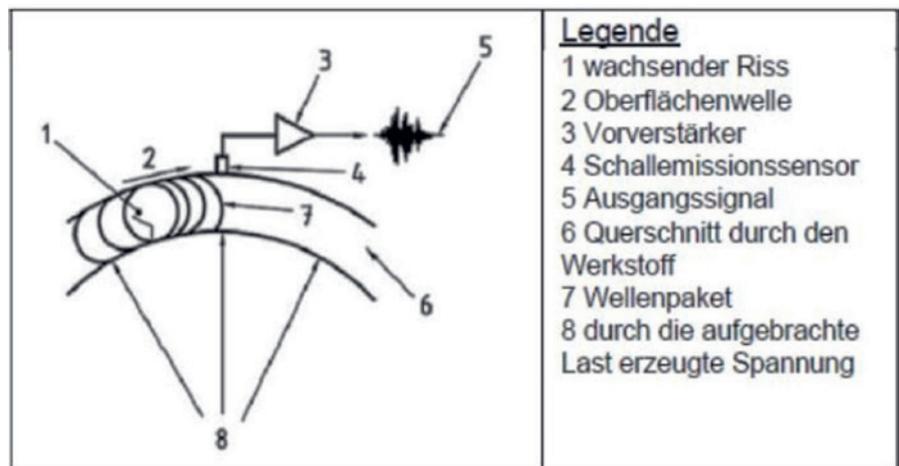
Schallemissionsprüfung (AE-Prüfung)

Schallemission (Acoustic Emission, AE) ist ein physikalisches Phänomen, durch das transiente (kurzzeitige) elastische Wellen innerhalb eines Werkstoffs oder durch einen Prozess erzeugt werden. Das Aufbringen von Lasten auf einen Werkstoff verursacht innere strukturelle Änderungen, zum Beispiel lokale plastische Verformung, Risswachstum, Korrosion, Erosion und Phasenübergänge (**Bild 4**). Die durch solche inneren strukturellen Änderungen hervorgerufenen Schallwellen werden mithilfe geeigneter Sensoren (4), die die Oberflächenwelle (2) des Werkstoffs in elektrische Signale umwandeln (5), aufgenommen. Die Aufnahme der Schallwellen erfolgt durch piezoelektrische Sensoren (**Bild 5**), die meist als Resonanzempfänger arbeiten. Der Messkörper ist in der Regel aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) und erzeugt ein messbares Signal von $1 \mu\text{V}$ bei einer Auslenkung von $10\text{--}12$ m. Diese Signale werden mit einer geeigneten Messtechnik aufgezeichnet und verarbeitet, um die Schallemissionsquellen festzustellen, zu charakterisieren und zu orten.

Das Schallemissionsverfahren ist ein passives Nachweisverfahren, das die dynamische Reaktion des Werkstoffs auf die aufgebraute Last oder die Umgebung aufzeichnet. Es ermöglicht den Nachweis von Quellen bis zu einer Entfernung von mehreren Metern in Abhängigkeit von den Werkstoffeigenschaften. Fehlerwachstum und Änderungen im Werkstoffaufbau werden durch das empfindliche Verfahren frühzeitig detektiert und geortet. Der Unterschied zwischen der Schallemissionsprüfung und den meisten anderen zerstörungsfreien Prüfverfahren besteht darin, dass der Werkstoff selbst infolge von strukturellen Veränderungen Energie freisetzt. Das unterscheidet dieses Verfahren von der Feststellung vorhandener geometrischer Inhomogenitäten/Abweichungen in einem statischen Zustand [8]. Schallemissionen können ganz verschiedene Ursachen haben. Als Beispiele seien genannt plastische Verformung (zum Beispiel Versetzungsbewegungen), Phasenumwandlung (zum Beispiel martensitische



▲ Bild 3. Prinzipieller Aufbau eines EMUS-Wandlers



▲ Bild 4. Schematische Darstellung des Prinzips der Schallemission und ihres Nachweises

Umwandlungen), Rissbildung und Rissfortschritt oder Bruchvorgänge, Rissuferreibung, Korrosion, Abplatzen von Korrosionsprodukten und Ähnlichem, turbulente Strömungen (zum Beispiel Leckagen). Derartige Vorgänge erzeugen typische Signalformen (**Bild 6**). Kurzzeitige Signale (sogenannte Burstsignale) entstehen beispielsweise beim Fortschreiten eines Risses; kontinuierliche Signale sind typisch für Verformungsvorgänge oder Leckagen. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Sensoren unter Umständen auch den Schall aus Quellen aufnehmen, die keinen Zusammenhang zu den genannten Ursachen haben. Solche Quellen können zum Beispiel Regen, Hagel oder Wind sein, aber auch die Bewegungen der Prüfobjekte sowie Einbauten in deren Innerem. Diese Signale sind als Störsignale zu berücksichtigen [9].

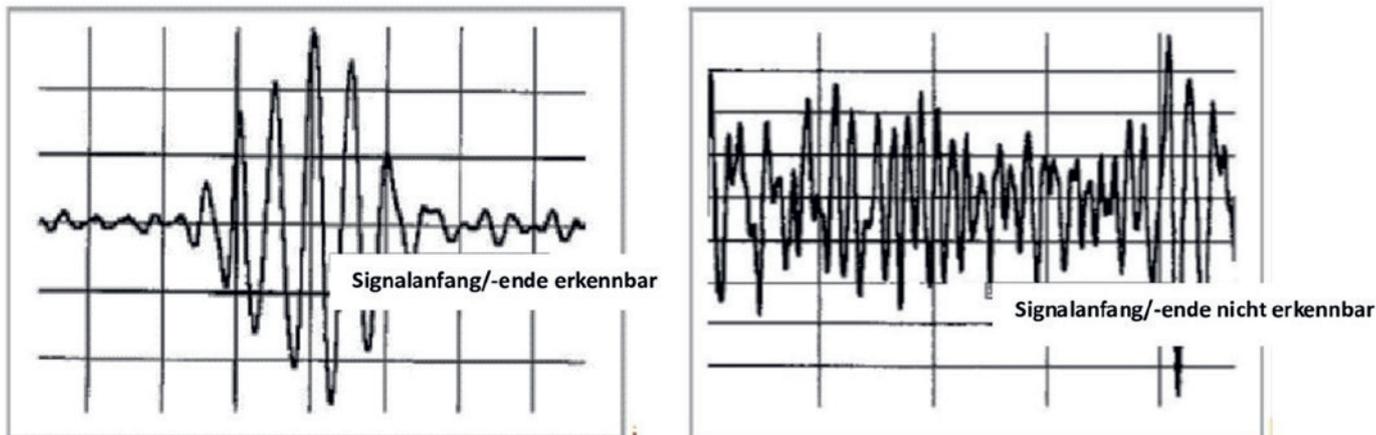
Das Einsatzgebiet der Schallemissionsprüfung ist sehr vielfältig; sie wird zum Beispiel

bei der Abnahmeprüfung bzw. bei der wiederkehrenden Prüfung von Druckgeräten eingesetzt. Darüber hinaus kommt dieses Prüfverfahren bei der Überwachung während des Betriebs (Zustandsüberwachung) zur Anwendung, oder es dient zur Feststellung von Undichtigkeiten (**Bild 7**).



▲ Bild 5. Beispiel für einen Sensor zur Aufnahme von Schallwellen

QUALITÄTSMANAGEMENT/NORMUNG



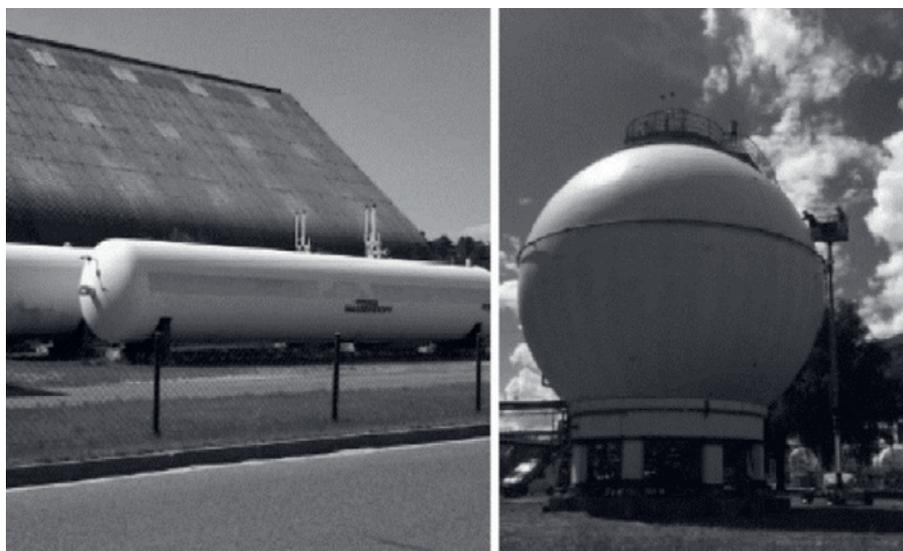
▲ Bild 6. Typische Signalformen bei der Schallemissionsprüfung: Burstsinal (links), kontinuierliches Signal (rechts)

An Druckgeräten erfolgt die Schallemissionsprüfung nach nationalen oder europäischen Standards. Die harmonisierte Norm DIN EN 14584 [10] legt das Verfahren zur Durchführung einer Schallemissionsprüfung an metallischen Druckgeräten während der Druck-Abnahmeprüfung unter Anwendung der planaren Ortung (Ortung in der Ebene) fest. Allgemeine Grundlagen der Schallemission sind in der DIN EN 13554 [7] beschrieben. Die von den Prüfern verwendeten Schallemissionsgeräte müssen die Anforderungen der DIN EN 13477-2 [11] erfüllen, und ihre Leistungsfähigkeit muss in regelmäßigen Abständen nach dieser europäischen Norm überprüft werden.

Die Belastung des Prüfobjekts erfolgt je nach Komponente, Prüfstandard und Phase der Lebensdauer mit einer definierten Drucksteigerungsrate. Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung an metallischen Druckgeräten sollte die Drucksteigerungsrate einen Wert von einem Prozent vom Prüfdruck je Minute (1% PT/min) bei einer Gasdruckprüfung und fünf Prozent vom Prüfdruck je Minute (5% PT/min) bei einer hydraulischen Druckprüfung nicht übersteigen. In Abhängigkeit der Druckrate sind zudem ausreichend viele und lange Haltephasen und falls notwendig Druckablassphasen vorzusehen.

Thermografie

Bei der Thermografie werden Sensoren zur Bestimmung der Wellenlänge des von der Oberfläche eines Objekts emittierten Infrarotlichts eingesetzt, um den Zustand eines Prüfstücks zu begutachten. Die Untersuchungen erfolgen mit speziellen Kameras, die eine große Anzahl von Infrarotsensoren enthalten, die kleine Temperaturunterschiede erkennen



▲ Bild 7. Beispiele für Anwendungsgebiete der Schallemissionsprüfung: Wasserstoffbehälter (links), Flüssiggaskugel (rechts)

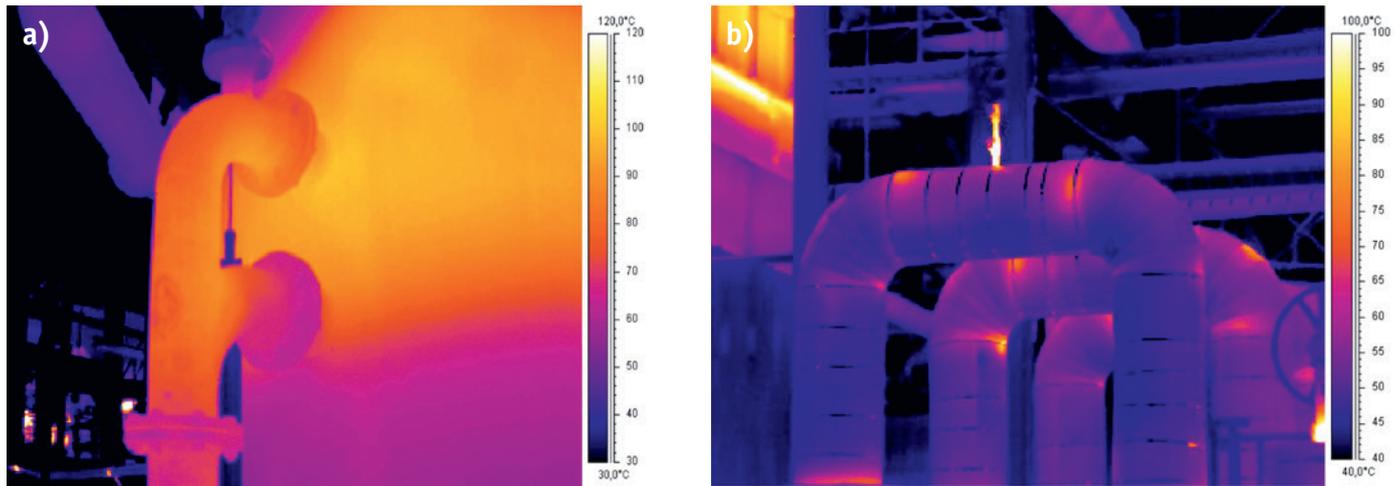
und messen können. Das Bild, das diese Unterschiede zeigt, kann auf einen PC heruntergeladen und dort angezeigt werden, normalerweise als Farb- oder Graustufenkarte. Es gibt zwei grundlegende Arten der Thermografie: die passive und die aktive Thermografie.

Bei der passiven Thermografie wird die Kamera einfach auf den Prüfling gerichtet und aus dem Wärmebild eine Temperaturkarte erstellt. Wenn der Emissionsgrad bekannt ist oder abgeschätzt werden kann, wird die Temperatur berechnet und als digitaler Messwert oder als Falschfarbenbild angezeigt. Dies ist zum Beispiel nützlich zur Erkennung von überhitzten Wellenlagern, Motoren oder elektrischen Komponenten und wird häufig zur Überwachung des Wärmeverlusts von Gebäuden, Behältern (Bild 8a) und gedämmten Rohrleitungen (Bild 8b) verwendet. Dabei werden Bereiche mit erhöhten Temperaturen

gelblich dargestellt. Kältere Zonen erscheinen violett bis blau.

Die passive Thermografie wird häufig bei der Suche nach Korrosionen unterhalb von Wärmedämmungen (CUI) eingesetzt. Dabei wird davon ausgegangen, dass die angezeigten Wärmeverluste an der Dämmung auf Beschädigungen derselben zurückzuführen sind. Derartige Schäden sind prädestinierte Ausgangspunkte für das Eindringen von Feuchtigkeit oder Wasser in die Isolierung, wodurch wiederum Korrosion auf den darunter befindlichen Stahloberflächen ausgelöst werden kann.

Bei der aktiven Thermografie wird die Oberfläche des Objekts mit einer externen Wärmequelle schnell erhitzt und beobachtet, wie die Temperatur mit der Zeit abnimmt. Fehler im Werkstoff zeigen sich durch Schwankungen in der Temperaturabfallrate.



▲ Bild 8. Beispiele für Prüfergebnisse mit passiver Thermografie: Temperaturverteilung in einem Behälter (a), fehlerhafte Wärmedämmung an Rohrleitungen (b)

Das Verfahren wird zur Erkennung von oberflächennahen Delaminationen oder Bindefehlern in Verbundwerkstoffen bzw. Kunststoffschweißnähten verwendet.

Prüfmethodik

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen stellen einen wesentlichen Bestandteil von Maßnahmen zur Qualitätssicherung an Bauteilen des Stahl-, Druckgeräte-, Tank- oder Rohrleitungsbaus dar. Während bei der Neufertigung bzw. Instandsetzung von Bauteilen die Fehlerfreiheit von Schweißnähten im Fokus steht, wird bei der wiederkehrenden Untersuchung von Anlagenkomponenten der aktuelle Zustand im Hinblick auf das Vorhandensein von Korrosion, (Wanddickenverluste, selektive Korrosion) oder mechanischer Bauteilschädigungen ermittelt. Da bestimmte Schadensmechanismen bevorzugt im Bereich von Schweißnähten auftreten, werden bei wiederkehrenden Untersuchungen in den meisten Fällen Schweißnähte in besonders prädestinierten Anlagenbereichen (zum Beispiel wenig durchströmte Toträume, Umlenkungen, dynamisch beanspruchte Orte) in das Prüfprogramm einbezogen.

Generell sollen bei zerstörungsfreien Prüfungen in geregelten technischen Bereichen (zum Beispiel Druckgeräterichtlinie, Stahlbau usw.) ausschließlich nach DIN EN ISO 9712 [12] zertifizierte Prüfer eingesetzt werden. Während für die VT-Prüfung in der Regel eine Level-1-Qualifikation ausreicht, müssen für alle anderen in der DIN EN ISO 9712 aufgeführten Verfahren Prüfer mit mindestens

einer Level-2-Qualifikation zum Einsatz kommen. Für Auswertungen von Prüfungen, Erstellen von Prüfberichten usw. ist dann vielfach eine Level-3-Zertifizierung erforderlich. Darüber hinaus müssen Prüfer, die mit den Verfahren VT, PT und MT beauftragt werden, einen Sehtest nach DIN EN ISO 8596 [13] nachweisen, wobei ein Sehschärfegrad von mindestens 0,63 auf einem Auge bescheinigt werden muss.

Während bei der Neufertigung meistens eine gute Zugänglichkeit der zu überprüfenden Komponenten gegeben ist, sind im eingebauten Zustand viele Prüforte selbst bei Nutzung von Gerüsten oder Ähnlichem nur schwer oder manchmal gar nicht zugänglich. Eine besondere Herausforderung für die zerstörungsfreie Prüfung sind wärme- oder kältegedämmte Behälter oder Rohrleitungen, erdverlegte Leitungen sowie lange Leitungsabschnitte, wie sie vielfach auf Rohrbrücken vorhanden sind. Um einen ausreichenden Überblick über den tatsächlichen technischen Zustand der in Betrieb befindlichen Anlagen zu gewinnen, gleichzeitig aber den wirtschaftlichen Aspekt bei der Überprüfung zu berücksichtigen, werden hier vielfach neu entwickelte Prüfverfahren eingesetzt. Gedämmte Bauteile werden oft mit digitaler Durchstrahlung ohne Demontage der Dämmung überprüft. Allerdings ist dieses Verfahren nur bis zu Nennweiten von DN150 bis maximal DN200 und Wanddicken <12 mm technisch sinnvoll einsetzbar. Alternativ werden Prüfungen mit gepulstem Wirbelstrom an Bauteilen aus ferritischen Stählen bei montierter Dämmung

erprobt. Prüfverfahren, die keinen direkten Kontakt mit der zu prüfenden Oberfläche benötigen, können zu Messungen auch während des Betriebs eingesetzt werden. Dies ist beispielsweise bei wirbelstrombasierten Verfahren der Fall. Lange Rohrleitungsabschnitte, gedämmt oder ungedämmt, werden vielfach mit der Guided-Wave-Technik auf Korrosionserscheinungen geprüft. Dabei genügt es, an einer Stelle die Dämmung zu entfernen, sodass die Prüfapparatur hier angebracht werden kann. Das Verfahren ermittelt dann auf langen Prüfstrecken die Lage von Schweißnähten und Rohrhalterungen und findet Orte mit flächenhaften Werkstoffabtrag. Unterirdische Rohrleitungen werden entweder in einem sogenannten Schutzrohr verlegt – dies geschieht zum Beispiel im Bereich von Straßendurchführungen –, oder aber die Außenoberflächen der Rohre werden mit einer festhaftenden Bitumenschicht vor Korrosion geschützt und in diesem Zustand in das Erdreich verlegt. Wenn es die Örtlichkeiten zulassen, kommen zur Überprüfung dieser Leitungen auf Korrosion Rohrmolchsysteme, die mit Ultraschall- oder Wirbelstromprüfköpfen bestückt sind, zum Einsatz. Im Bereich von Straßendurchführungen arbeitet man mit den Guided-Wave-Verfahren bzw. nutzt den elektromagnetisch erzeugten Ultraschall (EMAT). Zur besseren Fehlererkennung prüft man dabei von beiden Seiten der Durchführung.

Insbesondere bei komplizierten Prüfaufgaben lassen sich die mit einer Prüftechnik erzielten Ergebnisse vielfach nicht einwandfrei

◀ Tabelle 1. Eignung verschiedener ZfP-Verfahren zum Auffinden unterschiedlicher Schädigungsmechanismen

Prüfverfahren Schädigungsmechanismus	VT (ohne Hilfsmittel)	VT (mit Hilfsmittel)	PT (Cr/Ni-Stahl, Ni-Basis) MT (un- und niedrigleg.)	UT Wanddicke	UT Phased Array	UT TOFT	UT Guided Wave	EMAT	ET Wirbelstrom	RT (digital)	RT (analog)	Thermographie
Prüftemp. normal max.	< 50°C < 100°C	< 30°C < 60°C	< 30°C < 60°C	< 30°C < 180°C	< 30°C < 400°C	< 30°C < 400°C	< 30°C < 40°C	< 30°C < 600°C	< 30°C < 600°C	< 30°C < 40°C	< 30°C < 40°C	< 1200°C
Anwendung des Verfahrens	RA, RI BA, BI	RI, BI	RA, BA, BI	RA, BA, BI	RA, RI BA, BI	RA, RI BA, BI	RA	RA	RA, RI BA, BI	RA, BA, BI	RA, BA, BI	RA, BA
Flächen- abtrag	FA Q1	FA Q1	NA	FA Q1+Q2	FA Q1+Q2	FA Q1+Q2	FA Q1+(Q2)	FA Q1+(Q2)	FA Q1+Q2	FA Q1+Q2	FA Q1	FA Q1
Lochkorrosion Poren, Lunker	FA Q1	FA Q1	FA Q1	NA	FA + FI Q1	FA + FI Q1	NA	NA	FA Q1	FI Q1	FI Q1	NA
Risse	FA Q1	FA Q1	FA Q1	NA	FA + FI Q1+Q2	FA + FI Q1+Q2	FA+FI Q1	NA	FA + FI Q1	NA	FA+FI Q1	FA+FI Q1
Abrasion	NA	FA Q1	NA	FA Q2	FA Q1+Q2	FA Q1+Q2	FA Q1+(Q2)	FA Q1+(Q2)	FA Q1+Q2	FA Q1+Q2	FA Q1	FA Q1
CUI	AA* + A** Q1	NA	AA** Q1	AA** Q2	NA	NA	AA** Q1	AA** Q1	FA Q1	FA + FI Q1+Q2	FA + FI Q1	FA Q1

Erläuterungen und Abkürzungen:
 FA: Fehlernachweis an der Außenoberfläche
 FI: Fehlernachweis im Werkstoffinneren
 Q1: Fehlererkennung qualitativ (Verfahren macht Lage und Größe sichtbar, liefert jedoch keine Zahlenwerte)
 Q2: Fehlererkennung quantitativ (Verfahren liefert Zahlenwerte z.B. für Wanddicke, Fehlerlänge/ -tiefe)
 NA: nicht anwendbar
 AA*: Schäden an Dämmung werden erkannt
 AA**: nach Demontage der Dämmung anwendbar

RA: Rohrleitg außen, RI: Rohrleitg innen
 BA: Behälter außen, BI: Behälter innen

Üblicherweise eingesetztes Verfahren
 Verfahren mit guten Ergebnissen
 Verfahren wird bei speziellen Prüfaufgaben eingesetzt
 kein Standardverfahren bzw. Verfahren in Erprobung

interpretieren. Dies gilt sowohl für die Art der gefundenen Fehler als auch für deren Größe und genauen Lage. In diesen Fällen empfiehlt es sich, ein weiteres Verfahren zur Abklärung der gefunden Fehleranzeigen heranzuziehen. **Tabelle 1** enthält Hinweise zur Anwendbarkeit verschiedener Prüfverfahren zum Auffinden häufig auftretender Schädigungsmechanismen [14].

Werden beispielsweise bei Wanddickenmessung an einem Rohrbogen mit digitaler Radiographie Poren oder Lunker in einer Schweißnaht festgestellt, deren Größe und Lage nicht erkennbar sind, so kann man nach Entfernen der Dämmung durch Ultraschallverfahren, zum Beispiel durch Einsatz der Phased-Array-Technik, weitere Erkenntnisse zur Zulässigkeit dieser Fehler gewinnen und gegebenenfalls teure und zeitintensive Reparaturen umgehen.

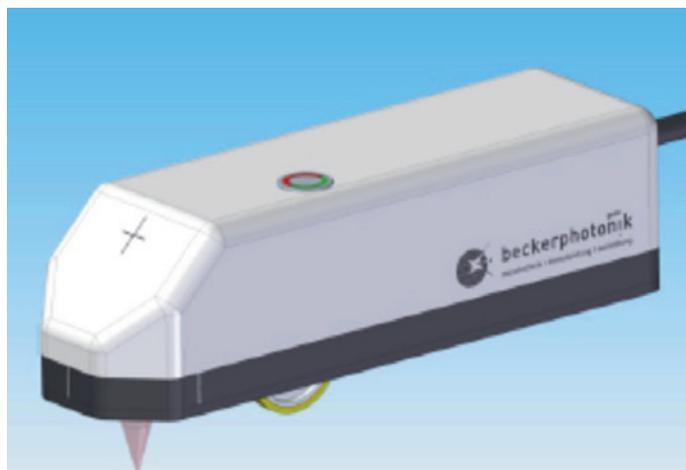
Neue Verfahren in der Erprobung

Dem Verfasser ist durchaus bewusst, dass die in diesem Beitrag vorgestellte Auswahl an Prüfverfahren nicht vollständig ist. Bezogen auf den Anlagenbau sollten jedoch die wichtigsten Prüfverfahren behandelt worden sein.

Wie in anderen Bereichen der Technik auch, werden zurzeit auch im Anlagenbau neu entwickelte ZfP-Verfahren erprobt. Handlungsbedarf besteht unter anderem bei der Ermittlung von Spaltkorrosion an Rohrleitungen im Bereich von Rohrhalterungen (Schellen) und Auflagern. Ziel ist es, diese Korrosionen ohne Lösen der Rohrschellen bzw. ohne Anheben der Leitungen zu finden und das Ausmaß der Korrosion zu quantifizieren. Die auf Ultraschalltechnik basierenden derzeit verfügbaren Verfahren sind

teilweise noch mit zu großen Ungenauigkeiten behaftet und bedürfen weiterer Entwicklungsarbeit.

Eine interessante Neuentwicklung ist das Prüfen mit Terahertzwellen. Dieses Verfahren arbeitet im Frequenzbereich von 0,1–10 THz. Der daraus resultierende Wellenlängenbereich beträgt 3–0,03 mm. Das Verfahrensprinzip ist ähnlich wie bei der Ultraschallprüfung nach dem Reflexionsschallverfahren. Mithilfe eines Prüfkopfs (**Bild 9**) [15] werden Terahertzwellen im genannten Frequenzbereich



◀ Bild 9. Prüfkopf für die manuelle Prüfung mit Terahertzwellen (Bilder: [1] (1), Killing (2, 8), [5] (3), [8] (4, 5, 7), [9] (6), [15] (9))

gesendet und empfangen [16]. Die Prüfsonde erkennt Änderungen der dielektrischen Eigenschaften, zum Beispiel Poren, Lunker, Fremdmaterialeinschlüsse oder Risse, und zeigt die Ergebnisse als A- oder B-Scan an.

Terahertzstrahlung ist nicht ionisierend, daher sind keine Abschirmmaßnahmen zum Schutz von Menschen und Anlagen notwendig. Im Gegensatz zu der Ultraschallprüfung wird kein Kopplungsmedium benötigt. Da die Prüfung im Reflexionsverfahren arbeitet, ist ein einseitiger Zugang zum Bauteil ausreichend.

Die Anwendung des Verfahrens ist allerdings auf dielektrische Werkstoffe, zum

Beispiel Kunststoffe, glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK), Keramik, Schäume (zum Beispiel Polyurethan) oder Papier, beschränkt [17]. Das Terahertzverfahren wird bereits bei der Qualitätsüberwachung von Kunststoffschweißungen und -klebungen, bei GFK-Sandwichbauteilen von Rotorblättern an Windkraftanlagen sowie bei der Wanddickenmessung von GFK-Tanken und -rohren eingesetzt. Im Chemie- und Petrochemiebereich laufen zurzeit erste Untersuchungen zum Nachweis von Nässe und Feuchtigkeit in Wärme- bzw. Kälteisolationen von Rohrleitungen und Behältern. Dadurch soll Korrosion von Bauteilen unterhalb von Dämmungen

frühzeitig erkannt werden. Darüber hinaus sind Prüfungen an Komponenten aus GFK im Fokus der chemischen Industrie. Hierbei geht es besonders um das frühzeitige Auffinden von Fehlern in der medienseitigen Korrosionsschutzschicht. ■



Dr.-Ing. Ulrich Killing,
Beratungsbüro für Schweiß-
und Werkstofftechnik,
Nerdlen, beratungsbuero-
killing@t-online.de

Literatur

- [1] N.N.: Eddy Current Testing – Electromagnetic NDT Inspection. URL: <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/eddy-current-testing> [Abruf: 06.10.2023]
- [2] N.N.: <https://www.rohmann.de/wirbelstromlexikon/> [Abruf: 19.10.2023]
- [3] N.N.: ZfP-Tankinspektionen mit SLOFEC. URL: <https://www.tuv.com/germany/de/slofec%E2%80%93tank-inspection-services.html> [Abruf: 06.10.2023]
- [4] Robers, M. A.; u. a.: Pulsed eddy current in corrosion detection. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt02/251/251.htm> [Abruf: 06.10.2023]
- [5] Heutling, B.; u. a.: EMUS-Prüfung als Alternative und Ergänzung zur Wirbelstromprüfung von Rohrleitungen. DGZfP-Jahrestagung 2017, Koblenz, 22.–24.05.2017.
- [6] N.N.: Wanddickenmessung bei Dampfkesselrohren mit EMAT-Prüfköpfen. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/applications/thickness-boiler-tubes-emat-transducers/> [Abruf: 06.10.2023]
- [7] DIN EN 13554-1: Schallemissionsprüfung – Allgemeine Grundsätze. Ausgabe: 2011-04.
- [8] Sahin, L.: Schallemissionsprüfung im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung an Druckbehältern. In: DVS-Berichte, Band 333 (2017), S. 92–95.
- [9] Arras, M.: Die Anwendung der Schallemissionsanalyse als integrales Prüfverfahren. In: DVS-Berichte, Band 246 (2008), S. 21–22.
- [10] DIN EN 14584: Schallemissionsprüfung – Prüfung von metallischen Druckgeräten während der Abnahmeprüfung – Planare Ortung von Schallemissionsquellen. Ausgabe: 2013-07.
- [11] DIN EN 13477-2: Schallemissionsprüfung – Charakterisierung der Prüfausrüstung – Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen. Ausgabe: 2021-12.
- [12] DIN EN ISO 9712: Zerstörungsfreie Prüfung – Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung. Ausgabe: 2022-09.
- [13] DIN EN ISO 8596: Augenoptik – Sehschärfeprüfung – Normsehzeichen und klinische Sehzeichen und ihre Darbietung. Ausgabe: 2020-05.
- [14] N.N.: Guide for selecting non-destructive methods for materials and equipment. Document DT 75 (Rev. 4). France Chimie, Puteaux/Frankreich, Juni 2019.
- [15] Becker, S.: Industrielle Anwendung der mobilen Terahertzprüfung. Vortrag. DGZfP-Arbeitskreis, Stuttgart, 06.06.2019.
- [16] Hinken, J.; u. a.: Mikrowellen- und Terahertzprüfung – Grundlagen und ausgewählte Anwendungen. 10. DGZfP-Fachtagung „ZfP im Eisenbahnwesen“, Wittenberge, 13.–15.03.2018.
- [17] Becker, S.; u. a.: Mobile Terahertzprüfung in der Kunststoffindustrie. DGZfP-Jahrestagung 2017, Koblenz, 22.–24.05.2017.