

## ZERSTÖRUNGSFREIE WERKSTOFFPRÜFUNG BEI BAU, INSTANDHALTUNG UND WIEDERKEHRENDER UNTERSUCHUNG VON ANLAGEN – BESCHREIBUNG DER WICHTIGSTEN PRÜFVERFAHREN, TEIL 1

# Von Sichtprüfung bis Ultraschallprüfung

Ulrich Killing, Nerdlen

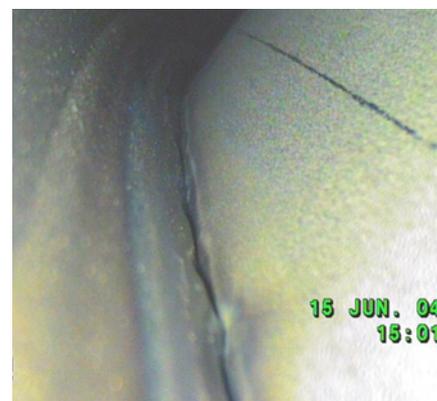
Mit den zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP), im englischen Sprachgebrauch Non Destructive Testing (NDT) genannt, wird die Qualität eines Werkstücks getestet, ohne das Bauteil zu beschädigen. Dabei kann auf zahlreiche Prüfverfahren zurückgegriffen werden. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den Prüfverfahren 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. Beispielhaft seien das Detektieren von Rissen, Poren, Luntern, flächenhafter oder örtlich begrenzter Korrosion genannt.



▲ Bild 1. VT-Prüfung einer Flanschschweißnaht mithilfe eines Spiegels



▲ Bild 2. VT-Prüfung von Schweißnähten durch Videoendoskop: Rohrrundnaht (links), Halbbröhrschlangenschweißnaht (rechts)



Die ZfP-Verfahren befinden sich in einem kontinuierlichen Prozess der Weiterentwicklung. Dabei handelt es sich in erster Linie nicht um Weiterentwicklungen, die die Prüfverfahren in ihren Prüfgrenzen optimieren. Vielmehr liegen zum einen die Innovationen darin begründet, dass die Prüfverfahren in ihrer Auswertung besser interpretierbar werden, zum anderen wurden große Fortschritte bei der Digitalisierung und Visualisierung der Prüfergebnisse gemacht. Dadurch konnten zum einen die Prüfergebnisse computerbasiert ausgewertet werden, darüber hinaus wurde die Auswertung als solche verbessert, da die Prüfergebnisse deutlich an visueller Schärfe gewonnen haben. Ferner können nunmehr die Resultate digital versandt werden. Dieser Beitrag beschreibt die wichtigsten ZfP-Verfahren und deren Anwendungsgebiete. Der vorliegende Teil 1 hat die VT-, PT-, MT-, RT- und UT-Prüfungen zum Thema, Teil 2 in der Novemberausgabe 2023 von „Der Praktiker“ wird sich unter

anderem mit den ET- und AE-Prüfungen, der Thermografie und der Prüfmethodik befassen.

### Sichtprüfung (VT-Prüfung)

Die visuelle Prüfung, die auch als Sichtkontrolle bekannt ist, ist eine der häufigsten Techniken, bei der der Prüfer auf die Oberfläche des Bauteils schaut. Die Prüfung kann durch den Einsatz von optischen Instrumenten wie Lupen, Spiegeln, Endoskopen oder Videokameras unterstützt werden [1]. Während mit Lupen und Spiegeln nur ein kleiner Oberflächenbereich geprüft werden kann (**Bild 1**), sind Videoendoskopsysteme mit Einfahrlängen von bis zu 50 m auf dem Markt verfügbar. Endoskope werden hauptsächlich für die Sichtprüfung an Innenoberflächen von Rohrleitungen eingesetzt (**Bild 2**). Je nach Rohrdurchmesser ist jedoch eine 360°-Beurteilung des Prüfobjekts problematisch. Prüfungen in 12-Uhr- und 6-Uhr-Position bezogen auf die Rohrlängsachse sind machbar. Die zur Sichtprüfung

eingesetzten Videokameras sind mit hochauflösenden, zoombaren Objektiven ausgerüstet und erlauben eine Rundumbegutachtung des Prüflings. Kamerasysteme können für die VT-Prüfung von Rohren auf Fahrwagen oder Rohrmolchen bzw. zur Überprüfung von großen Behältern und Tanks auf Drohnen montiert werden, oder aber sie gelangen an Stangen befestigt durch Stützen in das Innere von Behältern und Tanks (**Bild 3**). Die VT-Prüfung ermöglicht unter anderem das Erkennen von äußeren Schweißnahtfehlern [2], Verzug und Versatz, Korrosion, Rissen oder Verschmutzungen. Visuelle Prüfungen begleiten die meisten anderen Arten der zerstörungsfreien Prüfung. Allerdings kann das Verfahren nur auf der Oberfläche von Werkstoffen angewendet werden. Es kann keine internen Defekte erkennen.

### Farbeindringprüfung (PT-Prüfung)

Bei der Eindringprüfung wird eine farbige, meist rote Flüssigkeit mit niedriger Viskosität

auf das zu prüfende Bauteil aufgetragen. Diese Flüssigkeit dringt in Fehler wie Risse, Löcher, Lunker oder Porosität ein, danach wird ein Entwickler aufgetragen, der aufgrund von Kapillarwirkung die Eindringflüssigkeit nach oben durchsickern lässt und einen sichtbaren Hinweis auf den Fehler erzeugt (**Bild 4**).

Die Fehlstellen werden in der Regel als rote Punkte oder Linien angezeigt. Eindringprüfungen können mit lösungsmittelentfernbaren, wasserauswaschbaren oder nachemulgiebaren Eindringmitteln durchgeführt werden. Unterschieden wird zwischen der Farbeindringprüfung und der fluoreszierenden Eindringprüfung [3]. Wichtig ist, dass die zu prüfende Oberfläche vor dem Aufbringen der Eindringflüssigkeit gründlich gereinigt wird. Nach einer ausreichenden Einwirkdauer der Eindringflüssigkeit, die zum Teil werkstoffabhängig ist – bei Ni-Werkstoffen kann diese mehr als eine Stunde dauern –, wird die Eindringflüssigkeit entweder mit Wasser oder einem speziellen Reiniger von der Werkstoffoberfläche entfernt und anschließend gleichmäßig der Entwickler aufgebracht. Mit der PT-Prüfung lassen sich ausschließlich Fehlstellen nachweisen, die zur Werkstoffoberfläche hin geöffnet sind. Unterhalb der Werkstoffoberfläche liegende Fehlstellen sind mit der PT-Prüfung nicht nachweisbar.

### Magnetpulverprüfung (MT-Prüfung)

Die Magnetpulverprüfung verwendet Magnetfelder, um Diskontinuitäten an oder nahe unterhalb der Oberfläche (maximal 0,5 mm) von ferromagnetischen Bauteilen zu finden. Für die Magnetisierung eines Werkstoffs gibt es mehrere Verfahren, zum Beispiel Stromdurchflutung in Spannvorrichtung, Spulenmagnetisierung, Felddurchflutung mit Innenleiter oder Aufsetzelektroden (Handjochmagneten) (**Bild 5**). Beim Magnetisieren benutzt man sowohl Gleich- als auch Wechselstrom, bzw. es kommen Dauermagneten zum Einsatz. Bei kleineren Bauteilen nutzt man häufig die Stoßmagnetisierung (durch Kondensator-Entladung), damit sich der Werkstoff nicht zu stark erhitzt. Welches Magnetisierungsverfahren genutzt wird, ist abhängig von der Werkstoffgeometrie, der Größe des Prüfkörpers und der Art der vermutlichen Fehler, die auftreten können [4].

Bei der Magnetisierung eines ferromagnetischen Werkstoffs werden die magnetischen Feldlinien, da sie den geringsten Widerstand



▲ Bild 3. VT-Prüfung von Behälterinnenflächen durch Videokamera: Einfahrvorgang in einen Behälter (links), Detailaufnahme einer Schraubverbindung (rechts)



▲ Bild 4. Ergebnisse von PT-Prüfungen an Chemieapparaten: Bindefehler in einer Dichtflächenaufschweißung (links), Schweißnahtfehler in Halbrohrschlangenschweißungen (rechts)

suchen, im magnetisch bestleitenden Medium geführt. Wenn die Magnetfeldlinien auf einem magnetisch schlecht leitenden Bereich wie einen Riss treffen, so wird durch den hohen magnetischen Widerstand eine Fließveränderung verursacht. Dies erzeugt an der Oberfläche einen Streiffluss, der eine Ansammlung ferromagnetischer Partikel verursacht, wodurch oberflächliche Fehler sichtbar werden.

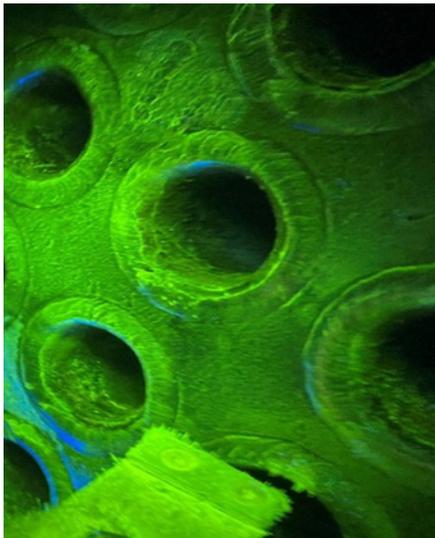
Das Prüfmittel besteht in der Regel aus Eisenoxidpulver. Als Trägermittel zwischen Eisenoxidpulver und Prüfwerkstoff dient meistens Öl. Das Öl wird verwendet, um das Risiko der Korrosion des Werkstoffs zu vermindern und ein besseres Ergebnis der Fehlerdarstellung zu erzielen. Das Prüfmittel kann aber auch trocken auf den zu prüfenden Werkstoff aufgebracht werden. Vielfach enthält es fluoreszierende Bestandteile (**Bild 6**). Die Auswertung der Prüfergebnisse erfolgt dann unter zur Hilfenahme von speziellen UV-Leuchten.

Bei der Magnetpulverprüfung bleibt das Prüfstück magnetisiert, solange dieses nicht mit anderen Werkstoffen in Berührung kommt oder entmagnetisiert wird. Damit keine Restmagnetisierung übrig bleibt, wird der Werkstoff nach der Prüfung meist entmagnetisiert, da es



▲ Bild 5. MT-Prüfung einer Schweißnaht mit Handjochmagnet

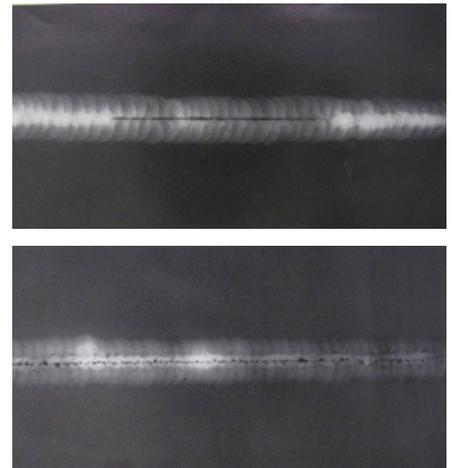
durch den Restmagnetismus zu Problemen bei der Weiterverarbeitung oder zu unerwünschten Effekten im Gebrauch kommen kann. Das sind zum Beispiel das Anhaften von Metallspänen in der Fertigung, die Ablenkung des Lichtbogens



▲ Bild 6. MT-Prüfung von Rohreinschweißungen mit fluoreszierendem Prüfmittel



▲ Bild 7. Fahrbare Röntgenröhre für die Durchstrahlungsprüfung von Schweißnähten



▲ Bild 8. Durchstrahlungsaufnahmen von Schweißnähten: Schweißnaht mit mangelhafter Durchschweißung (oben), Schweißnaht mit Nahtwurzelporosität (unten)

beim Schweißen oder Effekte auf elektrische Instrumente von Maschinen und Anlagen [5]. Anwendungsbeispiele für die Magnetpulverprüfung sind die Schweißnahtprüfung, das Prüfen von Schmiede-, Walz- und Gussteilen sowie die Einzel- und Serienteilprüfung.

#### Durchstrahlungsprüfung (RT-Prüfung)

Die Durchstrahlungsprüfung (Röntgenprüfung) ist ein bildgebendes Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, bei der durch eine geeignete Strahlenquelle die Dichte eines Bauteils auf einem Röntgenfilm bzw. -bild dargestellt wird. Als Strahlenquellen kommen zum einen Röntgenröhren (**Bild 7**), zum anderen gammastrahlende Radionuklide wie Iridium 192, Selen 75 oder Cobalt 60 zum Einsatz.

Auf der Durchstrahlungsaufnahme erscheint ein Projektionsbild des Bauteils. An der unterschiedlichen Schwärzung lässt sich die abweichende Werkstoffdicke oder -dichte erkennen. Je dicker oder dichter ein Bauteil ist, umso weniger Strahlung kann das Bauteil durchdringen und desto heller erscheint die Abbildung auf dem Auswertemedium. Bei Unterschieden der Dichte zwischen Fehlstelle und Grundmaterial ist der Fehler durch Helligkeitsunterschiede sichtbar [6]. Auch feine Risse, Poren oder Lunker lassen sich bei geeigneten Parametereinstellungen, zum Beispiel Einstrahlwinkel, Belichtungsdauer, Filmempfindlichkeit, finden (**Bild 8**).

Um die Kontrastqualität der Durchstrahlungsaufnahme zu bestimmen, verwendet man in der Praxis sogenannte Bildgüteprüfkörper (BPKs). Das sind unterschiedlich dicke Drähte, die zusammen mit dem Prüfobjekt aufgenommen werden. Der gerade noch sichtbare Draht entspricht dabei der Bildgüte der Durchstrahlungsaufnahme [7].

Röntgenstrahlen werden üblicherweise für dünne oder weniger dichte Werkstoffe verwendet, während Gammastrahlen für dickere oder dichtere Gegenstände eingesetzt werden. Ein Haupteinsatzgebiet der RT-Prüfung stellt das Prüfen von Schweißnähten dar. Während werkstattgefertigte Schweißkonstruktionen vielfach mit stationären Prüfanlagen in „Röntgenbunkern“ geprüft werden, kommen auf Baustellen transportable Röntgenröhren, die mittlerweile auch batteriebetrieben erhältlich sind, häufiger jedoch einfacher zu bedienende Isotopenarbeitsgeräte (**Bild 9**) zum Einsatz. Abhängig von der Wanddicke des zu prüfenden Bauteils sind diese mit Iridium 192 bzw. Selen 75 bestückt. Cobalt 60 kommt bei besonders dickwandigen Komponenten zum Einsatz. Die Ergebnisse können analog auf speziellen Röntgenfilmen dargestellt werden, oder aber es kommen sogenannte Flachdetektoren – siehe Pfeil in **Bild 10** – zum Einsatz, mit denen eine Digitalisierung des Prüfergebnisses möglich ist.

Die digitalisierten Daten werden durch spezielle Software auf dem Computerbildschirm in

eine Durchstrahlungsaufnahme umgewandelt. Gängige Auswerteprogramme ermöglichen eine schnelle Bestimmung der Bauteilwanddicke (**Bild 11**) sowie von Fehlergrößen- und -tiefen. Darüber hinaus können die digitalisierten Aufnahmen zu Dokumentationszwecken auf dem Computer gespeichert werden. Dagegen müssen analoge Durchstrahlungsaufnahmen aufwendig archiviert bzw. zeitaufwendig mit speziellen Geräten digitalisiert werden. Allerdings ist der Einsatz der digitalen Durchstrahlungsprüfung zurzeit noch auf eine Bauteildicke von maximal 12 mm und bei Rohren auf Nennweiten von maximal 150–200 mm begrenzt.

Für die Untersuchung von Rohreinschweißungen in Wärmetauscherböden wurden spezielle Prüfeinrichtungen entwickelt, wobei die Strahlenquelle in die Wärmetauscherrohre eingefahren und der Röntgenfilm außen auf die Schweißnaht angebracht wird (**Bild 12**). Als Strahlenquellen kommen Isotope oder neuerdings auch Röntgenstrahlen zur Anwendung [8].

Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Durchstrahlungsprüfung stellen Computertomographen dar, die ähnlich wie in der Medizintechnik eine schichtenweise Untersuchung sowie eine dreidimensionale Darstellung des Bauteils ermöglichen. Diese Geräte sind allerdings noch nicht baustellentauglich und werden hauptsächlich im Labor zum Beispiel zur Untersuchung von Gussteilen eingesetzt.



▲ Bild 9. Isotopenarbeitsgerät mit Ausfahrtschlauch (schwarz) und Fernbedienungseinheit

► Bild 10. Aufnahmeanordnung für die digitale Durchstrahlungsprüfung von Rohrleitungen



Für das Prüfen in Anlagen bzw. auf Baustellen ist das relativ neue Verfahren der „Echtzeitradiographie“ von Interesse (**Bild 13**). Hierbei wird bei schwacher Strahlungsintensität das Bauteil durchstrahlt und die durchdringende Strahlung durch einen Detektor aufgezeichnet. Das Prüfergebnis kann danach sofort am Computer ausgewertet werden. Allerdings wird dieses Verfahren aufgrund fehlender behördlicher Umgangsgenehmigungen in Deutschland bisher nicht angewendet.

### Ultraschallprüfung (UT-Prüfung)

Die Ultraschallprüfung beinhaltet die Übertragung von hochfrequentem Schall in einen Werkstoff. Üblicherweise wird bei der UT-Prüfung im Frequenzbereich zwischen 500 kHz und 20 MHz gearbeitet. Für Sonderanwendungen sind auch Prüfköpfe erhältlich, die im Frequenzbereich zwischen 50 kHz und 200 MHz arbeiten. Bei niedrigerer Frequenz erhöht sich die Durchdringung, wohingegen mit steigender Frequenz die Auflösung und die Fokusschärfe zunehmen. An dieser Stelle sollte erwähnt werden, dass typische ZfP-Prüfköpfe keine Schallwellen mit einer einzigen reinen Frequenz, sondern vielmehr über einen Bereich von Frequenzen erzeugen, zentriert an der Nennfrequenz. Im Prüfling kommt es zu einer Beeinflussung des eingeleiteten Schalls durch im Werkstoffinneren befindliche Inhomogenitäten (zum Beispiel Risse, Poren, Lunker, Gefügebestandteile),

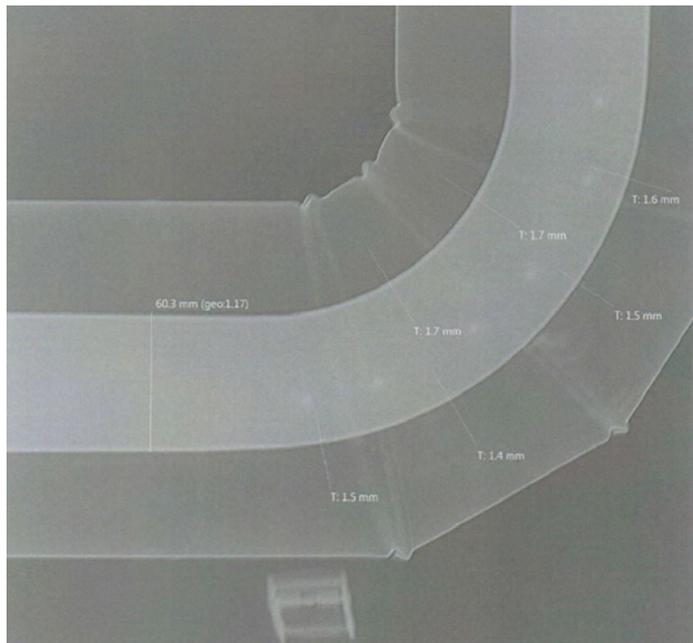
die zu einer Reflexion oder Dämpfung des Schalls führen können. Es gibt viele Methoden der Ultraschallerzeugung, jedoch hat sich für die zerstörungsfreie Prüfung in dem typischen Frequenzbereich die Erzeugung von Ultraschall durch den piezoelektrischen Effekt (griechisch piezo = Druck) bewährt [10].

Die Ultraschallprüfung wird allgemein in Reflexionsschall-, Durchschallungs- und Beugungslaufzeittechnik-Verfahren unterteilt. Im Allgemeinen besteht ein UT-Prüfsystem aus einem Ultraschallwandler, einem Impulsgeber/Empfänger und einer Anzeigeeinheit. Trifft das Schallbündel auf Ungenzen wie Einschlüsse, Porosität oder Risse, wird ein Teil der mechanischen Energie von der Oberfläche der Fehlstellen (Reflektoren) reflektiert. Das vom Wandler empfangene reflektierte Schallwellensignal wird dann wieder in ein elektrisches Signal umgewandelt und seine Intensität auf der Anzeigeeinheit angezeigt [11]. Bei bekannter werkstoffspezifischer Schallgeschwindigkeit kann die Laufzeit der Schallwellen direkt mit der Entfernung in Beziehung gesetzt werden, die das Signal zurückgelegt hat. Aus dem Signal können Informationen über den Ort, die Größe, die Ausrichtung und andere Merkmale des Reflektors bestimmt werden.

### Reflexionsschallverfahren

Bei der Prüfung mit dem Reflexionsschallverfahren wird ein Schallstrahl in die

Oberfläche des Prüfstücks eingeleitet. Der Schall bewegt sich durch den Werkstoff des Prüfstücks und erreicht entweder die Rückwand des Prüflings, wird dort reflektiert und kehrt dann zum Wandler zurück, oder er kehrt frühzeitig zurück, wenn er von einer Diskontinuität innerhalb des Teils reflektiert wird. Wenn die Schallgeschwindigkeit bekannt ist, kann das aufgezeichnete Zeitintervall zur Ableitung der im Werkstoff zurückgelegten Strecke verwendet werden. Die für das Reflexionsverfahren verwendeten Prüfköpfe enthalten dementsprechend sowohl eine Sende- als auch eine Empfangseinheit. Die Schalleinleitung kann entweder senkrecht zur Werkstoffoberfläche erfolgen – diese Variante wird üblicherweise bei der UT-Wanddickenmessung eingesetzt –, oder aber es kommen sogenannte Winkelprüfköpfe zum Einsatz, mit denen die Schalleinleitung unter einem Winkel von 35 bis 80° zur Oberfläche des Prüfstücks erfolgt. Das UT-Prüfen mit Winkelprüfköpfen wird unter anderem bei der Prüfung von Schweißnähten eingesetzt (**Bild 14**). Eine Weiterentwicklung des Reflexionsverfahrens stellt das sogenannte „interne Rotationsinspektionssystem (IRIS)“ dar. Mit „IRIS“ kann die Restwanddicke von Rohren exakt gemessen werden. Die bei der „IRIS“-Untersuchung verwendete Sonde besteht aus einem Zentriergerät, einem Ultraschallwandler und einem Drehspiegel. In dem in axialer Richtung montierten Schallwandler wird



◀ Bild 11. Digitale Durchstrahlungsaufnahme einer gedämmten Rohrleitung mit Bestimmung der Bauteilwanddicke

des Bauteils, zum Beispiel Porosität, Lunker, Risse, gedämpft. Eine Dickenmessung ist mit dieser Technik normalerweise nicht möglich.

#### Beugungslaufzeittechnik

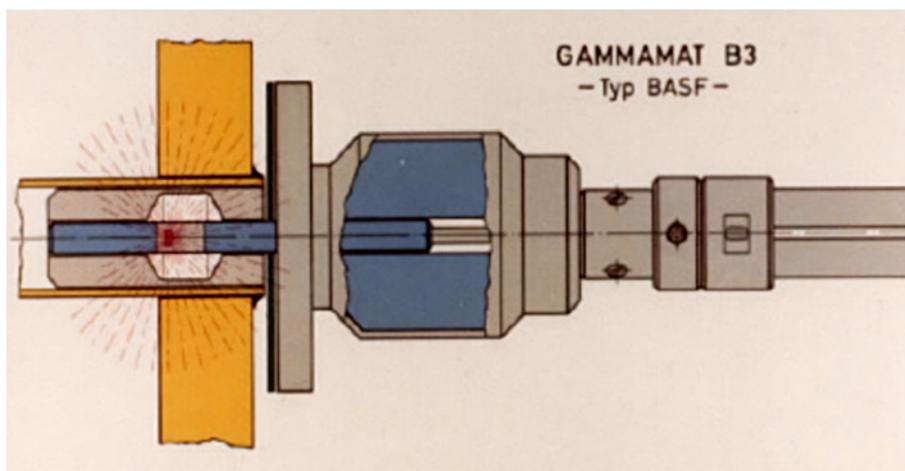
Die Beugungslaufzeittechnik, auch ToFD-Verfahren (ToFD = Time of Flight Diffraction) genannt, arbeitet mit der Änderung der Wellenlänge des Schalls, wenn dieser auf eine Fehlstelle in einem Prüfstück trifft. Dieser Mechanismus wird verwendet, wenn keine echte Reflexion erreicht werden kann, aber eine ausreichende Beugung auftritt, um die Laufzeit des Schalls zu verändern. Damit kann die Spitze eines Defekts erkannt werden, der sich senkrecht zur Kontaktfläche der Sonde befindet. ToFD wird auch für die Rückwandinspektion zum Nachweis von Korrosion verwendet.

Bei ToFD-Systemen wird ein Paar Ultraschallsonden verwendet, die zum Beispiel auf gegenüberliegenden Seiten einer Schweißverbindung aufgesetzt werden. Eine Sonde sendet einen Ultraschallimpuls aus, der von der Empfängersonde auf der gegenüberliegenden Seite aufgenommen wird. In einem unbeschädigten Teil stammen die von der Empfängersonde aufgenommenen Signale von zwei Wellen, nämlich einer, die sich entlang der Oberfläche ausbreitet (laterale Welle) und einer, die von der gegenüberliegenden Wand reflektiert wird (Rückwandreflexion). Wenn eine Diskontinuität wie ein Riss vorhanden ist, gibt es eine Beugung der Ultraschallwelle von den oberen und unteren Spitzen des Risses. Anhand der gemessenen Laufzeit des Impulses kann die Tiefe der Risspitzen automatisch durch trigonometrische Anwendung berechnet werden. Diese Methode ist sogar noch zuverlässiger als herkömmliche radiographische Verfahren bzw. manuelle und automatisierte UT-Schweißnahtprüfungsmethoden [14].

ToFD bietet eine hohe Genauigkeit für die Messung von rissähnlichen Defekten. Die Genauigkeit von mehr als  $\pm 1$  mm kann in einem breiten Bereich von Werkstoffdicken erreicht werden, aus denen druckbeaufschlagte Komponenten hergestellt werden. Das ToFD-Verfahren stellt eine der effektivsten Techniken zum Lokalisieren und Bemessen von Fehlstellen in ferritischen Schweißnähten dar und kann bis zu Temperaturen von 350°C eingesetzt werden [15].

#### Ultraschallprüfung mit geführten Wellen

Die Ultraschallprüfung mit geführten Wellen (Guided-wave-Verfahren) ist für die Prüfung



▲ Bild 12. Anordnung für die Durchstrahlungsprüfung von Rohreinschweißungen

ein Ultraschallimpuls erzeugt, dann führt ein 45°-Drehspiegel in der Sonde das Schallbündel zur Rohrwand. Anschließend erfolgt eine Ultraschallreflexion (Echo) an der Innen- und der Außenwand des Rohrs. Diese Echos werden reflektiert und dann von der Anlage verarbeitet. Die Zeit zwischen diesen beiden Echos repräsentiert die Wanddicke des Rohrs. Dank der bekannten Schallgeschwindigkeit im zu prüfenden Werkstoff lässt sich die Wanddicke berechnen. „IRIS“ lässt sich sowohl auf Eisen- und Nichteisenwerkstoffe als auch auf nichtleitende Werkstoffe wie Kunststoffe anwenden [12].

Vor Beginn der Messung muss die UT-Prüfeinrichtung für die jeweilige Prüfaufgabe kalibriert werden. Im Falle von Wanddickenmessungen kommen sogenannte Stufenkeile zum

Einsatz, die mit definierten, abgestuften Wanddicken aus dem zu prüfenden Werkstoff hergestellt werden. Für das Prüfen mit Winkelprüfköpfen werden genormte Testkörper verwendet (Bild 15), oder aber es kommen Probestücke zur Anwendung, die mit definierten Testbohrungen und geeichten Bohrtiefen für die jeweilige Prüfaufgabe angefertigt wurden [13].

#### Durchschallungsverfahren

Das Durchschallungsverfahren verwendet separate Wandler zum Abstrahlen und Empfangen des Schalls. Die Sendesonde wird auf der einen Seite des Prüflings und die Empfangs-sonde auf der anderen Seite positioniert. Wenn der Schall das Bauteil durchdringt, wird er durch Fehlstellen innerhalb



▲ Bild 13. Einrichtung für die Echtzeitradiographie beim Prüfen einer Rohrleitung



▲ Bild 14. Manuelle UT-Prüfung von Schweißnähten an einem T-Stück

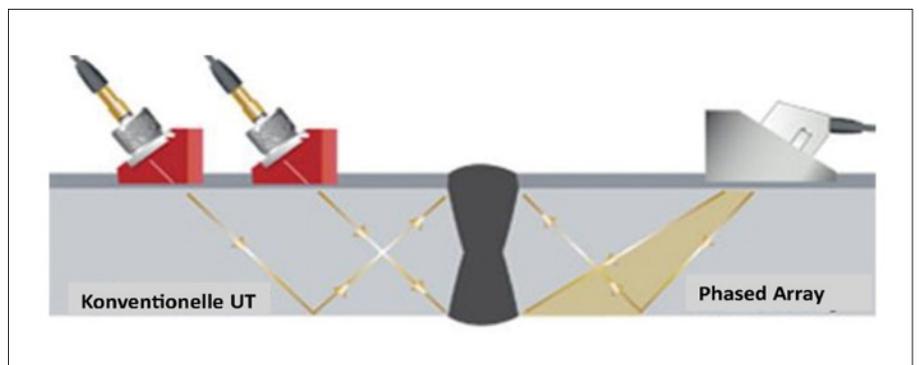
von Rohren über große Entfernungen geeignet. Sie wird daher oft „Langstreckenultraschalluntersuchung“ genannt. Dieses Prüfverfahren erzeugt und detektiert mithilfe von mehreren Wandlern (Transducern) und einem Computer besondere Ultraschallwellenformen, um Fehlstellen in der Rohrwandung aufzufinden. Die Ultraschallprüfung mit geführten Wellen deckt im mittleren Längenbereich eine Strecke von 25 mm bis 3000 mm ab. Im Langstreckenbereich hat das Verfahren eine größere Reichweite und kann vom Einkopplungsort aus zur Prüfung im Bereich von bis zu Hunderten von Metern verwendet werden [16].

Das Verfahren wird zur Ortung von Korrosionsstellen unterhalb von Wärmedämmungen an Rohrleitungen (corrosion under insulation, CUI) sowie zur Inspektion von Rohren in unzugänglichen Bereichen wie Straßen- und Flusskreuzungen, Kraftwerksrohren, Steigleitungen, Offshore-Rohren, Anlegestellenleitungen und Raffinerierohren eingesetzt.

#### Phased-Array-Ultraschallprüfung

Die Phased-Array-Ultraschallprüfung [17] wurde ursprünglich für den Einsatz in der Medizin entwickelt. Industrielle Anwendungsbereiche stellen dagegen wegen der großen Verschiedenheit der akustischen Eigenschaften von Metallen, Verbundwerkstoffen, Keramik, Kunststoffen und Glasfaser und auch wegen der verschiedenen Dicken und Geometrien eine weit größere Schwierigkeit dar. Die ersten industriellen Phased-Array-Systeme wurden in den 1980er Jahren für die Prüfung von Nuklearkomponenten oder großen geschmiedeten Wellen eingeführt.

► Bild 15. Kalibrierstück für Ultraschallprüfungen



▲ Bild 16. Vergleich der konventionellen UT-Technik mit dem Phased-Array-Verfahren

Mit zunehmender Digitalisierung kamen kleine, transportable Phased-Array-Geräte zum Einsatz, die nunmehr auch für die Schweißnahtprüfung geeignet waren.

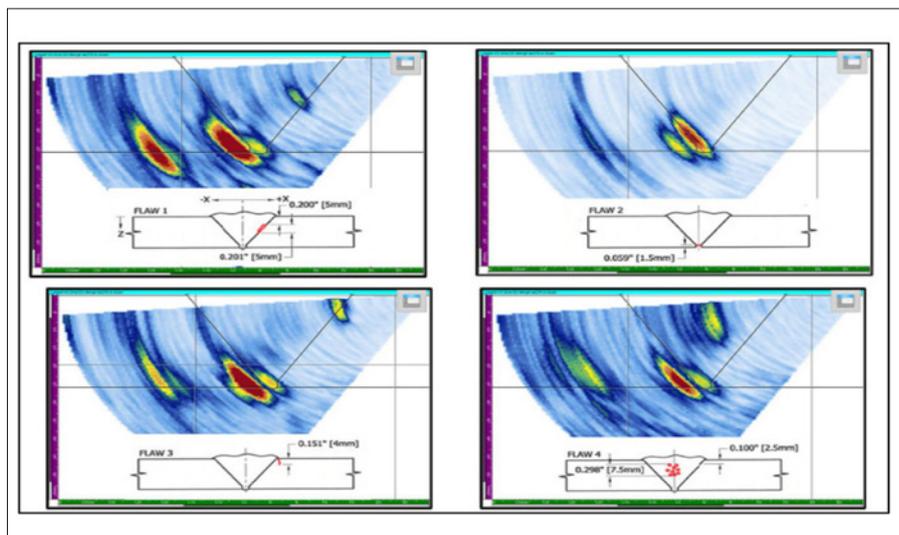
Während ein konventioneller Ultraschallkopf normalerweise aus einem Element oder zwei Elementen zum Senden und Empfangen besteht, kann ein Phased-Array-Prüfkopf hunderte Elemente enthalten, die jeweils einzeln angeregt werden können (Bild 16). Das bedeutet, dass die Schallbündel eines Phased-Array-Sensors elektronisch gesteuert, angeregt, geschallt und fokussiert werden können, um eine

schnelle Prüfung, vollständige Datenspeicherung und Prüfungen unter mehreren Winkeln zu ermöglichen.

Phased-Array-Ultraschallgeräte können grundsätzlich für fast alle Prüfungen eingesetzt werden, für die bisher Geräte für konventionellen Ultraschall genommen wurden. Die Schweißnaht- und die Rissprüfung sind die wichtigsten Anwendungsbereiche, und diese Prüfungen werden in vielen verschiedenen Industriebranchen, wie der Luftfahrt, der Energieerzeugung, der Petrochemie, bei der Herstellung von Metallrohlingen und Rohren, in

Pipelinebau und -wartung sowie für Stahlkonstruktionen, ausgeführt. Mit der Phased-Array-Methode kann bei der Korrosionsprüfung auch die verbleibende Restwanddicke überwacht werden.

Die Schallbündelsteuerung, auch Sektor-Scan genannt, wird auch für die Schweißnahtprüfung eingesetzt. Die Fähigkeit, die Schweißnaht mit einem einzigen Sensor in verschiedenen Winkeln prüfen zu können, erhöht die Fehlererkennungswahrscheinlichkeit erheblich. Mit der elektronischen Änderung der Fokustiefe werden Schallbündelform und -größe für die erwartete Fehlerlage optimiert, was die Wahrscheinlichkeit der Fehlererkennung weiter erhöht. Die Möglichkeit, das Schallbündel in verschiedenen Tiefen zu fokussieren, verbessert die Fähigkeit, die Größe von kritischen Defekten bei der Volumenprüfung zu bestimmen. Der Fokus kann das Signal-Rauschverhältnis in schwierigen Anwendungsbereichen wesentlich verbessern, und durch das elektronische Abtasten mit mehreren Elementen werden C-Bilder sehr schnell erstellt (**Bild 17**). Die eventuellen Nachteile



▲ Bild 17. Darstellung von Schweißnahtfehlern als C-Bilder mit dem Phased-Array-Verfahren (Bilder: Killing (1–11, 14–16), [8] 12, [9] 13, [18] 17)

von Phased-Array-Geräten sind die etwas höheren Kosten und die etwas aufwendigere Ausbildung des Prüfers. Diese Kosten werden allerdings oft durch die Zeitersparnis beim Prüfen aufgewogen. ■



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

## Literatur

- [1] DIN EN 13927: Zerstörungsfreie Prüfung – Sichtprüfung – Geräte. Ausgabe: 2003–05.
- [2] DIN EN ISO 17637: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Sichtprüfung von Schmelzschweiß-Verbindungen. Ausgabe: 2017–04.
- [3] DIN EN ISO 3452-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Eindringprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Ausgabe: 2022–02.
- [4] DIN EN ISO 9934-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Magnetpulverprüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Ausgabe: 2017–03.
- [5] N.N.: Magnetpulverprüfung – MT. URL: <https://www.zeros-berlin.de/magnetpulverpruefung-mt> [Abruf: 24.08.2023]
- [6] N.N.: Röntgenprüfung/Durchstrahlungsprüfung. URL: <https://www.zeros-berlin.de/roentgenpruefung-rt> [Abruf: 24.08.2023]
- [7] DIN EN ISO 19232-1: Zerstörungsfreie Prüfung – Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen – Teil 1: Ermittlung der Bildgütezah mit Draht-Typ-Bildgüteprüfkörper. Ausgabe: 2013–12.
- [8] Schmid, M.; Gröger, P.; Hecht, A.; Post, P.: Weiterentwicklung der Prüftechnik für Rohr-/Rohrbodenverbindungen an Wärmetauschern. In: DVS-Berichte, Band 255 (2009), S. 54–58.
- [9] Amer, A.; u. a.: Inspection Challenges for Detecting Corrosion Under Insulation (CUI) in the Oil and Gas Industry. 17th Middle East Corrosion Conference & Exhibition, Sanabis, Bahrain, Oktober 2018 (NACE Paper No. MECCOCT18-12400).
- [10] Schuster, V.; u. a.: Die Qual der Wahl: Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz? Sonderdruck 1/51 aus DACH Tagung, Salzburg, Österreich, 17.05.–19.05.2004.
- [11] N.N.: Manual Ultrasonic Testing (UT) Services – NDT Inspection. URL: <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/manual-ultrasonic-testing> [Abruf: 24.08.2023]
- [12] N.N.: Interne Rotationsinspektion IRIS. URL: <https://www.applus.com/de/de/what-we-do/sub-service-sheet/interne-rotationsinspektion-iris> [Abruf: 24.08.2023]
- [13] DIN EN ISO 2400: Zerstörungsfreie Prüfung – Ultraschallprüfung – Beschreibung des Kalibrierkörpers Nr. 1. Ausgabe: 2013–01.
- [14] N.N.: Time of Flight Diffraction – TOFD – NDT for weld inspection. URL: <https://www.twi-global.com/what-we-do/services-and-support/asset-management/non-destructive-testing/ndt-techniques/time-of-flight-diffraction> [Abruf: 24.08.2023]
- [15] N.N.: TOFD – Verfahren für die Schweißnahtprüfung. URL: <https://www.tuv.com/germany/de/tofd-and-non-destructive-testing.html> [Abruf: 24.08.2023]
- [16] N.N.: Was ist zerstörungsfreie Prüfung und welche ZFP-Verfahren gibt es? URL: <https://www.twi-global.com/locations/deutschland/was-wir-tun/haeufig-gestellte-fragen/was-ist-zerstoerungsfreie-pruefung-und-welche-zfp-verfahren-gibt-es> [Abruf: 24.08.2023]
- [17] N.N.: Einführung in die Phased-Array-Prüfung. URL: <https://www.olympus-ims.com/de/ndt-tutorials/phased-array/> [Abruf: 24.08.2023]
- [18] van Straelen, F.: Phased Array Ultraschallverfahren – Anwendung, Umgang und Praktikumsversuche mit dem OmniScan SX (Olympus). Masterarbeit. Technische Hochschule Georg Agricola, Wissenschaftsbereich Maschinenbau und Materialwissenschaften, eingereicht am 03.05.2023.