

Zerstörungsfreie HM-Schweißnahtprüfung für Netze in der Gas- und Wasservertei- lung (HM-NDT)

Kurzfassung

B. Eng. Tobias Eckhardt

SKZ – KFE gGmbH, Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg

Dr. Eduard Kraus

SKZ – KFE gGmbH, Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg

Dr. Gernot Hochleitner

SKZ – KFE gGmbH, Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg

Dipl.-Ing. Werner Weißing

Office for Green Gas

Herausgeber

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.

Technisch-wissenschaftlicher Verein

Josef-Wirmer-Straße 1–3

53123 Bonn

T +49 228 91885

F +49 228 9188990

info@dvwg.de

www.dvgw.de

Zerstörungsfreie HM-Schweißnahtprüfung für Netze in der Gas- und Wasserverteilung (HM-NDT)

Kurzfassung

Juni 2024

DVGW-Förderkennzeichen G 202206

1 Einleitung

Schweißverbindungen können bei nicht Einhaltung der allgemeinen Schweißvorgaben (u.a. DVS, GW 330, GW 331) vor Ort langfristig zu einer Schwachstelle in Gas- und Wassernetzen werden. Auch nach einer ordnungsgemäßen Druckprüfung kommt es vereinzelt in der Praxis vor, dass im Nachgang noch Undichtigkeiten entstehen. Dies lässt oft auf Fehlstellen im Schweißbereich schließen. Bisher gibt es noch keine Methode, um flächendeckend, zuverlässig, schnell und zerstörungsfrei die Qualität von Heizwendelschweißungen (HM) zu prüfen. Aktuell werden neben der Sichtprüfung nur stichprobenartig Schweißnähte von der Baustelle entnommen und im Anschluss mechanisch geprüft.

Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben soll ein Nachweis zur Einsatzmöglichkeit von zerstörungsfreien Prüfungen (zFP) zur Ermittlung von Schweißfehlern in HM-Verbindungen erbracht werden. Im Fokus liegen dabei die Quantifizierung der Fehlerauffindwahrscheinlichkeit (POD, probability of detection), die anwendungsbezogene Beurteilung des Einflusses der Fehlstelle auf die Schweißqualität und die Wirtschaftlichkeitsbewertung der ZfP-Methoden unter Berücksichtigung der Einsatzfähigkeiten auf Baustellen.

Da speziell die Gasnetze mit kontinuierlich steigenden Drücken sowie entsprechend erhöhten Anforderungen konfrontiert werden, ist die Etablierung einer zuverlässigen zerstörungsfreien Methode zur Evaluierung der Qualität von HM-Verbindungen von größter Dringlichkeit. Die Steigerung der Sicherheit der Versorgungsnetze stellt somit den wichtigsten Nutzen der hier zu erwartenden Ergebnisse dar.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die ZfP als zuverlässige Qualitätssicherung im Baustelleneinsatz zu etablieren, einerseits zum Integritätsnachweis für bestehende Netze und andererseits für den Bau von neuen Netzen.

2 Durchgeführte Arbeiten

2.1 Probenherstellung

Im Rahmen der Untersuchung wurden Schweißverbindungen aus PE 100-RC (Polyethylen – Resistant to Crack), mit den Dimensionen D110 SDR 11, hergestellt. Um bei den Muffen die Variabilität der Oberflächen zu berücksichtigen, wurden hier Formstücke von drei verschiedenen Herstellern eingeholt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die verwendeten Materialien.

Tabelle 1: Materialübersicht

Art	Hersteller
Rohre	Egeplast, 48268 Greven, DE
Muffen	Aliaxis, 68229 Mannheim, DE
Muffen	Georg Fischer, 8201 Schaffhausen, CH
Muffen	Frank, 64546 Mörfelden-Walldorf, DE

Alle Schweißungen wurden mit dem Schweißgerät FRIAMAT prime eco der Fa. Aliaxis durchgeführt (vgl. Abbildung 1). Entscheidend für die Versuche war eine zuverlässige Dokumentationsfunktion mit ausführlichen Schweißprotokollen (z. B. Schweißdauer, Energie, Umgebungstemperatur, etc.), da diese möglicherweise schon Erkenntnisse hinsichtlich der Verbindungsqualität liefern.



Abbildung 1: FRIAMAT prime eco

Soweit für die Proben keine Fehler hinsichtlich der Vorbereitung oder der Ausführung eingebracht wurden, wurden die Schweißungen basierend auf der DVS-Richtlinie 2207-1 [1] ordnungsgemäß durchgeführt.

2.1.1 Schweißfehler

Beim Versuchsplan wurde sich an Vorversuchen, an der DVS-Richtlinie 2202 Beiblatt 2 [1] und an dem Forschungsvorhaben „Zerstörungsfreier Integritätstest für stumpfgeschweißte Kunststoffrohre auf der Baustelle – Bead-Bend-Back-Test“ des SKZ [2] orientiert. Es sollten Fehler ausgewählt werden, welche am wahrscheinlichsten auf Baustellen auftreten können und sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften einer HM-Verbindung auswirken. Zudem wurden alle Fehler in unterschiedlichen Ausprägungsgraden eingebracht, um Grenzen festzulegen, ab welcher Fehlergröße ein klarer Einfluss auf die Mechanik zu erkennen ist. Jedes Fehlerbild wurde mit jeder Muffe einmal hergestellt. Um eine optimale Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen zu gewährleisten, wurden die Fehler möglichst reproduzierbar in die HM-Verbindungen eingebracht. Die Schweißfehler wurden in zwei Kategorien unterteilt. Gruppe 1 beinhaltet Fehler mit unsachgemäßer Durchführung der Schweißung, in diesem Fall ein falsches Abschälen und ein unvollständiger Rohreinschub. Gruppe 2 enthält Bindefehler aufgrund von Kontamination, entweder durch Flüssigkeiten (Wasser, Öl) oder Festkörper (Sand, Laub). Eine Übersicht mit allen Fehlern und Ausprägungsgraden ist in Tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Übersicht Fehler und Ausprägungsgrade

Gruppe	Fehler	Anzahl Ausprägungsgrade
1) Unsachgemäße Durchführung	Falsches Abschälen	6
	Unvollständiger Rohreinschub	5
2) Bindefehler	Wasser	4
	Öl	4
	Sand (Ø 0,5 – 1,0 mm)	4
	Laub	4

Insgesamt wurden 80 Schweißungen durchgeführt. Bei jeder Schweißung wurde der gleiche Fehler in die linke und rechte Seite der Muffe eingebracht, wodurch sich insgesamt 160 Proben ergaben.

2.2 Prüfmethoden

2.2.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

Bei den zFP lag der Fokus auf dem Phased Array-Verfahren (Ultraschallprüfung), da diese Methode geeignet ist für den Einsatz auf der Baustelle. Dabei wurden Untersuchungen von der Fa. Georg Fischern und vom SKZ durchgeführt. Um einen Vergleich zu einer weiteren ZfP-Methode zu haben, wurde ein Teil der Proben zusätzlich in der Computertomographie (CT) untersucht.

Phased Array (Ultraschall)

Das Verfahren beruht auf der Ultraschall-Impuls-Echo Technik. Hierbei wird das Ultraschallsignal bei auftretenden Änderungen der Schallimpedanz (durch Dichteänderungen) im Material zum Empfänger zurückgelenkt. Wenn eine Schweißung korrekt durchgeführt wurde, sind die Materialien beider Rohre miteinander stoffschlüssig verbunden. Es besteht somit keine nennenswerte Dichteänderung beim senkrechten Übergang der Ultraschallwellen in das Rohr. Erreichen sie das Ende der Rohrwandung, treffen sie auf einen sehr großen Dichteunterschied und werden zum Empfänger reflektiert.

Bei der Phased Array-Technik (vgl. Abbildung 2) arbeitet man mit nur einem Sensor. Sender und Empfänger sind in einem Bauteil vereinigt. Anders als bei der konventionellen Technik besteht der Ultraschall-Sensor hier nicht nur aus einem Schwinger, sondern aus mehreren

kleinen Schwingern, welche zu einer Einheit zusammengefasst werden, jedoch einzeln elektronisch angesteuert werden können. Der Vorteil besteht darin, dass das Ultraschallbündel durch zeitlich versetzte Ansteuerung der einzelnen Schwinger modifiziert werden kann. Während der Prüfung kann somit der Einschallwinkel verändert und das Schallbündel fokussiert werden. Das Fokussieren der Wellen erlaubt zudem die Einkopplung erhöhter Schallenergien und trägt somit zur Verbesserung der lateralen Auflösung bei.

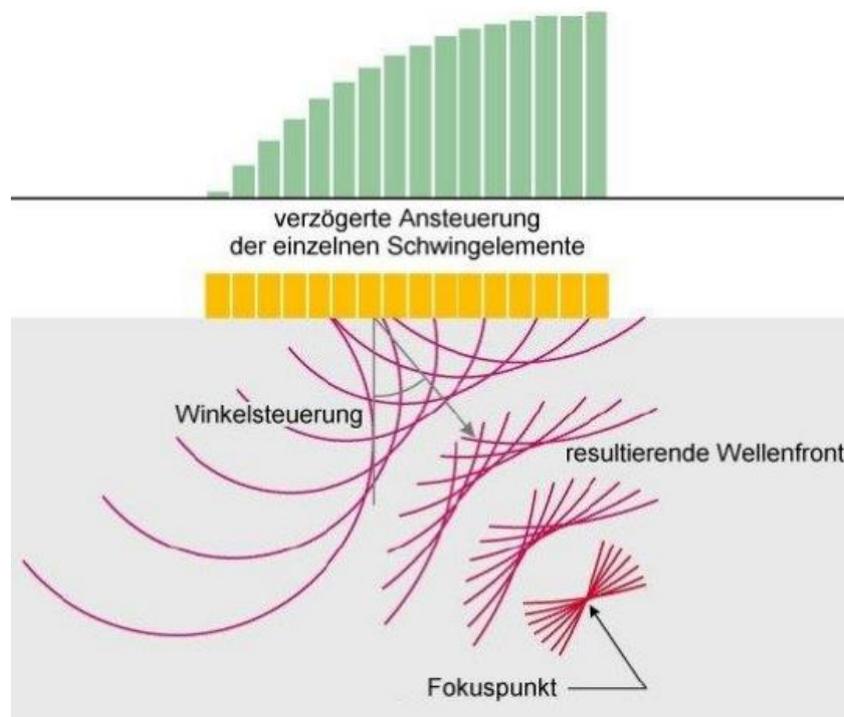


Abbildung 2: Funktion des Phased Array-Verfahrens (in Anlehnung an [3])

Computertomographie

Die CT ist ein Verfahren, das anhand der Abschwächung von Röntgenstrahlung bestimmte Dichteänderungen im Prüfkörper erkennen kann. Dadurch treffen die Röntgenstrahlen mit unterschiedlichen Intensitäten auf den Röntgendetektor (vgl. Abbildung 3). Durch eine einzelne Durchleuchtung kann eine 2D-Ansicht mit Informationsgehalt zur inneren Struktur der Muffe erzeugt werden. Mit einer hohen Anzahl an Aufnahmen während der Bauteil-Rotation kann auch ein dreidimensionales Modell der Schweißverbindung generiert werden.

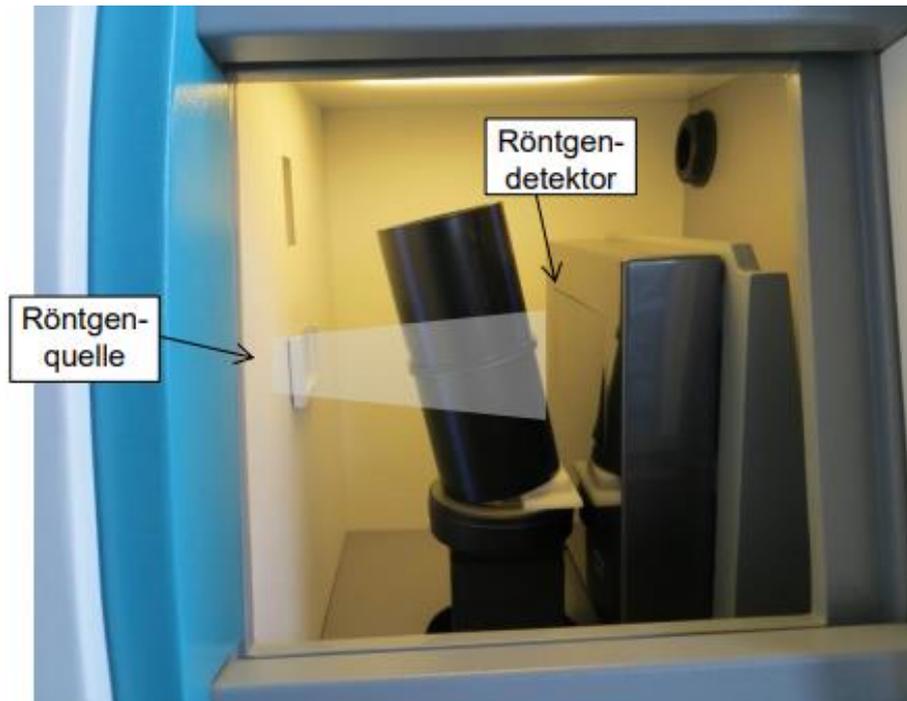


Abbildung 3: Funktion der Computertomographie am Beispiel einer Stumpfschweißung

2.2.2 Mechanische Prüfungen

Für eine abschließende Bewertung sowie einer Korrelation der zfP und der Schweißnahtqualität wurden an allen hergestellten Proben mechanische Prüfungen durchgeführt. Hierbei wurde sowohl die Kurzzeitmechanik anhand des maschinellen Linearscherversuchs als auch die Langzeitmechanik anhand des Zeitstandinnendruck-Versuchs getestet.

Maschineller Linearscherversuch

Der maschinelle Linearscherversuch (LSV) wurde nach der DVS-Richtlinie 2203-6 [1] durchgeführt (vgl. Abbildung 4). Hierbei wird der Probekörper (Breite von 4 mm für d110) mit einer für PE festgelegten Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min linear geschert. Mittels einer Kraftmessdose wird zusätzlich die Scherkraft erfasst. Über diese kann nach der Ermittlung der Fügefläche eine Festigkeit berechnet werden. Im Anschluss wird außerdem die Bruchfläche nach der DVS-Richtlinie 2203-1 Beiblatt 4 [1] bewertet, was letztendlich das ausschlaggebende Kriterium ist. Hier muss der Probekörper einen Duktilbruchanteil von mindestens $\frac{2}{3}$ der gesamten Fügezonenlänge aufweisen.

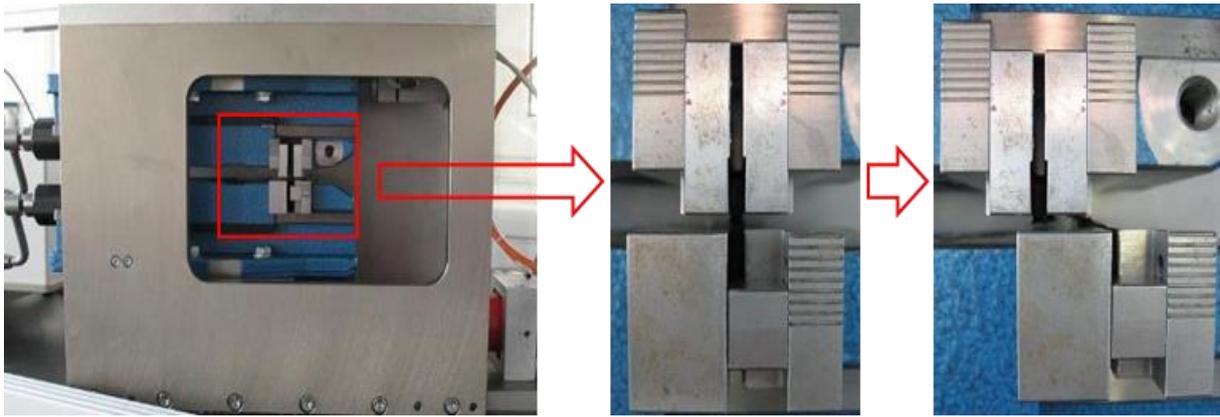


Abbildung 4: Ablauf des maschinellen Linearscherversuch

Zeitstandinnendruck-Versuch

Beim Zeitstandinnendruck-Versuch (vgl. Abbildung 5) werden die Proben bei einer festgelegten Prüftemperatur mit einem konstanten Innendruck beaufschlagt. Für die ausgewählten Parameter müssen die Proben dann eine vorgegebene Mindeststandzeit aushalten, ohne dass es während der Versuchsdauer zum Bruch.

Für die Versuche wurde eine Prüftemperatur von 80 °C und ein Prüfdruck von 10,8 bar gewählt. Aus diesen Parametern ergibt sich im Zeitstandinnendruck-Versuch eine Mindeststandzeit von 165 Stunden.



Abbildung 5: Zeitstandinnendruck-Versuch

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Fehlerdetektion

Die Phased Array Ultraschallprüfung zeigt mit ca. 70 % eine höhere Detektionsrate als die CT (ca. 58 %). Vergleicht man die beiden Fehlergruppen miteinander, werden für die unsachgemäße Durchführung bei 78 % der Proben Indikationen erkannt und für die Bindefehler bei 65 %. Untergliedert man die Gruppen nochmal in die einzelnen Fehler, erhält man die folgenden Detektionsraten:

- Falsches Abschälen: 75 %
- Unvollständiger Rohreinschub: 82 %
- Wasser: 100 %
- Öl: 0 %
- Sand: 58 %
- Laub: 100 %

Zwischen den Fehlerarten sind deutliche Unterschiede zu erkennen. Hier ist dann entscheidend, wie sich die Fehler auf die Mechanik auswirken. Sollten beispielsweise die Proben mit Öl schlechte Ergebnisse bei den mechanischen Prüfungen zeigen, wäre dies auf jeden Fall als kritischer Fehler anzusehen. Außerdem scheinen auch die einzelnen Muffen-Typen einen Einfluss darauf zu haben, ob Indikationen erkannt werden (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Detektionsraten in Abhängigkeit der Muffen

Muffe 1	Muffe 2	Muffe 3
83 %	57 %	67 %

Zusätzlich wurden auch Indikationen in Schweißungen gefunden, in die keine Fehler eingebracht wurden. Dies suggeriert, dass die Phased Array-Methode teilweise auch zu sensibel ist. Eine genaue Schlussfolgerung lässt sich mit den zusätzlichen Ergebnissen aus den mechanischen Prüfungen ziehen.

3.2 Fehlerbewertung

Bei der abschließenden Fehlerbewertung werden die Ultraschallmessungen mit den Ergebnissen der Kurzzeitmechanik verglichen. Dabei kann zwischen den folgenden vier Fällen unterschieden werden:

1. Keine Indikation gefunden & kein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften
2. Indikation gefunden & Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften vorhanden
3. Keine Indikation gefunden & Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften vorhanden
4. Indikation gefunden & kein Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften

Fall 1 und 2 sind die wünschenswerten Szenarien, d.h. die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung stimmt mit den mechanischen Eigenschaften überein. Fall 3 wäre hingegen als kritisch zu betrachten, da die Schweißung qualitativ unzureichend ist, ohne Indikationen in der ZfP aufzuweisen. Im negativsten Szenario führt eine solche Konstellation zu einem Rohrleitungsbruch und potenziell enormen Schaden. Fall 4 wäre eine falschpositive Prüfung. Hierbei wird die Schweißung fälschlicherweise als fehlerhaft bewertet. Dies führt zu unnötiger Nacharbeit und ist daher ebenfalls zu vermeiden.

Da im Zeitstandinnendruck-Versuch alle Proben – auch solche mit sehr ausgeprägten Fehlerbildern - die geforderte Standzeit erreichten, wird im Folgenden nur die Kurzzeitmechanik mit den Bewertungen der Ultraschallprüfung verglichen. Für die vier angesprochenen Fälle ergeben sich bei Betrachtung der Ergebnisse die folgenden Prozentsätze:

1. Fall: 40 %
2. Fall: 88 %
3. Fall: 13 %
4. Fall: 60 %

Positiv anzumerken ist, dass 88 % der Proben, welche eine schlechte Mechanik aufweisen, von der Ultraschallprüfung als fehlerhaft angesehen werden. Allerdings ist auch die Quote an falschpositiven Prüfungen mit 60 % vergleichsweise hoch. Dies lässt darauf schließen, dass die Phased Array-Methode sehr sensibel ist und auch leichte Indikationen als kritische Fehlstellen einstuft.

4 Fazit

Aus den durchgeführten Analysen und den daraus resultierenden Ergebnissen lassen sich nachfolgende Schlussfolgerungen ableiten.

Es ist prinzipiell möglich, fehlerhafte HM-Verbindungen mittels Ultraschallprüfung zu untersuchen, um Indikationen hinsichtlich der Schweißnahtqualität festzustellen. Generell lag die Detektionsrate hier bei ca. 70 %. Dabei muss beachtet werden, dass auch teils sehr geringe Fehler in die Fügeverbindungen eingebracht wurden. Zudem wurde eine Schnittmenge an Proben sowohl mit US als auch mit der CT untersucht, in welcher US (83 %) im Vergleich zur CT (58 %) eine deutlich höhere Detektionsrate zeigt.

Im Vergleich mit der Mechanik muss beachtet werden, dass das Heizwendelschweißen mit PE 100 als sehr unempfindlich zu bewerten ist. Alle Proben haben die Mindeststandzeit im Zeitstandinnendruck-Versuch erreicht. Dies spricht für die Robustheit des Werkstoffs und der Fügemethode gegenüber Fehlereinflüssen. Möglicherweise müssen bei der Langzeitmechanik andere Prüfmethode in Betracht gezogen werden, die die Schweißnähte nicht mit einer konstanten, sondern einer dynamischen Belastung beanspruchen. Im maschinellen Linearverscherversuch haben nur 15 % nicht die Anforderungen hinsichtlich des Duktilbruchanteils erreicht. Hier ist positiv zu nennen, dass 88 % der qualitativ schlechten Schweißungen von den Ultraschallmessungen erkannt wurden. Allerdings wurden auch 60 % der Schweißungen mit geeigneter Kurzzeitmechanik irrtümlich als fehlerhaft bewertet. Wie erwähnt, ist eine belastbare Bewertung der Schweißnahtqualität sehr schwierig, da die lange Lebensdauer von Rohrsystemen von über 50 Jahren im Labor nicht vollständig abbildbar ist. Auch Fehlerbilder die im Laufe der vorliegenden Untersuchung als falschpositiv bewertet werden mussten, könnten sich in langen Zeiträumen und wechselnder Belastung als potenzielle Schadenquelle herausstellen.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist der hohe Anteil an falschpositiven Ergebnissen negativ zu werten. Im Baustelleneinsatz würden anhand der Ergebnisse viele Schweißungen wieder entnommen werden, obwohl die gefundene Indikation höchstwahrscheinlich kaum einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften hat. Dies würde neben den Materialkosten auch den Zeitaufwand deutlich erhöhen.

Insgesamt bietet Ultraschallprüfungen das Potenzial, HM-Verbindungen auf Fehlstellen zu untersuchen. Für eine flächendeckende Qualitätsprüfung auf der Baustelle muss allerdings die Bewertung der Ultraschallergebnisse hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften optimiert werden. Zudem verbleibt das Problem, dass geeignete Ultraschallprüfungen nur von speziell qualifiziertem und erfahrener Personal durchgeführt werden können.

5 Literatur

- [1] DVS Media GmbH, Hg. *Taschenbuch DVS-Merkblätter und -Richtlinien: Fügen von Kunststoffen*, 20. Aufl. (Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 68/IV). Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2024.
- [2] M. Eckes, B. Baudrit und W. Weißing, "Zerstörungsfreier Integritätstest für stumpfgeschweißte Kunststoffrohre auf der Baustelle – Bead-Bend-Back-Test," *DVGW energie wasser-praxis*, Nr. 10, S. 30–33, 2020.
- [3] AZO MATERIALS, "Introduction to Ultrasonic Phased Array Testing", Onlineartikel, 02.01.2013, Quelle: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8023> (Zuletzt abgerufen am 28.06.2024)