

Volumetrische Vor-Ort-Prüfung von Stumpfgeschweißten und Heizwendelgeschweißten Verbindungen bei Polyethylenrohren

On-site Volumetric Inspection of Butt Fusion and Electrofusion Joints in Polyethylene Pipes

Dr. Mike Troughton and Dr. Fredrik Hagglund, TWI Ltd, United Kingdom

Kurzfassung

Viele der Fehler, die in die Verbindungstelle beim Schweißen von Polyethylenrohren gelangen können, wie Staub aus der Luft, Fett, Schmutz, Fingerabdrücke, oder kalte Schweißstellen können nicht einfach nur durch das Betrachten der fertigen Verbindung entdeckt werden. Um diese Defekte auffindig machen zu können, ist eine volumetrische Prüftechnik notwendig.

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein neues Phased-Array-Ultraschallprüfsystem und die damit verbundenen Verfahren, die speziell für die Vor-Ort-Prüfung von Stumpfgeschweißten und Heizwendelgeschweißten Verbindungen bei Polyethylenrohren entwickelt wurden. Außerdem werden sowohl einige Fallstudien beschrieben, bei denen dieses System im Vor-Ort-Einsatz und in Fabrikumgebung verwendet wurde, als auch das aktuelle Wirken an internationalen Normen für die volumetrische Prüfung von Verbindungen bei Polyethylenrohren.

1. Einleitung

Polyethylen (PE) bietet bedeutende Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen wie Gusseisen, Stahl, Kupfer und Beton beim Transport von Flüssigkeiten. Sie korrodieren nicht und haben eine längere Lebensdauer was dazu führt, dass sie weniger oft ausgetauscht werden müssen. Durch das geringe Gewicht und die hohe Flexibilität sind sie günstiger in der Montage und sie haben eine wesentlich geringere Leckage im Vergleich zu vollverschweißten Systemen. Ihre Verwendung in sicherheitskritischen Umgebungen, beispielsweise als Kühlwasser-Einlassleitungen in Kernkraftwerken wird hingegen dadurch verhindert, dass es noch keine nachgewiesenen sichere und zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP) für die Schweißverbindungen gibt.

Das aktuelle Verfahren zur Qualitätssicherung von Stumpfgeschweißten und Heizwendelgeschweißten Nähten während der Montage sieht die Aufzeichnung der verwendeten Schweißparameter, eine optische Prüfung der Schweißnaht und eine kurzzeitige Beaufschlagung mit Wasserdruck vor.



Dr. Mike Troughton

Profil: www.fuegen-von-kunststoffen.de/?q=306933

profile: www.joining-plastics.info/?q=306933

mike.troughton@twi.co.uk



Dr. Fredrik Hagglund

Profil: www.fuegen-von-kunststoffen.de/?q=306934

profile: www.joining-plastics.info/?q=306934

Ergänzt wird dies durch eine zerstörende Prüfung von Proben in Form eines Kurzzeittests, welche aus den Schweißnähten herausgetrennt werden. Eine optische Prüfung kann jedoch nur Aufschluss über die Oberfläche einer Rohrschweißnaht geben, Belege für das Vorhandensein von Fehlstellen oder kalten Schweißstellen im Innern liefert sie nicht. Bisherige Arbeiten am TWI [1, 2] deuten darauf hin, dass der Wasserdrucktest nur bei groben Mängeln zum Versagen von stumpfgeschweißten und heizwendelgeschweißten Nähten führt. Sollte die Verbindung einen Fehler haben, ist es zudem unwahrscheinlich, dass dieser sich auch in der für die

Abstract

Many of the defects that can get into the joint when welding polyethylene pipes in the field, such as airborne dust, grease, dirt, fingerprints or cold welds cannot be detected by simply looking at the completed joint. In order to detect these types of defect, a volumetric inspection technique is required.

This paper describes a new phased array ultrasonic inspection system and associated procedures that have been developed specifically for the on-site inspection of butt fusion and electrofusion joints in polyethylene pipes. Also described are a number of case studies where this system has been used, both in the field and in a factory environment, and the current work to develop international standards on the volumetric inspection of polyethylene pipe joints.

ing (NDT) method for the welded joints.

The current practice for assuring the quality of butt fusion (BF) and electrofusion (EF) joints in PE pipes during installation is by recording the welding parameters used, together with a visual inspection of the welded joint and a short-term hydrostatic pressure test, supplemented by the destructive testing of joints on a sample basis using a short-term test on specimens cut from the joint. However, visual inspection can only examine the external surface of the pipe joint; it cannot provide evidence of embedded flaws or cold welds. Also, previous work at TWI [1,2] has suggested that the hydrostatic pressure test will only cause BF and EF joints to fail if they contain gross defects. In addition, if a defect exists in a welded joint there is only a small chance that it will be included in a specimen that has been cut for mechanical testing. Finally, mechanically testing a joint and then replacing it with one of unknown quality does not ensure the integrity of the pipeline. Volumetric NDT can provide a complete analysis of the whole joint and does not

1. Introduction

Polyethylene (PE) pipes offer significant advantages over other materials such as cast iron, steel, copper and concrete for the transportation of fluids. They do not corrode and have a longer predicted service life leading to less frequent replacement, they are less expensive to install due to their light weight and flexibility, and they have significantly lower leakage rates due to having an all-welded system. However, their use in safety critical environments, such as cooling water intake pipework in nuclear power stations, is being restricted by the lack of a proven, reliable non-destructive test-

mechanische Prüfung herausgetrennten Probe befindet. Zu guter Letzt gewährleistet die Prüfung einer Verbindung nicht die Intaktheit der gesamten Rohrleitung wenn sie letztendlich durch eine mit unbekannter Güte ersetzt wird.

Die volumetrische ZfP kann eine vollständige Untersuchung der gesamten Schweißnaht liefern und zerstört dabei nicht die völlig intakten Schweißnähte. Zudem ist es die einzige Methode, die die Möglichkeit bietet, die Intaktheit aller Schweißnähte in einem PE Leitungssystem sicherzustellen. Jedoch muss noch nachgewiesen werden, dass durch die ZfP alle möglichen Arten von Fehlern nachgewiesen werden können, die die Intaktheit der Rohrleitung reduziert.

2. Mögliche Fehler in stumpfschweißten und heizwendelgeschweißten Nähten in PE-Rohren

Da PE-Rohre üblicherweise vor Ort verlegt werden, ist die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlern in den Verbindungen relativ hoch. Die möglichen Fehler werden folgend aufgelistet:

- Fehlausrichtung der Verbindungsstelle: eine axiale Fehlstellung der Rohre beim Stumpfschweißen kann durch falsche Klemmung in der Schweißvorrichtung oder durch eine Ovalität der Rohre verursacht werden. Eine Fehlstellung beim Heizwendelschweißen kann dadurch entstehen, dass die Rohre während des Schweißvorgangs nicht eingeklemmt waren. Glücklicherweise können beide Mängel durch die optische Begutachtung der Schweißnaht erkannt werden.
- Mangelhafte Vorbereitung der Rohre: beim Stumpfschweißen kann falsches Abhobeln zu einer Stufe im Rohrende führen, welche eine mangelhafte Schweißnaht verursachen kann. Auch dies kann durch eine optische Prüfung erkannt werden. Wenn beim Heizwendelschweißen die Oberfläche der Rohre nicht abgeschabt worden ist, bevor es in die Muffe geschoben wird, sollte dies bei der optischen Prüfung auffallen. Wenn jedoch das Abschaben mangelhaft erfolgte und nicht abgeschabte Bereiche übrig bleiben wird dies bei Prüfung der Verbindung wahrscheinlich nicht auffallen.
- Unterschiedliche Fehler auf der Oberfläche: diese Fehler können beim

Stumpf- und beim Heizwendelschweißen auftreten. Sie können durch Fingerabdrücke verursacht werden, die beispielsweise durch das versehentliche Berühren der Rohrenden beim Entfernen der Späne nach dem Trimmen beim Stumpfschweißprozess oder beim Berühren des abgehobelten Rohrs beim Heizwendelschweißprozess entstehen können. Auch Schweiß- oder Regentropfen auf der Schweißoberfläche, wenn der Schweißvorgang nicht wassergeschützt sein sollte, führen zu solchen Fehlern. Diese Fehler können nicht durch optische Prüfung erkannt werden.

- Partikel: in trockenen, windigen Umgebungen wird Staub aus der Luft oder feiner Sand von der PE-Rohroberfläche angezogen. Beim Stumpfschweißen können diese Partikel während des Schweißvorgangs auf die geschmolzene Fläche oder auf die Heizplatte gelangen. Beim Heizwendelschweißen kann Schmutz auf die abgehobelte Fläche gelangen, bevor das Rohr in die Muffe gelegt wurde. Dies passiert bevorzugt in schlammigen Gräben. Auch diese Fehler können nicht durch optische Prüfung erkannt werden.
- Zu kleine Schweißzone: beim Heizwendelschweißen können sich, wenn die Rohre nicht geklemmt wurden, die Rohrenden voneinander weg bewegen, was durch axiale Kräfte während des Schweißvorganges verursacht wird. Dies bedeutet, dass die Rohre sich nicht vollständig in der Muffe befinden. Dieser Fehler kann nur durch optische Prüfung entdeckt werden, wenn die Position der Muffe auf den Rohren markiert wurde.
- Kalte Schweißstellen: Diese entstehen durch unvollständige oder nur teilweise Verschmelzung, verursacht durch unzureichendes Eindringen der Molekülketten und durch Cokristallisation an der Grenzfläche. Dies führt zu einem Sprödbruchverhalten beim Unterziehen einer Festigkeitsprüfung. Kalte Schweißstellen können beim Stumpfschweißen auftreten, wenn der Schweißprozess bei kalten und windigen Bedingungen ohne passende Schutzvorrichtung durchgeführt wird und beim Heizwendelschweißen wenn eine große Lücke zwischen Rohr und Muffe durch beispielsweise Ova-

destroy perfectly good joints. It is therefore the only method that has the potential to ensure the integrity of the installed joints in a PE pipeline. However, in order to do this, the NDT technique must be proven to detect all possible types of flaws that reduce the integrity of the joint.

2. Potential flaws in butt fusion and electrofusion joints in PE pipes

Since PE pipes are normally installed in the field there is a significant potential for flaws to occur in the welded joints. The potential flaws that may occur are listed below.

- Joint misalignment: axial misalignment of the pipes in a BF weld can be caused by incorrect clamping in the welding machine or pipe ovality. Angular misalignment in EF welds can result if the pipes are not clamped during the welding process. Fortunately, both of these imperfections can be detected by visual examination of the welded joint.
- Poor pipe preparation: in BF welds, incorrect planing could result in a step at the pipe end, which would generate an irregular weld bead. This again can be detected by visual examination. In EF welds, if the pipe surface has not been scraped before inserting the pipe into the fitting then this should be detected by visual examination. However, if the scraping has been carried out poorly, leaving unscraped areas then this would not be detected by visual examination of the completed joint.
- Discrete planar flaws: these types of flaws can exist in both BF and EF joints. They can be caused by fingerprints, i.e. touching the pipe ends accidentally while removing swarf after the end of the trimming stage during the BF process or touching the scraped pipe surface during the EF process; perspiration falling on the surfaces to be welded; or rain droplets, if the welding operation is not protected from the weather. These types of flaw cannot be detected by visual examination.
- Particulates: in dry, windy environments airborne dust or fine sand is attracted to the surface of PE pipes. In BF welding, this can get on to the molten pipe ends during the heater

plate removal stage and can also get on to the heater plate itself. In EF welding, dirt can get on to the scraped pipe surface before the pipe is inserted into the fitting, especially in wet and muddy trenches. Again, these types of flaw cannot be detected by visual examination.

- Pipe under-penetration: in EF joints, if the pipes are not clamped during the welding operation they can move due to axial loads, which means that they are not fully inserted into the fitting. This type of flaw can only be detected by visual examination if the end of the EF fitting is marked on the pipes before welding.
- Cold welds: these are due to incomplete or partial fusion caused by inadequate molecular chain penetration and co-crystallization at the interface, resulting in a brittle failure mode when subjected to a short-term mechanical test. Cold welds can occur in BF joints if the welding operation is carried out in cold, windy conditions without adequate protection of the welding operation and can occur in EF joints if there is an excessive gap between the pipe and fitting due to, for example, pipe ovality, or if the heating cycle is terminated prematurely.

3. Development of phased array ultrasonic testing techniques for PE pipes

The BF and EF joint types require very different inspection techniques. The techniques used for both types of joints are shown in Figure 1.

The inspection technique for EF joints is a 0-degree linear scan, focusing on the fusion zone between the fitting and the pipe; see Figure 1(a). The most critical factors for the inspection of EF joints are the coverage and the resolution. The fusion zone is normally located below the heating wire and sufficient resolution for inspection between the turns of wire is required. Generally, the resolution increases with increasing frequency. However, PE is a highly attenuating material and attenuation increases approximately with a power factor with frequency [3]. Therefore, the frequency needs to be low for larger, thicker fittings to achieve sufficient propagation distance of the sound. Fortunately, in larger EF fittings, the wire diameter and

lität besteht, oder wenn der Heizzyklus vorzeitig beendet wird.

3. Entwicklung von Phased-Array-Ultraschalluntersuchungsverfahren für PE-Rohre

Die Stumpf- und die Heizwendelschweißnahtarten erfordern sehr unterschiedliche Untersuchungsmethoden. Die Verfahren, die für beide Schweißnahtarten verwendet wurden, sind in Bild 1 zu sehen.

Die Untersuchungsverfahren für Heizwendelschweißverbindungen bestehen aus einem 0°-linear-Scan mit Bündelung auf die Verbindungszone zwischen Muffe und Rohr, (Bild 1a). Die entscheidenden Einflussfaktoren sind der Erfassungsbereich und die Auflösung. Die Verbindungszone liegt normalerweise unter dem Heizdraht. Für eine Untersuchung zwischen den Drahtwindungen wird eine ausreichend hohe Auflösung benötigt. Allgemein steigt die Auflösung mit steigender Frequenz. Jedoch ist PE ein sehr stark dämpfendes Material und die Dämpfung steigt ungefähr mit einem Leistungsfaktor zur Frequenz [3]. Deshalb muss die Frequenz bei größeren, dickeren Muffen niedrig sein, damit sich die Schallwellen ausreichend weit ausbreiten können. Glücklicherweise sind der Drahtdurchmesser und der Drahtabstand bei größeren Heizwendelschweißmuffen ebenfalls größer, sodass die Auflösung immer noch ausreichend ist. Um die Verbindungszone von kleineren Rohren zu untersuchen, werden Sonden mit einer höheren Frequenz benötigt, da dort Drahtdurchmesser und Drahtabstand wesentlich kleiner sind.

Für die Untersuchung von Stumpfschweißverbindungen werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet, Sektor-Impuls-Echo und Kriechwellen, Bild 1b. Die Methoden ergänzen sich hinsichtlich des Erfassungsbereichs. Die Sektor-

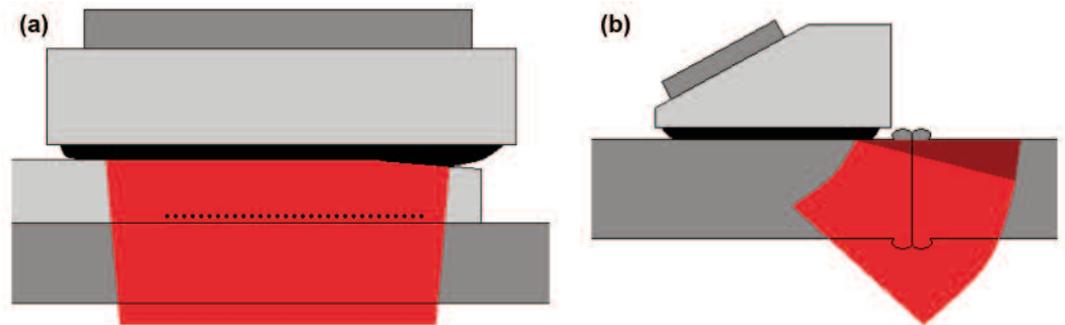


Bild 1: (a) Linear Scan für Heizwendelschweißverbindungen; (b) Sektor (hell) Kriechwellen (dunkel) Scans für Stumpfschweißverbindungen

Figure 1: (a) Linear scan for EF joints; (b) Sector (light) and creeping wave (dark) scans for BF joints

Impuls-Echo-Methode verwendet alle Elemente in der Sondenordnung, um eine Öffnung zu erzeugen. Das Schallbündel wird um einen gewissen Winkel geschwenkt, um einen Großteil der Schmelzzone abzudecken, mit Ausnahme weniger Millimeter hin zur Außenseite. Das Kriechwellenverfahren wurde entwickelt, um den Bereich bis zur Außenseite abzudecken, welcher vom Sektor-Impuls-Echo-Verfahren nicht abgedeckt wird. Für die Kriechwellenverfahren wird ein Sektor-Scanner mit großen Winkeln verwendet, welcher Druckwellen erzeugt, die sich sofort unter die zu untersuchende Oberfläche ausbreiten, um Fehler auf der Oberfläche und Fehler in Oberflächennähe (beispielsweise innerhalb weniger mm unterhalb der Außenseite) zu erkennen.

4. Entwicklung des Prüfsystems

Ein Phased-Array-Ultraschallprüfsystem besteht aus einer Vielzahl von Komponenten:

- einer Phased-Array-Sonde, die den Ultraschall erzeugt und die von jeder Fehlstelle reflektierten Schallwellen auffängt,
- einem Winkelprüfkopf, der den Ultraschall im richtigen Winkel und mit

the wire spacing are also normally larger so the resolution is still sufficient. For smaller pipes both the wire diameter and spacing get smaller, and a probe with a higher frequency is required to be able to inspect the fusion zone.

For the inspection of BF joints two different techniques are used; sector pulse-echo and creeping wave; see Figure 1b. The techniques are complementary in terms of coverage. The sector pulse-echo technique uses all the elements in the probe array to create an aperture, sweeping the beam over a range of angles to cover most of the fusion zone, except for a few millimetres close to the outer surface. The creeping wave technique is designed to cover the region close to the outer surface, which is the part of the weld not covered by the sector pulse-echo technique. The configuration for the creeping wave technique uses a high angle sector scan, producing compression waves propagating immediately under the inspection surface, to detect surface-breaking and near-surface defects (i.e. within a few millimetres of the outer surface).

4. Development of the inspection system

A phased array ultrasonic inspection system consists of a number of components:

- A phased array probe, which produces the ultrasonic signal and detects the reflected signals from any flaw in the joint.
- A probe wedge, which ensures that the ultrasound is transmitted from the probe into the PE pipe or fitting at the correct angle and with the minimal loss of energy.
- A probe holder, which ensures good contact between the probe wedge and the PE pipe/fitting around the whole circumference of the joint.
- A scanner, which carries the probe assembly around the pipe joint without any movement in the axial direction and records its circumferential position.
- A flaw detector, which sends electrical signals to the probe elements and analyses the returning signals.

4.1 Phased array probes

As mentioned previously, PE is a highly attenuating material for ultrasound and therefore the probes have to be designed specifically for this material. It was found that, in order to inspect BF and EF joints of diameters between 90 mm and 800 mm, a minimum of four different probes are required (Table 1).

4.2 Probe wedges

To perform the inspection on plastic pipes, novel membrane water wedges have been designed and manufactured. The advantages of using a water wedge are low attenuation and a velocity ratio enabling the steering of angled beams.

Tabelle 1: Eigenschaften der Sonden
Table 1: Properties of the probes

Verbindung Joint Type	Größe des Rohrs Pipe size	Frequenz der Sonde, MHz Probe frequency, MHz	Anzahl der Elemente No. of probe elements
Stumpfgeschweißt butt fusion joint	klein small	4	32
	groß large	2	64
Heizwendelgeschweißt electrofusion joint	klein small	5	128
	groß large	3.5	128

minimalem Energieverlust in das PE-Rohr oder in die Muffe leitet,

- einer Sonden-Halterung, die den ordnungsgemäßen Kontakt zwischen dem Winkelprüfkopf und dem PE-Rohr/der Muffe entlang des gesamten Umfangs sicherstellt,
- einem Scanner, der die Baugruppe ohne jegliche Axialbewegung entlang der Verbindung der Rohre führt und die Position entlang des Umfangs speichert,
- einem Prüfgerät, welches elektrische Signale an die Sonderelemente sendet und die zurückkehrenden Signale auswertet.

4.1 Phased-Array-Sonden

Wie schon zuvor erwähnt ist PE ein im Ultraschallbereich hochdämpfendes Material. Deshalb müssen die Sonden speziell für diesen Werkstoff konstruiert werden. Es stellte sich heraus, dass für Stumpf- und Heizwendelgeschweißte Rohre mit Durchmessern zwischen 90 mm und 800 mm mindestens vier verschiedene Sonden benötigt werden (Tabelle 1).

4.2 Winkelprüfkopf

Um die Prüfung auf Kunststoffrohren durchführen zu können, müssen neuartige, wassergefüllte Winkelprüfköpfe mit einer Membran entwickelt und hergestellt werden. Die Vorteile eines wassergefüllten Winkelprüfkopfs sind die geringe Dämpfung und ein Geschwindigkeitsverhältnis, das die Lenkung des Schallbündels entlang eines Winkels ermöglicht. Einige der zusammengebauten Prüfkopf/Vorlaufkeil-Einheiten sind in Bild 2 dargestellt.

Für das Stumpfschweißen wurde der Winkel der Vorlaufkeile optimiert, um die elektronische Steuerung durch die Sonderelemente zu minimieren. Für das Heizwendelschweißen werden 0°-Vorlaufkeile benötigt. Die Membran besteht aus einem flexiblen Material, die sich dem Rohr anpasst und die das Wasser innerhalb des Vorlaufkeils hält.

4.3 Scannersystem und Sondenhalterung

Das Scannersystem, welches speziell für die Prüfung von Schweißnähten von PE-Rohren entwickelt und hergestellt wurde, ist anpassungsfähig und kann an verschiedene Rohrgrößen und Schweißarten angepasst werden. Es umfasst

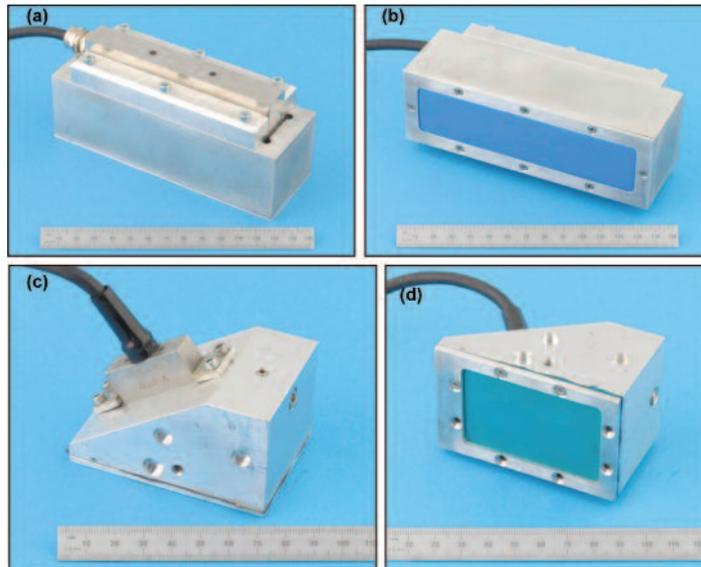


Bild 2: Prüfkopf/Vorlaufkeil Einheiten: (a) und (b) 5-MHz-Sonde in einem 0°-Vorlaufkeil mit Wasser und Membran, für die Prüfung von Heizwendelschweißverbindungen mit kleinen Durchmessern (c) und (d) 4-MHz-Sonde in einem Vorlaufkeil mit Winkel, für die Prüfung von Stumpfschweißverbindungen mit kleinen Durchmessern

Figure 2: Probe/wedge assemblies: (a) and (b) 5 MHz probe in a 0° membrane water wedge, used for the inspection of small diameter EF joints; (c) and (d) 4 MHz probe in an angled water wedge, used for the inspection of small diameter BF joints

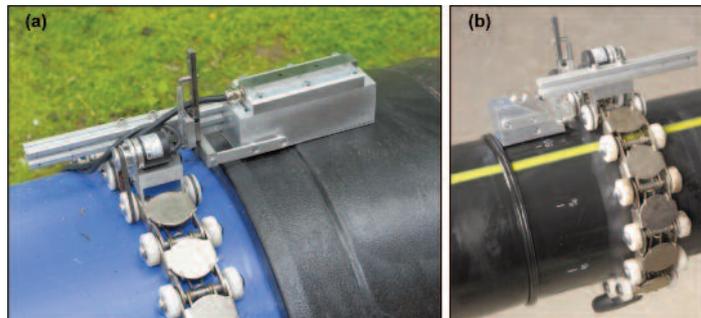


Bild 3: Das Scansystem: (a) für Heizwendelschweißverbindungen (b) für Stumpfschweißverbindungen

Figure 3: The scanning system : (a) for EF joints ; (b) for BF joints

eine Hauptplatte, die durch Glieder um das Rohr in Position gehalten wird und einen Verstellmechanismus (Bild 3). Die Hauptplatte umfasst den Inkrementalgeber, der die Winkeländerung um die Verbindungsstelle herum erfasst und außerdem stützt sie die Probenhalterung. Die Prüfkopf/Vorlaufkeil-Einheiten verwenden dieselbe Probenhalterung für beide Verbindungsarten, bei Rohrdurchmessern über 90 mm.

4.4 Prüfgerät

Für die Phased-Array-Ultraschallprüfung werden Prüfgeräte verwendet, welche Hardware und Software beinhalten, um die Prüfungen durchzuführen. Für

Some of the probe/wedge assemblies are shown in Figure 2.

For the BF welds, the angle of the wedges was optimised to minimize the electronic steering by the probe elements. For the EF welds, 0° wedges are required. The membrane is a flexible material adapting to the pipe and fitting surfaces, and contains the water in the wedge.

4.3 Scanning system and probe holders

The scanning system, specifically designed and manufactured for inspecting PE pipe joints, is flexible and adaptable for the different pipe sizes and joint

types. It comprises a main plate that is held in position around the pipe by several links and an adjustment mechanism (Figure 3). The main plate contains the encoder, which records the circumferential position around the joint, and also the support for the probe holders. The probe/wedge assemblies for the two different joint configurations use the same probe holder, for all pipe diameters above 90 mm.

4.4 Flaw detector

Phased array ultrasonic testing uses array controllers containing hardware and software to conduct the inspections. For on-site deployment, a number of portable systems are available. The basic requirements for a flaw detector suitable for inspecting PE pipe joints is an instrument supporting 128 element phased array transducers, addressing 32 elements at the same time.

5. Assessment of the inspection system

5.1 In the laboratory

For the inspection system to be valuable to the industry, all relevant defects need to be detected. For this reason, the system and associated procedures have been evaluated in the laboratory on over 200 welded PE pipe joints, with diameters between 180 and 710 mm, containing artificial flaws. The reason for using artificial flaws was because, in order to determine the limits of detection of the NDT technique and to determine the critical size or concentration of flaw that reduces the joint integrity, it is necessary to know the exact location, size and quantity of each flaw type.

The artificial flaws used were:

- Aluminium discs, 25 µm thick, to simulate discrete planar flaws. Previous work at TWI has shown that, as far as ultrasonic NDT is concerned, thin metallic discs are good simulations of real lack of fusion in PE pipe joints [4].
- Micronised talc, particle size < 45 µm, to simulate fine particulates.
- Graded silica sand, particle size 150-300 µm, to simulate coarse particulates.

Figures 4 and 5 show ultrasonic images of a 225 mm EF joint containing a 2 mm diameter aluminium disc and where the pipe has not been fully inserted into the coupler (pipe under-penetration),

die Implementierung vor Ort steht eine Vielzahl von tragbaren Geräten zur Verfügung. Damit ein Prüfgerät für die Prüfung von PE-Rohren verwendet werden kann, müssen die Phased-Array-Sensoren 128 Elemente besitzen und 32 Elemente gleichzeitig adressieren können.

5. Beurteilung des Prüfsystems

5.1 Im Labor

Um das Prüfsystem in der Industrie einsetzen zu können, müssen alle relevanten Fehler entdeckt werden. Deshalb wurden das System und die damit verbundenen Abläufe im Labor an über 200 geschweißten PE-Rohrverbindungen, mit Durchmessern zwischen 180 mm und 710 mm mit künstlich erzeugten Fehlern ausgewertet. Mithilfe der künstlich erzeugten Fehler können die Grenzen der ZfP ermittelt werden und die kritische Größe als auch die Konzentration von Fehlern bestimmt werden, die Einfluss auf die Stabilität der Verbindung haben. Es ist notwendig, die genaue Position, die Größe und die Anzahl jedes Fehlertyps zu wissen.

Die künstlich erzeugten Fehler waren:

- Aluminiumplättchen mit 25 µm Dicke, um flache Fehler nachzustellen. Vorherige Arbeiten am TWI haben gezeigt, dass dünne Metallplättchen bei zerstörungsfreier Ultraschallprüfung echte Fehler in PE-Schweißverbindungen gut nachbilden [4].
- Zerkleinerter Talk, Partikelgröße < 45 µm, um feine Schmutzpartikel zu simulieren,
- Quarzsand, Partikelgröße 150 µm bis 300 µm, um grobe Schmutzpartikel zu simulieren.

Bild 4 und 5 zeigen Ultraschallbilder einer 225 mm Heizwendelschweißnaht, die ein 2 mm Aluminiumplättchen enthält und bei der das Rohr nicht vollständig in das Verbindungsstück gelegt wurde (zu geringe Eindringtiefe ins Rohr). Beide Fehlerarten können klar erkannt werden.

In Bild 6 sind eine Standard-450-mm-Heizwendelschweißnaht und eine kalte Verschweißung zu sehen, bei der die Heizzeit um 50% im Vergleich zur Empfehlung des Herstellers reduziert wurde. Es zeigte sich, dass die Linie oberhalb der Heizdrähte die Grenze der Schmelzzone der Heizwendelschweißmuffe bildet [5]. Der Abstand zwischen der Grenze der Schmelzzone und dem

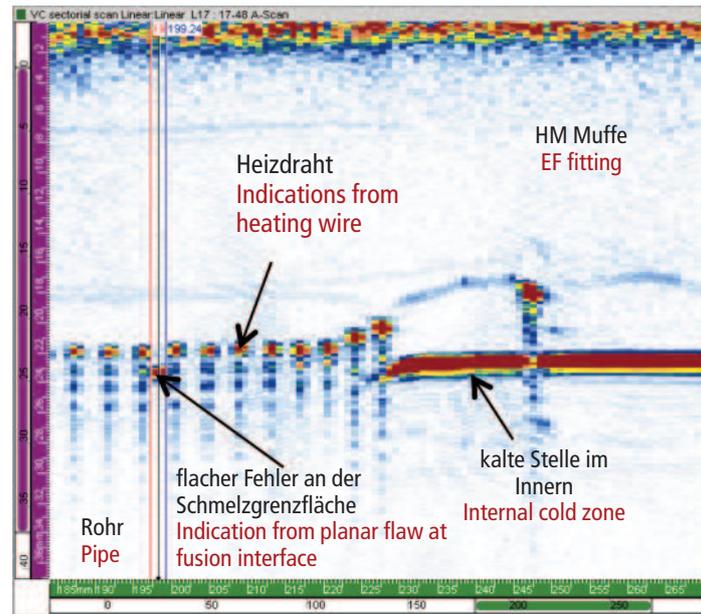


Bild 4: Ultraschallbild einer 225-mm-SDR11-HM-Verbindung, mit einer 2-mm-Aluminiumscheibe an der Grenzfläche der Verschmelzung

Figure 4: Ultraschonic image of a 225 mm SDR11 EF joint containing a 2 mm aluminium disc at the fusion interface

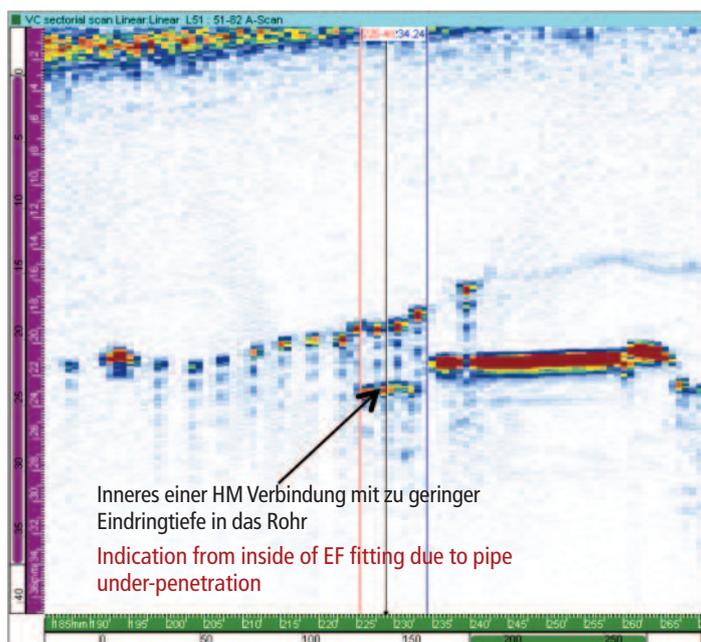


Bild 5: Ultraschallbild einer 225-mm-SDR11-Heizwendelschweißverbindung mit zu geringer Eindringtiefe ins Rohr

Figure 5: Ultraschonic image of a 225 mm SDR11 EF joint with pipe under-penetration

Heizdraht kann wiederum verwendet werden, um kalte Schweißnähte zu identifizieren [5–7].

Bild 7 zeigt ein Ultraschallbild einer 225-mm-Heizwendelschweißnaht mit Verschmutzungen durch Sand. Bild 8 zeigt ein Sektor-Impuls-Echo-Bild einer 355-mm-Stumpfschweißnaht mit einem 4 mm großen, flachen Fehler an der Grenzfläche. Auch diese beiden

respektive. Both types of flaw can clearly be detected.

Figure 6 shows images from a standard 450 mm EF joint and a cold weld, where the heating time was reduced to 50% of the manufacturers recommended value. The line indication above the heating wires has been shown to be the boundary of the melt zone in the EF fitting [5]. The distance between the melt

zone boundary indication and the indications from the heating wire can therefore be used to detect cold welds [5–7]. Figure 7 shows an ultrasonic image of a 225mm EF joint containing sand contamination and Figure 8 shows a sector pulse-echo image from a 355mm BF joint containing a 4 mm planar flaw at the fusion interface. Again, both of these flaw types can be detected.

The results of the trials in the laboratory showed that the inspection system could detect the following defects consistently, in both BF and EF joints:

- Planar flaws, lack of fusion and voids, down to 1mm diameter.
- Fine and coarse particulates.
- Cold welds.

■ Pipe under-penetration in EF joints. The impact of these defects on both the short and long-term performance of the joint was also assessed using mechanical testing, in order to develop flaw acceptance criteria.

5.2 In the factory

PE pipework that was to be installed in a UK power station was inspected in the factory in Rotherham, UK before being delivered. The pipes had diameters between 450 and 630 mm and wall thicknesses between 36 and 60 mm. In total, 88 butt fusion welded joints were inspected (Figure 9).

Figure 10a shows a sector scan image at one location around one of the pipes where there was an indication in the joint. The circumferential position of the indication was marked on the pipe and the joint was subsequently cut out and the section containing the weld was trimmed in a butt fusion machine. The shavings were then analysed for any imperfections at the location of the indication. Figure 10b shows a photograph of the shaving at the location of the indication, revealing a flaw in the joint.

5.3 In the field

Inspections have been carried out in the field in the UK and overseas. Figure 11a shows the equipment being used to inspect a 710 mm EF joint in North Wales, for a pipeline being installed for a hydroelectric power station and Figure 11b shows an inspection being carried out on a 250 mm EF joint in a gas pipeline in Sheffield, UK.

Bild 6: Ultraschallbilder (a) einer Standard 450-mm-SDR17-Heizwendelschweißverbindung; (b) einer 450-mm-SDR17-Heizwendelschweißverbindung, bei der die Hitze um 50% reduziert wurde, was zu einer kalten Schweißstelle führte

Figure 6: Ultrasonic images of: (a) a standard 450 mm SDR17 EF joint (b) a 450 mm SDR17 EF joint where the heating time was reduced by 50%, resulting in a cold weld

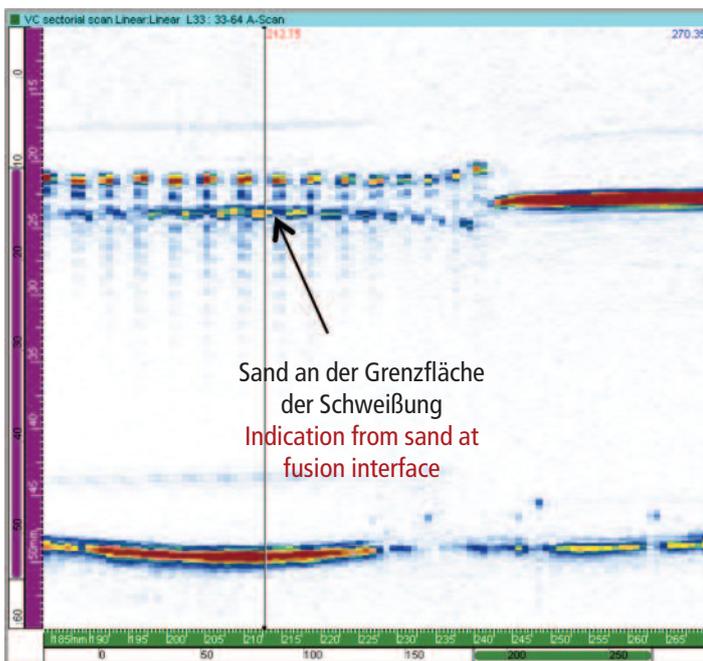
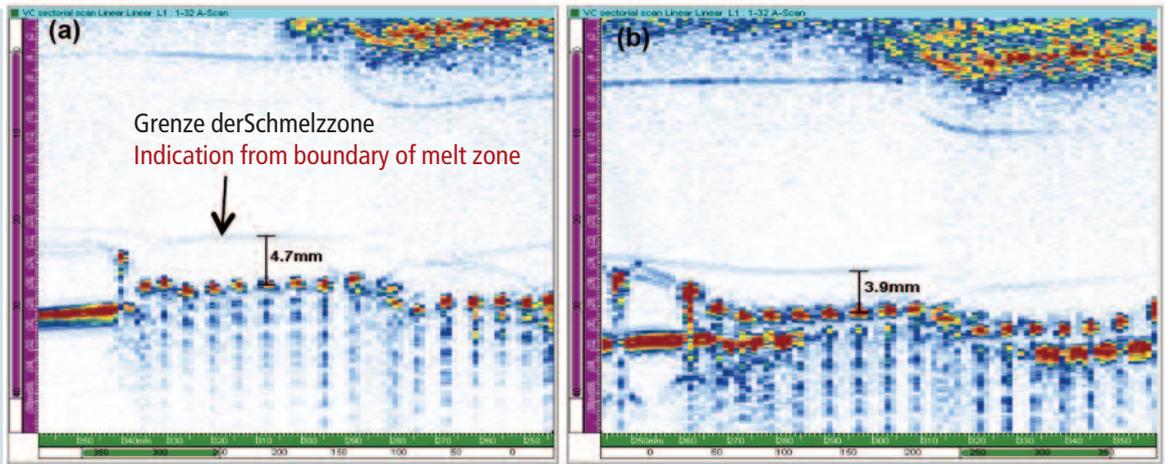


Bild 7: Ultraschallbild einer 225-mm-SDR11-Heizwendelschweißverbindung, die Quarzsand enthält

Figure 7: Ultrasonic image of a 225 mm SDR11 EF joint containing graded silica sand

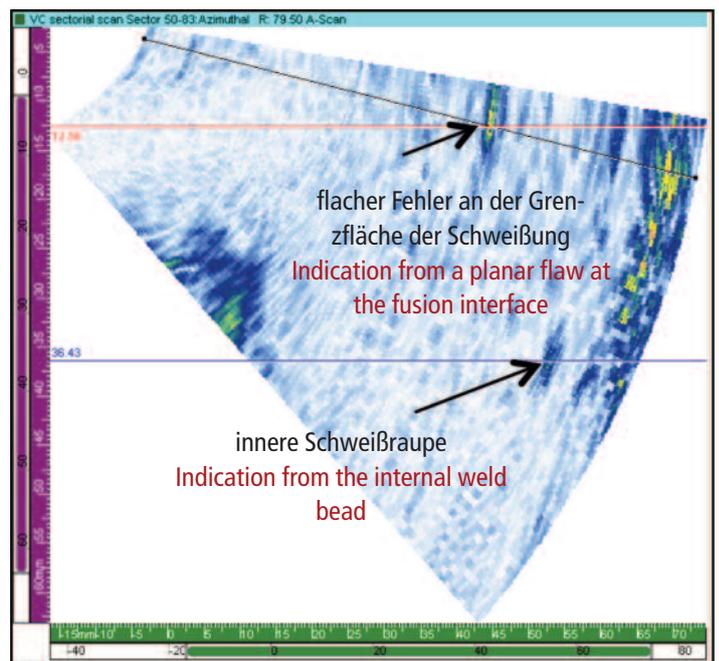


Bild 8: Ultraschallbild einer 355-mm-SDR11-Stumpfschweißverbindung, die einen 4 mm großen, flachen Fehler an der Grenzfläche der Schweißung enthält

Figure 8: Ultrasonic image of a 355 mm SDR11 BF joint containing a 4 mm planar flaw at the fusion interface

Fehlerarten können erkannt werden. Die Ergebnisse des Testlaufs im Labor haben gezeigt, dass das Prüfsystem folgende Fehler beim Stumpf- und Heizwendelschweißen zuverlässig erkennt:

- flache Fehler, fehlerhafte Verschmelzung und Poren bis zu 1 mm Durchmesser,
- feine und grobe Schmutzpartikel
- kalte Schweißstellen,
- zu geringe Eindringtiefe beim Heizwendelschweißen.

Die Auswirkungen dieser Fehler auf das kurzzeitige und das langfristige Verhalten der Verbindung wurden ebenfalls durch mechanische Prüfung beurteilt, auch um Kriterien für Fehlertoleranzen entwickeln zu können.

5.2 Im Werk
 PE-Rohrleitungen, welche in einem Kraftwerk im Vereinigten Königreich installiert werden sollten, wurden im Werk in Rotherham geprüft bevor sie ausgeliefert wurden. Die Rohre hatten einen Durchmesser zwischen 450 mm und 630 mm und eine Wanddicke zwischen 36 mm und 60 mm. Insgesamt wurden 88 stumpfgeschweißte Verbindungen geprüft (Bild 9). Bild 10a zeigt ein Sektor-Scan-Bild an einer Stelle an einem Rohre, bei dem es einen Hinweis für einen Fehler in der Verbindung gab. Die Position des möglichen Fehlers am Umfang wurde auf dem Rohr markiert und die Verbindung wurde anschließend herausgetrennt und

Figure 12 shows the locations of some of the 30 BF and EF joints that were inspected in Milan city centre. The pipe diameters ranged from 90 to 315 mm. After completion of the inspections, some of the joints were cut out and sectioned based on the inspection reports. Figure 13 shows a typical correlation between the section and the ultrasonic image.

6. Standards Development
 The work carried out by TWI on the development of phased array ultrasonic inspection techniques for PE pipes is being used as input into two new ISO Technical Reports being developed in the Working Group ISO/TC138/

SC5/WG17 (Plastics Pipes, Fittings and Valves – Alternative Test Methods). The draft Technical Report ISO/DTR 16943 (Inspection of electrofusion socket joints using the phased array ultrasonic testing method) was approved in November 2014 and should be published this year, and the draft Technical Report on the inspection of butt fusion joints using the phased array ultrasonic testing method is currently being reviewed by the Working Group. In addition, TWI is providing input into the ASME BPV Code Section III Mandatory Appendix XXVI (Rules for construction of Class 3 buried polyethylene piping) on the NDT of PE pipe joints.



Bild 9: Prüfung einer 630-mm-stoßgeschweißten-Verbindung von PE-Rohren im Werk

Figure 9: Inspection of 630 mm butt fusion joints in PE pipes in the factory

Bild 10: (a) Sektor-Scan Bild einer der Stumpfschweißungen mit Hinweis auf einen Fehler in der Verbindung, (b) Foto eines Querschnitts durch die Verbindung an der durch den Ultraschall entdeckten Stelle

Figure 10: (a) Sector scan image of one of the BF welds indicating a defect in the joint; (b) photograph of a section through the joint at the location of the ultrasonic indication

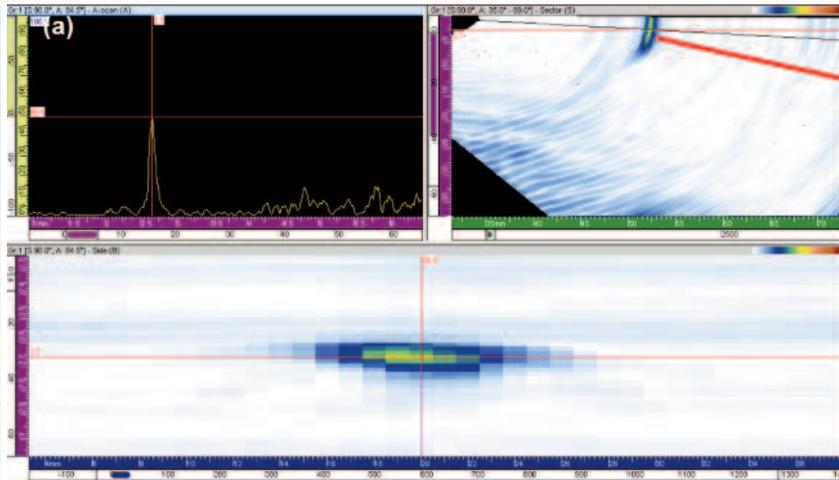


Bild 11: Vor-Ort-Prüfungen in: (a) Nord Wales und (b) Sheffield, UK

Figure 11: Field inspections in: (a) North Wales and (b) Sheffield, UK

in der Stoßschweißmaschine abgeholt. Die Späne wurden dann auf alle möglichen Fehler an der auffälligen Stelle untersucht. Bild 10b zeigt ein Foto des Spans der auffälligen Stelle, jetzt ist der Fehler in der Verbindung zu erkennen.

5.3 Vor Ort

Es wurden Vor-Ort-Prüfungen im Vereinigten Königreich und in Übersee durchgeführt. Bild 11a zeigt die Ausrüstung zur Prüfung einer 710-mm-Heizwendelschweißverbindung im Norden von Wales für eine Rohrleitung eines Wasserkraftwerks und Bild 11b zeigt eine Prüfung an einer 250-mm-Heizwendel-

Literatur References

- [1] C.I. Brown and M.J. Troughton: Qualifying long-term performance of butt fusion welds in PE pipes from short-term tests, *Plastics Pipes XII Conference*, Milan, Italy, 19-22 April 2004.
- [2] M.J. Troughton, C.I. Brown, J Hessel and M Piovano: Comparison of long-term and short-term tests for electrofusion joints in PE pipes, *Plastics Pipes XIII Conference*, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
- [3] L. Mazeika, R. Sliteris and A. Vladisaukas: Measurement of velocity and attenuation for ultrasonic longitudinal waves in the polyethylene samples, *Ultragarsas*, Vol. 65(4), 2010.
- [4] I.J. Munns and G.A. Georgiou: Ultrasonic and radiographic NDT of butt fusion welded polyethylene pipes, *Insight*, 41(5), 1999.
- [5] C. Bird, D. Caravaca and A. Raude: The inspection of cold welds in electrofusion joints. *Plastics Pipes XIII conference*, Washington DC, USA, 2-5 October 2006.
- [6] M. Troughton, M. Spicer and F. Hagglund: Development of ultrasonic phased array inspection of Polyethylene pipe joints, *ASME 2012, Pressure Vessels and Piping Conference*, Toronto, Canada, 15-19 July 2012.
- [7] J. Shi, J. Zheng, W. Guo and C. Xu: Safety assessment of cold welding defect in electro-fusion joint of polyethylene pipe, *ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, PVP2012-78655, 2012.



Bild 12: Rohrleitungen, die an zwei unterschiedlichen Ausgrabungsstellen in Mailand geprüft wurden

Figure 12: Pipelines that were inspected at two different excavations in Milan city centre

schweißverbindung einer Gaspipeline in Sheffield, UK.

Bild 12 zeigt einige von 30 Stellen in Mailand wo Stumpf- und Heizwendelschweißverbindungen geprüft wurden. Die Durchmesser der Rohre betragen zwischen 90 mm und 315 mm. Nach der Prüfung wurden einige Verbindungen auf Grundlage von Prüfberichten herausgetrennt und Querschnitte gemacht. Bild 13 zeigt eine typische Übereinstimmung zwischen herausgetrenntem Element und dem Ultraschallbild.

6. Entwickeln von Normen

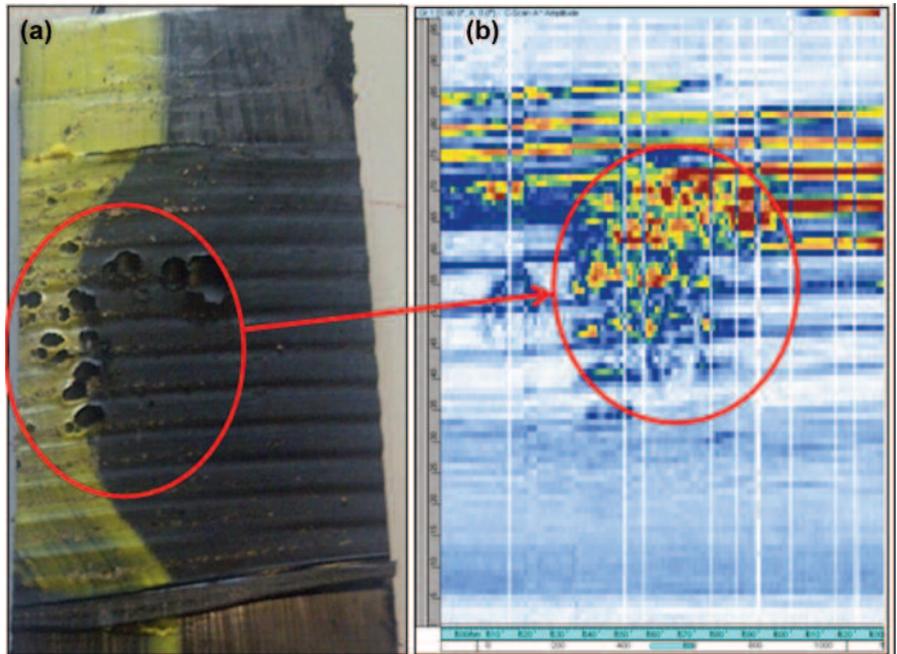
Die Arbeit des TWI über die Entwicklung von Phased-Array-Ultraschallprüfverfahren für PE-Rohre wird als Vorlage für zwei neue ISO-Fachberichte verwendet, welche in der Arbeitsgruppe ISO/TC138/SC5/WG17 (Kunststoffrohre, Muffen und Ventile – Alternative Prüfverfahren) erarbeitet werden. Der Entwurf des Fachberichts ISO/DTR 16943 (Prüfung von heizwendelgeschweißten Verbindungen mit dem Phased-Array-Ultraschallprüfverfahren) wurde im November 2014 verabschiedet und sollte in diesem Jahr veröffentlicht werden. Der Entwurf des Fachberichts über die Prüfung stumpfgeschweißter Verbindungen mit dem Phased-Array-Ultraschallprüfverfahren wird derzeit von der Arbeitsgruppe überprüft. Darüber hinaus leistet das TWI einen Beitrag für die „ASME BPV Code Section III Mandatory Appendix XXVI“ (Regeln für den Bau von unterirdischen Klasse-3-Polyethylen-Rohren) für die ZfP von PE-Rohrverbindungen.

7. Zusammenfassung

Es wurde ein Phased-Array-Ultraschallprüfsystem zur ZfP für sowohl Heizwendelgeschweißte als auch Stumpfge-

Bild 13: (a) Foto einer gebrochenen Verbindung einer 315-mm-Heizwendelschweißung; (b) CScan Bild derselben Stelle vor dem Trennen (a)

Figure 13: (a) Photograph of the fractured interface of a 315 mm EF joint; (b) C-scan image of the same area before sectioning



schweißte Verbindungen von PE-Rohren mit Außendurchmessern von 90 mm bis 800 mm und Wanddicken von 8 mm bis 65 mm in Laborversuchen und in Vor-Ort-Prüfungen entwickelt und ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass:

- sowohl Heizwendel- also auch Stumpfschweißverbindungen erfolgreich vor Ort geprüft werden können, ausgegraben oder in den Gräben.
- eine erste Auswertung einer jeden Verbindung unmittelbar nach der Prüfung erfolgen kann und man somit sofortige Rückmeldung erhält, um Verbindungen auf dieser Grundlage außer Betrieb nehmen zu können.
- eine hervorragende Korrelation zwischen den Prüfergebnissen und den anschließend herausgetrennten Proben besteht.

7. Conclusions

A phased array ultrasonic NDT system for the inspection of both EF and BF joints in PE pipes, with outer diameters ranging between 90 and 800mm, and wall thicknesses between 8 and 65mm, has been developed and evaluated, both in laboratory trials and during on-site inspections. The results of this work have shown that:

- Both EF and BF joints in PE pipes can be successfully inspected on-site in excavations or in trenches.
- Initial analysis of each joint can be given immediately after inspection for immediate feedback and joints can be taken out of service based on this analysis.
- There is excellent correlation between inspection results and the subsequently sectioned samples.