

# Ultraschallprüfung von Rohrlängsschweißnähten mit Phased Arrays

Wolfram A. Karl DEUTSCH \*, Klaus MAXAM \*, Mathias RAZENG \*, Werner ROYE \*  
\* KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal

**Kurzfassung.** Vor der Auslieferung müssen Pipelinerohre und deren Schweißnähte aufwändig mit Ultraschall geprüft werden. Dabei sind Spezifikationen, in denen die Verfahren und die nachzuweisenden Referenzreflektoren (Längsfehler, Querfehler und Dopplungen) definiert sind, zu beachten.

In diesem Vortrag werden folgende Details vorgestellt:

- Nachweis von Querfehlern, Bindefehlern und Dopplungen
- Einsatz von Phased Arrays auf gekrümmten Oberflächen
- Ortskorrigierte Draufsicht (C-Bild) und Seitenansicht (elektronische und mechanische B-Bilder)
- Mehrkanalprüfung und Echtzeitdarstellung der Prüfergebnisse
- Methoden der Systemkalibrierung

## Einführung

Bei der Ultraschallprüfung von Längsnähten an Pipelinerohren sind Längsfehler und Querfehler in der Schweißnaht sowie Dopplungen im Grundmaterial neben der Schweißnaht zu detektieren. In diesem Beitrag wird der Stand der Phased-Array-Techniken vorgestellt, wobei auch auf Kalibrierwerkzeuge und die Möglichkeiten der Mehrkanalprüfung eingegangen wird.

## Referenzreflektoren

Für die Längsfehlerprüfung (LF) werden Nuten als Referenz verwendet – in Schweißnahtmitte und an beiden Seiten der Schweißnaht. Ferner dienen auch Flachböden von seitlich eingebrachten Bohrungen sowie die Mantelfläche von Längsbohrungen als Referenz für Längsfehler. Bei der Querfehlerprüfung (QF) verwendet man innen und außen Nuten quer zur Naht und Durchgangsbohrungen in Schweißnahtmitte und an beiden Seiten der Schweißnaht. Für die Dopplungsprüfung (DF) sind von innen eingebrachte Flachbodenbohrungen definiert.

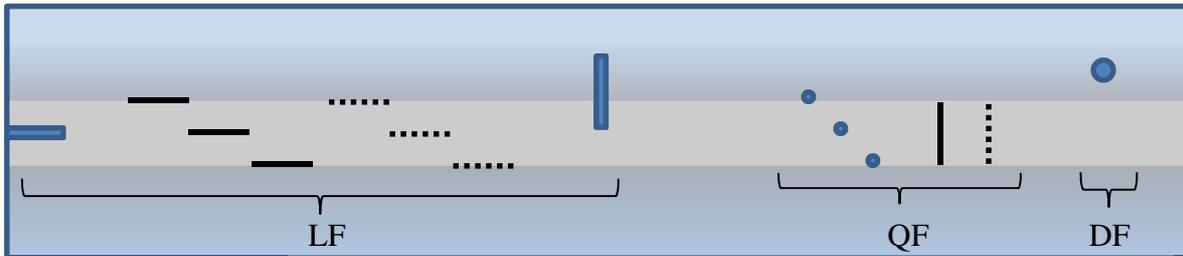


Abb. 1. Testreflektoren für die Rohrlängsnahtprüfung

## Längsfehlerprüfung

Längsfehler können mit Hilfe von Sektorscans nachgewiesen werden. Dabei ist es möglich, die Sektorbilder geometrisch korrekt an der Rohraußenfläche und -innenfläche zu „falten“, siehe Abbildung 2. Der Vorteil besteht darin, dass die Fehlerlage direkt zugeordnet werden kann. Im dargestellten Fall beschreibt die Anzeige einen Fehler an der Außenwand des Rohres.

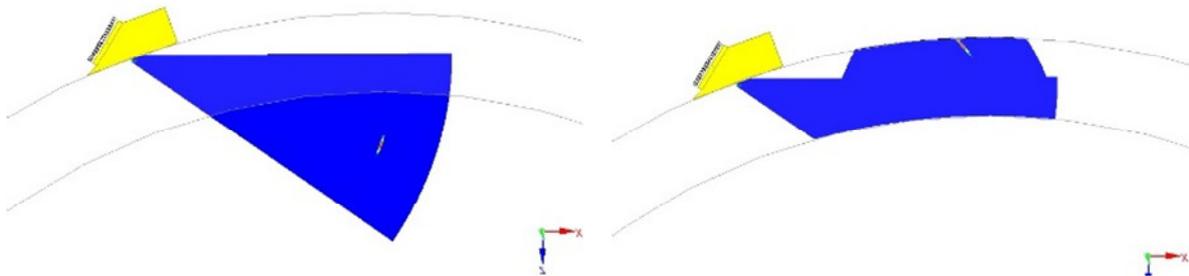


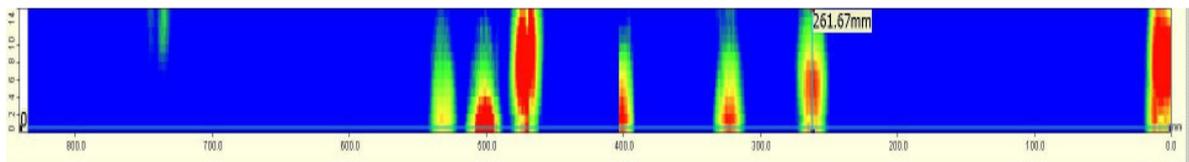
Abb. 2. Sektorbild und gefaltete Darstellung



**Abb. 3.** Längsfehlerprüfung mit Fließwasserankopplung

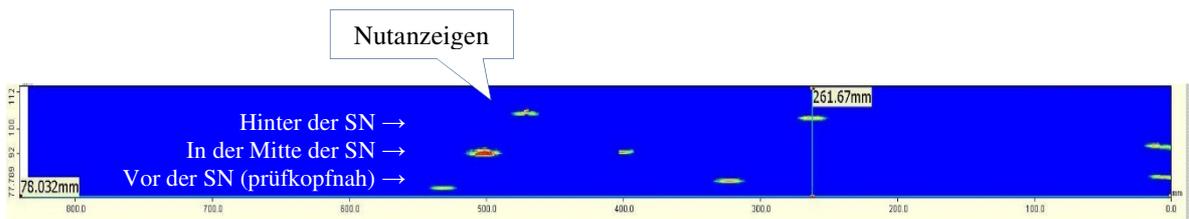
In Abhängigkeit von dem Rohrdurchmesser, der Wanddicke und der Spezifikation werden für die beidseitige Längsfehlerprüfung 2 oder 4 Arrays eingesetzt, mit jeweils 16, 32 oder 64 Elementen. Als Ultraschallfrequenz wird 2 oder 4 MHz gewählt.

Beim Scannen eines kompletten Rohres werden die Prüfdaten als C-Bild aufgezeichnet. In Abbildung 4 ist ein unkorrigiertes C-Bild (Sektorscanwinkel über dem Scanweg mit farbkodierten Echoamplituden) dargestellt.



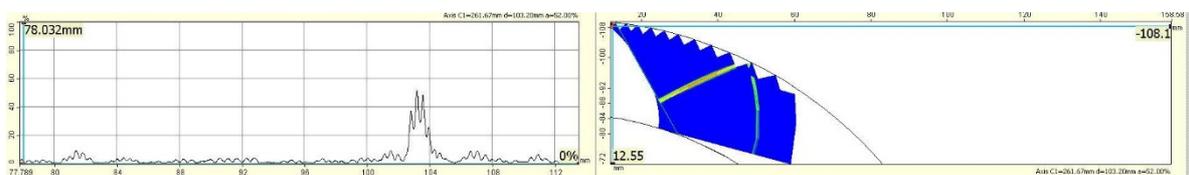
**Abb. 4.** Unkorrigiertes C-Bild (Sektorscanwinkel über Scanweg)

Für die Anzeigenanalyse im Hinblick auf die Reflektorlage ist natürlich das ortskorrigierte C-Bild besser geeignet, siehe Abbildung 5. Es repräsentiert eine reale Draufsicht auf die Schweißnaht. Alle Anzeigen werden lagerichtig wiedergegeben als Projektion quer zur Schweißnaht in mm über dem Scanweg. Diese Darstellung erlaubt nun eine eindeutige Zuordnung der Reflektorlage: prüfkopfnah, in Schweißnahtmitte und hinter der Naht bezogen auf die jeweilige Prüfkopfposition.



**Abb. 5.** Ortskorrigiertes C-Bild (Projektionsabstand über Scanweg = reale Draufsicht auf die Schweißnaht)

Zusätzlich können auch noch für jede Fehleranzeige das B- und A-Bild angezeigt werden. Dem B-Bild kann entnommen werden, dass die markierte Fehleranzeige – siehe vertikalen Cursor im C-Bild – an der Rohraußenfläche liegt. Das A-Bild beinhaltet die Information zur Amplitude.



**Abb. 6.** A- und B-Bild (Schnittbild für vertikale Cursorposition im C-Bild in Abb. 5)

## Querfehlerprüfung

Als Referenzreflektoren für die Querfehlerprüfung dienen quer zur Schweißnaht liegende Nuten innen und außen oder wahlweise Durchgangsbohrungen mit einem Durchmesser von 1,6 oder 3,2 mm. Im Folgenden wird ein Prüfbeispiel zum Nachweis von Durchgangsbohrungen vorgestellt.

Die Prüfung der Schweißnahtmitte kann mit einem Einschwingerprüfkopf erfolgen. Wenn jedoch die gesamte Schweißnahtbreite geprüft werden soll, empfiehlt sich ein Phased-Array-Prüfkopf, mit dem linear über die Schweißnahtbreite gescannt wird. In Längsrichtung der Schweißnaht wird der Array-Prüfkopf mechanisch verschoben.

In Abbildung 7 ist eine Durchgangsbohrung durch die Rohrwand dargestellt. Die untere Kante der Bohrung liefert ein Echo im halben Sprungabstand und die obere Kante ein Echo im ganzen Sprungabstand.

Wird nun der Prüfkopf mechanisch in Längsrichtung verschoben, dann ergibt sich in Abhängigkeit vom Schallbündeldurchmesser eine mehr oder weniger breite Echodynamik-Kurve mit Anzeigen für die obere Kante im ganzen Sprung und für die untere Kante im halben Sprung, siehe Abbildung 8. In dieser Abbildung wird die Amplitude explizit dargestellt. Mit Hilfe eines Schwellwertes kann ein Alarm ausgegeben werden.

Die Anzeigen können auch als B-Bild präsentiert werden, Abbildung 9, wobei die Ordinate die Schall-Laufzeit und die Abszisse den mechanischen Scanweg wiedergibt. Die Echoamplituden sind farbkodiert. Im Gegensatz zur Echodynamik-Kurve kann im B-Bild abgelesen werden, ob eine Anzeige von der Oberfläche, der Innenfläche oder aus dem Schweißnahtvolumen stammt.

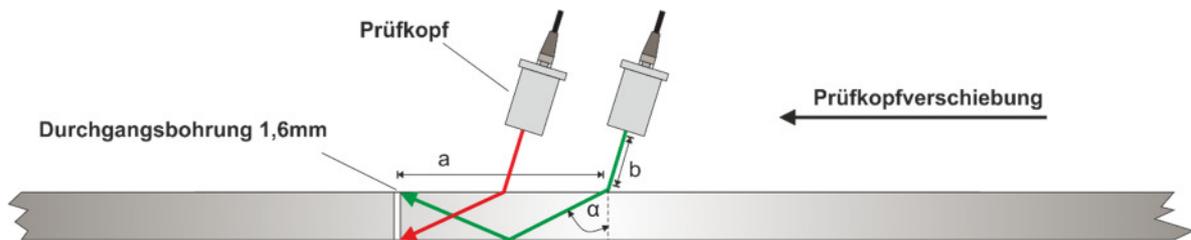


Abb. 7. Prüfanordnung zur Querfehlerprüfung

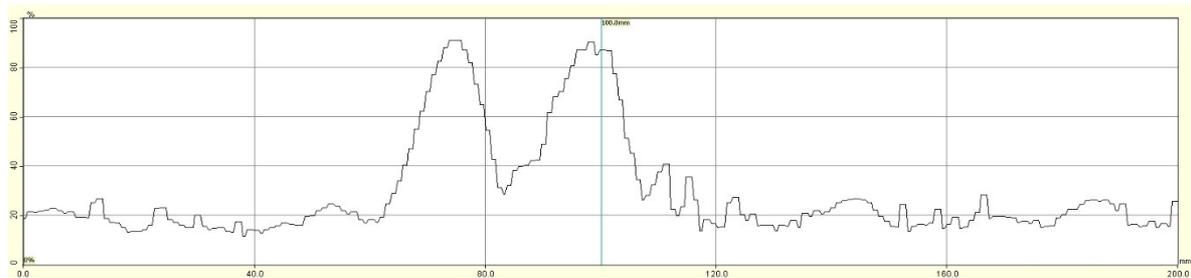


Abb. 8. Echodynamik-Kurve zur Querfehlerprüfung (Echohöhe über Scanweg, hier 200 mm)

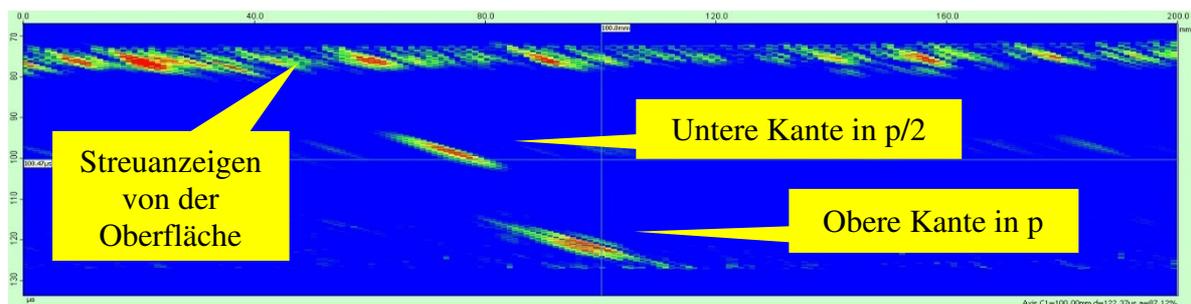


Abb. 9. B-Bild zur Querfehlerprüfung (Schall-Laufzeit über Scanweg, Echohöhe farbkodiert)

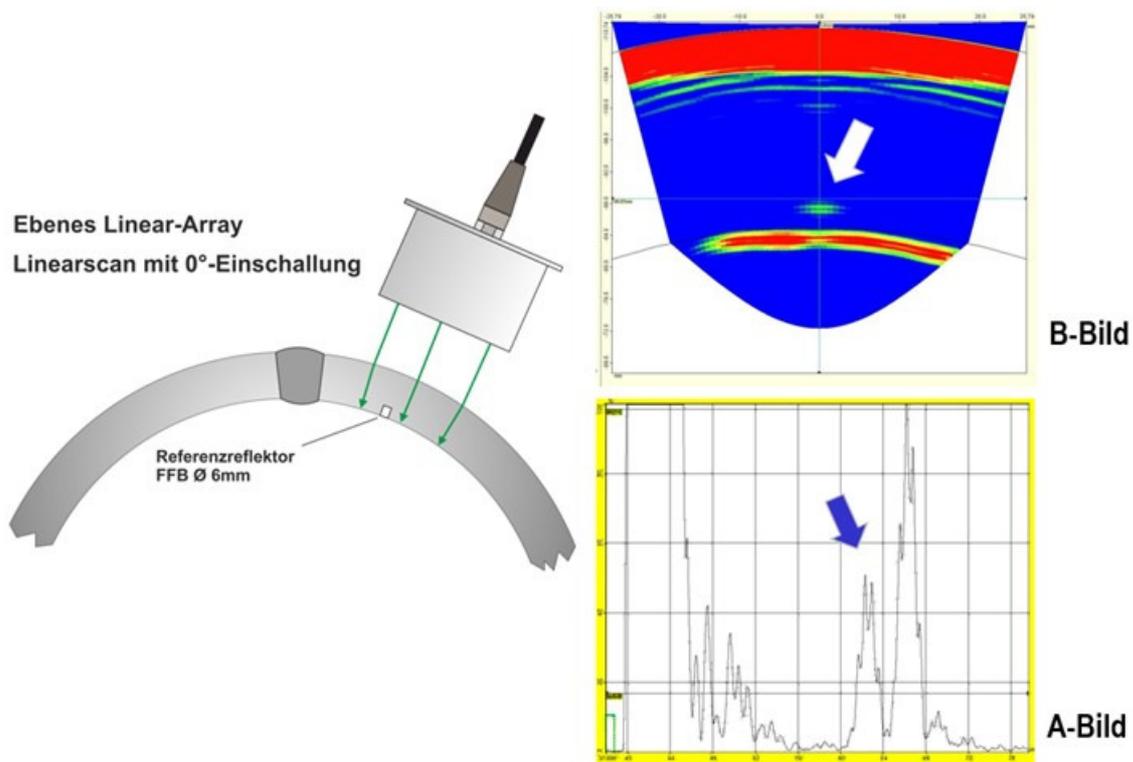
## Dopplungsprüfung

Als Testreflektor für die Prüfung auf Dopplungen im Grundmaterial neben der Schweißnaht dient eine Flachbodenbohrung, die von innen in das Rohr eingebracht wird.

Der flache Boden bzw. Dopplungen als reale Fehler verlaufen parallel zur Oberfläche des Rohres. Daher empfiehlt sich eine Einschallung mit konstantem  $0^\circ$ -Einschallwinkel an der Oberfläche.

Abbildung 10 enthält links die Prüfanordnung. Hier wird ein ebenes Linear-Array mit einem Wasservorlauf eingesetzt. Die „Focal Laws“ werden so berechnet, dass beim Linear-Scan überall mit exakt  $0^\circ$  eingeschallt wird.

Im B-Bild rechts oben sind 3 Anzeigen zu erkennen: Das Echo von der Rohraußenfläche, das Rückwandecho von der Rohrrinnenfläche und das Echo von der Flachbodenbohrung (Pfeil). Im A-Bild rechts unten können die Echohöhe und der Signal-Rausch-Abstand mit Hilfe eines Cursors ausgemessen werden.



**Abb. 10.** Nachweis von Dopplungen – Prüfanordnung und Prüfergebnis

Beim Scan über die gesamte Rohrlänge kann das Ergebnis auch als C-Bild aufgezeichnet werden, ähnlich wie in Abbildung 5 dargestellt.

## Mehrkanalprüfung

Um alle Fehlerarten in allen Positionen in einem Prüfdurchgang zu erfassen, ist eine Prüfung mit mehreren Prüfköpfen erforderlich. Das Phased-Array-System Multi2000 unterstützt die „Multisalven“-Funktion. So wird mit jedem Prüfkopf eine Salve ausgeführt. Dazu kommen weitere Salven für die Koppelkontrolle.

In Abbildung 11 ist die Prüfkopf-anordnung beschrieben und in Abbildung 12 wird ein Beispiel für eine Mehrkanal-Online-Aufzeichnung vorgestellt.

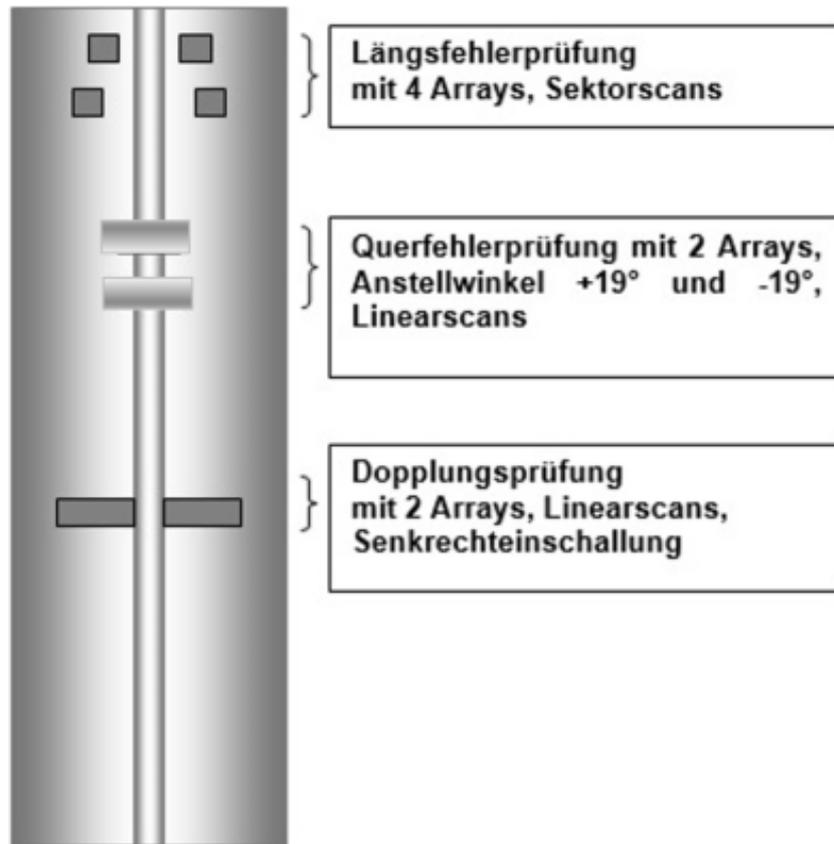


Abb. 11. Mehrkanal-Prüfkopf-anordnung

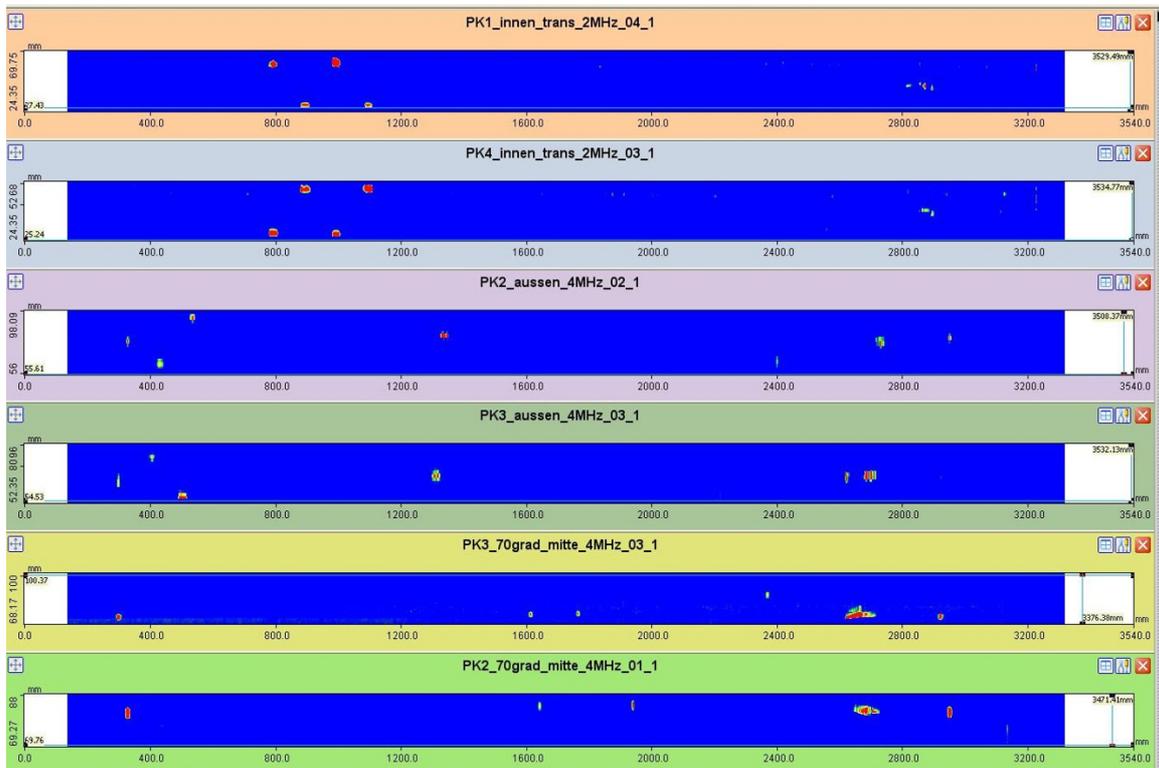


Abb. 12. Beispiel für eine Online-Multisalven-Prüfergebnisdarstellung

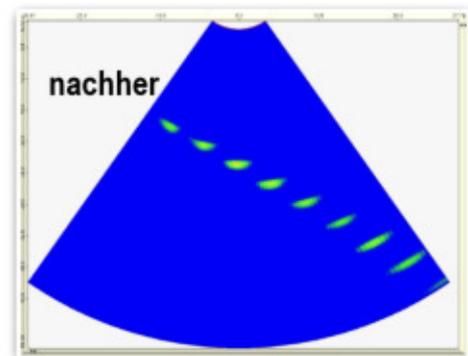
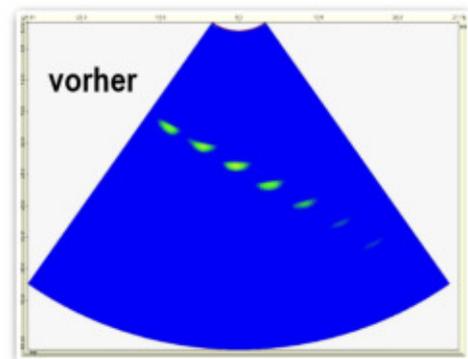
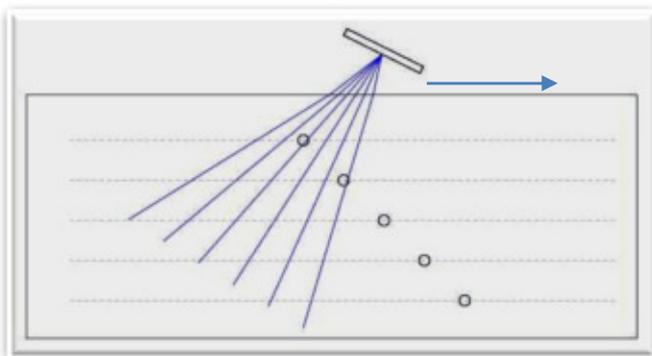
## Kalibrierwerkzeuge

Zur Überprüfung und Kalibrierung des Prüfsystems stehen verschiedene Kalibrierwerkzeuge zur Verfügung. Dazu gehören:

- Automatische Vermessung und Ausgleich der Elementempfindlichkeiten. Dabei werden alle Elemente einzeln angeregt und die Echos von einem senkrecht angeschallten Reflektor ausgewertet. Der Ausgleich erfolgt wahlweise über eine angepasste Verstärkung oder eine angepasste Sendeimpulsspannung. Danach weisen alle Elemente exakt die gleiche Empfindlichkeit auf.
- Automatische Vermessung von Vorlaufkeilen oder Wasservorlaufstrecken. Hierbei wird mit jedem Element einzeln die Laufzeit bis zur Objektoberfläche gemessen. Aus den Ergebnissen lassen sich der Anstellwinkel und die mittlere Höhe des Vorlaufs bestimmen.
- Laufzeit- und winkelabhängige Verstärkungskorrektur. Hier werden Reflektoren in verschiedenen Tiefen angeschallt. Nach der Messung werden alle Echohöhen, die ursprünglich mit zunehmender Laufzeit und mit zunehmendem Einschallwinkel im Sektorscan abnehmen, auf die gleiche Echohöhe verstärkt. Diese Funktion steht zur Verfügung für die Senkrecht- und Schrägeinschallung.

**TCG - Time Corrected Gain**  
- Laufzeitkorrigierte Verstärkung

**ACG - Angle Corrected Gain**  
- Winkelkorrigierte Verstärkung



**Abb. 13.** Laufzeit- und winkelabhängige Verstärkungskorrektur



**Abb. 14.** SNUL-Prüfanlage für die Rohrlängsnahtprüfung mit bewegtem Rohr

## **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Beitrag wird die Ultraschallprüfung mit Phased-Array-Techniken an Längsschweißnähten von Großrohren beschrieben.

Es wird aufgezeigt, wie alle vorgeschriebenen Referenzreflektoren (Nuten, Bohrungen und Flachbodenbohrungen) mit Hilfe von Sektor- und Linearscans sicher detektiert werden können.

Um alle Fehlerarten in allen Positionen mit mehreren Phased-Array-Prüfköpfen in einem Prüfgang nachzuweisen, wird Mehrkanalprüfung gewählt.

Um schließlich auch die gleichbleibende Qualität der Prüfung sicherzustellen, stehen softwareunterstützte Kalibrierwerkzeuge zur Verfügung. In diesem Zusammenhang wird eine Methode zur laufzeit- und winkelabhängigen Verstärkungskorrektur vorgestellt.