

## Manuelle Messungen an Prüfungsstücken mit Ultraschall

Von Dipl.-Ing. Eduard Schulz

Für künftige Ultraschallkurse der Stufe 2 sollen für die DGZfP-Ausbildung und für Qualifikationsprüfungen gekrümmte Prüfstücke mit Schweißnähten verstärkt verwendet werden. Die DPZ hat daher bei der englischen Firma Sonaspection 48 Prüfungsstücke mit Schweißnahtfehlern gekauft. Zur Dokumentation dieser Prüfungsstücke wurden mechanisierte Messungen mit dem P-Scan-Verfahren im Juni 2001 und manuelle Messungen (Handmessungen) im Januar und Februar 2002 bei der DGZfP in Berlin durchgeführt. Das Bild 1 zeigt den Prüfraum mit einem Teil der Prüfungsstücke.

Für die Messungen wurde die AVG-Methode ausgewählt und AVG-Vorsatzskalen angefertigt. Die Empfindlichkeits-einstellung sollte am Kalibrierkörper 2 (25 mm Kreisbogen) erfolgen. Bei den Vorbereitungen zu den Messungen wurden bei der Empfindlichkeitsüberprüfung am Kalibrierkörper 2 und an einer 3 mm Querbohrung im Prüfungsstück erhebliche Unterschiede (bis zu 12 dB!) festgestellt. Hier ist offenbar der Geometrie-Einfluss stark ausgeprägt. Um diesen zu berücksichtigen wurde als Justierreflektor für die Empfindlichkeitseinstellung die Querbohrung im Prüfungsstück verwendet.

Außerdem wurde beobachtet, dass es bei Einschallwinkeln von 60 und 70 Grad nach der Umlenkung zu einem Empfindlichkeitssprung kommt. Dieses Phänomen ist anscheinend nicht bekannt oder vernachlässigt worden.

### Prüfungsstücke

Die Prüfungsstücke sind Rohrsegmente mit einer Rundnaht (V-Naht). Der Außendurchmesser beträgt ca. 204 mm, die Wanddicke im Mittel 22 mm. Die Bilder 2 und 3 zeigen die Außen- bzw. Innenoberfläche eines Prüfungsstückes. Man erkennt deutlich, dass die Decklage der Schweißnaht nicht bearbeitet wurde und die Wurzel eine starke Überhöhung aufweist. Die Ankopplungsoberflächen sind metallisch blank und erlauben somit eine gute Ankopplung.

Die Prüfungsstücke kann man in sechs Gruppen einteilen. Jede Gruppe enthält drei definierte Schweißnahtfehler, also jeweils acht Prüfungsstücke haben gleichartige Schweiß-



Bild 1: Prüfraum mit Prüfungsstücken

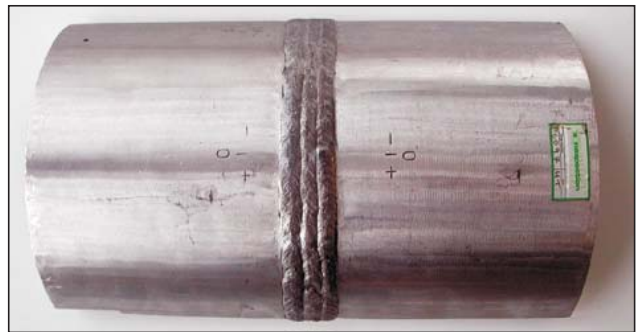


Bild 2: Außenoberfläche eines Prüfstückes



Bild 3: Innenoberfläche eines Prüfstückes

nahtfehler. Insgesamt gibt es 11 verschiedene Arten von Schweißnahtfehlern. Im Bild 4 sind diese aufgeführt. Je nach Art sind diese relativ leicht bzw. schwieriger aufzufinden. Alle Prüfungsstücke enthalten außerdem noch folgende Reflektoren:

- eine 3 mm Querbohrung parallel zur Oberfläche, Anordnung in Umfangsrichtung (als Justierreflektor verwendet)
- eine 3 mm Querbohrung parallel zur Oberfläche, Anordnung in Längsrichtung
- eine 3 mm Bohrung senkrecht zur Oberfläche und
- eine 1,5 bis 2 mm tiefe umlaufende Nut an der Innenoberfläche.

Nr.	Schweißnahtfehler
1	Flankenbindefehler
2	Querriss in der Decklage/Wurzel
3	Längsriss in der Bindezone
4	Porennest
5	Wurzelüberhöhung
6	Längsriss im Schweißgut
7	Längsriss in der WEZ
8	Schlackeneinschluss
9	nicht durchgeschweißte Wurzel
10	Wurzelbindefehler
11	Flankenriss

Bild 4: Schweißnahtfehler

## Normen

Für die Schweißnahtprüfung mit Ultraschall wurden die Europäischen Normen angewendet. Dies sind u. a. die Normen:

- DIN EN 1714 „Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen“  
Ausgabe Oktober 1997
- DIN EN 1712 „Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen“ (Zulässigkeitsgrenzen)  
Ausgabe September 1997.

Diese enthalten zum Teil widersprüchliche und schwierig zu interpretierende Angaben bzw. Vorgehensweisen. Insbesondere werden Begriffe verwendet, die zur Verwirrung beitragen. Diese Normen sollen jedoch noch einmal überarbeitet werden.

Bisher stellte der Begriff der Bezugshöhe (s. DIN EN 583-2, Ausgabe April 2001) bei der AVG-Methode im AVG-Diagramm und am Bildschirm des Ultraschallgerätes eine waagerechte Linie dar. Im AVG-Diagramm wurde diese Linie durch den Bezugspunkt gelegt und diente mit der Justierhöhe zur Ermittlung der Zusatzverstärkung. Am Bildschirm war es eine bestimmte Höhe (z.B. 80% BSH). Auf diese Höhe wurden dann die Anzeigen gestellt und im AVG-Diagramm ausgewertet. Die andere Methode war die der AVG-Bezugslinie. Hier wurde die Bezugslinie aus dem AVG-Diagramm auf den Bildschirm übertragen, oder es wurden von Herstellern angebotene AVG-Skalen verwendet.

Die Bezugshöhe nach DIN EN 1712 bedeutet entweder eine DAC-Kurve (3 mm Querbohrung bzw. 1 mm Nut) oder eine AVG-Linie. Für die AVG-Methode ist für die Bezugshöhe (in den Tabellen der DIN EN 1712) die Größe von Kreisscheibenreflektoren angegeben.

In der DIN EN 1712 wurden für die AVG-Methode zwei Zulässigkeitsgrenzen (2 und 3) eingeführt, die aber in Bezug auf die Bewertung von Anzeigen (zulässig oder nicht zulässig) identisch sind. Lediglich unterscheiden sich die Registrierschwellen. Es gibt zwei Registrierschwellen:

Zulässigkeitsgrenze 2 = Bezugshöhe und

Zulässigkeitsgrenze 3 = Bezugshöhe + 4 dB.

Es wäre hier sinnvoller, den Begriff der Registrierklasse für die unterschiedlichen Registrierschwellen einzuführen (Vorschlag von Dipl.-Ing. Kaps, Leiter der DPZ).

Für die Prüfung wurde die AVG-Methode ausgewählt mit einer Bezugshöhe von  $D_{KSR} = 2 \text{ mm}$  ( $D$  = Durchmesser,  $KSR$  = Kreisscheibenreflektor). In der Tabelle für die Bezugshöhen ist für die Wanddicke von 15 bis 40 mm und eine Prüffrequenz von 3 bis 5 MHz sogar ein Kreisscheibendurchmesser von 1,5 mm vorgesehen. Vergleicht man die DIN EN 1712 mit der früheren Norm DIN 54125, so war in dieser eine Registriergrenze von 3 mm KSR für Wanddicken größer 20 mm empfohlen worden. Zulässigkeitsgrenzen wurden in der Norm DIN 54125 nicht definiert.

Vergleicht man die Beobachtungsschwellen in der DIN EN 1714 zwischen der Methode 1 (3 mm Querbohrung) und der Methode 2 (AVG-Methode: Kreisscheibendurchmesser in Abhängigkeit von der Wanddicke und Frequenz), so tre-

ten z. T. erhebliche Unterschiede bei der Prüfeempfindlichkeit auf /1/.

Die gleiche Problematik ergibt sich, wenn die Registrierschwellen miteinander verglichen werden. Das hat zur Folge, dass mit der AVG-Methode in einigen Fällen zu empfindlich geprüft wird, wenn nicht anderes zwischen den Vertragspartnern vereinbart wurde.

Im AD-Merkblatt HP 5/3 (Ausgabe Juli 1989) gilt eine Registriergrenze von 2 mm KSR für den Wanddickenbereich von 20 bis 40 mm. Zur Bestimmung der Registrierlänge war die Registriergrenze für diesen Wanddickenbereich um 6 dB abzusenken, und die zulässige Registrierlänge von Einzelfehlern betrug 25 mm. (Die Ausgabe Juli 1989 dieses AD-Merkblattes wurde durch die Ausgabe Oktober 2000 ersetzt.)

Für den Wanddickenbereich von 15 mm bis 100 mm ist die Registrierschwelle für die Zulässigkeitsgrenze 2 gleich der Bezugshöhe. Die neu eingeführte Beobachtungsschwelle liegt 4 dB unterhalb der Bezugshöhe.

Übersteigt die Echohöhe einer Anzeige die Beobachtungsschwelle, so ist zunächst die Längenausdehnung des Reflektors zu ermitteln. Nach DIN EN 1712 ist die Registrierlänge (RL) zu bestimmen. Da die Registrierlänge auf die Beobachtungsschwelle (feste Amplitudenschwelle) bezogen wird, ergeben sich bei großer Echohöhenüberschreitung auch große Registrierlängen; im Gegensatz zur Halbwertslänge. Man hat aber die Möglichkeit, den Bündeldurchmesser (im vorliegenden Fall von ca. 3 bis 10 mm, abhängig vom Schallweg) von der Registrierlänge wieder abzuziehen. Bei kleiner Echohöhenüberschreitung wird die Registrierlänge kleiner als die Halbwertslänge sein.

In Abhängigkeit der Länge von Anzeigen bezogen auf die Wanddicke ist die Echohöhenüberschreitung ein Maß für die Zulässigkeit von Anzeigen. Für Längenausdehnungen, die im Wanddickenbereich von 15 mm bis 100 mm größer als die halbe Wanddicke oder größer als 20 mm sind, ist eine Nachprüfung mit mindestens einem anderen Einschallwinkel erforderlich. Im Prüfbericht sind alle zulässigen und unzulässigen Anzeigen oberhalb der Registrierschwelle zu dokumentieren.

In der Ausgabe 79 vom April 2002 der ZfP-Zeitung hat Ulrich Kaps in einem Fachbeitrag zur DIN EN 1712 die Vorgehensweisen zur Bewertung ausführlich dargestellt.

## Prüftechnik

Für die Durchführung der manuellen Prüfung wurden ein Ultraschallgerät der Firma Krautkrämer vom Typ USM3 und herkömmliche Miniaturwinkelprüfköpfe ebenfalls von der Firma Krautkrämer vom Typ MWB45N4, MWB60N4 und MWB70N4 eingesetzt.

Für eine spezielle Technik wurden zwei Miniaturwinkelprüfköpfe vom Typ MWB60N4 auf 55° angeschliffen.

Die Ankopplung erfolgte mit Öl.

## Empfindlichkeitseinstellung

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Längsfehlerprüfung, d. h. Einschallrichtung in Längsrichtung.

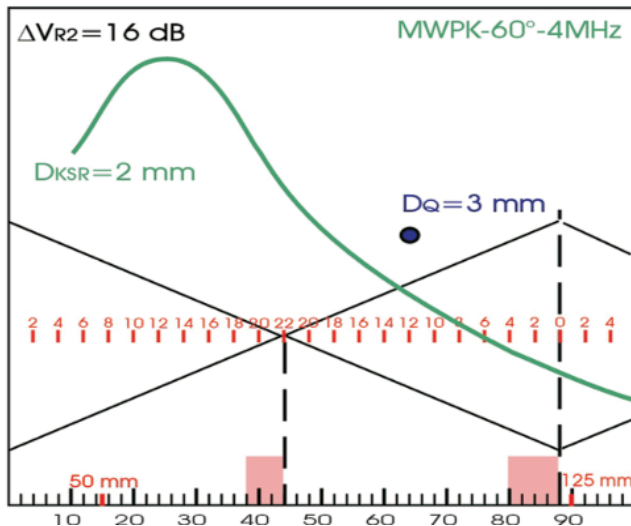


Bild 5: AVG-Skala vom Prüfkopf MWB 60 N4

Zur Erleichterung der Prüfung wurden AVG-Vorsatzskalen auf Transparentfolie für die Prüfköpfe 45°, 60° und 70° erstellt, siehe Bild 5. Diese enthalten die Bezugslinie von KSR 2, den Wert für die Zusatzverstärkung, Markierungen für den halben und ganzen Sprung, einen Tiefenmaßstab und einen Bezugspunkt für die 3 mm Querbohrung in einer Tiefenlage von  $\frac{1}{2} d$  im Prüfungsstück. Die 3 mm-Querbohrung wurde umgerechnet in einen äquivalenten Kreisscheibendurchmesser. Bei Anschallung der Bohrungen für die Einschallwinkel von 45° und 60° über die Umlenkung und bei Direktanschallung für 70° ergeben sich Kreisscheibendurchmesser, die in der Größenordnung von 2 mm (2,1; 2,3 und 1,9 mm) liegen. Als Justierreflektor für die Empfindlichkeitsjustierung wurde zunächst der 25 mm Kreisbogen am K2 verwendet. Daraus ergibt sich eine Zusatzverstärkung von 16 dB für alle Prüfköpfe.

Die Überprüfung der Empfindlichkeitseinstellung an der Bohrung im Prüfungsstück hat ergeben, dass die Echohöhen von der Bohrung nicht die erwarteten Größen erreichten. Bei dem Einschallwinkel von 60° fehlten ca. 12 dB. Zunächst wurde versucht diesen Verlust durch die Transferkorrektur auszugleichen. Die gemessenen Werte der Transferkorrektur lagen in der Größenordnung von 6 bis 7 dB. Bei Berücksichtigung dieser Werte blieb immer noch eine Differenz zur Echohöhe der Bohrung bestehen.

Daraufhin wurden in einem Prüfungsstück zusätzliche Testreflektoren eingebracht:

- 2 mm Flachbodenbohrungen (FBB) unter den entsprechenden Winkeln, so dass diese senkrecht vom Schallstrahl direkt und über die Umlenkung angeschallt werden konnten
- 2 mm Flachbodenbohrung parallel zur Oberfläche
- 3 mm Querbohrungen in einer Tiefenlage von  $t = \frac{1}{4} d$  und  $t = \frac{3}{4} d$  ( $d =$  Wanddicke) und
- 2 mm tiefe Nuten in Längsrichtung und Umfangsrichtung innen und außen.

Die Überprüfung an den Flachbodenbohrungen ergab, dass eine Einstellung der Empfindlichkeit an der Querboh-

rung in einer Tiefenlage von  $t = \frac{1}{2} d$  im Prüfungsstück nahezu zu einer richtigen Empfindlichkeitseinstellung führt. Für den Winkel von 45° fehlen noch 4 dB, für die Winkel 60° und 70° 2 dB. Man könnte dies in der AVG-Skala berücksichtigen, indem der Bezugspunkt um den entsprechenden Wert versetzt wird.

Wird die Empfindlichkeitseinstellung an der Querbohrung im Prüfungsstück vorgenommen, so entfällt die Transferkorrektur. Würde man die Transferkorrektur berücksichtigen, so wäre eine Überbewertung der Anzeigen die Folge. Die großen Werte der Transferkorrektur sind sicherlich nicht durch den Werkstoff und die Oberflächenbeschaffenheit bedingt, sondern durch die Geometrie (Krümmung).

Bei der Bewertung der Anzeigen mit den Prüfköpfen MWB60N4 und MWB70N4 ist darauf zu achten, ob die Anzeigen vor oder nach dem halben Sprung auftreten. Für Anzeigen ab dem halben Sprung ist für 60° die an der Bohrung bei Anschallung über die Umlenkung eingestellte Empfindlichkeit richtig. Vor dem halben Sprung wären 6 dB weniger Verstärkung einzustellen. Wegen der breiten Decklage sind aber Anzeigen vor dem halben Sprung kaum zu erwarten.

Für 70° gilt die bei direkter Anschallung der Bohrung eingestellte Empfindlichkeit bis zum halben Sprung. Für Anzeigen ab dem halben Sprung ist die Verstärkung um 6 dB zu erhöhen. Die Grenze halber Sprung liegt nicht genau beim berechneten Schallweg, sondern geringfügig früher (bis zu ca. 7 mm).

Eine Unterscheidung von Anzeigen vor oder nach dem halben Sprung bezogen auf die Verstärkungseinstellung ist beim Prüfkopf MWB45N4 nicht notwendig, da sich die Empfindlichkeit nach einer oder auch zwei Umlenkungen nicht sprunghaft ändert. Möglicherweise liegt das daran, dass die erste Umlenkung am Nahfeldende erfolgt, wo das Schallbündel am kleinsten ist, und hier sich der Krümmungseinfluss nicht auswirkt.

Die Überprüfung der Empfindlichkeitseinstellung am Kalibrierkörper K2 brachte nach einigen Tagen Prüfung an den Prüfungsstücken einen scheinbaren Verlust der Empfindlichkeit der benutzten Prüfköpfe. Der Vergleich der Echohöhen an der Querbohrung zu Beginn der Prüfung und danach ergab keinen Unterschied bezüglich der Echohöhen. Beim genauen Betrachten der Prüfkopfsohlen war ein winziger Spalt (ca. 0,1 mm oder weniger) erkennbar. Dies ist die Erklärung für die unterschiedlichen Echohöhen am Kalibrierkörper. Damit scheidet eine Empfindlichkeitseinstellung am Kalibrierkörper aus. Das bedeutet, dass die Empfindlichkeitseinstellung am Prüfungsstück vorgenommen werden muss oder dass ein Vergleichskörper mit entsprechenden Justierreflektoren vorhanden sein muss.

Zum Reflexionsverhalten senkrecht zur Oberfläche orientierter Reflektoren bei Schrägeinschallung wurde die 2 mm Flachbodenbohrung, die parallel zur Oberfläche angeordnet ist, mit 60° und 70° angeschallt. Der Auftreffwinkel beträgt dabei 30° bzw. 20°.

Wie zu erwarten war, ergab die Messung eine Echohöhenunterschreitung bezogen auf die Beobachtungsschwelle von 10 dB bzw. 8 dB entsprechend 14 dB bzw. 12 dB bezo-

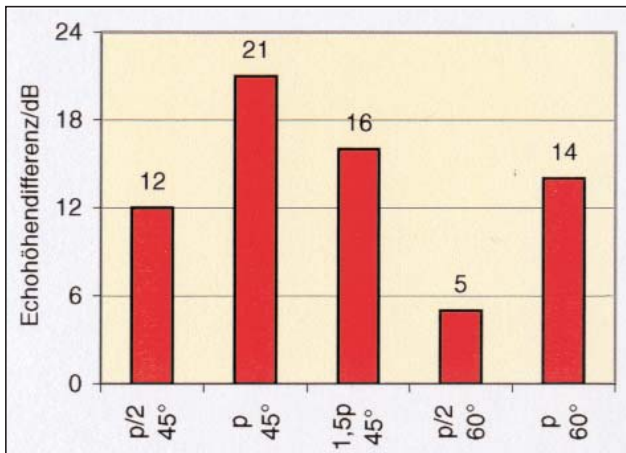


Bild 6: Echohöhendifferenz der Kantenanzeigen vom Kalibrierkörper und Prüfungsstück

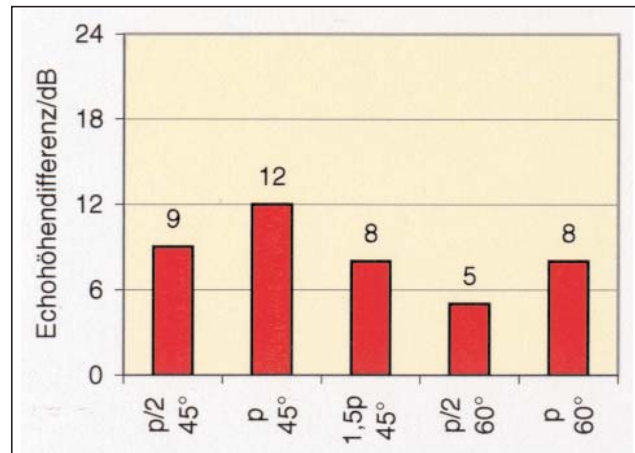


Bild 7: Echohöhendifferenz der Bohrungsanzeigen vom Kalibrierkörper und Prüfungsstück

gen auf die Registerschwelle. Um derartige Fehler sicher nachzuweisen und richtig zu bewerten, müsste die Tandemtechnik eingesetzt werden. Bei dieser Wanddicke ist dies mit herkömmlichen Prüfköpfen kaum machbar. Abhilfe könnte der Einsatz von LLT- oder SEK-Prüfköpfen bringen.

Dass wenigstens ein Nachweis derartiger Fehler möglich ist, hat die Überprüfung des Längsrisses im Schweißgut gezeigt. Bei flächenhaften Fehlern, die nicht senkrecht oder nahezu senkrecht vom Schallstrahl getroffen werden, erhält man von der Fläche keine Anzeige, sondern bestenfalls von den so genannten Riss-Spitzen.

### Krümmungsanpassung

Eine Anpassung von Prüfköpfen an gekrümmte Prüfflächen ist gemäß DIN EN 1714 nicht erforderlich, wenn die Gleichung  $D > 15a$  erfüllt ist. Dabei ist  $D$  der Durchmesser des Prüfgegenstandes und  $a$  die Länge der Prüfkopfsohle in Prüfrichtung. Bei der Längsfehlerprüfung wäre das die Breite der Prüfkopfsohle (ca. 14 mm mit Kufen bzw. 12 mm ohne Kufen). Nimmt man die wirksame Breite (12 mm Plexiglas), so ist die Gleichung  $204 \text{ mm} > 180 \text{ mm}$  erfüllt. Selbst bei einer Gesamtbreite von 14 mm liegt der Wert von 210 mm knapp über dem Durchmesser von 204 mm. Obwohl nicht angeschliffen werden muss, ist die Prüfdurchführung nicht einfach. Insbesondere bei der Optimierung von Anzeigen und bei der Längenbestimmung.

Gemäß DIN EN 583-2 muss angeschliffen werden, wenn die Gleichung  $D < 10 \text{ wps}$  erfüllt wird (wps = Breite des Prüfkopfes). Hiernach könnte der Durchmesser noch wesentlich kleiner sein, bevor angeschliffen werden müsste.

### Messungen zum Krümmungseinfluss

Um den Einfluss der Krümmung vom Prüfungsstück bei Einschallung in Längsrichtung zu ermitteln, wurden die Kantenanzeigen und die Anzeigen der senkrecht angeordneten Bohrung vom Kalibrierkörper 1 und von einem Prüfungsstück aufgenommen. Mit 45° wurden die Reflektoren im halben, ganzen und anderthalbfachen Sprung, mit 60° im halben und ganzen Sprung angeschallt.

Die senkrecht angeordnete Bohrung bildet mit der Oberfläche einen Winkelspiegel und stellt einen kleinen Reflektor dar. Da sich die Dicken des Prüfungsstückes (22 mm) und

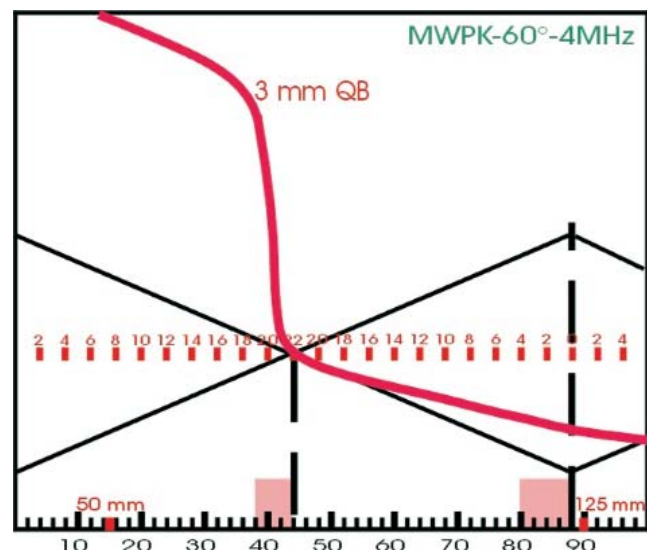


Bild 8: Vergleichsline vom Prüfungsstück

des Kalibrierkörpers 1 (25 mm) nur geringfügig voneinander unterscheiden, kann der Schallwegeinfluss vernachlässigt werden.

Dargestellt ist im Bild 6 die Echohöhendifferenz der Kantenanzeigen vom Kalibrierkörper 1 und von einem Prüfungsstück. Der Vergleich der Kantenanzeigen zeigt, dass erhebliche Differenzen in den Echohöhen auftreten. Beispielsweise ist die Echohöhe vom Prüfungsstück im halben Sprung bei 45° um 12 dB niedriger als vom Kalibrierkörper, im ganzen Sprung sogar um 21 dB.

Im Vergleich zu den Kantenanzeigen ist die Differenz der Echohöhen der Bohrungsanzeigen zwischen dem Kalibrierkörper und dem Prüfungsstück geringer, aber noch deutlich vorhanden, Bild 7.

An den drei Querbohrungen im Prüfungsstück wurde eine Vergleichsline mit dem Prüfkopf MWB60N4 aufgenommen. Diese ist im Bild 8 wiedergegeben. Man erkennt den ungewöhnlichen Verlauf dieser Vergleichsline. Bis kurz vor dem halben Sprung hat diese Linie einen gewohnten Verlauf, danach geht diese steil herunter und nach der Umlenkung ist der Verlauf wieder normal.

### Längsfehlerprüfung

Wie schon beschrieben, erfolgte die Empfindlichkeitseinstellung für alle drei Prüfköpfe nur noch an der Querbohrung im Prüfungstück. Die Anzeige der Querbohrung wird auf den Bezugspunkt auf der AVG-Skala gestellt und die dazu notwendige Verstärkung ist die Grundverstärkung  $V_J$ . Die Registrierverstärkung  $V_R$  ist für 45° gleich der Grundverstärkung.

Für 60° ist für Anzeigen, die ab dem Sprung erscheinen, die Registrierverstärkung ebenfalls gleich der Grundverstärkung. Für Anzeigen, die vor dem halben Sprung erscheinen würden, wäre die Registrierverstärkung um 6 dB abzusenken.

Bei 70° erhält man die Grundverstärkung bei direkter Anschaltung der Querbohrung. Das bedeutet, dass für Anzeigen, die bis zum halben Sprung erscheinen, die Registrierverstärkung gleich der Grundverstärkung ist. Für Anzeigen, die ab dem halben Sprung auftreten, ist die Registrierverstärkung um 6 dB zu erhöhen.

Für die Prüfung ist die Verstärkung für die Beobachtungsschwelle einzustellen. Diese ergibt sich aus der Registrierverstärkung  $V_R$  zuzüglich 4 dB. Man erhält dadurch die so genannte Beobachtungsverstärkung  $V_B = V_R + 4$  dB, ab der eine Bewertung vorzunehmen ist.

### Prüfdurchführung

Die Schweißnaht wurde mit allen drei nicht angeschliffenen Miniaturwinkelprüfköpfen von beiden Seiten der Naht überprüft. Für die Längenmessung wurden zusätzliche Hilfsmittel verwendet, um eine möglichst genaue Messung zu ermöglichen. Zur Prüfkopfführung parallel zur Naht wurde ein Magnetstreifen um das Prüfungstück gelegt und zum Ablesen der Längskoordinaten ein selbst hergestelltes Maßband, siehe Bild 9. Der Nullpunkt der Längskoordinate liegt nicht am Anfang, sondern auf der Hälfte der Länge der Schweißnaht. Somit gibt es auch negative Werte der Längskoordinaten.

Insbesondere hat sich die Verwendung von Klarsichtfolien mit eingetragenen Schallstrahl bewährt, die auf ein Blatt mit Schweißnahtkontur gelegt werden, um so den Reflektorort ohne Rechnen schnell bestimmen zu können. Damit konnten sofort Formanzeigen identifiziert werden.

### Auswertung

Die gemessenen Werte wurden dann in Excel-Tabellen eingegeben und die Zwischenwerte berechnet: Schallweg  $s$ , Projektionsabstand  $a$ , verkürzter Projektionsabstand  $a'$ , Längenausdehnung  $\Delta L$  (RL bzw. HWL), Querkoordinate  $q$  (Ab-lage des Reflektors bezogen auf Schweißnahtmitte), Reflektortiefenlage  $t$  und Echohöhenüberschreitung  $\Delta H_U$  bezogen auf die Registrierschwelle.

Für die Berechnung der Echohöhenüberschreitung musste in Excel noch eine Abfrage durchgeführt werden, ob Anzeigen von den Prüfköpfen 60° und 70° vor oder nach dem halben Sprung auftreten, damit die entsprechende Registrierverstärkung  $V_R$  berücksichtigt werden konnte.

Ferner wurde die Zulässigkeit von Anzeigen im Excel-Programm überprüft:

- Anzeigenlänge (RL) < halbe Wanddicke: max. zulässige Echohöhenüberschreitung = 10 dB

- Anzeigenlänge (RL) > halbe Wanddicke aber < Wanddicke: max. zulässige Echohöhenüberschreitung = 4 dB
- Anzeigenlänge (RL) > Wanddicke: max. zulässige Echohöhenüberschreitung = 0 dB

Die Echohöhenüberschreitung bezieht sich hierbei auf die Registrierschwelle.

Eine andere Möglichkeit der Bewertung wäre die, dass die Echohöhen der Anzeigen auf die Beobachtungsschwelle bezogen werden. Dadurch würde sich lediglich der Wert der max. zulässigen Echohöhenüberschreitung ändern. Beispielsweise würde sich im ersten Fall die max. zulässige Echohöhenüberschreitung von 10 dB auf 14 dB ändern.

Man hätte den Vorteil, dass Anzeigen zunächst registriert würden, die mit anderen Winkeln nachzuprüfen sind.

Eine weitere Bewertung, z. B. nach DIN EN 1713 wurde nicht vorgenommen.

### Querfehlerprüfung

Da die Decklagen unbearbeitet sind, konnten die Prüfköpfe nicht auf der Naht angekoppelt werden. Daher wurden die Prüfköpfe auf dem Grundwerkstoff angekoppelt und schräg zur Naht geführt (Anstellwinkel ca. 30°). Die Einschallung erfolgte aus vier Positionen zunächst in Einkopftechnik mit 45° und 60°. Da bei 60° der Hauptstrahl nicht an die Innenoberfläche gelangt, wurden versuchsweise für Querfehler an der Innenoberfläche Miniaturwinkelprüfköpfe mit einem Einschallwinkel von 55° eingesetzt. Anscheinend wegen der großen Ausdehnung dieser Querfehler und der Bündelbreite brachte der Einsatz der 55°-Prüfköpfe keine Verbesserung.

Die Prüfköpfe hätten eigentlich angeschliffen werden müssen. Man hätte diese aber schräg (diagonal) anschleifen müssen. Da ein Nachweis der Querrisse auch so möglich war, wurde darauf verzichtet. Ein weiteres Problem wäre die Empfindlichkeitseinstellung für schräg angeschliffene Prüfköpfe gewesen.

Die Echohöhenbewertung wurde wie bei der Längsfehlerprüfung vorgenommen. Der Abstand  $A'$  wurde zum Nullpunkt der Längskoordinate gemessen. Anfang und Ende des Fehlers konnte unter diesen Umständen nicht gemessen werden. Dazu wäre eine blecheben überschiffene



Bild 9: Hilfsmittel für die Längenmessung



Bild 10: Querfehlerprüfung mit der „Bügeleisen-Technik“

Nahtoberfläche notwendig gewesen. Um eine Unterscheidung zwischen kleiner und großer Fehlergröße treffen zu können, wurde eine zusätzliche Prüfung mit zwei Prüfköpfen in V-Anordnung im S+E-Betrieb durchgeführt.

Diese Technik ist bekannt unter dem Namen „Bügeleisen-Technik“. Diese ist ähnlich der V-Durchschallungs-Technik, nur dass die Einschallrichtung beider Prüfköpfe bis auf den Anstellwinkel gleich ist. Im Bild 10 ist die Prüfkopfanzordnung wiedergegeben.

Eine Bewertung ist bei den Querfehlern nicht vorgenommen worden, da dazu eine geeignete Empfindlichkeitseinstellung notwendig gewesen wäre. Aber anhand der starken Echohöhenüberschreitung der sog. Bügeleisen-Technik konnte man abschätzen, dass es sich um relevante Fehler handeln muss.

### Ergebnisse

Die Ergebnisse der manuellen Messungen (Handprüfungen) sind in die Prüfungsstückdokumentation (UT) übernommen worden. Diese besteht aus drei Seiten (Word-Datei):

Auf der ersten Seite sind die Daten, die für alle Prüfungsstücke (außer der Nummer des Prüfungsstückes) gelten, aufgeführt. Das sind Angaben über das Objekt, die Prüfaufgabe und prüftechnische Daten (Prüfköpfe, Entfernungsjustierungen, Verstärkungseinstellungen und Bewertungsdaten nach DIN EN 1712).

Auf der zweiten Seite ist das Protokollblatt wiedergegeben. Das sind die Werte, die aus dem Excel-Protokollblatt stammen. Für jedes Prüfungsstück gibt es ein eigenes Blatt. Unter der Spalte Bemerkungen ist der Fehlertyp eingetragen. Außer den drei Schweißnahtfehlern sind zum Teil noch weitere Anzeigen aufgeführt:

- Formanzeigen aus der Wurzel und Decklage
- Indirekte Anzeigen, Umlenkung am Fehler (Bindefehler) und Reflexion an der Decklage
- Riss-Spitzen-Anzeigen

Die dritte Seite enthält eine Skizze der Fehlerlagen. Für die Fehlerlänge wurde der Wert der Registrierlänge eingetragen. Zur Nachweisbarkeit der Schweißnahtfehler gibt es noch folgende Hinweise:

Flankenbindefehler, Längsriss in der Bindezone, Längsriss im Bereich der WEZ, nicht durchgeschweißte Wurzel, Wurzelbindefehler und Flankenriss sind relativ leicht nachzu-



Bild 11: Nicht durchgeschweißte Wurzel



Bild 12: Wurzelüberhöhung



Bild 13: Querriss wurzelseitig

weisen. Wurzelüberhöhung, Längsriss im Schweißgut und Schlackeneinschluss sind schwieriger aufzufinden. Das Porennetz ist nur mit erhöhter Verstärkung nachweisbar. (Die Echohöhe liegt unterhalb der Beobachtungsschwelle).

In den Bildern 11, 12 und 13 sind die sichtbaren Schweißnahtfehler wiedergegeben. Bild 11 zeigt einen Bereich mit nicht durchgeschweißter Wurzel. Der Spalt bei den einzelnen Prüfungsstücken ist unterschiedlich breit. Im Bild 12 ist eine bereichsweise Wurzelüberhöhung zu erkennen. Das Bild 13 zeigt einen Querriss im Bereich der Wurzel.

Es wurden die Ergebnisse der Messungen mit dem P-Scan-Verfahren und der manuellen Prüfung miteinander verglichen. Es gab eine weitgehend gute Übereinstimmung bezüglich der Werte der Echohöhenüberschreitung und der Anzeigenlänge. Die Werte der Echohöhenüberschreitung sind in einigen Fällen nicht unbedingt vergleichbar, da un-

terschiedliche Einschallwinkel eingesetzt wurden. (Bei dem P-Scan-Verfahren wurde nur der 60-Grad-Prüfkopf eingesetzt). Außerdem wurden bei der manuellen Prüfung die Anzeigen optimiert, was zu größeren Echohöhen führen kann.

**Fazit:** Die Prüfungsstücke eignen sich sowohl für den Unterricht als auch für eine Qualifikationsprüfung. Gegenüber ebenen Prüfungsstücken stellen diese gekrümmten Prüfungsstücke höhere Anforderungen an den Prüfer.

### Weitere Untersuchungen

Im Anschluss an die Messungen wurden an eigens dafür nachbestellten Segmenten Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden in Teilbereichen die Außen- und Innenoberfläche plan gefräst und die Stirnflächen mit +/-30-Grad-Schrägen versehen für die Anschallung mit 60-Grad-Prüfköpfen. Außerdem wurden Querbohrungen im Bereich der bearbeiteten Oberflächen eingebracht. Die Untersuchungen hatten zum Ziel die einzelnen Krümmungseinflüsse (Anteil der Innen- bzw. Außenoberfläche) zu ermitteln. Jedoch konnten keine befriedigenden Ergebnisse aus den Messwerten der V-Durchschallung, der Stirnflächen und der Querbohrungen erzielt werden.

Im Fachausschuss für Ultraschallprüfung wurde angeregt, für die Justierung der Empfindlichkeit axial-radiale Bohrungen mit an den Einschallwinkel angepasster Neigung zu verwenden. Dazu sind Testkörper in Auftrag gegeben worden.

Gemäß DIN EN 1714 sind auch andere Nennfrequenzen (1,5 MHz bis 2,5 MHz) für den infrage kommenden Wanddickenbereich von 15 mm bis 40 mm vorgesehen. Bei den üblicherweise eingesetzten Miniaturwinkelprüfköpfen ist aber mit starken Formanzeigen aus der Decklage und der Wurzelüberhöhung der Schweißnaht zu rechnen. Besser geeignet wären dafür Winkelprüfköpfe mit einer etwas größeren Schwingergröße, wie sie beispielsweise von der Fa. Krautkrämer als Typ SWB angeboten werden. Dazu sind noch Untersuchungen notwendig. Schließlich sollen in der BAM noch Modellrechnungen durchgeführt werden, um den quantitativen Einfluss der Geometrie herauszufinden.

### Seminare

Im Juli 2002 fand ein Seminar „Prüfung gekrümmter Bauteile mit Ultraschall“ im DGZfP-Ausbildungszentrum in Dortmund statt, an der über 20 Teilnehmer (Prüfungsbeauftragte) teilnahmen. Ein weiteres wurde in Magdeburg bei der Firma Linke & Rühle durchgeführt. Vortragende bei beiden Seminaren waren Dipl.-Ing. Kaps und der Autor.

### Literatur

/1/ Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Methoden zur Einstellung der Bezugshöhe. Durchgeführt in der BAM; Ergebnisse wurden in den Unterlagen zum Kursus Z-UT erstmals 1998 vorgestellt

### Der Autor

Nach der Berufsausbildung bei der Firma Siemens Berlin und dem Studium in der Fachrichtung Elektrotechnik an der Staatlichen Ingenieurschule Gauß in Berlin hat Eduard Schulz zunächst als Toningenieur beim Sender Freies Berlin und anschließend beim Senator für Bau- und Wohnungswesen als Sachbearbeiter für die Projektierung von Elektroanlagen in öffentlichen Einrichtungen gearbeitet. Danach ist er 1964 als Elektro-Ingenieur in die Fachgruppe Zerstörungsfreie Materialprüfung der damaligen Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) eingestellt worden.



Am Anfang war er in den Bereichen Ultraschallprüfung, Durchstrahlungsprüfung, Magnetpulverprüfung und Eindringprüfung tätig. Im Verlauf seiner weiteren Tätigkeit lag der Schwerpunkt nur noch im Bereich Ultraschallverfahren. Sein Aufgabengebiet war u. a. die Weiterentwicklung von Ultraschall-Prüftechniken, Durchführung und Organisation komplexer Ultraschallprüfungen, Erprobung neuer Prüftechniken vor Ort, Erstellung von Prüfspezifikationen und Begutachtung von ZfP-Prüflaboratorien. Bei der DGZfP hat er an ca. 90 Kursen und 130 Qualifizierungsprüfungen mitgewirkt.