

Vorstellung eines Verfahrens zur Zertifizierung von Referenzfehlern

Thomas WÜRSCHIG¹
Baker Hughes Digital Solutions GmbH, Robert-Bosch-Str. 3, 50354 Hürth

Kontakt E-Mail: thomas.wuerschig@bakerhughes.com

Kurzfassung. Die gesamte zerstörungsfreie Ultraschallprüfung beruht auf einer Vergleichsmessung des Prüfmaterials bezüglich eines vorherigen Abgleichs an künstlich eingebrachten Fehlern in einem Referenzstück. Dementsprechend muss auch der Leistungsnachweis des Prüfsystems an ebendiesen demonstriert werden. Allgemeinhin wird davon ausgegangen, dass die Referenz selbst keinen Einfluss auf die erzielten Ergebnisse hat. Mit den erhöhten Prüfanforderungen und der daraus resultierenden steigenden Genauigkeit der Prüfsysteme stellt sich allerdings zunehmend die Frage, in wieweit die Fehlergüte der eingebrachten Referenz selbst berücksichtigt werden muss. Für die Prüfelektronik und die Prüfköpfe existieren bereits ausgefeilte Normen und Zertifizierungen. Bemerkenswerter Weise fehlen entsprechende Vorgaben für das Herzstück der Prüfung, die Referenz selbst, gänzlich oder sind nur sehr vage umrissen.

Im Artikel wird ein Verfahren vorgestellt, mit dem es möglich ist, Referenzfehler quantitativ und qualitativ zu erfassen. Dabei wird sich auf die Bewertung von Nuten als Referenzreflektor konzentriert. Diese wurde auf Basis der Auswertung einer großen Anzahl verschiedener Referenzfehler für die Rohrprüfung entwickelt und in der Praxis erprobt, kann aber auch auf andere Fehlertypen übertragen werden. Die Ausführungen sollten als Grundlage dienen, die Zertifizierung der Referenzen in die entsprechenden Normen aufzunehmen.

1. Einführung

Die Ultraschallprüfung ist ein Relativverfahren, das auf dem Abgleich an definierten Referenzreflektoren basiert. Art und Größe der Referenzen hängen vom speziellen Anwendungsgebiet ab und sind in entsprechenden Normen spezifiziert. Relevante Messgröße ist die Amplitude oder die Laufzeit des Ultraschallsignals. Für die Einstellung und Bewertung der Prüfergebisse automatisierter Prüfanlagen sind zwei Schwellen entscheidend: (1) der Abgleichwert, d.h. die geforderte einzustellende Amplitudenhöhe für den Referenzreflektor sowie (2) die Ereignisschwelle, welche zur Fehlerbewertung herangezogen wird.

Der Abstand der Ereignisschwelle vom Abgleichwert muss sowohl den Messfehler der Amplitudenmessung der Prüfanlage als auch Abweichungen im Reflexionsverhalten der Referenz selbst einschließen (siehe Abb. 1). Mit zunehmender Genauigkeit der Prüfanlagen wird somit der Einfluss der Güte der eingebrachten Referenz immer wichtiger [1], [2]. Eine Überbewertung der Referenzgüte kann dazu führen, dass in den für die Abnahmefahrten durchzuführenden Wiederholungsmessungen Referenzen nicht zur Anzeige kommen. Eine geringe Referenzgüte erfordert die Verschiebung der Ereignisschwelle weiter in Richtung



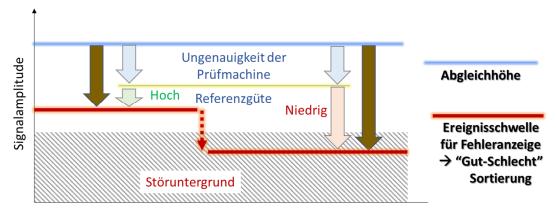


Abb. 1. Darstellung der Festlegung der Ereignisschwelle. Im Falle einer hohen Referenzgüte geht im Wesentlichen die Ungenauigkeit der Prüfmaschine ein (links). Durch eine verminderte Güte der Referenz besteht die Gefahr, dass die Ereignisschwelle in den Bereich des Störuntergrunds verschoben wird.

Störuntergrund, womit es vermehrt zu Fehlanzeigen kommt. Diese sind kostspielig, weil sie entweder direkt die Ausschussquote erhöhen oder aufwendige Nachprüfungen erfordern.

Das Dilemma in der Evaluierung der Referenzgüte besteht bisher darin, dass die bestehenden Methoden hinsichtlich des für das Prüfsystem relevanten Reflexionsverhaltens nicht ausreichend sind. Zwar wird in vielen Fällen mit mikroskopischen Aufnahmen oder Abdruckverfahren gearbeitet. Mit diesen können jedoch nur grundlegende geometrische Parameter wie nominelle Tiefe, Länge oder Form überprüft werden. Hinsichtlich des Ultraschallverhaltens sind diese Angaben unzureichend. Es fehlen unter anderem:

- Genaue Fehlerorientierung
- Resultierendes Reflexionsprofil entlang der Fehlerlänge
- Einfluss der umgebenden Geometrie auf den Schalllaufweg
- Isotropie des Materials, d.h. Abhängigkeit der Schallschwächung von Einschallrichtung

Im Folgenden werden zuerst relevante Messgrößen zur Bewertung der Referenzgüte eingeführt. Anschließend wird ein dafür geeignetes Prüfsystem vorgestellt. Am Ende werden exemplarisch einige Anwendungsbeispiele illustriert.

2. Messgrößen für die Güte des Reflexionsverhaltens von Referenzfehlern

1.1 Fehlerhomogenität

Für die Messung der Fehlerhomogenität erfolgt die Aufnahme eines C-Bildes für den entsprechenden Fehlerbereich. Das C-Bild entspricht der zweidimensionalen Farbdarstellung der gemessenen Signalamplituden. Ein Beispiel ist in Abb. 2 zu sehen. Für eindimensional ausgedehnte Referenzen wie z.B. Nuten oder Seitenbohrungen existiert eine Hauptachse. Das Reflexionsprofil der Referenz entspricht der eindimensionalen Projektion auf diese Achse.

Für die Fehlerhomogenität (FH) wird nur der zusammenhängende Teil des Reflexionsprofils innerhalb der Halbwertsbreite (HWB) ausgewertet. Zur Berechnung wird die Fläche oberhalb der Halbwertslinie ermittelt und ins Verhältnis zur maximalen Rechteckfläche gesetzt (siehe Abb. 2, unten). Im Idealfall wird die Fehlerhomogenität nur durch die fallende und steigende Flanke des Schallfeldes beeinflusst. Wird ein im Vergleich zur Fehlerausdehnung hinreichend kleines Schallfeld angenommen, liegen die theoretischen Grenzwerte bei 85% und mehr [3], [4]. Schwankungen im Reflexionsprofil vermindern diesen Wert deutlich und sind damit ein quantitatives Maß für die Fehlerhomogenität.

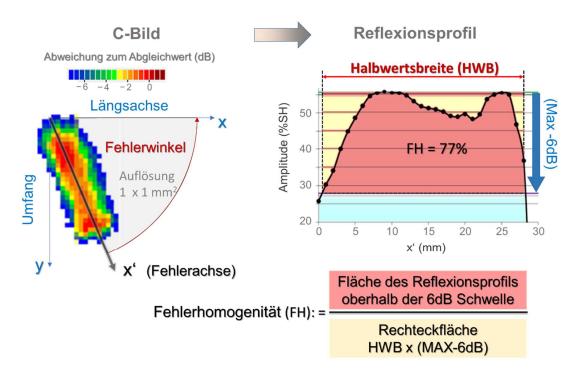


Abb. 2. Darstellung zur Berechnung der Fehlerhomogenität (FH).

1.2 Effektive Fehlerlänge

Unter der Annahme, dass die Ausdehnung der Referenzreflektoren größer ist als die Schallfeldbreite, wird die Fehlergröße über die Halbwertsbreite bestimmt. Allerdings bestehen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Prüfanlage deutlich strengere Vorgaben. Demzufolge wird die effektive Fehlerlänge als Summe aller Teilabschnitte oberhalb der entsprechenden Schwelle definiert (siehe Abb. 3)

Wie im Vergleich der beiden in Abb. 3 gezeigten Beispiel zu sehen ist spiegelt sich die Referenzgüte in der ermittelten effektiven Fehlerlänge wider. In Kombination mit der Fehlerhomogenität lässt sich somit eine starke Aussage über die Referenz hinsichtlich der Einstellung des Prüfsystems stellen.

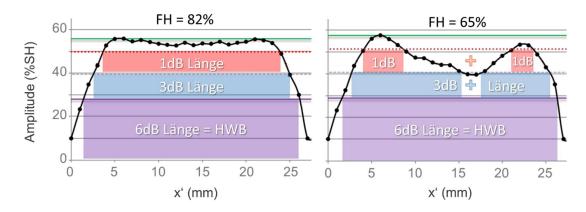


Abb. 3. Darstellung zur Berechnung der effektiven Fehlerlänge. Diese bezieht sich auf den Abstand der jeweiligen Ereignisschwelle zum Abgleichwert, welcher hier in Einheiten von dB angegeben ist. Während bei einer hohen Fehlerhomogenität (FH) die effektive Länge nur an den Enden auf Grund des Schallfeldprofils beeinflusst wird (links), tritt für Referenzen verminderter Güte und einem entsprechend kleinen FH-Wert im Vergleich dazu eine deutliche Verkürzung der effektiven Fehlerlänge auf (rechts).

1.3 Fehlerorientierung

Zur Bestimmung der Fehlerorientierung ist eine Untersuchung über den vollständigen Polarwinkel (360°) notwendig. In der Auswertung des Polardiagrams kann der nominelle Fehlerwinkel überprüft werden. Wie in Abb. 4 zu sehen ergibt sich für einen eindimensional ausgerichteten Referenzreflektor das erste Maximum im Bereich des Fehlerwinkels sowie bei $X + 180^{\circ}$ ein zweites Maximum, das die entgegengesetzte Schallrichtung präsentiert.

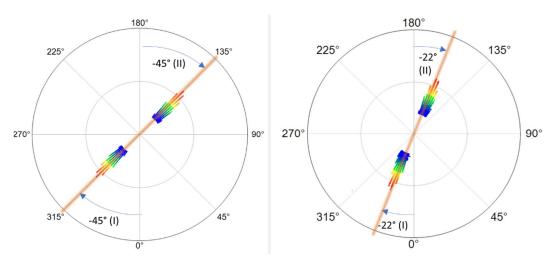


Abb. 4. Polardarstellung der gemessenen Amplitudenverteilung zur Überprüfung des Sollwinkels für zwei Referenz-Nuten. Die rote Linie entspricht dem Sollwinkel, (I) und (II) stehen für die beiden Schallrichtungen.

1.4 Fehlerisotropie

Ein eindimensionaler Referenzreflektor kann von zwei Schallseiten aus nachgewiesen werden. Beide Messungen sind voneinander unabhängig. Bei hoher Fehlergüte sind die Verstärkungen beider Schallrichtungen nach dem Abgleich nahezu identisch. Auftretende Verstärkungsunterschiede können durch ein unterschiedliches Reflexionsverhalten der Schallseiten des eingebrachten Referenzreflektoren selbst hervorgerufen werden.

In den meisten Fällen hängt die Anisotropie der Verstärkungswerte jedoch nicht direkt mit der eingebrachten Referenz zusammen, sondern ist durch eine unterschiedliche, richtungsabhängige Schallschwächung im Material zu erklären. Darüber hinaus spielen Verluste auf Grund einer unterschiedlichen Geometrie eine Rolle. Beispiele hierfür sind z.B. verschiedene Einkopplung ins Material, Koppelverluste auf Grund einer unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheit oder unterschiedliche Reflexionsverluste an der Rückwand im Falle eines Nachweises im Sprungabstand. Für das Gesamtreflexionsverhalten der Referenz sind diese Effekte zu berücksichtigen, vor allem, wenn die Einlegerichtung in der automatisierten Prüfung nicht kontrolliert wird.

2. Messsystem zur Fehlerevaluierung

2.1 Messaufbau

Der vorgestellte Messaufbau (siehe Abb. 5) ermöglicht eine Untersuchung rotationssymmetrischer Objekte wie z.B. Rohre und Stangen mit einer Länge von bis zu 8 m in einem Durchmesserbereich von ca. 60 mm bis 600 mm. Darüber hinaus besteht auch eine



Abb. 5. Foto des Messplatzes zur Zertifizierung von Referenzfehlern in rotationssymmetrischen Objekten: 1: Rollgang, 2; Lineareinheit; 3: Auswerteplatz

Umbaumöglichkeit hin zu kleineren Durchmessern bis ca. 20 mm. Als Referenzreflektor-Typen können damit u.a. Nuten, Seitenbohrungen oder Flachbodenbohrungen untersucht werden.

Der Messaufbau besteht aus einer Lineareinheit und einem Rollgang, mit dem die eingelegten Objekte um die Längsachse gedreht werden können. In dieser ist ein Matrixprüfkopf eingebaut, der mit einer USIP|xx-Elektronik [5] betrieben wird. Die SPS-Steuerung ermöglicht einen synchronisierten Vorschub mit einer Genauigkeit von 1 mm auch für Objekte mit großem Durchmesser.

2.2 Messprinzip

Zur Minimierung des systematischen Messfehlers wird auf einen Matrixkopf zurückgegriffen, der die vollständige elektronische Einstellung jedes beliebigen Schallwinkels ermöglicht. Somit können alle Messungen mit demselben Prüfkopf und mit derselben mechanischen Einstellung durchgeführt werden. Zur weiteren Reduzierung des Messfehlers werden die Objekte um die Querachse gedreht ("A zu B" und "B zu A"), wobei die Vorschubrichtung die gleiche bleibt. Pro Seite werden drei hochauflösende C-Bilder im 1 mm-Raster aufgenommen. Insgesamt werden somit für jede Schallseite der Referenz sechs Messpunkte aufgenommen. Die Genauigkeit der Messung wird durch den Einsatz der ShapeUT-Technologie Anwendung erhöht, welche neben der reinen Verzögerungsgesetzen die komplette Anregungsfunktion pro Element vorgibt [6].

3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden Beispiele erstellter Fehlerzertifikate aus durchgeführten Anlageabnahmen gezeigt. Diese beinhalten die Zusammenfassung der zuvor durchgeführten Messungen. In der Mitte ist das Polardiagramm zu sehen, welches die Überprüfung des Fehlerwinkels zulässt. Daneben sind für beide Schallseiten die C-Bilder des Fehlerbereichs und die daraus extrahierten Reflexionsprofile zu sehen. Die resultierenden Messgrößen zusammen mit der Verstärkungsdifferenz zwischen den Abgleichwerten beider Schallseiten sind in der Tabelle links zusammengefasst. Zur Veranschaulichung sollen drei verschiedene Fälle diskutiert werden.

In der ersten Abbildung (Abb. 6) handelt es sich um einen Referenzfehler hoher Güte. Die Schwankungen in den Reflexionsprofilen auf beiden Schallseiten liegen innerhalb von 1dB. Die Werte für die Fehlerhomogenität liegen um die 80% und damit nahe am theoretischen Limit [4]. Die effektive Länge wird nur durch die Flankensteilheit beeinflusst. Diese wiederum ist hier im Wesentlichen durch das Schallfeldprofil gegeben. Auch der Unterschied in den Verstärkungswerten ist sehr gering.

In Abb. 7 ist der Beispielfall eines homogenen Referenzfehlers zu sehen, der jedoch eine hohe Verstärkungsdifferenz von 2,2 dB zwischen den beiden Schallseiten aufweist. Der Wert übersteigt bereits die in diesem Fall geforderte Reproduzierbarkeit von 2 dB, weshalb es zum Farbumschlag kommt. Das bedeutet, dass Wiederholungsfahrten mit Drehung des Referenzrohres nicht für die Abnahmeprozedur der Anlage herangezogen werden können. Auf Grund der guten Reflexionsprofile an sich kann die Referenz allerdings verwendet werden, wenn auf die Einlegerichtung geachtet und separat ein neuer Abgleich für beide Richtungen ("A zu B" und "B zu A") erfolgt.

In Abb. 8 ist eine Referenz geringer Güte abgebildet. In dieser kommt es zu Einbrüchen von bis zu 3 dB innerhalb des Reflexionsprofils. Die Fehlerhomogenität fällt auf Werte unterhalb von 65% und die effektive 2dB Länge sinkt auf weniger als 60% der nominalen Länge. Der Farbumschlag signalisiert, dass in Wiederholungsfahrten mit hoher Geschwindigkeit die durch die Referenz selbst induzierte Amplitudenschwankung bereits im Bereich der eigentlich nachzuweisenden Genauigkeit für die Anlage liegt. Deshalb wurde im die Referenz im Rahmen der Abnahme nicht für die Auswertung herangezogen.

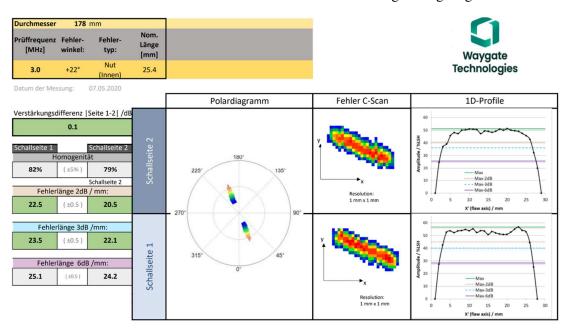


Abb. 6. Auszug eines Zertifizierungsprotokolls für einen Referenzfehler hoher Güte.

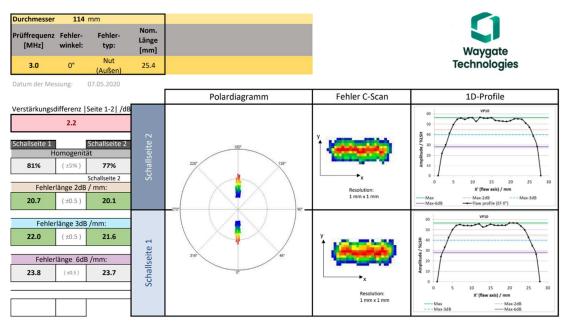


Abb. 7. Auszug eines Protokolls für einen Referenzfehler hoher Homogenität mit anisotroper Signalstärke beider Schallseiten. Der Farbumschlag signalisiert, dass die Referenz im vorliegenden Fall nicht für Wiederholungsfahrten mit Rohrdrehung verwendet werden kann.

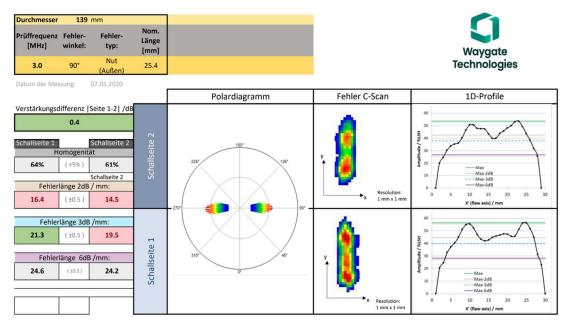


Abb. 6. Auszug eines Protokolls zur Fehlerzertifizierung für einen Referenzfehler verminderter Güte. Der Farbumschlag erfolgt auf Grund der von beiden Vertragsseiten für die Abnahme der Anlage abgestimmten Kriterien zur Berücksichtigung der Referenz im Rahmen der Abnahmeprozedur.

Neben der einmaligen Zertifizierung der Referenzen ist analog zum Vorgehen für Prüfköpfe ("Probe check") oder der Elektronik auch ein Screening über einen längeren Zeitraum sinnvoll, da die Güte der Referenzen mit der Zeit sinkt. In Abb. 9 ist ein Beispiel für die Degradierung der Fehlergüte zu sehen. Die obere Aufnahme stammt von der Eingangskontrolle eines Referenzrohres vor der Abnahmeprozedur, die untere wurde im Anschluss daran angefertigt. Im vorliegenden Fall konnte die signifikante Verschlechterung des Außenfehlers auf die ungünstige Führung des Rohres im Rollgang während der Abnahmefahrten zurückgeführt werden, welche zur mechanischen Beschädigung des Referenzfehlers geführt hat.

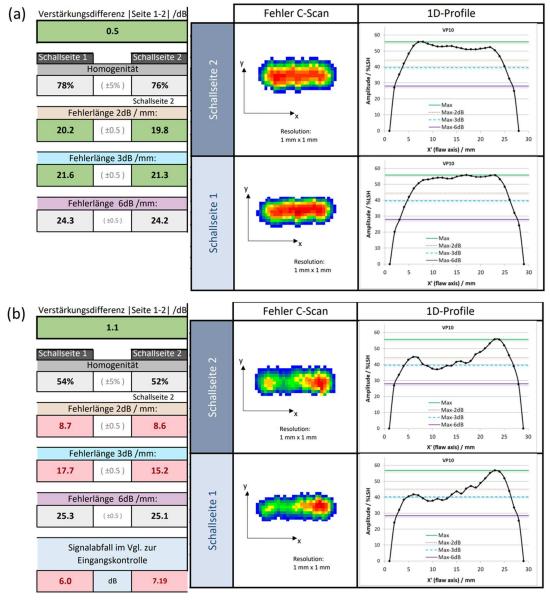


Abb. 9. Zertifizierungsprotokoll für einen Referenzfehler bei der Eingangskontrolle (a) und nach der Durchführung der Abnahmefahrten (b). Die signifikante Verminderung der Referenzgüte kam im vorliegenden Fall durch eine ungünstige Rohrführung im Rollgang zustande.

4. Zusammenfassung

Durch steigendende Anforderungen an die automatisierte Prüfung und die damit einhergehende Verbesserung der Prüfanlagen wird eine exakte Evaluierung der Güte der eingebrachten Referenzen immer wichtiger, um in Abnahmen oder Audits die wahre Leistungsfähigkeit der Prüfanlage entsprechend der Vorgaben nachzuweisen. Im vorliegenden Artikel werden die dazu notwendigen Messgrößen für Referenzfehler mit einer eindimensionalen Ausdehnung hergeleitet und ein Aufbau vorgestellt, der die benötigte Präzision zur Durchführung der Messungen gewährleistet. Das Konzept kann auch auf Referenzen mit einer zweidimensionalen Ausdehnung übertragen werden. Die präsentierten Zertifizierungsprotokolle veranschaulichen eine Möglichkeit der Dokumentation und Bewertung der erzielten Ergebnisse.

Das gesamte Verfahren wurde auf Basis eines großen Datensatzes verschiedener Referenzfehler und Abmessungsbereiche entwickelt und bereits mehrfach in der Praxis zur Unterstützung der Abnahmeprozedur eingesetzt. Die Möglichkeit einer vom eigentlichen Prüfsystem unabhängigen Bewertung der Referenzgüte stieß dabei in allen Fällen auf große Akzeptanz. Auch konnte die Robustheit des Verfahrens in der Vielzahl der durchgeführten Messungen hinlänglich bestätigt werden.

Waygate Technologies verfügt damit bereits über einen großen Erfahrungsschatz hinsichtlich der Evaluierung von Referenzreflektoren. Basierend auf diesen Erfahrungen wäre es wünschenswert, wenn das vorgestellte Konzept Eingang in gängige Normen finden würde. Es wäre ein Ansatz, die fehlende Lücke in der Standardisierung für die Ultraschallprüfung durch die Hinzunahme einer definierten Vorgehensweise zur Bewertung der Referenzgüte zu schließen.

Referenzen

- [1] Th. Würschig, Christof Breidenbach, Benjamin Hömske, Rene Pfortje, Stephan Falter, "Einfluss der Fehlercharakteristik auf die Reproduzierbarkeit von Prüfanlagen", DGZfP Jahrestagung 2018, Leipzig
- [2] K. Kapoor, K. Sunder Krishna, Shaik Allah Bakshu, "On Parameters Affecting the Sensitivity of Ultrasonic Testing of Tubes: Experimental and Simulation", J Nondestruct Eval (2016) 35:56
- [3] Th. Würschig, "Impact of the reference defect quality on the effective reflector size", Eingereicht bei Materials Testing, 2021
- [4] Th. Würschig, "Einfluss der Fehlergüte auf die effektive Fehlergröße", DGZfP Jahrestagung 2021
- [5] Waygate Technologies, "High-End Electronics Platform for Ultrasonic Testing Machine" Datenblatt BHCS38592, 10/2020
- [6] Th. Würschig, "Automatisierte Ultraschallprüfung von Nahtlosrohren mit Matrix-Arrays", DGZfP Frühjahrstagung 2018, Leipzig