

Einfluss der Fehlergüte auf die effektive Fehlergröße

Thomas WÜRSCHIG¹

¹ Baker Hughes Digital Solutions GmbH, Robert-Bosch-Str. 3, 50354 Hürth

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

Kurzfassung. Der Leistungsnachweis für automatisierte Prüfanlagen beruht auf der Detektion von künstlich eingebrachten Referenzfehlern, welche durch die gängigen Normen oder kundenspezifisch vorgegeben sind und die möglichen natürlichen Defekte nachbilden. Die Fehlergüte leitet sich dabei aus der Reflexionscharakteristik der Referenzfehler ab und hat bewiesenermaßen Einfluss auf die gemessene Reproduzierbarkeit.

Neben der Reproduzierbarkeit spielt für die automatisierte Prüfung die Fehlerausdehnung eine zentrale Rolle, weil diese sich linear im gewählten Schussabstand und damit in der Produktivität niederschlägt. Bei ausgedehnten Fehlern, die größer als die Schallfeldbreite sind, wird die Fehlergröße über die Halbwertsbreite bestimmt. Um den geforderten Reproduzierbarkeiten zu entsprechen müssen allerdings höhere Schwellen angewendet werden. Selbst im optimalen Fall ist damit die gemessene effektive Fehlergröße bereits kleiner als die mechanisch eingebrachte. Außerdem steigen die Anforderungen an die Homogenität der Referenzenfehler. Genaue Untersuchungen bezüglich der sich daraus ergebenden effektiven Fehlerlänge fehlen bisher jedoch.

Im Artikel werden die theoretischen Grenzen der effektiven Fehlerlänge in Abhängigkeit der geforderten Reproduzierbarkeit hergeleitet und mit Messdaten verglichen. In der empirischen Auswertung eines großen Datensatzes verschiedener Referenznuten zeigt sich ein universeller Zusammenhang zwischen der Fehlergüte und der erzielten effektiven Fehlergröße. Damit ist es möglich, Referenzfehler geringer Güte auszuschließen oder mit geringerer Prüfgeschwindigkeit zuzulassen. In der Praxis ist dies von großer Bedeutung, weil so die kosten- und zeitaufwendige Neuanfertigung von zusätzlichen Referenzen für die Abnahme oder das Audit umgangen werden kann.

1. Einführung

Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit automatisierten Ultraschallprüfanlagen ermöglicht u.a. den Nachweis von Defekten sowohl im Volumen wie auch an den Oberflächen. Das Verfahren beruht auf dem Vergleich der Prüfergebnisse mit denen von künstlich eingebrachten Referenzreflektoren, deren Geometrie durch Normen vorgegeben ist. Dazu ist ein vorheriger Abgleich der Anlage an ebendiesen notwendig. Die Einstellungen müssen nach einer gewissen Anzahl von Prüfzyklen und bei Prüfungsende kontrolliert werden.

Für die Fehlerprüfung ist die gemessene Amplitude des Ultraschallsignals relevant. Nuten repräsentieren dabei z.B. für die Rissprüfung [1], [2] einen typischen Referenzreflektor eindimensionaler Ausdehnung. Die vorgeschriebene Geometrie, d.h. Länge, Position und Orientierung der Nut, hängen vom jeweiligen Anwendungsfall und der damit angewandten Norm ab. Zur Absicherung einer 100% Nachweiswahrscheinlichkeit ist die



Prüfgeschwindigkeit so ausgelegt, dass der Defekt mindestens zweimal innerhalb der vorgegebenen Fehlerlänge getroffen wird. Wird ein idealer Reflektor angenommen so kann durch Wiederholungsmessungen die Genauigkeit des Prüfsystems ermittelt werden. Allerdings konnte bereits in einer früheren Arbeit gezeigt werden, dass die Güte der Referenz einen Einfluss auf die Messung hat [3].

Das Dilemma in der aktuellen Situation ist das Fehlen von Messgrößen anhand der eine Klassifizierung der Referenzgüte und damit verbunden ein Modus Operandi zum Umgang mit Referenzen verminderter Güte möglich ist. Im vorliegenden Artikel werden die Fehlerhomogenität und die effektive Länge als quantitative Größen zur Beschreibung der Referenzgüte eingeführt und in Zusammenhang gestellt. Die effektive Länge bestimmt maßgeblich die zu wählende Prüfgeschwindigkeit und damit den Durchsatz.

1. Messverfahren

1.1 Abgleich

Der Abgleich der Ultraschallprüfanlage basiert auf der Amplitudenmessung der am Referenzfehler reflektierten Ultraschallwelle. Die Messung erfolgt für alle relevanten Kanäle mit einem feinen Raster für den Schussabstand, um die Fehlerregion gut abzutasten. Typischerweise wird ein Schussabstand von 1 mm in beiden Richtungen gewählt. Für jeden Rasterpunkt wird die Amplitude gemessen und das Maximum aller Punkte mit einem Abgleichwert verglichen. Der resultierende Skalierungsfaktor wird als Korrekturverstärkung (in dB) auf den jeweiligen Kanal angewendet.

1.2 Verifizierung

Nach dem Abgleich muss das Ergebnis in einer erneuten Messung verifiziert werden. Das ermittelte Maximum darf sich nur in einem vorgegebenen Rahmen vom Abgleichwert unterscheiden. Die Abweichung spiegelt den systematischen Fehler der Amplitudenmessung wider. Die Verifizierung wird nach einer festgelegten Anzahl von Prüfzyklen wiederholt. Sollten die Abweichungen zu groß sein muss ein neuer Angleich durchgeführt werden.

1.3 C-Bild Aufnahme und Extrahierung des Reflexionsprofils

Werden alle Amplitudenwerte zusammen mit den Ortskoordinaten gespeichert, kann das Reflexionsverhalten der Referenz im C-Bild dargestellt werden (siehe Abb. 1). Im Falle eindimensional ausgedehnter Referenzen wie z.B. Nuten ist das Reflexionsprofil durch die Projektion auf die Fehlerachse gegeben. Die Koordinatentransformation entspricht einer Drehung um den negativen Fehlerwinkel. Jede Nut kann von zwei Seiten aus angeschallt werden, die jeweiligen Messungen der beiden Profile sind unabhängig voneinander.

1.4 Wiederholungsfahrten

Wiederholungsfahrten werden zur Anlagenabnahme und bei Audits durchgeführt. Sie entsprechen einer Reihe von Prüfläufen mit dem für den Abgleich verwendeten Referenzstück. Sie werden mit Produktionsgeschwindigkeit durchgeführt, um die Genauigkeit der Prüfanlage unter Produktionsbedingungen zu ermitteln. Als quantitatives Maß wird das Verhältnis von Maximal- und Minimalwert der Messreihe (in dB) ermittelt. Die Produktionsgeschwindigkeit ist so gewählt, dass der Reflektor mindestens zweimal innerhalb der nominellen Länge getroffen wird.

2. Charakterisierung von Referenzfehlern

Durch die Auswertung des Reflexionsprofils kann die Qualität der eingebrachten Referenz ermittelt werden. In dieser Arbeit wird der Fokus dabei auf zwei Messgrößen gelegt: die effektive Fehlerlänge und die Fehlerhomogenität. Darüber hinaus existieren noch weitere Kriterien, welche in einem anderen Beitrag genauer diskutiert werden [4].

2.1 Fehlerhomogenität

Die Fehlerhomogenität ergibt sich aus dem Flächenverhältnis des Reflexionsprofils oberhalb der 6dB-Schwelle und der einschließenden Rechteckfläche (siehe Abb. 1). Im Falle eines idealen Reflektors wird dieser Wert nur durch die Flanken des Schallfeldes bestimmt. Ist die Fehlerausdehnung im Vergleich zur Schallfeldbreite hinreichend groß ergeben sich Werte von deutlich über 80% (siehe auch Abb. 4). Inhomogenitäten im Reflexionsprofil führen zu einer Abminderung des Wertes womit eine quantitative Messung bzgl. der Fehlerqualität möglich ist. Weitere Details werden in Kapitel 3 diskutiert.

2.2 Effektive Fehlerlänge

Sofern die Ausdehnung des Referenzfehlers deutlich größer als die Schallfeldbreite ist, kann dessen Größe über die Halbwertsbreite (HWB), d.h. den zusammenhängenden Bereich mit Amplitudenwerten oberhalb von 50% des Profilmaximums, bestimmt werden. Dies entspricht einer Schwelle von 6dB. Für einen idealen Reflektor ist die HWB auf Grund der Schallfeldausdehnung etwas größer als die nominale Fehlerlänge. Wird die Schwelle weiter nach oben verschoben dann verringert sich auch die effektive Fehlerlänge (sieh Abb. 2). Stärkere Einbrüche im Fehlerprofil wirken sich auch auf hier die effektive Länge aus. Im Weiteren wird die effektive Fehlerlänge definiert als Summe aller Teilstücke innerhalb der HWB mit Amplitudenwerten oberhalb der gewählten Schwelle.



Abb. 1. Darstellung zur Berechnung der Fehlerhomogenität (FH).



Abb. 2. Darstellung der effektiven Fehlerlänge für einen Schwellwert von 1dB, 3dB und 6 dB unterhalb des Maximums. Im Falle einer hohen Fehlerhomogenität (FH) ist diese nur durch die Flanken bestimmt. Andernfalls können Einbrüche im Reflexionsprofil zu einer zusätzlichen Verringerung führen.

3. Theoretische Beschreibung

Das erhaltene Reflexionsprofil kann vereinfacht als Faltung des Schallfeldprofils mit dem eingebrachten geometrischen Profil der Referenz beschrieben werden. Für die weiteren Betrachtungen werden dabei ein Gaußsches Profil bzw. ein Rechteckprofil angenommen. Je nach deren Verhältnis können drei verschiedene Bereiche unterteilt werden [5]. Ist die Rechtecklänge (L_{nom}) kleiner als die Schallfeldbreite (SFB) ergibt sich ein verbeitertes gaußförmiges Reflexionsprofil (Bereich I). Liegt das Verhältnis zwischen 1 und ca. 2,2 (Bereich II), dann weicht die Form des Reflexionsprofils immer weiter von einer gaußschen Form ab. Sie kann in guter Näherung mit einer exponentiellen Potenzfunktion beschrieben werden, die zu einer Plateaubildung führt [6]. Liegt das Verhältnis über 2,2 (Bereich III) dann ändert sich die Form der steigenden und fallenden Flanke nicht mehr und es kommt nur zu einer Verbreiterung des Plateaus. An Abb. 3 ist jeweils ein Beispiel aus jedem Bereich gezeigt.

Basierend auf dem oben skizzierten Ansatz ist es möglich, theoretische Grenzen für die aus dem Reflexionsprofil ermittelte Fehlerlänge eines idealen Reflektors zu berechnen [5]. Ergebnisse für verschiedene Schwellen sind auf der linken Seite von Abb. 4 gezeigt. Auf



Abb. 3. Reflexionsprofil (rot) resultierend aus der Faltung eines gaußförmigen Schallfelds (blau gepunktet) mit einer Rechteckfunktion (blaue Linie) zur Approximation des eingebrachten Referenzfehlers. Die Flanken sind mit einer exponentiellen Potenzfunktion angepasst (grau gestrichelt). Gezeigt werden drei verschiedene Verhältnisse von nomineller Rechtecklänge (L_{nom}) und Schallfeldbreite (SFB):

(I) : $L_{nom}/SFB \le 1$, (II) : $1 \le L_{nom}/SFB \le 2,2$ und (III) : $L_{nom}/SFB > 2,2$



Abb. 4. Theoretische Limits für die effektive Fehlerlänge (links) und die Fehlerhomogenität (FH_{max}) in Abhängigkeit des Verhältnisses zwischen Rechtecklänge (L_{nom}) und Schallfeldbreite (SFB). Die errechnete effektive Länge für verschiedene Schwellen ist relativ zur Rechtecklänge dargestellt. Der dB-Wert entspricht der Absenkung der Schwelle in Bezug auf das Maximum. Der Bereich, in dem sich im Reflexionsprofil ein Plateau bildet (III) ist blau unterlegt.

der x-Achse ist dabei das Verhältnis von Rechtecklänge zu Schallfeldbreite aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Halbwertsbreite (6 dB-Schwelle) immer größer als die Rechtecklänge ist, wobei Abweichungen schnell gegen Null konvergieren und in Bereich III nur noch im Promillebereich liegen. Für höhere Schwellen liegen die Werte zum Teil deutlich unterhalb der Rechtecklänge. Zum Erreichen von 70% und 80% der Rechtecklänge muss diese im Falle der 1dB-Schwelle bereits um einen Faktor 3 bzw. 4,5 größer sein als die Schallfeldbreite.

Ebenso wie für die effektive Fehlerlänge können theoretische Grenzwerte für die maximal zu erreichende Fehlerhomogenität errechnet werden [5]. Die Resultate sind auf der rechten Seite in Abb. 4 zu sehen. Der kleinste Wert von ca. 62% ergibt sich für ein gaußförmiges Profil (Bereich I). Im Übergangsbereich (Bereich II) steigt dieser dann auf 71% an. In Bereich III werden bei klarer Herausbildung eines Plateaus deutlich höhere Werte erreicht. Ist die Rechtecklänge dreimal größer als die Schallfeldbreite ergibt sich ein Wert von 85%, welcher bei einem Verhältnis von 10:1 bis auf 95% ansteigt.



Abb. 5 Oben: Störung (gelb) im Rechteckprofil (blau) für verschiedene Schallfeldprofile (grau gepunktet). Unten: Auswirkung auf das Reflexionsprofil. Eine auf Grund der Normierung hervorgerufene Re-Skalierung ist durch den gelben Pfeil gekennzeichnet.

Zum Abschluss soll die Auswirkung von Störungen im Rechteckprofil betrachtet werden. Wichtigstes Kriterium für den Einfluss auf die ermittelte Homogenität ist die verbleibende Restlänge des ungestörten Teils. Ist diese größer als die Schallfeldbreite dann wirkt sich jegliche Störung direkt in einer Verringerung der Werte aus. Wird sie kleiner dann kann der Maximalwert nicht mehr erreicht werden (siehe Abb. 5). In diesem Fall ist zwar noch eine Auswirkung auf die Form des Profils erkennbar, Re-Skalierungseffekte können sich aber z.T. auch in einer Erhöhung der FH-Werte auswirken. Ab einem gewissen Punkt hat die Störung des Rechteckprofils keinen Einfluss mehr auf die Form, sondern nur noch auf die Profilhöhe. Es ergeben sich gaußförmige Profile mit einem FH-Wert von 62%.

4. Messergebnisse

Die hier vorgestellten Untersuchungen erfolgten mit vier verschiedenen Referenzrohren, die für eine Anlagenabnahme angefertigt wurden. Sie wiesen eine Länge von 8 m auf und lagen in einem Dimensionsbereich zwischen 114 mm und 273 mm im Durchmesser und Wanddicken zwischen 5,5% und 7,5% relativ zum Durchmesser. Alle Referenzrohre enthielten Nuten sowohl an der Innen- wie auch der Außenwand. Insgesamt wurden 64 Längsfehler, 64 Querfehler und 32 Schrägfehler mit Orientierungen zwischen 11° und 45° ausgewertet. Da die Messung beider Schallseiten unabhängig ist wurden somit in Summe 320 Nutprofile ausgewertet. Die Nutlänge betrug entweder ½ Inch (12,7 mm) oder 1 inch (25,4 mm), die Einbringtiefe lag bei 5% oder 10% der nominellen Wanddicke.



Abb. 7 Häufigkeitsverteilungen für die Abweichung der gemessenen Halbwertsbreite (L_{6dB}) von der nominellen Nutlänge (L_{nom}) und die Fehlerhomogenität verschiedener Fehlertypen: (a) Längsfehler, (b) Schrägfehler und (c) Querfehler. Die graue Linie zeigt den Mittelwert.



Abb. 8 Gemessene Reflexionsprofile höchster Fehlerhomogenität (FH) für (a) Längsfehler, (b) Schrägfehler und (c) Querfehler. Die roten Punkte entsprechen den Messwerten. Die rote Kurve beschreibt die beste Anpassung für das Reflexionsprofil, das für die Faltung verwendete Schallprofil ist grau gepunktet dargestellt. Die grüne Linie kennzeichnet die Schwelle 1dB unterhalb des Maximums.

Alle Messungen wurden an einem Teststand mit einem 3 MHz Matrixprüfkopf durchgeführt. Auf Grund der vollständigen elektronischen Einstellung aller Schallwinkel konnte somit eine hohe Vergleichbarkeit erreicht werden. Zur weiteren Verringerung des Messfehlers wurde die Messung für jedes Profil sechsmal wiederholt. Zur Ermittlung der Genauigkeit für die Amplitudenmessung wurden alle gemessenen Profilmaxima aus der Verifizierung herangezogen. Für deren Abweichung vom Abgleichwert ergibt sich eine gaußförmige Verteilung mit einer Standardabweichung von 0,2 dB, welcher als Messfehler angenommen werden kann. Er ist somit deutlich kleiner als der Abstand der höchsten ausgewerteten Schwelle (1dB unter Abgleichwert).

In Abb. 7 sind die Verteilungen der gemessenen Differenz der 6dB Fehlerlänge von der nominellen Fehlerlänge (links) sowie der Fehlerhomogenität (rechts) zusammengefasst. Offensichtlich ist, dass die besten Ergebnisse für die Längsfehler erzielt werden. Für die Querfehler zeigt sich neben der deutlich geringeren Fehlerhomogenität auch eine Aufsplittung der gemessenen Fehlerlänge hinsichtlich der Innen- und Außenfehler, welche höchstwahrscheinlich auf eine unzureichende Anpassung der Fehlereinbringung an die unterschiedliche Rohrkrümmung zwischen Innen- und Außenseite zurückzuführen ist.

Wie in Abb. 8 zu sehen werden im besten Fall für alle drei Fehlerarten sehr homogene Profile mit FH-Werten von über 80% erreicht. Schwankungen im Plateaubereich liegen innerhalb von 1 dB. Basierend auf dem in Kapitel 3 skizzierten Modell kann über die Anpassung der Profilflanken die Schallfeldbreite extrahiert werden. Sie liegt für alle drei Fehlertypen bei ca. 3.75 mm und damit um einen Faktor von 3,4 und 6,7 unterhalb der Nominallänge von ½ bzw. 1 Inch. Die dazugehörigen theoretischen Grenzwerte für die Fehlerhomogenität liegen bei 86% bzw. 93% (siehe Abb 4). In Abb. 9 werden zum Vergleich Beispiele von Reflexionsprofilen mit größeren Einbrüchen gezeigt.



Abb. 9 Beispiele von Reflexionsprofile für Nuten geringerer Fehlerhömogenität (FH).



Abb. 10 Darstellung der ermittelten effektiven Längen relativ zu Halbwertsbreite in Abhängigkeit der Fehlerhomogenität. L_x bezeichnet die effektive Länge bzgl. einer Schwelle "x" dB unter dem Maximum, womit L_{6dB} der Halbwertsbreite entspricht. Die Symbole stehen für den Mittelwert der Messreihe einer Nutseite, umgebende dünne Linien für Minimal- und Maximalwerte. Die rote Linie entspricht einer sigmoidalen Anpassungsfunktion. Die orangenen Linien zeigen die theoretischen Limits für 1 Inch-Nuten.

Die finale Zusammenfassung aller Messungen ist in Abb 10 zu sehen. Dort werden separat für verschiedene Schwellen die effektiven Fehlerlängen relativ zur Halbwertsbreite (y-Achse) in Abhängigkeit der Fehlerhomogenität (x-Achse) dargestellt. Jeder Datenpunkt entspricht einer Nutseite. Die orangene Linie symbolisiert die theoretische Grenze für Nuten einer Länge von 1 Inch. Wie erwartet konvergieren die Messwerte für hohe FH-Werte gegen diese Grenzen. Der Gesamtverlauf der effektiven Fehlerlänge in Abhängigkeit der Fehlerhomogenität kann durch ein Sigmoid beschrieben werden [5]. Die Varianz der effektiven Länge bei ähnlichen FH-Werten hängt von der genauen Form des Fehlerprofils ab. Da jedoch in der Praxis immer der schlechteste Fall von Bedeutung ist, erfolgt die Anpassung hinsichtlich der unteren Grenze.

Die Parametrisierung der in Abb. 10 visualisierte Anpassung kann verwendet werden, um eine Prozedur zum Umgang mit Referenzen verminderter Güte auszuarbeiten. In der Abnahmeprozedur oder bei Audits muss der Fehlernachweis in Wiederholungsfahrten mit Prüfgeschwindigkeit durchgeführt werden, wobei die maximal zulässige Schwankung der gemessenen Amplitudenwerte vorgegeben ist. Die Auslegung der Prüfgeschwindigkeit basiert darauf, dass die Referenz unter der Annahme eines idealen Reflexionsverhaltens mindestens zweimal innerhalb des Plateaus getroffen wird. Abweichungen vom Idealfall äußern sich zum einen durch Profileinbrüche unterhalb der durch die Prüfgenauigkeit geforderten Schwelle, anderseits durch eine verkürzte effektive Länge des Fehlers.

Um möglichst sicherzugehen, dass die Profileinbrüche nicht bereits im Bereich der geforderten Reproduzierbarkeit liegen, können zum einen Mindestvorgaben an die Fehlerhomogenität vorgegeben werden. Referenzen entsprechend geringer Homogenität würden damit für die Auswertung ausgeschlossen. Normalerweise ist in diesem Fall eine



Abb. 11 Extrahierte Reduzierungsfaktoren in Abhängigkeit der Fehlerhomogenität für verschiedene Vorgaben an die minimale effektive Länge (L_{min}) in Bezug auf die nominale Fehlerlänge (L_{nom}) . Die Ermittlung dieser Faktoren basiert auf der in Abb. 10 als roter Linie gekennzeichneten Anpassung. Die verschiedenen Kurven in den Diagrammen entsprechen jeweils der Auswertung bzgl. eines vorgegebenen Schwellwerts.

Nacharbeitung oder Neuanfertigung notwendig, welche sehr kostenintensiv und meistens im Rahmen der zeitlichen Frist sehr schwierig ist. Eine vielversprechende Alternative bietet deshalb die Einführung eines Reduzierungsfaktors für die anzuwendende Prüfgeschwindigkeit, der im ersten Schritt auf der Vorgabe einer minimalen effektiven Länge fußt. In Abb. 11 ist dieser in Abhängigkeit der Fehlerhomogenität für verschiedene Vorgaben gezeigt. Die minimal geforderte Länge ist mit der Aperturgröße und der zur Verfügung stehenden Überlappung der Prüfhelix verbunden. Die Wahl des Reduzierungsfaktors kann dann bezüglich einer geforderten Schwelle erfolgen. Es ist offensichtlich, dass diese höher liegen muss als die geforderte Reproduzierbarkeit um eine Aussage zu der Leistungsfähigkeit der Prüfanlage zu erhalten.

5. Zusammenfassung

Die effektive Fehlerlänge und die Homogenität des Reflexionsprofils ausgedehnter Fehler ermöglichen eine quantitative Messung der Fehlergüte. Mit dem vorgestellten Aufbau ist eine verlässliche Messung dieser Parameter an einem unabhängigen System hoher Genauigkeit möglich. Die prüfbaren Objekte können eine Länge von bis zu 8m und einen Durchmesser von bis zu 800 mm haben und sind damit typischerweise zu groß für herkömmliche Laborsysteme.

Die präsentierte Studie basiert auf einem großen Datensatz für Referenznuten. Die Zusammenfassung der Ergebnisse für verschiedene Fehlertypen (Längs-, Quer- und Schrägfehler) gibt einen ersten Einblick in die grundlegende Statistik des Herstellungsprozesses hinsichtlich der erzielten Fehlergüte. Die wichtigsten Erkenntnisse dieser Studie ergeben sich durch die Verknüpfung der effektiven Fehlerlänge mit der Fehlerhomogenität. Hier offenbart sich ein universelles Verhalten unabhängig von Rohrgeometrie, Nutposition (Innen- oder Außenfehler) oder Fehlerorientierung. Der Zusammenhang kann durch ein Sigmoid parametrisiert werden.

Durch die steigenden Anforderungen an die Genauigkeit der Prüfanlagen rückt die Fehlergüte der eingebrachten Referenzen immer mehr in den Blickpunkt. Auf Grund fehlender oder ungenauer Vorgaben in den Normen besteht das Dilemma aktuell dadrin, wie mit Referenzen verminderter Güte umgegangen werden soll. In diesem Kontext kann das vorgestellte Verfahren zur Implementierung eines Zertifizierungsverfahrens in Anlehnung an bestehende Prozeduren z.B. für die Prüfköpfe oder die Prüfelektronik herangezogen werden.

Durch die eingeführte Bewertung kann die Prozedur für die Anlagenabnahme oder Audits deutlich erleichtert werden. Es ermöglicht es die Vorgabe von Mindestanforderungen an die Fehlerhomogenität in Abhängigkeit der geforderten Reproduzierbarkeit für die Prüfanlage. Eine weitere interessante Möglichkeit ist die Herleitung eines Reduzierungsfaktors für die Prüfgeschwindigkeit der Abnahmefahrten im Falle von Referenzen mit verminderter Fehlergüte. Mit dieser Option kann die kostspielige und zeitaufwendige Neuanfertigung von zusätzlichen Referenzen umgangen werden kann.

Schlussendlich soll erwähnt werden, dass das präsentierte Konzept von ein- auf zweidimensional ausgedehnten Referenzreflektoren ausgedehnt werden kann. Außerdem kann es auch auf die Charakterisierung natürlicher Defekte übertragen werden.

Referenzen

- [1] DIN EN ISO 10893-10:2011, Automated full peripheral ultrasonic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections
- [2] API Spec 5CT:2016, "Specification for Casing and Tubing", American Petroleum Institute, 2016
- [3] Th. Würschig, Christof Breidenbach, Benjamin Hömske, Rene Pfortje, Stephan Falter "Einfluss der Fehlercharakteristik auf die Reproduzierbarkeit von Pr
 üfanlagen", DGZfP Jahrestagung 2018, Leipzig (NDT.net Issue: 2018-09)
- [4] Th. Würschig, "Vorstellung eines Verfahrens zur Zertifizierung von Referenzfehlern", DGZfP Jahrestagung 2021
- [5] Th. Würschig, "Impact of the reference defect quality on the effective reflector size", Eingereicht bei Materials Testing, 2021
- [6] Mineo, A. M., Ruggieri, M., "A software tool for the exponential power distribution: The normalp package.", Journal of Statistical Software, 12(4), 1-24, 2005