

Vergleich von Ultraschallprüftechniken zum quantitativen Fehlernachweis und zur Fehlergrößenbewertung

Friedhelm WALTE, Xuezheng LI
Fraunhofer Institut Zerstörungsfreie Prüfverfahren, IZFP,
Campus E 3.1, D- 66123 Saarbrücken

Kurzfassung. Es gibt eine Vielzahl von Ultraschallprüftechniken, die das Auffinden und das Bewerten von Materialungängen ermöglichen. Sie zeichnen sich durch unterschiedliche Aufnahme, Verarbeitung und Auswertung von Ultraschallsignalen aus und werden je nach Prüfanwendung, Prüfobjekt, Fehlerart und gültigen Prüfvorschriften eingesetzt.

Die Information über die Fehlergröße (insbesondere bei Rissen) befindet sich zum Einen in der Höhe und Breite der spiegelnden Ultraschallanteile und zum Anderen in der Differenz der Zeitsignale, wenn die Anzeigen aus den Nebenkeulen bewertet werden.

In der oft eingesetzten Schrägeinschallung mit Winkeln von 45°- 70° liegen die spiegelnden Ultraschallanteile nicht mehr im Empfangsbereich der Prüfköpfe, so dass nur die Nebenkeulen-Signale zur Bewertung vorliegen.

Zur quantitativen Fehlergrößenbewertung werden seit Jahren Techniken wie:

- ALOK mit Fehlerrandabtastung
- Impulsecho- B- Bild
- SAFT- Rekonstruktion aus IE- B- Bildern
- Phased Array- Sektorscan

eingesetzt, wobei in der jüngeren Vergangenheit noch die TOFD- Technik hinzukam.

Alle diese Techniken sind auf den Nachweis von Risspitzen angewiesen, die jedoch Anzeigehöhen liefern, die ca. 20- 30 dB unter denen der spiegelnden Anteile liegen und bei längeren Schallwegen durchaus in die Nähe des Rauschens kommen können.

Um diese Techniken sicher einsetzen zu können, ist es zunehmend wichtig die Entstehung der Risspitzen signale und ihre Abhängigkeit von den Prüfparametern:

- Wellenmode
- Frequenz
- Einschallwinkel
- Scan- Technik (Mäander- Scan, Linien- Scan (z. B. bei TOFD)

zu kennen.

Im vorliegenden Beitrag wird versucht diese Abhängigkeiten aufzuzeigen; dabei dienen analytische Berechnungen (GTD) und Simulationen mit dem CIVA- Code als Basis und werden durch Experimente ergänzt.

1. Einleitung

Um eine Aussage über die Fehlergröße machen zu können, die hinter einer Ultraschallanzeige steckt, muss im „Fehlersignal“, d. h. im primären A- Bild, diese Größe implizit enthalten sein.

Wo sitzt nun die Größeninformation, z. B. eines Risses, in der Ultraschallmessung? Zum einen in der Breite der Hauptkeule und zum anderen in der Interferenzstruktur der Nebenkeulen.

Wenn wir nun mit einem Impulsverfahren die Breite der Hauptkeule und die oszillatorische Struktur der Nebenkeulen abtasten, erhalten wir Laufzeitortskurven, die im Bereich der Hauptkeule einen Impuls und im Bereich der Nebenkeulen zwei Impulse zeigen. Letztere sind die isolierten Risspitzenanzeigen (Abb. 1).

Bei der oft eingesetzten Schrägeinschallung spiegeln die Hauptkeulen der Ultraschallprüfköpfe bei der Reflexion am Fehler weg, sodass nur der Nachweis über die Nebenkeulen = Riss- Spitzenechos übrig bleibt.

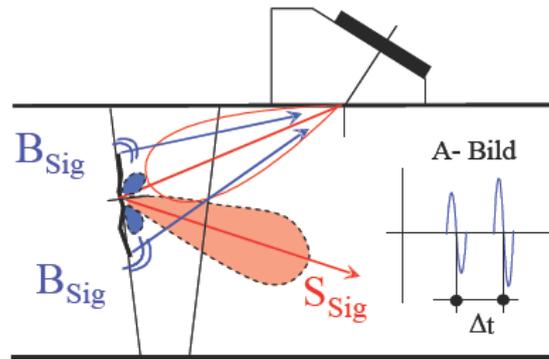


Abb. 1: Information über die Fehlergröße bei der Schrägeinschallung

2. Vergleich der Prüfverfahren

Im Folgenden werden die unten gelisteten Prüfverfahren untersucht und verglichen:

- a) Impulsecho mit B- Bildauswertung
- b) SAFT
- c) Phased Array mit Sektorscan
- d) Sampling Phased Array
- e) TOFD

Als Testkörper werden eine ebene Platte aus feinkörnigem Stahl (55 mm Wanddicke) mit einem angeschwungenen Riss (an der Spitze $\sim 5 \mu\text{m}$ breit, und $\sim 28 \text{ mm}$ tief) und eine ebene Platte aus austenitischem Grundmaterial (32 mm Wanddicke, Korngröße 50- 120 μm) mit funkenerodierten schräg liegenden Nuten verwendet (Abb. 2).

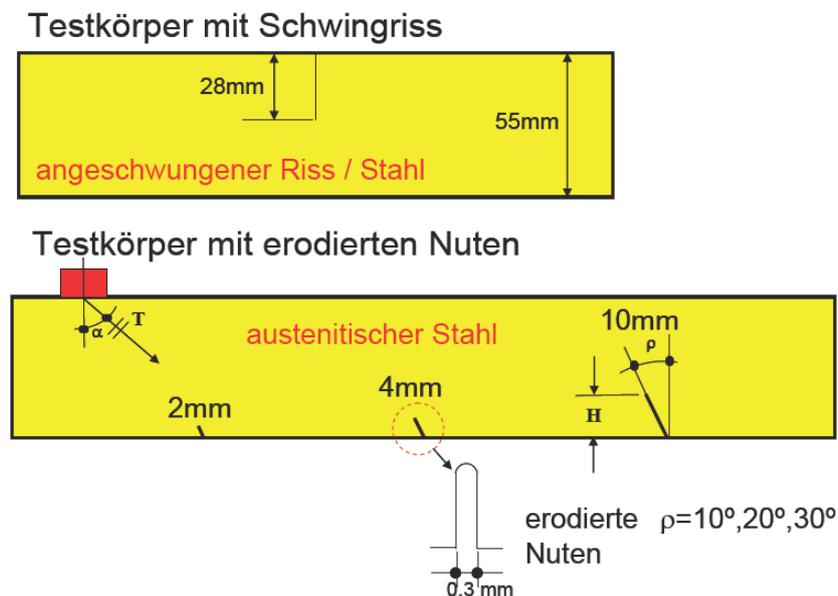


Abb. 2: Testkörper

Folgende Prüfparameter wurden eingesetzt:

- Impulsecho / SAFT: 45° T- Welle (8x9 mm) 4 MHz, optimaler Prüfkopf für Bauteile mit Wanddicken bis ~ 100 mm und mittlerer Schallschwächung.
- TOFD: 60° L- Welle (12,7 mm ϕ , 5 MHz, Schnittpunkt der akustischen Achsen = 2/3 Wanddicke nach DIN EN 583-6
- Phased Array: 45° L / T- Welle (16 Elemente, Elementabstand 0, 6 mm), 5 MHz
- Sampling Phased Array: 45° L- Welle (16 Elemente, Abstand 0, 6 mm), 5 MHz

3. Grundlagen der Simulationstechniken

Zum Verständnis der Phänomene bei der Reflexion von Rissen kann man die „Kirchhoffsche Beugungstheorie (KH)“ und die „Geometrical Theorie of Diffraction (GTD)“ einsetzen [1].

Basis von GTD ist die Beugung einer ebenen Welle an einer halbunendlichen Ebene, die schon von Maue [2] in den 50ziger Jahren formuliert und von Ogilvy und Temple [3] 1987 auf den elastodynamischen Fall adaptiert wurde.

Das Beugungsfeld ψ setzt sich aus dem Rissspitzen- Beugungskoeffizienten Γ , der vom Auftreffwinkel auf die Halbebene β , vom Beobachtungswinkel Φ , und den Wellenlängen der L-, T- und der Rayleighwelle abhängt und einer Zylinderwelle, die von der Kante (= Rissspitze) ausgeht, zusammen. GTD hat den Nachteil, dass die Beugungskoeffizienten für bestimmte Winkelbereiche Polstellen aufweisen, in denen die Werte gegen unendlich streben. Bei der T- Welleneinschallung unter $\sim 57^\circ$ können die Polstellen durch eine „uniform GTD“ Lösung von Chapmen [4] vermieden werden.

Abb. 3 zeigt den Beugungskoeffizient für eine, unter einem Auftreffwinkel $\beta = 80^\circ$, einfallenden T- Welle bei einem Beobachtungswinkel Φ von 0 – 360°. Für die T- Welle erkennt man deutlich neben dem spiegelnden Anteil bei $\Phi = 100^\circ$ und dem durchgehenden Anteil bei $\Phi = 260^\circ$ einen großen Beugungsanteil bei $\Phi \sim 57^\circ$ und einen kleineren Anteil bei $\Phi = 180^\circ$.

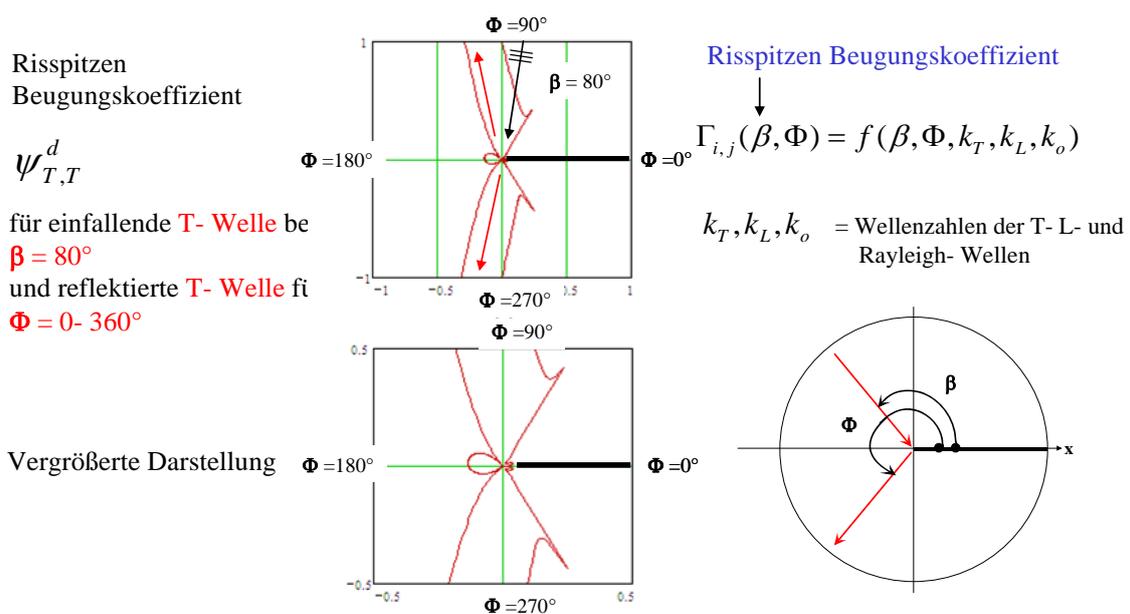


Abb. 3: Rissspitzenbeugung nach GTD

Für die L- Welle ergeben sich ähnliche Verhältnisse.

Um das Verhalten von flächigen Trennungen, also Rissen, modelliert durch einen großen streifenförmigen Fehler, zu berechnen, kann man die Rissspitzenreflexion von zwei halbumendlichen Ebenen betrachten. Die Ebene, die von der Bauteiloberfläche ausgeht modelliert die untere Rissspitze, die Ebene, die von der Bauteilrückwand ausgeht, modelliert die obere Rissspitze.

Für reale Prüfsituationen sind die Bauteile meist planparallel oder leicht gekrümmt und die Prüfköpfe erzeugen in erster Näherung eine Kugelwelle in Richtung Rissspitze, wobei von einem streifenförmigen Fehler eine Zylinderwelle reflektiert wird. Stellt man nun den Radius R des zylindrischen Prüflings als Funktion der Tiefenlage T, der Rissspitze und des Einschallwinkels α dar, ergibt sich für den Schalldruck, mit E = Echodurchlässigkeit an der Grenzfläche Prüfkopfkeil / Bauteil folgender Zusammenhang[1]:

$$P(\alpha) \cong \frac{1}{\lambda \cdot R} \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda \cdot R}} \cdot \Gamma \cdot E \quad \text{mit:} \quad R = T / \cos(\alpha) \quad \rightarrow \quad P(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{\lambda^3 \cdot T^3}} \cdot \cos(\alpha)^{3/2} \cdot \Gamma \cdot E \quad (1)$$

Abb. 4 zeigt die Rissspitzenreflexionsfaktoren für eine vorwärts reflektierte L- Welle (relevant für TOFD) und für eine rückwärts reflektierte T- Welle (relevant für Impulsecho).

Fazit: Obere Rissspitze

- T- Welle besser als L- Welle, insbesondere im interessanten Winkelbereich von 45°- 70°

Fazit: Untere Rissspitze

- T- und L- Welle nahezu gleich
- L- Welle zeigt keine Nullstellen

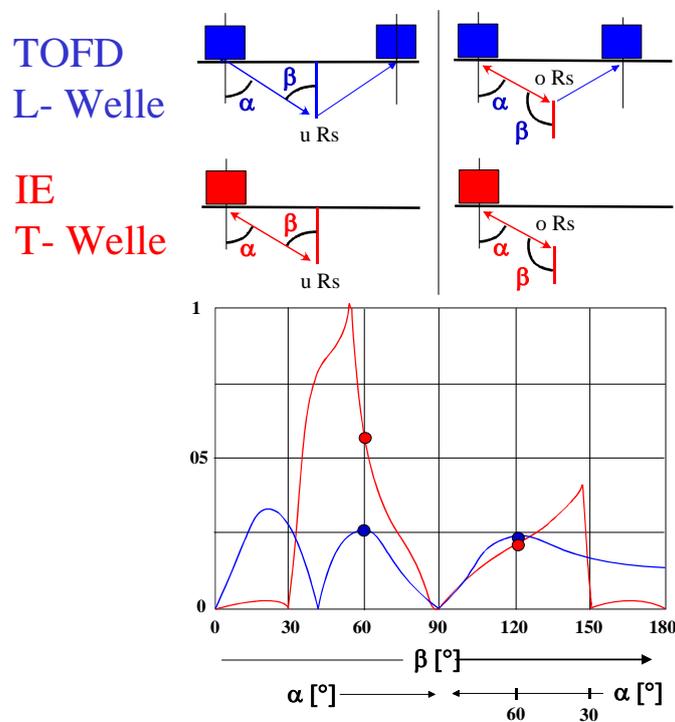


Abb. 4: Rissspitzenreflexionsfaktoren für Vorwärts- und Rückstreuung

Zusammenfassend kann man feststellen:

- Rissspitzen zeigen ausgeprägte Richtwirkungen. Die Kontrollparameter sind abhängig von β und Φ . Γ hängt nicht von der Frequenz ab.
- Für den Nachweis von unteren Rissspitzen eignet sich besonders die T- Welle; sie zeigt bei $\beta \sim 60^\circ$ einen besonders großen Beugungskoeffizient Γ .
- Für den Nachweis der oberen Rissspitze zeigen T- und L- Welle im wichtigen Auftreffwinkelbereich von $\beta \sim 60^\circ$ nahezu gleiche Werte für Γ .
- Ein Vorteil für die TOFD bezüglich des Nachweises von Rissspitzen ist nicht zu erkennen.

4. Simulationen mit der CIVA- Software

Mit der CIVA- Software [5, 6] können Ultraschallprüfungen simuliert werden. Modelliert werden der Sende- und Empfangsprüfkopf, das Bauteil und Fehler in Form von:

- a) Flächige Trennungen (Streifenmodel, Kreisscheibe) im Volumen
- b) Nuten ausgehend von den Bauteiloberflächen
- c) Voluminöse Reflektoren wie Kugel und Zylinder

Dabei bestehen folgende Optionen:

- (1) Berechnungen nach der „Kirchhoffschen Beugungstheorie“ (KH)
- (2) Berechnungen mit der „Geometrischen Beugungstheorie“ (GTD)
- (3) Berechnungen mit der „Bornschen Näherung“ (BN)

Für flächige Fehler im Volumen und für Nuten in der Nähe der spiegelnden Schallanteile wird KH eingesetzt, für Rissspitzen an den flächigen Fehlern und Nuten GTD. Für voluminöse Reflektoren BN.

4.1 Kirchhoff (KH)

Das Beugungsfeld (beschrieben als Potential Ψ der Teilchenauslenkung) ergibt sich aus der Überlagerung des einfallenden Feldes mit dem Beugungskoeffizient und dem Integral über die Fehlerfläche [7, 8]:

$$\Psi^{diff}(r', \omega) = \Psi^{inc}(r, \omega) \cdot B(\beta, \Phi) \cdot \int_F e^{i \cdot k \cdot x \cdot (\sin \beta - \sin \Phi)} dF \quad (2)$$

$\Psi^{diff}(r', \omega)$ = Beugungsfeld, $\Psi^{inc}(r, \omega)$ = Einfallendes Feld, $B(\beta, \omega)$ = Beugungskoeffizient
 r = Abstand Sender- Fehler, r' = Abstand Fehler- Aufpunkt, k = Wellenzahl, β = Auftreffwinkel auf den Fehler, Φ = Beobachtungswinkel, x = Ortskoordinate auf dem Fehler, F = Fehlerfläche.

Durch Einführung des Prüfkopfspektrums $H(\omega)$ kann man über eine Fouriertransformation auch Zeitsignale berechnen:

$$S(t) = FFT \left\{ \Psi^{diff}(r', \omega) \bullet H(\omega) \right\} \quad (3)$$

4.2 Geometrische Beugungstheorie (GTD)

Das Beugungsfeld ergibt sich aus der Überlagerung des einfallenden Feldes mit dem Rissspitzenbeugungskoeffizienten Γ und der Ausbreitungsfunktion der Zylinderwellen [7, 8]:

$$\psi^{diff}(r', \omega) = \psi^{inc}(r, \omega) \cdot \Gamma(\beta, \Phi) \cdot e^{-i \cdot k \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{r}} \quad (4)$$

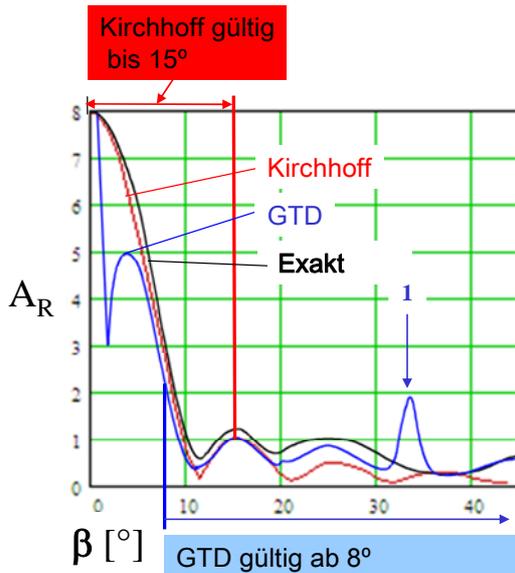
Das Zeitsignal ergibt sich wieder aus der Fouriertransformation wie in (3) [9].

KH und GTD sind Hochfrequenz- Näherungslösungen, bei denen die durch das einfallende Feld erzeugte (crack opening displacement, COD) Teilchenauslenkung auf der Rissfläche durch eine plausible Annahme für das Fernfeld spezialisiert wurde. Für eine exakte Berechnung des Beugungsfeldes muss das COD über eine Integralgleichungs- Methode berechnet werden. Abb. 5 zeigt einen Vergleich von KH, GTD und einer exakten Lösung [9] für einen kreisförmigen Fehler mit 5 mm Durchmesser bei einer Anschallung mit einer ebenen harmonischen 2 MHz Ultraschallwelle.

Man erkennt, dass bis zu einem Schräglagenwinkel des Fehlers von $\sim 10^\circ$ KH gut mit der exakten Lösung übereinstimmt. Bei größeren Schräglagenwinkeln stimmt GTD besser mit der exakten Lösung überein. Das bedeutet, dass flächige Fehler und Nuten an der Bauteilrückwand, die überwiegend die spiegelnden Ultraschallanteile nutzen, mit KH zu simulieren sind. Flächige Fehler, die schräg zum Schallfeld liegen sind besser mit GTD zu simulieren.

Rückgestreute Amplitude A_R für eine Kreisscheibe bei einer auftreffenden ebenen Welle

D_R = Durchmesser Kreisscheibe 5 mm
 R = Radius Testkörper = 200 mm
 B = Bandbreite (relativ) Anregungsimpuls 100 %
 Frequenz 2 MHz



1) Polstelle für GTD bei $\beta = 33^\circ$

Fazit:

→ Kirchhoff ok bis $\sim 15^\circ$, jedoch Minima zu tief

→ GTD ok ab $\sim 8^\circ$ mit Ausnahme Polstelle, zeitlicher Abstand Δt stimmt mit der exakten Theorie von Chapman überein

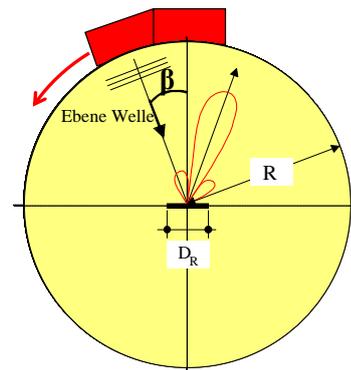


Abb. 5: Vergleich von KH, GTD und einer exakten Theorie, 1) Polstelle

5. Experimente und Simulationen.

Der Vergleich wurde mittels CIVA- Simulationen, gestützt durch Experimente, durchgeführt.

5.1 Angeschwungener Riss 28 mm tief.

Verglichen wurden: IE- B- Bild, SAFT und TOFD. Die Ergebnisse für diesen relativ großen Fehler in einem feinkörnigen Werkstoff sind recht eindeutig (Details in [10]):

- Die CIVA- Simulationen stimmen bis auf +/- 2 dB gut mit den Experimenten überein
- Das Rissspitzen- Echo liegt ~ 36 dB unter dem Winkelspiegeleffekt- Echo, siehe Abb. 6
- Gemessenes Signalrauschverhältnis für die Rissspitze:
 - IE 4 MHz 45° T- Welle → S/R = 15 dB
 - TOFD 5 MHz 60° L- Welle → S/R = 16 dB
 - IE- 4 MHz 45° T- Welle SAFT → S/R = 20 dB

Fazit: Für große senkrechte Risse in feinkörnigem Stahl zeigen alle drei Verfahren ein, bezogen auf die Wellenlänge, ausreichendes Nachweisvermögen.

Liegen die Risse jedoch schräg (z. B. in Flankenrichtung bei Schweißnähten) ergeben sich andere Verhältnisse. Abb. 7 zeigt eine CIVA- Simulation für Risse im Volumen mit Schräglagen von +/- 20°. Dabei liegt jeweils der obere Rissanfang symmetrisch zur TOFD-Prüfkopfanzordnung. Abb. 7 zeigt, dass, für die obere Rissspitze, die Vorwärtsstreuung (TOFD) weniger stark von der Schräglage abhängt als im Fall von IE mit T- Wellen, wobei die Amplituden bei IE- T größer sind. Bei negativen Schräglagenwinkeln (- ρ) kommt bei IE immer mehr der spiegelnde Anteil zum tragen (bei TOFD gibt es keinen spiegelnden Anteil), bei positiven Schräglagenwinkeln (+ ρ) kommt bei IE (für die untere Rissspitze) der größere Rissspitzenreflexionsfaktor zum tragen, Abb. 7. Das bedeutet, dass für schrägliegende große Risse die IE- Technik deutlich im Vorteil ist.

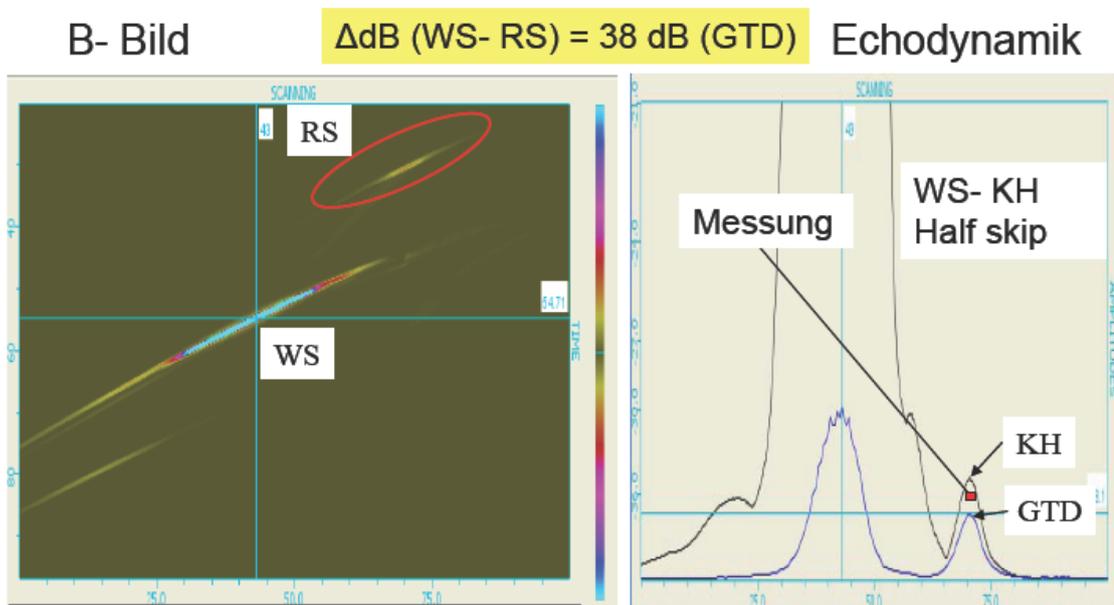


Abb. 6: CIVA- Simulation für IE 45° 4 MHz-T- Welle

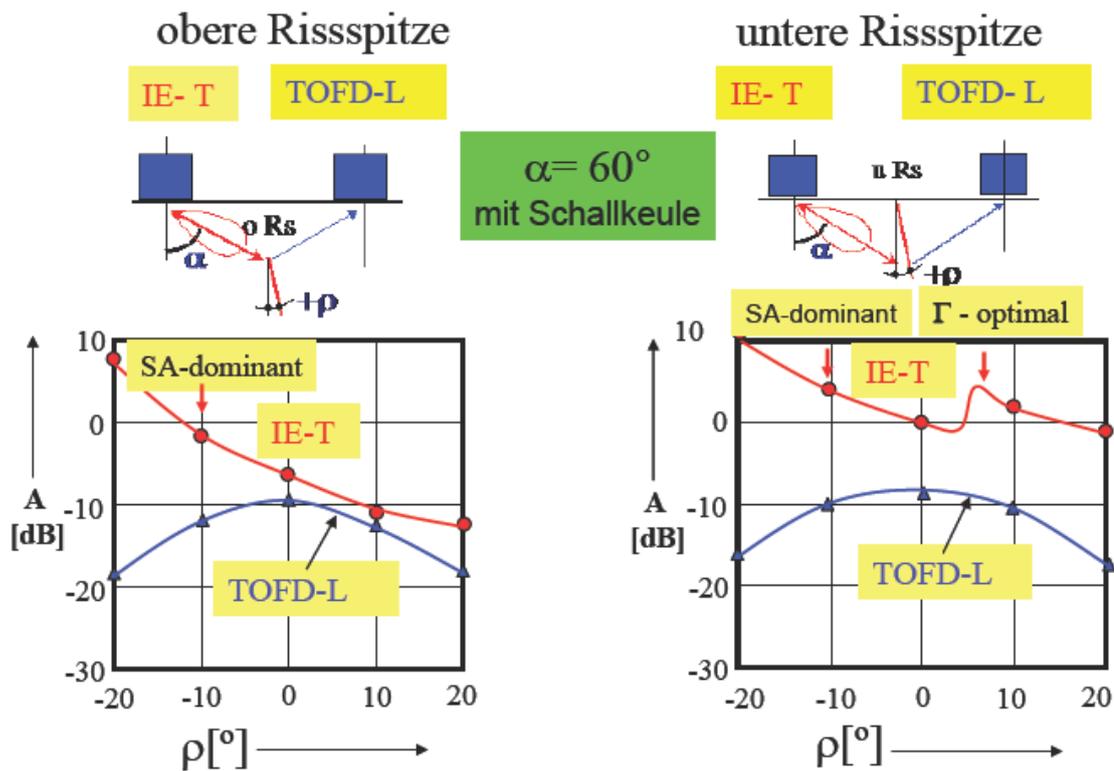


Abb. 7: Schräglagenabhängigkeit

5.2 Funkenerodierte Nuten mit Schräglage.

Zur Klärung der Frage, wie sich die Nachweisbarkeit der verschiedenen Prüfverfahren für Risse mit geringer Tiefe ändert, wurde ein Testkörpersatz mit funkenerodierten Nuten (Tiefe: 2, 4 und 10 mm, Nutbreite 0,3 mm mit gerundeter Spitze, Schräglage: 10° , 20° und 30° , Material: austenitisches Grundmaterial, mittlere Korngröße $\sim 100 \mu\text{m}$, siehe Abb. 2) eingesetzt.

Experimentell untersucht wurden die Ultraschallverfahren:

- Impulsecho mit B- Bildauswertung, 4 MHz- 45° T- Welle
- SAFT, mit Daten aus a)
- Phased Array mit überlagerten Sektorscan (Compoundscan), 5 MHz- 45° T- Welle
- Phased Array mit überlagerten Sektorscan (Compoundscan), 5 MHz- 45° L- Welle
- Sampling Phased Array, 5 MHz- 45° - L- Welle
- TOFD, 5 MHz, 60° L- Welle

dabei wurde für a) und zusätzlich für IE mit der L- Welle Simulationen durchgeführt.

Abb. 8 zeigt die Impulsechoprüfung mit 45° T- Wellen und die zugehörige SAFT-Rekonstruktion für 10° schrägliegende Nuten. Der Fehlernachweis gelingt mit gutem Signalrauschabstand. Für die 4 und 10 mm tiefe Nut sind auch die Rissspitzenechos zu erkennen, d. h., dass eine Größenbestimmung gegeben ist. SAFT zeigt mit 20 und 11 dB für die 10 und 4 mm Nuten einen etwas höheren Signalrauschabstand als die IE- B- Bild Prüfung mit 12 und 8 dB.

Abb. 9 zeigt eine Prüfung mit der Phased Array – Compound Scan Technik mit T- Wellen. Auch hier sind neben den Winkelspiegelechos für die 4 und 10 mm tiefe Nut die Rissspitzenechos erkennbar, für die 2 mm tiefe Nut ist kein Rissspitzenecho erkennbar. Die Signalrauschabstände für die Rissspitzenechos betragen für die 10 und 4 mm Nuten 15 und 12 dB.

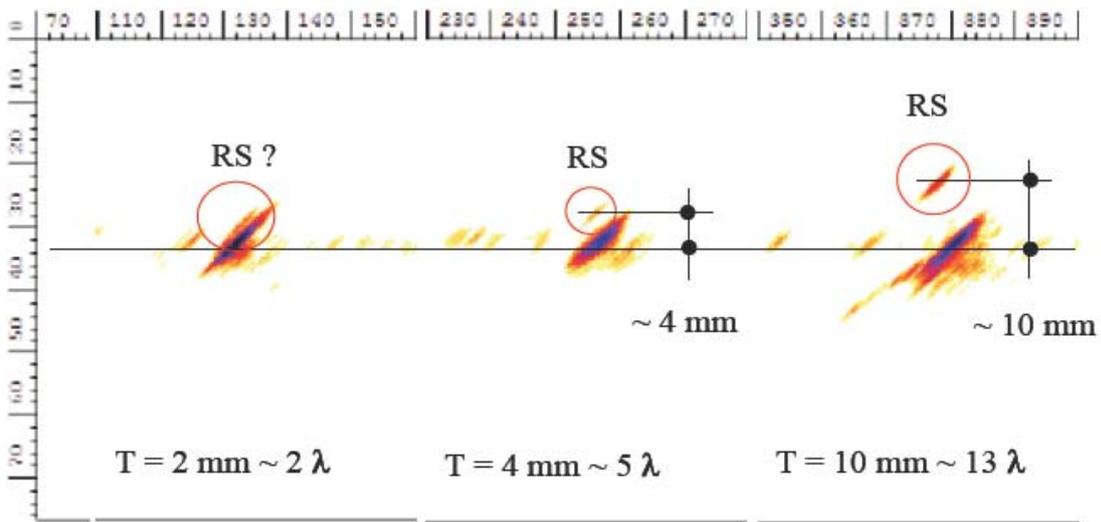
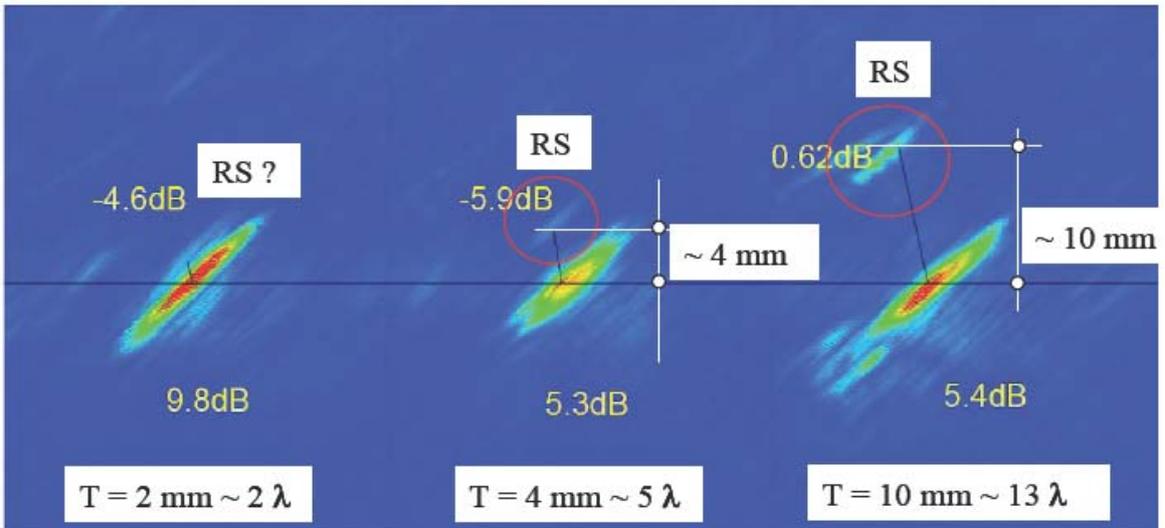


Abb. 8: oben: IE 4 MHz- 45°- T- Welle, 10° Schräglage, unten SAFT- Rekonstruktion

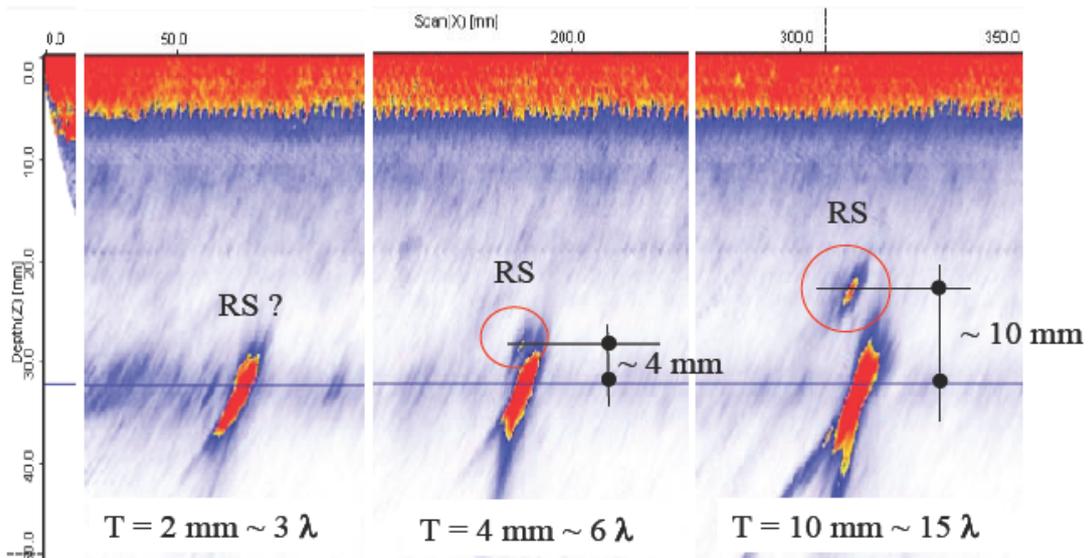


Abb. 9: 5 MHz-45°- T- Welle Phased- Array Compoundscan, 10°

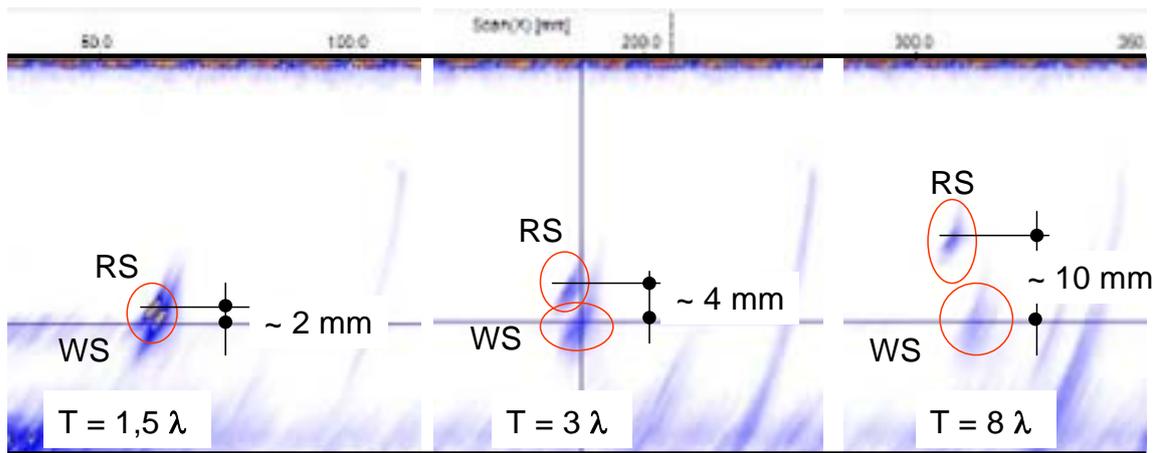


Abb.10: 5 MHz-45°- L- Welle Phased- Array Compoundscan 20°

Abb. 10 zeigt eine Prüfung mit der Phased Array – Compound Scan Technik mit L-Wellen. Die Winkelspiegelechos der L- Welle sind deutlich kleiner als bei der T- Welle; dies ist aus der Theorie des Winkelspiegeleffektes bekannt. Interessant ist, dass die Winkelspiegelechos, zumindest bei schräg liegenden Nuten, mit abnehmender Nuttiefe größer werden, und dass auch das Risspitzenecho für die 2 mm tiefe Nut erkennbar ist. Auf Grund des schlechteren Winkelspiegeleffekts der L- Welle liegen die Amplituden des Winkelspiegelechos und des Risspitzenechos nahezu in der gleichen Größenordnung und werden getrennt dargestellt. Der S/R- Abstand liegt bei 17; 17,5 und 15,5 dB für die 10, 4 und 2 mm Nut. Im Fall der T- Welle (Abb.9), deren Risspitzenecho im Mittel ~ 35 dB unter dem Winkelspiegelecho liegt, wird das Risspitzenecho überlagert und ist nicht trennbar.

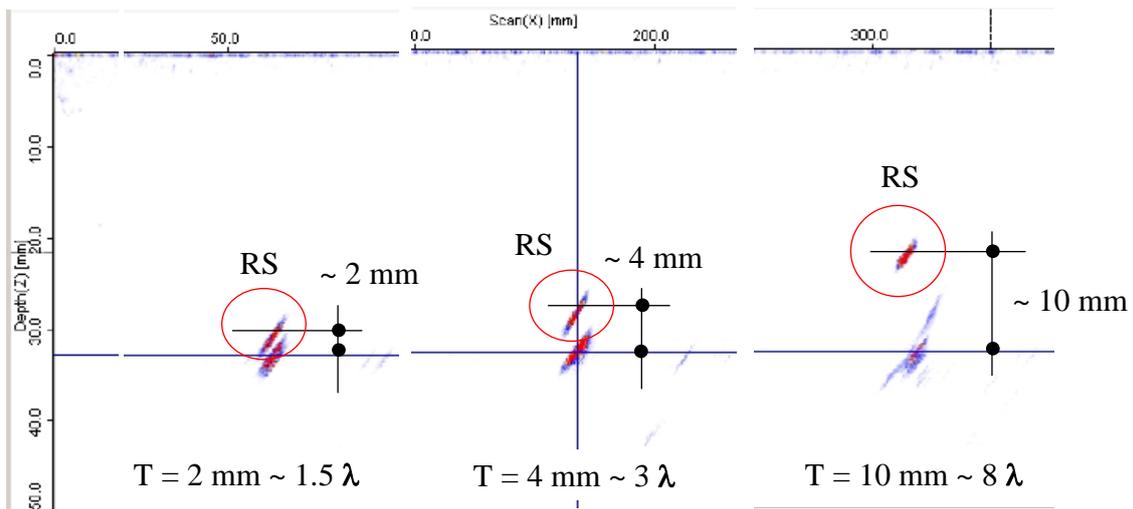


Abb. 11: 5 MHz-45°- L- Welle Sampling-Phased- Array Technik, 10°

Abb. 11 zeigt die Prüfung mit der Sampling Phased Array- Technik. Winkelspiegelechos und Risspitzenechos sind für alle Nuten deutlich erkennbar. Die S/R – Abstände sind hier ungewöhnlich groß und liegen für alle Nuten bei ~ 30 dB.

Der Grund liegt vermutlich in der Ausnutzung der vollständigen Informationsmatrix die, im Gegensatz zur Phased Array- Compound- Scan Technik, welche 16 Messwerte liefert, für jedes Volumenelement 256 Messwerte bereitstellt.

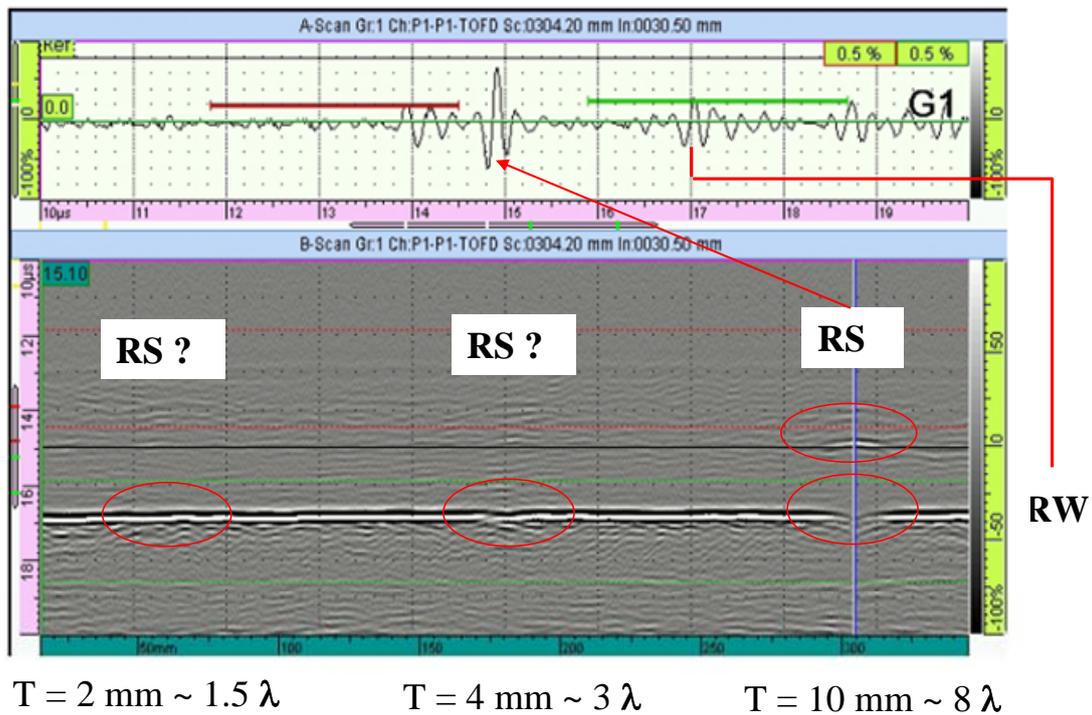


Abb. 12: Prüfung mit der TOFD- Technik

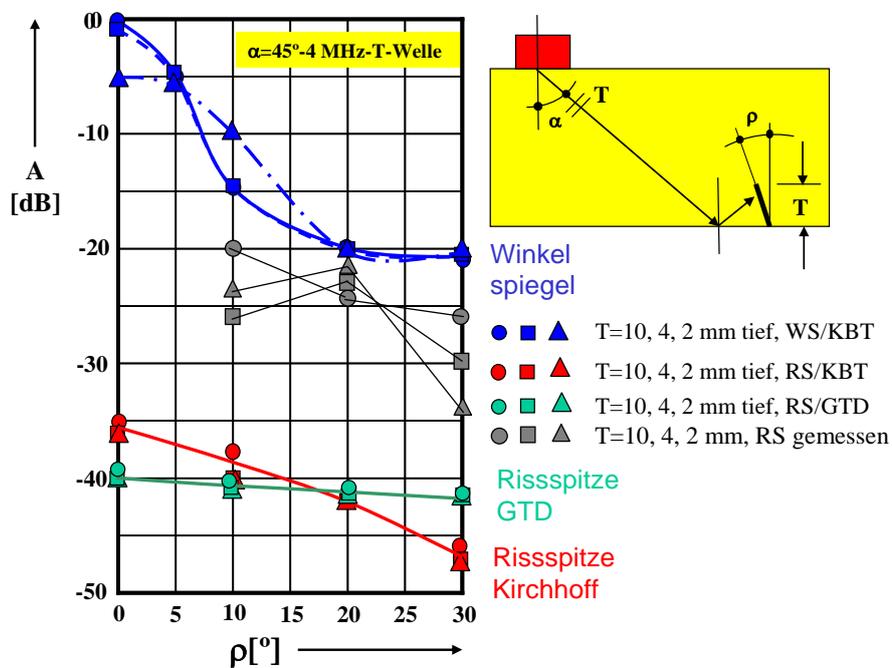


Abb. 13: CIVA- Simulation für IE- 4 MHz (8 x 9 mm), 45° T- Welle mit KBT über 1/2 Sprung und GTD

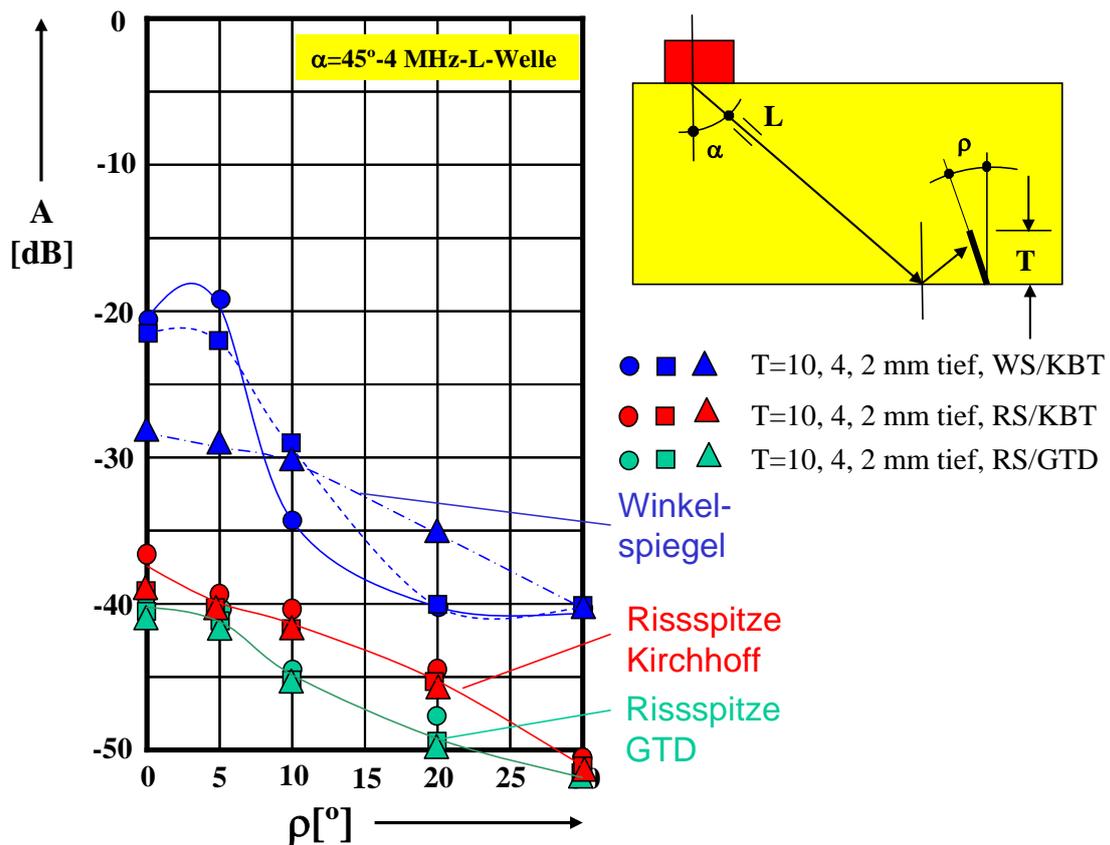


Abb. 14: CIVA- Simulation für IE- 4 MHz (8 x 9 mm), 45° L- Welle mit KBT über ½ Sprung und GTD

Die Ergebnisse der TOFD- Technik sind in Abb. 12 angegeben. Die Spitze der 10 mm tiefen Nut ist deutlich mit einem S/R- Abstand von ~ 16 dB zu erkennen. Die Spitze der 4 mm Nut ist nur sehr schwierig zu erkennen. Die 2 mm Nut ist gar nicht erkennbar. Dies liegt daran, dass die Tote Zone nach DIN EN 583-6 bei ~ 2 mm liegt.

Zusätzlich zu den Experimenten wurde die Impulsecho- Prüfung mit 4 MHz, 45° T- und L- Welle mit CIVA simuliert.

Abb. 13 und 14 zeigen die Ergebnisse:

T- Welle:

- Die Amplitude des Winkelspiegelechos (WS) fällt um 20 dB für eine Schräglage ρ von 0°- 30°.
- Die mit CIVA simulierten RS-Echos liegen ~ 35- 45 dB unter den WS- Echos.
- Die gemessenen Nutspitzenechos liegen jedoch nur ~ 20- 30 dB unter den WS- Echos. Dies liegt daran, dass die Nutspitze gerundet ist und wie eine kleine Zylinderbohrung wirkt.

L- Welle:

- Die Amplitude des WS- Echos bei einer L- Welle liegt ~ 20 dB unter der Amplitude des WS- Echos bei einer T- Welle.
- Die RS- Echos liegen 20- 30 dB unter den WS- Echos, aber in der gleichen Größenordnung wie bei einer T- Welle.

6. Zusammenfassung:

- Für senkrecht orientierte Risse $> \sim 6 \lambda$ in feinkörnigen Werkstoffen zeigen alle untersuchten US- Techniken ein ausreichendes Nachweisvermögen.
- Für Anrisse ausgehend von der Bauteilrückwand mit Größen von $\sim 4-6 \lambda$ ist ein Fehlernachweis ebenfalls mit allen US- Techniken gegeben.
- Eine Fehlergrößenbestimmung für Anrisse mit einer Größe $< 2-3 \lambda$ war jedoch nur mit dem Phased Array- Compoundscan mit einer L- Welle und mit dem Sampling Phased Array mit einer L- Welle möglich.

Referenzen

- [1] R. K. Chapman. An integrated model of ultrasonic NDT and its practical application. CEGB Report No. OED/STN/87/20102/R/PER/MWG/NDT/P (87) 63
- [2] A. W. Maue, Die Beugung Elastischer Wellen an der Halbebene. Z. Angew. Math. Mech., 1953, 33, 1-10
- [3] J. A. Ogilvy, J. A. G. Temple, Diffraction of elastic waves by cracks: application to time – of- flight inspection. Ultrasonics, November 1983
- [4] R. K. Chapman, CEGB Report No OED/STN/87/20106/R, 1987
- [5] M. Darmon, S. Chatillion, S. Mahaut, L. J. Fradkin, A. Gautsen. Simulation of disoriented flaws in TOFD technique configuration using GTD approach. Review of QNDE Vol. 27, p 155- 162
- [6] More information may be found at <http://www-civa.cea.fr>
- [7] R. K. Chapman. A system model for the ultrasonic inspection of smooth planar cracks. Journal of Nondestructive Evaluation, Vol 9, No. 2/3, 1990
- [8] Civa 9 Training- Handbook. CEA, LIST, Cenrte de Saclay
- [9] G. A. Georgiou, M. Blackmore, R. K. Chapman, D. Firth. The application of the Geometrical Theory of Diffraction to model pulsed ultrasonic inspection: A system model. British Journal of NDT, Vol 31 No. 10 October 1989
- [10] Xuezheng Li. Dissertation (in Vorbereitung)