

Einsatz der Phased Array-Technik und Auswertung nach der AVG-Methode

F. WALTE*, R. MARKLEIN**, R. BOEHM***

*Fraunhofer IZFP, Campus E 3.1, 66123 Saarbrücken

**Universität Kassel, Mönchebergstraße 19, 34109 Kassel

***BAM, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

Kurzfassung. Durch die rasante Entwicklung in der Elektronik und Computertechnik ist die Phased Array-Technik heute klein, handlich und preiswert geworden und erhält immer mehr Einzug in die tägliche Prüfpraxis. Nach geltenden Ultraschallnormen muss man die Ultraschallanzeigen entweder nach der Vergleichskörper- oder nach der AVG-Methode bewerten. Die Vergleichskörper-Methode ist mit den verfügbaren Phased Array-Geräten und -Prüfköpfen anwendbar. Bei einer Bewertung nach der AVG-Methode gibt es jedoch noch einige Probleme, die nicht ohne Anpassungen überwindbar sind. Winkelprüfköpfe weisen eine einschallwinkelabhängige Sendeamplitude und Empfindlichkeit auf. Bei Prüfköpfen mit festen Einschallwinkeln, z. B. 45° , 60° oder 70° , den sogenannten Festwinkelprüfköpfen, wird dieser Effekt jedoch durch die Justierung – z. B. am Viertelkreis des Kontrollkörpers K1 – kompensiert, sodass der Prüfer diesen Effekt nicht extra zu berücksichtigen braucht. Bei Phased Array-Prüfköpfen ist neben den Geometrie- und Materialparametern die Ansteuerung entscheidend für das Schall- bzw. das Empfindlichkeitsfeld. Wollte man vorgehen, wie bei Festwinkelprüfköpfen, dann müsste für jede (geeignete) Steuerungszeitbelegung, also für jeden Einschallwinkel, eine eigene Justierung vorgenommen werden. Da die Einflüsse der Geometrie, der Phasen- bzw. Zeitsteuerung und auch des Spektrums des akustischen Impulses bekannt sind, können die AVG-Kurven mithilfe geeigneter Modelle berechnet werden, sodass die Empfindlichkeitsjustierung mit nur einem Einschallwinkel auf alle anderen rechnerisch übertragen werden kann. Über die ausschließliche Änderung des Einschallwinkels hinaus könnte diese Vorgehensweise im Prinzip auch bei anderen beliebigen Schallfeldsteuerungen, z. B. ein- oder zweiachsig fokussierende Steuerung, angewendet werden, was hier jedoch nicht vertieft wird. Jedoch ist schon allein die Berechnung der Winkelabhängigkeit bei Phased Array-Prüfköpfen bei der Vielzahl der Parameter, wie z. B. Frequenz, Keilwinkel, Anzahl der Array-Elemente und Abstand der Elemente, keine einfach zu lösende Aufgabe. Aufgezeigt werden einfache analytische Rechnungen für die Schallfelder von Phased Array-Prüfköpfen und Amplitudendynamiken für z. B. Kreisscheibenreflektoren als gängige Referenzreflektoren mit dem Ziel, die notwendigen Korrekturen zu bestimmen, bzw. festzustellen, welcher Fehler entsteht, wenn keine Korrekturen vorgenommen werden. Verifiziert werden diese einfachen Rechnungen durch Simulationen mit einer Punktquellensynthese, mit EFIT und durch Experimente. Wird sinnvollerweise die Vielfalt der Einschallwinkel des Phased Array-Systems genutzt, kann und wird dies in der Regel zu größeren Ersatzfehlergrößen führen als bei einer Prüfung nach Norm. Die Ursache und die daraus entstehende Problematik für die Bewertung werden ebenfalls im Beitrag diskutiert.

1. Analytische Berechnungen

Um Aussagen über eine AVG-Bewertung beim Einsatz von Winkelprüfköpfen zu machen, muss man zunächst (zumindest für das Fernfeld) Richtcharakteristiken und vor allem die

Abstandsabhängigkeit im Schallfeld berechnen. Nach /1/ ist das grundsätzliche Vorgehen bekannt (siehe Abb. 1). Für Phased Array-Prüfköpfe kann man analog vorgehen. Alle weiteren Berechnungen werden nur für Phased Array-Prüfköpfe mit einem Winkelschwenk ohne Fokussierung gemacht.

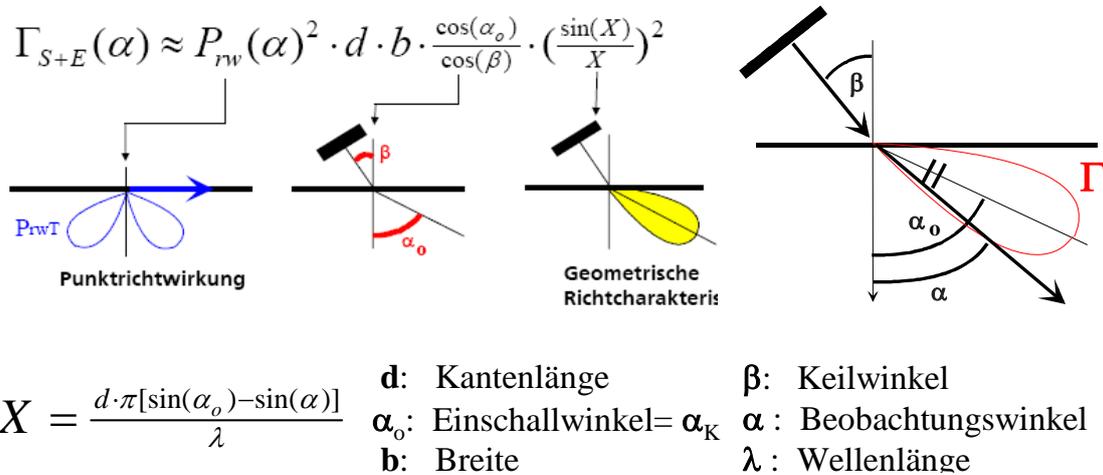


Abb. 1: Richtcharakteristik eines Festwinkelprüfkopfes (multipliziert mit der Schwingerfläche $F = d \cdot b$) für den Impuls-Echo-Fall.

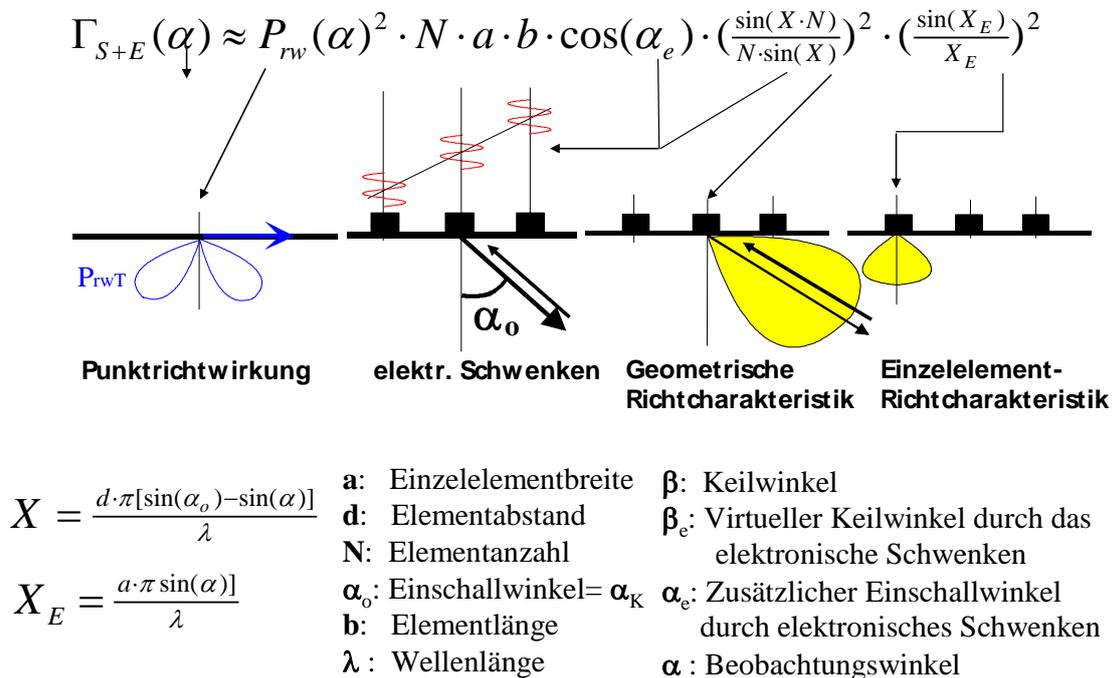


Abb. 2: Richtcharakteristik eines Phased Array-Prüfkopfes ohne Keil für eine Wellenlänge

Gegenüber dem Festwinkelprüfkopf ergibt sich eine Modifikation in der geometrischen Richtcharakteristik bezüglich der Elementanzahl N und hier ist noch mit der Richtcharakteristik des Einzelschwinger-Elementes zu multiplizieren. Für den Phased Array-Prüfkopf mit Keil ist eine weitere Modifikation vorzunehmen. Neben dem Einschallwinkel über den Keil $\alpha_K = \alpha_o$ ist noch der zusätzliche elektronische Schwenkwinkel β_e einzufügen und der Keil-

winkel β ist durch den Winkel β_e der, das elektronische Schwenken berücksichtigt, zu ersetzen (siehe Abb. 3).

Es ist jeweils darauf zu achten, dass für abgestrahlte Longitudinal-bzw. Transversalwellen die entsprechenden Punkttrichtwirkungen und Wellenlängen einzusetzen sind. Ähnliche Formeln ergeben sich für den Sendefall (Anhang A1). Es ist jeweils darauf zu achten, dass für abgestrahlte Longitudinal- bzw. Transversalwellen die entsprechenden Punkttrichtwirkungen und Wellenlängen einzusetzen sind. Ähnliche Formeln ergeben sich für den Sendefall (Anhang A1).

$$\Gamma_{S+E}(\alpha) \approx P_{rw}(\alpha)^2 \cdot N \cdot a \cdot b \cdot \frac{\cos(\alpha_o + \alpha_e)}{\cos(\beta_e)} \cdot \left(\frac{\sin(X \cdot N)}{N \cdot \sin(X)}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sin(X_E)}{X_E}\right)^2$$

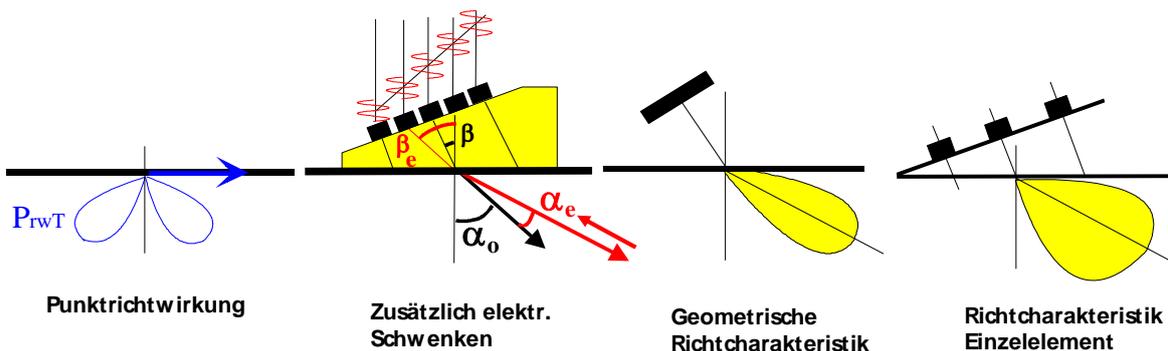


Abb. 3: Richtcharakteristik für einen Phased Array-Prüfkopf mit Keil

2. Verifizierung durch eine Punktquellensynthese (PQS) und den EFIT-Code

2.1 Freies Schallfeld (ohne Keil)

Um die einfachen analytischen Berechnungen, die streng genommen nur für das Fernfeld und für monochromatischen Ultraschall gelten, zu verifizieren, wurde zunächst nur der Sendefall für einen Phased Array-Prüfkopf ohne Keil gerechnet. Die Parameter zeigt Abb. 4 und Abb. 5 zeigt einen Vergleich der analytischen Lösung mit der PQS [2] für eine T-Welle ohne Keil.

- (1) Anzahl der Elemente $N = 16$
- (2) Elementabstand $d = 0,75 \text{ mm}$
- (3) Elementbreite $a = 0,7 \text{ mm}$
- (4) Elementlänge $b = 24 \text{ mm}$
- (5) Frequenz $f = 2,25 \text{ MHz}$
- (6) Radius Zylinder $R = 100 \text{ mm}$
- (7) Einschallwinkel $\alpha_o = 45^\circ$, durch Laufzeitverzögerung einzustellen

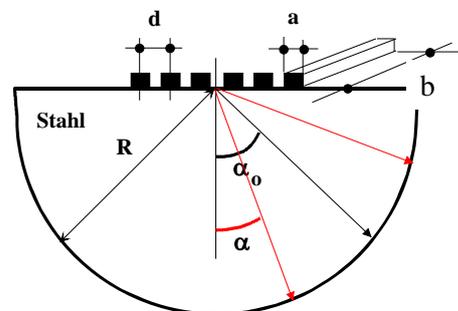


Abb. 4. Parameter für die Schallfeldberechnung für eine T-Welle

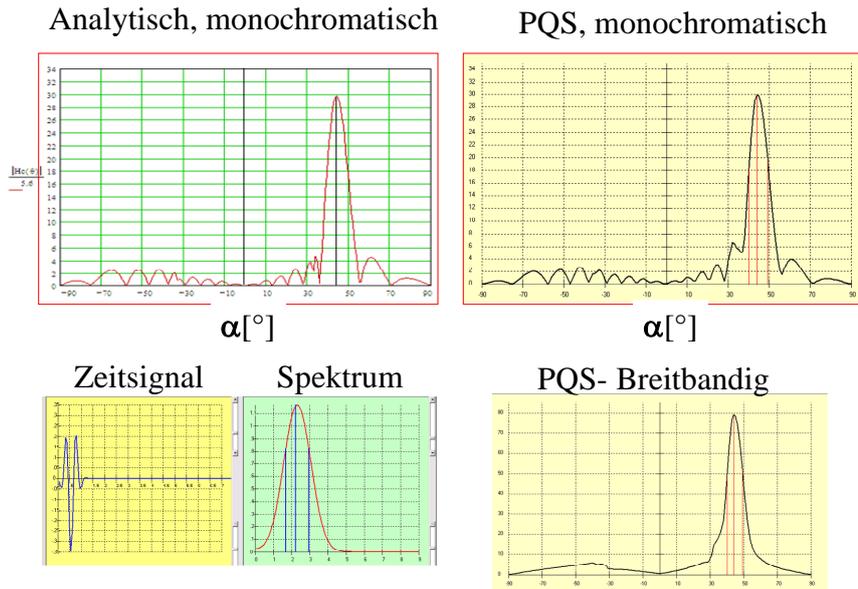


Abb. 5: Vergleich der analytischen Rechnung mit der PQS. Oben: monochromatisch, unten: Breitbandig mit der PQS (Zeitsignal= RC2-Impuls).

Die einfache analytische Rechnung stimmt für den monochromatischen Fall gut mit der PQS überein. Da die PQS die Abstandsabhängigkeit über die Ausdehnung des ganzen Schwingers berücksichtigt, sind die Minima an den „analytischen Nullstellen“ umso weniger ausgeprägt je geringer der Abstand ist (siehe besonders die Minima neben dem Hauptmaximum). In der breitbandigen PQS fallen gegenüber dem monochromatischen Fall die Nullstellen weg, aber die Hüllkurven stimmen immer noch gut überein. Abb. 6 zeigt den Vergleich der analytischen Berechnung mit der Elastodynamischen Finiten Integrations-Technik (EFIT) /3/ für eine T-Welle (ohne Keil). Auch hier wurde ein RC2 Impuls benutzt. Betrachtet man in der analytischen Rechnung nur die Hüllkurve, so stimmen die Ergebnisse gut überein. Die Nullstellen erscheinen wie bei der PQS nicht.

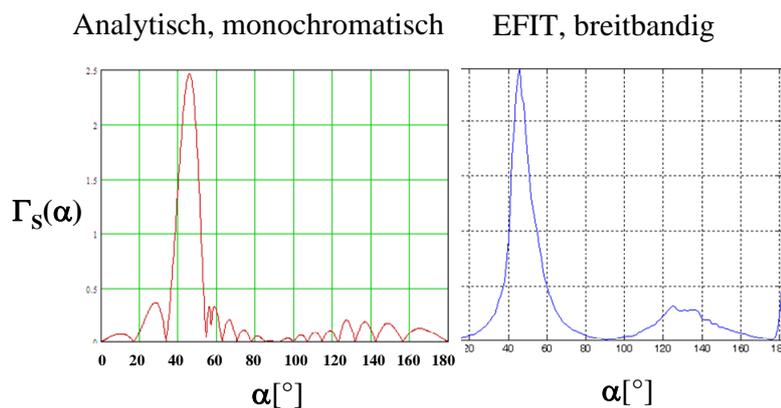


Abb. 6: Vergleich: Analytisch (monochromatisch) mit EFIT (breitbandig)

2.2 Freies Schallfeld mit Keil

Der Keil wurde nach Snellius (für eine ebene Welle) so ausgelegt, dass im Prüfobjekt (Stahl) eine T-Welle unter 45° erzeugt wird.

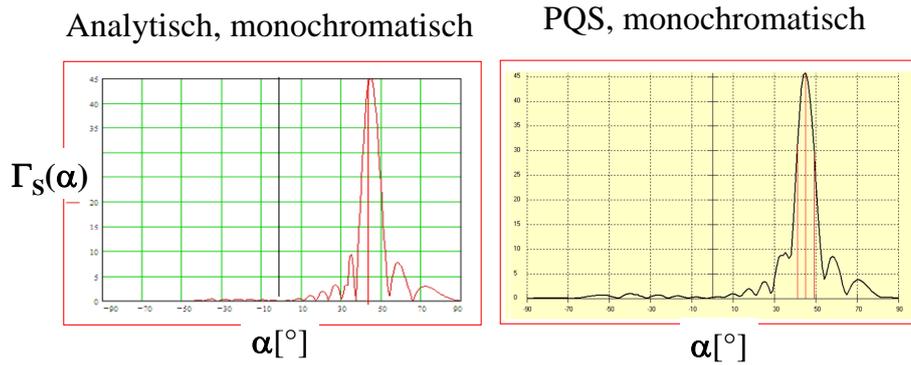


Abb. 7: Vergleich: Analytisch mit PQS (monochromatisch) für einen 45°-Keil

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung im Bereich der Hauptkeule bei $\alpha \sim 45^\circ$. **Fazit:** Im Fernfeld ist die analytische Rechnung hinreichend genau, um für AVG-Berechnungen eingesetzt zu werden.

3. Berechnung von Amplitudendynamiken im Fernfeld.

Zur Berechnung von Amplitudendynamiken werden die o. g. analytischen Gleichungen benutzt. Zunächst sollen aber einige Bemerkungen zum Schallfeld bei verschiedenen Keilwinkeln gemacht werden. Beim Schwenken der Schallkeule, die durch einen Phased Array-Prüfkopf über einen Keil mit dem Keilwinkel β_0 und dem resultierenden Einschallwinkel α_0 , unter dem Schwenkwinkel α_s entsteht, kommt es für größere Schwenkwinkel zu einer Abnahme der Amplitude im Maximum der Schallkeule und zu einer Bündelverbreiterung /4/. Beide Werte hängen von der Elementanzahl N und vom Elementabstand d ab. Abb. 8 zeigt einige Beispiele für unterschiedliche Keil- und resultierende Einschallwinkel (α_0) in Abhängigkeit des Schwenkwinkels (α_s). Neben der Prüfkopfauslegung ist diese Amplitudenabnahme beim Schwenken auch bei einer AVG-Betrachtung wichtig.

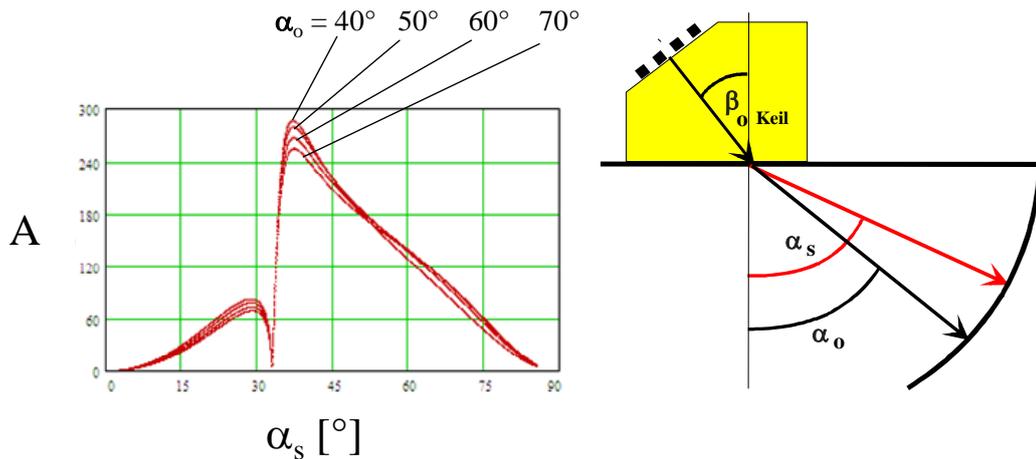


Abb. 8: Abhängigkeit der Amplitude vom Schwenkwinkel α_s bei verschiedenen Keilwinkeln β_0 (die Amplitudendifferenzen der Rechnung an einer oo Ebene als Referenzreflektor und einem Halbkreis, z. B. am K1, wurden durch die bekannte Halbkreis Korrektur berücksichtigt /5/, Anhang A2)

Zur Berechnung von Amplitudendynamiken, d. h. der Amplitude über der Fehlerkoordinate bei vorgegebener Fehlertiefe und -größe (z. B. für kreisscheibenförmige Reflektoren (KSR), oder die oo Rückwand) muss man nach /6/ die Größen- und Abstandsabhängigkeiten mit den Richtwirkungen multiplizieren. Abb. 9 zeigt ein Beispiel. Aus der Differenz zwischen der Fehlerechoamplitude und der Rückwandechoamplitude könnte man (nach Halbkreis Korrektur und der Kenntnis der Amplitudenabnahme beim Schwenken):

- theoretisch einen KSR-Wert berechnen. Dies würde aber bedeuten, dass für jeden Phased Array-Prüfkopf und für jeden möglichen Schwenkwinkel ein AVG-Diagramm zu berechnen ist, dies ist aber sehr aufwendig.
- für das Maximum der gemessenen Fehlerechoamplitude den zugehörigen Schwenkwinkel α_s ermitteln und den Referenzwert für die oo Rückwand (nach Halbkreis Korrektur) ebenfalls unter diesem Winkel bestimmen und mit dieser Amplituden-Differenz in ein allgemeines AVG-Diagramm gehen. Die Amplitudenabnahme beim Schwenken wäre somit eliminiert.

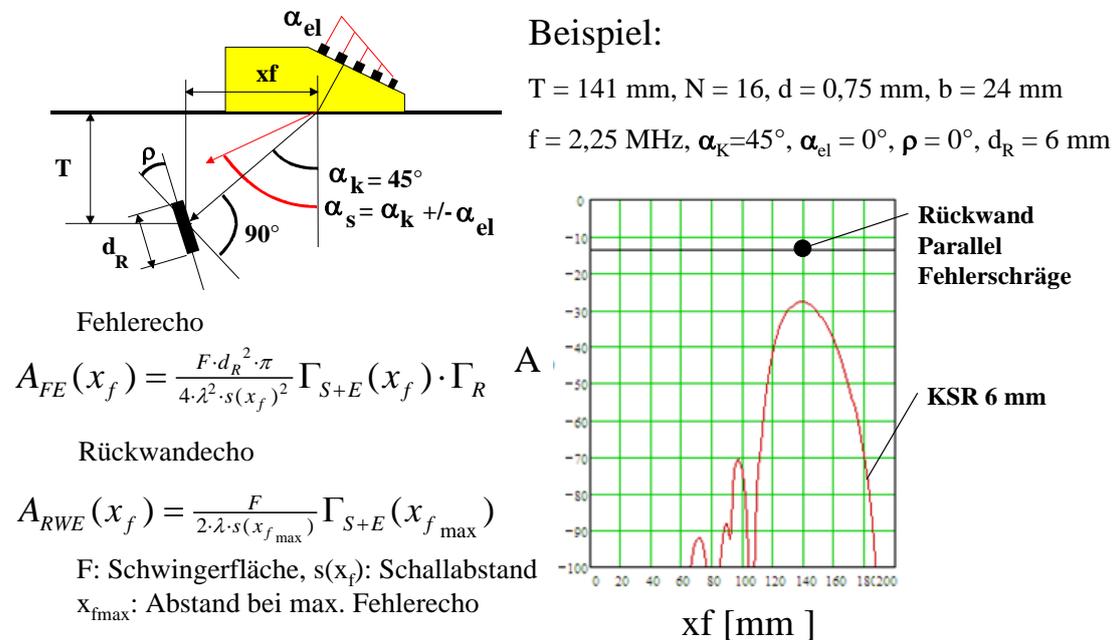


Abb. 9: Berechnung von Amplitudendynamiken für Phased Array-Prüfköpfe mit $\Gamma_R =$ Richtwirkung des Reflektors

4. Phased Array-Prüfköpfe und Bewertung nach AVG.

In vielen Regelwerken wird für die Ultraschallprüfung eine Bewertung nach der AVG-Methode vorgeschrieben. Für Phased Array-Prüfköpfe stellt sich damit die Frage, welche Auswirkungen eine AVG-Bewertung mit sich bringt? Bei der AVG-Methode wird die Echoamplitude eines Materialfehlers unbekannter Größe, Schräglage und Form mit der Echoamplitude verglichen, die eine senkrecht angeschallte Kreisscheibe mit einer Größe G in diesem Abstand erzeugen würde. Diese Größe G, der sogenannte KSR-Wert, ist nur eine Ersatzfehlergröße, da z. B. die wahre Fehlerschräglage unbekannt ist. Um einer gegebenenfalls vorliegenden Fehlerschräglage Rechnung zu tragen, sind die nachzuweisenden Fehlergrößen bei der Schrägeinschallung sehr klein, d. h. in der Regel \sim KSR 2-3. Für eine Tan-

demprüfung, bei der man davon ausgeht, die spiegelnden Echoanteile zu erfassen, d. h. in der Hauptkeule des Fehlers arbeitet, liegt die Nachweisgrenze üblicherweise bei KSR 10-6 dB ~ KSR 7 mm.

Mit einem Phased Array-Prüfkopf z. B. mit Sektor-Scan wird nun ein schräg liegender Fehler deutlich besser nachgewiesen, da man ihn bei nicht zu großer Schräglage näherungsweise senkrecht treffen kann. Dies könnte zur Folge haben, dass eine nicht registrierfähige Anzeige z. B. KSR 1 mm bei einer konventionellen Prüfung mit Schrägeinschallung bei einer Phased Array-Prüfung mit Sektor-Scan als KSR > 3 gemessen wird und somit unzulässig ist.

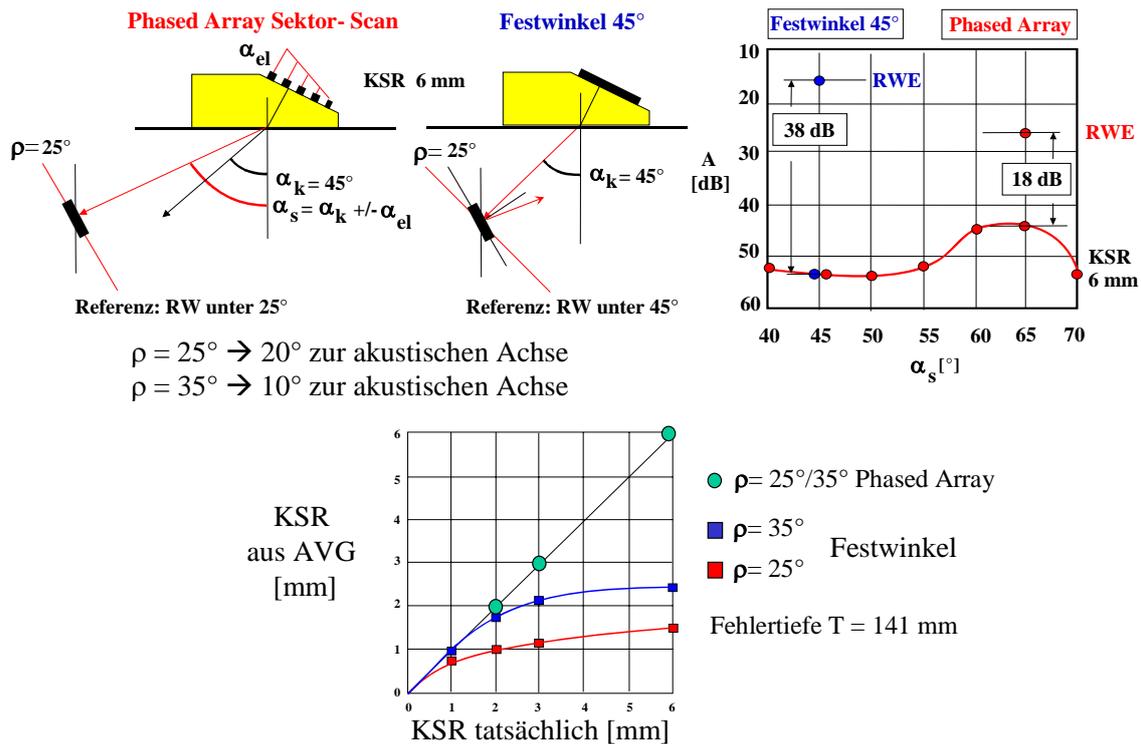


Abb. 10: Phased Array-Prüfung und Bewertung nach AVG

Abb. 10 zeigt ein Beispiel. Angenommen werden zwei kreisscheibenförmige Fehler mit 6 mm Durchmesser (KSR 6), die unter dem Winkel $\rho = 25^\circ$ bzw. 35° zur Oberflächennormalen stehen. Die Prüfkopfparameter wurden Abb. 9 entnommen. Die Abb. 10 oben rechts zeigt die berechneten maximalen Echohöhen in Abhängigkeit vom Schwenkwinkel für den Fehler ($\rho = 25^\circ$) und die Rückwand. Für den Festwinkelprüfkopf mit 45° Einschallwinkel ergeben sich die beiden blauen Punkte im Diagramm, die Differenz RWE-FE ergibt sich zu 38 dB. Für den Sektor-Scan ergibt sich die rote Kurve. Bei dem Schwenkwinkel $\alpha_s \sim 65^\circ$ wird der Fehler im Sektor-Scan senkrecht getroffen. Die Differenz RWE-FE ergibt sich zu 18 dB. Rechnet man diese Differenzen in KSR um, ergibt sich für den Festwinkel-Prüfkopf \rightarrow KSR 1,5 mm und für den Phased Array-Prüfkopf KSR 6.

Die Abb. 10, unten zeigt die berechneten KSR-Werte abhängig vom tatsächlichen Kreisscheibendurchmesser für zwei Fehlerschräglagen $\rho = 25^\circ$ und 35° . Man erkennt die großen Differenzen zwischen dem KSR-Wert aus AVG und der tatsächlichen Fehlergröße. Beim

Phased Array-Prüfkopf ergibt sich immer die richtige Größe von KSR 6 mm, falls der Reflektor innerhalb des Schwenkwinkelbereichs senkrecht getroffen wird. **Fazit:** Bewertungen der Prüfungen mit Phased Array-Prüfköpfen nach AVG sind möglich. Bei der Verwendung des allgemeinen AVG-Diagramms (Methode b) muss die Nahfeldlänge des Phased Array-Prüfkopfes bekannt sein. In 1. Näherung kann man die Nahfeldlänge aus den Schwingerabmessungen nach /7/ bestimmen.

$$N = \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot (B^2 + b^2) \cdot (0,78 - 0,27 \cdot \frac{B}{b})$$

B = Kantenlänge in Einschallrichtung: [(N-1)*d+a], Kantenlänge in Querrichtung = b, für B < b.

Für den Parametersatz aus Abb. 9 ergibt sich eine Nahfeldlänge von ~ 100 mm. Eine PQS für diesen Prüfkopf ergibt eine Nahfeldlänge von ~ 95 mm.

5. Zusammenfassung.

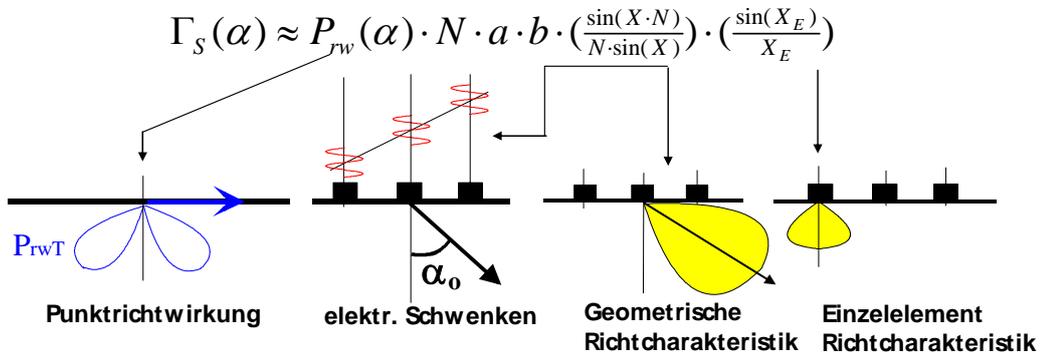
Für Schallfeldberechnungen im Fernfeld von Phased Array-Prüfköpfen leisten einfache monofrequente analytische Formeln in erster Näherung gute Dienste. Mit diesen Formeln kann man Amplitudendynamiken und daraus AVG-Kurven für das Fernfeld berechnen. Wird ein Reflektor innerhalb des Schwenkwinkelbereichs senkrecht angeschallt, dann vermeidet die Phased Array-Prüfung den schräglagenbedingten Echohöhenverlust und gibt die wahre Fehlergröße eines ebenen Reflektors nahezu richtig an. Bezogen auf eine konventionelle Prüfung mit festem Winkel sind die KSR-Werte daher praktisch immer größer und können zu Unzulässigkeiten bezüglich bestehender Regeln führen. Dieses Verhalten sollte in zukünftigen Regelwerken berücksichtigt werden!

Referenzen

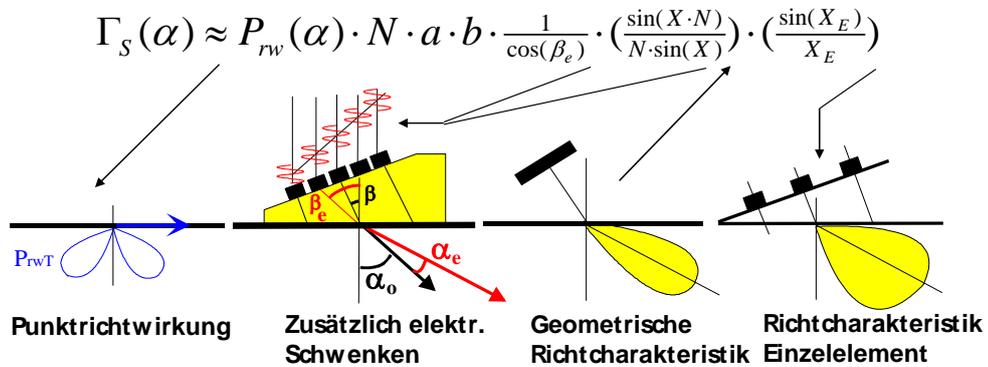
- /1/ H. Wüstenberg: Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall. Diss. TU-Berlin 1972
- /2/ R. Boehm, A. Erhard: Simulationsgestützte Entwicklung von Ultraschallprüfköpfen. DGZfP Jahrestagung 2004
- /3/ R. Marklein: Numerische Verfahren zur Modellierung von akustischen, elektromagnetischen, elastischen und piezoelektrischen Wellenausbreitungsproblemen im Zeitbereich basierend auf der Finiten Integrationstechnik. Shaker Verlag, 1998
- /4/ A. Bulavinov: Der getaktete Gruppenstrahler. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2005
- /5/ A. K. Gurvich: Determination of the allowable frequency spread of ultrasonic oscillations in flaw detection. Defektoskopiya, No. 2, March-April 1976
- /6/ J. Krautkrämer, H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. Auflage, Springer Verlag 1986, Kapitel 5, Seite 88ff
- /7/ H. Wüstenberg: Zur Auswahl der Membranform bei Winkelprüfköpfen für die Ultraschallprüfung. Materialprüfung 18 (1976) Nr. 7, Juli

Anhang

Phased Array ohne Keil: Richtcharakteristik im Sendefall



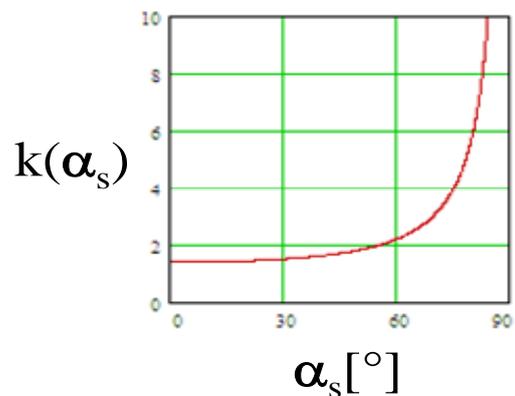
Phased Array mit Keil: Richtcharakteristik im Sendefall



A1: Richtcharakteristiken nur für den Sendefall

$$k(\alpha_s) = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot r}{F}} \cdot \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{c_P}{c_T}\right)^2 \cdot \sin(\alpha_s)^2}}{\cos(\alpha_s)}$$

r = Abstand zum Halbkreis
 cP = Schallgeschwindigkeit im Keil
 cT = Schallgeschwindigkeit T-Welle



A2: Halbkreiskorrektur für Parametersatz aus Abb. 9