

# Schnelle Ultraschallprüfung von längsgebohrten Eisenbahnradsatzwellen mit Phased Array Rotationsscanner

Rainer BOEHM<sup>1</sup>, Thomas HECKEL<sup>1</sup>, Wolfgang SPRUCH<sup>2</sup>, Toni BEGGEROW<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

<sup>2</sup> Büro für Technische Diagnostik GmbH & Co. KG BTD, Brandenburg

Kontakt E-Mail: rainer.boehm@bam.de

**Kurzfassung.** Im Rahmen des Europäischen Projektes RAAI\* wird speziell für längsgebohrte Eisenbahnradsatzwellen von Hochgeschwindigkeitszügen eine Phased Array Technik angepasst, mit dem Ziel einer nahezu 100%igen Rissprüfung (Tiefe 2-3 mm) ohne die Demontage der Wellen und einer Prüfzeitreduzierung um 75%.

Die Technik arbeitet mit einem Phased Array, bei dem die Schwingerelemente auf einem Kegelstumpf angeordnet sind. Für die Abtastung in Umfangsrichtung erlaubt das Phased Array die schnelle Rotation und zusätzlich das Fokussieren und Schwenken des Schallbündels. In Richtung der Achse wird das Prüfkopfsystem mechanisch bewegt.

In vorangegangenen Projekten ist das Prinzip dieser Prüftechnik entwickelt und die Tauglichkeit gezeigt worden. Die jetzigen Arbeiten haben insbesondere die Optimierung der Sensortechnik an die o.g. Aufgabe zum Ziel. Wegen der ungewöhnlichen Geometrie des Arrays sind umfangreiche Simulationsrechnungen nötig, um die Auswirkung von zahlreichen Parametern auf die Schallfeldform und letztlich auf die Empfindlichkeit und die Ortsauflösung zu untersuchen und die Konstruktionsdaten zu bestimmen.

Zur Validierung der Prüftechnik werden Tests an typischen Eisenbahnradsatzwellen durchgeführt. Der Einsatz von unterstützenden Signalverarbeitungsalgorithmen bei der Auswertung der Prüfergebnisse zur sichereren Fehlererkennung ist u.a. wegen des möglichen geringen Messpunktabstandes für diese Prüftechnik besonders vielversprechend. Der Stand der Entwicklung wird gezeigt.

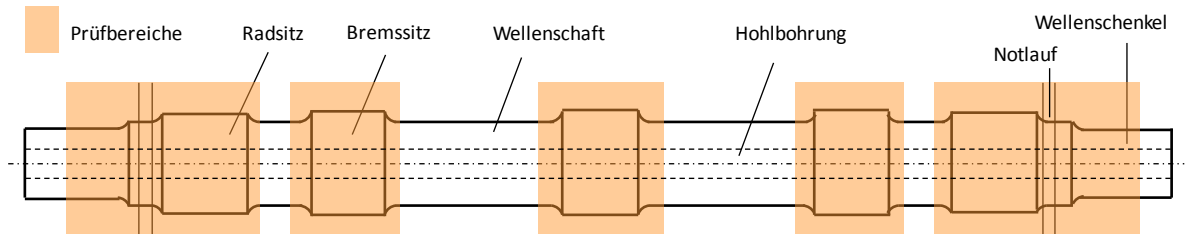
\* Whole Life Rail Axle Assessment and Improvement Using Ultrasonic Phased array and Corrosion Inspection Systems” (RAAI)

## Einführung

Eisenbahnradsatzwellen mit Längsbohrung haben den großen Vorteil, dass die hochbelastete Wellenaußenoberfläche mit einem in der Bohrung befindlichen Sensorsystem mit Ultraschall zerstörungsfrei geprüft werden kann. Dies betrifft insbesondere die Bereiche der Sitze für die Räder, die Lager und die Bremsscheiben (siehe Abb. 1). Der vollständige Scan erfolgt durch die Bewegung des Prüfsystems in Achs- und in Umfangsrichtung. Für die Abtastung in Umfangsrichtung wird im Gegensatz zur Vollwellenprüfung nicht der ganze Radsatz gedreht sondern das Sensorsystem in der Bohrung. Dies erfordert eine entsprechende Mechanik und eine rotierende elektrische Verbindung beispielsweise über Schleifkon-

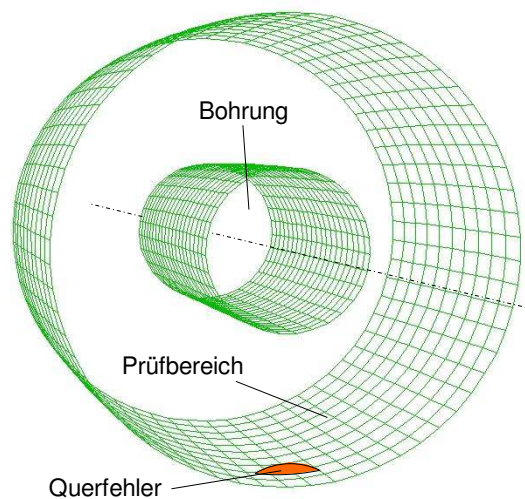


takte. Durch die freie Positionierung des Sensorsystems in Achsrichtung ist es ausreichend mit einem (oder zwei) festen Einschallwinkel(n) zu prüfen. Dadurch ist es möglich, die mechanische Rotation durch die elektronisch gesteuerte Rotation des Schallbündels eines Phased Arrays zu ersetzen und neben der Vereinfachung der Mechanik die Prüfzeit um ca. 75 % zu reduzieren.



**Abb. 1.** Prüfbereiche einer längsgebohrten Eisenbahnradatzwelle

Durch die Art der Belastung können betriebsbedingt rissartige Fehler von der Oberfläche ausgehen. Sie liegen in der Radial-Radialebene (siehe Abb. 2), deren Flächennormale in Richtung der Wellenachse zeigt. Diese Fehlerart früh genug zu finden ist von größter Sicherheitsrelevanz, weil sie im weiteren Betrieb wachsen und im schlimmsten Fall zum Achsbruch führen können.



**Abb. 2.** Rissartiger Fehler in der Radial-Radialebene

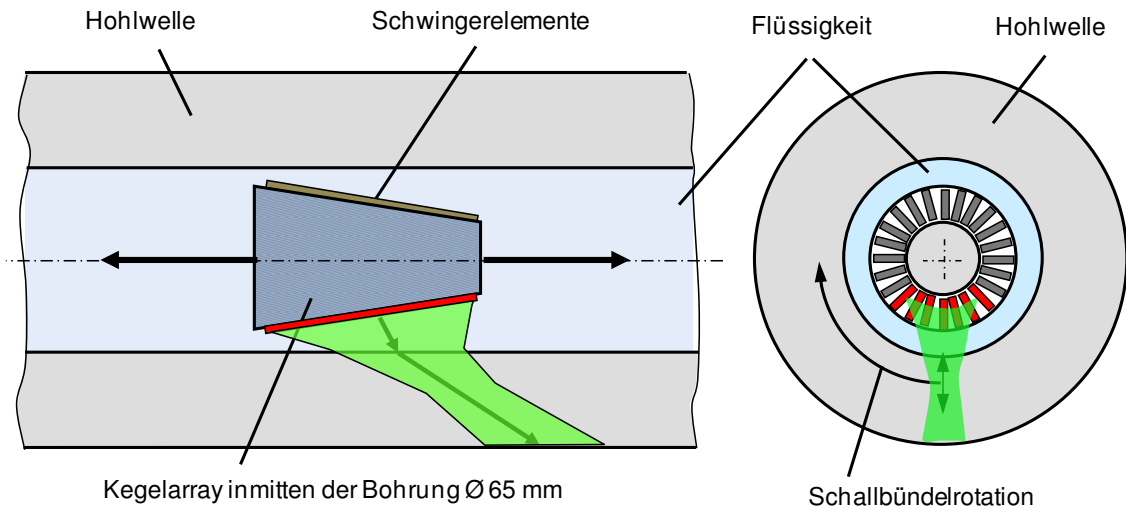
In vorangegangenen Projekten ist das Prinzip dieser Prüftechnik entwickelt und die Tauglichkeit gezeigt worden. Die jetzigen Arbeiten haben insbesondere die Optimierung der Sensortechnik an die genannte Aufgabe zum Ziel. Wegen der ungewöhnlichen Geometrie des Arrays sind umfangreiche Simulationsrechnungen nötig, um die Auswirkung von zahlreichen Parametern auf die Schallfeldform und letztlich auf die Empfindlichkeit und die Ortsauflösung zu untersuchen und die Konstruktionsdaten zu bestimmen.

## 1. Prinzip der Prüftechnik

Die Schwingerelemente des Phased Array befinden sich gleichmäßig am Umfang verteilt auf der Oberfläche eines Kegelstumpfes wie in Abb. 3 skizziert. Der Schall wird von einer Anzahl von nebeneinanderliegenden aktiven Elementen (rote Elemente in der Skizze Abb. 3) erzeugt. Der Einschallwinkel in der Axial- Radialebene, der Einschallebene der Schallbündelachse, ergibt sich aus den Schallgeschwindigkeiten der Flüssigkeit, z.B. Öl

oder Wasser, und der Transversalwelle in Stahl. In der Ebene senkrecht zur Einschallebene wird die Schallbündelform wesentlich durch die Verzögerungszeitverteilung bestimmt.

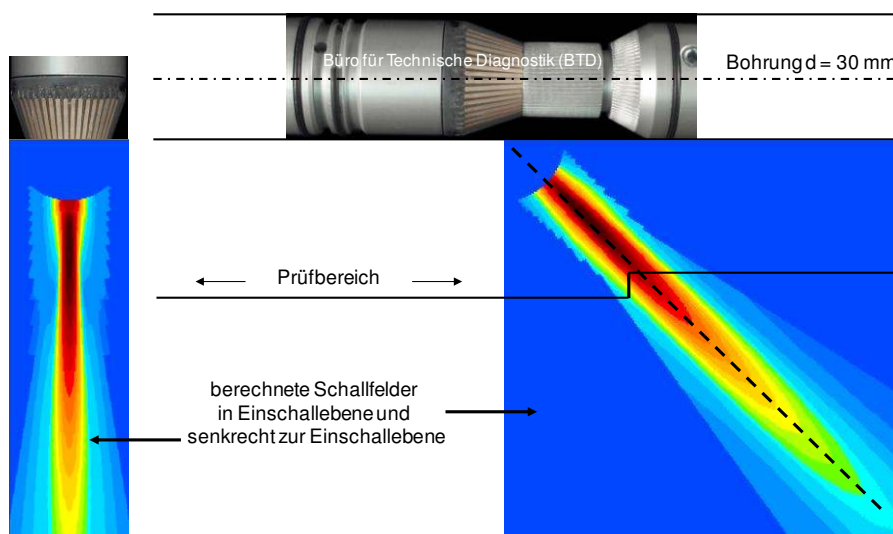
Die optimalen geometrischen Abmessungen und die geeignetsten Steuerparameter werden mit interaktiver Modellierung gewonnen, die auch zum Verständnis des akustischen Verhaltens dieses Arrays mit der besonderen Geometrie beiträgt.



**Abb. 3.** Skizze des kegelförmigen Phased Arrays

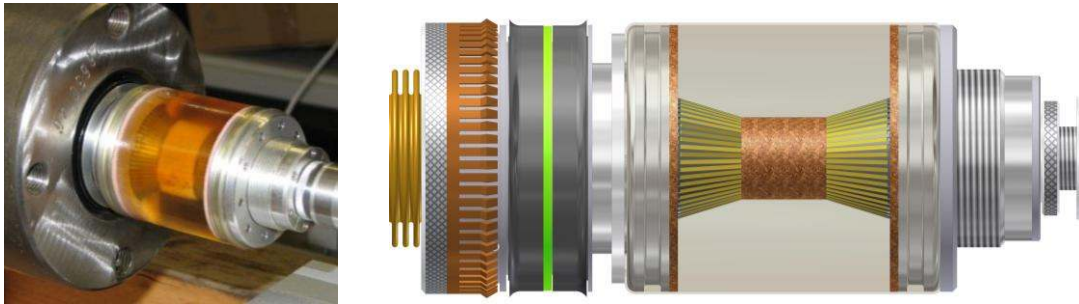
Der erste Rotationscanner Funktionsprototyp für die Prüfung von längsgebohrten Eisenbahnradsatzwellen wurde 2006 auf der ECNDT in Berlin [1] vorgestellt. Mit diesem Sensorsystem wurde gezeigt, dass diese Prüftechnik prinzipiell geeignet ist. Die Skizze in Abb. 4 zeigt das Array in der Bohrung und die berechneten Schallfelder in der Einschallebene und senkrecht dazu. Obwohl die Anordnung der Schwingerelemente auf einer Kegelfläche dazu führt, dass der Abstand (pitch) zwischen den Elementen entlang der Längsausdehnung der Elemente mit wachsendem Durchmesser zunimmt, lassen sich bei richtiger Dimensionierung Schallfelder erzeugen, die in ihrer Form kaum von denen üblicher Prüfköpfe abweichen.

Aufgrund der geometrischen Anordnung existiert bei gleichzeitiger Anregung der Schwingerelemente ein virtueller geometrischer Fokuspunkt auf der Wellenachse und der Schall würde sich rotationssymmetrisch nach außen hin ausbreiten. Mit der Phased Array-Steuerung wird jedoch der reale Fokus für die gewünschte Funktion in den Prüfbereich an die Außenoberfläche der Welle gelegt.



**Abb. 4.** Berechnete Schallfelder des ersten Kegelarrays (Boehm et al. 2006, [1])

Zur Berechnung der Schall- und Empfindlichkeitsfelder der Kegelarrays wurde damals eigens eine Simulationssoftware von der BAM entwickelt. Messungen an Wellen mit entsprechenden Testfehlern haben die Simulationsergebnisse hervorragend bestätigt.

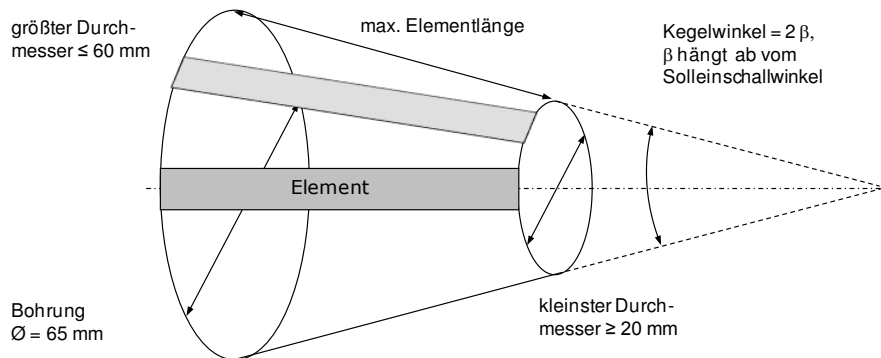


**Abb. 5.** In einer Ölkammer gekapselter Rotationsscanner für Vor- und Rückwärtsprüfung entwickelt im Rahmen des Vorläuferprojektes WOLAXIM, Völz et al. 2012 [2])

Im Rahmen des Europäischen Projektes WOLAXIM wurde im nächsten Schritt ein Prüfkopfsystem entwickelt wie es in Abb. 5 gezeigt wird. Das Prüfkopfsystem enthält zwei Kegelarrays zur Prüfung in Vor- und Rückwärtsrichtung. Das System befindet sich in einer weichen Kapselung, die das Öl der Vorlaufstrecke enthält. Der Vorteil ist, dass bei der Prüfung keine größeren Mengen Öl bewegt werden müssen, Luftblasen leichter zu vermeiden sind und die Arrays selbst vor Verschmutzung geschützt sind.

## 2. Neue Entwicklung

Im laufenden Europäischen Projekt RAAI ist die Aufgabe die Entwicklung eines Rotationsscannerarrays mit einer möglichst guten Ortsauflösung und hohen Empfindlichkeit bei einer Nennfrequenz von 4 MHz und optimiert für einen Innendurchmesser von 65 mm.



**Abb. 6.** Skizzierung der Randbedingungen für die Prüfkopfneuentwicklung

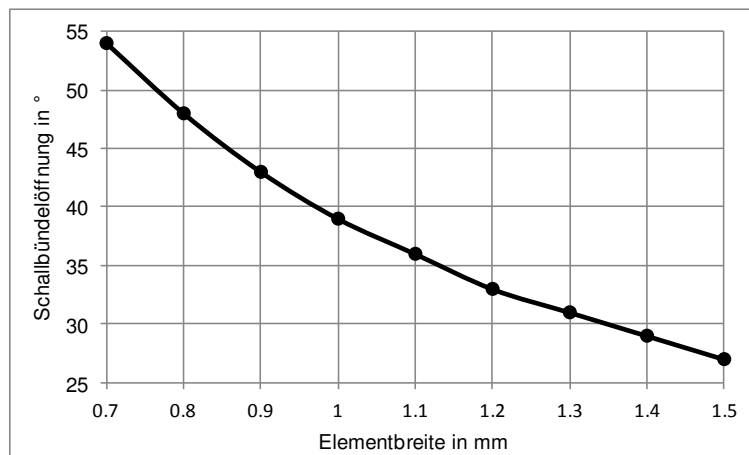
Die geometrischen Randbedingungen sind in Abb. 6 skizziert. Die Hauptunterschiede zu den früheren Konstruktionen betreffen die Anpassungen an den größeren Bohrungsdurchmesser und die höhere Frequenz. Einerseits erlaubt der größere Bohrungsdurchmesser die Vergrößerung des Kegelarrays. Dies ermöglicht eine größere aktive Schwingerfläche. In Umfangsrichtung sind mehr Schwingerelemente erforderlich, von denen eine größere Anzahl aktiv sein kann als bei früheren Konstruktionen. Auch die Abmessung in der Einschallebene, die Schwingerelementlänge, kann vergrößert werden.

In Kombination mit der höheren Frequenz bzw. kleineren Wellenlänge führt das jedoch dazu, dass der Prüfbereich schon im Nahfeld liegt. Ein Vorteil von einer vergrößerten Schwingerelementlänge ergibt sich nur, wenn man auch in dieser Ebene fokussiert.

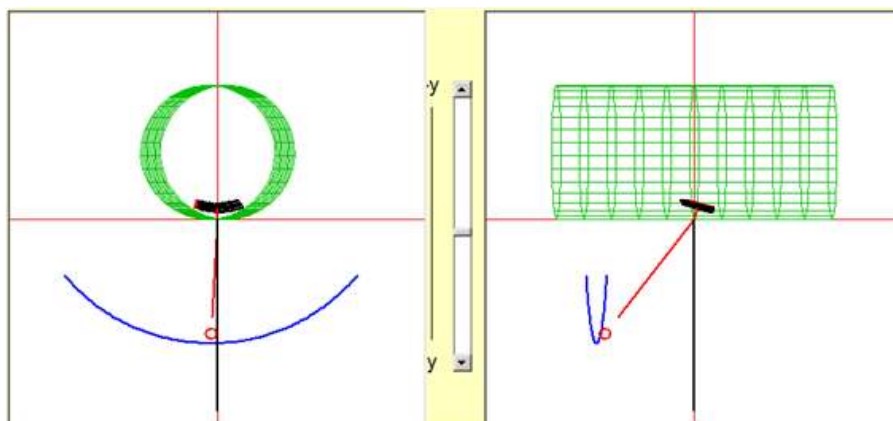
Für die Simulationsrechnungen wurde die semianalytische Punktsynthese-simulationssoftware "ArrayCalculus3D" der BAM verwendet, die für dieses Projekt an die Aufgabe angepasst wurde, Schallfelder von Arrays auf Kegel- und Torusflächen zu berechnen.

## 2.1 Beitrag des einzelnen Schwingerelements

Die Schallfelder eines Arrays entstehen aus der Summe der im Allgemeinen gegeneinander zeitverzögerten Schallwellen der einzelnen Schwingerelemente. Daher ist die Untersuchung der Schallfeldeigenschaften der Elemente der erste Schritt. Je schmaler ein Element ist, umso größer ist seine Schallbündelöffnung senkrecht zur Einschallebene des Arrays wie in Abb. 7 dargestellt. Die Berechnung berücksichtigt die Brechung an der zylindrischen Bohrung und die Wellenlänge der Transversalwelle in Stahl. Der Wert der Schallbündelöffnung in  $^{\circ}$  bezieht sich auf den Umfangswinkel an der Oberfläche der Welle bei einem Durchmesser von 160 mm. (siehe die blaue Aufpunktlinie in Abb. 8)



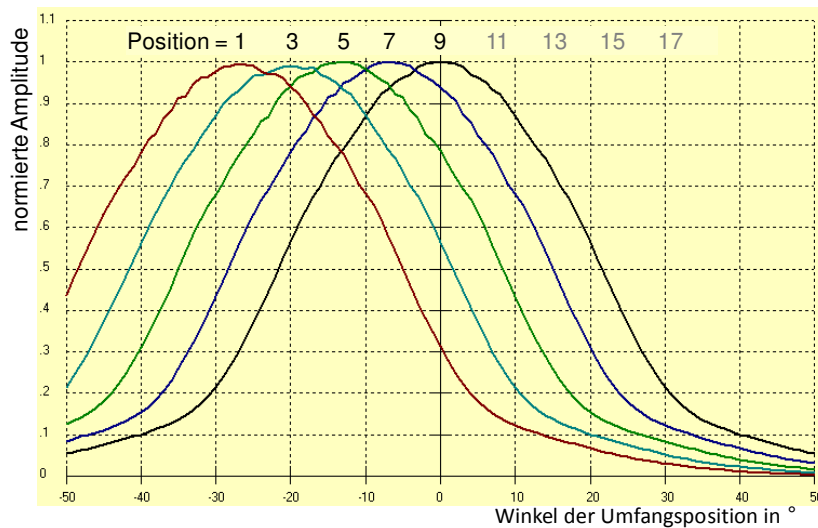
**Abb. 7.** Schallbündelöffnung bei -6 dB Amplitude im Schallfeld



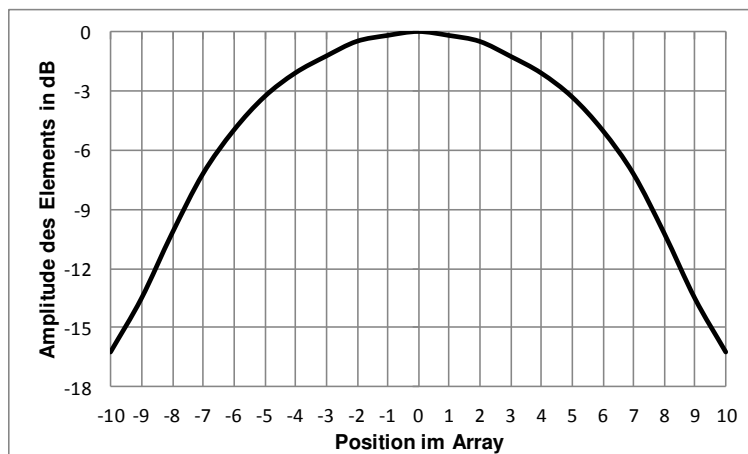
**Abb. 8.** Aufpunktlinie an der Achswellenoberfläche (blau) und Position der aktiven Elemente in der Bohrung

Abb. 9 zeigt die Amplitudenverteilungen der einzelnen Elemente auf der Umfangslinie (Aufpunktlinie in Abb. 8) abhängig von der Position des Elements in einem Array von 17 Elementen von insgesamt 108 Elementen am Umfang des Kegelstumpfes. Dargestellt sind die Amplitudenverteilungen für die Elemente 1, 3, 5, 7 und 9. Das Element 9 liegt in der Mitte an der Position  $0^{\circ}$ . Die Kurven der Elemente 11 bis 17 liegen symmetrisch dazu und wurden wegen besserer Übersichtlichkeit weggelassen. Aus dem Diagramm lässt sich ablesen wie hoch der Beitrag jedes Elements zur Gesamtamplitude des Arrays in der jewei-

ligen Richtung sein kann. Aus dieser Aussage lässt sich ableiten wie groß die Anzahl der aktiven Elemente sein kann bzw. sinnvoller Weise sollte.

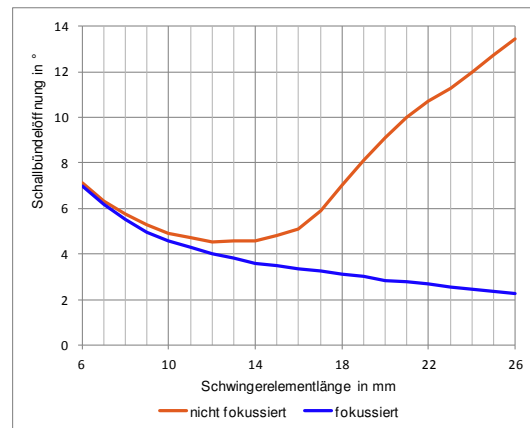
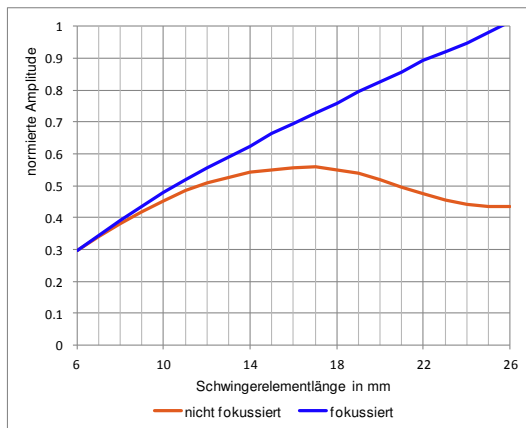


**Abb. 9.** Richtcharakteristik der Elemente abhängig von ihrer Position im aktiven Array von 17 Elementen  
 Mit größer werdendem Abstand wird der Beitrag der Randelemente immer geringer wie in Abb. 10. dargestellt. Das mittlere Element hat hier die Position Null.



**Abb. 10.** Amplitudenbeitrag eines Elements abhängig von seiner Position im aktiven Array in Bezug auf das mittlere Element

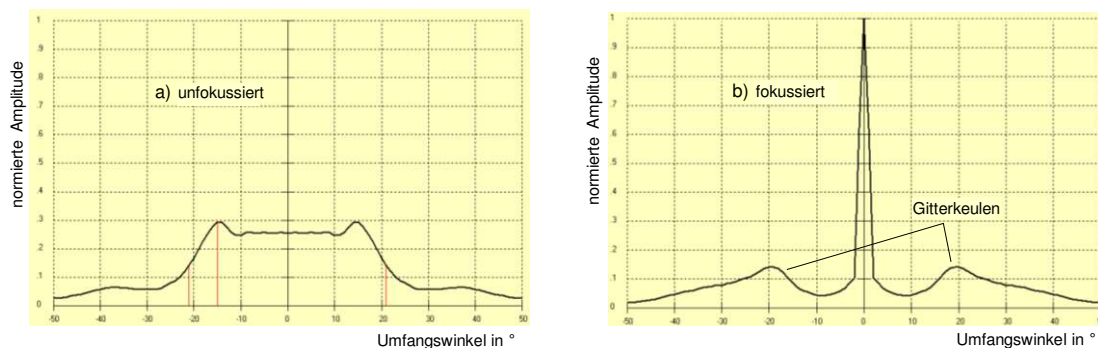
Wie oben schon erwähnt ermöglicht die neue Dimensionierung des Prüfkopfes auch die Schwingerelementlänge zu vergrößern, wodurch der Prüfbereich beim Schallweg von ca. 70 mm (in der Einschallebene der Schallbündelachse) schon im Nahfeld des einzelnen Elements liegt. Bei zu lang werdenden Elementen nimmt die Amplitude im Prüfbereich mit wachsender Elementlänge ab und die Schallbündeldivergenz in der Einschallebene nimmt zu. Die größere Elementlänge kann aber genutzt werden, wenn durch eine konkave Krümmung der Schwingerelemente der Schall auch in der Einschallebene fokussiert wird. Die Wirkung der Fokussierung wird in den Abb. 11. und 12. Gezeigt.



**Abb. 11.** Amplitude als Funktion der Elementlänge **Abb. 12.** Divergenz als Funktion der Elementlänge

## 2.2 Schallfeld des Arrays

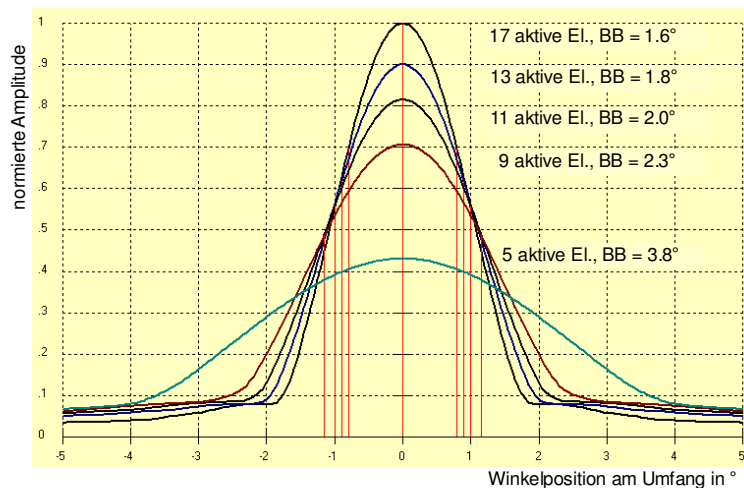
Die Abmessung der Wandlerfläche in Umfangsrichtung kann durch die Anzahl  $n$  der aktiven Elemente variiert werden. Bei gleichzeitiger Anregung der Elemente geht der Schall scheinbar von einem virtuellen geometrischen Fokus auf der Wellenachse aus mit einem "Öffnungswinkel"  $\alpha_U$  am Umfang von  $\alpha_U^\circ = n \cdot 360^\circ / 108$ ; siehe Abb. 13a. Das Kegelarray hat insgesamt 108 Elemente. Durch Fokussierung auf die Wellenoberfläche an der Winkelposition  $0^\circ$  wächst die Amplitude dort um ca. 12 dB und führt zu einer um etwa 24 dB höheren Empfindlichkeit für kleine Reflektoren. Der Öffnungswinkel verringert sich etwa um den Faktor 20, siehe Abb. 13b. Die Zeitverzögerungen werden mit Hilfe des fermatschen Prinzips berechnet.



**Abb. 13.** Richtcharakteristik des Kegelarrays mit 13 aktiven Elementen von 108, a) ohne, b) mit Fokussierung

Durch den unvermeidlich größer werdenden Elementabstand auf dem nach außen wachsenden Durchmesser auf dem Kegel entstehen klar ausgeprägte Nebenmaxima bei  $\pm 20^\circ$ , die sogenannten Gitterkeulen. Deren Amplitude liegt bei -17 dB in Bezug auf das Hauptmaximum; dem entspricht eine relative Echohöhe von -34 dB für kleine Reflektoren. Die Echos der Gitterkeulen haben eine deutlich abweichende Echodynamik und Impulslänge und haben einen konstanten Winkelabstand zum Hauptecho, das immer vorhanden ist, weil durch das rotierende Schallbündel jeder Reflektor auch immer vom Hauptstrahl getroffen wird. In der Praxis ist durch die Gitterkeulen daher keine Beeinträchtigung der Prüfung zu erwarten.

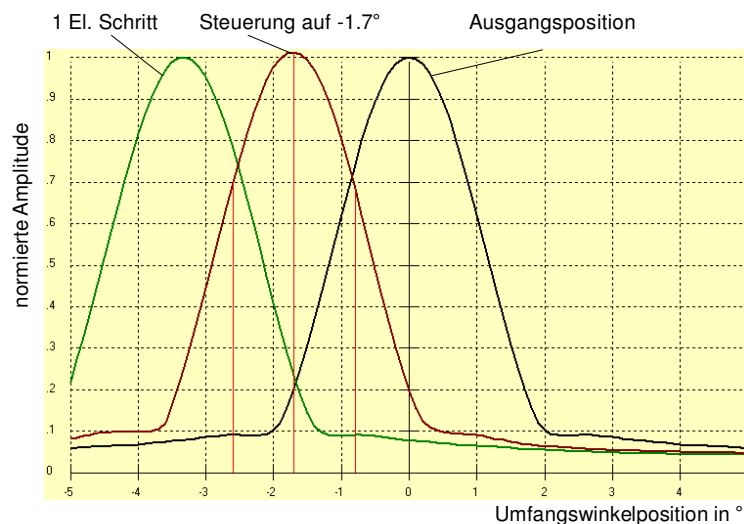
Mit wachsender Anzahl der aktiven Elemente nimmt die Amplitude zu und die Schallbündelbreite ab wie in Abb. 14 dargestellt. Wie zu erwarten, wächst die Amplitude bei größer werdender Elementzahl immer weniger, siehe hierzu auch Abb. 9 und 10.



**Abb. 14.** Amplitude und Schallbündelbreite (BB, -3 dB) als Funktion der Anzahl der aktiven Elemente

Durch Weiterschalten der Gruppe aktiver Elemente um ein Element dreht sich das Schallbündel um den Winkelabstand der Elemente von  $\Delta\varphi = 360^\circ/108 = 3.33^\circ$  wie die Darstellung der Richtcharakteristiken in der Abb. 15 zeigen von der Ausgangsposition  $0^\circ$  (schwarze Kurve) auf die Position  $-3.33^\circ$  (grüne Kurve). Da die Schallbündelbreite (-3 dB) mit ca.  $1.8^\circ$  jedoch nur etwa halb so groß ist wie  $\Delta\varphi$ , fällt im Bereich dazwischen die Empfindlichkeit zu stark ab.

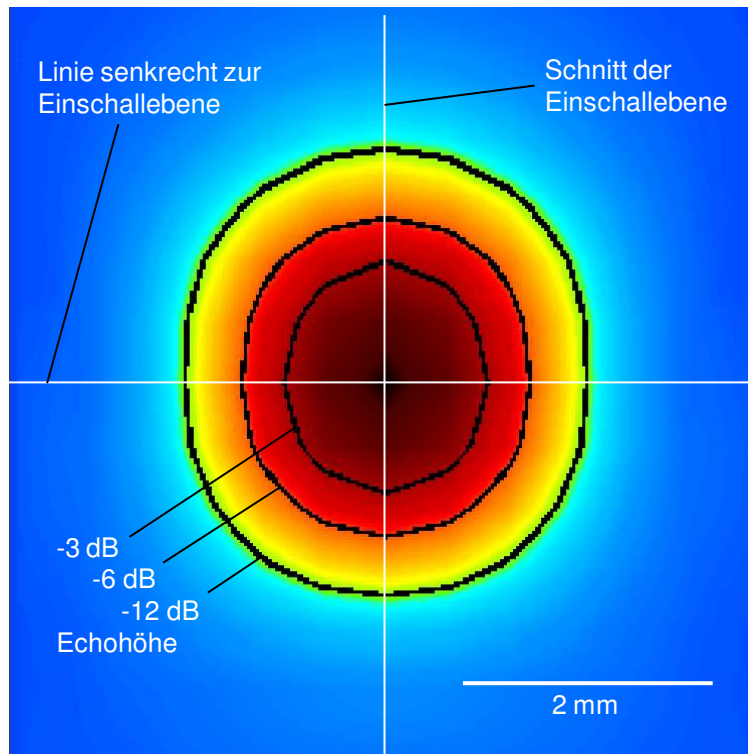
Diese Lücken können durch zusätzliches Schwenken des Schallbündels geschlossen werden, z.B. auf die Position  $-1.7^\circ$ , siehe die braune Kurve in Abb. 15. Zusätzlich sei bemerkt, dass mit der Phased Array-Steuerung die Winkelschrittweite im Prinzip beliebig gewählt und die Schallbündelbreite in dieser Ebene in weitem Rahmen verändert werden können, womit bei Bedarf eine flexible Wahl zwischen kürzerer Prüfzeit oder höherer Empfindlichkeit und Ortsauflösung möglich ist.



**Abb. 15.** Richtcharakteristiken bei Rotation des Schallbündels

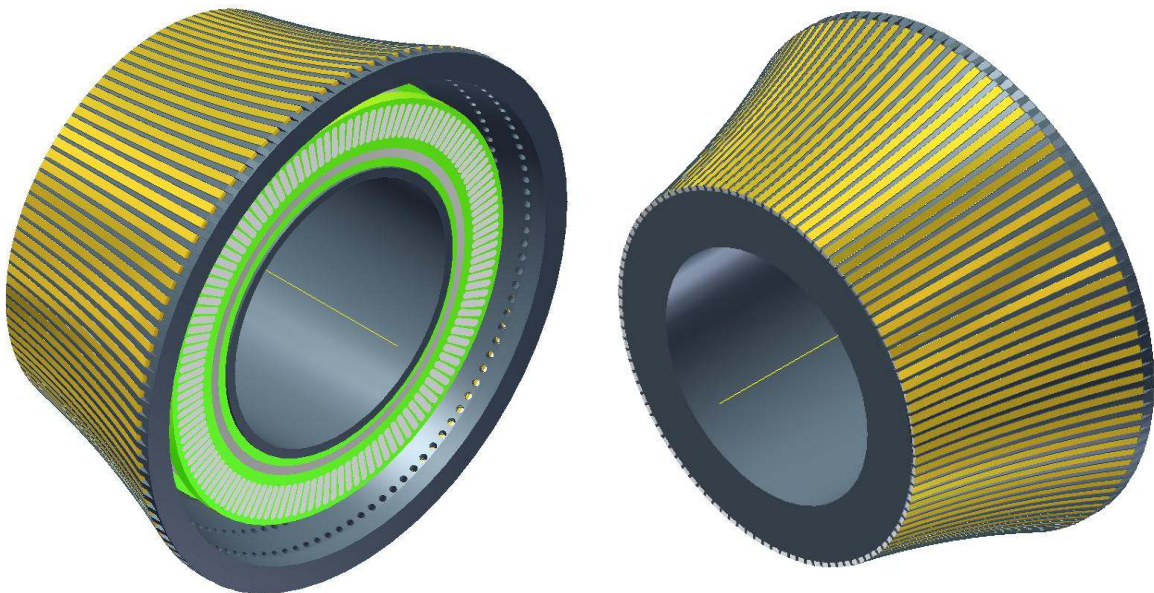
Mit der vorgeschlagenen Dimensionierung und der Fokussierung in beiden Ebenen hat der Schallbündelquerschnitt im Schallwegbereich der Prüfzone ähnlich große Abmessungen in der Einschallebene und senkrecht dazu. Abb. 16 zeigt die zu erwartende Echohöhenverteilung für kleine Reflektoren (farbcodiert) mit den eingetragenen Grenzen von -3, -6 und -12 dB in Bezug auf das Maximum.





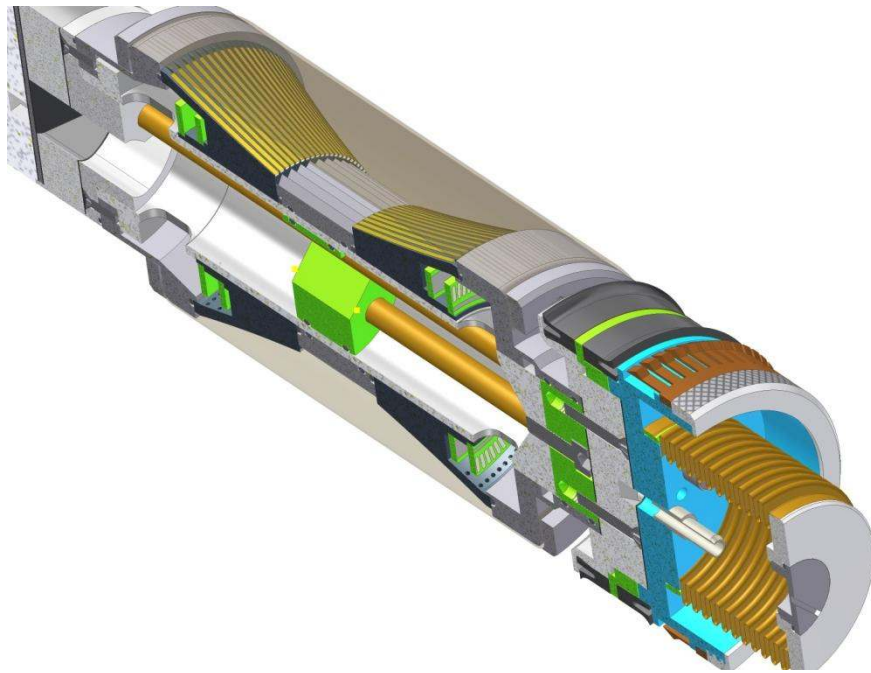
**Abb. 16.** Bildgröße  $6 \times 6 \text{ mm}^2$ , Echohöhen im Schallbündelquerschnitt bei  $s = 70 \text{ mm}$ , 17 ak. Elemente

### 2.3 Prüfkopfkonstruktion



**Abb. 17.** Konstruktionszeichnungen des Rotationssannerprüfkopfes als Ergebnis der Designstudie

Die durch die Simulationsrechnungen gewonnenen Parameter bilden die Grundlage für die in Abb. 17 gezeigte Konstruktionsidee des Rotationssanner Phased Arrays, das an die oben genannten Anforderungen angepasst wurde. Deutlich zu erkennen ist die zweiachsige Krümmung der Arrayfläche. Abb. 18 zeigt einen Längsschnitt durch die komplette Sonde, die zwei Kegelarrays enthält, um mit einer einzigen Bewegung in Achsrichtung die Prüfung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung durchführen zu können.



**Abb. 18.** Schnittzeichnung der Sonde mit zwei Kegelarrays zur Prüfung in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung

### 3. Stand der Entwicklung, Anmerkung

Das Manuskript beschreibt den Stand der Entwicklung bis zum Zeitpunkt der Dead-Line für die Manuskriptabgabe und enthält daher leider noch nicht die angekündigten Ergebnisse; insbesondere lagen zu diesem Zeitpunkt noch keine experimentellen Ergebnisse vor. Im Folgenden ist eine Signalverarbeitung zur automatisierten Erkennung potentieller Fehleranzeigen und zur Unterdrückung von Form- oder Störanzeigen vorgesehen, die an die Eigenschaften der Prüftechnik angepasst wird. Dies geschieht, wenn ausreichend viele Messdaten vorliegen. Die Grundlage hierzu bilden Auswertetechniken, die in Bezug auf die Eisenbahnvollwellenprüfung [4] gewonnen wurden. Wenn möglich werden neuere Ergebnisse in den Vortrag auf der Jahrestagung in Koblenz einfließen.



Dieses Projekt wird gefördert vom "European Union's Horizon 2020 research and innovation program" under grant agreement no 674231

### Referenzen

- [1] Boehm, R., Spruch, W., 2006. Phased Array Rotation Scanner Probe System for Ultrasonic Testing of Sleeve Shafts, 9th European Conference on NDT. Berlin, Germany, paper Fr.1.3.3
- [2] Völz, U., Boehm, R., Heckel, T., Spruch, W., 2012. Ultraschallprüfung an Hohlwellen mit einem Gruppenstrahler-Kegelarray. DACH-Jahrestagung in Graz, Austria, paper Mi.3.A.1
- [3] Boehm, R., Heckel, Th., Spruch, W., Beggerow, T., "Ultrasonic Phased Array Design Study for High Speed Axle Inspection using an Electronically Rotating Beam", ESIS TC24 Workshop "Integrity of Railway Structures", 24-25 October 2016, Leoben, Austria
- [4] Boehm, R., Heckel, Th., Spruch, W., Jacob, S., "Automatisierte Prüfung von Radsatzwellen im eingebauten Zustand", 9. Fachtagung Zerstörungsfreie Prüfung im Eisenbahnwesen, März 2016, Wittenberge