

Ultraschallprüfung an Hohlwellen mit einem Gruppenstrahler-Kegelarray

Uwe VÖLZ*, Rainer BOEHM*, Thomas HECKEL*, Wolfgang SPRUCH**

* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

** BTD Büro für Technische Diagnostik, Brandenburg

Kurzfassung. Bei der wiederkehrenden Ultraschallprüfung von Eisenbahn-Radsatzwellen mit Längsbohrung von innen werden in der Regel konventionelle Systeme mit mechanischer Rotation der Prüfköpfe eingesetzt. Damit ist ein hoher technischer Aufwand verbunden, um eine sichere elektrische Kontaktierung und eine ausreichende Schallankopplung der Ultraschallprüfköpfe bei schnellen Prüffahrten zu erreichen. Eine Anpassung an unterschiedliche Bohrungsdurchmesser erfolgt durch den Wechsel des kompletten Prüfkopfträgers.

Die vorgestellte Technik arbeitet mit einem zentrisch in der Bohrung befindlichen rotationssymmetrischen Gruppenstrahler, dessen Schwingerelemente auf einem Kegel angeordnet sind. Der Einschallwinkel wird durch den Kegelwinkel und die Schallgeschwindigkeitsverhältnisse bestimmt. Die Rotation des Schallbündels wird ohne mechanische Bewegung im Wesentlichen durch die elektronische Verschiebung des aktiven Schwingerbereiches realisiert. Kleine Rotationswinkelschritte und die Schallbündelformung werden durch unterschiedliche Steuerung derselben Schwingerguppe erreicht. Die Zeit für die Prüfung einer Welle reduziert sich dadurch und die aufwändige und störanfällige elektrische Kontaktierung mit Schleifringen entfällt. Derselbe Kegelprüfkopf ist für einen großen Bohrungsdurchmesserbereich (z. B. 30 – 70 mm) einsetzbar. Die Anpassung erfolgt ausschließlich durch die verschiedenen Durchmesser der Abdichtungen für den koppelmittelgefüllten Bereich. Vorteile der neuen Prüftechnik sind die kürzeren Prüfzeiten, der geringere Wartungsaufwand für das Prüfsystem und die Eignung des Kegelarrays für alle Bohrungsdurchmesser.

Neben den theoretischen und praktischen Untersuchungen zur Realisierung eines solchen Prüfsystems werden erstmals auch Ergebnisse aus der Anwendung in einer Prüfanlage gezeigt.

Einführung

Die wiederkehrende Ultraschallprüfung von Eisenbahn-Radsatzwellen mit Längsbohrung, so genannten Hohlwellen, ist für die Gewährleistung der Sicherheit von Schienenfahrzeugen zwingend erforderlich. Sie erfolgt von der Bohrung aus und kann somit ohne Demontage des Radsatzes direkt am Schienenfahrzeug durchgeführt werden. Bisher eingesetzte Prüfsysteme arbeiten mit konventionellen oder Gruppenstrahler-Prüfköpfen, die mechanisch in der Bohrung rotiert werden, um eine Abtastung der Wellenoberfläche in Umfangrichtung zu ermöglichen. Mechanisierte Systeme dieser Art benötigen Schleifkontakte für die Übertragung der hochfrequenten Ultraschallsignale für jeden Prüfkopfkanal, die in der Praxis sehr störanfällig sind und die Prüfgeschwindigkeit einschränken.

Der hier verwendete Gruppenstrahler-Prüfkopf ersetzt die mechanische Rotation durch eine elektronisch gesteuerte Rotation des Schallfeldes und kann somit die

Prüfgeschwindigkeit bis an die Grenzen der physikalischen Schalllaufzeit erhöhen. Der technische Aufwand für die Manipulationstechnik wird dadurch deutlich reduziert. Ziel ist dabei, 3 mm tiefe Querrisse an der Oberfläche von Wellen mit 30 bis 70 mm Durchmesser zu detektieren. Die Auflösung muss mindestens 2° in Umfangsrichtung sowie 2 mm in Längsrichtung betragen und die vollständige Prüfung der Welle muss innerhalb von 5 Minuten abgeschlossen sein.

1 Prüfkonzept

1.1 Prüfsystem

Das Konzept des Ultraschallprüfsystems besteht darin, die Hohlwelle mit einem festen Einschallwinkel in axialer Richtung von ca. $\pm 45^\circ$ für die Transversalwelle und einer elektronisch gesteuerten Rotation des Schallfeldes durch Umschaltung der aktiven Elementgruppe eines Gruppenstrahler-Prüfkopfes abzutasten. Das System besteht aus einem Gruppenstrahler-Gerät (COMPAS[®]) mit einem Kegellaray-Prüfkopf, einer motorgetriebenen Linearachse zur axialen Bewegung des Prüfkopfes und einem Steuerrechner (PC), wie in Bild 1 dargestellt.

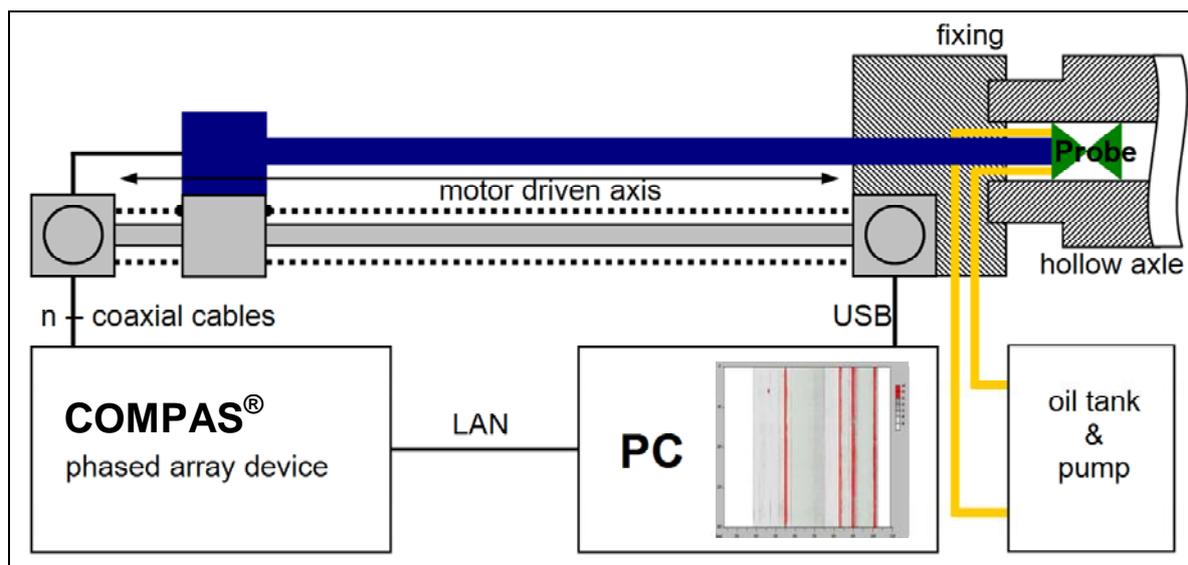


Bild 1. Ultraschallprüfsystem

1.2 Gruppenstrahler-Prüfkopf

Das Prinzip des Kegellaray-Prüfkopfes für die Detektion von Querfehlern ist in Bild 2 gezeigt. Der Prüfkopf besteht aus zwei Kegeln (jeder für eine axiale Einschallrichtung) mit einer rotationssymmetrischen Anordnung von je 48 rechteckigen Schwingerelementen mit einer Fläche von $1 \times 14 \text{ mm}^2$. Die Konstruktion wird durch eine theoretische Modellierung unterstützt und basiert auf Simulationsrechnungen für ein definiertes rotierendes Schallfeld mit angepasster Verzögerungszeitbelegung. Ein mathematisches Modell für diese spezielle Gruppenstrahlertechnik wurde an der BAM entwickelt.

Die Prüfkopfelemente sind auf der Kegeloberfläche angebracht. Das Schallfeld wird durch eine Gruppe von aktiven Prüfkopfelementen erzeugt und kann durch Umschaltung der aktiven Elemente sowie entsprechenden Verzögerungszeitbelegungen zur

Winkelsteuerung rotiert werden. Die Kopplung erfolgt durch die Ausfüllung des Volumens zwischen Kegel und Bohrungsinneseite mit Öl.

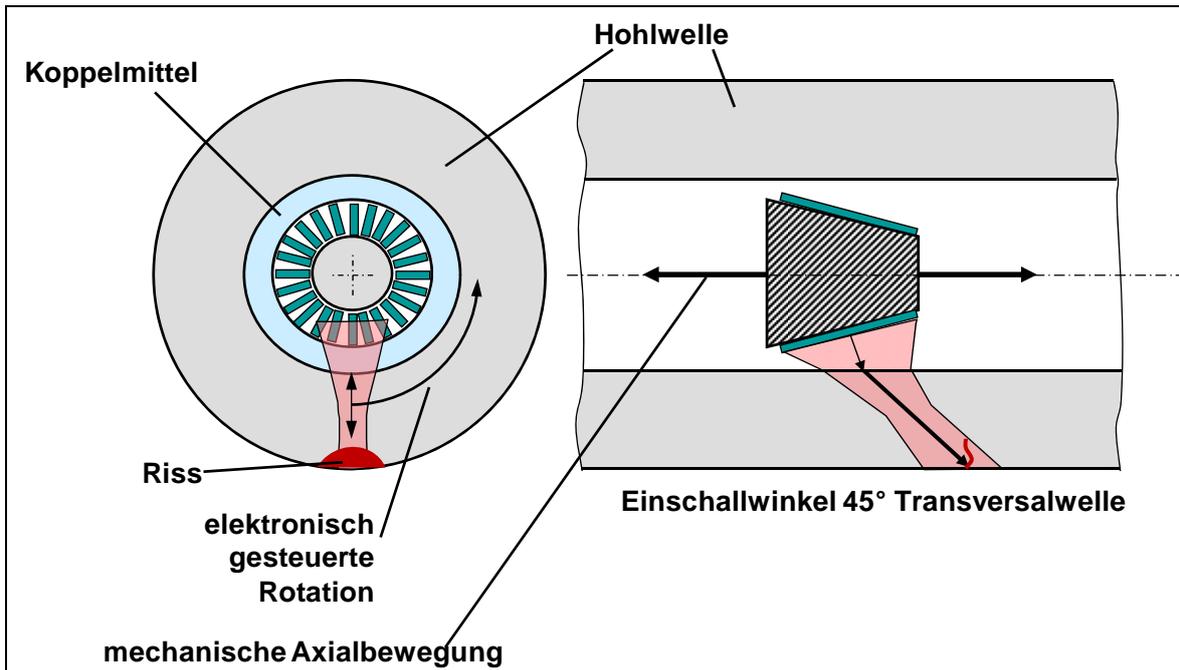


Bild 2. Prinzip des Kegelarray-Prüfkopfes

1.3 Prüfablauf

Im Folgenden sind die Randbedingungen für die Prüfung beschrieben. Eine Winkelauflösung von z. B. $1,5^\circ$ benötigt 240 Schritte je Umdrehung. Die axiale Auflösung von 2 mm benötigt 1000 Prüfpositionen in Längsrichtung für eine 2 m lange Welle. Die Prüfung mit zwei entgegengesetzt orientierten Kegelarrays ermöglicht die gleichzeitige Prüfung in beiden Einschallrichtungen. Somit müssen bei einer reinen Prüfzeit von einer Minute 2×240000 A-Bilder aufgenommen werden. Bei einem parallelen Betrieb der beiden Kegelarrays mit 180° versetzter Umfangsposition, zur Vermeidung der Überlagerung der Schallfelder, ergibt sich eine maximale Schalllaufzeit von $250 \mu\text{s}$ je A-Bild bzw. eine Pulsfolgefrequenz von 4 kHz.

Ein angenommener extrem langer Schallweg von 127 mm in der Koppelflüssigkeit (Bohrungsdurchmesser 100 mm) und 424 mm in Stahl (Wellendurchmesser 400 mm) benötigt $85 \mu\text{s} + 141 \mu\text{s} = 226 \mu\text{s}$ und ist somit kleiner als die maximal mögliche Länge des A-Bildes. Für jedes A-Bild werden 256 Pixelwerte gespeichert. Mit dem verwendeten COMPAS[®]-Gerät werden 2 Byte je Pixel erzeugt. Somit entsteht eine Datenmenge von ca. 2×2 MByte/s, die mit dem Prüfgerät problemlos gespeichert werden kann.

Bei der Darstellung und Dokumentation der Prüfdaten in Form von C-Bildern parallel zum Prüfvorgang verbleiben nach der reinen Prüfzeit von 1 Minute noch 4 Minuten für die Umsetzung des Prüfsystems zur nächsten zu prüfenden Welle, um den vollständigen Prüfablauf in 5 Minuten abzuschließen. Unter diesen realisierbaren Bedingungen können die oben genannten Ziele für die Prüfung der Hohlwelle mit einem Kegelarray erreicht werden.

2. Prüfkopfmodellierung

Umfangreiche Simulationen sind notwendig um die akustischen Probleme zu verstehen und den Prüfkopf optimal zu gestalten. Die ersten Ergebnisse wurden bereits 2006 vorgestellt [1]. Die hier gezeigten Berechnungen wurden für einen Bohrungsdurchmesser von 65 mm und einen Wellendurchmesser von 165 mm durchgeführt.

2.1 Fokussierung

Das ungesteuerte Schallfeld ohne Verzögerungszeitbelegung des Kegelarrays ist aufgrund der geometrischen Bedingungen sehr divergent, wie in Bild 3 unten dargestellt ist. Um eine ausreichende Empfindlichkeit des Prüfkopfes zu erreichen, muss eine elektronische Fokussierung vorgenommen werden. In Bild 3 oben ist das resultierende Schallfeld für eine optimale Verzögerungszeitbelegung zu sehen. Die maximale Amplitude der Richtcharakteristik kann dadurch, wie zu sehen ist, um bis zu 10 dB erhöht werden. Das heißt, die resultierende Empfindlichkeit ist bis zu 20 dB größer.

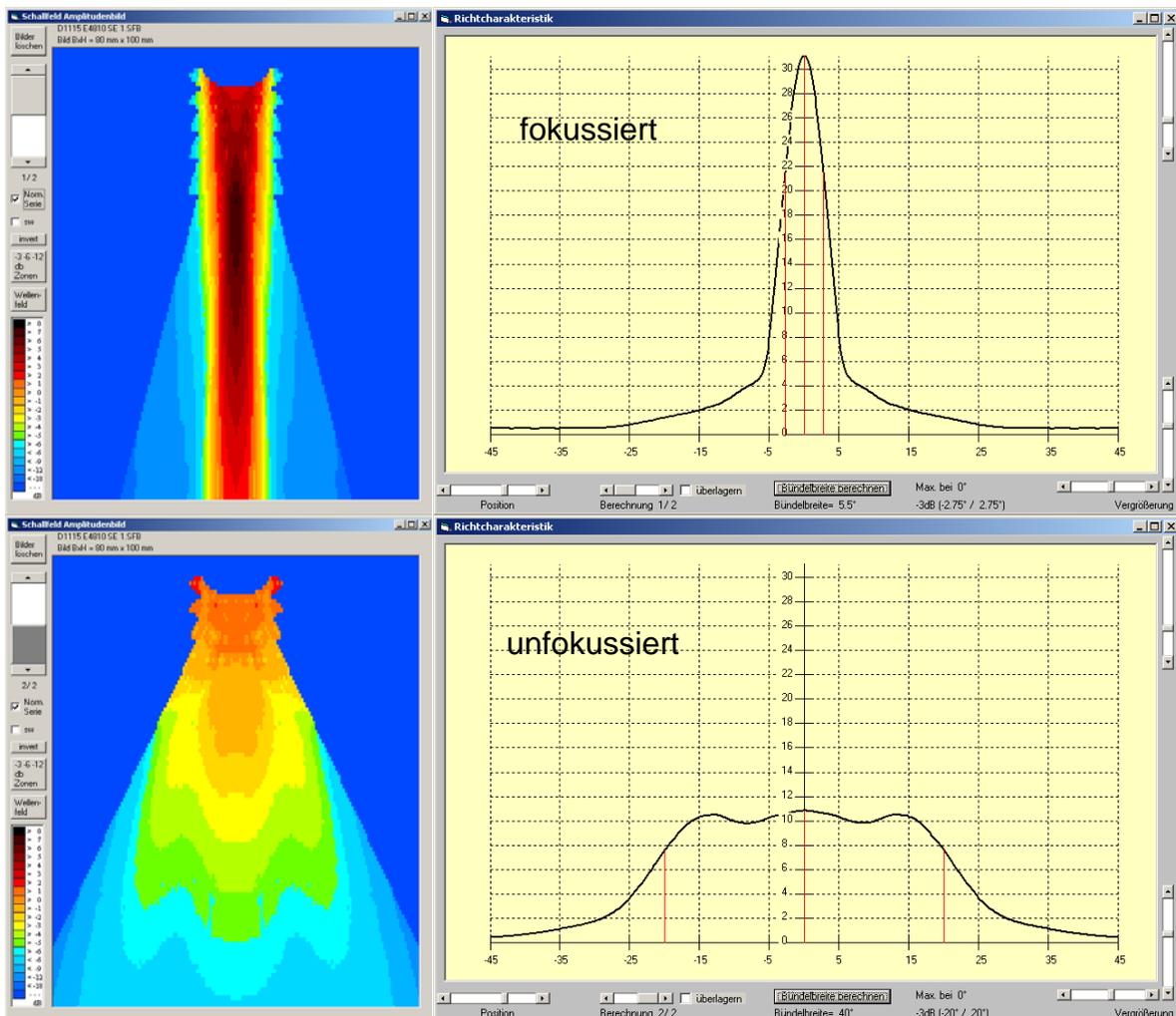


Bild 3. Modellrechnung des umlaufenden Schallfeldes, links: Schallfeld mit farbkodierter Amplitude, rechts: Richtcharakteristik in Umlaufrichtung

2.2 Anzahl der aktiven Elemente

Die Anzahl der aktiven Elemente bestimmt die Apertur des virtuellen Prüfkopfes. Eine große Apertur wird für eine gute Auflösung in Umlaufrichtung benötigt. Allerdings ist die Erhöhung der Amplitude durch eine größere Anzahl aktiver Elemente aufgrund der gekrümmten Prüfkopfoberfläche begrenzt. Ein optimaler Wert ergibt sich bei 10 aktiven Elementen, wie in Bild 4 gezeigt ist.

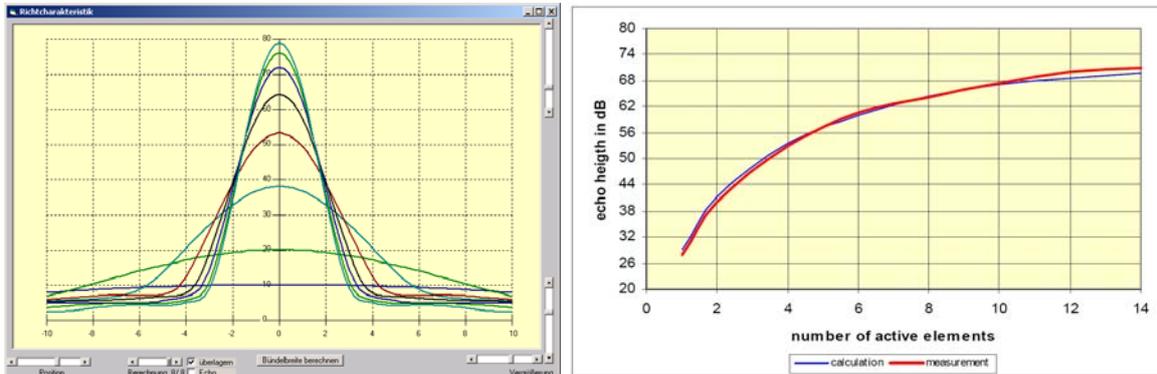


Bild 4. Modellrechnung für eine unterschiedliche Anzahl von aktiven Elementen, links: Richtcharakteristik in Umlaufrichtung, rechts: maximale Echoamplitude [1]

2.3 Richtcharakteristik

Bild 5 zeigt die Richtcharakteristik des Prüfkopfes in Umlaufrichtung und axiale Richtung in Abhängigkeit von der Arbeitsfrequenz des Prüfkopfes. In Umlaufrichtung ist das Amplitudenverhältnis zwischen den Gitterkeulen und der Hauptkeule abschätzbar. Die Divergenz des Schallfeldes, die die örtliche Auflösung des Prüfkopfes bestimmt, ist durch die 3 dB Grenzen definiert. Diese sind mit roten Linien in den Abbildungen für beide Richtungen gekennzeichnet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Gitterkeulen bei kleineren Prüfkopffrequenzen in der Amplitude reduziert werden. Die örtliche Auflösung dagegen wird durch größere Frequenzen erhöht. Die optimale Frequenz liegt bei 3 MHz. Mit dieser Frequenz ergibt sich eine Schallbündelbreite von ca. 10 mm in axialer Richtung und ein Divergenzwinkel von ca. 4° in Umlaufrichtung. Die Gitterkeulen haben dabei eine 10 dB kleinere Amplitude als die Hauptkeule, was im Impuls-Echo-Betrieb einen Signal-Stör-Abstand von 20 dB ergibt.

2.4 Winkelsteuerung

Die elektronisch gesteuerte Rotation des Schallfeldes durch Umschaltung der aktiven Elementengruppe ermöglicht bei 48 Elementen am Kegelumfang eine natürliche Winkelschrittweite von 7,5°. Für feinere Winkelauflösungen kann der Einschallwinkel in Umlaufrichtung elektronisch gesteuert werden. Bild 6 zeigt die überlagerten Richtcharakteristiken für eine gesteuerte Winkelschrittweite von 1,5°. Die Richtcharakteristiken ohne elektronische Steuerung bei 0° und -7,5° sind blau dargestellt. Diese Kurven haben die größte Amplitude. Der Amplitudenverlust der gesteuerten Schallfelder ist sehr gering. In den überlagerten Richtcharakteristiken ist ein maximaler Amplitudenverlust von weniger als 0,5 dB ablesbar.

Für die vollständige Rotation des Schallfeldes mit einer Auflösung von $1,5^\circ$ sind nur 3 verschiedene Verzögerungszeitbelegungen für das Array erforderlich, um die auf 0° , $\pm 1,5^\circ$ und $\pm 3^\circ$ gesteuerten Schallfelder zu realisieren. Die Richtcharakteristiken dieser Verzögerungszeitbelegungen zeigen nur eine geringe einseitige Erhöhung der Gitterkeulenamplitude und einen sehr kleinen Abfall der Maximalamplitude der Hauptkeule, so dass die Empfindlichkeit des Prüfkopfes dadurch nicht beeinträchtigt wird.

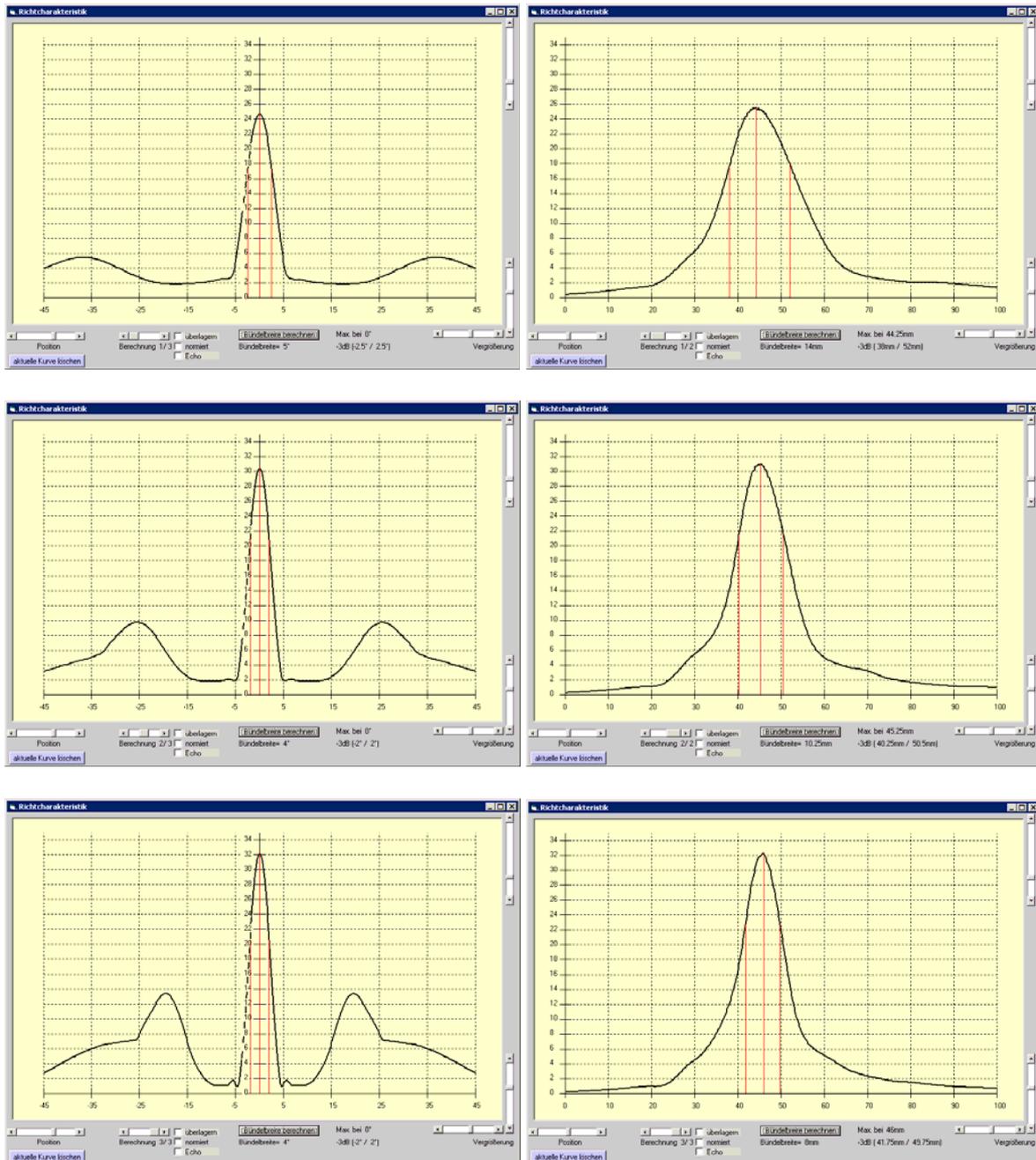


Bild 5. Modellrechnung, links: Richtcharakteristik in Umlaufrichtung mit Gitterkeulen, rechts: Richtcharakteristik in axiale Richtung, oben: 2 MHz, Mitte: 3 MHz, unten: 4 MHz

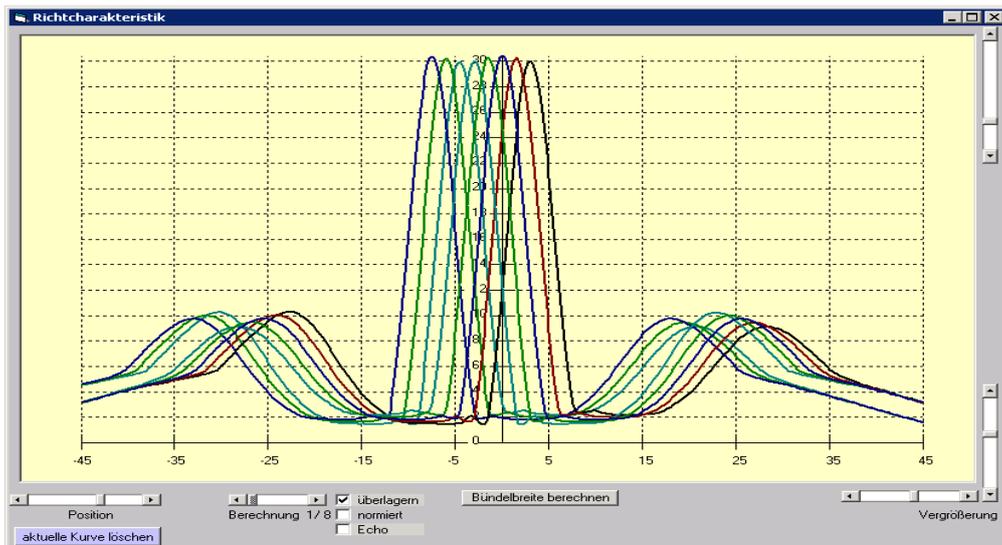


Bild 6. Modellrechnung der Richtcharakteristik in Umlaufrichtung mit Winkelsteuerung

3. Erste Prüfergebnisse

3.1 Prüfkopf

Der erste Prototyp des Kegelarray-Prüfkopfes, wie in den Bildern 7 und 8 zu sehen, wurde mit zwei entgegengesetzt orientierten Kegeln mit 30 mm Außendurchmesser für einen Einschallwinkel von $\pm 45^\circ$ realisiert. Die Anpassung erfolgte für einen Bohrungsdurchmesser von 65 mm. Das benötigte Ölvolumen um die Kegel, zur Ankopplung des Ultraschalls an die Welle, wird dabei mit einem Kunststoffbalg umhüllt. Damit ist es möglich, den Prüfkopf ohne Ablassen und erneutes Auffüllen des Koppelöls zur nächsten zu prüfenden Welle umzusetzen. Der Balg wird wiederum mit einem Koppelmittel umspült, um eine sichere Ankopplung an die Innenwand der Bohrung zu gewährleisten.

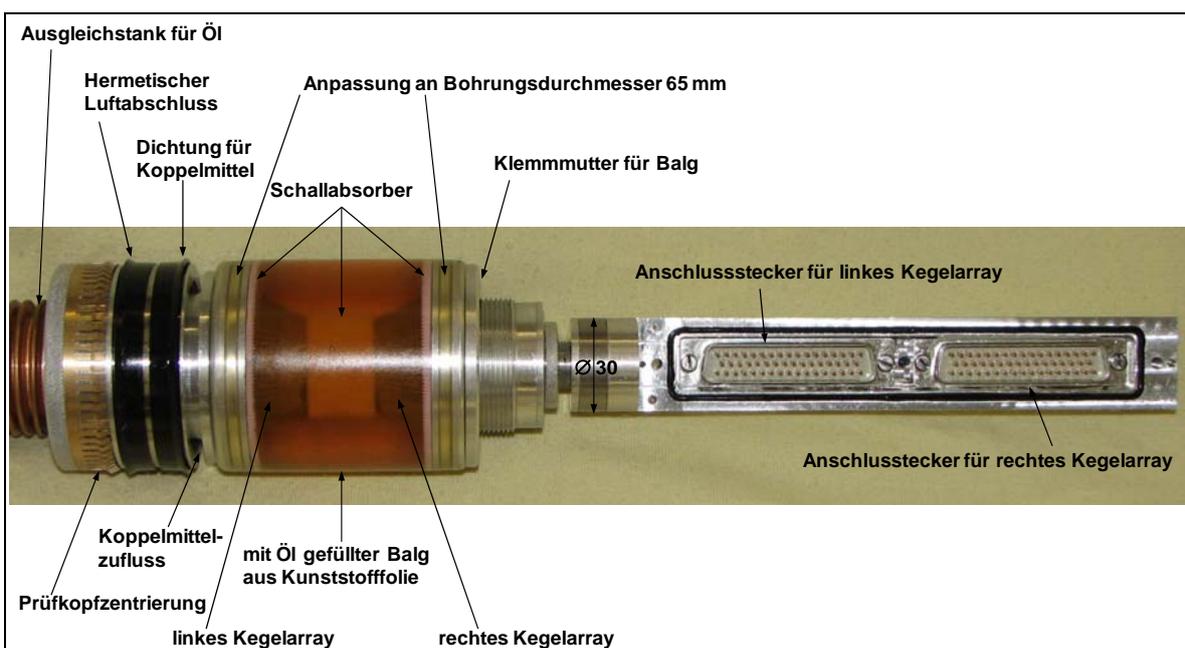


Bild 7. Aufbau des Kegelarray-Prüfkopfes



Bild 8. Kegelarray-Prüfkopf im Prüfsystem

3.2 Testwelle

In eine Testwelle mit 65 mm Bohrungsdurchmesser wurden 3 Referenzfehler auf dem Schaft, dem Radsitz und dem Schenkel sowie 4 Testfehler an den Querschnittsübergängen eingebracht, wie in Bild 9 skizziert ist. Die Fehler sind 2 mm tiefe Sägeschnitte die tangential zur Wellenoberfläche eingebracht wurden. Die Testfehler in den Querschnittsübergängen sind 10 mm von den jeweiligen Kanten entfernt.

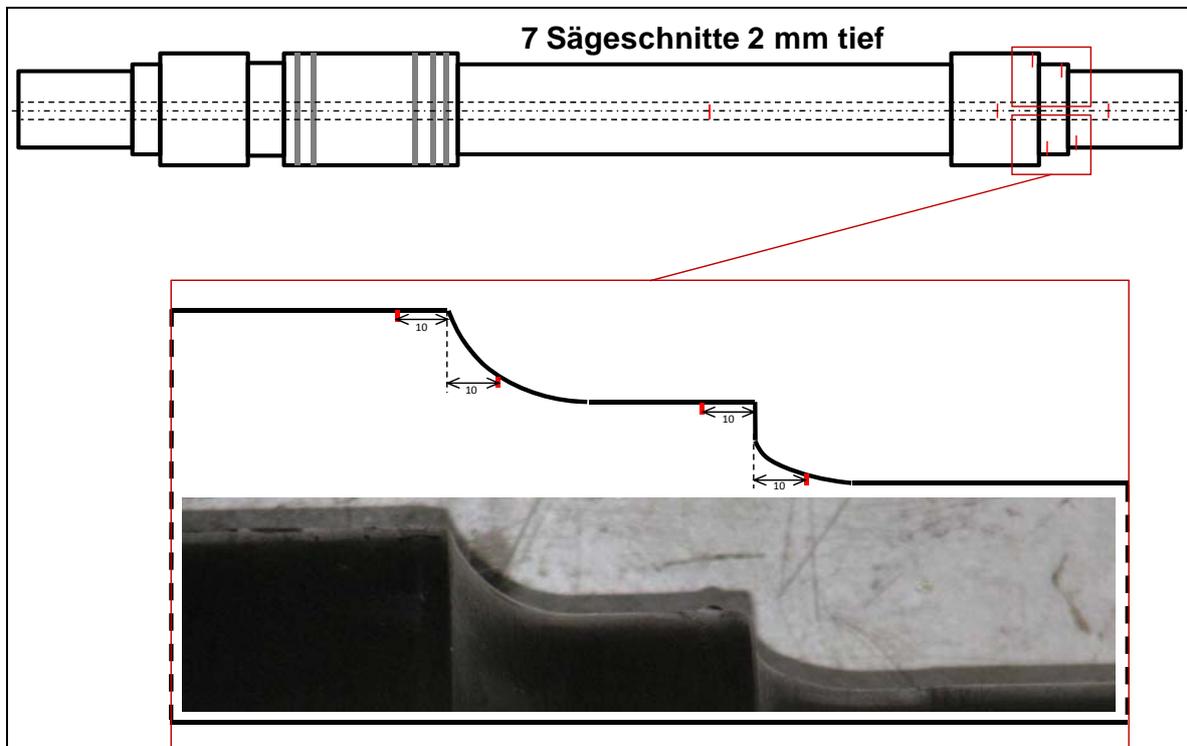


Bild 9. Testwelle mit 65 mm Innendurchmesser

3.3 Prüfung

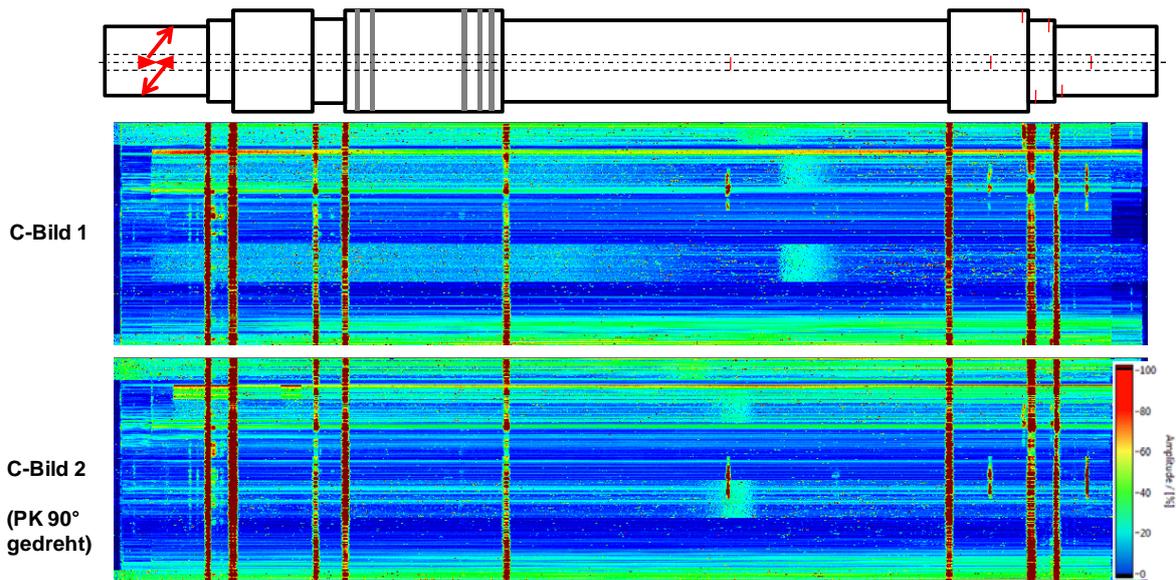


Bild 10. C-Bilder der Testwelle, oben: 1. Prüfung, unten: 2. Prüfung mit 90° gedrehtem Kegelarray-Prüfkopf

In Bild 10 sind die C-Bilder der ersten Prüfungen mit dem Kegelarray-Prüfkopf dargestellt. Dabei sind die einzelnen C-Bilder der beiden Kegel überlagert abgebildet. Wie zu sehen ist, sind die Formanzeigen der Kanten sehr gut erkennbar. Die 3 Referenzfehler sind im oberen C-Bild deutlich schlechter abgebildet, als die beiden Sägeschnitte in den ebenen Bereichen vor den Querschnittsübergängen. Die Testfehler in den gekrümmten Bereichen der Querschnittsübergänge können, aufgrund der ungünstigen Winkelverhältnisse und dem somit fehlenden Winkelspiegel, mit dem gewählten Einschallwinkel von 45° nicht detektiert werden.

Für das untere C-Bild wurde der Prüfkopf um 90° gedreht. Dadurch werden die Testfehler vor den Querschnittsübergängen an der gleichen Umfangsposition wie die Referenzfehler im oberen C-Bild abgebildet. Wie zu erkennen ist, sind die Anzeigen dieser Fehler hier deutlich schlechter ausgebildet, während die Referenzfehler jetzt deutlich besser abgebildet werden. Die gestörten Bereiche in Umfangsrichtung sind an der gleichen Position wie im oberen C-Bild verblieben.

Es zeigt sich also eine unterschiedliche Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der Prüfkopfdrehung, was auf eine ungleichmäßige Kopplung der großen Balgoberfläche zurückgeführt werden kann. Durch das Koppelproblem lässt sich auch ein Teil der Störanzeigen erklären, die durch Wölbungen der Balgoberfläche entstehen können. Gleichzeitig treten aber auch störende Reflexionen von der Dämpfungsschicht zwischen den Kegeln auf. An dieser Stelle sind noch weitere Arbeiten zur Optimierung des Prüfkopfaufbaus bezüglich der Koppelmittelzufuhr und -verteilung sowie der Gestaltung der Dämpfungsschichten erforderlich.

4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Kegelarray-Prüfkopf zur Prüfung von Radsatzwellen mit Längsbohrung vorgestellt. Dieser Prüfkopf arbeitet ohne mechanische Rotation und benötigt somit keine störanfälligen und wartungsintensiven Schleifkontakte zur HF-Signalübertragung und ist leicht an verschiedene Bohrungsdurchmesser anpassbar.

In ersten praktischen Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit diesem Prüfkopf bei einer Auflösung in Umlaufrichtung von $1,5^\circ$ und in axialer Richtung von 2,0 mm eine Prüfzeit für die gesamte Oberfläche der Radsatzwelle von 1 Minute möglich ist. Das ist deutlich schneller als mit vergleichbaren mechanisch rotierenden Prüfsystemen. Die auf umfangreichen Simulationsrechnungen basierende Prüfkopfkonstruktion ist für eine mechanisierte Prüfung von Radsatzwellen mit Längsbohrung geeignet. Es konnte nachgewiesen werden, dass das Prinzip des Kegelprüfkopfes mit einem Öl gefüllten Balg in der Praxis funktionsfähig ist. Dabei konnten die Vorgaben aus der Aufgabenstellung des Projektes weitgehend erfüllt werden.

Allerdings sind noch weitere Optimierungsarbeiten zur Unterdrückung von Störsignalen und zur Erfassung von Rissen in den Querschnittsübergängen notwendig. Das erfordert unter Umständen auch eine Erweiterung des Grundprinzips um weitere Einschallwinkel und -richtungen.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten Projektes WOLAXIM FP7-SME-2010-1-262242 erarbeitet.

Referenzen

- [1] R. Boehm, W. Spruch, "Phased Array Rotation Scanner Probe System for Ultrasonic Testing of Sleeve Shafts", ECNDT 2006,
<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Fr.1.3.3.pdf>
- [2] U. Tessaro, T. Heckel, R. Boehm, M. Guichard, H. Mrasek, G. Brekow, "Ultrasonic Testing of Railway Axles from a Borehole in Axial Direction", ECNDT 2006,
<http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/P195.pdf>
- [3] T. Oelschlägel, H. Hintze, T. Heckel, J. Becker, "Perspektiven der Gruppenstrahlertechnik bei der Prüfung von Radsatzwellen mit Längsbohrung", DGZfP-Jahrestagung 2005,
<http://www.ndt.net/article/dgzfp05/v34.pdf>