Untersuchungen zum Einfluss von Geometrie- und Temperaturabweichungen bei der Stangenprüfung mit Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik

Gottfried SCHENK*, Daniel BRACKROCK*, Rainer BOEHM*, Marc KREUTZBRUCK*, Wolfram A. Karl DEUTSCH**, Michael JOSWIG**, Klaus MAXAM**, Volker SCHUSTER**
* Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
** Karl Deutsch Prüf- und Messgerätebau, Wuppertal

Kurzfassung. Bei der automatisierten Prüfung von Stangen mit Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Prüfkopfparameter wie Einschallwinkel, Fokustiefe und Schallbündelbreite programmgesteuert an sich verändernde Prüfbedingungen anzupassen. Zu diesen zählt die Temperatur des Koppelmediums (Wasser), die in einem Bereich von 10°C bis 50°C liegen kann, was zu unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten führt und den Einschallwinkel verändert. Mit der Folge, dass unter Umständen die geforderte 100%-Abdeckung des Prüfvolumens nicht mehr gewährleistet ist.
Auch geometrische Abweichungen, wie sie durch die fertigungsbedingte Streuung des Prüflings gegeben sind, können Einfluss auf das Prüfergebnis nehmen. So führen Abweichungen vom idealen Geradheitszustand zu Fehlpositionierungen des Prüfkopfs, was wiederum Einfluss auf die Lage und Beschaffenheit des Schallbündels in der Stange hat. Ähnliches gilt für nicht vollkommen kreisförmig ausgebildete Stangendurchmesser, die unterschiedliche Schalleintrittsbedingungen bewirken und Abweichungen von den theoretisch ermittelten Werten zur Folge haben.
Im Rahmen eines vom BMWi geförderten Forschungsvorhabens wurde der Einfluss dieser Parameter untersucht und ihre Auswirkungen für den Betrieb einer automatisierten Prüfanlage unter realen Betriebsbedingungen ermittelt. Dies betrifft vor allem den maximal möglichen Schallbündelversatz innerhalb des Arrays, der die Anzahl der erforderlichen Prüftakte bestimmt und damit die maximale Vorschubgeschwindigkeit des Prüflings. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur programmgesteuerten Kompensation der untersuchten Temperatur- und Geometrieabweichungen durch eine flexible Anpassung der Gruppenstrahler-Prüfkopfparameter aufgezeigt.

Prüfaufgabe

Die Prüfung von Halbzeug wie Stangen gehört zu den Standardaufgaben in der Stahlindustrie. Halbzeuge stellen das Ausgangsmaterial für weitere Produktionsschritte z.B. in der Automobilindustrie dar und unterliegen sehr hohen Qualitätsanforderungen. Dazu gehört u.a. die Freiheit von Materialfehlern wie Rissen oder Einschlüssen.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

Bild 1: Stangen mit unterschiedlichen Durchmessern

Aus diesem Grund sind die Hersteller von Halbzeug-Produkten (Bild 1) gezwungen, ihre Produkte bereits während des Produktionsprozesses zerstörungsfrei auf Fehlerfreiheit zu prüfen. Ein sehr leistungsfähiges und in der industriellen Praxis bereits seit vielen Jahren eingeführtes Verfahren ist die Ultraschallprüfung. Sie erlaubt, im Gegensatz zur Durchstrahlungsprüfung, eine automatisierte Prüfung mit hohem Durchsatz der Prüfobjekte und die Erstellung des Prüfbefunds in Echtzeit, d.h. unmittelbar während der Prüfung. Zur schnellen Identifizierung werden hierbei Fehlerstellen z.B. mit Hilfe von Farbpistolen unmittelbar während der Prüfung auf dem Prüfling markiert.

In der Regel kommen Ultraschall-Sensoren mit festen Schallfeldparametern zu Einsatz, d.h. der Einschallwinkel, der Fokustiefenbereich und die Position des Schallbündels sind durch den mechanischen Aufbau des Prüfkopfs bzw. der Halterung festgelegt (Bild 2) und damit unveränderbar. Aus diesem Grund sind für eine ausreichende Schallüberdeckung bis zu 15 konventionelle Prüfköpfe notwendig, deren Zahl sich bei Umrüstung auf andere Durchmesser auf bis zu 45 erhöhen kann. [1].

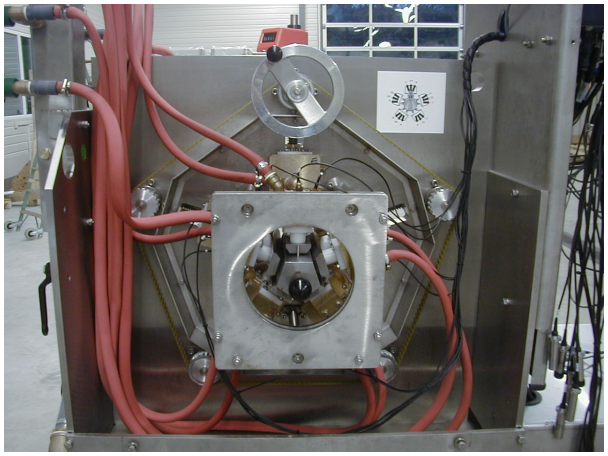


Bild 2: Prüfmechanik mit fünfzehn konventionellen Ultraschall-Prüfköpfen

Prüfkonzepte mit Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik

Ein Gruppenstrahler („Phased Array“) besteht aus einer Strahlerfläche, die ein- oder zweidimensional aufgebaut und in kleine Einzelelemente unterteilt ist. Derartige Strahlergruppen gewährleisten ein in weiten Grenzen elektronisch steuerbares Schallfeld, und zwar in Form der Variation des Einschallwinkels, der Fokustiefe und -schlauchlänge und der Schallbündelposition [2].

Lineare Gruppenstrahler mit gekrümmter Schwingerfläche eigenen sich in besonderer Weise für die Prüfung von rotationssymmetrischen Prüfobjekten. So führt der Einsatz von Viertel- oder Achtelschalen-Arrays mit 128 bzw. 64 Elementen durch die optimale Anpassung an die Stangengeometrie zu einem signifikant verbesserten Signal-Rausch-Verhältnis, darüber hinaus können durch die aktiven Strahlergruppen („virtuelle Prüfköpfe“) eine Vielzahl von Einschallpositionen eingenommen und somit eine große Anzahl von konventionellen Prüfköpfen ersetzt werden. Der elektronische Versatz einer aktiven Schwingergruppe von 16 oder 32 Elementen („virtueller Prüfkopf“) über den Gesamtschwinger ermöglicht sowohl eine programmgesteuerte Anpassung an Stangen mit unterschiedlichem Durchmesser wie auch eine Optimierung in Bezug auf die Anzahl der Prüftakte und den Grad der Überdeckung (Bild 3). Darüber hinaus können elektronische Schallbündelvariationen wie Winkel-, Fokus- und Bündelbreitensteuerung programmgesteuert durchgeführt werden [3].

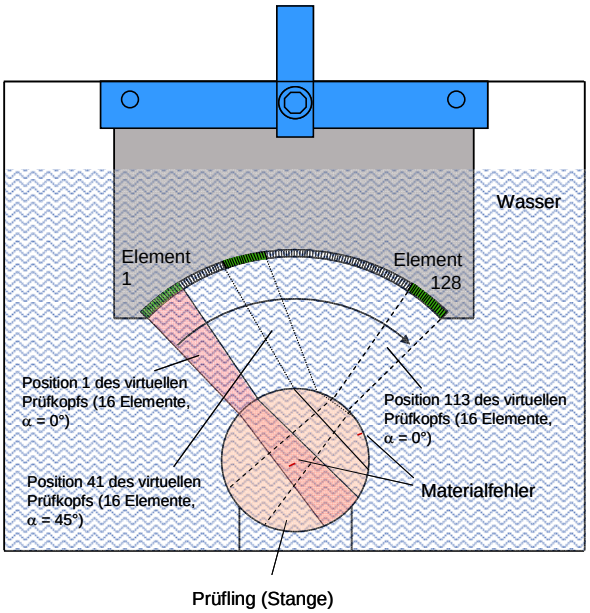


Bild 3: Prüfkonzept mit Viertelschalenarray mit 128 Elementen

Für den praktischen Einsatz in einer automatisierten Prüfanlage bringt es Vorteile, 4 derartige Viertelschalenarrays paarweise axial versetzt um das Prüfobjekt anzuordnen, um durch den parallelen Betrieb von jeweils zwei Arrays eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit und damit eine höhere Prüfgeschwindigkeit zu erreichen (Bild 4).

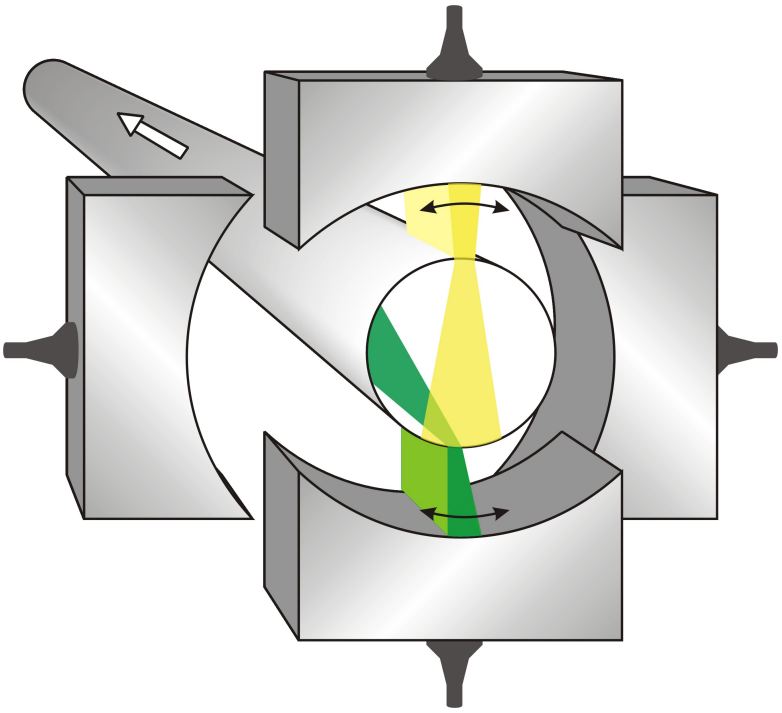


Bild 4: Prüfkonzept mit 4 Viertelschalenarray mit je 128 Elementen

Der Einfluss der Temperatur auf die Prüfsicherheit

Da die Produktionsstätten von Halbzeug und die in ihnen installierten Prüfanlagen in unterschiedlichen Weltregionen mit z.T. stark alternierenden klimatischen Bedingungen angesiedelt sind, muss beim laufenden Prüfbetrieb mit Temperaturschwankungen von +10°C bis +50°C gerechnet werden (im Extremfall kann die Hallentemperatur sogar auf -10°C sinken). Bedingt durch die starke Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Wasser (Bild 5) führt dies zu Veränderungen des Schallfelds, insbesondere des Einschallwinkels und der Schallbündelbreite, was Auswirkungen auf die Abdeckung des Prüfvolumens hat.

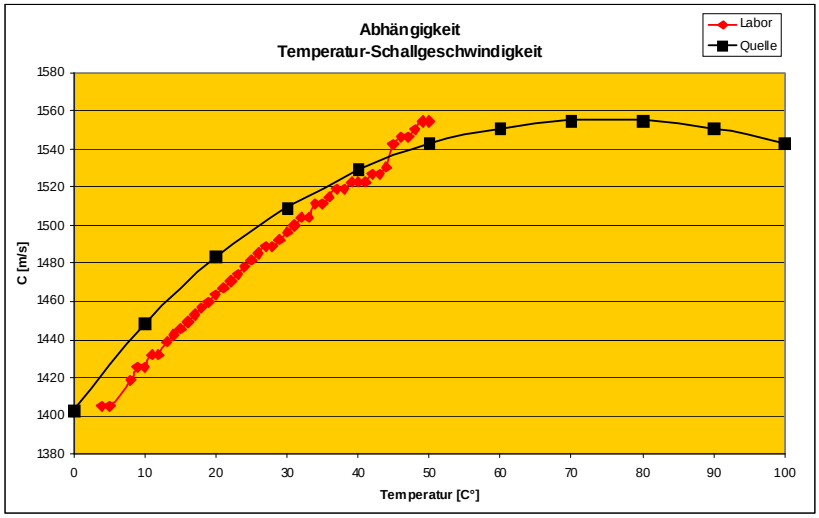


Bild 5: Schallgeschwindigkeit in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur

Mit Hilfe einer Messreihe unter Laborbedingungen wurde der Einfluss der Temperatur des Koppelmediums (Wasser) auf die Prüfempfindlichkeit und damit auf die geforderte 100%-Volumenabdeckung untersucht. Hierzu wurde ein Testkörper mit Flachbodenbohrungen unterschiedlichen Durchmessers und Tiefenlage sowie zwei verschieden tief eingebrachten Nuten (Bild 6) in einem Wasserbad unter definierten Temperaturbedingen untersucht. Es kamen sowohl Achtel- wie auch Viertelschalenarrays zum Einsatz, die vom BAM-eigenen COMPAS-XXL Prüfsystem gesteuert wurden.

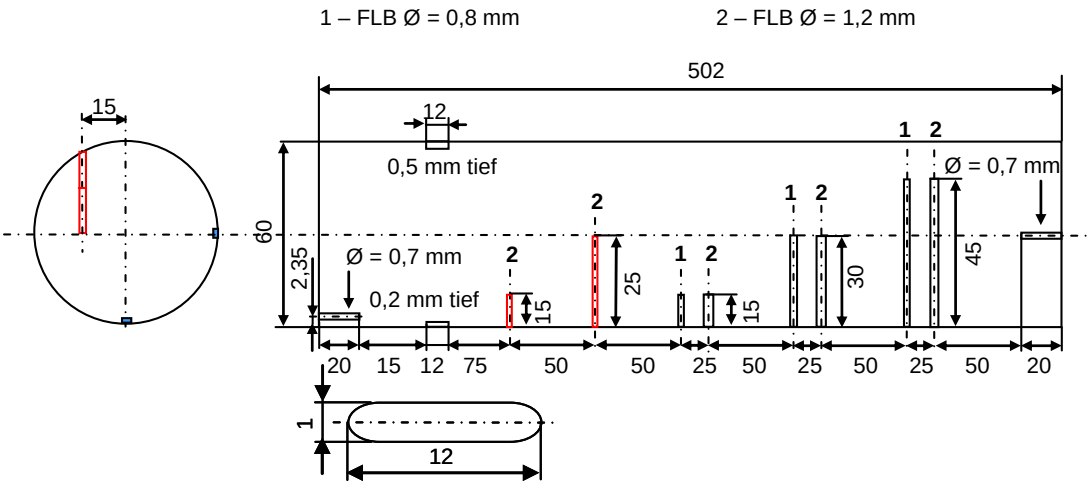


Bild 6: Stangentestkörper mit Ø 60 mm und künstlich eingebrachten Testreflektoren

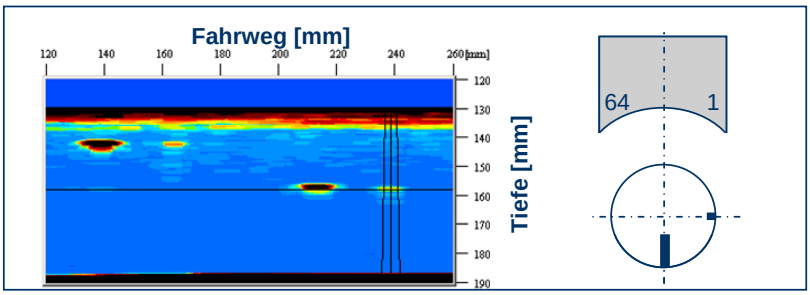
Bedingt durch die Schallbrechung bei den vorliegenden geometrischen Gegebenheiten war der Einfluss der Temperaturschwankungen auf die Schrägeinschallung sehr viel signifikanter als bei der Senkrechteinschallung, dies allerdings erst bei Wassertemperaturen von unter 16°C. Für erstere wurde bei 8°C eine Abnahme der Prüfempfindlichkeit von 11 dB festgestellt, was durch eine Winkelabweichungen von 5°C bedingt ist. Durch eine entsprechende Anpassung der Verzögerungszeiten konnte dieser Amplitudenverlust kompensiert werden.

Der Einfluss der Stangen-Geradheit auf die Prüfsicherheit

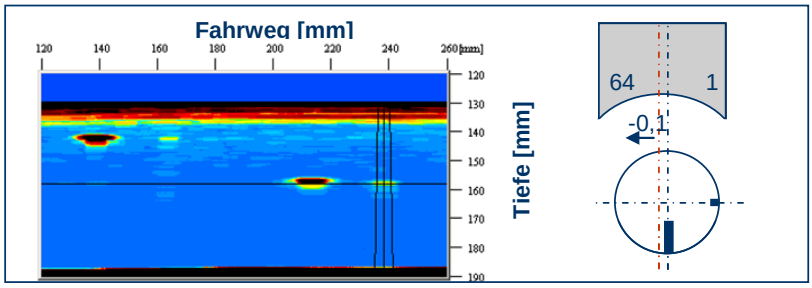
Jede Abweichung der realen Stangenform von der idealen Geometrie hat Auswirkungen auf die Schallfeldausbildung und damit auf die Prüfsicherheit. In der Praxis kommen sowohl Längs-Geradheitsabweichungen wie auch ein seitlicher Versatz vor, was u.U. auch durch eine nicht exakt montierte Prüfkopfmechanik bedingt sein kann. Von den Produzenten von Halbzeug wird eine maximale Geradheitsabweichung von 1 mm/m garantiert, was einem Neigungswinkel von 0,06° entspricht.

Die Untersuchungen mit verschiedenen Neigungswinkeln ergaben sowohl für die Senkrecht- wie auch für die Schrägeinschallung einen vernachlässigbaren Einfluss. Erst ein Neigungswinkel von 5° führt bei der Detektion der o.g. Testreflektoren zu einem nicht mehr ausreichenden Signal-Rauschverhältnis, was einer Stangengeradheitsabweichung von 87 mm entsprechen würde (bezogen auf eine Länge von 1000 mm), laut Herstellerangaben aber ausgeschlossen werden kann

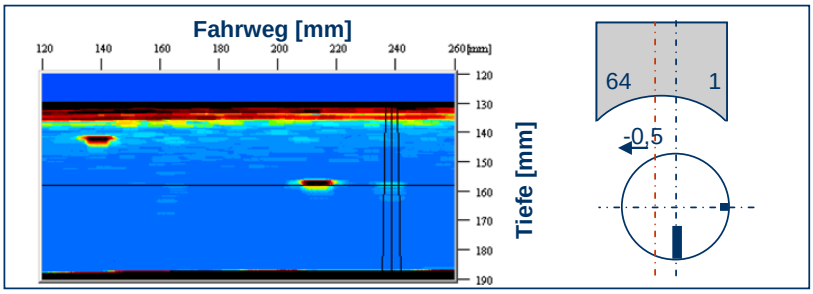
Anders die Ergebnisse beim seitlichen Versatz (Bild 7). Hier wurden bei der Senkrechteinschallung die genannten Testreflektoren z.T. bereits ab einer Abweichung von 0,5 mm nicht mehr mit einem ausreichendem Signal-Rauschverhältnis getroffen. Die außermittige Einschallung verwandelt die Senkrechteinschallung in eine Schrägeinschallung, was insbesondere im oberflächennahen Bereich, also bei den Reflektoren mit einer Tiefenlage von 15 mm und weniger, zu nicht mehr tolerierbaren Lücken führt.



B-Bild: Kein Achsversatz, KSR 0,8 in t = 30 mm, Elemente 37 - 22



B-Bild: 0,1 mm Achsversatz, KSR 0,8 in t = 30 mm, Elemente 37 - 22



B-Bild: 0,5 mm Achsversatz, KSR 0,8 in t = 30 mm, Elemente 37 - 22

Bild 7: Detektion von verschiedenen Flachbodenbohrungen (KSR) in 15 mm und 30 mm Tiefe bei seitlichem Versatz

Die geforderte vollständige Abdeckung des Prüfvolumens kann allerdings durch eine ausreichende Anzahl von Prüffunktionen erreicht werden [4]. Wird nämlich die Anzahl der virtuellen Prüfköpfe erhöht, so kann der Fehler auch bei der genannten axialen Abweichung aus einer anderen Schallbündelposition mit ausreichender Empfindlichkeit getroffen und detektiert werden. Eine weitere, allerdings aufwändigere Lösung wäre die automatische Erkennung der Konturabweichung und eine damit einhergehende online-Anpassung der Schallfelder.

Einfluss der Stangen-Ovalität auf die Prüfsicherheit

Die Abweichung der Stangengeometrie von der idealen Rundform, die sog. Stangen-Ovalität, stellt eine weitere Fehlerquelle dar. Diese Abweichung wird von den Herstellern zwar

auf maximal 1% eingeschränkt (prozentuale Abweichung von maximalem zu minimalem Durchmesser), jedoch liegen über den Einfluss auf die Qualität der Prüfung keine gesicherten Ergebnisse vor. Aus diesem Grund wurden Untersuchungen an einem entsprechend modifizierten Testkörper durchgeführt, der zu diesem Zweck einseitig abgedreht wurde (Bild 8).

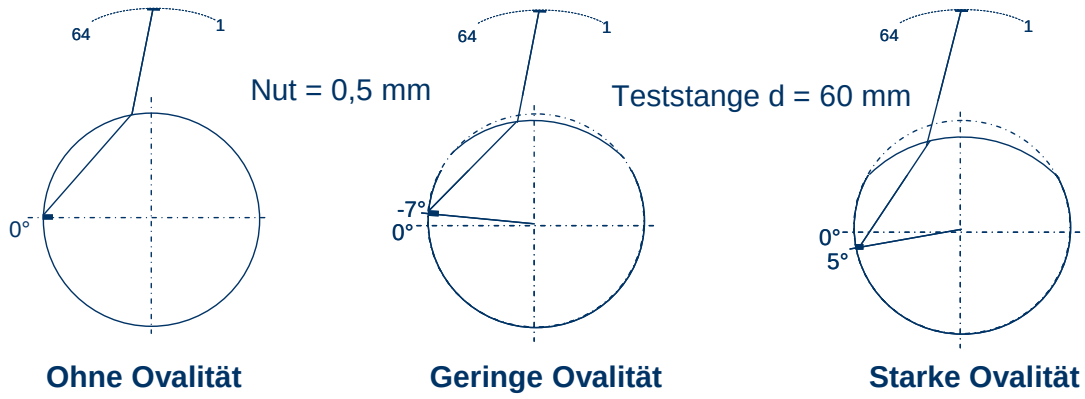


Bild 8: Stangentestkörper mit verschiedenen Ovalitäten: 0 mm; 0,5 mm; 1 mm

Wie aus den geometrischen Gegebenheiten ersichtlich, ist hier lediglich bei der Schrägeinschallung eine signifikante Auswirkung zu erwarten. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen auf diese beschränkt und durch Ermittlung der Schallbündelbreite die Fähigkeit der Schallfelder der virtuellen Prüfköpfe zur Kompensation der Abweichung überprüft. Die Messungen an einem Testkörper mit 60 mm Durchmesser ergaben an der Stangenoberfläche eine Schallbündelöffnung von 16° (Abfall 6 dB). Durch mehr oder minder starke Abflachung (Ovalität) wird das Schallbündel lediglich entlang des Umfangs im Bereich von +5° bis -7° verschoben. Da dies stetig und ohne Sprünge erfolgt, ist der Einfluss auf die Nachweisempfindlichkeit von untergeordneter Bedeutung, wie anhand von Versuchen mit Testnuten nachgewiesen werden konnte.

Zusammenfassung

Die Untersuchungen zum Einfluss der Temperatur- und Geometrieabweichungen bei der automatisierten Stangenprüfung mit Ultraschall-Gruppenstrahlertechnik wurden unter simulierten Praxisbedingungen im Labormaßstab an speziell angefertigten Testkörpern durchgeführt. Der Temperatureinfluss wurde durch eine definierte Temperierung des Wasserbades ermittelt, wobei dies lediglich bei der Schrägeinschallung zu relevanten Ergebnissen führte. Der dadurch verursachte Empfindlichkeitsverlust konnten jedoch – programmgesteuert - durch eine entsprechende Anpassung der Winkelwerte kompensiert werden.

Bei den Geometrieabweichungen war nur der seitliche Versatz von Stange oder Prüfkopf zur Spurmitte von Bedeutung. Abhilfe war hier durch eine ausreichende Zahl von Prüffunktionen möglich, da die „Blindheit“ aus einer Richtung durch das Schallbündel eines nachfolgenden virtuellen Prüfkopfs ausgeglichen werden konnte. Dies führte jedoch zu einer Herabsetzung der Vorschubgeschwindigkeit und damit zur Erhöhung der Prüfzeit, sodass auch eine automatische Konturerkennung mit entsprechender Schallfeldkorrektur in Betracht gezogen wurde. Die Praxistauglichkeit dieser Lösung konnte jedoch aufgrund des erheblichen technischen Aufwands nicht erprobt werden.

Festzustellen ist, dass die Gruppenstrahlertechnik in Bezug auf die untersuchten Phänomene klare Vorteile gegenüber der konventionellen Technik aufweist. Jedoch ist der optimal angepasste Einsatz dieser Technik erforderlich, um eine ausreichende Prüfsicherheit unter Praxisbedingungen zu gewährleisten (Bild 9).

Bild 9: Anlagenprototyp für die automatisierte Stangenprüfung mit Gruppenstrahlertechnik

Referenzen

[1] W.A.K. Deutsch, V. Schuster: Automatisierte Stangenprüfung ohne Rotation, Firmenpublikation, Wuppertal Juli 2003, www.karldeutsch.de

[2] H. Wüstenberg, G. Schenk: Entwicklung und Trends bei der Anwendung von steuerbaren Schallfeldern in der ZfP mit Ultraschall, DGZfP-Jahrestagung Mainz 2003, Tagungs-CD

[3] G. Schenk et al: Prüfkonzept mit Ultraschall-Gruppenstrahlern für die automatisierte Prüfung von Stangen, DGZfP--Jahrestagung Münster 2009, Tagungs-CD

[4] J. Maier et al: Untersuchung der Empfindlichkeitswelligkeit bei der Prüfung von Rundstangen mit Phased Array Prüfköpfen, DACH-Jahrestagung St. Gallen 2008, Tagungs-CD