



Sonderdruck: SD 1/50

Automatisierte Ultraschallprüfanlagen – Überlegungen zu Durchsatz, Überdeckung und Sensorik

Sonderdruck von
Oktober 2003

Eine Informationsschrift, zusammengestellt von
W. A. K. Deutsch, V. Schuster

Zusammenfassung

Hauptproblematik bei der automatisierten Prüfung ist eine möglichst vollständige Überdeckung des Bauteils mit möglichst wenigen Prüfköpfen und bei gleichzeitig möglichst hoher Prüfempfindlichkeit. Da sich diese Anforderungen z.T. widersprechen, ist immer ein praxisnaher Kompromiss zu suchen. Die Sensorik spielt eine entscheidende Rolle: Fokussierung bzw. Defokussierung des Schallfeldes, die Auswahl eines geeigneten Wandlermaterials und die Prüffrequenz stehen hierbei im Vordergrund.

Automatisierte Ultraschallprüfanlagen – Überlegungen zu Durchsatz, Überdeckung und Sensorik

Dr.(USA) Wolfram A. Karl Deutsch, Dr.-Ing. Volker Schuster

KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal

Tel: (+49-202) 7192 - 0, Fax: (+49-202) 714 - 932, info@karldeutsch.de, www.karldeutsch.de

1 Einleitung

Die automatisierte Ultraschall-Prüfung hat in vielen Industriebereichen einen festen Platz in der Produktionskette. In diesem Beitrag werden Beispiele aus der Stahlindustrie vorgestellt, bei denen hoher Durchsatz und stetig steigende Qualitätsanforderungen in einem rauen Umfeld in Einklang gebracht werden müssen.

Schwerpunkt dieses Beitrages liegt auf der zum Teil speziell entwickelten Sensorik – also Spezialprüfköpfen, die bezüglich ihrer Empfindlichkeit und Überdeckung für den jeweiligen Anwendungsfall optimiert wurden.

Die stetig steigenden Qualitätsanforderungen korrespondieren mit entsprechend sinkenden Mindestfehlergrößen, die im dynamischen Durchlauf reproduzierbar zur Anzeige gebracht werden müssen. Kleinere Fehlergrößen verursachen einen Trend zu höheren Prüffrequenzen mit dem Nachteil einer stärkeren Fokussierung. Um einen gegebenen Halbzeug-Querschnitt dennoch adäquat zu überdecken, ist in vielen Fällen eine hohe Anzahl von Prüfköpfen erforderlich.

Verschiedene Prüfkonzepte zur Stangenprüfung werden bezüglich der erreichbaren Überdeckung vorgestellt und diskutiert. Die Schallfelder von neu entwickelten defokussierenden Prüfköpfen für die Knüppel-Prüfung wurden vermessen und ihre besonders breite Prüfspur liefert eine besonders hohe Überdeckung bei dennoch hoher Empfindlichkeit.

2 Ultraschallankopplung bei der Prüfung von (rundem) Halbzeug

Bei der automatisierten Prüfung von Halbzeug gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten. In der Regel kommt Wasser für die Ankopplung des Ultraschalls zur Anwendung.

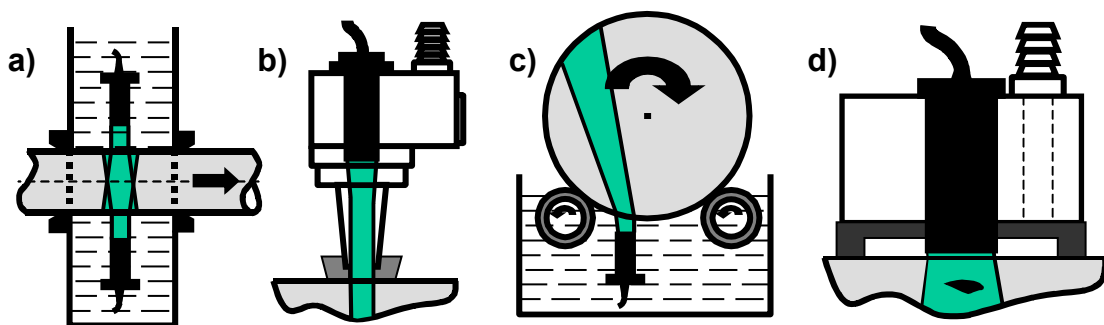


Bild 1: Ankopplung des Ultraschalls, **a)** Tauchtechnik für Stabstahl, **b)** Ankopplung mit Wasserstrahl, **c)** Pfützentechnik, und **d)** Spaltankopplung.

Am häufigsten kommen die ersten beiden Varianten zum Einsatz. Bei der Tauchtechnik durchläuft der Stab eine mit Wasser gefüllte Kammer. Ringförmig um den Stab sind die Prüfköpfe angeordnet. Dabei können die Prüfköpfe stationär, rotierend oder als Gruppenstrahler ausgeführt sein. Bei der Strahlankopplung dient eine mit Wasser gefüllte Düse der Schalleinleitung. Lediglich bei großen Durchmessern wird die Pfützentechnik angewendet. Entweder kommt ein Spiraltransport der Stange zum Einsatz oder die Stange wird in einem Tauchtank teilweise oder komplett eingetaucht und rotierend mit spiralförmiger Prüfspur geprüft. Spezielle Prüfköpfe werden bei der Spaltankopplung verwendet. Hierbei dient

ein schmaler Wasserspalt (ca. 0,5 mm) zwischen Prüfkopf und Stangenoberfläche der Schallankopplung. Durch die starke Oberflächen-Krümmung des Stabs wird diese Technik eher selten eingesetzt. Der Verschleiß der Prüfköpfe und die Anpassung des Koppelspalts an den Durchmesser sind problematisch. Den Techniken b), c) und d) ist gemeinsam, dass eine Führung der Prüfköpfe am Profil erfolgt. Diese Eigenschaft ist besonders bei größeren Geradheits-Toleranzen vorteilhaft.

Die Ankopplung spielt für die erreichbare Überdeckung pro Prüfkopf eine entscheidende Rolle. Die Tauchtechnik ermöglicht einen Einsatz von Prüfköpfen aller Typen. Es muss nur beachtet werden, dass Störechos vermieden werden. Störechos können auch dadurch entstehen, dass Schallanteile, die von einem Prüfkopf ausgehen, von einem zweiten Prüfkopf als Fehlerecho interpretiert werden. Axialer Versatz der Sensoren gegeneinander und ein optimiertes Taktprogramm sind hierfür Voraussetzung. Bei der Strahlankopplung ist die Bauform der Führungsdüsen entscheidend. Ein laminarer Wasserstrahl ist wichtig um Störechos aus der Düse zu vermeiden. Maximale Wandlerdurchmesser von 20 mm sind bisher einsetzbar. Breite Prüfspuren werden bei der Band- und Blechprüfung oft mit speziellen SE-Prüfköpfen in Spaltankopplung erzielt. Bei gekrümmten Oberflächen ist der Wandler-Durchmesser und somit auch die erreichbare Überdeckung pro Prüfkopf begrenzt.

3 Stabstahlprüfung mit linearen Prüfspuren

Die Stangenprüfung an schwarzem oder blankem Material kann mit sehr unterschiedlichen Prüfkonzepthen durchgeführt werden. In diesem Abschnitt wird die Prüfung mit Wasserstrahlankopplung (s. Bild 1b) vorgestellt bei linearem Vorschub des Prüflings und mit feststehenden Prüfköpfen. Die Prüfköpfe sind ringförmig um den Stab angeordnet. Die Anzahl der Prüfköpfe ist dabei variabel.

Der mechanische Grundrahmen dient der Aufnahme von Mehrfachprüfkopfträgern (s. Bild 2), die in äquidistanten Abständen um den Umfang angeordnet sind. Die Standardkonfiguration enthält in jedem Prüfkopfträger drei Prüfköpfe, wobei ein Prüfkopf senkrecht und zwei Prüfköpfe schräg in die Stange einschallen. Die Ankopplung erfolgt über Düsen geführte Wasserstrahlen. Laminare und blasenfreie Wasserstrahlen sind die Voraussetzungen für eine gute Ultraschall-Ankopplung. Die Prüfkopfträger sind mit einer Sohle ausgerüstet, die direkt auf dem Prüfgegenstand gleitet. Die federnde Aufhängung der Prüfkopfträger sorgt auch bei nicht gerichtetem Material für eine optimale Nachführung der Prüfkopfträger entlang der Oberfläche. Die Anpassung der Prüfanlage an einen anderen Durchmesser lässt sich simultan für alle Prüfkopfträger in sehr kurzer Zeit einstellen.

Mit der Standard-Anordnung von neun Prüfköpfen wird bereits eine hohe Überdeckung des Querschnitts mit Ultraschall erreicht. Bei höheren Anforderungen an Überdeckung und Prüfempfindlichkeit wird die Anzahl der Prüfköpfe entsprechend erhöht.

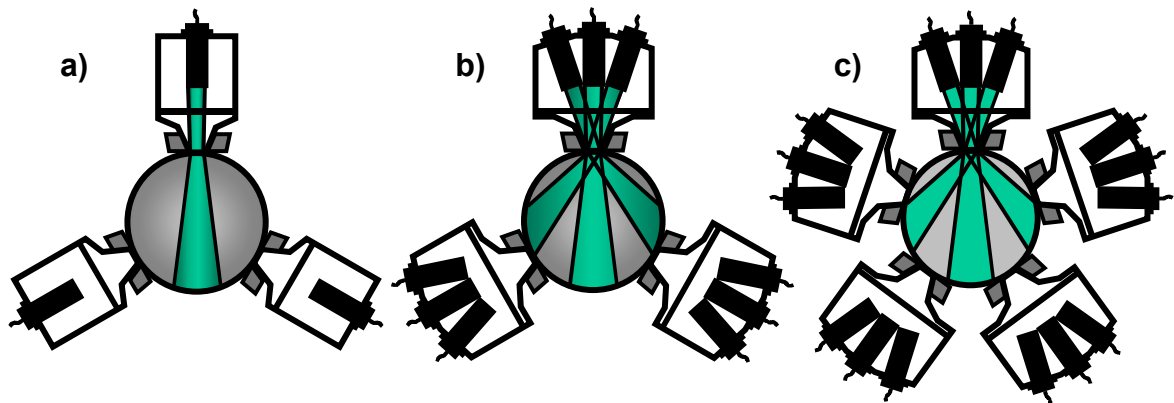


Bild 2: *Prinzipskizze für die Stangenprüfung mit Wasserstrahlankopplung, a) Basiskonfiguration mit drei Prüfköpfen zur Kernfehlerprüfung, b) Prüfung von runden Stangen mit neun Prüfköpfen (3 senkrecht, 6 schräg einschallend) und c) Prüfung mit 15 Prüfköpfen.*

Durch eine Simulationsrechnung soll die Überdeckung für einen typischen Durchmesser (50 mm) und mit 15 Prüfköpfen dargestellt werden. Es wurden Prüfköpfe mit 10 mm Wandler-Durchmesser mit einer Prüffrequenz von 4 MHz verwendet. Abgesehen von oberflächennahen Bereichen ist eine vollständige Überdeckung des Querschnitts gewährleistet.

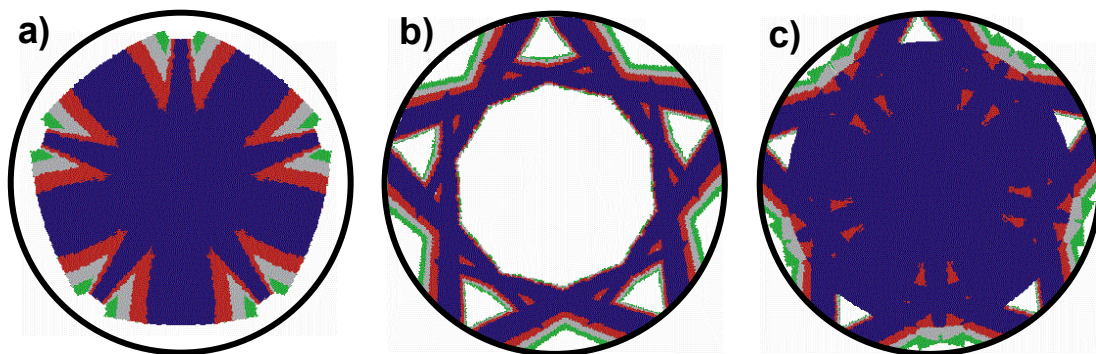


Bild 3: *Überdeckung für Stabstahl-Prüfung mit fünfzehn 4 MHz-Prüfköpfen für 50 mm Durchmesser, a) Überdeckung für fünf Senkrecht-Prüfköpfe, b) Überdeckung für 10 Winkelprüfköpfe - jeweils fünf in beide Umfangsrichtungen und c) deren Überlagerung (a + c).*

4 Tauchtechnik-Prüfung von Stangen mit PVDF-Folien-Prüfköpfen

Alternativ soll ein zweites Konzept zur automatischen Stangenprüfung mit linienfokussierten Prüfköpfen (Sensoren) vorgestellt werden. Neuartige Folien-Prüfköpfe verwenden PVDF (Polyvinylidenfluorid) als aktives Piezomaterial zur Schallerzeugung [2]. Durch geeignete Vorbehandlung der Folien ergeben sich hervorragende piezoelektrische Eigenschaften. Aufgrund der niedrigen Schallimpedanz eignen sich die Folienwandler besonders zur Prüfung in Tauchtechnik und bieten dann vergleichbare Schallintensitäten wie Prüfköpfe mit keramischen Wandlern.

Die Sensoren sind auf Trägerplatten angeordnet. Mehrere Trägerplatten werden zu einer Prüfkassette zusammengefasst und in wassergefüllte Prüfkammern eingesetzt [3, 4]. Diese Prüfkammern sind mit extrem schnellen Schließmechanismen ausgestattet, so dass beim Öffnen und Schließen wenig Wasser verloren geht und sehr kurze ungeprüfte Enden erreichbar sind.

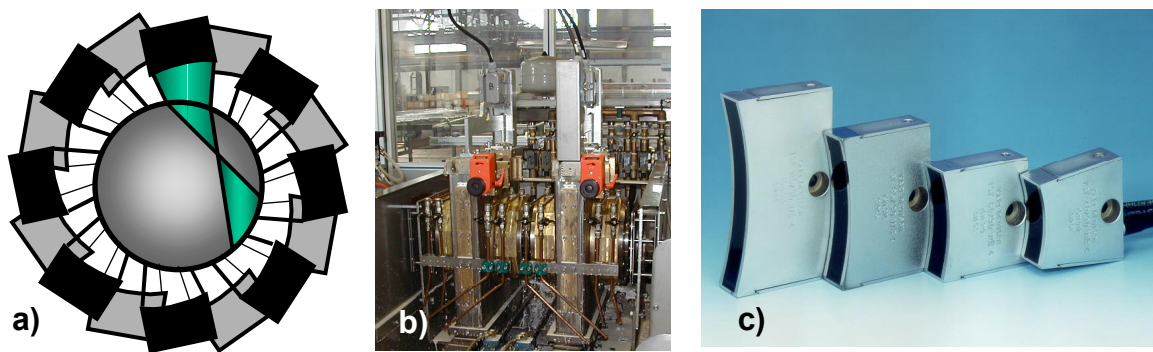


Bild 4: Prinzip und Aufbau einer Tauchtechnik-Stangenprüfanlage, a) Anordnung der Prüfköpfe, b) Ansicht der Prüfmechanik quer zur Durchlaufrichtung, c) Prüfköpfe mit Linienfokus in vier Baugrößen (Einsatz je nach Stabdurchmesser).

Die Prüfkassetten sind auf ihre jeweilige Prüfaufgabe optimiert. Die Anzahl der Winkelprüfköpfe kann somit variiert werden. Die Prüfung des Kernbereichs mit Senkrechteinschallung wird mit meist unfokussierten Tauchtechnikprüfköpfen durchgeführt. Je nach Durchmesser und geforderter Prüfempfindlichkeit sind aber auch linien- oder punktfokussierte Prüfköpfe einsetzbar.

Das Umrüsten auf einen neuen Durchmesser erfolgt durch eine zentrale Winkeleinstellung gleichzeitig für alle PVDF-Prüfköpfe und sorgt somit für kurze Umrüstzeiten. Der Wechsel auf einen anderen Durchmesserbereich (Dimensionswechsel) erfordert den Austausch der Prüfkassetten. Beim Dimensionswechsel wird berücksichtigt, dass für jeden Arbeitsbereich die richtigen Prüfköpfe eingesetzt werden. Da jeweils 30 Grad pro PVDF-Prüfkopf abgedeckt wird, wächst die Bauform der Prüfköpfe mit dem Stangendurchmesser. Die durch die Krümmung erzielte Linienfokussierung der Prüfköpfe ermöglicht bei der Prüfung von Rundprofilen eine sehr gleichmäßige Einschallung.

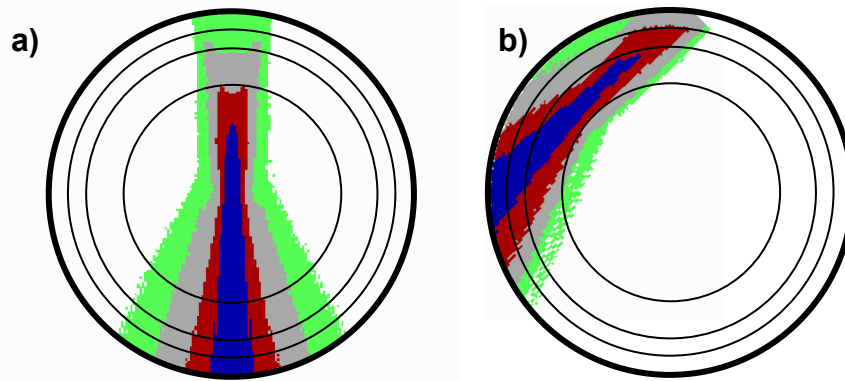


Bild 5: Überdeckung für einen linienfokussierten PVDF-Prüfkopf, **a)** Senkrechteinschallung, **b)** Winkeleinschallung.

Ungefähr 15 Prüfköpfe sind je nach Durchmesser ausreichend für eine vollständige Überdeckung des Querschnitts. Dieses Prüfkonzept hat sich besonders für gerichteten Blankstahl bestens bewährt und liefert eine gleichmäßige Prüfempfindlichkeit für den ganzen Querschnitt. Natürlich steigt die Nachweiswahrscheinlichkeit von Fehlstellen mit der Anzahl der verwendeten Prüfköpfe. Eine Vielzahl von unterschiedlichen Konfigurationen wurde bereits realisiert.

Beiden vorgestellten Konzepten ist eine sehr hohe Überdeckung des Stangenquerschnitts (in Abhängigkeit der Prüfkopf-Anzahl) gemeinsam. Typische Impuls-Folge-Frequenzen (pro Prüfkopf) bewegen sich im Bereich von 1 kHz, die durch akustische Randbedingungen nicht beliebig weiter gesteigert werden können (Phantomechos, Signal-Rausch-Verhältnis). Für das Beispiel einer Durchlaufgeschwindigkeit von 1 m/sec und einer Schussfrequenz von 1 kHz ergibt sich ein axialer Schussabstand von 1 mm. Typische Schallfeldbreiten der vorab gezeigten Prüfköpfe bewegen sich im Bereich von 5-10 mm. Somit ist eine vollständige Überdeckung in Durchlaufrichtung gewährleistet, was die Auffindung sehr kurzer Fehler ermöglicht.

5 Stabstahlprüfung mit schraubenförmigen Prüfspuren

Einige Anlagen zur Stabstahl-Prüfung verwenden schraubenförmige Prüfspuren. Dies kann sowohl durch Rotation der Prüfköpfe relativ zur Stange bei linearem Transport, als auch durch Rotation der Stange bei feststehenden Prüfköpfen erfolgen (Pfützentchnik mit Spiraltransport der Stange oder Traverse mit rotierendem Bauteil und Linearbewegung der Prüfköpfe).

Bei derartigen Systemen gibt es bezüglich ihrer Überdeckung zwei Aspekte zu beachten. Der Vorschub darf nicht größer sein, als die Breite der Prüfspur, um eine vollständige Überdeckung zu erreichen. Bei typischen Prüfgeschwindigkeiten im Halbzeugbereich (ca. 1 m/sec) ist diese Forderung nicht immer zu erfüllen. Abhilfe wird in diesen Fällen meist geschaffen, indem man eine minimal auffindbare Fehlerlänge definiert, die dann mindestens einmal sicher von der Prüfspur gekreuzt wird. Für alle Prüfkonzepte gilt jedoch, dass mit Entstöralgorithmien gearbeitet werden muss, um den Pseudoausschuss auf ein Minimum zu beschränken. Gängig ist z.B. die Verwendung einer Entstörrate, welche angibt, wie oft ein Fehlerecho die Schwelle zu überschreiten hat, bevor es zum Ausschuss des Prüfteils führt. Bei Rotiersystemen wird damit die auffindbare Fehlerlänge deutlich größer, da die Prüfspur mehr als einmal gekreuzt werden muss.

Die Überdeckung kann durch Erhöhung der Kanalzahl und somit durch Vergrößerung der Prüfspurbreite verbessert werden. Die Prüfköpfe werden möglichst dicht nebeneinander angeordnet, so dass die Schallfelder ebenfalls möglichst dicht zusammen rücken. Sonderbauformen und gemeinsame Gehäuse der Einzelschwinger (Prüfkopflineale) sind bei vielen Prüfanlagen anzutreffen.

Trotzdem ist es bei einer solchen Prüfkopfkonfiguration durch die natürliche Fokussierung im Bereich des Nahfeldes unmöglich, die Prüfspuren ohne Schwankungen bezüglich der Empfindlichkeit auszuführen. Als Beispiel sei ein Prüfkopflineal mit vier Einzelschwingern genannt. Das Lineal enthält vier Rechteckwandler mit den Abmessungen 8,5 x 10 mm². Die Prüffrequenz sei mit 7,5 MHz gewählt und der Wasservorlauf sei 50 mm

(SV) sd_1_50 Automatisierte UT Anlagen Durchsatz Überdeckung Sensorik.doc 08.Sep-2005

lang. Geprüft wird eine Stange mit 80 mm Durchmesser. Prüflücken mit einer Breite von ca. 5 mm sind im Bereich der Nahfeldlänge deutlich zu erkennen (Bild 6). Das Bild basiert auf einer Simulationsrechnung, in der die Schallfelder der Einzel-Prüfköpfe durch die Überlagerung von Punktquellen erzeugt wurden.

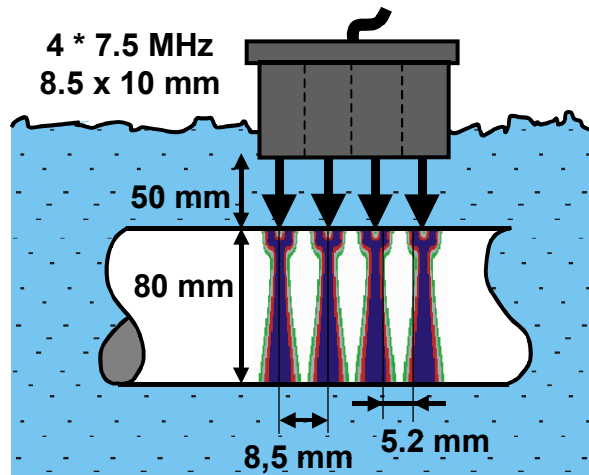


Bild 6: Überdeckung für ein Prüfkopflineal bestehend aus vier Prüfköpfen.

Der Trend bei der Stabstahlprüfung geht zu immer kleineren Fehlerlängen. Viele Ungenzen am Stab sind durch den Walzprozess länglich ausgewalzt. Nichtmetallische Einschlüsse lassen sich jedoch kaum verformen und bilden sehr kurze Fehlstellen im Stab. Auch diese sollen natürlich möglichst ausgesondert werden - ein schwieriges Unterfangen mit schraubenförmigen Prüfspuren! Abhilfe kann geschaffen werden, indem man benachbarte Prüfköpfe gemeinsam anregt. Diese Technik wird jedoch nur in Einzelfällen angewendet, wie z.B. bei der Rohrprüfung an nahtlos gewalzten Rohren bei Vallrourec & Mannesmann. Hierfür wurden kürzlich patentierte Prüfkopflineale vorgestellt [8].

6 Ultraschallprüfung an Knüppeln mit defokussierten Breitstrahlprüfköpfen

Für die Prüfung von Vierkantstahlknüppeln wurden spezielle Prüfköpfe mit besonders breiter Prüfspur entwickelt. Ähnlich wie bei der Stangenprüfung durchlaufen die Knüppel eine Prüfmechanik, an der federnd aufgehängte Prüfkopfträger angebracht sind. Die Ankopplung erfolgt mit geführten Wasserstrahlen. Der Federhub bewegt sich bei Knüppeln im Zentimeterbereich. Durch die zu erwartenden Geradheitsabweichungen (besonders an den Knüppelenden) wird im Anstellbetrieb gearbeitet. Die Prüfkopfträger werden daher pro Knüppel zwischen der Sicherheits- und der Prüfposition hin und her bewegt.

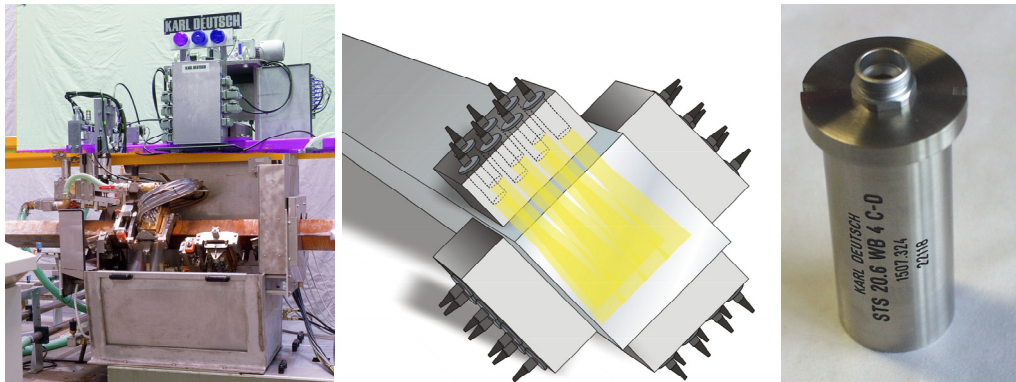


Bild 7: Automatisierte Knüppelprüfung im Stahlwerk, a) Prüfmechanik, b) Prüfprinzip mit vier Prüfkopfträgern und 28 Prüfköpfen, c) Spezialprüfkopf zur Knüppelprüfung.

Die Prüfaufgabe war nun eine möglichst vollständige Erfassung des Knüppelquerschnitts durch Senkrechteinschallung. Die Einschallung ist von allen vier Seiten möglich und wird je nach Knüppelabmessung durch den Anlagenbetreiber vorgewählt. An jeder Knüppelseite befindet sich ein Prüfkopfträger, der mit sieben Prüfköpfen bestückt ist. Der seitliche Versatz (pro Knüppelseite) zwischen zwei Prüfköpfen beträgt 15 mm. Damit ist die erforderliche Schallfeldbreite vorgegeben.

Gelöst wurde die Prüfaufgabe durch einen Tauchtechnikprüfkopf mit defokussiertem Composite-Wandler. Es handelt sich um einen breitbandigen Prüfkopf mit 4 MHz Mittenfrequenz. Durch die Defokussierung wird die sonst typische Schallfeldeinschnürung bei der Nahfeldlänge vermieden. Als Ergebnis wurde ein „Schallfeldschlauch“ mit fast konstantem Durchmesser erzeugt.

Gekrümmte piezoelektrische Wandler stellen an die Fertigung der Sensoren sehr hohe Anforderungen. Die Composite-Wandler stehen unter Spannung und müssen mechanisch entsprechend im Gehäuse montiert werden. Die erzielbare Standzeit der Prüfköpfe ist somit ein wichtiges Qualitätsmerkmal. Die zweite wichtige Voraussetzung ist eine reproduzierbare Schallfeldbreite, um bei einem Prüfkopfwechsel gleiche Prüfbedingungen zu erhalten.

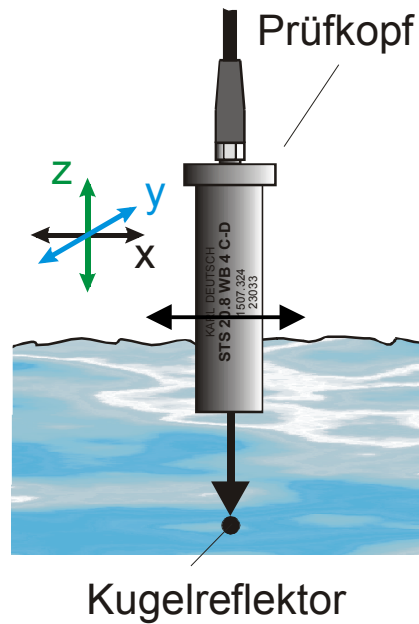


Bild 8: Schallfeldmessung für einen Spezialprüfkopf.

Zur Verdeutlichung dient eine Ansicht quer zur Schallausbreitungsrichtung. Die Messung wurde mit einem (kleinen) Kugelreflektor im Tauchbad (s. Bild 8) durchgeführt.

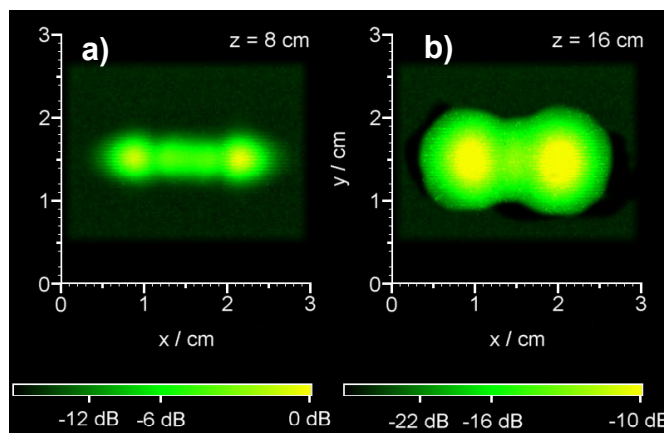


Bild 9: Vermessung des Schallfelds quer zur Ausbreitungsrichtung, a) Abstand Prüfkopf zum Punktflektor: 8 cm, b) Abstand: 16 cm.

Da der Prüfkopf nur in einer Richtung defokussiert aufgebaut ist, nimmt die Breite des Schallfelds bezüglich der Durchlaufrichtung wie erwartet zu. Die konstante Breite quer zur Knüppelachse (hier x-Achse) ist jedoch deutlich zu erkennen und hat einen Wert von ca. 2 cm.

7 Zusammenfassung

Hauptproblematik bei der automatisierten Prüfung ist eine möglichst vollständige Überdeckung des Bauteils mit möglichst wenigen Prüfköpfen und bei gleichzeitig möglichst hoher Prüfempfindlichkeit. Da sich diese Anforderungen z.T. widersprechen, ist immer ein praxisnaher Kompromiss zu suchen. Die Sensorik spielt eine entscheidende Rolle: Fokussierung bzw. Defokussierung des Schallfeldes, die Auswahl eines geeigneten Wandlermaterials und die Prüffrequenz stehen hierbei im Vordergrund.

8 Literatur

- [1] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt: Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen, Springer Verlag, 1997.
- [2] V. Deutsch, M. Platte, P. Möller: Ultraschallprüfköpfe aus Piezoelektrischen Hochpolymeren, Materialprüfung, Vol 32, S. 333-337, 1990.
- [3] V. Deutsch, M. Platte, P. Möller: Hochgeschwindigkeits-Ultraschall-Prüfsystem für Rundmaterial, DGZfP-Jahrestagung Trier, Tagungsband S. 185-194, 1990.
- [4] M. Platte, P. Möller: Automatisches Ultraschallprüfen von Blechen und Rohren, Bänder Bleche Rohre, S. 25-32, 3/1993.
- [5] P. Möller: Vergleich von gekrümmten Folien- und ebenen Piezo-Schwingern bei der Ultraschallprüfung von Rohren und Stangen, DGZfP-Jahrestagung Fulda, Tagungsband S. 205-213, 1992.
- [6] W. Deutsch, V. Schuster, M. Joswig, R. Kattwinkel: Schnelle, automatisierte Stangen- und Rohrprüfung ohne Rotation, DGZfP-Jahrestagung Celle, Tagungsband S. 407-415, 1999.
- [7] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, W. A. K. Deutsch, V. Schuster: Die Ultraschallprüfung – Kompakt & Verständlich, 77 Seiten, Castell-Verlag Wuppertal, 2002.
- [8] N. Arzt, S. Nitsche, H.-J. Bähmann, M. Lach, M. Platte: Ultraschallprüfen ohne Lücke, QZ – Qualität und Zuverlässigkeit, Ausgabe 01/2000.