



Sonderdruck: SD 1/51

Die Qual der Wahl: Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz?

Sonderdruck aus

DACH Tagung 17.5. bis 19.5.2004 in Salzburg, Österreich

Eine Informationsschrift, zusammengestellt von

V. Schuster, M. Lach, M. Platte

Zusammenfassung

Am Anfang steht die Frage: „Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz?“ Das ist die Frage, die sich der Anwender stellt. Aus der Sicht des Anwenders gibt es ein paar Randbedingungen, die er sich selbst herausarbeiten kann und die Kenntnis dieser Randbedingungen führt ihn zu dem richtigen Prüfkopftyp. In manchen Fällen, besonders bei der Wahl der richtigen Prüffrequenz, kann auf einen kleinen Vorversuch bzw. auf ein Ausprobieren nicht verzichtet werden. Dies führt schließlich zu einem Entscheidungsbaum, der den Anwender die Wahl des richtigen Prüfkopfes deutlich erleichtert. Dieser Entscheidungsbaum deckt zwar die wichtigsten Fragestellungen ab, sollte aber flexibel gehandhabt werden, um somit das individuelle Prüfproblem optimal lösen zu können.

Bei der automatisierten Ultraschallprüfung treten noch weitere Fragen in den Vordergrund, welche die Überdeckung des Prüfvolumens, die Nachweisgrenze und die Prüfgeschwindigkeit betreffen. Da es sich bei der automatisierten Ultraschallprüfung meistens um größere Prüfanlagen handelt, werden hier dem Anwender die richtige Wahl der Prüfköpfe vom Hersteller abgenommen, der auch das notwendige Prüfkonzept entwickelt, um so das Optimum von Überdeckung, Nachweisgrenze und Prüfgeschwindigkeit zu erzielen. Am Beispiel einer automatisierten Stangenprüfung konnte gezeigt werden, wie bei einer hohen Durchlaufgeschwindigkeit eine 100%ige Überdeckung sowie eine hohe Prüfempfindlichkeit mit Hilfe geeigneter Prüfköpfe und Prüftechniken erreichbar ist.

Die Qual der Wahl: Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz?

Volker Schuster, Michael Lach, Michael Platte, KARL DEUTSCH Prüf- und Messgerätebau GmbH + Co KG, Wuppertal

1 Einleitung

Bei der Herstellung von Prüfköpfen für die Zerstörungsfreie Prüfung mit Ultraschall, werden unterschiedliche Materialien verwendet. Diese Materialien sind im Wesentlichen keramische piezoelektrische Materialien, Polyvinylidenfluorid (eine piezoelektrische Kunststoffolie) und Piezo-Composite (ein Verbund aus Epoxidharz und piezokeramischem Material). Zu den keramischen Materialien zählen unter anderen Bleizirkonattitanat (PZT), Bleititanat (PT) und Bleimetaniobat (PMN), wobei hier nur die wichtigsten genannt sind. Aufgrund der teilweise sehr speziellen Materialeigenschaften, ergeben sich bereits für diese Schwingermaterialien die jeweils besonderen Einsatzgebiete des daraus hergestellten Prüfkopfes. Aber nicht nur die Materialeigenschaften legen die Einsatzgebiete fest, sondern auch weitere Einflussgrößen wie die Prüffrequenz, die Dämpfung des Schwingers und die Schwingerabmessungen. Dies muss alles bei der Herstellung der Prüfköpfe (Sensoren für die Ultraschallprüfung) berücksichtigt werden.

Der Prüfer vor Ort hat nun die Qual der Wahl, wenn er aus einem Angebot aus mehreren hundert unterschiedlichen Prüfköpfen den richtigen für seine Prüfaufgabe aussuchen soll. Diese Wahl wird dem Prüfer auch nicht wesentlich erleichtert, wenn ihm das Datenblatt eines Prüfkopfes in die Hand gegeben wird. Hier werden die Abmessungen und die technischen Daten (Mittenfrequenz, Bandbreite,...) aufgelistet, jedoch nicht für welchen Einsatz dieser Prüfkopf geeignet ist. Darüber hinaus wird meistens verschwiegen, welches Schwingermaterial für den Bau des Prüfkopfes herangezogen wurde.

Aus diesem Grund, soll hier dargestellt werden, wie von der Anwendung ausgehend auf den richtigen Prüfkopf geschlossen werden kann. Zunächst müssen jedoch einige wichtige Grundbegriffe geklärt werden.

2 Ultraschallerzeugung

Es gibt viele Methoden der Ultraschallerzeugung, jedoch hat sich für die zerstörungsfreie Prüfung in dem typischen Frequenzbereich eine Methode dominierend durchgesetzt. Grundlage für die praktische Erzeugung von Ultraschall ist der **Piezoelektrische Effekt** (griech. piezo... = Druck...), der im 19. Jahrhundert am Quarz entdeckt wurde: Wird ein aus einem natürlichen Quarzkristall herausgeschliffenes Plättchen mechanisch zusammengepresst oder gedehnt, so entstehen an seiner Oberfläche elektrische Ladungen, die bei Metallisierung dieser Oberflächen gesammelt und als elektrische Spannung gemessen und weiterverarbeitet werden können (direkter piezoelektrische Effekt). Dieser Effekt ist umkehrbar: Legt man eine elektrische Spannung an die metallisierten Oberflächen, so zieht sich der Kristall in Abhängigkeit von der Polarität der Spannung zusammen oder dehnt sich aus (indirekter piezoelektrischer Effekt), Bild 1. Der gleiche Kristall lässt sich damit sowohl zur Erzeugung als auch zum Empfang von Ultraschall verwenden [2], [4], [7].

Wird von außen ein kurzer elektrischer Impuls auf das piezoelektrische Material gegeben, dann schwingt dieses mit seiner Resonanzfrequenz f_r . Dies ist vergleichbar mit dem Glockenschlag in einem Kirchturm. So lange die Glocke frei hängt schwingt sie in ihrer Resonanzfrequenz und wird nur langsam leiser. Wird sie bedämpft, wird sie schneller leiser. Die Resonanzfrequenz wird im Wesentlichen von den Abmessungen der Glocke bestimmt. Die gleichen Eigenschaften zeigt auch das piezoelektrische Material. Unbedämpftes Material schwingt lange nach (sendet lange Ultraschallsignale aus), ein bedämpftes klingt schneller ab und die Resonanzfrequenz wird hauptsächlich von der Materialdicke d bestimmt, Bild 2.

	Ursache		Wirkung
direkter piezo-elektrischer Effekt	Druckbeanspruchung des Kristalls		positive elektrische Spannung
	Zugbeanspruchung des Kristalls		negative elektrische Spannung
umgekehrter piezo-elektrischer Effekt	positive elektrische Spannung		Ausdehnung des Kristalls
	negative elektrische Spannung		Zusammenziehung des Kristalls

Bild 2: *Ultraschallanregung*

3 Schwingermaterial

Ebenso wie es unterschiedliche Methoden zur Ultraschallerzeugung gibt, existieren auch verschiedene Materialien die einen piezoelektrischen Effekt aufweisen. Neben einigen keramischen Materialien gibt es auch eine spezielle Kunststoffolie (PVDF = Polyvinylidenfluorid) sowie Piezo-Composite, die ebenfalls piezoelektrisch sind. Hierbei sollten jetzt nur die anwendungstechnisch wichtigsten genannt sein [5], [6].

3.1 Keramische Piezo-Materialien

Bei den keramischen Piezo-Materialien haben sich Bleizirkonattitanat (PZT), Bleititanat (PT) und Bleimetaniobat ($PbNb_2O_6$) bei dem Bau von Prüfköpfen durchgesetzt, Bild 3. Ohne jetzt zu tief in die technischen Details zu gelangen, sollen hier nur die wesentlichen und prägenden Eigenschaften dieser Materialien genannt werden:

- **Bleizirkonattitanat** hat einen hohen Kopplungsfaktor. Dies bedeutet, dass viel Schallenergie in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet und von dort auch wieder aufgenommen werden kann. Daher wird PZT meist für Prüfköpfe verwendet, die ein schmalbandiges Frequenzspektrum und eine hohe Empfindlichkeit haben.
- **Bleititanat** hat eine sehr geringe Querkopplung. Damit wird die meiste Schallenergie mit der Dickenschwingung erzeugt und nur ein geringer Teil geht durch störende Querschwingungen verloren. Daher eignet sich diese Keramik besonders für den Bau kleiner Prüfköpfe mit kleinen Schwingern.
- **Bleimetaniobat** hat einen Schallwellenwiderstand (Z), der niedriger als bei PZT ist und sehr nahe bei guten Dämpfungsmaterialien liegt. Damit lässt sich Bleimetaniobat gut bedämpfen. Eingesetzt wird Bleimetaniobat daher für Stoßwellenprüfköpfe die einen äußerst kurzen Ultraschallimpuls aussenden. Diese Prüfköpfe finden ihre Verwendung bei der Wanddickenmessung (gute Tiefenauflösung) und bei der Prüfung schallstreuender Materialien.

3.2 Polyvinylidenfluorid (PVDF)

Polyvinylidenfluorid (PVDF) ist eine Kunststoffolie und hat einen sehr kleinen Schallwellenwiderstand (Z), der vergleichbar mit dem von Wasser ist. Dies kommt einer Tauchtechnikprüfung entgegen, Bild 4. Je ähnlicher der Schallwellenwiderstand (auch akustische Impedanz genannt) des Schwingermaterials (PVDF) zu dem des Prüfmediums (Wasser) ist, desto geringer sind die Reflexionsverluste an der Übergangsschicht. Unter dieser Voraussetzung lässt sich ein hoher Schallenergieanteil in das Wasser einleiten.

Eine negative Eigenschaft ist die allgemein geringe Abstrahlung von Schallenergie im Vergleich zu den keramischen Piezo-Materialien, womit PVDF für eine Prüfung in Kontakttechnik nicht empfindlich genug ist. Weitere Vorteile für Prüfköpfe mit PVDF-Schwingern ist die gute Formbarkeit (Folie) sowie die hohe Bandbreite zur Erzeugung von Stoßwellen.

	
<p>Bild 3: Beispiele für Prüfköpfe mit keramischem Piezo-Material.</p>	<p>Bild 4: Beispiel für einen PVDF Prüfkopf.</p>

3.3 Piezo-Composite

Bei Composite-Wandlern werden die Räume zwischen den piezoelektrischen Keramikstäbchen mit Epoxidharz gefüllt, Bild 5. Dieser Aufbau bewirkt einen insgesamt geringeren Schallwellenwiderstand als den des reinen keramischen Piezo-Materials. Prüfköpfe mit Piezo-Compositen eignen sich daher als Tauchtechnik-Prüfköpfe (s. Bild 6) und zur Prüfung von Kunststoffen. Daraus ergibt sich auch die hohe Empfindlichkeit für SE- und Winkelprüfköpfe (s. Bild 6), da hierbei meistens das Schwingermaterial an einen Plexiglas-Vorlauf angekoppelt wird. Aufgrund der geringeren Impedanz lassen auch sie sich gut bedämpfen, so dass auch Stoßwellenprüfköpfe realisierbar sind.

Diese Eigenschaften werden jedoch nur erreicht, wenn die Querabmessungen der Stäbchen kleiner als die Wellenlänge des Ultraschalls sind. Da herstellungstechnisch hier eine Grenze gesetzt ist, wird die maximal noch mögliche Prüffrequenz nach oben beschränkt. Zur Zeit liegt die noch gut anwendbare Prüffrequenz bei ca. 5 MHz, darüber sind entweder die günstigen Eigenschaften gegenüber den konventionellen keramischen Piezo-Materialien kaum noch nennenswert oder der Aufwand zur Herstellung unwirtschaftlich hoch.

Schon anhand dieser unterschiedlichen Eigenschaften der verschiedenen Schwingermaterialien wird deutlich, dass alle diese Materialien gewisse Anwendungsnischen belegen und somit für bestimmte Aufgaben bestens geeignet sind.

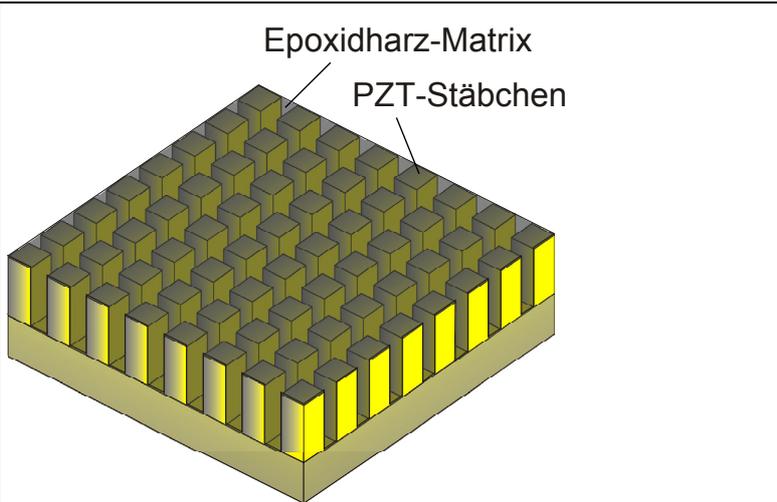


Bild 5: Piezo-Composite bestehen aus piezoelektrischen Keramikstäbchen, deren Zwischenräume mit Epoxidharz gefüllt sind.



Bild 6: Beispiele für Prüfköpfe mit Piezo-Composite.

4 Prüfkopfeigenschaften

Einige Eigenschaften werden nicht durch das Schwingermaterial selbst, sondern durch die Bauform (z.B. Schwingerdicke, Schwingerdurchmesser, Bedämpfung) festgelegt. So ist - wie bereits erwähnt - die Prüffrequenz durch die Resonanzfrequenz f_r und diese durch die Schwingerdicke d bereits fest vorgegeben. Das Schallfeld wiederum lässt sich aus dem **Schwingerdurchmesser D** (bei runden Schwingern), der **Prüffrequenz f** und der **Schallgeschwindigkeit c** im Prüfteil berechnen, Bild 7. Demnach wird das Schallfeld in **Nah- und Fernfeld** unterteilt. Im Nahfeld schnürt sich das Schallfeld noch etwas enger zusammen, während es im Fernfeld scheinwerferartig divergiert. Wie Bild 8 zeigt, ist der Übergang zwischen Nah- und Fernfeld nicht so plötzlich wie in der Skizze (Bild 7) zu erkennen ist, sondern eher stetig. Dennoch beschreiben diese Formeln das Schallfeld recht zuverlässig. Welchen Einfluss f , D und c auf die Schallfeldgeometrie haben, ist ebenfalls in Bild 8 zu erkennen [2], [4], [7].

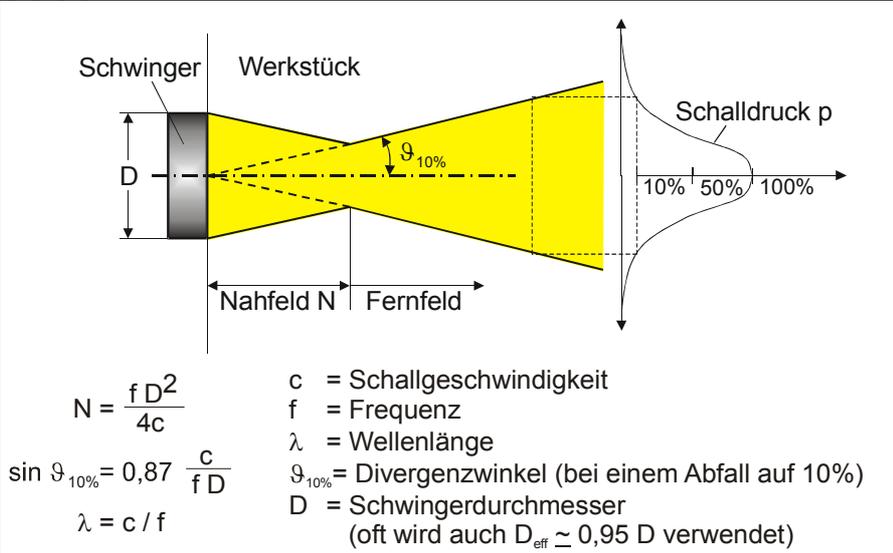


Bild 7: Schallfeldgrößen und die funktionalen Zusammenhänge.

<p>S 12 W 2 D = 12 mm f = 2 MHz c = 5920 m/s</p>	<p>S 12 W 1 D = 12 mm f = 1 MHz c = 5920 m/s</p>	<p>S 24 W 2 D = 24 mm f = 2 MHz c = 5920 m/s</p>	<p>S 12 W 2 D = 12 mm f = 2 MHz c = 2730 m/s</p>	<p>Bild 8: Einfluss von D, f und c auf die Schallfeldgeometrie (Simulation).</p>

(6 dB Farbabstufung / weiße Linie = - 20 dB)

Ein weiteres wichtiges Prüfkopfmerkmal ist die Bandbreite bzw. die Ultraschallimpulslänge. Ein zeitlich langer Ultraschallimpuls korrespondiert hierbei mit einem schmalen Frequenzspektrum (d.h. es tragen nur wenig Frequenzanteile zum Aufbau des Ultraschallimpulses bei) und umgekehrt korrespondiert ein kurzer Ultraschallimpuls mit einem breiten Spektrum (d.h. viele Frequenzanteile bauen den zeitlich kurzen Impuls auf), Bild 9. Die Impulslänge wird hierbei im Wesentlichen durch die Bedämpfung des Schwingermaterials festgelegt. Da dieses Merkmal ebenfalls die Einsatztauglichkeit eines Prüfkopfes für eine bestimmte Prüfaufgaben mit bestimmt, wird die Bandbreite in der Kennzeichnung des Prüfkopfes - oft etwas versteckt - mit angegeben; zumindest im Datenblatt sollte die Angabe zur Bandbreite eingetragen sein.

	<p>Bild 9: Ein langer Ultraschallimpuls korrespondiert mit einem schmalen Frequenzspektrum und umgekehrt korrespondiert ein kurzer Impuls mit einem breiten Spektrum.</p>
<p>langer Impuls kurzer Impuls</p>	
<p>Amplitude</p> <p>schmalbandig breitbandig</p>	

Wie wirkt sich nun die Bandbreite / Impulslänge auf das Prüfergebnis aus?

Schmales Spektrum und lange Impulse:

Für diese Prüfköpfe können die frequenzabhängigen Daten des Schallfeldes, wie Wellenlänge, Nahfeld und Divergenzwinkel, am genauesten angegeben werden. Das bedeutet, dass die reflektierte Echoamplitude eines idealisierten Reflektors (z.B. KSR = Kreisscheibenreflektor), der sich im Schallstrahl des Prüfkopfes befindet, mit guter Präzision berechnet werden kann. Daher eignen sich diese Prüfköpfe besonders zur Bewertung der Fehlergröße nach dem AVG-Verfahren (Amplitude-Verstärkung-Größe), welches auf der theoretischen Berechnungsmethode derartiger Echoamplituden von Kreisscheibenreflektoren basiert.

Bei der Prüfung schallschwächender Materialien ist die Schallschwächung für hohe Frequenzen stets größer als für kleinere Frequenzen. Es kann daher zu einer Verschiebung des Frequenzmaximums kommen, wenn breitbandige Prüfköpfe eingesetzt werden. Bei schmalbandigen Prüfköpfen ist diese Verschiebung allerdings minimal, so dass

(SV) sd 1 51 Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz.doc 08.Sep-2005

die Prüffrequenz unabhängig vom Werkstoff als konstant angesehen werden kann. Aufgrund der langen Impulse sind die schmalbandigen Prüfköpfe jedoch ungeeignet zur Wanddickenmessung.

Vergrößerte Bandbreite und kurzer Impuls:

Diese Prüfköpfe bieten einen guten Kompromiss zwischen den Forderungen einer hohen Auflösung und definierter Prüffrequenz. Die Prüffrequenz kann nur bedingt als konstant angesehen werden. Lediglich stark schallschwächende Materialien erzeugen daher eine Frequenzverschiebung und Änderung der Bandbreite. Somit ist eine AVG-Bewertung für die meisten Materialien noch möglich. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit werden diese Prüfköpfe auch standardmäßig eingesetzt.

Extrem große Bandbreite und Stoßimpuls:

Prüfköpfe mit diesen Eigenschaften bieten eine optimale Auflösung und eignen sich daher insbesondere zur präzisen Wanddickenmessung. Die Schallfeldgrößen lassen sich jedoch nicht mehr mit den Standardformeln berechnen (s. Bild 7), so dass eine AVG-Bewertung nicht möglich ist. Zusätzlich zeigen diese Prüfköpfe bei der Prüfung schallschwächender Materialien auch deutliche Verschiebungen des Frequenzmaximums.

Bei der Prüfung schallstreuender Bauteile (Grauguss, austenitische Schweißnähte, etc...) ist im A-Bild ein Rauschuntergrund (Grasanzeigen) zu erkennen. Dieser Rauschuntergrund basiert auf der Interferenz vieler im Bauteil gestreuter Schallanteile, der umso höher ausfällt, je länger der Ultraschallimpuls ist (bei einem langen Impuls werden mehr Streuzentren erfasst). Die Echoamplitude einer einzelnen Fehlstelle hängt dagegen nur unwesentlich von der Ultraschallimpulslänge ab. Daher zeigen Stoßimpulsprüfköpfe einen höheren Signal-Rausch-Abstand als Standardprüfköpfe, d.h. Fehleranzeigen sind deutlicher vom Streuuntergrund unterscheidbar.

5 Prüfkopfauswahl aufgrund der Anwendungssituation

Die richtige Wahl des Prüfkopfes hängt im Wesentlichen von den folgenden Faktoren bzw. Gegebenheiten ab:

- Prüfaufgabe
- Ankoppeltechnik
- Werkstoff
- Fehlerart, -lage und -orientierung
- Bauteilabmessungen
- erwartete Fehlergröße

In einigen Fällen reicht schon die Berücksichtigung eines dieser Punkte um den notwendigen Prüfkopf eindeutig zu identifizieren, in den meisten Fällen müssen jedoch mehrere Punkte in die Prüfkopfwahl mit einbezogen werden. Diese Liste ist sicherlich nicht vollständig, deckt jedoch die meisten Fragestellungen, die bei der Wahl des Prüfkopfes gestellt werden, ab.

5.1 Prüfaufgabe

Fehlstellensuche:

Zur Suche von Fehlstellen eignen sich grundsätzlich alle Prüfköpfe. Hier erfolgt keine Einschränkung.

Fehlerbewertung aufgrund der reflektierten Amplitude (AVG-Methode):

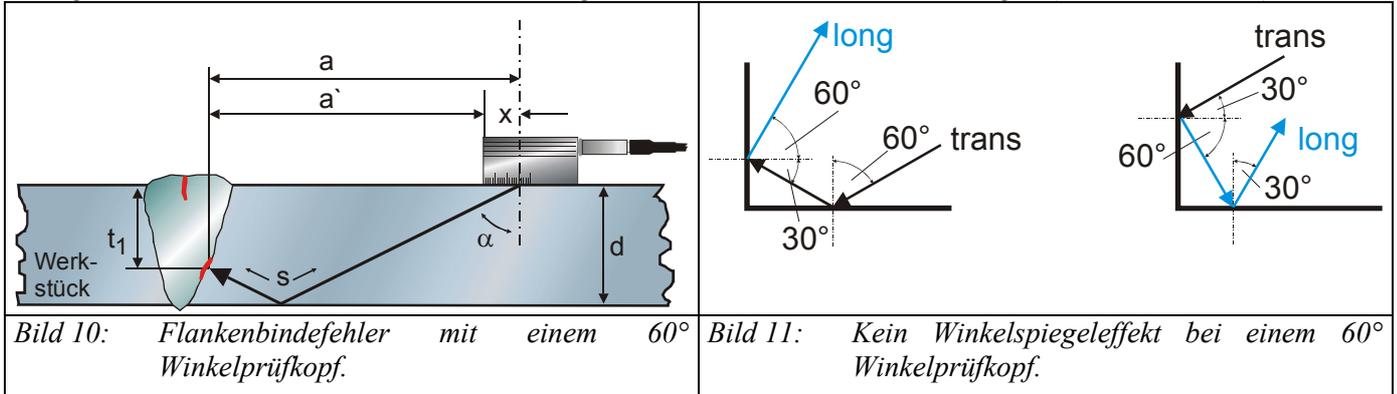
Bei Fehlstellen, die kleiner als der Schallfelddurchmesser sind, kann die Fehlerbewertung nur durch Auswertung der Echoamplitude erfolgen. Ein hierbei oft genutztes Verfahren ist die AVG-Methode. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten ist eine Prüfung bei einer definierten Prüffrequenz notwendig. Ein Prüfkopf mit schmalem Spektrum wäre daher ideal, es könnte jedoch noch auf einen mit vergrößerter Bandbreite zurückgegriffen werden.

Schweißnahtprüfung:

Aufgrund der Schweißnahtüberhöhung ist es in den meisten Fällen nicht möglich, einen Senkrechtprüfkopf direkt auf die Schweißnaht aufzusetzen. Daher wird ein Winkelprüfkopf genutzt. Je nach Schweißflankenvorbereitung und erwarteter Fehlerorientierung kommen unterschiedliche Einschallwinkel zum Einsatz. Gebräuchliche Winkel sind: 35°, 45°, 60°, 70° und 80°. Zum Nachweis von Flankenbindefehlern eignet sich besonders - aufgrund des Winkels der Nahtvorbereitung - ein 60° Winkelprüfkopf (s. Bild 10). Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass

(SV) sd 1 51 Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz.doc 08.Sep-2005

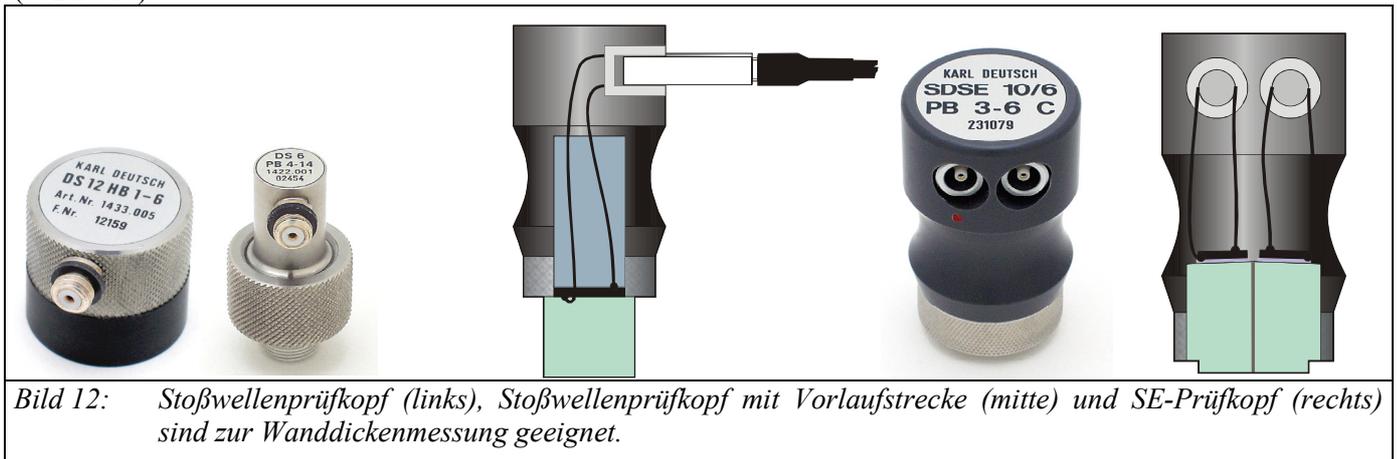
mit diesem Prüfkopf Risse, die Senkrecht von der Oberfläche ausgehen, nicht oder nur unzureichend nachweisbar sind. Schuld daran ist die nahezu vollständige Wellenumwandlung einer Transversalwelle in eine Longitudinalwelle beim Auftreffen unter 30° auf eine Wandung (s. Bild 11). Sollen derartige Risse ebenfalls nachgewiesen werden, muss eine zweite Prüfung unter einem anderen Winkel erfolgen (z.B. 45° oder 70°).



Wanddickenmessung:

Zur Wanddickenmessung oder aber auch zur exakten Lagebestimmung einer Fehlstelle kommen Prüfköpfe mit einem möglichst kurzen Ultraschallimpuls (d.h. einer großen Bandbreite, s. Bild 9) zum Einsatz. Daher eignen sich für eine Wanddickenmessung Stoßwellenprüfköpfe (s. Bild 12, links) und ggf. auch Prüfköpfe mit vergrößerter Bandbreite. Für geringe Wanddicken empfiehlt sich zusätzlich der Einsatz einer Vorlaufstrecke (Delay-Line, s. Bild 12, mitte). Die Ultraschallanregung eines Schwingers erzeugt ein relativ langes Nachschwingen und Übersteuerungseffekte im angeschlossenen Empfangsverstärker. Die nicht prüfbare Zone bei einem Prüfkopf ohne Vorlaufstrecke ist daher verhältnismäßig groß. Durch eine Vorlaufstrecke wird der Auswertebereich aus dem Bereich des Sendeimpulses herausgeschoben. Das Echosignal vom Ende der Vorlaufstrecke erzeugt eine deutlich kleinere nicht prüfbare Zone, so dass auch dünne Bauteile noch gut prüfbar sind.

Durch die Trennung von Sende- und Empfangsschwinger bei SE-Prüfköpfen (s. Bild 12, rechts) erzeugen diese im A-Bild weder einen Sendeimpuls noch ein Echosignal von der Vorlaufstrecke. Bis auf ein vernachlässigbares Überkoppelecho sind störende Signale, die das Nutzsiegel überdecken können, somit ausgeschlossen. Allerdings haben SE-Prüfköpfe den Nachteil, dass sie aufgrund des Zweischwinger-Systems eine tote Zone direkt nach dem Eintritt ins Bauteil haben, die den Nachweis von Reflektoren beliebig dicht unter der Oberfläche verbietet (s. Bild 13).



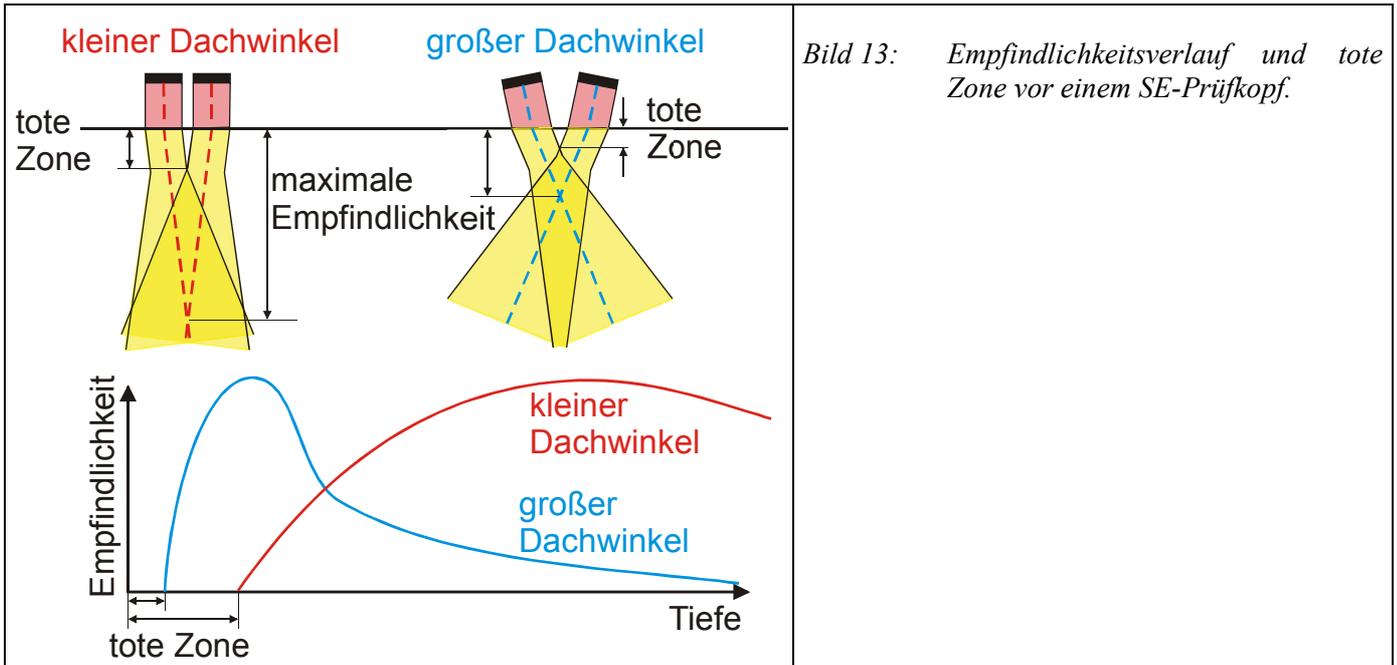


Bild 13: Empfindlichkeitsverlauf und tote Zone vor einem SE-Prüfkopf.

5.2 Ankoppeltechnik

Grob unterschieden werden kann bei der Ankoppeltechnik zwischen Hand- und Tauchtechnikprüfung. Bei der Handprüfung wird der Prüfkopf direkt mit dem Bauteil in Kontakt gebracht, während bei der Tauchtechnikprüfung der Ultraschall fast immer über eine längere Vorlaufstrecke (Wasser, Öl, etc...) in das Bauteil eingeleitet wird. Da die Tauchtechnik ein berührungsloses Verfahren ist, eignet es sich insbesondere für die automatisierte Ultraschallprüfung und findet auch dort die wichtigsten Einsatzgebiete.

Für die richtige Wahl der Prüfköpfe bedeutet dies: wenn eine Handprüfung vorgesehen ist, sollte in direktem Kontakt geprüft und dementsprechend ein Handprüfkopf (s. Bild 14, mitte und rechts) ausgewählt werden. Für eine automatisierte Prüfung ist das Tauchtechnikverfahren zu bevorzugen und somit fällt die Wahl auf einen Tauchtechnikprüfkopf (s. Bild 14, links).

Tauchtechnikprüfköpfe	Senkrecht-Handprüfköpfe	Winkel-Handprüfköpfe

Bild 14: Prüfköpfe zur Tauchtechnik- (links) und Handprüfung (mitte und rechts)

5.3 Werkstoff

Der Werkstoff selbst hat zwei Eigenschaften, die für die praktische Prüfung relevant sind: die Schallgeschwindigkeit und die Schallschwächung.

5.3.1 Schallgeschwindigkeit

Nach dem Gesetz von Snellius hängt der Einschallwinkel (bzw. die Brechung der Schallstrahlen an einer Grenzfläche) von der Schallgeschwindigkeit im Werkstoff ab [2], [4], [7]. Standard-Winkelprüfköpfe geben den Einschallwinkel in Stahl (Schallgeschwindigkeit = 3255 m/s) an. Wird ein anderer Werkstoff geprüft (z.B. Aluminium oder Kunststoff) muss der Einschallwinkel entsprechend umgerechnet werden.

$$(1) \quad \frac{\sin(\alpha_1)}{c_1} = \frac{\sin(\alpha_2)}{c_2} \quad (\text{Gesetz von Snellius})$$

mit: α_i = Einschallwinkel zur Welle i
 c_i = Schallgeschwindigkeit zur Welle i

5.3.2 Schallschwächung

Bei der Schallschwächung wird zwischen den zwei Mechanismen Absorption und Streuung unterschieden.

Schallabsorption:

Die Schallabsorption ist die Umwandlung von Schallenergie in eine andere Energieform (Wärme). Durch diese Umwandlung wird das Nutzsignal schwächer und im Extremfall stößt diese Schwächung schließlich an die Verstärkungsgrenzen des benutzten Ultraschallgerätes. Dies geschieht bei den meisten Materialien erst bei längeren Schalllaufwegen und ist daher für dickere Bauteile relevant. Da die Absorption mit der Prüffrequenz ansteigt, kann diesem Effekt durch Verringerung der Prüffrequenz entgegengewirkt werden.

Die Absorption tritt bei allen Werkstoffen auf, kann jedoch bei den meisten Metallen vernachlässigt werden. Nicht vernachlässigbar ist die Absorption bei Kunststoffen (Plexiglas, Polyethylen, Polypropylen,...).

Während dünnwandige Kunststoffe noch recht gut prüfbar sind, bedeutet dies für die Prüfkopfwahl dickerer Bauteile, dass ein Prüfkopf mit einer niedrigen Prüffrequenz zum Einsatz kommt. Meistens reichen 1 - 2 MHz, abhängig von der Bauteildicke muss teilweise auch auf eine geringere Prüffrequenz ausgewichen werden. Darüber hinaus ist auch der Einsatz eines Prüfkopfes mit einer hohen Empfindlichkeit bzw. großem Kopplungsfaktor (z.B. Bleizirkonatnattitanat PZT oder Piezo-Composite) vorteilhaft.

Schallstreuung:

Schallstreuung tritt beispielsweise an den Korngrenzen eines Metallgefüges, der Stengelkristallstruktur austenitischer Schweißnähte und den Graphiteinschlüssen in Gusswerkstoffen auf. An jedem Streuzentrum werden geringe Anteile des Schalls in eine beliebige Raumrichtung gestreut (reflektiert) und stehen somit dem Nutzsignal nicht mehr zur Verfügung, d.h. der Schallstrahl wird geschwächt (s. Bild 15). Die an diesen Streuzentren gestreuten Schallanteile können zum Teil auch wieder zum Empfangsprüfkopf gelangen und erzeugen so im A-Bild einen Streuuntergrund [4], [8].

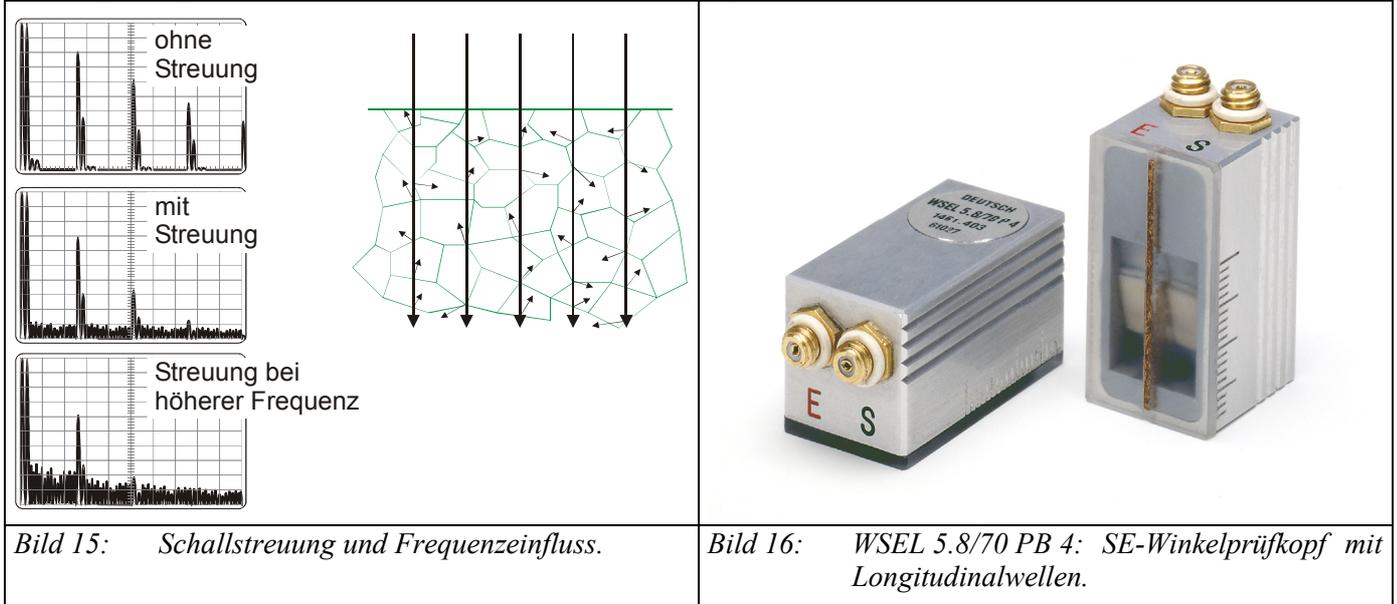
Die Schallschwächung aufgrund dieses Streumechanismus wächst überproportional mit der Prüffrequenz (d.h. eine Verdoppelung der Prüffrequenz kann eine 4-fach oder 8-fach höhere Schallschwächung bedeuten). Außerdem erhöht sich auch der Streuuntergrund mit einer Frequenzanhebung. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird somit im doppelten Maße bei einer Frequenzanhebung verschlechtert (s. Bild 15). Die Wahl eines Prüfkopfes mit einer höheren Empfindlichkeit zeigt hierbei keine positive Wirkung, da hierdurch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis nicht verbessert wird, schließlich werden nicht nur die Nutzsignale sondern auch die Streuanteile empfindlicher nachgewiesen.

Folgende Maßnahmen können ergriffen werden, um das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu verbessern; diese Maßnahmen sollten auch bei der Wahl des Prüfkopfes berücksichtigt werden:

Sonderdruck: SD 1/51

- Benutzung eines Stoßwellenprüfkopfes mit niedriger Prüffrequenz (z.B. 0,3 - 1,3 MHz). Mit einer Stoßwelle werden nur wenige Streuzentren mit einem Impuls erfasst. Entsprechend geringer ist der Streuuntergrund.
- Benutzung eines fokussierenden bzw. SE-Prüfkopfes. Hierdurch wird ebenfalls die Zahl der in einem Impuls erfassten Streuzentren gering gehalten und somit der Rauschuntergrund verringert.
- Einsatz von Longitudinalwellen bei Winkelprüfköpfen. Aufgrund der größeren Wellenlänge ist die Schallschwächung der Longitudinalwellen geringer als die der Transversalwellen (bei gleicher Prüffrequenz).

Diese Maßnahmen können auch kombiniert werden. Z.B. der Prüfkopf WSEL 5.8/70 PB 4 (s. Bild 16) ist ein SE-Winkelprüfkopf mit einem Einschallwinkel von 70° für Longitudinalwellen.



5.4 Fehlerart, -lage und -orientierung

Grundsätzlich gilt die Aussage: „Es kann kein Bauteil vollständig mit Ultraschall geprüft werden“. Es können immer ungünstige Umstände auftreten, so dass ein Fehler übersehen wird. Insbesondere flächige Fehlstellen können ungünstig zum Schallstrahl orientiert sein und den Ultraschallimpuls in eine völlig andere Richtung reflektieren. Eine Prüfung des Bauteils auf alle möglichen Fehlerorientierungen und Fehlerlagen würde den Prüfaufwand enorm in die Höhe treiben und somit unbezahlbar machen.

Daher sollte bereits vor der Prüfung klar sein, welche Fehlertypen, welche Fehlerlagen und welche Orientierungen hauptsächlich zu erwarten sind. Beeinflusst wird hierdurch hauptsächlich der zu wählende Einschallwinkel des Prüfkopfes.

5.4.1 Risse

Risse gehen meistens von der Oberfläche aus und sollten daher auch mit Oberflächenprüfverfahren (Magnetpulverrissprüfung, Eindringprüfung) und nicht mit einer Ultraschallprüfung nachgewiesen werden. Ausnahme sind Risse an unzugänglichen Bauteiloberflächen und in Schweißnähten (s. Bild 10). In diesen Fällen wird auch oft die Ultraschallprüfung genutzt. Je nach Lage und Orientierung ist ein Winkelprüfkopf mit geeignetem Einschallwinkel zu wählen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass mit einem Einschallwinkel von 60° bzw. 30° (in Stahl) Risse, die senkrecht von der Oberfläche ins Material einlaufen, nicht nachweisbar sind (kein Winkelspiegeleffekt, s. Bild 11). Gängige Einschallwinkel in Stahl sind 35°, 45°, 60°, 70° und 80° (selten 90°).

5.4.2 Einschlüsse

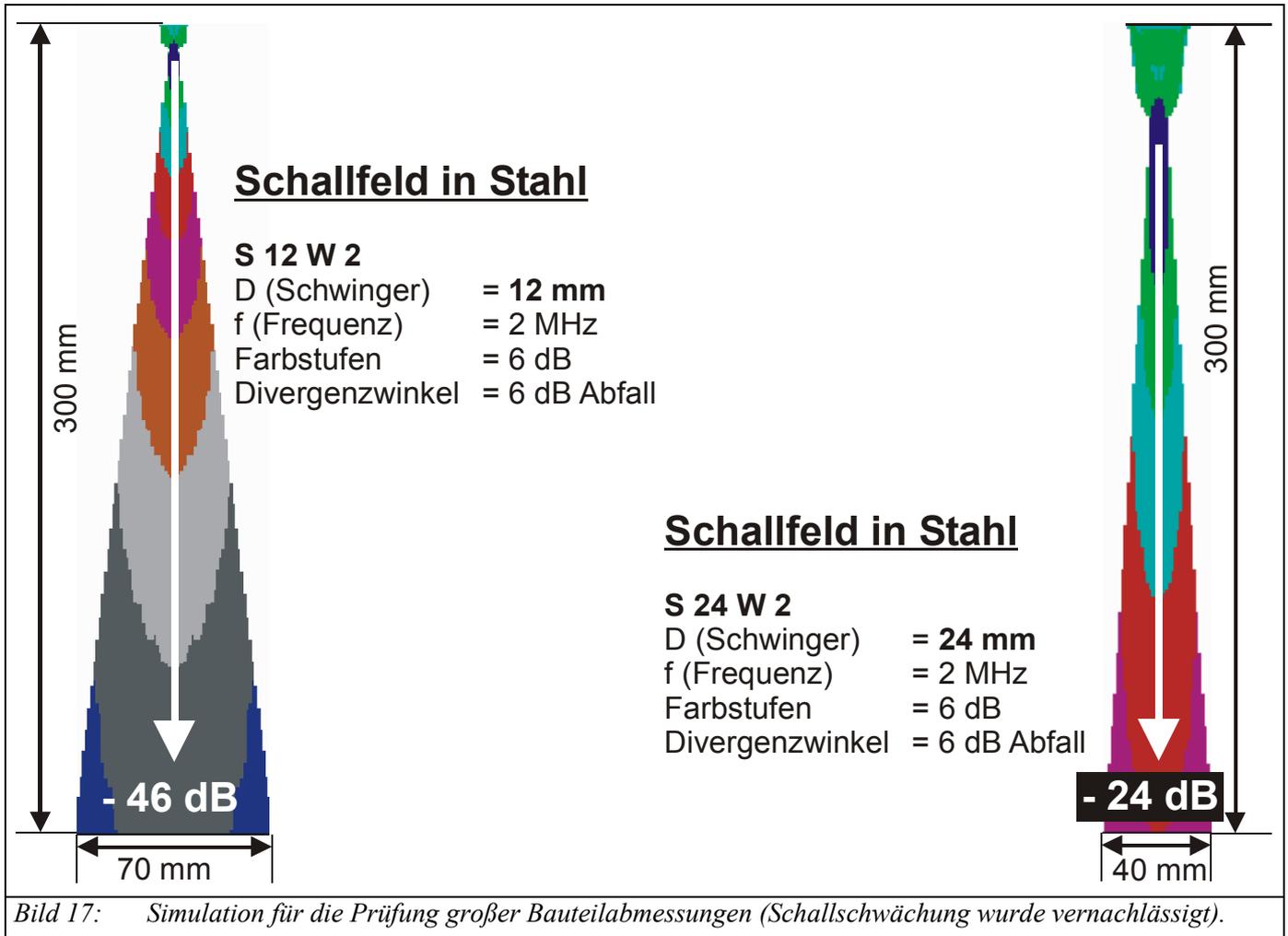
Kugel- bzw. blasenförmige Einschlüsse ohne ausgeprägte Orientierung können mit Senkrecht- aber auch mit Winkelprüfköpfen nachgewiesen werden. Ist ein Winkelprüfkopf nicht zwingend erforderlich, ist ein Senkrechtprüfkopf zu benutzen.

5.4.3 Flächige Fehler

Flächige verdeckte Fehlstellen, die keine (Oberflächen) Risse sind (Dopplungen), haben eine ausgeprägte Orientierung. Die flächige Seite muss vom Schallstrahl nahezu senkrecht getroffen werden, so dass von der Fehlerorientierung auch der Einschallwinkel abhängt.

5.5 Bauteilabmessung

Bei großen Bauteilen ergeben sich auch große Schallwege. Hierfür eignen sich Prüfköpfe mit großen Schwingern, da diese einen geringen Divergenzwinkel und damit auch einen kleinen Schallfelddurchmesser in großen Tiefen haben (s. „4 Prüfkopfeigenschaften“). So können im gesamten Bauteil auch noch relativ kleine Fehlstellen nachgewiesen werden. Wie in Bild 17 zu erkennen ist, hat der Prüfkopf mit dem 24 mm Schwingerdurchmesser in 300 mm Tiefe (Stahl) eine um 22 dB (12,5-fach) höhere Empfindlichkeit als ein Prüfkopf mit 12 mm Schwingerdurchmesser. Hinzu kommt noch, dass ein größerer Schwinger auch mehr Schallenergie in das Bauteil einleitet.



5.6 Fehlergröße

Bei vielen Prüfaufgaben mit Ultraschall steht die noch nachweisbare Fehlergröße im Vordergrund. Eine Beziehung zur Ultraschallwellenlänge λ ist schnell hergeleitet. Über die Verknüpfung

$$(2) \quad f = \frac{c}{\lambda}$$

kann dann eine direkte Beziehung über die Schallgeschwindigkeit c zur Prüffrequenz f geknüpft werden. In einigen Literaturstelle wird eine minimal nachweisbare Fehlergröße d als ein Fünftel der Wellenlänge λ angegeben [8]:

$$(3) \quad d \geq 0,2 \lambda$$

Wird nur dieser Zusammenhang betrachtet, kann leicht der Schluss gezogen werden: Es ist jede Fehlergröße nachweisbar, es muss nur die Prüffrequenz entsprechend hoch gewählt werden. Dass dies nicht so ist, hat insbesondere das Kapitel „5.3 Werkstoff“ gezeigt. Die frequenzabhängige Schallschwächung, die grundsätzlich in jedem Bauteil auftritt, beschränkt die mögliche Prüffrequenz nach oben und somit auch die minimale Fehlergröße. Darüber hinaus hat auch noch die Fehlerart, -lage und -orientierung sowie die Bauteilabmessung einen Einfluss auf die nachweisbare Fehlergröße. Die Gleichung (3) gilt somit nur unter idealen Prüfbedingungen und ist daher für den Praktiker nicht brauchbar. Für Materialien, die keine nennenswerte Schallschwächung zeigen, gilt daher, dass lediglich Fehlstellen in der Größenordnung der Wellenlänge noch nachweisbar sind:

$$(4) \quad d \approx \lambda$$

Dieses Verhältnis kann sich jedoch bei ungünstigen Prüfbedingungen (Schallschwächung, ungünstige Fehlerorientierung, große Bauteilabmessung, etc...) noch verschlechtern. Im Endeffekt ist in diesen Fällen das Ausprobieren und die Suche nach der richtigen Prüffrequenz unumgänglich.

5.7 Vorgehensschema

Bei der richtigen Wahl des Prüfkopfes kann eine Vorgehensweise beschrrieben werden, die den angesprochenen Fragestellungen - auch in dieser Reihenfolge - in diesem Kapitel entspricht. Angefangen mit der gestellten Prüfaufgabe (Fehlersuche, Fehlerbewertung, Schweißnahtprüfung, Wanddickenmessung, etc...) sollte als nächstes die Frage der Ankoppeltechnik geklärt werden. Hier ist bei einer Einzelprüfung sicherlich eine Kontakttechnik (Handprüfung) zu bevorzugen, während für eine Massenprüfung sich die Anschaffung einer automatisierten Ultraschallanlage lohnt. Weiter geht es mit der Betrachtung des Werkstoffes, dann der Fehlerart usw.. Wie in Bild 18 zu erkennen ist, verzweigt sich der Entscheidungsbaum immer weiter und an jeder Verzweigung wird eine Entscheidung getroffen, die die freie Wahl des Prüfkopfes ein wenig einschränkt. Am Ende sollte dann der Prüfkopf so weit charakterisiert sein, dass die Wahl des optimalen Prüfkopfes nicht mehr schwer fällt.

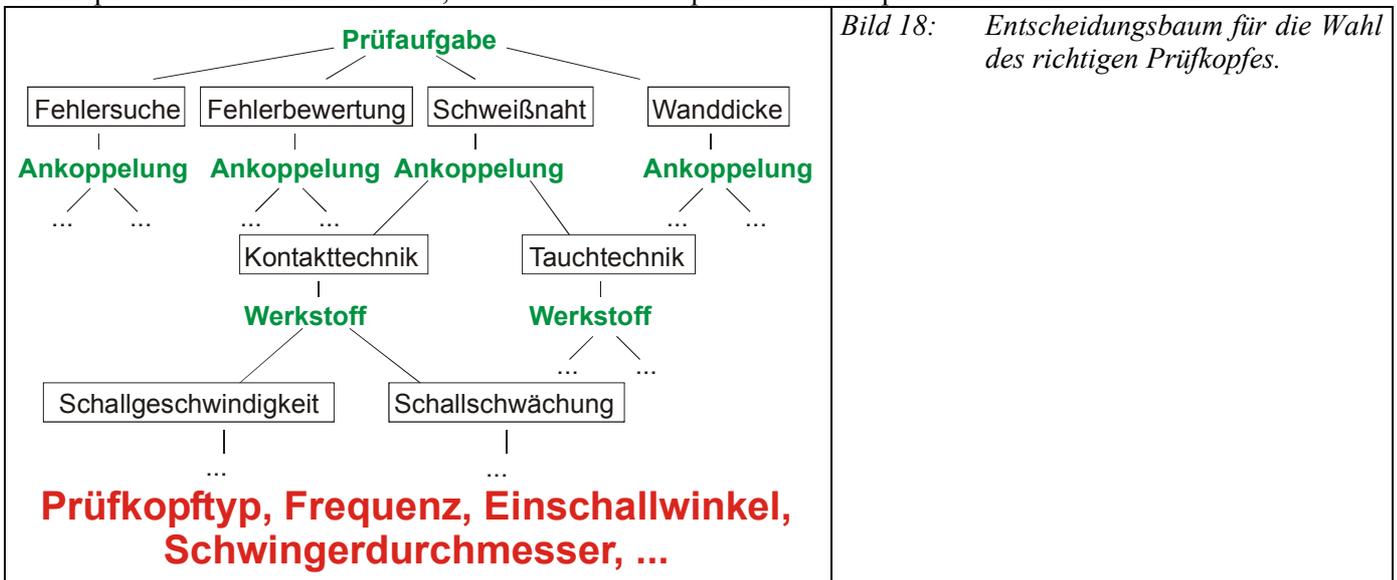


Bild 18: Entscheidungsbaum für die Wahl des richtigen Prüfkopfes.

Leider lässt sich die Wahl des Prüfkopfes nicht weiter operationalisieren. Dagegen sprechen mehrere Gründe:

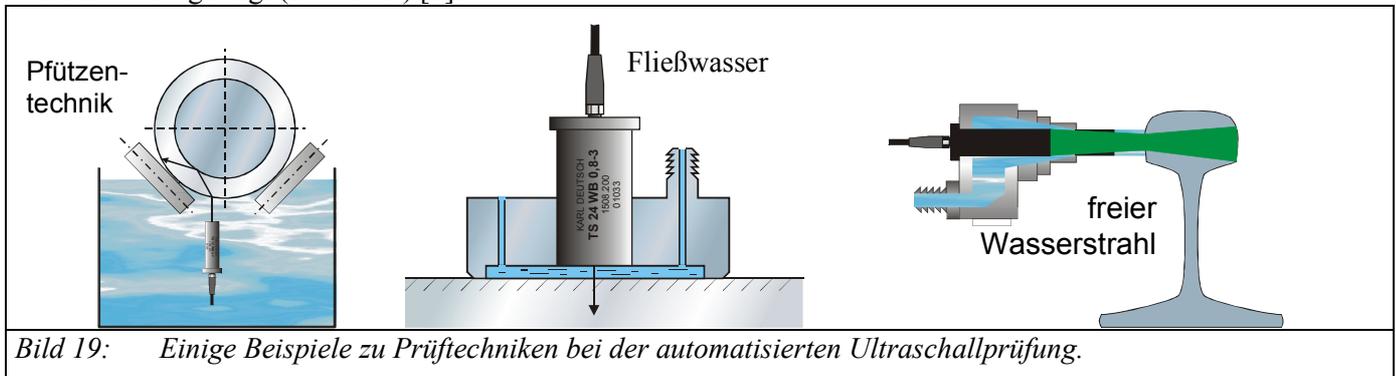
- Die Auflistung der Einflussgrößen, die die Wahl des Prüfkopfes beeinflussen, umfasst zwar bereits ein breites Spektrum, ist aber sicherlich nicht vollständig. Jeder kann für sich entscheiden, ob an diesem Baum noch der eine oder andere Ast hinzugefügt werden sollte.

- Teilweise sind die Entscheidungen nicht eindeutig. So kann es z.B. vorkommen, dass ein Prüfkopf sowohl zur Fehlersuche als auch zur Fehlerbewertung herangezogen werden soll. An dieser Stelle tritt dann keine Verzweigung auf.
- Einige Entscheidungen lassen sich nicht ohne Vorversuche klären (z.B. Prüffrequenz bei schallschwächendem Material).
- In einigen Fällen muss nicht jeder Punkt in diesem Entscheidungsbaum durchlaufen werden. Bei einer Wanddickenmessung ist die Frage nach dem Fehlertyp oder die Fehlergröße nicht sinnvoll.

Der in Bild 18 dargestellte Entscheidungsbaum kann daher nur als Hilfe angesehen werden, der im Einzelfall zu ergänzen, zu reduzieren oder zu verändern ist, um schließlich den richtigen Prüfkopf für die gestellte Prüfaufgabe zu finden.

6 Prüfkopfauswahl bei der automatisierten Ultraschallprüfung

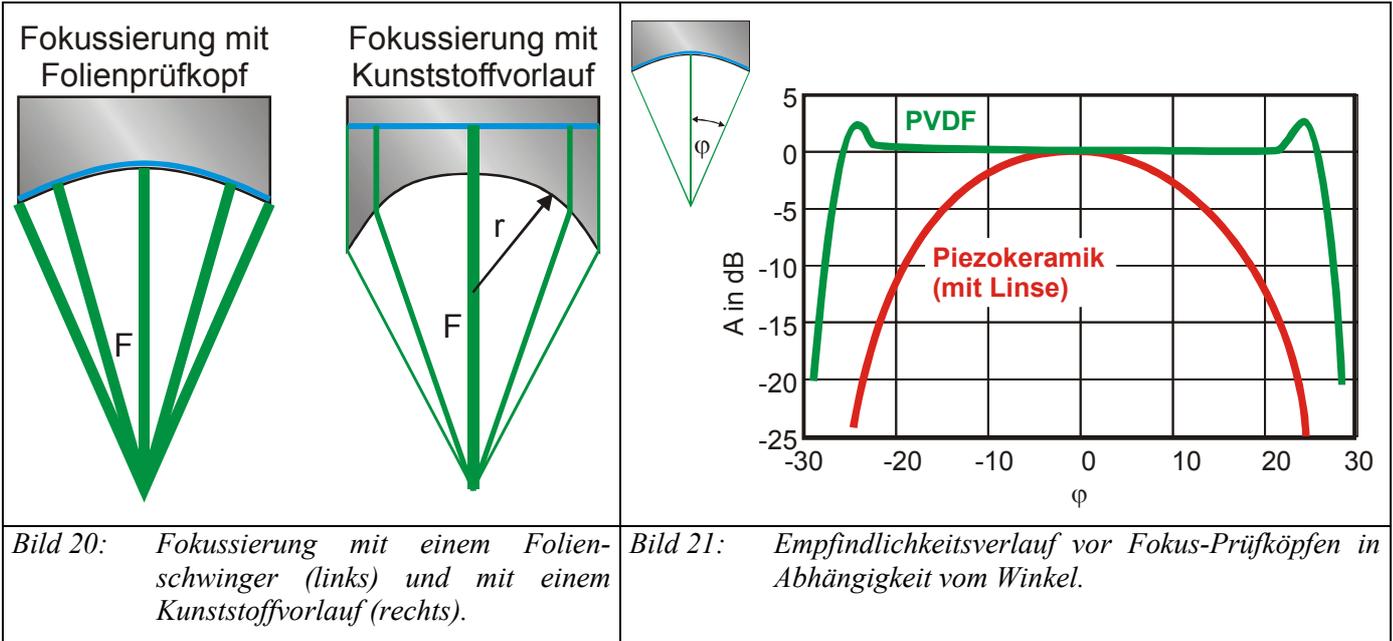
Grundsätzlich gelten die in Kapitel 5 gemachten Aussagen hinsichtlich der Prüfkopfauswahl natürlich auch für die automatisierte Ultraschallprüfung. Hinzu kommen jedoch noch Fragestellungen hinsichtlich der Überdeckung des zu prüfenden Volumens, der Nachweisgrenze und der Prüfgeschwindigkeit. Dies sind Forderungen, die sich zum größten Teil gegenseitig negativ beeinflussen. Um hier ein Optimum zu erreichen, sind geeignete Prüfköpfe und Prüftechniken gefragt (s. Bild 19) [3].



Da bei der automatisierten Ultraschallprüfung meistens mit einer Wasservorlaufstrecke gearbeitet wird, sind Schwingermaterialien mit einem geringen Schallwellenwiderstand (der etwa die gleiche Größenordnung wie der Widerstand von Wasser hat) vorteilhaft. Wird der Unterschied im Schallwellenwiderstand kleiner, kann mehr Schallenergie vom Schwinger auf das Wasser übertragen werden.

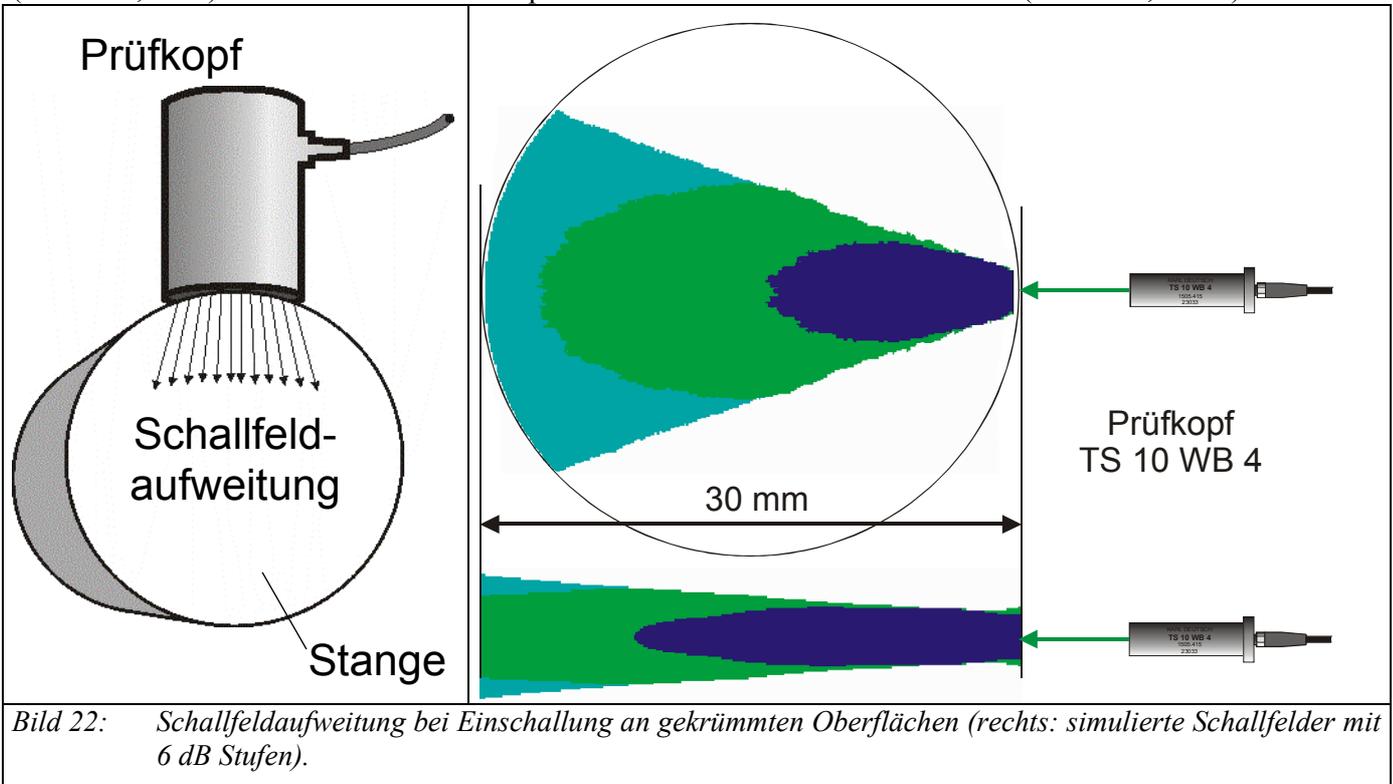
Geeignet sind daher PVDF und Composite Prüfköpfe; aber auch Bleimetaniobat ist mit seinem geringen Schallwellenwiderstand für den Bau eines Tauchtechnikprüfkopfs gut geeignet. Diese Überlegung muss allerdings nicht der Anwender führen, da die Hersteller automatisch die richtigen Schwingermaterialien für die Tauchtechnikprüfköpfe einsetzen.

Die PVDF-Folienschwinger haben jedoch gegenüber den anderen Materialien den besonderen Vorteil, dass sie gut formbar sind. Fokussierende Prüfköpfe können durch Krümmung der Folie hergestellt werden und nicht, wie bei den anderen Materialien, durch den Vorsatz einer angeschliffenen Kunststoffvorlaufstrecke (s. Bild 20). Aufgrund der Schallschwächung von Kunststoff und der Reflexionsverluste an der Linsenoberfläche ist der Empfindlichkeitsverlauf vor dem Prüfkopf für den PVDF-Schwinger wesentlich gleichmäßiger als für den Piezoschwinger mit Linsenfokussierung (s. Bild 21) [6].



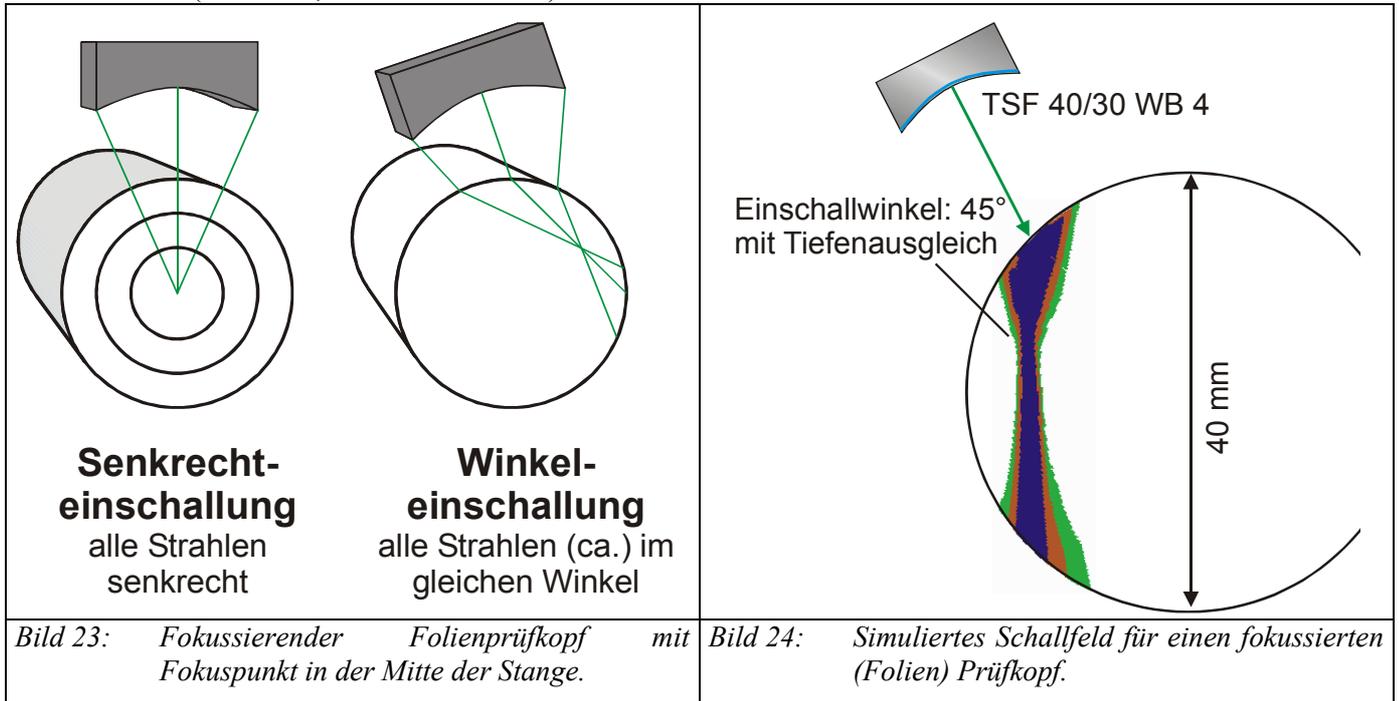
6.1 Prüfung runder Stangen: das HRP-Konzept

Fokussierende Prüfköpfe sind insbesondere bei der Prüfung runder Stangen beim Nachweis kleiner oberflächennaher Fehlstellen und Risse gefragt. Daher soll die Prüfkopfauswahl am Beispiel der Stangenprüfung erläutert werden. Aufgrund der Oberflächenkrümmung ergibt sich für nicht fokussierte Prüfköpfe ein besonderer Schallfeldverlauf, der nicht mehr mit den Standardgrößen wie Nahfeldlänge und Divergenzwinkel beschreibbar ist. An gekrümmten Oberflächen resultiert eine Schallfeldaufweitung mit einem deutlich größeren Divergenzwinkel (s. Bild 22, links) und einer schnelleren Amplitudenabnahme auf der Schallfeldachse (s. Bild 22, rechts).

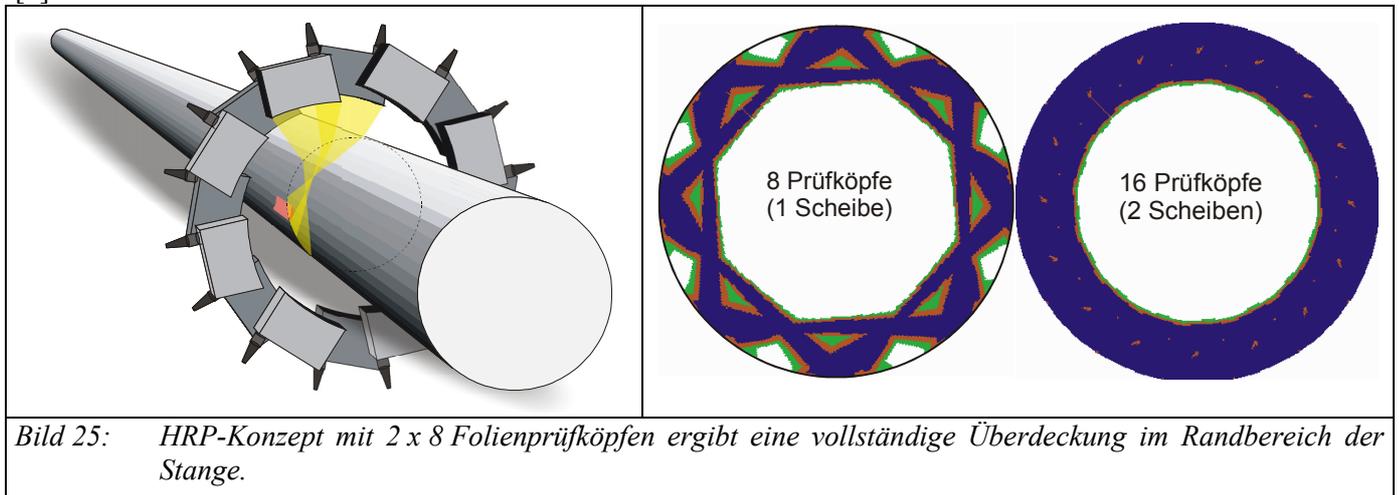


Wird nun ein fokussierender Prüfkopf so positioniert, dass er in die Mitte der Stange fokussiert, dann treffen alle Schallstrahlen senkrecht auf die Oberfläche. Senkrecht auf die Oberfläche treffende Schallstrahlen werden jedoch

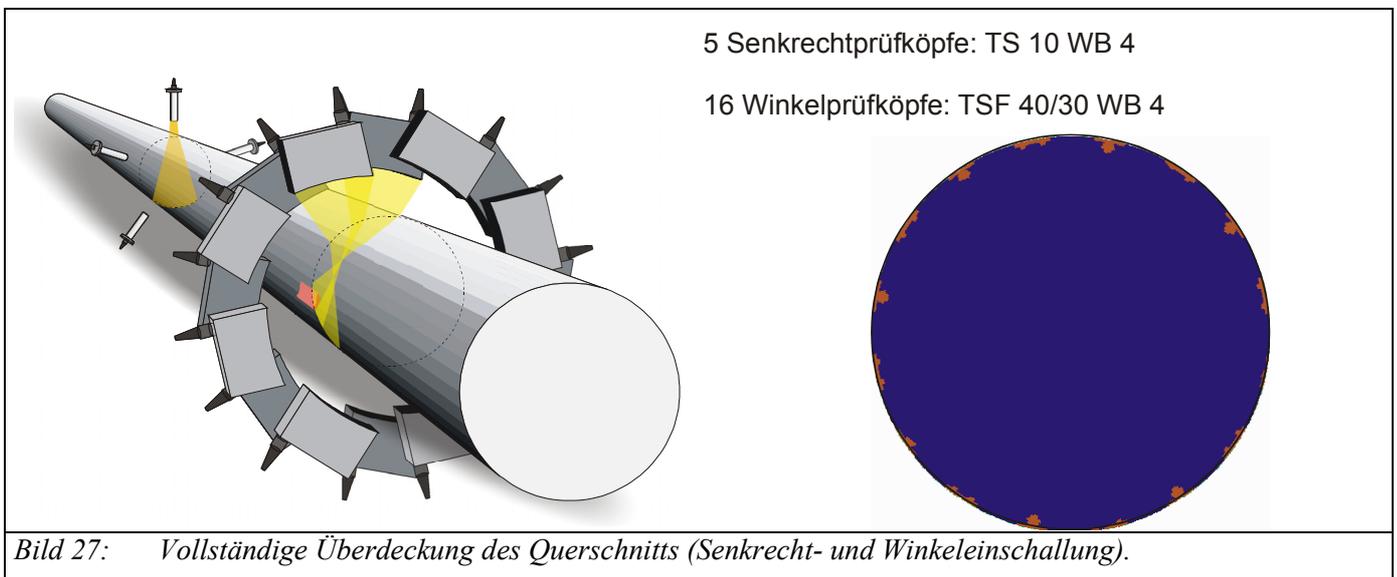
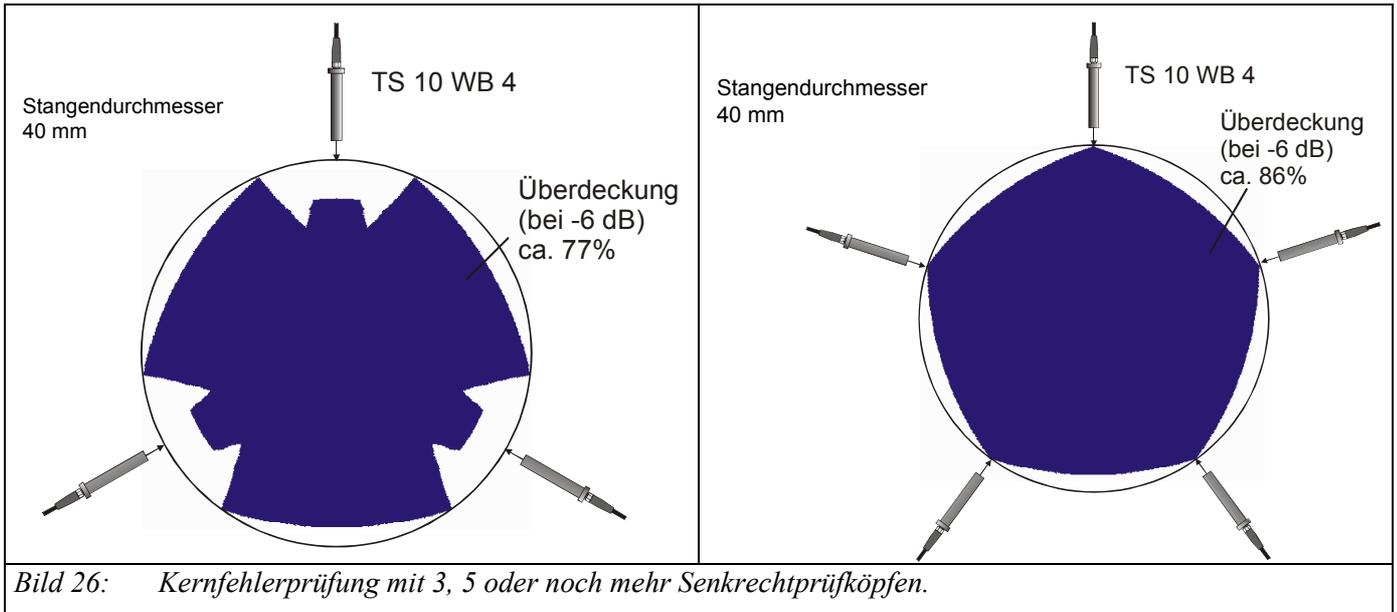
nicht gebrochen, so dass diese Schallstrahlen keine Ablenkung erfahren und der Fokuspunkt in der Mitte der Stange verbleibt (s. Bild 23, links). Bei der Winkelschallung ergeben sich dann für alle Strahlen - bis auf geringe Abweichungen - die gleichen Einschallwinkel, wodurch die Fokussierung zwar zum Rand wandert, aber als solche erhalten bleibt (s. Bild 23, rechts und Bild 24).



Auf diese besondere Eigenschaft baut das HRP-Konzept für die Stangenprüfung (s. Bild 25). Insgesamt 16 Folienprüfköpfe, die auf dem gesamten Umfang verteilt sind, garantieren eine lückenlose Überdeckung des Stangenrandbereichs. Dieses Konzept kommt ohne Rotation aus (weder für die Prüfköpfe, noch für die Stange), so dass keine störenden Wasserbewegungen oder störanfälligen Schleifkontakte (Signalübertragung) in Erscheinung treten. Damit wird eine optimal hohe Empfindlichkeit für randnahe Fehlstellen sowie Oberflächenrisse erzielt [1], [3].

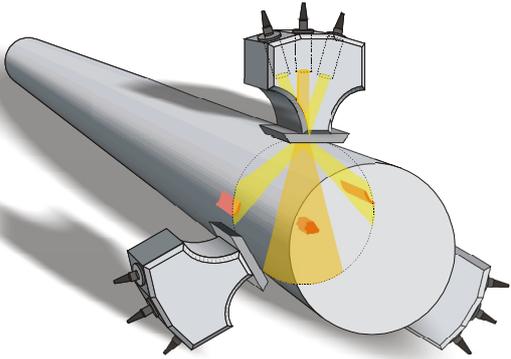
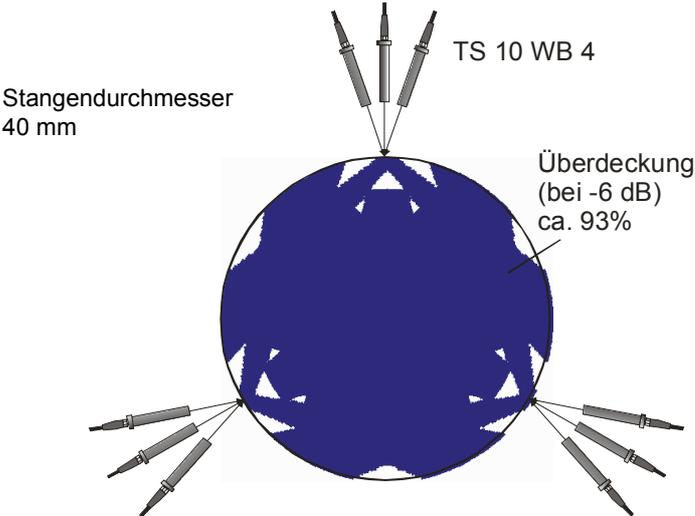


Die Prüfung auf Kernfehler wird mit 3, 5 oder noch mehr Senkrechtschallköpfen durchgeführt (s. Bild 26). Die vollständige Überdeckung für den gesamten Querschnitt der Stange ergibt sich aus der Kombination von Winkel- und Senkrechtschallung (s. Bild 27). Die Empfindlichkeit ist besser als 1 mm KSR (Kreisscheibenreflektor).



6.2 Prüfung runder Stangen: das STPS-Konzept

Ist eine nicht so hohe Prüfeempfindlichkeit insbesondere im Randbereich gefragt, dann bietet das STPS-Konzept (Stangen-Prüf-System) [1], [3] eine preiswerte Alternative zum HRP-Konzept. Die Stange wird hierbei an 3 bis 5 Prüfkopfträgern vorbeigeführt (in Bild 28 mit 3 Prüfkopfträgern). Jeder Prüfkopfträger ist mit einem Senkrechtprüfkopf (Kernfehler) und zwei Winkelprüfköpfen (Randfehler) bestückt. Die richtige Wahl der Prüfköpfe garantiert auch hierbei eine hohe Überdeckung des gesamten Querschnitts jedoch mit einigen Lücken im Randbereich bei einer vollständigen Überdeckung des Kernbereichs (s. Bild 29). Der Grad der Überdeckung hängt vom Prüfkopf (Schwingerdurchmesser und Prüffrequenz) und Stangendurchmesser ab, so dass die Wahl der Prüfköpfe gut auf den Durchmesserbereich der zu prüfenden Stangen abgestimmt werden muss.

	
<p><i>Bild 28: STPS-Konzept (3 Senkrecht- und 6 Winkelprüfköpfe).</i></p>	<p><i>Bild 29: Recht hohe Überdeckung mit Lücken hauptsächlich im Randbereich.</i></p>

7 Zusammenfassung

Am Anfang stand die Frage: „Welcher Prüfkopf für welchen Einsatz?“ Das ist die Frage, die sich der Anwender stellt. Aus der Sicht des Anwenders gibt es ein paar Randbedingungen, die er sich selbst herausarbeiten kann und die Kenntnis dieser Randbedingungen führt ihn zu dem richtigen Prüfkopftyp. In manchen Fällen, besonders bei der Wahl der richtigen Prüffrequenz, kann auf einen kleinen Vorversuch bzw. auf ein Ausprobieren nicht verzichtet werden. Dies führt schließlich zu einem Entscheidungsbaum (s. Bild 18), der den Anwender die Wahl des richtigen Prüfkopfes deutlich erleichtert. Dieser Entscheidungsbaum deckt zwar die wichtigsten Fragestellungen ab, sollte aber flexibel gehandhabt werden, um somit das individuelle Prüfproblem optimal lösen zu können.

Bei der automatisierten Ultraschallprüfung treten noch weitere Fragen in den Vordergrund, welche die Überdeckung des Prüfvolumens, die Nachweisgrenze und die Prüfgeschwindigkeit betreffen. Da es sich bei der automatisierten Ultraschallprüfung meistens um größere Prüfanlagen handelt, werden hier dem Anwender die richtige Wahl der Prüfköpfe vom Hersteller abgenommen, der auch das notwendige Prüfkonzept entwickelt, um so das Optimum von Überdeckung, Nachweisgrenze und Prüfgeschwindigkeit zu erzielen. Am Beispiel einer automatisierten Stangenprüfung konnte gezeigt werden, wie bei einer hohen Durchlaufgeschwindigkeit eine 100%ige Überdeckung sowie eine hohe Prüfempfindlichkeit mit Hilfe geeigneter Prüfköpfe und Prüftechniken erreichbar ist.

Die wichtigsten akustischen Zusammenhänge und Entscheidungsgrundlagen zur richtigen Prüfkopfwahl sind in anschaulicher Weise auf einem farbigen 60 cm x 80 cm Wandposter zusammengefasst, das wir Interessenten gerne zur Verfügung stellen.

8 Literatur

- [1] W. Deutsch, V. Schuster, M. Joswig, R. Kattwinkel: „Fixe Prüfung mit fixem Kopf“, Qualität und Zuverlässigkeit, 45, S. 1016-1017, 2000
- [2] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt, W.A.K. Deutsch, V. Schuster: „Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung - ZfP - kompakt und verständlich - Band 1 - DIE ULTRASCHALLPRÜFUNG“, Castell Verlag, Wuppertal, 1999
- [3] W. Deutsch, V. Schuster, M. Joswig, R. Kattwinkel: „Schnelle, automatisierte Stangen- und Rohrprüfung ohne Rotation“, DGZfP Jahrestagung, Celle, S. 407-415, 1999
- [4] V. Deutsch, M. Platte, M. Vogt: „Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen“, Springer Verlag, 1997

- [5] M. Lach, M. Platte, A. Ries: „Piezoelektrische Schwingermaterialien für Ultraschall-Prüfköpfe“, DGZfP Zeitung 52, April 1996
- [6] M. Platte, P. Möller: „Automatisches Ultraschallprüfen von Blechen und Rohren“, Bänder Bleche Rohre, 3/1993
- [7] R. Millner: „Ultraschalltechnik“, Leipzig, 1987
- [8] W. Oppermann: „Untersuchungen zum Einfluss der Impulsparameter auf den Fehlernachweis bei der Ultraschallprüfung schallstreuender Werkstoffe“, Dissertation an der Universität Dortmund (Maschinenbau), 1982