

Zum Ultraschallprüfsystem gehören das Ultraschallgerät, der oder die Prüfköpfe und die Prüfkabel. Bei den Ultraschallgeräten werden die analoge und digitale Signalverarbeitung unterschieden, je nachdem ob die zeitliche Folge der Bilder auf dem Bildschirm dem Zeitverhalten bei ihrer Entstehung am Prüfkopf entspricht oder nicht. Ein Ultraschallgerät muss nach DIN EN 583-1 [2.6] die Anforderungen der DIN EN 12668-1 [2.7] erfüllen.

2.1 Prüfgeräte

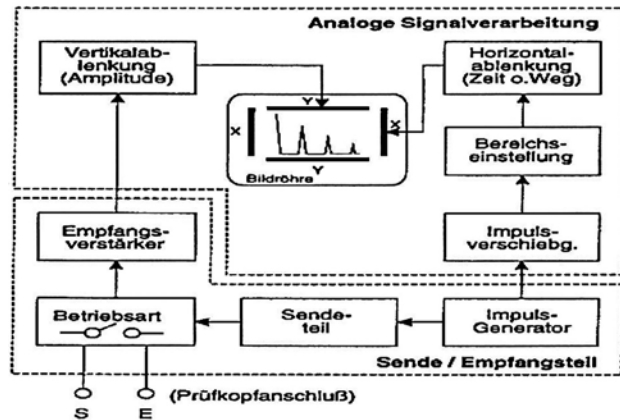
2.1.1 Analoggeräte

Beim analogen Ultraschallgerät ist dieser Zusammenhang zwischen der Impulsfolge und dem Bildwechsel gegeben, d.h. die Darstellung der Impulssignale auf dem Bildschirm erfolgt im Takt der Impulsfolgefrequenz für das menschliche Auge in geschlossenen Linienzügen.

2.1.1.1 Blockschaltbild

In Abb. 2.1 ist der Aufbau eines Ultraschallgerätes mit analoger Signalverarbeitung dargestellt. Der Impulsgenerator gibt als Taktgeber mit einer Impulsfolgefrequenz von 50 Hz bis zu ca. 10 KHz elektrische Impulse an das Sendeteil ab. Dort werden durch diese Steuerimpulse die Sendeimpulse erzeugt, die über das Prüfkopfkabel an den Prüfkopf und dessen piezoelektrischen Schwinger übertragen und von diesem in mechanische Ultraschallimpulse umgewandelt werden. Werden die Ultraschallimpulse nach Reflexion im Werkstück vom Prüfkopf wieder empfangen, so erfolgt durch den Schwinger ihre Umwandlung in elektrische Impulse. Diese Impulse werden danach vom Empfangsverstärker verstärkt und an den vertikalen Platten der Bildröhre zur Anzeige gebracht. Die Laufzeiten der verschiedenen Impulse werden durch die Horizontalablenkung an den horizontalen Platten auf dem Bildschirm angezeigt.

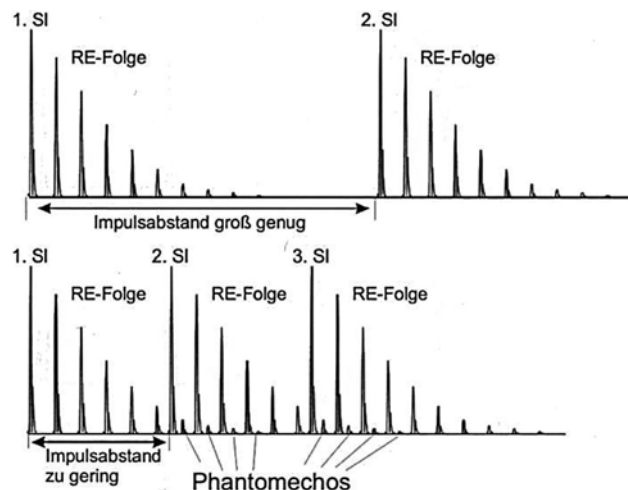
Abb. 2.1 Blockschaltbild eines analogen Ultraschallgerätes [2.2]



2.1.1.2 Baustufen des Ultraschallgerätes

Im Impulsgenerator wird die Impulsfolgefrequenz erzeugt. Die Impulsfolgefrequenz ist einstellbar von 50 Hz bis ca. 10 kHz. Durch den Grobbereichssteller wird die Frequenz automatisch an den Justierbereich und damit indirekt an die Prüfstückdicke angepasst. Bei zu hoher Impulsfolgefrequenz können sogenannte Phantom-Echos entstehen (Abb. 2.2), weil der Abstand der Impulse zu gering ist, d.h. es wird ein neuer Sendepuls ausgelöst, bevor alle Echos des vorhergehenden Sendepulses abgeklungen sind. Im Bild fallen von den Mehrfachechos aus dem Werkstück nur zwei in den Bildbereich t_a . Da ihre Amplitude in der Pausenzeit bis zum Beginn der nächsten Arbeitszeit t_a nicht auf Null abgeklungen ist, können die übrigen Mehrfachechos als Phantom- oder Scheinanzeigen abgebildet werden. In den meisten Ultraschallgeräten wird diese Erscheinung durch eine automatische Regelung der Impulsfolgefrequenz vermieden.

Abb. 2.2 Entstehung von Phantomechos bei zu schneller Impulsfolge [2.1]



Im Sendeteil werden die Sendeimpulse aufbereitet. Der Sendeverstärker arbeitet als Breitbandverstärker. Durch seine Anregung des Prüfkopfes werden das Auflösungsvermögen und die Empfindlichkeit beeinflusst. Der Betriebsartenschalter wird geschlossen, wenn nur ein Schwinger zum Senden und zum Empfangen eingesetzt werden soll, wie beim Impulsehobetrieb. Er bleibt offen, wenn dagegen zum Senden und Empfangen zwei elektrisch und akustisch getrennte Systeme verwendet werden sollen, wie z.B. beim SE-Prüfkopf, bei der Tandem- oder Durchschallungsprüfung. Vom Schwinger werden die empfangenen Ultraschallsignale in elektrische Signale umgewandelt und zum Empfangsverstärker geleitet. Dort werden diese Signale verarbeitet und verstärkt, um sie auf der Bildröhre abbilden zu können. Die Verstärkung erfolgt dabei mit Hilfe des dB-Stellers. Wird die Verstärkung zu hoch gewählt, so kann es zum sogenannten Verstärkerrauschen, einem elektronischen Rauschen, kommen (Abb. 2.3).

Die Verstärkungswirkung kann beeinflusst werden durch die Wahl des Frequenzbereiches, die Art der Gleichrichtung, Siebung oder Unterdrückung (Schwellwerteinstellung). Selten wird die HF- oder Hochfrequenz-Darstellung eingesetzt, meistens werden die Impulse gleichgerichtet mit nur einer Auslenkung oder gefiltert (Abb. 2.4).

Die Impulsverschiebung ist bei den meisten Ultraschallgeräten stufenlos, selten zusätzlich in Stufen einstellbar. Dabei werden die Steuerimpulse des Impulsgenerators um eine bestimmte Zeit gegenüber dem Sendeimpuls verschoben, d.h. das gesamte Echobild wird auf dem Bildschirm nach links oder nach rechts verstellt, um die linken unteren Fußpunkte der einzelnen Echos auf die Markierungen der Bildschirmskala einzustellen, die den Abständen der Echos von der Nullmarkierung entsprechen.

Abb. 2.3 Elektronisches Rauschen bei zu hoher Verstärkung [2.8]

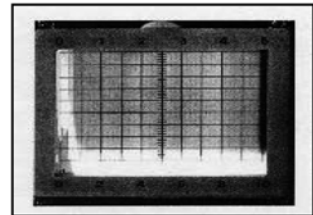
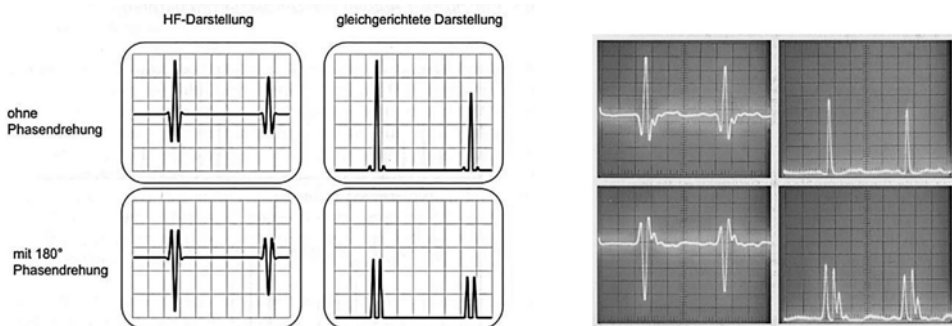
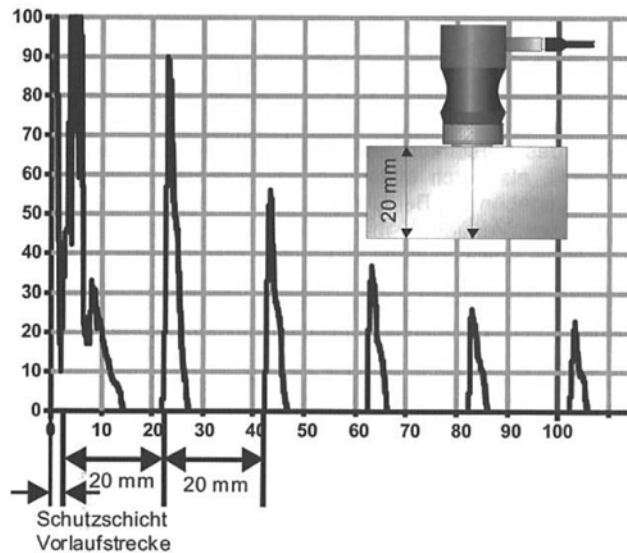


Abb. 2.4 Impulsdarstellung bei Ultraschallgeräten schematisch und im A-Bild [2.3]

Da die Horizontalablenkung proportional der Laufzeit ist, muss sie linear sein. Die Mehrfachechos aus einem fehlerfreien Werkstück müssen alle den gleichen Abstand untereinander aufweisen. So kann man z.B. durch die Verschiebung des Echobildes feststellen, dass der Abstand zwischen dem Sendeimpuls und dem ersten Rückwandecho größer ist, als der Abstand zwischen den folgenden Mehrfachechos. Wie Abb. 2.5 zeigt, liegt das an der zusätzlichen Laufzeit in der Schutzschicht oder der Vorlaufstrecke des Prüfkopfes. Alle Prüfköpfe haben eine feste Schutzschicht und je nach Rauheit der Werkstückoberfläche auch eine flexible Schutzschicht.

Der Prüfbereich ist eine auf die Abmessungen des Werkstückes abzustimmende Größe. Wählt man den Prüfbereich zu groß, so lassen sich Einzelheiten schlecht ausmessen bzw. ablesen, da beispielsweise ein Skalenteil am Bildschirm einen zu großen Betrag aufweist. Würde der Prüfbereich zu klein eingestellt, so werden nicht alle Details angezeigt, weil nicht das gesamte Werkstück abgebildet wird. Mit Hilfe der Bereichseinstellung kann der erforderliche Prüfbereich eingestellt werden, indem die Echos in ihren Abständen vergrößert oder verkleinert werden. Das Werkstück wird maßstäblich an die Bildschirmabmessungen angepasst. Zur Justierung von Anzeigen werden nacheinander die Impulsverschiebung und die Bereichseinstellung solange verändert, bis die Echos auf den gewünschten Markierungen am Bildschirm stehen.

Abb. 2.5 Einfluss einer Schutzschicht oder Vorlaufstrecke [2.1]



2.1.2 Digitalgeräte

2.1.2.1 Blockschaltbild

In Abb. 2.6 ist der Aufbau eines Ultraschallgerätes mit digitaler Signalverarbeitung abgebildet. Im Prinzip ist die Funktionsweise ähnlich der eines analogen Ultraschallgerätes, jedoch wird die Vertikalablenkung durch den A/D-Wandler und die Horizontalablenkung einschließlich der Impulsverschiebung und Bereichseinstellung durch den Mikroprozessor beeinflusst.

2.1.2.2 Mikroprozessor und Auswertung der Signale

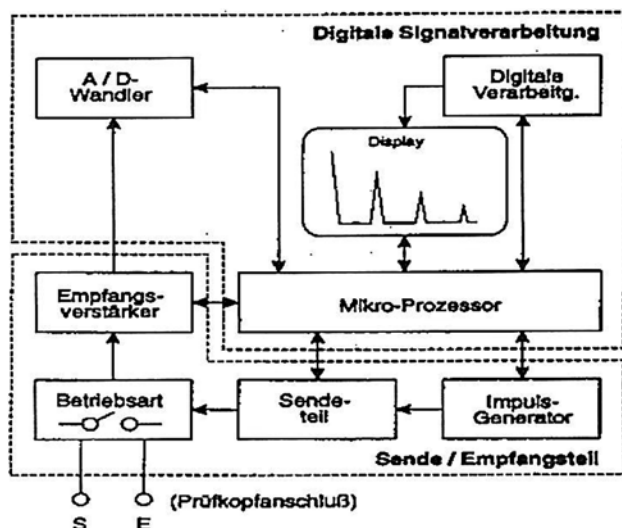
Bei Ultraschallgeräten mit digitaler Signalverarbeitung wird der zeitliche Zusammenhang zwischen der Impulsfolge und dem Bildwechsel mit Hilfe eines Mikroprozessors und eines Analog-Digital-Wandlers aufgehoben, so dass anstelle von Kathodenstrahlröhren Displays oder Fernsehbildröhren verwendet werden können, die die Signaltbilder aus Bildpunkten zeilenweise zusammenstellen.

2.1.3 Allgemeine Einstellungen am Ultraschallgerät nach DIN EN 583-1

Ohne nähere Angaben aus Normen, Regelwerken und Prüfspezifikationen soll hinsichtlich der Ultraschall-Prüfgeräte-Einstellungen sichergestellt werden, dass nach [2.6]

- die Unterdrückung nicht benutzt werden darf,
- der Verstärker im richtigen Frequenzbereich betrieben wird,
- die Filterung so eingestellt ist, dass eine optimale Auflösung erreicht wird,

Abb. 2.6 Blockschaltbild eines digitalen Ultraschallgerätes [2.2]



- die Impedanz des Prüfsystems, wenn notwendig, so angepasst wird, dass bei gleichbleibendem Auflösungsvermögen maximale Echohöhe erhalten wird,
- die Energie für den Sendeimpuls unter Berücksichtigung der Verstärkungsreserve so niedrig wie möglich eingestellt ist.

Diese Einstellungen müssen während der Prüfung beibehalten werden.

2.1.4 Generelle Anwendung von digitalen Ultraschallgeräten

Große Schmiedestücke konnten lange Zeit nur mit analogen Geräten geprüft werden. Lange Schallwege und geringe Schallschwächung erforderten eine niedrige Impulsfrequenz zur Vermeidung von Phantomechos und eine hohe Verstärkung zum Nachweis kleinster Reflektoren [2.13]. Inzwischen wurden Geräte entwickelt, die auch bei extrem niedrigen Impulsfrequenzen (25 Hz) ein dynamisches Abbildungsverhalten wie die zuvor verwendeten Analoggeräte zeigten. Damit war es möglich, die Vorteile der Digitaltechnik, wie A-Bilder einfrieren, Befunde speichern, Echoanzeigen vergleichen, dokumentieren etc. für die manuelle Prüfung großer Schmiedestücke aber auch für die mechanisierte Prüfung zu nutzen [2.13].

2.2 Prüfköpfe

Die Ultraschallprüfung lässt sich ohne Prüfköpfe nicht durchführen. Da die Prüfköpfe sowohl als Sender als auch als Empfänger von Schallwellen dienen, kommt ihnen eine entscheidende Bedeutung innerhalb des Prüfsystems zu. Die Schallwellen verlaufen entlang eines Schallfeldes, dessen Eigenschaften für die praktische Ultraschallprüfung sehr wichtig sind. **Ein Ultraschallprüfkopf muss nach DIN EN 583-1 die Anforderungen der DIN EN 12668-2 erfüllen** [2.7]. Die Prüfkopfauswahl richtet sich nach dem Zweck der Prüfung und den Anforderungen der vorgegebenen Norm oder des Regelwerkes. Sie ist abhängig von

- der Werkstoffdicke, -gestalt und -Oberflächenbeschaffenheit,
- der Art und vom metallurgischen Zustand des zu prüfenden Werkstoffes,
- der Art, Lage und Orientierung der nachzuweisenden Fehler.

2.2.1 Schallfelder

Die Impulsschalltechnik verwendet zur Erzeugung und zum Empfang von Schallwellen Prüfköpfe, die fast ausschließlich mit piezoelektrischen Schwingern aus leistungsfähigen Werkstoffen, wie z.B. Bariumtitanat oder Blei-Zirkonat-Titanat, in Form von dünnen Plättchen ausgestattet sind. Diese Wandler werden mit kurzen elektrischen Impulsen zu Schwingungen angeregt. Damit der Schwinger nicht zu lange schwingt, wird durch Auf-

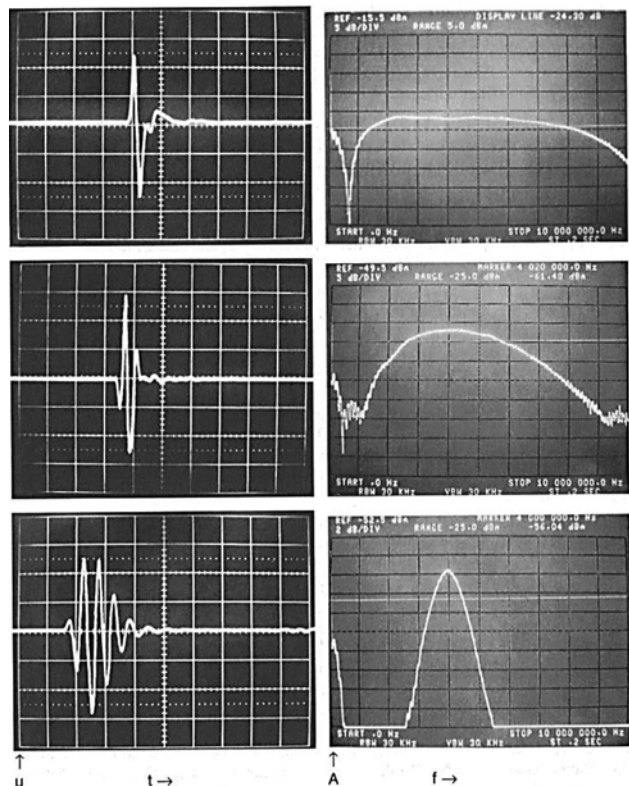
bringen eines Dämpfungskörpers (Kunstharz, Kunstgummi u.s.w.) auf der metallisierten Rückseite des Wandlers die Schwingung der Piezoplatte gedämpft. Bei geringer Dämpfung ist ein Impuls lang, sein Frequenzspektrum entsprechend schmalbandig. Es liegt in der Nähe der Resonanzfrequenz des Schwingers. Bei hoher Dämpfung erhält man kurze, breitbandige Impulse. Diese sehr kurzen Impulse bieten eine höhere Fernauflösung und ermöglichen genaue Laufzeitmessungen. Abb. 2.7 zeigt den Zusammenhang zwischen Dämpfung und Impulsdauer.

2.2.1.1 Nah- und Fernfeld

Die Schalldruckverteilung eines Prüfkopfes wird beschrieben durch ein Schallfeld, das wiederum charakterisiert wird durch das Nahfeld, das Fernfeld, durch die Divergenz und den Schallbündeldurchmesser.

In der Nähe des Prüfkopfes ist das Schallfeld zunehmend gebündelt und die Schalldruckverteilung stark schwankend. Infolge von Interferenzen (Überlagerung von Schallwellen mit Phasenverschiebung) schwankt in diesem Bereich der Schalldruck von Ort zu Ort erheblich und durchläuft mit wachsendem Abstand vom Prüfkopf mehrere Minima und Maxima. In einem bestimmten Abstand vom Schwinger öffnet sich das Bündel schein-

Abb. 2.7 Zusammenhang zwischen Dämpfung und Impulsdauer [2.8]



werferartig und der Schalldruck nimmt mit dem Abstand ab, d.h. er ist umgekehrt proportional zum Schallweg. Das Gebiet der Schallbündelung, das durch Interferenzen mit Maxima und Minima des Schalldruckes gekennzeichnet ist, nennt man das **Nahfeld N**. Das Ende des Nahfeldes in Schallausbreitungsrichtung wird definiert durch das letzte Maximum der Schalldruckamplitudenverteilung. Man erkennt, dass im Nahfeld eine natürliche Fokussierung des Schallfeldes vorhanden ist.

Die Entfernung, in der das Nahfeld in das Fernfeld übergeht, heißt **Nahfeldlänge**. Sie hängt von der Schwingergröße und von der Wellenlänge im Prüfstück ab und kann entweder den Datenblättern des Herstellers entnommen werden oder für kreisförmige Schwinger mit folgender Formel berechnet werden:

$$N = \frac{D^2}{4 \times \lambda} = \frac{D^2 \times f}{4 \times c}$$

mit N = Nahfeldlänge [mm],

D = Schwingerdurchmesser [mm],

λ = Wellenlänge im Werkstück [mm],

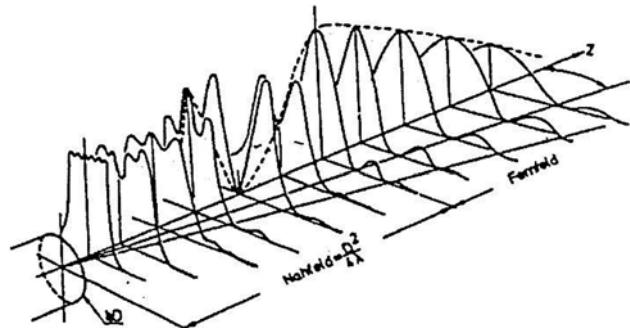
f = Nennfrequenz [MHz],

c = Schallgeschwindigkeit [m/s].

Aus dieser Formel geht hervor, dass die Nahfeldlänge umso größer wird, je größer der Schwingerdurchmesser oder die Frequenz werden. Im Nahfeld können Anzeigen in ihrer Amplitude falsch abgebildet oder gänzlich unterdrückt werden (Interferenz = Schalldruckschwankungen) und deswegen ist eine aussagekräftige Prüfung, d.h. eine Anzeigenbewertung in diesem Bereich nur bedingt möglich. In Abb. 2.8 ist die Schalldruckverteilung im Schallfeld räumlich dargestellt.

Das Gebiet des scheinwerferartig geöffneten Schallverlaufs, in dem der Schalldruck mit der Entfernung vom Prüfkopf kontinuierlich abnimmt, nennt man das **Fernfeld**. In diesem Teil des Schallfeldes gelten in Abhängigkeit von der Reflektorart bestimmte Entfernungsgesetze.

Abb. 2.8 Räumliche Schalldruckverteilung im Schallfeld
[2.3], [2.9]



2.2.1.2 Divergenz und Bündeldurchmesser

Im Fernfeld ist der größte Schalldruck der abgestrahlten Ultraschallwellen stets auf der Symmetrieachse, d.h. der sog. akustischen Achse des Bündels, zu finden (Abb. 2.9). Je mehr man aus der Richtung der akustischen Achse abweicht, desto schwächer wird der Schalldruck. Wird z.B. der Schalldruck auf der Symmetrieachse bei der gleichen Entfernung vom Schwinger zu 100% angenommen und weicht man aus der Richtung ab, so erreicht man einen Winkel bei dem der Schalldruck auf einen Wert von 50% (bezogen auf die 100% der Symmetrieachse) abgeklungen ist.

Weicht man aus der Richtung weiter ab, so erreicht man schließlich einen Winkel, bei dem die Schalldruckamplitude nur noch 10% der Amplitude in der Symmetrieachse beträgt. **Dieser Winkel heißt 'Divergenzwinkel'** und wird wie folgt berechnet:

$$\sin \vartheta_{50 (-6 \text{ dB})} = 0,5 \times \frac{\lambda}{D} = 0,5 \times \frac{c}{D \times f}$$

Schalldruckabfall des Randstrahls auf 50% des Zentralstrahls (d.h. um 6 dB),

$$\sin \vartheta_{10 (-20 \text{ dB})} = \frac{\lambda}{D} = \frac{c}{D \times f}$$

Schalldruckabfall des Randstrahls auf 10% des Zentralstrahls (d.h. um 20 dB),

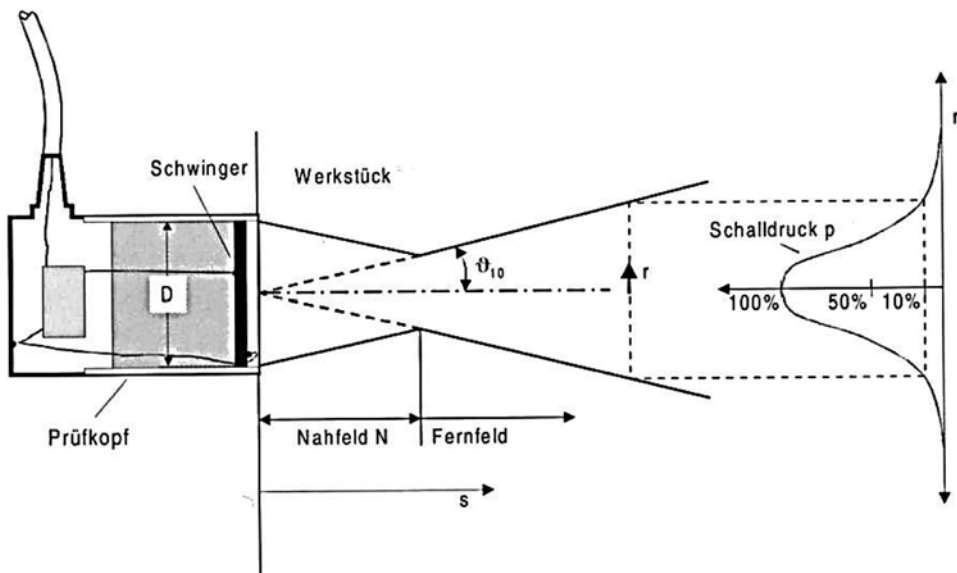


Abb. 2.9 Schallfeld eines Prüfkopfes und Verlauf des Schalldruckes [2.1]

mit λ = Wellenlänge im Prüfstück [mm],
 D = Schwingerdurchmesser [mm],
 f = Frequenz [1/s],
 c = Schallgeschwindigkeit im Prüfstück [m/s].

Der doppelte Divergenzwinkel entspricht dem Öffnungswinkel des Schallfeldes. Aus diesen Formeln geht hervor, dass der Öffnungswinkel umso kleiner wird, je größer die Frequenz oder der Schwingerdurchmesser sind.

Die das Schallfeld bestimmenden Größen „ ϑ “ und „ N “ sind von der Wellenlänge abhängig, so dass derselbe Prüfkopf verschiedene Schallfelder in Stoffen mit verschiedenen Schallgeschwindigkeiten aufweist.

Bei der Bestimmung von Ersatzfehlergrößen durch Abtastung großer Reflektoren, deren Abmessungen am Ort der Ungänge größer sind als der Schallbündeldurchmesser, muss die Ausdehnung des Schallfeldes D_B senkrecht zum Schallstrahl, d.h. in der Tiefe des gefundenen Reflektors, bekannt sein. Die Bündeldurchmesser D_{B50} bzw. D_{B10} (d.h. bei Schalldruckabfall auf 50% bzw. 10%) in der Entfernung „ s “ vom Prüfkopf werden nach folgenden Formeln berechnet

$$D_{B50 (-6dB)} = \frac{\lambda \times s}{D} = \frac{c \times s}{D \times f} \text{ und}$$

$$D_{B10 (-20dB)} = \frac{2 \times \lambda \times s}{D} = \frac{2 \times c \times s}{D \times f}.$$

2.2.1.3 Schallfeld und Prüfkopfeigenschaften nach DIN EN 583-1

Bei der Ultraschallprüfung ist zwischen dem Suchen und Auffinden der Orte von Reflektoren und ihrer Bewertung zu unterscheiden. Um die Ungängen orten zu können, braucht man eine hohe Auffindwahrscheinlichkeit oder Prüfempfindlichkeit. Die Forderungen dafür stehen oft im Widerspruch zu denen für eine Bewertung der gefundenen Reflektoren. Eine große Auffindwahrscheinlichkeit hat man bei einem Prüfkopf mit großem Divergenzwinkel, d.h. kleinem Schwingerdurchmesser oder niedriger Frequenz, und entsprechend hoher Verstärkung, weil dann ein relativ großes Volumen durchschallt wird (Abb. 2.10).

Übliche Prüffrequenzen in Europa sind 0,5; 1; 2; 4; 6 und 10 MHz, in den USA (ASME-Code) werden überwiegend Prüffrequenzen von 0,5; 1; 2,25 und 5 MHz benutzt.

Bei Prüfköpfen mit niedrigen Frequenzen und schwacher Bedämpfung haben kleine flächige Reflektoren eine geringe Richtwirkung, so dass sie noch messbare Echos abgeben, auch wenn sie nicht senkrecht vom Schallstrahl getroffen werden. Die Richtcharakteristik dieser Reflektoren kann bei Prüfköpfen mit hoher Frequenz so ungünstig werden, dass der Schallstrahl nicht mehr vom Prüfkopf reflektiert wird (Abb. 2.11). Mit dem gro-

Abb. 2.10 Schallfelder verschiedener Prüfköpfe [2.2], [2.3]

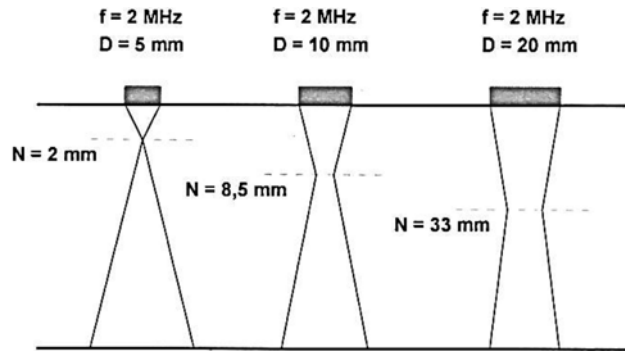
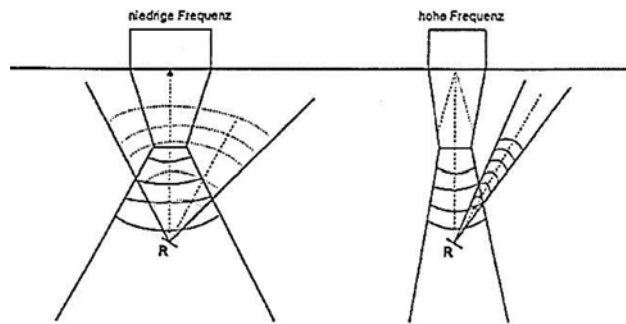


Abb. 2.11 Richtcharakteristiken verschiedener Prüfköpfe [2.8]



ßen Schallbündel und der breiten Richtcharakteristik lässt sich aber keine gute Bewertung der Ungängen durchführen.

Die Bestimmung der Größe kleiner Reflektoren sollte im Fernfeld des Prüfkopfes erfolgen, d.h. man sollte Prüfköpfe verwenden, die eine kleine Nahfeldlänge haben. Diese Prüfköpfe, d.h. mit kleinem Schwingerdurchmesser oder niedriger Frequenz haben aber wegen der weniger gerichteten Abstrahlung eine schlechtere Fernempfindlichkeit und zusätzlich ein schlechtes Auflösungsvermögen. Das Auflösungsvermögen gibt an, in welchem Abstand vom Prüfkopf zwei dicht benachbarte Reflektoren mit kurzen Laufzeitunterschieden im Werkstück als zwei Anzeigen auf dem Bildschirm gerade noch als getrennte Anzeigen wahrgenommen werden können.

Man unterscheidet zwischen „Nahauflösung“ und „Fernauflösung“. Die Nahauflösung bezieht sich auf das Gebiet in Schwingernähe und damit auf den Bereich des Sendeimpulses. Man spricht von guter Nahauflösung, wenn der Prüfkopf die Fähigkeit besitzt, eine Reflexion dicht unter der Oberfläche getrennt vom Sendeimpuls erkennen zu lassen (Abb. 2.12). Das hängt ganz wesentlich von der Sendeimpulsbreite ab, so dass prüfflächennahe Fehler mit Senkrechtprüfköpfen nicht immer zuverlässig nachgewiesen werden können. Der Begriff Fernauflösung wird auf größere Abstände vom Wandler und damit vom Sendeimpuls bezogen. Eine gute Fernauflösung liegt vor, wenn zwei sehr nahe beieinander liegende Reflektoren noch getrennt dargestellt werden können (Abb. 2.13).

Abb. 2.12 Gute Nahauflösung links und schlechte Nahauflösung rechts [2.10]

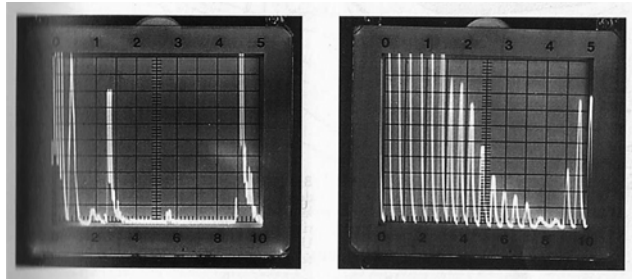
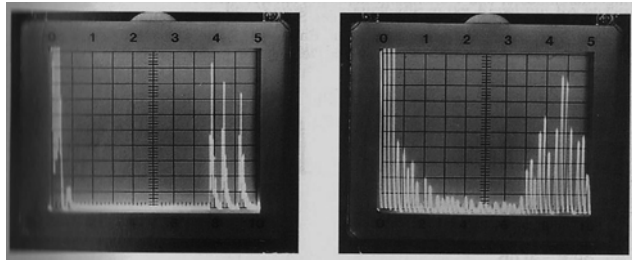


Abb. 2.13 Gute Fernauflösung links und schlechte Fernauflösung rechts [2.10]



Das Schallbündel (Nahfeldlänge und Divergenz) wird durch die Frequenz und die Prüfkopfabmessungen bestimmt. Die Prüfkopfauswahl muss sicherstellen, dass die Eigenschaften des Schallbündels optimal für die Prüfung sind. Dafür gelten insbesondere nach DIN EN 583-1 folgende Hinweise:

- Die Nahfeldlänge muss möglichst kleiner als die Dicke des Prüfgegenstandes sein.
- Der Schallbündeldurchmesser muss in der am weitesten vom Prüfkopf entfernten Prüfzone so klein sein, dass noch ein ausreichendes Nachweisvermögen besteht.
- Der Divergenzwinkel des Schallbündels muss ausreichend groß sein, um ebene Ungängen nachweisen zu können, die ungünstig orientiert sind.
- Bei der Auswahl des Prüfkopfes muss die tote Zone im Verhältnis zum Prüfvolumen berücksichtigt werden.
- Ebenso muss die Dämpfung des Prüfkopfes beachtet werden, da sie sowohl das Auflösungsvermögen als auch das Frequenzspektrum beeinflusst.
- Bei der Auswahl der Prüffrequenz müssen die Schallschwächung im Werkstoff und das Reflexionsvermögen der Fehler in Betracht gezogen werden.

Prüfköpfe mit großen Schwingerdurchmessern haben wegen der gebündelten Richtcharakteristik eine große Leistung (Intensität) und deswegen eine große Reichweite (bis ca. 20 m) sowie eine höhere Empfindlichkeit, aber zugleich eine große Nahfeldlänge, so dass Reflektoren im Bereich der Oberfläche nicht bewertet werden können. Für die meisten Prüfaufgaben kann man sehr große Durchmesser (> 40mm) nicht gebrauchen, weil wegen der Bauteilgeometrie entsprechend ebene Kontaktflächen nicht zur Verfügung stehen.

Prüfköpfe mit hoher Frequenz und starker Bedämpfung haben wegen der kurzen Impulse und schmalen Echos eine gute Auflösung aber wegen der kleineren Wellenlänge und verbunden damit größeren Schallschwächung eine geringere Schalleistung (kleinere Empfindlichkeit). Wie daraus ersichtlich ist, verlangt man von einem optimalen Prüfkopf auf der einen Seite eine gute Fernempfindlichkeit, auf der anderen ein gutes Auflösungsvermögen. Diese Eigenschaften eines Prüfkopfes kann man leider nicht in Einklang bringen, wie Tabelle 2.1 zeigt.

Tab. 2.1 Prüfkopfeigenschaften

Hohe Frequenz und stark bedämpft	Niedrige Frequenz und schwach bedämpft
Gute Auflösung durch schmalere Echos	Hohe Schalleistung (große Empfindlichkeit)
Geringere Schalleistung (kleine Empfindlichkeit)	Schlechtere Auflösung durch breite Echos

Bei stark bedämpften Prüfköpfen kann die Nennfrequenz bis zu 10% abweichen. Außerdem wird durch den Prüfgegenstand (Ankopplung, Werkstoff, Reflektor u.s.w.), der ja auch eine Bedämpfung des Schwingers darstellt, die Frequenz beeinflusst, d.h. das Frequenzamplitudenspektrum herabgesetzt. Die bei der Ultraschallprüfung in einem Echo überwiegend vorhandene Frequenz nennt man **Arbeits- oder Prüffrequenz**. Die auf dem Prüfkopf angegebene Frequenz heißt **Nennfrequenz**.

2.2.2 Senkrechtprüfköpfe

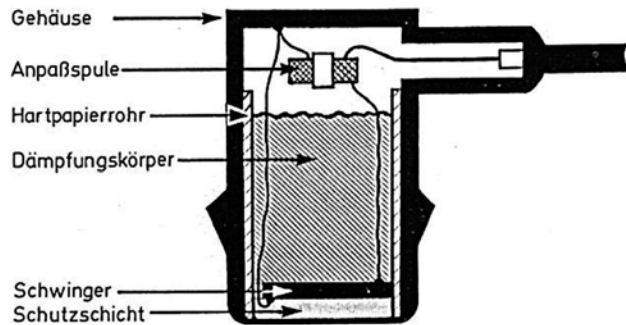
2.2.2.1 Normalprüfköpfe

Prüfköpfe für senkrechtes Einschallen von Longitudinalwellen in eine Oberfläche eines Werkstückes werden Senkrechtprüfköpfe genannt. Wird zum Senden und Empfangen nur ein Prüfkopf verwendet, so bezeichnet man den Prüfkopf als Senkrechnormalprüfkopf. Bei getrenntem Sender und Empfänger in einem Gehäuse spricht man vom Senkrecht-SE-Prüfkopf.

Ein Schwinger (zur Aufbringung der elektrischen Impulse (auf beiden Flächen metallisiert) ist mit einer Fläche auf einen Dämpfungskörper aufgeklebt, die andere Fläche wird unter Anwendung einer Schutzschicht an das Werkstück angekoppelt. Die Anschlussdrähte der metallisierten Schwingerfläche sind mit einer Spule verbunden, die die elektrische Anpassung zwischen Schwinger und Impulsgenerator vornimmt. Diese aus Schwinger, Dämpfungskörper und Spule mit Stecker bestehende Einheit (auch Spule oder Niob genannt) sitzt in einem metallischen, geerdeten Gehäuse. Die Verbindung des Prüfkopfes zum Ultraschallgerät wird über Prüfkabel realisiert (Abb. 2.14).

Bei der Kontakttechnik wird der Prüfkopf durch ein Koppelmittel an das zu prüfende Bauteil angekoppelt, denn ohne Koppelmittel bleibt zwischen dem Prüfkopf und der Prüffläche ein Luftspalt, der für die Ultraschallwellen ein kaum überwindbares Hindernis be-

Abb. 2.14 Aufbau eines Senkrechtprüfkopfes (schematisch) [2.10]



deutet. Zur Anwendung können Wasser, synthetische Mittel (gelöster Tapetenkleister), Öle, Glycerin und spezielle Koppelpasten kommen. Am besten sind Koppelmittel, deren Schallwellenwiderstand annähernd so groß ist, wie der des Prüfstückes.

In den handelsüblichen Normalprüfköpfen werden Schwinger mit tatsächlichen Durchmessern zwischen 5 und 40 mm benutzt (zumeist 10 und 24 mm). Der effektive Schwingerdurchmesser ist kleiner als der äußerlich messbare Schwingerdurchmesser. Er wird in den Prüfkopf-Datenblättern vom jeweiligen Hersteller angegeben und beträgt etwa 95% des Nenndurchmessers. Senkrechtprüfköpfe werden aufgrund ihres Einschallwinkels von 0° überwiegend bei der Prüfung von Guss- und Schmiedestücken eingesetzt. Senkrechnormalprüfköpfe werden fast ausschließlich mit kreisförmigen Schwingern hergestellt. Folglich sind die wichtigsten Schallfeldgrößen für Senkrechnormalprüfköpfe der effektive Schwingerdurchmesser, die Prüffrequenz, die Wellenlänge, die Schallgeschwindigkeit im übertragenden Werkstoff, der Öffnungswinkel des Schallbündels und der Schallbündeldurchmesser. Abb. 2.15 zeigt einige Beispiele für die unterschiedlichen Schallfelder bei Veränderung dieser Größen.

2.2.2.2 Sende-Empfangs-Prüfköpfe

Prüfköpfe mit getrennten Schwingern für die Sende- und Empfangsfunktion werden als Sende – Empfangs (SE)-Prüfköpfe bezeichnet. Der Aufbau eines solchen Prüfkopfes ist in Abb. 2.16 dargestellt. SE – Prüfköpfe enthalten in einem Gehäuse zwei elektrisch und akustisch voneinander getrennte Schwinger, von denen einer als Sender und der andere als Empfänger arbeitet. Sie sind auf zwei voneinander akustisch (durch schallabsorbierende Substanz) getrennte Kunststoffkeile aufgeklebt, so dass ein direkter Schalldurchgang vom Sende- zum Empfangswandler nicht möglich ist. Durch die Vorlaufstrecke (Plexiglaskeil) wird erreicht, dass der Sendeimpuls nicht mit dem Nullpunkt der Messung (Werkstückoberfläche) wie beim Normalprüfkopf zusammenfällt, sondern vorher, d.h. weiter nach links auf dem Bildschirm liegt und deshalb aus dem Sichtbereich herausgestellt ist (Abb. 2.17).

Durch entsprechende Neigung der Schwinger zueinander, kann die „tote Zone“ verringert und Bereiche bestimmter Tiefe (besonders nahe der Oberfläche) im Werkstück geprüft werden. Der Neigungs- oder Dachwinkel liegt zwischen 0 und 12° . In Abhängigkeit von

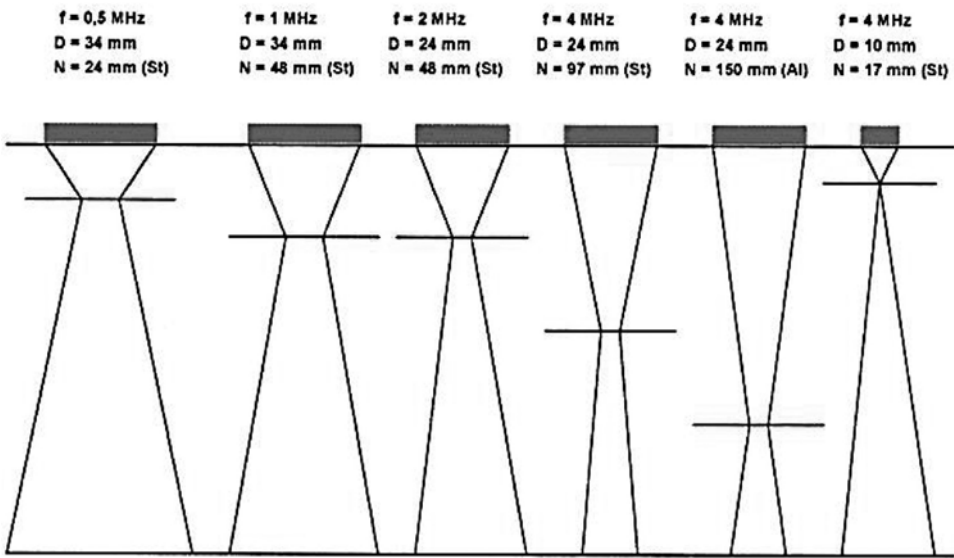


Abb. 2.15 Beispiele für Schallfelder bei Veränderung von Schwingerdurchmesser, Prüffrequenz, Wellenlänge, Schallgeschwindigkeit u. Nahfeldlänge [2.2]

den o.g. Dachwinkeln wie auch von der Frequenz, Bandbreite und Schwingerabmessung liegt der Tiefenbereich = Arbeitsbereich (d.h. der Bereich, auf den die Prüfung eingeschränkt werden soll) von 0,5 bis 200 mm. Die Obergrenze gilt für schwächungsfreies Ma-

Abb. 2.16 Aufbau eines Sende-Empfangs-Prüfkopfes [2.10]

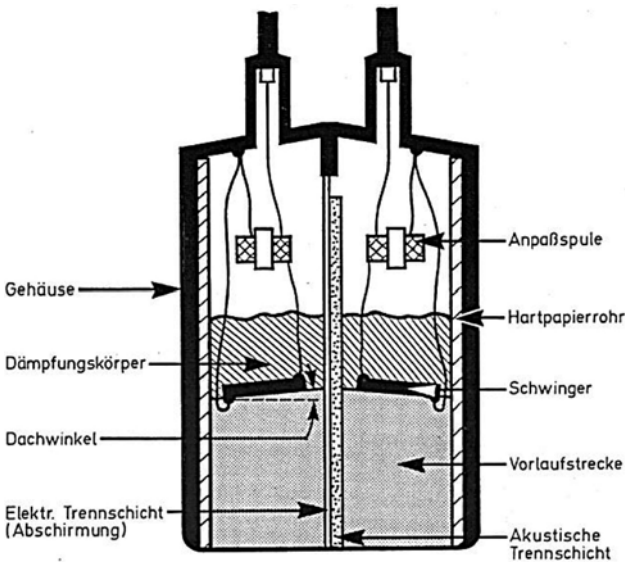
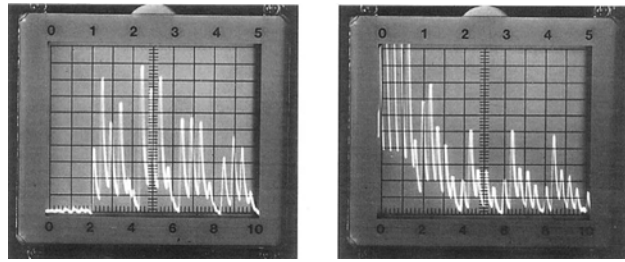


Abb. 2.17 Echoanzeige bei einem SE-Prüfkopf (links) im Vergleich mit einem Normalprüfkopf (rechts) [2.2]



terial und stellt nur einen Richtwert dar. Mit zunehmender Schallschwächung des Werkstoffes und höherer Frequenz ist in der Praxis mit einer starken Abnahme der Obergrenze zu rechnen.

Der Prüfkopf ist mit einem Doppelkabel an zwei getrennte farbig gekennzeichnete oder besonders geformte Eingänge (Stecker) für den Sender und Empfänger am Gerät angeschlossen. Um mit dem SE-Prüfkopf arbeiten zu können muss man am US-Gerät den Betriebsartenschalter öffnen, d.h. in die Position „Durchschallung“ bringen.

Der Dachwinkel, die Frequenz und die Bandbreite wie auch die Schwingerabmessungen bestimmen die Geometrie des Schallfeldes bei SE-Prüfköpfen (Abb. 2.18). Die für Einschwingersystem gültigen Gesetzmäßigkeiten (Nahfeld, Fernfeld) sind hier nicht mehr anwendbar. Durch die schräggestellten Schwinger im SE-Prüfkopf überschneiden sich die Schallbündel von Sender und Empfänger, wodurch **der Arbeits- bzw. Empfindlichkeitsbereich** begrenzt wird (in Abb. 2.18 **doppeltschraffiertes Feld**). Im Kreuzungspunkt (Brennpunkt = Fokuspunkt) beider Hauptstrahlen ergibt sich die maximale Empfindlichkeit, während die Kreuzungspunkte der Randstrahlen den Anfang und das Ende des Empfindlichkeitsbereiches kennzeichnen.

Abb. 2.18 Schallfelder von S/E-Prüfköpfen mit unterschiedlichen Dachwinkeln [2.10]

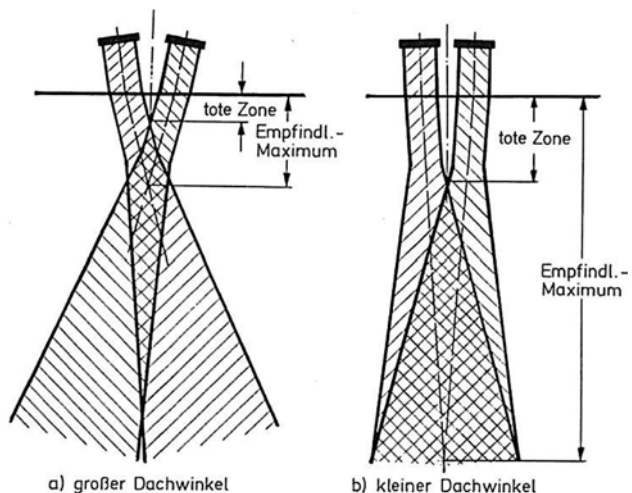
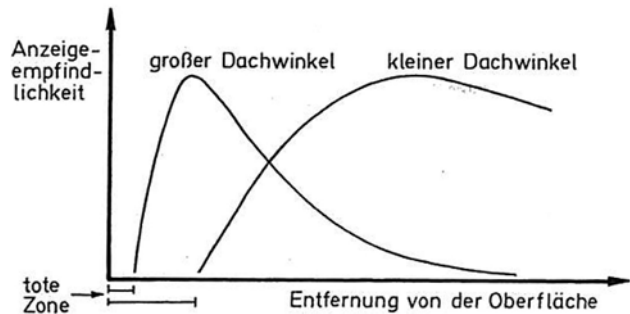


Abb. 2.19 Dachwinkel und Empfindlichkeitsverlauf [2.10]



Je nach Dachwinkelgröße lässt sich der Brennpunkt dicht unter die Oberfläche oder tiefer legen und zugleich den Arbeitsbereich verkürzen oder verlängern (Abb. 2.19). Infolge dieses Aufbaus mit einer relativ stark schwächenden Vorlaufstrecke hat der SE-Prüfkopf theoretisch eine geringere Empfindlichkeit als der Normalprüfkopf, jedoch wegen des nicht auf dem Bildschirm vorhandenen Sendepulses eine unvergleichlich bessere Nahauflösung, womit man dicht unter der Oberfläche liegende Fehler aufdecken kann und sehr dünnwandige Werkstücke (Wanddicke) messen kann.

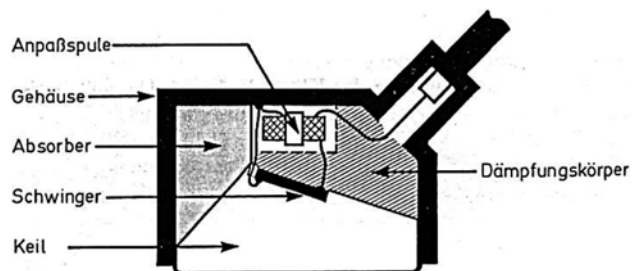
2.2.3 Winkelprüfköpfe

Prüfköpfe für Schrägeinschallung heißen Winkelprüfköpfe. Der Aufbau eines Winkelprüfkopfes ist in Abb. 2.20 dargestellt.

Im Winkelprüfkopf selbst werden Longitudinalwellen erzeugt und erst der Vorsatzkeil ermöglicht durch das schräge Auftreffen der Longitudinalwellen auf die Grenzfläche zum Prüfgegenstand die Umwandlung der Longitudinalwellen in Transversalwellen durch Brechung im Prüfstück.

Der Einschallwinkelbereich liegt bei Stahl zwischen 35° und 80° (am meisten angewendet werden 45° , 60° und 70°), da bei kleineren Winkeln auch Longitudinalwellen und bei größeren bereits Oberflächenwellen entstehen. **Der Einschallwinkel ist der Winkel**

Abb. 2.20 Aufbau eines Winkelprüfkopfes [2.10]



zwischen der Achse des Schallbündels im Prüfgegenstand und der Normalen zur Prüffläche.

Die Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle ist in Kunststoffen temperaturabhängig, d.h. bei Prüfköpfen mit Plexiglasvorlaufkeilen ändert sich der für 20° C angegebene Einschallwinkel entsprechend der veränderten Temperatur (Schallgeschwindigkeit) des Keiles. Normalerweise können diese Prüfköpfe bei Temperaturen zwischen – 20°C und +60°C verwendet werden, ohne eine Korrektur zwischen Justierung und Prüfung berücksichtigen zu müssen.

Auf jedem Prüfkopf sind die Nennfrequenz und der Nenneinschallwinkel angegeben, auch wird der Schallaustrittspunkt gekennzeichnet. Der Schallaustrittspunkt ist der Schnittpunkt der akustischen Achse mit der abstrahlenden Fläche des Prüfkopfes. Er wird beschrieben durch seinen Abstand zur Prüfkopfvorderkante (x-Maß). Deswegen sind der Einschallwinkel und das x-Maß auch für die Ortung von Ungängen wichtig.

Aufgrund der verschiedenen Einschallwinkel werden Winkelprüfköpfe bevorzugt bei der Prüfung von Schweißnähten eingesetzt. So kann beispielsweise ein Flankenbindefehler bei einer Nahtflanke von 30° am besten mit einem WPK 60 nachgewiesen werden. Senkrechtnormalprüfköpfe können diesbezüglich nur bei abgeschliffener Schweißbraupe verwendet werden.

Für die Winkelprüfköpfe gilt dieselbe Unterteilung des Schallfeldes (Nah- und Fernfeld, Divergenzwinkel, Bündeldurchmesser) wie bei Normalprüfköpfen, lediglich die physikalischen und mathematischen Zusammenhänge sind etwa komplizierter. Da diese Prüfköpfe überwiegend rechteckförmige Schwinger haben und wegen der unterschiedlichen

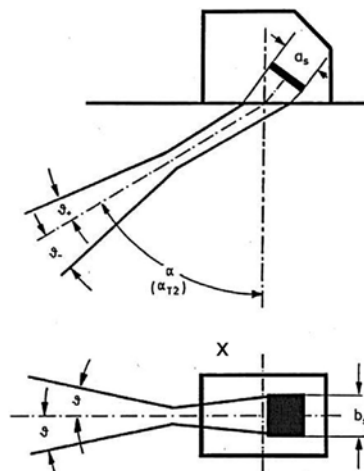


Abb. 2.21 Schallfeld-Kenngrößen eines Winkelprüfkopfes [2.10]

- mit α – Einschallwinkel,
 $\vartheta_{(+/-)}$ – Divergenzwinkel senkrecht zur Einschallebene,
 ϑ – Divergenzwinkel in der Einschallebene.

schräg auftreffenden Schallwellen auf die Grenzfläche Plexiglasvorlaufkeil/Prüfgegenstand, ist das Schallfeld (Abb. 2.21) und die Schalldruckverteilung im Werkstück gegenüber Senkrechnormalprüfköpfen verzerrt.

Wie aus o.g. Bild ersichtlich wird, ist von der gesamten Nahfeldlänge „N“ ein Teil in der Vorlaufstrecke des Prüfkopfes enthalten (Nahfeldäquivalent S_v). Die verbleibende Nahfeldlänge im Prüfgegenstand (Stahl) ist $N_{St} = N - x$.

Da die Berechnung der Nahfeldlänge für den Praktiker nicht gut handhabbar ist, wird die Nahfeldlänge in der Regel von den Prüfgeräteherstellern in den Datenblättern angegeben. Aus der ermittelten Nahfeldlänge lässt sich ein äquivalenter Schwingerdurchmesser ermitteln. Wegen der verschiedenen langen Schallwege in der Vorlaufstrecke ist der Divergenzwinkel in der Einschallebene asymmetrisch und nur schwer zu berechnen. Man benutzt deshalb in der Praxis nur die Öffnungswinkel in der Einschallebene und senkrecht zur Einschallebene, die man auch den Datenblättern entnehmen kann. Die strenge Endkontrolle der Prüfköpfe durch die zertifizierten Prüfkopfhersteller bedeutet nicht nur, dass die Prüfköpfe einer Serie von einem bestimmten Reflektor die gleichen Echosignale liefern, sondern sie mündet auch ein in die Datenblätter, eine Aufzeichnung der Prüfkopfdaten und Richtcharakteristik-Diagramme jedes einzelnen Prüfkopfes.

2.2.4 Sonderprüfköpfe

2.2.4.1 Tauchtechnikprüfköpfe

Bei bestimmten Prüfaufgaben insbesondere im Zusammenhang mit automatischen Prüfanlagen oder Prüfteilen mit komplizierter Geometrie ist es durchaus sinnvoll, die Prüfköpfe vollständig oder teilweise in die Ankopplungsflüssigkeit einzutauchen. Diese Tauchtechniken werden im Kapitel 11 behandelt. Prüfköpfe in wasserdichter Ausführung haben keinen Stecker, sondern einen direkten fest vergossenen Kabelanschluss. Abb. 2.22 zeigt einige handelsübliche Typen.

Abb. 2.22 Typen handelsüblicher Tauchtechnikprüfköpfe [2.10]



2.2.4.2 Fokusprüfköpfe

Herkömmliche Normal- und Winkelprüfköpfe haben, abgesehen vom Nahfeldende, ein relativ großes Schallbündel im Bezug auf übliche Fehlerabmessungen. Bei der Ermittlung der Größe von großflächigen Reflektoren durch Abtastverfahren erhält man in diesem Fall größere Fehlerausdehnungen als sie in Wirklichkeit sind. Um das zu vermeiden, muss man den Schallbündeldurchmesser verkleinern, d.h. das Schallfeld fokussieren. Das kann für Prüfköpfe in Kontakttechnik (Normal- und Winkelprüfköpfe) durch geeignete Vorsatzlinsen erreicht werden (Abb. 2.23).

Es bildet sich über einen größeren Schallwegbereich (Tiefenbereich des Werkstücks) ein relativ schmales definiertes Schallbündel aus (ein sogenannter Fokusschlauch), das den Arbeitsbereich des Fokusprüfkopfes darstellt. Der Nenndurchmesser wird beim Punkt größter Schallfeldintensität (dem akustischen Fokuspunkt) angegeben (Abb. 2.24). An diesem Punkt hat der Bündeldurchmesser auch nahezu den kleinsten Wert.

Der Fokusabstand liegt für Normalprüfköpfe zwischen 50 und 200 mm und für Winkelprüfköpfe zwischen 80 und 300 mm. Die Fokusbündeldurchmesser dieser Prüfköpfe liegen zwischen 5 und 10 mm. Derartige Prüfköpfe ermöglichen es, nebeneinander liegende kleine Fehler auch noch in großen Abständen von der Werkstückoberfläche getrennt zu lokalisieren und die Ausdehnung einzelner Fehler durch Fehlerrandabtastung zu vermessen. Sie sind also besonders geeignet für die Prüfung dickwandiger Prüfstücke (bis 500 mm), wenn die Fehlergröße exakt vermessen und ein größerer Fehler von einer Wolke kleinerer Fehler (z.B. einer Schlackenzeile) unterschieden werden soll. Besonders

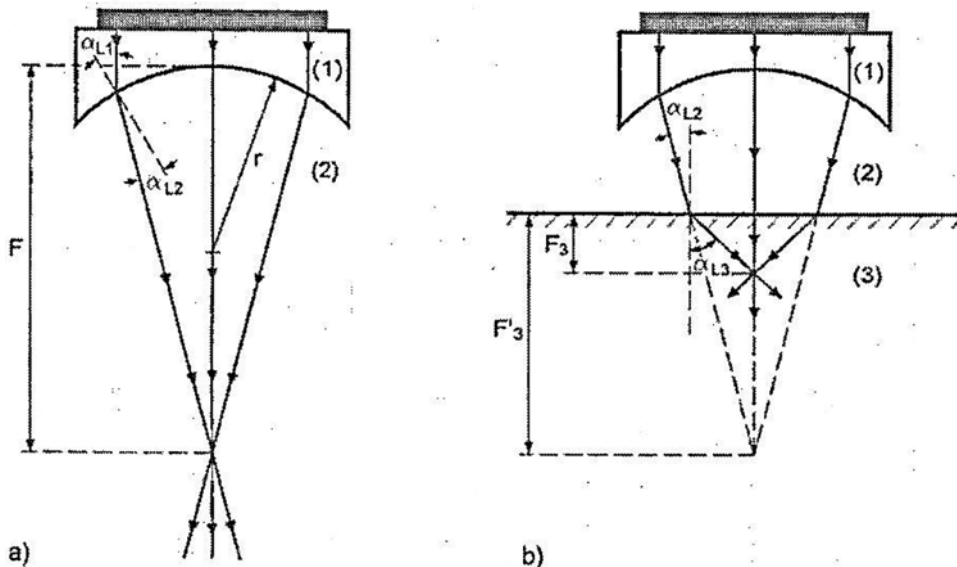


Abb. 2.23 Fokussierung durch Schallbrechung [2.8]. a) Wirkungsweise von Linsen (1); b) Wirkung eines schallbrechenden Werkstoffs (3)

Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung

Schiebold, K.

2015, XXII, 458 S. 441 Abb., 8 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-662-44699-7