

Basiswissen Ultraschallprüfköpfe



KARL DEUTSCH

Ultraschallerzeugung

In der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) mit Ultraschall wird fast ausschließlich der "piezoelektrische Effekt" zur Erzeugung des Ultraschalls eingesetzt.

Dieser Effekt tritt bei Piezo-Materialien auf. Diese reagieren auf einen äußeren mechanischen Druck (bzw. Zug) mit einer elektrischen Spannung, die an der Oberfläche gemessen werden kann (*direkter piezoelektrischer Effekt*).

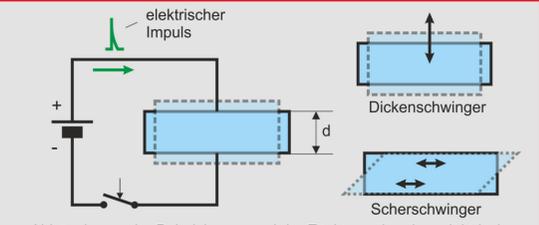
Dieser Effekt ist auch umkehrbar: Wird von außen eine elektrische Spannung angelegt, dann reagiert das Piezo-Material mit einer Verformung (*umgekehrter piezoelektrischer Effekt*).

	Ursache	Wirkung
direkter piezoelektrischer Effekt	Druckbeanspruchung des Piezo-Materials	positive elektrische Spannung
	Zugbeanspruchung des Piezo-Materials	negative elektrische Spannung
umgekehrter piezoelektrischer Effekt	positive elektrische Spannung	Ausdehnung des Piezo-Materials
	negative elektrische Spannung	Zusammenziehung des Piezo-Materials

Wird von außen ein kurzer elektrischer Impuls auf das piezoelektrische Material gegeben, dann schwingt dieses mit seiner Resonanzfrequenz f.

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.



Abhängig von der Polarisierung und der Züchtung der piezoelektrischen Scheiben eignen sich diese Scheiben zur Anregung von Longitudinalwellen (Dickenschwinger) oder Transversalwellen (Scherschwinger). Gebräuchlich sind fast ausschließlich die Dickenschwinger.

Schwingermaterial

Es gibt unterschiedliche Materialien, die einen piezoelektrischen Effekt zeigen:

- Keramische piezoelektrische Materialien; die bekanntesten sind Bleizirkonattitanat (PZT), Bleititanat (PT) und Bleimetaniobat (PbNb₂O₆)
- Polyvinylidenfluorid (PVDF); eine Kunststoffolie
- Piezo-Composite; eine Verbindung aus einer Piezokeramik und Gießharz

Die Wahl für das jeweilige piezoelektrische Material hängt von dem jeweiligen Anwendungsfall ab.

Bleizirkonattitanat (PZT) 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 (PT) 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 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.

Polyvinylidenfluorid (PVDF) hat einen sehr kleinen Schallwellenwiderstand (vergleichbar mit Wasser); sendet jedoch relativ wenig Schallenergie aus.

Damit ist PVDF bestens für eine Prüfung in Tauchtechnik (Wasser) geeignet; für eine Prüfung in Kontakttechnik ist dieses Material nicht empfindlich genug.

Weitere Vorteile für Prüfköpfe mit PVDF-Schwingern ist die gute Formbarkeit (Folie) sowie die hohe Bandbreite zur Erzeugung von Stoßwellen.

Bei **Composite**-Wandlern werden die Räume zwischen den piezoelektrischen Keramikstäbchen mit Epoxidharz gefüllt. Dieser Aufbau bewirkt einen geringen Schallwellenwiderstand. Prüfköpfe mit Piezo-Compositen eignen sich daher als Tauchtechnik-Prüfköpfe und zur Prüfung von Kunststoffen. Daraus ergibt sich auch die hohe Empfindlichkeit für SE- und Winkelprüfköpfe, da hierbei meistens an einen Plexiglas-Vorlauf angekoppelt wird. Darüber hinaus lassen sie sich gut bedämpfen, so dass auch Stoßwellenprüfköpfe realisierbar sind.



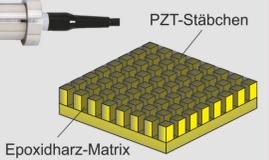
Beispiele für Prüfköpfe mit keramischen Schwinger-Materialien



Tauchtechnik Prüfkopf mit PVDF Folien-Schwinger



Tauchtechnik- und SE-Prüfkopf mit Piezo-Composite Schwinger



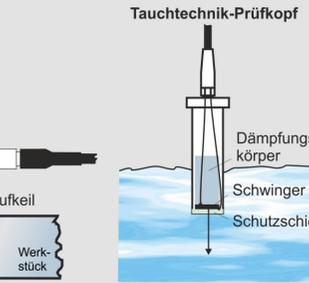
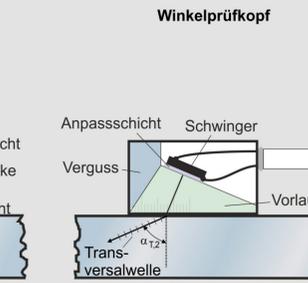
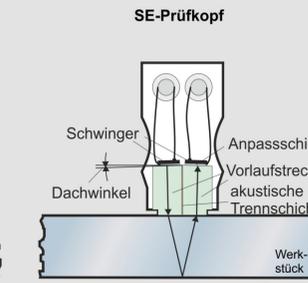
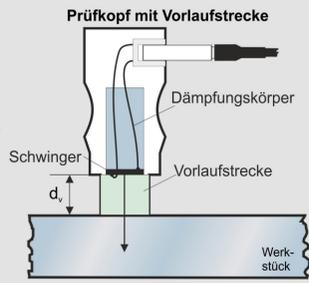
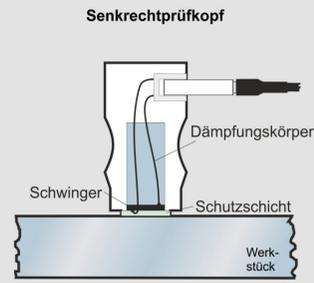
PZT-Stäbchen
Epoxidharz-Matrix

Prüfkopftypen

Für die unterschiedlichen Prüfaufgaben dienen verschiedene Prüfkopftypen. Wie bereits erwähnt, werden diese Prüfköpfe auch mit unterschiedlichen Schwingermaterialien versehen, so dass sie optimal an ihre Prüfaufgabe angepasst sind.

In dem Prüfkopfgewehr ist dann neben dem Schwinger auch der Dämpfungskörper und eine Schutzschicht, die auch zur akustischen Anpassung oder auch als Vorlaufstrecke dient.

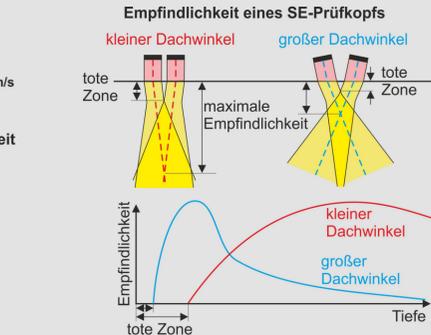
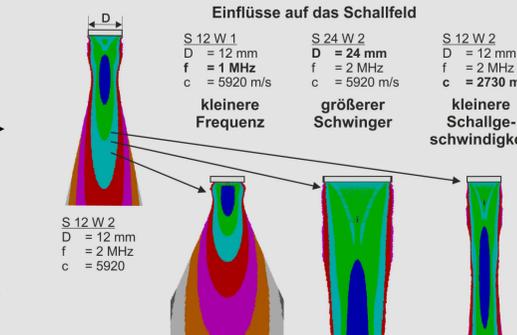
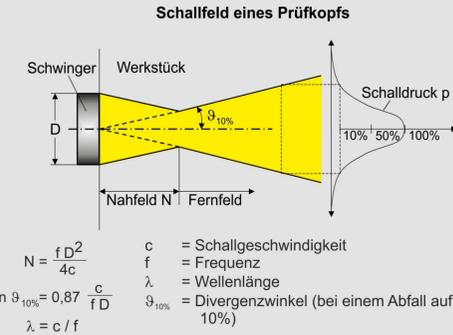
Die Prüffrequenz wird hierbei durch den Schwinger (Dicke) und in geringem Maße durch die Dämpfung bestimmt.



Schallfeldgeometrie eines Prüfkopfs

Das Schallfeld eines Prüfkopfs unterteilt sich in ein Nahfeld (direkt vor dem Prüfkopf) und ein Fernfeld. Die Nahfeldlänge und der Öffnungswinkel werden durch die Wellenlänge λ und den Schwingerdurchmesser D bestimmt.

Die Prüfung erfolgt im Allgemeinen im Fernfeld eines Prüfkopfs, das sich scheinwerferartig öffnet.



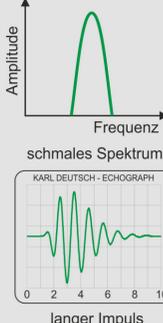
Material	c _l (m/s)	c _t (m/s)	ρ (g/cm ³)
Aluminium	6200-6400	3130	2,7
Blei	2160-2400	700	11,3-11,4
Eisen	5850-5900	3230	7,7-7,86
Epoxidharz	2400-2900	1100	1,1-1,25
Gusseisen	3500-5800	2200-3200	6,9-7,3
Kupfer	4600-4750	2260-2300	8,9
Messing (Ms 58)	3830-4250	2050-2200	8,1-8,5
Nickel	5600-5894	2960-3219	8,8
Öl (20 °C)	1200-1750		0,8-0,89
Plexiglas	2730	1430	1,18
Polyäthylen (PE)	1950-2000	540	0,9
Polypropylen (PP)	2404	1035	0,9
Polystyrol (PS)	2337-2350	1020-1150	1,05-1,06
Quarzglas	5570	3520	2,6
Silber	3600-3790	1590-1760	10,5
Stahl (Kalibrierkörper)	5920	3255	7,7-7,86
Teflon	1350	550	2,2
Titan	5823-6260	2920-3215	4,5
Wasser (20 °C)	1483		1,0
Zinn	4120-4170	2350-2410	7,1
Zinn	3210-3320	1530-1670	7,3

Spektrum und Impulsform

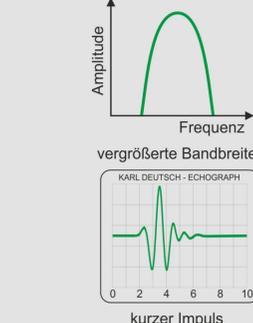
eines Ultraschallimpulses sind eng miteinander verknüpft:

- **Kurze Impulse** haben ein **breitbandiges Frequenzspektrum**, d.h. sie senden eine Vielzahl verschiedener Frequenzen gleichzeitig aus, die sich so überlagern, dass ein nadelförmiger Impuls entsteht.
- **Breite (länger dauernde) Impulse** mit mehreren Schwingungszügen haben eine ausgeprägte Eigenfrequenz und ein **schmalbandiges Spektrum**.

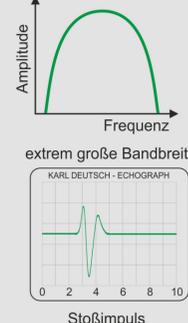
Die Impulsform und somit auch die Frequenzbandbreite eines Prüfkopfs wird durch die Wahl des Schwingermaterials und dessen Dämpfung bestimmt.



Schmales Spektrum und lange Impulse
Für diese Prüfköpfe können die frequenzabhängigen Daten des Schallfeldes (Wellenlänge, Nahfeld, Divergenzwinkel) am genauesten angegeben werden.
Daher eignen sich auch diese Prüfköpfe besonders zur Bewertung der Fehlergröße nach dem AVG-Verfahren.
Unabhängig vom Werkstoff kann die Prüffrequenz dieser Prüfköpfe als konstant angesehen werden.
Aufgrund der langen Impulse sind sie 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 noch möglich.



Extrem große Bandbreite und Stoßimpuls
Prüfköpfe mit diesen Eigenschaften bieten eine optimale Auflösung und eignen sich daher insbesondere zur präzisen Wanddickenmessung.
Bei der Prüfung schallstreuender Bauteile (Grauguss, austenitische Schweißnähte,...) zeigen sie darüber hinaus einen hohen Signal-Rausch-Abstand, d.h. Fehleranzeigen sind deutlich vom Streuuntergrund unterscheidbar.

Prüfkopfauswahl

Prüfaufgabe

Fehlstellensuche: Zur Suche von Fehlstellen eignen sich grundsätzlich alle Prüfköpfe.
Fehlerbewertung nach AVG: Zur Fehlerbewertung nach der AVG-Methode wäre ein Prüfkopf mit schmalen Spektrum ideal, es könnte jedoch noch auf einen mit vergrößerter Bandbreite zurückgegriffen werden.
Schweißnahtprüfung: Aufgrund der Schweißnahtüberhöhung ist es nicht möglich einen Senkrechtprüfkopf direkt auf die Schweißnaht auf zu setzen. Daher wird meistens ein Winkelprüfkopf genutzt. Je nach Schweißnaht-Vorbereitung und erwarteter Fehlerorientierung kommen unterschiedliche Einschallwinkel zum Einsatz. Gebräuchliche Winkel sind: 35°, 45°, 60°, 70° und 80°.
Wanddickenmessung: Zur Wanddickenmessung oder aber auch zur exakten Lagebestimmung der Fehlstelle eignen sich Stoßwellenprüfköpfe und ggf. auch Prüfköpfe mit vergrößerter Bandbreite. Für geringe Wanddicken empfehlen sich Prüfköpfe mit Vorlaufstrecke (Delay-Line) oder SE-Prüfköpfe.

Ankoppeltechnik

Tauchtechnik: Wird fast ausschließlich für die automatisierte Ultraschallprüfung verwendet. Bei Tauchtechnik-Senkrechtprüfköpfen kann der Einschallwinkel durch Schrägstellen festgelegt werden. Bei Anlagen-SE-Prüfköpfen wird über ein Koppelpalt eingeschallt.
Kontakttechnik: Wird fast ausschließlich für die Handprüfung verwendet.

Werkstoff

Schallgeschwindigkeit: Der auf den Winkelprüfköpfen angegebene Einschallwinkel gilt nur für Stahl und muss für ein anderes Material mit anderer Schallgeschwindigkeit umgerechnet werden.
Schallabsorption: Tritt bei allen Materialien auf, besonders bei Kunststoffen. Da die Absorption mit der Frequenz größer wird, sollte - abhängig auch von dem Schallweg - ein niederfrequenter Prüfkopf gewählt werden.
Schallstreuung: Tritt bei Metallen auf, besonders bei Gusswerkstoffen und austenitischen Schweißnähten. Hierbei sollte ebenfalls ein niederfrequenter Prüfkopf gewählt werden. Das Signal-Rausch-Verhältnis kann mit folgenden Maßnahmen verbessert werden:
➤ Stoßwellenprüfkopf
➤ Fokussierender bzw. SE-Prüfkopf
➤ Winkelprüfkopf mit Longitudinalwellen

Bauteilabmessungen

Schallweg: 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. So können im gesamten Bauteil auch noch relativ kleine Fehlstellen nachgewiesen werden.

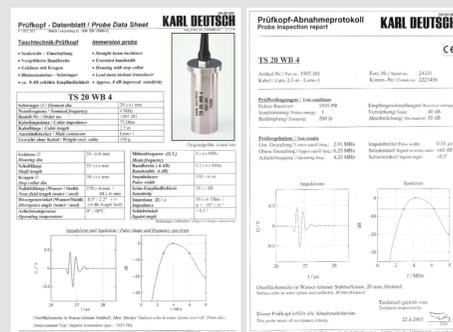
Fehlergröße

Risss: Risse gehen meistens von der Oberfläche aus und werden daher auch mit Oberflächenprüfverfahren (Magnetpulverprüfung, Eindringprüfung) nachgewiesen. Ausnahme sind Risse an unzugänglichen Bauteiloberflächen und in Schweißnähten. 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 Winkelseffekt).
Einschluss: Kugel- bzw. blasenförmige Einschlüsse ohne ausgeprägte Orientierung können mit Senkrechtprüfköpfen nachgewiesen werden.
Flächige Fehler: Flächige verdeckte Fehlstellen, die keine 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.

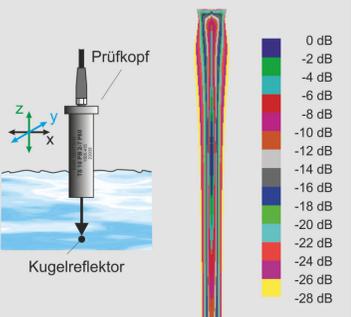
Fehlerart, -lage und -orientierung

Risss: Risse gehen meistens von der Oberfläche aus und werden daher auch mit Oberflächenprüfverfahren (Magnetpulverprüfung, Eindringprüfung) nachgewiesen. Ausnahme sind Risse an unzugänglichen Bauteiloberflächen und in Schweißnähten. 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 Winkelseffekt).
Einschluss: Kugel- bzw. blasenförmige Einschlüsse ohne ausgeprägte Orientierung können mit Senkrechtprüfköpfen nachgewiesen werden.
Flächige Fehler: Flächige verdeckte Fehlstellen, die keine 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.

Prüfkopf-Dokumentation



Datenblatt (links) gemäß EN 12668-2 und darüber hinaus das Abnahmeprotokoll (rechts) mit der gemessenen Impulsform und Bandbreite für jeden Prüfkopf.



Auf Wunsch werden auch für jeden Prüfkopf die individuellen Schallfeldparameter bestimmt.

Sonderprüfköpfe für besondere Anwendungen

Kolbenprüfung

Bindungsprüfung des Kolbenrings.
S = Sender / E = Empfänger



Pipeline-Prüfköpfe

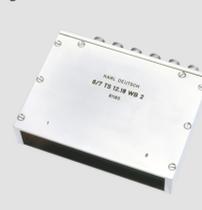
Zur Pipeline-Rohrprüfung werden sog. Molche eingesetzt. Dies sind mit Mess- und Sensorelektronik ausgestattete Geräte, die mit dem Transportgut (Öl) durch das Rohr (Pipeline) getrieben werden.

Entsprechend den unterschiedlichen Aufgaben kommen verschiedene Prüfkopftypen zum Einsatz. Allgemein werden jedoch recht hohe Ansprüche hinsichtlich der Temperaturstabilität und der Druckbeständigkeit gestellt.



Multischwinger-Prüfköpfe

Diese Prüfköpfe werden zur schnellen Rohrprüfung mit gleichmäßiger Überdeckung genutzt.



Multi-Schwinger SE-Prüfköpfe

Mit einem Sender- und drei Empfängerschwingern kann mit diesen Prüfköpfen eine Prüfspurbreite von 50 mm bis 100 mm erzielt werden und sind somit für eine schnelle, automatisierte 100%-ige Blech- oder Rohrprüfung bestens geeignet.



Sonder- oder Standardprüfköpfe, für jede Anwendung etwas Passendes

