

Kapitel 1

Einführung

Die Ansprüche an leistungsfähige, leichte und zugleich zuverlässige Konstruktionen steigen kontinuierlich. Aus diesem Grund werden – speziell in Hochtechnologieanwendungen wie der Luftfahrt – immer häufiger Bauteile aus konventionellen Werkstoffen durch neue Materialien ersetzt. Stahl oder Aluminium weichen Verbundwerkstoffen wie GFK (glasfaserverstärkte Kunststoffe), CFK (kohlefaserverstärkte Kunststoffe), Wabenkernverbünden oder Schäumen. Mittelfristig gibt es Bestrebungen, den kompletten Rumpf eines Verkehrsflugzeugs aus Verbundwerkstoffen herzustellen. Moderne Verbundwerkstoffe haben das Potential, das Gewicht eines Flugzeuges um bis zu 30 Prozent zu verringern [HS00].

Wo immer in sicherheitsrelevanten Anwendungen neue Materialien eingesetzt werden, bedarf es zuverlässiger Prüfverfahren, die eventuelle Schädigungen erkennen. Bei Faserverbundwerkstoffen können Materialschäden zum einen während des Betriebes, aber speziell auch während der Fertigung auftreten.

In diesem Beitrag wird die Werkstoffprüfung von Bauteilen aus CFK mittels Ultraschall und deren automatisierte Auswertung beschrieben. Die Ultraschalltechnik ist ein in der zerstörungsfreien Materialprüfung häufig angewandtes Verfahren. Durch das Aussenden eines Ultraschallsignals in das Material und die Analyse des empfangenen Echosignals wird dabei ein Abbild der inneren Struktur des Materials gewonnen. Dieses Verfahren hat sich schon seit langer Zeit bei der Prüfung von konventionellen Werkstoffen, wie Stahl und Aluminium, bewährt. Seit einigen Jahren wird es auch erfolgreich für die Prüfung von Faserverbundwerkstoffen eingesetzt. Die Prüfung von konventionellen Materialien und Verbundwerkstoffen weist jedoch einen entscheidenden Unterschied auf, der in der Inhomogenität des Materials liegt. Daher werden aus dem untersuchten Gegenstand auch im fehlerfreien Fall aus allen Tiefen des Bauteils geringe Streuechosignale empfangen.

Die klassische Analyse von Ultraschall-Echosignalen besteht in der bildgebenden Auswertung. Einem menschlichen Betrachter werden zweidimensionale Darstellungen des aufgenommenen Signals angezeigt, anhand derer eine Entscheidung über den Zustand des Materials getroffen wird. Das aufgenommene Signal ist jedoch dreidimensional, sodass die zweidimensionale Projektion eine Datenreduktion beinhaltet. Die Beurteilung durch den Menschen ist nicht nur abhängig von dessen Erfahrung, sondern auch von momentaner Konzentration und „Tagesform“ und variiert zudem von Prüfer zu Prüfer. Mit zunehmendem Einsatz der Ultraschall-Materialprüfung speziell bei großen Bauteilen treten auszuwertende Datenmengen auf, für

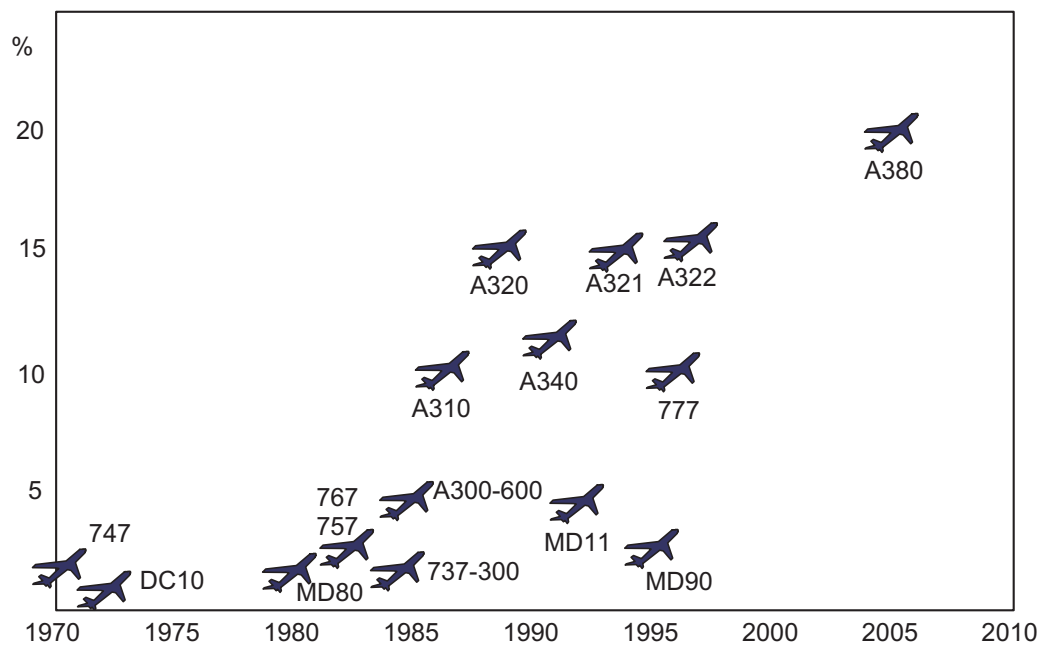


Abbildung 1.1: Anteil an Verbundwerkstoffen am Strukturgewicht für verschiedene Generationen von Verkehrsflugzeugen [HS01], [EMRB03]

die der Zeitaufwand der Auswertung die Dauer der Messung erheblich übersteigt. Aus diesen Gründen wird hier ein System entworfen, das eine automatische Bewertung des dreidimensional aufgenommenen Signals mit Hilfe eines lernenden Klassifikationssystems vornimmt und so eine automatisierte Entscheidungshilfe bei der Bewertung der Messdaten bietet.

Das System entdeckt und identifiziert Fehlstellen im Material automatisch. Ausgewertet werden die Ultraschall-Daten aus Impuls-Echo-Prüfungen. Das Verfahren läuft in zwei Schritten ab: Zunächst werden im Echosignal alle potentiell relevanten Signalspitzen detektiert. Dabei können räumlich zusammengehörende Signale zusammengefasst und im Folgenden als ein zu klassifizierendes Ereignis betrachtet werden.

In einem zweiten Schritt werden die zu bewertenden Ereignisse mit einem automatischen Klassifikationssystem analysiert. Hierfür werden für jedes zu klassifizierende Ereignis eine Reihe von beschreibenden Merkmalen bestimmt. In der Regel ist ein Ereignis nicht durch ein einzelnes Merkmal vollständig charakterisiert. Erst die geeignete und sinnvolle Kombination mehrerer Merkmale ermöglicht eine Differenzierung der verschiedenen Ereignisklassen. Diese Merkmale werden nicht nur aus dem jeweils betrachteten Echosignal selbst, sondern auch aus dessen räumlicher Umgebung und weiteren Kenngrößen, zum Beispiel der Lage und Amplitude des jeweiligen Rückwandechos, ermittelt. Für jedes Ereignis wird anhand seiner Merkmale eine Klasse (Materialfehler, Streuecho. . .) bestimmt. Für diese Klassenzuordnung wird ein zuvor trainierter Klassifikator verwendet. Das Training des Klassifikators ist ein einmaliger Vorgang, der genauso wie die Auswahl geeigneter Merkmale zur Anpassung an das Prüfsystem gehört. Dabei werden dem Klassifikationssystem Echosignale von Testkörpern mit bekannten Reflektoren präsentiert, anhand derer der Klassifikator lernt und justiert wird.

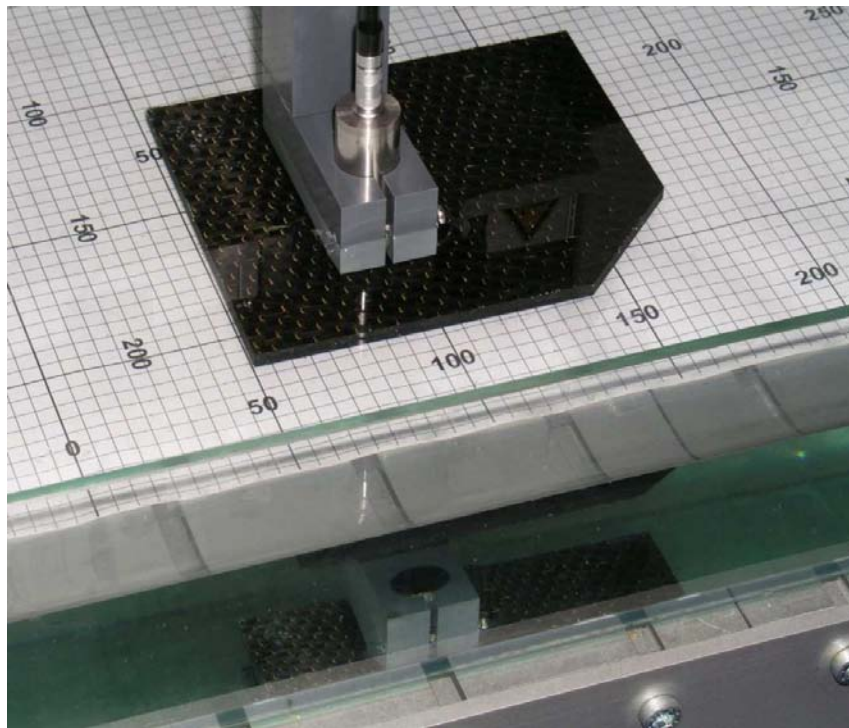


Abbildung 1.2: Ultraschall-Messung eines CFK-Bauteils im Wasserbad

Das Bewertungssystem trifft somit eine Entscheidung und ordnet den detektierten Signalspitzen und den Signalen aus der räumlichen Umgebung eine Klasse aus einem zuvor definierten Satz möglicher Objekte zu. Das Ergebnis der Klassifikation wird in einer dreidimensionalen Bauteilkarte dargestellt. Bereiche, die einen Materialfehler enthalten oder als verdächtig gelten, werden darin markiert.

Dieser Beitrag stellt das Auswertungssystem und seine Realisierung vor und berichtet über experimentelle Ergebnisse. Dazu werden in Kapitel 2 zunächst die Grundlagen der verwendeten Prüftechnik erläutert. Hiervon ausgehend wird in Kapitel 3 ein System zur automatischen Bewertung von Ultraschall-Messdaten entwickelt. Basierend auf einem allgemeinen Modell zur Klassifikation wird ein an die speziellen Erfordernisse der Ultraschall-Materialprüfung von Faserverbundwerkstoffen angepasstes Verfahren entwickelt. Das Kapitel 4 legt Verfahren zur Detektion von relevanten Echosignalen dar, die dann im Rahmen der Klassifikation näher betrachtet werden. Wichtig für die Auswertung ist die Auswahl geeigneter Merkmale. In Kapitel 5 werden hierzu verschiedene Ansätze erläutert und untersucht. In Kapitel 6 werden die Methoden zur automatischen Klassifikation von Daten beschrieben und nach einem Vergleich ein zur Lösung der Aufgabe geeignetes Verfahren ausgewählt. Abschließend werden in Kapitel 7 die Ergebnisse des Bewertungssystems für verschiedene Prüfaufgaben vorgestellt und diskutiert.

Kapitel 2

Materialprüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Ultraschall

Die Ultraschalltechnik ist ein ideales Verfahren zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung einer Vielzahl von Materialien. Neben der klassischen Prüfung von metallischen Werkstoffen werden zunehmend auch neuartige Materialien wie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe mittels Ultraschall auf Fehlerfreiheit untersucht.

Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit Ultraschall verwendet Schallwellen jenseits des hörbaren Bereichs zur Untersuchung von Strukturen. Die Ultraschallwellen werden in die zu untersuchenden Bauteile emittiert und anhand ihrer Ausbreitung wird eine Beurteilung der inneren Qualität des Materials möglich.

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in die Ultraschalltechnik. Zunächst wird der Signalweg des Prüfsystems anhand eines systemtheoretischen Modells erläutert. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der Ausbreitung des Ultraschallsignals, während derer das Signal entsprechend den Materialeigenschaften verändert wird, sodass hierbei die eigentliche Information über das Bauteil aufgenommen wird. Davon ausgehend werden die Verfahren zur Erzeugung dreidimensionaler Messdaten sowie die üblichen Methoden zur Darstellung und Bewertung vorgestellt. Abschließend wird die Materialprüfung von Faserverbundwerkstoffen mit Ultraschall erläutert.

2.1 Systemmodell der Ultraschall-Messtechnik

Die Materialprüfung mittels Ultraschall lässt sich als ein System im Sinne der Systemtheorie beschreiben. In [Sch98] ist hierzu ein vollständiger, theoretischer Ansatz erläutert. Für die Erfordernisse der Klassifikation von Ultraschall-Messdaten ist es hinreichend, das in Abbildung 2.1 dargestellte Modell zu verwenden.

Ausgangspunkt ist die Erzeugung des Ultraschallsignals, dargestellt durch eine Komponente, die den elektrischen Teil des Senders beschreibt. Anschließend wird im Sender-Prüfkopf das elektrische Signal in ein Ultraschallsignal umgewandelt. Darauf folgt die Übertragung des Ultraschalls

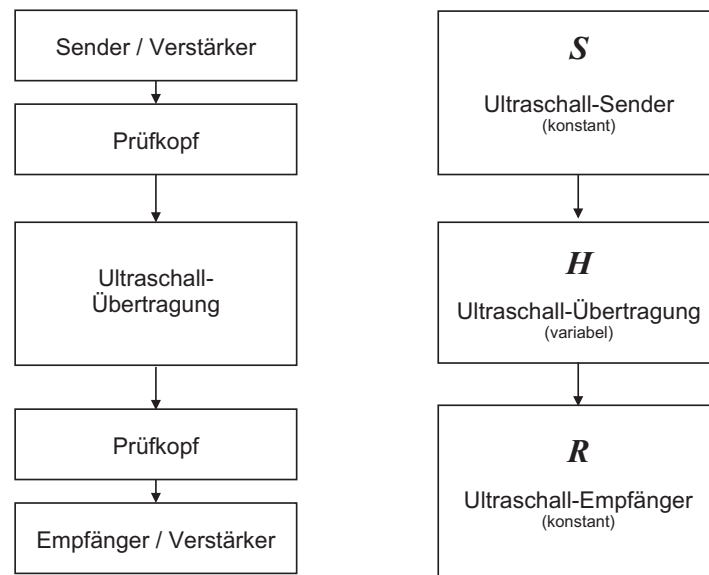


Abbildung 2.1: Systemmodell der Ultraschall-Messtechnik

durch Koppelmedium und zu untersuchendes Material. Abschließend wird das Ultraschallsignal mit einem Empfänger-Prüfkopf aufgenommen und in ein elektrisches Signal gewandelt. Dieses wird verstärkt und dient nach seiner Digitalisierung als Ausgangspunkt für die Verarbeitung.

Im Folgenden wird das zugrunde liegende Modell näher erläutert, zunächst für den elektrischen Anteil des Systems, danach für die Ultraschall-Übertragung selbst. Im elektrischen Teil des Systems wird die Information in Form eines elektrischen Signals übertragen. Dieser Bereich stellt bei einem Prüfsystem ein geschlossenes System dar, das unabhängig von der Schallübertragung ist.

2.2 Elektrische Komponenten des Ultraschallsystems

2.2.1 Ultraschall-Sender

Der Ultraschall-Sender erzeugt das für die Anregung des Prüfsystems erforderliche elektrische Signal. Abhängig von der Hardware und der Prüfaufgabe wird entweder eine kurze Anregung durch Entladung eines Kondensators, ein mono- oder bipolares Burstsinal oder eine andere Signalform erzeugt. Zum Kreis des Senders gehören auch die Eigenschaften der elektrischen Leitungen zum Sender-Prüfkopf sowie ggf. vorhandene Übertrager und Impedanz-Anpass-Schaltungen.

2.2.2 Prüfköpfe

Der Prüfkopf konvertiert ein angelegtes elektrisches Signal in eine Ultraschallwelle und erzeugt bei einem eintreffenden Ultraschallsignal wiederum ein elektrisches Signal. Er dient somit

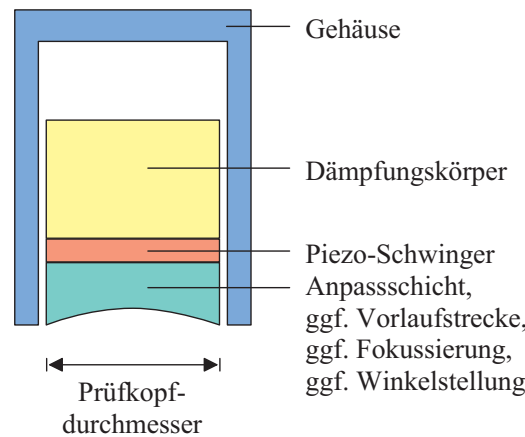


Abbildung 2.2: Typischer Ultraschall-Prüfkopf

der Umwandlung von elektrischer in mechanische (Schall-)Energie und umgekehrt. Daher werden für ein Ultraschallsystem entweder zwei Prüfköpfe benötigt (bistatischer Betrieb) oder ein Prüfkopf als Sender und Empfänger zugleich verwendet (monostatischer Betrieb).

Zur Wandlung des elektrischen Pulses in ein Ultraschallsignal wird ein Piezo¹-Schwinger [Red61], [Kin87] verwendet. Dieser besteht aus einer Kristallstruktur, die auf eine angelegte elektrische Spannung mit einer mechanischen Verformung reagiert und eine mechanische Verformung in eine elektrische Spannung transformiert. Die Übertragungseigenschaften eines Ultraschall-Prüfkopfs werden im Wesentlichen durch dessen elektromechanische Eigenschaften, zum Beispiel die Bedämpfung des Schwingers, bestimmt. In Abbildung 2.2 ist ein typischer Prüfkopf abgebildet. Das Übertragungsspektrum des Prüfkopfs stellt das begrenzende Element für das im Ultraschallsystem verwendete Signal dar.

2.2.3 Ultraschall-Empfänger

Der Empfänger besteht aus einer Kette elektrischer Verstärker und Filter und bereitet das Ultraschallsignal auf. Abschließend wird es von einem A/D-Wandler digitalisiert. Damit steht das Signal für eine digitale Verarbeitung zur Verfügung.

2.3 Ausbreitung der Ultraschall-Wellen

2.3.1 Wellen-Differentialgleichung

Die Ausbreitung von Schalldrücken p_a im Material genügt der Differentialgleichung [Sch98]

$$\text{vektorwertig :} \quad \nabla^2 p_a - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} = 0 \quad (2.1)$$

¹piezo: griechisch *piézein* – drücken

$$\text{eindimensional : } \quad \frac{\partial^2 p_a}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p_a}{\partial t^2} = 0 \quad . \quad (2.2)$$

Der vorhandene Schalldruck p_a bewirkt eine lokale Teilchenauslenkung u_a im Material. Man beachte, dass im Allgemeinen die Auslenkung u_a einen Tensor darstellt. Es existieren zwei verschiedene eindimensionale Anwendungsfälle. Für den Fall, dass u_a die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung darstellt, liegt eine Transversalwelle vor, die in Festkörpern und viskosen Flüssigkeiten ausbreitungsfähig ist. Wenn u_a die Auslenkung in Ausbreitungsrichtung der Welle beschreibt, liegt eine Longitudinalwelle vor.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle ist unmittelbar aus den Materialeigenschaften zu bestimmen. Sie ist gegeben durch

$$c = \sqrt{\frac{k_{\text{elast}}}{\rho}} \quad , \quad (2.3)$$

wobei die Dichte ρ durch das Material gegeben ist. Die Elastizitätskonstante k_{elast} ist materialabhängig und unterscheidet sich für Longitudinal- und Transversalwellen, sodass sich diese Wellen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten c_ℓ und c_t im Material ausbreiten.

2.3.2 Signal-Laufzeit und Wellenlänge

Die Laufzeit des Schallsignals wird durch die in Gleichung 2.3 angegebene Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Wellen bestimmt. Um den Weg r_i zurückzulegen, benötigt das Ultraschallsignal die Laufzeit

$$\tau_i = \frac{r_i}{c} \quad . \quad (2.4)$$

Für einen Reflektor im Abstand r beträgt die Signallaufzeit vom Ultraschall-Prüfkopf zum Reflektor und zurück zum Prüfkopf

$$\tau = \frac{2r}{c} \quad . \quad (2.5)$$

Durchläuft das Signal nacheinander verschiedene Materialien, addieren sich die jeweiligen Laufzeiten.

Dispersion

Unter Dispersion wird eine Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz des Signals verstanden. Für die Ultraschallausbreitung in CFK ist dieser Effekt in dem hier für die Materialprüfung verwendeten Frequenzband vernachlässigbar.

Wellenlänge

Die Wellenlänge des Ultraschalls wird bestimmt durch seine Frequenz f und die Ausbreitungsgeschwindigkeit c zu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad . \quad (2.6)$$

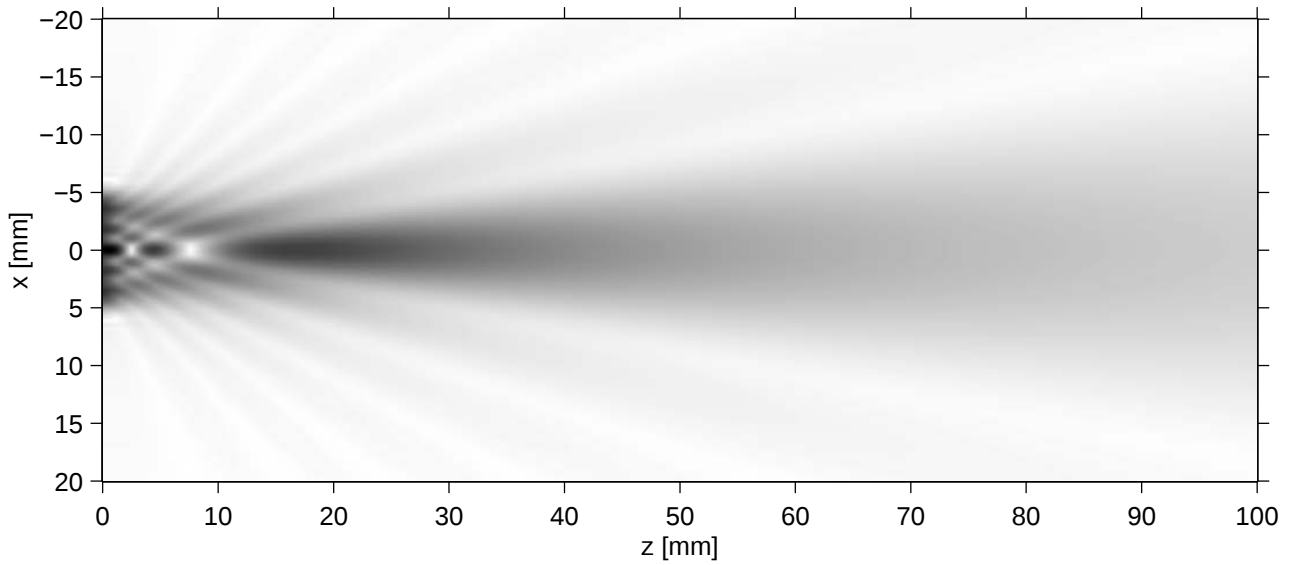


Abbildung 2.3: Schallfeld in CFK eines Prüfkopfs für $f = 2$ MHz, Prüfkopfdurchmesser 10 mm

2.3.3 Schallfeld

Der Ultraschall-Prüfkopf als Sender erzeugt ein dreidimensionales Schallfeld, das die örtliche Verteilung des Schalldrucks angibt. Das Schallfeld eines Prüfkopfs wird bestimmt durch dessen geometrische Abmessungen sowie die Frequenz des betrachteten Signals [KK86].

In Abbildung 2.3 ist eine zweidimensionale Darstellung des rotationssymmetrischen Schallfelds eines Prüfkopfs mit 10 mm Durchmesser bei einer Frequenz von 2 MHz in kohlefaserverstärktem Kunststoff (CFK) ($c_\ell = 2955 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) angegeben. Der Schalldruck auf der Achse des Prüfkopfs ist für dasselbe System in Abbildung 2.4 dargestellt.

Man unterscheidet das Nahfeld und das Fernfeld eines Prüfkopfs. Im Nahfeld treten durch Interferenzen verschiedene Minima und Maxima des Schallfelds auf. Als Nahfeldlänge wird der Abstand des letzten Schalldruck-Maximums auf der Achse des Prüfkopfs bezeichnet. Sie ist für kreisrunde Prüfköpfe gegeben durch

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \approx \frac{D^2}{4\lambda} \quad . \quad (2.7)$$

Im Beispiel der Abbildungen 2.3 und 2.4 sind $D = 10$ mm und $\lambda = 1.48$ mm. Damit ergibt sich eine Nahfeldlänge von $N = 16.6$ mm. Die Nahfeldlänge ist in Abbildung 2.4 als das am weitesten von der Schallquelle entfernte Maximum des Schalldrucks dargestellt.

Wegen der Aufweitung des Schallfelds ist es bei der Analyse des Echosignals ein Unterschied, ob ein sehr großer oder ein kleiner Reflektor betrachtet wird. Der kleine Reflektor deckt nur einen tiefenabhängigen Teil des Schallbündels ab.