

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

1.1 Einführung und Motivation

Beton ist der am häufigsten eingesetzte Baustoff der Gegenwart und wird diese Stellung auch in absehbarer Zukunft beibehalten. Zur Reduzierung der mit dem Bauen weltweit verbundenen Umweltbelastungen besteht die Notwendigkeit, Betone mit verbesserter Energie-, Umwelt- oder CO₂-Bilanz einzusetzen. Gleichzeitig haben sich die Anforderungen an zementgebundene Baustoffe hinsichtlich der charakteristischen Verarbeitungs-, Gebrauchs-, Dauerhaftigkeits- und Umwelteigenschaften in den letzten Jahrzehnten beständig verändert. Dies hat zu betontechnologischen Innovationen wie beispielsweise ultraleichten, selbstverdichtenden, ultrahochfesten, ökologischen und ressourcenschonenden Betonen geführt, die auf der Entwicklung und dem Einsatz neuartiger Zusammensetzungen, Bindemittel, Zusatzmittel und -stoffe beruhen.

Für den Bauprozess und die Gebrauchstauglichkeit von Bauwerksteilen und Bauwerken sind das zielsichere Erreichen der geforderten Eigenschaften und deren dauerhaftes Bestehen über die vorgesehene Nutzungsdauer von wesentlicher Bedeutung. Zur Entwicklung neuer Bindemittel und Betonzusammensetzungen in der Werkstoffforschung, zur Qualitätssicherung während des Bauprozesses sowie zur Analyse von Schadensprozessen und -ursachen geschädigter Betone ist die systematische Etablierung von Methoden erforderlich, welche die sichere Bewertung relevanter Eigenschaften ermöglichen und zur Akzeptanz von werkstofflichen Innovationen beitragen. Dies schließt insbesondere auch Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) ein.

In den letzten Jahren hat der Einsatz von derartigen Methoden im Bauwesen an Bedeutung gewonnen. Oft erfolgt dies durch die Adaption von Verfahren, die sich in anderen Fachgebieten bewährt haben. Ein typisches Beispiel dafür ist die 3D-Computertomographie, deren Einsatz von grundlegender Bedeutung für die bildgebende medizinische Diagnostik ist. Deren Anwendung hat über die ZfP von Luftfahrtkomponenten Eingang in die visuelle, hochaufgelöste Untersuchung von Gefügemerkmalen und Schadensmechanismen zementgebundener Baustoffe gefunden. Durch akustische zerstörungsfreie Methoden lässt sich eine zeit- und ortaufgelöste Bewertung struktureller Veränderungen von Baustoffen und Bauwerksteilen auf Grundlage von mechanischen Wellen erreichen. Die gewonnenen Ergebnisse sind direkt mit den elastischen Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe verbunden.

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Gegenstand und Zielsetzung dieser Arbeit ist die Charakterisierung struktureller Unterschiede und Veränderungen in zementgebundenen Baustoffen mit akustischen zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden, wie sie bei der Erstarrung und Erhärtung zementgebundener Werkstoffe sowie bei der Degradation der Materialeigenschaften durch gefügeschädigende Prozesse auftreten. Dazu wurden zwei auf dem Ultraschall-Transmissionsverfahren beruhende Methoden eingesetzt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgebaut, weiterentwickelt und exemplarisch auf relevante werkstoffliche Fragestellungen angewandt wurden. Die Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Das **Kapitel 2** gibt einen einführenden Überblick über wesentliche theoretische, messtechnische und werkstoffliche Grundlagen akustischer zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Untersuchung zementgebundener Baustoffe. Spezielle Fragestellungen zur Wellenausbreitung in frischen zementgebundenen Systemen sowie zur laserinduzierten Anregung werden analytisch betrachtet.

In **Kapitel 3** erfolgen der Aufbau, die Charakterisierung und die exemplarische Anwendung eines kontinuierlich arbeitenden Ultraschall-Transmissionsverfahrens. Auf der Grundlage von Lon-

gitudinal- und Scherwellen werden die dynamischen elastischen Eigenschaften (Elastizitäts-, Schub-, Kompressionsmodul, Querdehnzahl) frischer zementgebundener Systeme während des Erstarrens und Erhärtens unmittelbar und kontinuierlich als primäre physikalische Werkstoffparameter bestimmt und charakteristische, physikalische Effekte bei der Transmission frischer Systeme aufgezeigt. Die gewonnenen Ergebnisse werden zu diskreten Zeitpunkten mit begleitenden Untersuchungsmethoden verglichen. Es werden Methoden zur automatischen Detektion des Ersteinsatzes sowie zur Modellierung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten vorgestellt.

In **Kapitel 4** werden der Aufbau und die Charakterisierung eines laserbasierten Messsystems für ein berührungsloses, scannendes Ultraschall-Transmissionsverfahren beschrieben.

Das **Kapitel 5** umfasst systematische Untersuchungen zur laserbasierten Anregung und Erfassung von Ultraschall. Es werden relevante Einflussfaktoren der ablativen Anregung direkt auf zementgebundenen Baustoffen identifiziert und eine Optimierung der Prozessparameter für zementgebundene Baustoffe, natürliche Gesteinskörnungen und metallische Targetoberflächen als wesentliche Voraussetzung der zielgerichteten Verfahrensanwendung vorgenommen.

In **Kapitel 6** erfolgen Untersuchungen zur praktischen Anwendung von Laser-Ultraschall zur zeit- und orts aufgelösten Beurteilung der Strukturbildung und Homogenität frischer zementgebundener Systeme sowie erhärteter Laborproben und Betonbauteile. Während der Strukturbildung im Verlauf der Hydratation wird die simultane berührungslose Erfassung von Longitudinal- und Scherwellen vorgenommen.

In **Kapitel 7** erfolgen Untersuchungen zur Anwendung von Laser-Ultraschall für die orts aufgelöste und unter Einbeziehung akustischer tomographischer Methoden überlagerungsfreien Erfassung und Charakterisierung struktureller Veränderungen zur Bewertung der Dauerhaftigkeit zementgebundener Baustoffe. Exemplarisch werden der kombinierte Frost-Tausalz-Angriff sowie die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) als betonschädigende Mechanismen untersucht.

In **Kapitel 8** werden die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und offene Fragestellungen aufgezeigt.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Zur zerstörungsfreien Prüfung von Baustoffen und Bauteilen kommen zahlreiche Methoden zum Einsatz, die auf physikalischen Wechselwirkungsprozessen zwischen dem Untersuchungsobjekt und elektromagnetischen oder mechanischen Wellenfeldern basieren. Die in dieser Arbeit adaptierten und für die Charakterisierung zementgebundener Baustoffe angewandten zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden beruhen ausschließlich auf der Anwendung mechanischer Wellen im Ultraschallbereich. In diesem Kapitel werden relevante physikalische, messtechnische und werkstoffliche Aspekte beschrieben, welche von grundlegender Bedeutung für die Entwicklung und Anwendung akustischer zerstörungsfreier Prüfverfahren auf zementgebundene Baustoffe sind.

2.1 Mechanische Wellen in zementgebundenen Baustoffen

2.1.1 Wellenarten und elastische Parameter

Eine Welle beschreibt die räumliche Ausdehnung einer Schwingung oder Störung durch ein Ausbreitungsmedium wie Festkörper, Gase oder Flüssigkeiten. Bei diesem zeitlich und räumlich periodischen Vorgang wird Energie ohne Massentransport übertragen. Ultraschall repräsentiert einen Teilbereich der Akustik auf der Grundlage mechanischer Wellen im Schallspektrum oberhalb der menschlichen Hörgrenze von 16 kHz bis 1 GHz (DIN 1320:1997). Die zerstörungsfreie Prüfung zementgebundener Baustoffe beruht auf Frequenzen im kHz-Bereich (vgl. Abschn. 2.2.1).

Mechanische Wellen lassen sich grundsätzlich in **Raumwellen** und **Oberflächenwellen** unterscheiden. Die Grundform mechanischer Wellen sind **Raumwellen**, die sich ausgehend von einer Punktquelle als Kugelwelle ausbreiten. Diese weisen in Festkörpern drei Schwingungsmoden auf, die sich hinsichtlich der Polarisierung unterscheiden und in der Regel gekoppelt vorliegen (REINHARDT & GROSSE in: REINHARDT & GROSSE et al. 2005). Bei Kompressions- oder **Longitudinalwellen** erfolgt die Schwingung in Ausbreitungsrichtung, es entstehen abwechselnd Druck- und Zugspannungen, die mit Form- und Volumenänderungen einhergehen (Abb. 2-1a).

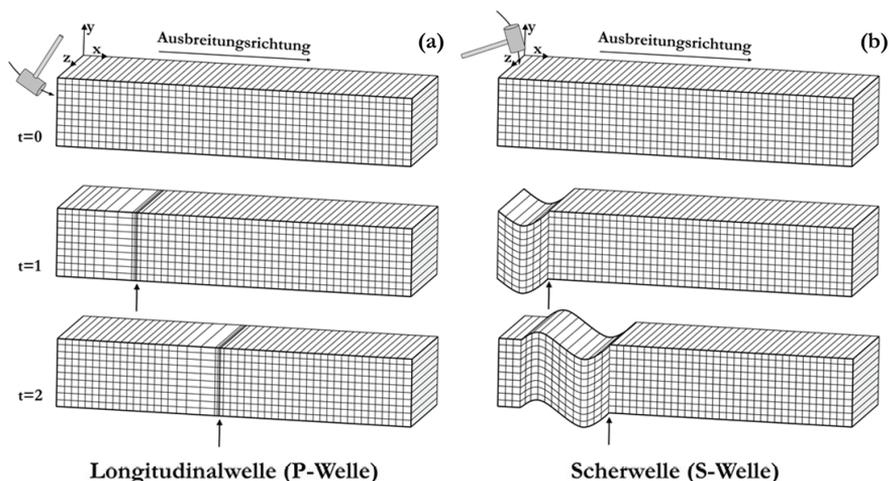


Abb. 2-1: Wellenausbreitung von Longitudinal- (a) und vertikal polarisierten Scherwellen (b) in elastischen Ausbreitungsmedien – Ausschnitt aus einem homogenen, isotropen und allseitig unbegrenzten Festkörper

Dagegen sind Transversal- oder **Scherwellen** senkrecht zur Ausbreitungsrichtung polarisiert (Abb. 2-1b). Volumenveränderungen erfolgen nicht. Voraussetzung für die Ausbreitung von Scherwellen ist die Übertragung von Schubspannungen durch das Medium. In rein viskosen Fluiden wie beispielsweise Luft oder Wasser kann daher keine Ausbreitung von Scherwellen erfolgen. In viskoelastisch-thixotropen Medien (vgl. Abschn. 2.4.2), wie Zementleimsuspensionen und Frischbeton, können diese grundsätzlich übertragen werden, sind allerdings im Vergleich zur Ausbreitung in Festkörpern deutlich stärker bedämpft (vgl. Abschn. 2.1.4).

Unter der Annahme eines quasi-homogenen, isotropen und unendlich ausgedehnten Mediums sind die **Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Scherwellen** eine Funktion der elastischen Parameter sowie der Dichte und nehmen für den jeweiligen Werkstoff charakteristische Werte an:

$$v_p = \sqrt{\frac{K_{\text{dyn}} + \frac{4}{3}G_{\text{dyn}}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}}(1-\nu_{\text{dyn}})}{\rho(1-2\nu_{\text{dyn}})(1+\nu_{\text{dyn}})}} \quad \text{Gl. 2-1}$$

$$v_s = \sqrt{\frac{G_{\text{dyn}}}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}}}{2\rho(1+\nu_{\text{dyn}})}} \quad \text{Gl. 2-2}$$

- v_p - Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle (P-Welle)
- v_s - Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle (S-Welle)
- E_{dyn} - dyn. Elastizitätsmodul
- G_{dyn} - dyn. Schubmodul
- K_{dyn} - dyn. Kompressionsmodul
- ν_{dyn} - dyn. Querdehnzahl (Poissonzahl)
- ρ - Rohdichte

Für Festkörper ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Scherwelle näherungsweise zu $v_s \simeq \frac{v_p}{\sqrt{3}}$ (REINHARDT & GROSSE in: REINHARDT & GROSSE et al. 2005).

Kenntnisse über den inneren Aufbau der Erde beruhen fast ausschließlich auf der Aufzeichnung und Auswertung seismischer Wellen. Longitudinalwellen weisen die größten Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf und treffen stets vor den Scherwellen am Messort ein. Dementsprechend werden in der Geophysik Longitudinalwellen als Primär- (P-Wellen) und Scherwellen als Sekundärwellen (S-Wellen) bezeichnet. Für die zerstörungsfreie Prüfung zementgebundener Baustoffe ist die Bestimmung beider Ausbreitungsgeschwindigkeiten von besonderer Bedeutung, da sich daraus Informationen zu den elastischen Parametern des Ausbreitungsmediums gewinnen lassen. Das Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten wird von der Querdehnzahl ν bestimmt:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{1-2\nu_{\text{dyn}}}{2(1-\nu_{\text{dyn}})}} \quad \text{Gl. 2-3}$$

In Abhängigkeit von den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Longitudinal- und Scherwelle ergeben sich für die dynamischen elastischen Parameter folgende Zusammenhänge:

$$\nu_{\text{dyn}} = \frac{\frac{1}{2}v_p^2 - v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \quad \text{Gl. 2-4}$$

$$E_{\text{dyn}} = v_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\nu_{\text{dyn}})(1-2\nu_{\text{dyn}})}{(1-\nu_{\text{dyn}})} \quad \text{Gl. 2-5}$$

$$G_{\text{dyn}} = v_s^2 \cdot \rho \quad \text{Gl. 2-6}$$

$$K_{\text{dyn}} = \rho \cdot \left(v_p^2 - \frac{4}{3}v_s^2 \right) \quad \text{Gl. 2-7}$$

Die **Querdehnzahl ν** beschreibt das negative Verhältnis von relativer Quer- zu relativer Längsdehnung. Für linear-elastische, nicht-auxetische Materialien gilt $0 \leq \nu \leq 0,50$. In Abb. 2-2 ist die dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Scherwelle v_s zu Longitudinalwelle v_p zugrunde liegende dynamische Querdehnzahl ν_{dyn} dargestellt.

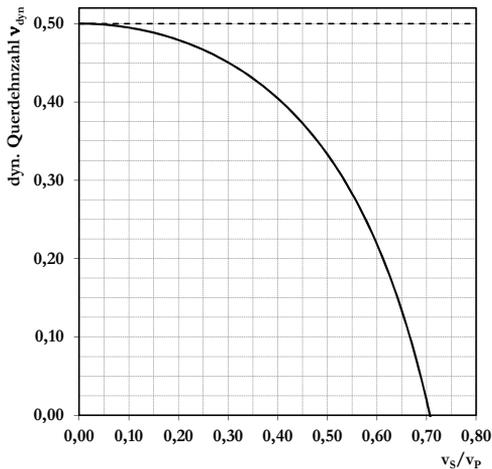


Abb. 2-2: Dyn. Querdehnzahl ν_{dyn} nach Gl. 2-4 aus dem Verhältnis der Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Scher- v_s zu Longitudinalwelle v_p (RENTSCH & KROMPHOLZ, 1961)

Der **Elastizitätsmodul E** (E-Modul) kennzeichnet das Verhältnis zwischen Druck- bzw. Zugspannung und der zugehörigen elastischen Verformung. Der E-Modul beschreibt demnach den Verformungswiderstand und ist ein wichtiger Materialparameter für die Bemessung von Bauwerkteilen und Tragwerken aus Beton. In Abhängigkeit von der Größe der einwirkenden Spannung wird zwischen statischem E-Modul E_{stat} und dynamischem E-Modul E_{dyn} unterschieden. Der statische E-Modul wird nach DIN EN 12390-13 (2014) als Sekantenmodul zwischen unterer und oberer Prüfspannung bei einem Drittel der Bruchlast ermittelt. Dagegen wird der dynamische E-Modul im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung mit infinitesimal kleinen Spannungen und Verformungen durch impulsartige Beanspruchung bestimmt. Dieser gilt daher auch als Tangentenmodul im Ursprung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms. Der statische E-Modul ist stets kleiner als der dynamische, da Beton im Bereich der Gebrauchsspannungen aufgrund der viskosen Eigenschaften des Zementsteins kein rein elastisches Verhalten zeigt. Demnach stellt ausschließlich der dynamische E-Modul eine Materialkonstante dar. Der statische E-Modul lässt sich aus dem dynamischen E-Modul mithilfe empirischer Beziehungen abschätzen. Korrelationsbeziehungen des dynamischen E-Moduls zu weiteren charakteristischen Eigenschaften zementgebundener Baustoffe wie z. B. der Druckfestigkeit sind möglich, beschränken sich allerdings auf definierte Randbedingungen, da die Größen von allen Einflussfaktoren nicht in gleicher Weise und teils gegensätzlich beeinflusst werden. Ein allgemein gültiger Zusammenhang existiert nicht (POHL 1966). Gesteinsart und Größtkorn, Hydrationsgrad, Wasser-Zement-Wert, Leimgehalt, Porengehalt und Wassersättigungsgrad stellen relevante Einflussfaktoren auf den dynamischen E-Modul von Beton dar (MANN 1969).

Der **Schubmodul G** oder auch Torsionsmodul beschreibt das Verhältnis zwischen einwirkenden Schubspannungen und der resultierenden elastischen Verformung und ist über die Querdehnzahl mit dem E-Modul bzw. dem Kompressionsmodul verknüpft.

Der **Kompressionsmodul K** oder auch Volumenelastizitätsmodul kennzeichnet die aus allseits einwirkenden mechanischen Spannungen resultierenden elastischen Volumen- bzw. Dichteveränderungen. Der Kompressionsmodul verhält sich umgekehrt proportional zur Kompressibilität.

Auf Grundlage der linearen Elastizitätstheorie können die elastischen Eigenschaften eines isotropen, elastischen Festkörpers durch zwei unabhängige elastische Materialkonstanten vollständig beschrieben werden. Die elastischen Konstanten Elastizitätsmodul E , Schubmodul G , Kompressionsmodul K , Querdehnzahl ν oder den Lamé-Konstanten λ bzw. μ bedingen sich wechselseitig. Sind mindestens zwei unabhängige elastische Materialkonstanten bekannt, lassen sich die Weiteren durch die in Tab. 2-1 dargestellten Beziehungen bestimmen.

Tab. 2-1: Beziehungen elastischer Konstanten (REINHARDT & GROSSE in: REINHARDT & GROSSE et al. 2005)

	E	G	K	ν	μ	λ
E	–	$E=G(2+2\nu)$	$E=3K(1-2\nu)$	$E=2\mu(1+\nu)$	$E=\frac{3\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}$	$E=\frac{\lambda(1+\nu)(1-2\nu)}{\nu}$
K	$K=\frac{E\mu}{3(3\mu-E)}$	$K=\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	–	$K=\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$K=\frac{\lambda(1+\nu)}{3\nu}$	$K=\lambda+\frac{2}{3}\mu$
G	$G=\frac{3KE}{9K-E}$	–	$G=\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	$G=\frac{E}{2+2\nu}$	–	$G=\frac{\lambda}{2\nu}-\lambda$
ν	$\nu=\frac{1}{2}-\frac{E}{6K}$	$\nu=\frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$	$\nu=\frac{3K-2\mu}{2(3K+\mu)}$	–	$\nu=\frac{E}{2\mu}-1$	$\nu=\frac{\lambda}{3K-\lambda}$
μ	$\mu=\frac{E}{2(1+\nu)}$	–	$\mu=\frac{3KE}{9K-E}$	$\mu=\frac{\lambda}{2\nu}-\lambda$	–	$\mu=\frac{3}{2}(K-\lambda)$
λ	$\lambda=\frac{3K(3K-E)}{9K-E}$	$\lambda=K-\frac{2}{3}G$	$\lambda=\frac{3K\nu}{1+\nu}$	$\lambda=\frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	$\lambda=\frac{2\mu\nu}{1-2\nu}$	–

Bei der zerstörungsfreien Prüfung von Probekörpern und Bauwerksteilen zementgebundener Baustoffe können die Anforderungen hinsichtlich eines **homogenen, isotropen und unendlich ausgedehnten Mediums** nur unter Berücksichtigung der Größenordnung der Wellenlänge zu den vorhandenen strukturellen Inhomogenitäten sowie zur Probengeometrie erfüllt werden. Nach WITTMANN (1983) erstrecken sich typische strukturelle Unterschiede des heterogenen Werkstoffs Beton über drei hierarchische Ebenen - die Mikro- (Zementstein-Struktur), die Meso- (Matrix, Gesteinskörnung, Grenzflächen, Risse, Einschlüsse) und die Makroebene (Bauwerksteile). Beton kann lediglich auf der Makroebene als quasi-homogen betrachtet werden. Dies setzt Mindestabmessungen deutlich oberhalb vorhandener struktureller Unterschiede voraus. Analog dazu sind für die jeweilige Prüfaufgabe geeignete Frequenzspektren auszuwählen (vgl. Abschn. 2.2.1) und notwendige Mindest-Probekörpergeometrien festzulegen. Die Beziehung zwischen Wellenlänge λ und Prüffrequenz f zur Ausbreitungsgeschwindigkeit v einer Welle ergibt sich aus:

$$v=\lambda \cdot f$$

Gl. 2-8

Die Größenordnung der Wellenlänge zu vorhandenen **strukturellen Inhomogenitäten** bestimmt, inwieweit zementgebundene Baustoffe für die sich ausbreitende Welle als homogen wirken und in welchem Umfang weitere physikalische Mechanismen (Streuung, Reflexion, Brechung, Beugung) eintreten (vgl. Abschn.2.1.3). Auch die erzielbare Ortsauflösung ist maßgeblich von der Wellenlänge abhängig (vgl. Abschn. 2.3.2). Liegt die Wellenlänge in der Größenordnung der Inhomogenitäten (z.B. Größtkorn der Gesteinskörnung) oder darüber, kann von einer weitgehend ungestörten Schallausbreitung ausgegangen werden (REINHARDT & GROSSE in: REINHARDT & GROSSE et al. 2005). Im Hinblick auf die **Mindestabmessungen** geben POHL (1966) sowie RENTSCH & KROMPHOLZ (1963) ein Verhältnis von $s/\lambda > 2$ sowie $b/\lambda \geq 1,5$ in Ausbreitungsrichtung bzw. senkrecht dazu an. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen gelten die Anforderungen eines homogenen, isotropen und unendlich ausgedehnten Mediums für sachgerecht gefertigte Probekörper zementgebundener Baustoffe. Werden die Mindestabmessungen unterschritten oder liegen ein- oder mehraxiale Eigenschaftsgradienten vor, sind die ermittel-

ten elastischen Parameter unter Beibehaltung der Messbedingungen als geometrie- bzw. methode-spezifische Relativwerte zu betrachten.

Ist das Ausbreitungsmedium relativ zur Wellenlänge in einer Raumrichtung begrenzt, treten **Oberflächenwellen** (Love-, Rayleighwellen) als Superposition von Longitudinal- und Scherwellenanteilen auf. Durch die mehrseitige Begrenzung realer Probekörpergeometrien können bei entsprechender Anregung hinsichtlich Richtung und Frequenzgehalt **Dehn-, Biege- oder Torsionswellen** entstehen. Jeweils zwei Wellenarten können dazu genutzt werden, den Zusammenhang zwischen den Ausbreitungsgeschwindigkeiten, der Rohdichte und den elastischen Parametern herzustellen. Dies kann unter praktischen Bedingungen als eine geeignete Alternative zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v_s der Scherwelle genutzt werden.

In der zerstörungsfreien Prüfung kommt **Rayleighwellen** neben Longitudinalwellen eine wichtige Bedeutung zu, da deren Ausbreitungsgeschwindigkeit v_R im Vergleich zu Scherwellen vergleichsweise einfach zu bestimmen ist. Rayleighwellen sind elliptisch polarisiert und breiten sich entlang der freien Oberfläche eines homogenen Halbraums aus. Die Eindringtiefe in das Ausbreitungsmedium ist begrenzt und entspricht etwa einer Wellenlänge (KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER 1986). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleighwelle v_R beträgt näherungsweise $v_R \approx 0,92 v_s$ und ergibt sich in Abhängigkeit von der Querdehnzahl aus (RENTSCH & KROMPHOLZ 1963):

$$v_R = \frac{0,87 + 1,12v_{\text{dyn}}}{1 + v_{\text{dyn}}} \cdot v_s \quad \text{Gl. 2-9}$$

Bei **Dehnwellen** oder auch Quasilongitudinalwellen werden Longitudinalwellen mit transversalen Schwingungsanteilen überlagert. Diese führen zur Kompression bzw. Dilatation stabförmiger Ausbreitungsmedien mit zugehöriger Querdehnung und -stauchung. Bei reinen Dehnwellen ($b/\lambda < 0,2$) ist deren Ausbreitungsgeschwindigkeit v_D ausschließlich von den elastischen Eigenschaften und der Dichte abhängig (RENTSCH & KROMPHOLZ 1963):

$$v_D = \sqrt{\frac{E_{\text{dyn}}}{\rho}} \quad \text{Gl. 2-10}$$

Biegewellen breiten sich in Stäben, Balken oder Platten aus. Im Unterschied zu Dehnwellen wird das Ausbreitungsmedium senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, unsymmetrisch ausgelenkt. Dies führt zur periodischen Änderung der Krümmung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Biegewellen ist frequenzabhängig und nimmt für tiefere Frequenzen kleinere Werte an (POHL 1966).

Lambwellen sind gemischte Kompressions- und Scherwellen in ausgedehnten, schlanken Platten, die in mindestens zwei Grundmoden (symmetrisch/asymmetrisch) auftreten und analog zu Biegewellen eine stark dispersive Wellenausbreitung aufweisen.

Torsionswellen breiten sich in begrenzten, stabförmigen Medien aus und sind ein Sonderfall der Transversalwelle. Die Schwingung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und führt zur periodischen Verdrehung des Mediums. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_T von Torsionswellen gilt (RENTSCH UND KROMPHOLZ 1963):

$$v_T = v_s = \sqrt{\frac{G_{\text{dyn}}}{\rho}} \quad \text{Gl. 2-11}$$

Biege-, Torsions- und Dehnwellen werden bevorzugt auch dazu genutzt, die elastischen Parameter auf der Grundlage der charakteristischen Eigen- bzw. Resonanzfrequenzen von definierten Probengeometrien zu bestimmen (vgl. Abschn. 2.3.3). Weiterführende Informationen zu diesen

und weiteren Wellenarten sowie deren Anwendung in der Werkstoffprüfung können KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER (1986) entnommen werden.

2.1.2 Kenngrößen des Schallfeldes

Die Gesamtheit der sich räumlich ausbreitenden Schallwellen wird als Schallfeld bezeichnet. Das Schallfeld ist Träger der Wechselwirkung innerhalb des Ausbreitungsmediums. Der Momentanzustand des Schallfeldes lässt sich auf der Grundlage von Kenngrößen als Funktion der Zeit und des Ortes beschreiben. Grundsätzlich wird zwischen Feld- und Energiegrößen unterschieden. In Abhängigkeit von der Form der Schallquelle (punkt-, linienförmig, flächig) treten Kugel-, Zylinder- oder ebene Wellen als Grundtypen der Wellenausbreitung auf. Das Schallfeld bildet sich ausgehend von der Schallquelle aus und ist durch ein Nah- und Fernfeld gekennzeichnet (vgl. Abschn. 2.2.1). Die in einem Schallfeld auftretenden Druckschwankungen werden als Schalldruck p bzw. Schallwechseldruck Δp bezeichnet. Diese sind dem statisch wirkenden Druck überlagert und resultieren für Longitudinalwellen aus der Abfolge von Kompressions- und Dilatationszonen (Abb. 2-3). Die Schallschnelle v beschreibt die Wechselgeschwindigkeit und die Auslenkung ξ den momentanen Abstand von der Ruhelage einzelner Partikel des Ausbreitungsmediums. Bei maximaler Auslenkung nimmt die Schallschnelle den Wert Null an. Schallschnelle und Auslenkung weisen dementsprechend eine Phasenverschiebung von 90° zueinander auf. Für piezoelektrische Sensoren ist die auftretende elektrische Spannung proportional zum anliegenden Schalldruck der eintreffenden Welle (vgl. Abschn. 2.2.1). Die Messgrößen der interferometrischen Erfassung von Ultraschall sind Oberflächenschnelle v_{OS} (Frequenzdemodulation) bzw. Oberflächenauslenkung ξ_{OS} (Phasendemodulation) (vgl. Abschn. 2.2.3).

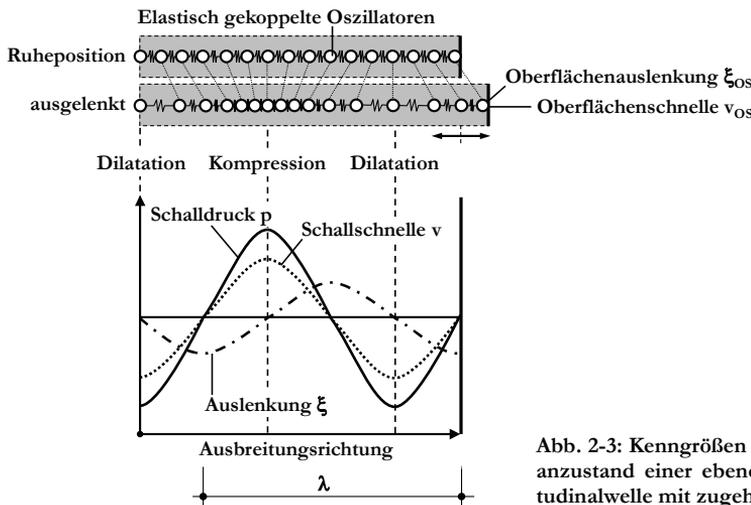


Abb. 2-3: Kenngrößen des Schallfeldes – Momentanzustand einer ebenen, fortschreitenden Longitudinalwelle mit zugehörigen Feldgrößen

Ausführliche Informationen zu den Kenngrößen akustischer Felder und deren Beziehungen zueinander können der DEGA-Empfehlung 101 (2006) entnommen werden.

2.1.3 Wechselwirkung mechanischer Wellen

Die Ausbreitung von mechanischen Wellen unterliegt einer Reihe von weiteren physikalischen Mechanismen. Deren Kenntnis ist entscheidend für die Anwendbarkeit akustischer zerstörungsfreier Prüfverfahren auf zementgebundene Baustoffe und erlaubt Rückschlüsse auf die Werkstoffeigenschaften sowie deren zeitliche und örtliche Veränderungen. Aufgrund der charakteristischen Zusammensetzung stellen zementgebundene Werkstoffe im Vergleich zu Metallen oder

biologischem Gewebe keine idealen Ausbreitungsmedien für Ultraschall dar. Das heterogene Gefüge aus Zementsteinmatrix, Poren und Gesteinskörnung führt zu Streuung, Modenkonzersion und Absorption und in deren Folge zu frequenzabhängiger Schwächung und Dispersion der ursprünglichen Wellenform (SCHICKERT 2007). Das Penetrationsvermögen wird entscheidend durch den Frequenzgehalt der sich ausbreitenden Wellen bestimmt (POHL 1966). Die Ursachen resultieren aus frequenzabhängigen Wechselwirkungen in Abhängigkeit vom Aufbau und den Eigenschaften des Ausbreitungsmediums.

Grenzflächen können zu Streuung, Reflexion, Brechung, Beugung und Modenkonzersion führen. Diese lassen sich in äußere Grenzflächen (z.B. Außenflächen der Probe, Übergang Probe - Sensor) und innere Diskontinuitäten (z.B. Poren, Korngrenzen, Lunker, Einschlüsse, Delaminationen, Mikrorisse, Risse) unterscheiden. In welchem Umfang die Mechanismen wirksam werden, hängt vom jeweiligen Verhältnis der Wellenlänge nach Gl. 2-8 zur Dimension der Grenzfläche ab. Für die Wechselwirkung sich ausbreitender Wellen an Grenzflächen sind Änderungen der Schallkennimpedanz maßgeblich:

$$Z = \rho \cdot v \quad \text{Gl. 2-12}$$

Z	- Schallkennimpedanz (Wellenwiderstand)
ρ	- Rohdichte
v	- Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle

Demnach ändert sich der Wellenwiderstand, wenn Unterschiede in den Ausbreitungsgeschwindigkeiten oder in den Dichten der angrenzenden Medien vorliegen. Bei senkrechtem Einfall der Wellenfront kommt es anteilig zu **Reflexion und Transmission**. Die zugehörigen Reflexions- (R_{akust}) bzw. Transmissionsgrade (T_{akust}) gelten für Grenzflächen in den Dimensionen der Wellenlänge oder darüber und ergeben sich zu (KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER 1986):

$$R_{\text{akust}} = \frac{p_r}{p_e} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (-1 \leq R < 1) \quad \text{Gl. 2-13}$$

$$T_{\text{akust}} = \frac{p_t}{p_e} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = 1 + R_{\text{akust}} \quad (0 \leq T < 2) \quad \text{Gl. 2-14}$$

p_e, p_r, p_t	- Schalldruck - einfallende, reflektierte bzw. transmittierte Welle
Z_1	- Schallkennimpedanz schallleitendes Medium
Z_2	- Schallkennimpedanz angrenzendes Medium

Für $Z_2 \ll Z_1$ wird die eintreffende Welle größtenteils reflektiert und unterliegt einem Phasenwechsel (negatives R_{akust}). Für $Z_2 = Z_1$ erfolgt vollständige Transmission in das angrenzende Medium. Für $Z_2 > Z_1$ wird die eintreffende Welle ohne Phasenwechsel partiell reflektiert. Der transmittierte Anteil ist stets in Phase mit der ursprünglichen Welle. Sehr große Unterschiede in den Schallkennimpedanzen ($Z_2 \ll Z_1$) ergeben sich vor allem für frische zementgebundene Baustoffe (Schallgeber - Frischbeton), für unzureichende Ankopplungsbedingungen (Schallgeber - Luft), für Fehlstellen und Delaminationen (Beton - Luft) sowie für die Außenflächen von Probekörpern (Beton - Luft). In den angeführten Fällen erfolgt annähernd Totalreflexion.

Auch bei schrägem Einfall der Wellenfront kommt es anteilig zu Reflexion bzw. Transmission. Ist die Grenzfläche glatt im Vergleich zur Wellenlänge gilt für den reflektierten Anteil das Reflexionsgesetz – der Einfallswinkel ist gleich dem Ausfallswinkel. Bei rauen Grenzflächen erfolgt diffuse Streureflexion. Der transmittierte Teil der Welle passiert das hinter der Grenzfläche liegende Medium unter Änderung der Ausbreitungsrichtung. Dieser Vorgang wird als **Brechung** (Refraktion) bezeichnet. Es gilt das Brechungsgesetz nach SNELLIUS. Äußere Grenzflächen kön-

nen zur gezielten Schallführung z. B. in Platten und Stäben oder durch Schallumlenkung in sonst nicht zugängliche Bereiche genutzt werden.

Inhomogenitäten in der Größenordnung der Wellenlänge führen zur **Beugung** (Diffraktion) einfallender Wellen, die mit deren Richtungsänderungen um Diskontinuitäten verbunden sind.

Darüber hinaus führt der schräge Einfall an Grenzflächen zu **Modenkonversion**. Eine einfallende Longitudinalwelle (oder auch Scherwelle) wird an der Grenzfläche aufgespalten und partiell als Longitudinal- und als Scherwelle reflektiert und transmittiert. Daraus resultiert, dass Longitudinal- und Scherwellen in Festkörpern als gekoppelte Raumwellen vorliegen (REINHARDT & GROSSE in: REINHARDT & GROSSE et al. 2005). Die Amplituden konvertierter Wellen sind stark vom Einfallswinkel der ursprünglichen Welle abhängig (GROBE 1996). Modenkonversion kann z. B. zur gezielten Erzeugung von Scher- und Oberflächenwellen mit Longitudinalwellensensoren durch schrägen Schalleinfall auf äußere Grenzflächen genutzt werden.

Die **Dämpfung** mechanischer Wellen bestimmt deren Reichweite innerhalb des Ausbreitungsmediums und damit die durchschallbaren Distanzen für eine hinreichende Detektion der akustischen Signale. Die Amplitudenabnahme mit der Ausbreitungsstrecke lässt sich auf zwei Ursachen zurückführen – die sphärische Divergenz und die dissipative Dämpfung. Der **sphärischen Divergenz** liegt die geometrische Aufweitung der Wellenfront zugrunde. Dies führt zur Abnahme der Amplitude bzw. der Intensität mit zunehmender Distanz s von der Quelle unabhängig von der Frequenz. Bei Kugelwellen gilt für die Amplituden A_K linearer Feldgrößen wie Schalldruck p , Oberflächenschnelle v_{OS} oder -auslenkung ξ_{OS} :

$$A_K \sim \frac{1}{s} \quad \text{Gl. 2-15}$$

Die Energie bzw. Intensität I_K einer Kugelwelle verteilt sich auf eine proportional zum Quadrat des Abstands zunehmende Kugeloberfläche:

$$I_K \sim \frac{1}{s^2} \quad \text{mit} \quad I_K = A_K \cdot A_K^* \quad \text{Gl. 2-16}$$

Die **dissipative Dämpfung** resultiert aus der **Streuung** der Welle an Inhomogenitäten sowie aus der Umwandlung der Wellenenergie in Wärme durch inelastische Prozesse und innere Reibung (**Absorption**). Als Streuzentren wirken Diskontinuitäten (z. B. Poren, Gesteinskörner) mit Durchmesser deutlich kleiner als die Wellenlänge. Die Absorption erfolgt bei resultierenden Auslenkungen von wenigen Nanometern (vgl. Abschn. 3.4.1) im mikroskopischen Bereich zementgebundener Baustoffe. Die Amplitude A_K nach der Ausbreitungsstrecke s ist proportional zu:

$$A_K \sim e^{-\mathfrak{D}s} \quad \text{Gl. 2-17}$$

Für Kugelwellen gilt unter Berücksichtigung beider Dämpfungsmechanismen:

$$A_K(s) = \frac{s_0}{s} \cdot A_K(s_0) \cdot e^{-\mathfrak{D}(s-s_0)} \quad \text{Gl. 2-18}$$

$A_K(s)$	- Amplitude in Abhängigkeit von der Distanz s
s_0	- Referenzwert der Distanz
$A_K(s_0)$	- Referenzwert der Amplitude für die Distanz s_0
\mathfrak{D}	- Dämpfungskoeffizient [m^{-1}]

Der Dämpfungskoeffizient \mathfrak{D} ist werkstoff- und frequenzabhängig. Hohe Frequenzen werden selektiv stärker gedämpft und sind aufgrund kleinerer Wellenlängen nach Gl. 2-8 stärker von Streuprozessen in zementgebundenen Baustoffen betroffen. Bei der taktilen Anregung und Er-