

Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen in Beton

vorgelegt von
Diplom-Bauingenieur
Andreas Zoëga
aus Berlin

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna, TU-Berlin

Berichter : Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier, TU-Berlin
Professor und Direktor Dr. rer. nat. Herbert Wiggenhauser, BAM
Parisa Shokouhi, Ph.D., P.E., BAM

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 27.06.2011

Berlin 2011

D 83

Danksagung

Während der Anfertigung dieser Arbeit habe ich vielfältige Anregungen und Unterstützung durch zahlreiche Personen erfahren, denen ich hiermit danken möchte.

Allen voran gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing Hillemeier und Prof. und Direktor Dr. rer. nat. Wiggenhauser für die Betreuung meiner Dissertation. Prof. Dr.-Ing Hillemeier und seinem Lehrstuhl für die spannende Lehre, die gute Betreuung und die Einführung in die Messtechnik der zerstörungsfreien Prüfung zu Studienzeiten, die mein Interesse an der zerstörungsfreien Prüfung geweckt haben. Prof. und Direktor Dr. rer. nat. Wiggenhauser für seine Geduld und die immer offen stehende Tür. Prof. Dr.-Ing. Petryna für das Interesse an diesem Thema und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Die dieser Dissertation zugrunde liegende Großversuchsserie konnte nur in einem fachgruppenübergreifenden Team gestemmt werden. Mein ganz besonderer Dank gilt Andreas Barner und den Kollegen der Fachgruppe 7.2., die mit mir wochenlang gemessen und in den Nächten zwischen den Messtagen die Großprüfmaschine repariert haben, damit der Versuchsablauf nicht unterbrochen wurde.

Den Kollegen aus der Fachgruppe 8.2. danke ich dafür, dass sie mich stets hilfsbereit unterstützt haben: Dr. rer. nat. Ute Effner die die Ultraschallversuche koordinierte und während der gesamten Versuchsserie mit viel Engagement betreute. Marko Lange, der die Geduld und Präzision aufbrachte, Holz auf einen zehntel Millimeter genau zu bearbeiten, Matthias Behrens für die Feder aus seiner Vorderradgabel und die damit erfolgte Optimierung des Versuchsaufbaus, Sean Smith, der unter Einsatz aller Kräfte immer sofort mit guter Laune half und Dieter Schaurich für seine Ideen und Filme. Rüdiger Feldmann, der in seiner Diplomarbeit zeigte, dass sich eine weitere Untersuchung des Zusammenhangs von Schallgeschwindigkeit und Druckbelastung lohnen wird. Dr.-Ing. Alexander Taffe, dass er für Fragen immer ein offenes Ohr und gute Tipps immer als Antwort hatte, insbesondere bei Fragen der Statistik. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger für seine Vorlagen. Es sei allen weiteren guten Geistern der Fachgruppe gedankt, die im Stillen dafür sorgen, dass Arbeiten wie diese entstehen können.

Ein besonderer Dank gilt Parisa Shokouhi, Ph. D. für die stets konstruktive Zusammenarbeit an diesem Forschungsthema und die zahlreichen interessanten und hilfreichen Diskussionen.

Meinen Eltern danke ich für ihre geduldige und liebevolle Begleitung durchs Leben, die eine derartige Ausbildung und Arbeit ermöglichten. Meiner Freundin für ihren Zuspruch, ihre Unterstützung und ihre Korrekturen über Nacht.

Kurzfassung

Beton, einer der vielseitigsten und meist-verbreitetsten Baustoffe, verdankt diese Popularität seiner hohen Druckfestigkeit bei gleichzeitig geringen Kosten auf der einen Seite sowie seiner hohen Flexibilität durch die Möglichkeit der fast beliebigen Formgebung von lastabtragenden Elementen und Bauteilen auf der anderen Seite. Die weltweit verbreiteten Betonbauwerke altern und drängen die zerstörungsfreie Prüfung dazu, Prüfmethoden für eine effektive Zustandsbewertung von im Betrieb befindlichen Betonbauwerken zur Verfügung zu stellen.

Für viele in anderen zerstörungsfreien Prüfbereichen alltägliche Anwendungen stellt Beton aufgrund der Heterogenität des Verbundwerkstoffs mit seinem nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Verhalten eine Herausforderung dar. Mit steigender Spannung nehmen die nichtlinearen Eigenschaften noch zu und können - z. B. durch die sich in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung bildenden Mikrorisse - zu einer anisotropen Ausbildung von Eigenschaften führen, welche u. a. mit elastischen Wellen in Wechselwirkung treten. Bisherige Prüfaufgaben an Beton beschränken sich auf Bereiche, bei denen die elastischen Wellen ein lineares Verhalten aufweisen und sind daher nicht uneingeschränkt anwendbar. Gerade der Zusammenhang von Spannungszustand und Anisotropie zeigt eindeutige nichtlineare Effekte auf die Eigenschaften elastischer Wellen. Diese Eigenschaftsänderungen von elastischen Wellen sollen in dieser Arbeit anhand der Schallgeschwindigkeit erörtert werden. Neben einer Beobachtung und Dokumentation der auftretenden Effekte werden die Ursachen und Wirkmechanismen, die zu einer Schallgeschwindigkeitsänderung unter einer Druckbelastung führen, untersucht.

In einem Vorversuch wurden Wellen unterschiedlichen Typs, Frequenz, Polarisation und Ausbreitungsrichtung auf ihre Sensitivität gegenüber einer Belastung miteinander verglichen. Hierbei stellte sich die Oberflächenwelle als die belastungsempfindlichste heraus und wird in dieser Arbeit für die Beschreibung der spannungsabhängigen Eigenschaftsänderungen von elastischen Wellen bevorzugt verwendet. Die für diese Versuchsserie erstellten Versuchsaufbauten und die verwendeten Oberflächenwellen erlaubten eine beliebige Orientierung der Messrichtung in Bezug zur Lastrichtung. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit konnte damit in Richtungsabhängigkeit verfolgt und anisotropes Verhalten beobachtet werden. Ultraschallwellen sind für Untersuchungen an Beton die am häufigsten verwendeten; infolgedessen wurde zum Vergleich parallel mit Ultraschallwellen unterschiedlicher Frequenzen gemessen.

Als Ergebnis aus der Versuchsserie konnte der Auslastungs- und Schädigungsgrad des Betons nachvollzogen und damit die Änderung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der aufgetragenen Last für eine sichere Bruchvorhersage verwendet werden. Mit wachsender Belastung stieg dabei die Schallgeschwindigkeit an, dieser Anstieg verlangsamte sich und ging im Bereich zwischen 50-80 % der Bruchlast in eine zunehmende Schallgeschwindigkeitsreduktion über. Der größte Schallgeschwindigkeitszuwachs konnte zu Beginn in Lastrichtung beobachtet werden, während die größte Schallgeschwindigkeitsreduktion in orthogonaler Richtung kurz vor dem Bruch stattfand. Der bei geringer Belastung (linear-elastischer Bereich) besonders deutliche Schallgeschwindigkeitsanstieg kann mithilfe der Akustoelastizität erklärt werden. Der sich vermindernde Anstieg und die

Schallgeschwindigkeitsreduktion ließen sich experimentell auf die Mikrorissentstehung und das Mikrorisswachstum innerhalb des Betons zurückführen.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich die Schallgeschwindigkeit bei einer Wiederbelastung von der bei einer Erstbelastung unterscheidet, dieser Unterschied sich bei einer höheren Vorbelastung vergrößert, die Anzahl der vorangegangenen Belastungen einen Einfluss hat und eine Überlastung sich besonders deutlich in einer Schallgeschwindigkeitsminderung niederschlägt. Bei den Schallgeschwindigkeitsänderungen konnte ebenso eine zeitabhängige Komponente beobachtet werden. Die typischen Kurvenverläufe der Schallgeschwindigkeit über der Spannung konnten ebenso an Probekörpern mit anderen Betonrezepturen sowie an bewehrten Probekörpern aufgezeichnet werden.

Die spannungsabhängige Änderung der Geschwindigkeit von elastischen Wellen in Beton ist ein nicht zu vernachlässigender Effekt, welcher für Prüfverfahren zur Inspektion von bestehenden Gebäuden in Betracht gezogen werden kann. Ein Verständnis für die Ursachen der belastungs- bzw. zerstörungsgradabhängigen Geschwindigkeitsänderung der elastischen Wellen in Beton ebnet den Weg zur Entwicklung und Etablierung neuer Prüfmethoden, mit deren Hilfe vor Ort und zerstörungsfrei der Auslastungs- und Schädigungsgrad einer Betonstruktur bestimmt werden kann.

Schlagworte: Beton, Schallgeschwindigkeit, Spannungsabhängigkeit, Belastung, Richtungsabhängigkeit, elastische Wellen, Akustoelastizität, Mikrorisse, Oberflächenwellen

Abstract

Concrete is one of the most widely used construction materials. Concrete owes this popularity to its high compressive strength, low costs and the flexibility of being cast in the form of customized structural elements and load-bearing members. The many concrete structures around the world are aging, urging the NDT community to develop testing tools for effective inspection of in-service concrete structures.

Concrete poses a challenge to the application of standard NDT techniques. Concrete is a multi-phase heterogeneous material with a nonlinear stress-strain behavior. Loading and the resulting damage (i.e., microcracking) increase the non-linearity and may induce anisotropy in concrete. As a result, many of the common wave propagation-based NDT methods relying on linear elastic theory are no longer applicable. The main objective of this study is to investigate the stress-induced changes in the velocity of elastic waves in concrete under uniaxial compression. The underlying mechanisms of the observed effects have been also investigated here.

A preliminary experiment was conducted to study the influence of the type, frequency, polarization, and propagation direction of elastic waves on the stress-induced velocity changes. The velocity of sonic surface waves (Rayleigh waves) demonstrated the highest sensitivity and therefore, much of this work is focused on the stress-induced changes in surface wave propagation characteristics. The test setup allowed measuring the surface wave velocities along various directions with respect to the loading direction and therefore, the direction-dependency of the surface wave velocity measurements was also investigated. Standard ultrasonic testing of various frequencies was also conducted and the results were compared to those from sonic surface wave measurements.

Sonic surface wave velocities were found to be highly stress- and damage-dependent. Application of stress results in an initial sharp increase in surface wave velocity. Increasing the stress, the wave velocities continue to increase, however, the rate of increase decreases for stress levels between 50% and 80% of the failure stress, after which the velocities start rapidly to decrease. The sharpest increase was recorded in the direction of the loading, while the velocities decreased the fastest in the perpendicular direction. The sharp initial increase in wave velocities (within the elastic region) can be explained by acoustoelastic effects. The initiation and development of microcracks within concrete result in the observed velocity-stress relationship beyond the elastic region.

The test specimens were generally loaded in several load cycles and wave velocities were measured during both loading and unloading phases. It was found that the load history has a major effect on the velocity measurements. For previously loaded specimens, a notable difference between the velocity measurements during unloading and reloading was recorded. The higher the maximum previous load, the larger was the difference. Also, overloading the specimens resulted in a very large loss in surface wave velocities. Similar qualitative velocity-stress relationships were obtained for a number of different concrete mixes as well as the reinforced concrete.

Stress-dependency of elastic wave velocities in concrete is an important effect, which needs to be taken into account for in-situ measurements of in-service structural elements. Understanding and establishing the stress- and –damage dependency of wave velocities in concrete paves the way for developing new NDT techniques, which can be used to nondestructively estimate the in-situ stress and damage state of concrete.

Keywords: Concrete, surface wave velocity, ultrasonic testing, acoustoelasticity, microcracking, stress-dependency, direction-dependency

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	1
Kurzfassung.....	3
Abstract.....	5
1 Einleitung	11
1.1 <i>Nichtlineares Materialverhalten in der zerstörungsfreien Prüfung</i>	11
1.2 <i>Frühere Untersuchungen zur Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen</i>	12
1.3 <i>Zielsetzung</i>	14
1.4 <i>Einflussfaktoren, Untersuchungsziel und –methodik</i>	15
1.5 <i>Gliederung</i>	17
2 Grundlagen elastischer Wellen	18
2.1 <i>Schwingungen</i>	18
2.2 <i>Wellen.....</i>	19
2.2.1 <i>Longitudinalwellen</i>	20
2.2.2 <i>Transversalwellen</i>	21
2.2.3 <i>Oberflächenwellen</i>	22
2.3 <i>Reflexion von Wellen</i>	24
2.4 <i>Charakterisierung von Wellen.....</i>	25
2.5 <i>Anregung von elastischen Wellen</i>	25
3 Planung der Versuchsserie	28
3.1 <i>Fragestellungen</i>	28
3.2 <i>Größe der Probekörper.....</i>	28
3.3 <i>Zusammensetzung der verwendeten Betone.....</i>	29
3.4 <i>Elemente der Versuchsdurchführung.....</i>	30
3.5 <i>Untersuchungsschwerpunkte und Belastungsverläufe</i>	31
3.5.1 <i>Erster Probekörper (1.PK).....</i>	32
3.5.2 <i>Zweiter Probekörper (2.PK).....</i>	33
3.5.3 <i>Dritter Probekörper (3.PK).....</i>	34
3.5.4 <i>Vierter Probekörper (4.PK)</i>	34
3.5.5 <i>Fünfter Probekörper (5.PK)</i>	35
3.5.6 <i>Akustische-Emission-Probekörper (AEPK).....</i>	36
4 Messapparaturen und Geräte.....	38
4.1 <i>Messmethoden.....</i>	38
4.2 <i>Laservibrometer (LVib).....</i>	40
4.3 <i>Sensorenarray (SA)</i>	43
4.4 <i>Zwei-Sensoren (ZS)</i>	45

4.5	Ultraschall (US).....	47
4.5.1	Vorversuch (PK 1).....	47
4.5.2	Versuchsserie (PK 2-5).....	48
4.6	Dehnungsmessung.....	50
4.7	Akustische-Emission (AE).....	51
4.8	Belastung	52
5	Auswertungsprinzipien	55
5.1	Die Laufzeitmessung	55
5.2	Kriterien zur Bestimmung der Laufzeit.....	58
5.2.1	Ersteinsatz	58
5.2.2	Schwellwert.....	60
5.2.3	Minimum.....	62
5.2.4	Spitzenwerterkennung.....	63
5.3	Klassifizierung von Störungen	64
5.3.1	Störungen unterhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle	64
5.3.2	Störungen innerhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle	64
5.3.3	Störungen oberhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle	65
5.4	Signalkonditionierung durch Filterung.....	65
5.4.1	Filterung des Messsignals	65
5.4.2	Einfluss der Filterung auf die Laufzeitmessung.....	68
5.5	Eliminierung von Fehlmessungen.....	70
5.5.1	Klassifizierung von Messungen	70
5.5.2	Mittelung ohne die Eliminierung von Fehlmessungen.....	72
5.5.3	Kriterien zur Erkennung von Fehlmessungen.....	73
5.5.4	Zweischrittauswertung.....	74
5.5.5	Mittelung nach der Eliminierung von Fehlmessungen.....	74
5.6	Laufzeitmessung mit Piezosensoren	77
6	Messergebnisse	78
6.1	Spannungssensitivität in Abhängigkeit von Wellenart, Mess- und Polarisationsrichtung	78
6.1.1	Einleitung	78
6.1.2	Versuchsaufbau	79
6.1.3	Versuchsdurchführung.....	79
6.1.4	Oberflächenwellen	80
6.1.5	Ultraschallwellen	83
6.2	Spannungsabhängige Effekte der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen.....	89
6.2.1	Einleitung	89
6.2.2	Versuchsdurchführung.....	89
6.2.3	In Belastungsrichtung	90
6.2.4	In Richtungsabhängigkeit.....	100
6.2.5	Ent- und Wiederbelastung nach einer Überlastung	109
6.2.6	Zeitabhängige Effekte	122
6.3	Vergleich mit anderen Betonen.....	126
6.4	Abschlussbetrachtungen zu den Messungen	128

7	Analyse der Ursachen des Effekts	129
	7.1 Vergleich des gemessenen Effekts mit der linearen Theorie.....	129
	7.2 Akustoelastischer Effekt	131
	7.3 Mikrorisse	138
8	Fazit.....	144
	8.1 Ziel und Umsetzung.....	144
	8.2 Beobachtungen und Dokumentation	144
	8.3 Ursachenanalyse.....	146
	8.4 Ausblick.....	147
	Anhang.....	149
	Begriffseinführung	150
	Abkürzungsverzeichnis	151
	Symbolverzeichnis.....	152
	Literaturverzeichnis.....	153
	Publikationsliste	154
1	Weitere Messergebnisse zu Kapitel 6.2	157
	1.1 Messungen mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau analog zu den Messungen mit dem Sensorenarray-Versuchsaufbau	157
	1.2 Messung der Richtungsabhängigkeit am ersten Probekörper.....	160
2	Einflüsse der Kalibrierung des Laservibrometers	162

1 Einleitung

1.1 Nichtlineares Materialverhalten in der zerstörungsfreien Prüfung

Um die Unversehrtheit eines existierenden Bauwerks zerstörungsfrei beurteilen zu können, ist eine verlässliche Bestimmung der Materialparameter vor Ort von Vorteil, welche in Kombination mit angemessenen Auswertemethoden die verbliebene Belastbarkeit auf der einen Seite und die relevanten Schäden auf der anderen Seite in den tragenden Bauteilen bestimmbar macht. Zerstörungsfreie Prüfmethoden (ZfP-Methoden), die eine verlässliche Beurteilung eines oder mehrerer Materialparameter ermöglichen ohne das Bauteil zu zerstören, sind für Inspektoren und Ingenieure außerordentlich wertvoll. Unter den anwendbaren ZfP-Methoden haben sich akustische Methoden zur Inspektion von Betonbauteilen, sowohl zur Schadensortung als auch zur Materialparameterbestimmung bewährt. Bei der Schadensortung sind akustische Methoden besonders zur Ortung von Schäden geeignet, die eine akustische Impedanz-Diskontinuität aufweisen wie Hohlstellen, Risse und Delaminationen. Für akustische Prüfmethoden, welche die Materialeigenschaften charakterisieren, liegt der Vorteil der verwendeten elastischen Wellen in der Eignung, die Materialparameter direkt durch die Interaktion der Welle mit dem Material zu bestimmen, z. B. über die Charakteristik der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen bzw. der Schallgeschwindigkeit.

Die Analyse und Interpretation der Resultate akustischer Prüfmethoden basieren üblicherweise auf der Theorie der elastischen Wellenausbreitung in linear-elastischen und homogenen Materialien. In Übereinstimmung mit dieser Theorie resultiert die Geschwindigkeit von Wellen, die sich in einem linear-elastischen Material ausbreiten, als eine Funktion der elastischen Materialeigenschaften wie den Lamékonstanten oder der Querkontraktion und dem E-Modul.

Für Verbundwerkstoffe wie Beton verlieren viele Annahmen dieser Theorie ihre Gültigkeit. Beton ist sowohl heterogen als auch anisotrop und weist ein nicht-lineares Spannungs-Dehnungsverhalten auf. Trotzdem ist die Verwendung dieser Theorie für viele Einsatzbereiche an Beton weiterhin gerechtfertigt. Der Grund hierfür liegt in der Abstimmung der Prüfmethoden auf konkrete Prüfaufgaben. Zum Einen, um Streuung und Dämpfung zu vermeiden, muss der verwendete Frequenzbereich (<60 kHz) so gewählt werden, dass die verwendeten Wellen nicht sensitiv sind für die Heterogenitäten im Beton und zum Anderen sind die Spannungsänderungen im Bauteil während der Messungen zu gering, um die Messergebnisse durch die Nichtlinearität des Materialverhaltens signifikant zu beeinflussen. Die letzte Feststellung verliert ihre Gültigkeit bei Untersuchungen, bei denen die Spannungsänderung im Beton während der Messungen derart ausgeprägt sind, dass Beton ein deutliches nichtlineares Verhalten aufzeigt. In dieser Arbeit soll gezeigt werden, dass in diesen Fällen die Schallgeschwindigkeit nicht allein durch die elastischen Materialeigenschaften bestimmt wird, sondern auch von der Spannung im Bauteil und der daraus resultierenden inneren Schädigung in Form von Mikrorissen abhängt. Die Spannungsabhängigkeit von elastischen Wellen wird zurzeit noch nicht für Prüfaufgaben an Betonbauteilen verwendet. In der Literatur sind wenige an Beton geführte Untersuchungen zu finden, die im folgenden Kapitel zusammengefasst werden.

1.2 Frühere Untersuchungen zur Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen

Wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt wird, liegt der Vorteil beim Einsatz von Oberflächenwellen im Hörschallbereich in einer höheren Sensitivität gegenüber Spannungsunterschieden in Beton begründet. Vom praktischen Standpunkt aus liegt ein weiterer Vorteil darin, dass Oberflächenwellen beliebige Messrichtungen an der Oberfläche erlauben. Spannungsabhängige Eigenschaftsänderungen für Oberflächenwellen an Beton sind in der bisherigen Literatur nicht beschrieben worden. Seit Sokolov im Jahr 1929 [Soko29] als erster Ultraschallwellen zur Untersuchung von Metallen verwendete, sind durchdringende Ultraschallwellen für die meisten Untersuchungen von Materialparametern verwendet worden. Aus diesem Grund wird die Literaturrecherche auf Ultraschallwellen und Materialien ausgeweitet, die ein ähnliches Verhalten wie Beton aufweisen.

Vorangegangene Untersuchungen mit Ultraschallwellen in Hinblick auf Schallgeschwindigkeitsänderungen unter Last zeigten erst kurz vor dem Erreichen der Bruchlast eine Schallgeschwindigkeitsänderung. Die in diesen Studien vorgestellten Versuche wurden an kleineren Probekörpern in einaxialen Druckprüfmaschinen in Durchschallung orthogonal zur Lastrichtung durchgeführt. Exemplarisch seien hier die Ergebnisse von Nogueira und William [Nogu01] angeführt. In Abbildung 1.1 ist ab ca. 70 % der Bruchlast eine Schallgeschwindigkeitsreduktion sowohl für Longitudinal- als auch für Transversalwellen zu erkennen.

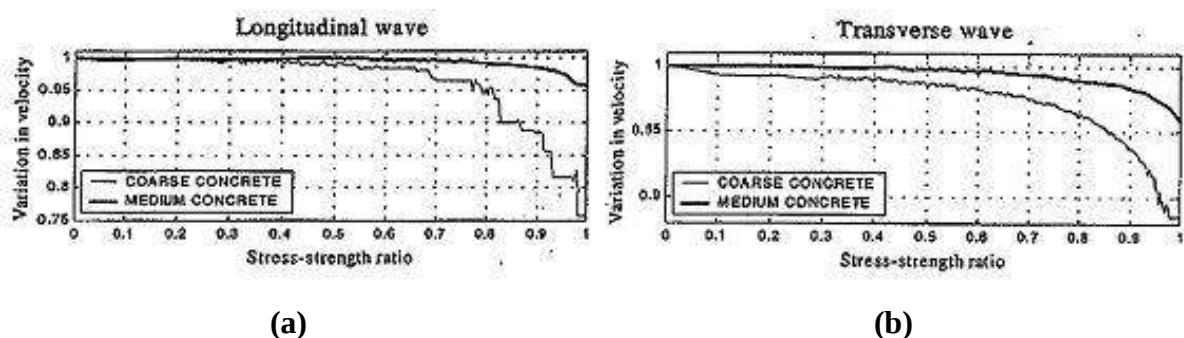


Abbildung 1.1: Ultraschall-Puls-Geschwindigkeit gemessen orthogonal zur Lastrichtung in Abhängigkeit von der Belastung für Beton mit unterschiedlichem Größtkorn und Mörtelprobekörper für (a) Longitudinalwellen und (b) Transversalwellen [Nogu01].

Nogueira und William zeigten weiterhin, wie zuvor Suaris und Fernando [Suar87], dass die Amplitudenschwächung sensitiver ist, schon ab ca. 40 % der Bruchlast Effekte zeigt und deuteten auf einen Zusammenhang des Mikrorisswachstums mit der Amplitudenschwächung hin. Kroggel und Wilhelm [Krog06] untersuchten die Amplitudendämpfung von Ultraschallwellen an Betonbauteilen, die mehrfach be- und entlastet wurden. Sie konnten beobachten, dass das Minimum der Dämpfung in einem Lastzyklus der maximalen zuvor erreichten Last entsprach und schlossen damit auf ein belastungsabhängiges Erinnerungsvermögen des Betons in Übereinstimmung mit dem Kaisereffekt [Kais50].

Mit durchschallenden Ultraschallwellen konnte von Chaix [Chaix08] an Beton in Lastrichtung ein Schallgeschwindigkeitsanstieg für geringe Lasten gemessen werden. Im Gegensatz zu den bisher erwähnten Laufzeitmessungen wurden diese Schallgeschwindigkeitsänderungen mit der Codawave-Interferometrie-Methode bestimmt.

Damit sind unterschiedliche Beziehungen der Schallgeschwindigkeitsänderung bei einer Belastung für Beton beschrieben worden. Für andere Materialien ist mit steigender Belastung ebenfalls ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit beobachtet worden - dieser Zusammenhang ist als akustoelastischer Effekt von Hauk [Hauk97] für Metalle und Ultraschallwellen beschrieben worden. Ein Verhalten, das analog zu den hier geführten Messungen zu Beginn einen Anstieg und bei höheren Lasten ein Absinken der Schallgeschwindigkeit aufzeigt, konnte von Sayer, Munster und King [Saye90] an Berea-Sandstein beobachtet werden. In deren Untersuchungen, siehe Abbildung 1.2, wurde sowohl mit US-Longitudinal- als auch mit US-Transversalwellen gemessen, die Richtung drei bezeichnet die Lastrichtung. In orthogonaler Richtung sind die Schallgeschwindigkeiten V_{22} , V_{11} , V_{12} und V_{23} gemessen worden, für die Transversalwelle mit den Polarisationen V_{12} (Polarisation orthogonal zur Lastrichtung) und V_{23} (Polarisation in Lastrichtung). Mit beiden Wellenarten ist ebenfalls in Lastrichtung (V_{33} , V_{31}) gemessen worden. Bis mindestens 25 % der Bruchlast (30 MPa) ist ein Schallgeschwindigkeitsanstieg beobachtet worden, welcher mit zunehmender Last in eine Schallgeschwindigkeitsreduktion übergang. Die Schallgeschwindigkeitsreduktion bei hohen Lasten wurde in Zusammenhang mit einer Rissbildung im Sandstein gebracht. Der sich je nach Messrichtung unterscheidende Verlauf wird auf die anisotrope Ausbildung der Risse im Sandstein zurückgeführt.

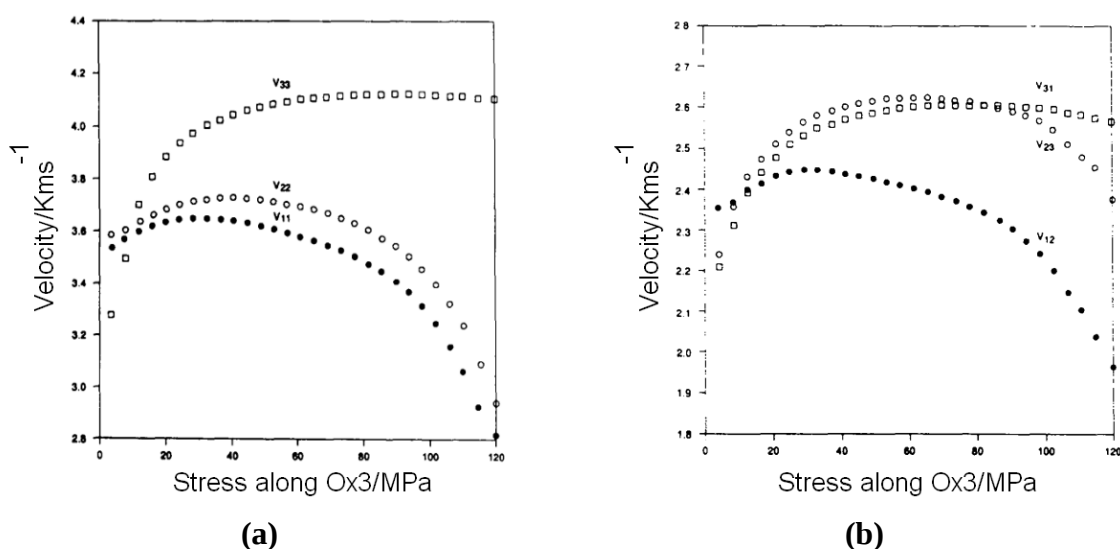


Abbildung 1.2: Änderung (a) der US-Longitudinalwellengeschwindigkeit und (b) US-Transversalwellengeschwindigkeit in km/s bei steigender Spannung in Richtung 3 in MPa in Berea-Sandstein [Saye90].

Die ersten Messungen an Beton, bei denen mit zunehmender Belastung ein Schallgeschwindigkeitsanstieg beobachtet werden konnte, sind von Feldmann im Jahr 2007 [Feld07] mit Oberflächenwellen in Lastrichtung unternommen worden. Bei diesen an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführten Voruntersuchungen zu dieser Arbeit ging der Schallgeschwindigkeitsanstieg bei ca. 80 % der Bruchlast in eine Schallgeschwindigkeitsreduktion über.

Bisherige Untersuchungen zeigen, dass ein spannungsabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeit in Beton gegeben ist. Die einzigen Messungen mit nicht Ultraschallwellen von Feldmann [Feld07] decken sich mit den Ultraschallmessungen von Chaix [Chaix08] und mit den zuvor schon erwähnten Beobachtungen von Sayer [Saye90] an Sandstein, die alle für geringe Lasten einen Schallgeschwindigkeitsanstieg in Lastrichtung

feststellen konnten. In den bisherigen Veröffentlichungen wurden Messungen nur mit Ultraschallwellen durchgeführt und diese nur in und/oder orthogonal zur Lastrichtung. Vergleiche mit Berea-Sandstein zeigen Ähnlichkeiten aber auch Widersprüche. Die Beobachtungen von Sayer [Saye90] sind ein Indiz dafür, dass an Beton ebenfalls ein richtungsabhängiges Verhalten zu erwarten ist. Messungen der Schallgeschwindigkeit in beliebige Richtungen und eine Untersuchung der Sensibilität von elastischen Wellen bei einer Spannungsbelastung sind in der Literatur noch nicht beschriebene Themenkomplexe, ebenso wie der Einfluss mehrerer Belastungszyklen auf die Schallgeschwindigkeit. Im nächsten Kapitel sollen die Untersuchungsziele der Arbeit und der zu untersuchende Inhalt näher beschrieben werden.

1.3 Zielsetzung

Aktive Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung basieren auf der Interaktion einer eingetragenen Energie mit dem zu prüfenden Material bzw. Körper. Diese Interaktion kann z. B. die Reflexion einer Welle an der Probekörperrückseite sein, die bei der US-Laufzeitmessung eine Struktur- bzw. Geometriebestimmung bei einseitiger Zugänglichkeit ermöglicht. Des Weiteren kann eine Interaktion auch ein Effekt sein, z. B. das dispersive Verhalten von Wellen bei geschichteten Systemen, wie es beim SASW-Verfahren zur Bestimmung der Materialparameter und Dicke der Schichten verwendet wird.

Für die Anwendung bestehender und insbesondere für die Entwicklung neuer Verfahren ist das Verständnis der Interaktion der eingetragenen Energie, hier elastische Wellen, mit dem Medium von entscheidender Bedeutung. Zum Thema der spannungsabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderung gibt es viele Informationen für homogene Stoffe, wie im Kapitel zuvor beschrieben, jedoch nur wenige Informationen für heterogene Stoffe und kaum für Beton als einen der am häufigsten verwendeten künstlichen Stoffe mit einer immensen wirtschaftlichen Bedeutung.

Die Vorversuche von Feldmann sowie einige der zuvor genannten Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass ebenfalls für Beton ein spannungssensitives Verhalten für elastische Wellen besteht. Die wenigen zu dem Thema: „Spannungsabhängige Eigenschaftsänderungen von elastischen Wellen in Beton“ vorhandenen Informationen machen deutlich, dass in diesem Bereich sowohl die Beobachtung der Eigenschaftsänderungen unter Last als auch die Untersuchung der Ursachen lohnend sind. Damit liegt das Ziel der geplanten Versuchsserie in der systematischen Untersuchung und Dokumentation der Änderungen der Welleneigenschaften in Abhängigkeit von der Spannung unter Beachtung von beeinflussenden Faktoren. Vorüberlegungen zur Auswahl der zu untersuchenden Faktoren, welche den Zusammenhang beeinflussen können, sind im nächsten Kapitel beschrieben.

Obwohl die Versuchsserie zur generellen Untersuchung und Auswertung der Eigenschaftsänderung elastischer Wellen durchgeführt wurde, wird aufgrund der Fülle der gefundenen Effekte der Fokus dieser Arbeit auf die Untersuchung der Geschwindigkeitsänderung von elastischen Wellen gelegt - im Folgenden als Schallgeschwindigkeitsänderung bezeichnet - und dieses insbesondere am Beispiel der Oberflächenwellen. Zum Vergleich mit bisherigen Veröffentlichungen soll der Effekt nicht nur isoliert anhand der Oberflächenwelle betrachtet werden, sondern parallel dazu auf die üblicherweise verwendeten Ultraschallwellen ausgeweitet werden.

Ein weiteres Ziel nach der Beobachtung und Dokumentation des Effekts ist die Untersuchung der Ursachen und Wirkmechanismen, die zu einer Schallgeschwindigkeitsänderung unter einer Druckbelastung führen. Damit liegt das Ziel dieser Arbeit nicht darin, ein neues Verfahren zu entwickeln oder ein vorhandenes weiterzuentwickeln, sondern den Effekt, der als Grundlage für neue Verfahren dienen könnte, zu beschreiben und zu verstehen.

Die zur Umsetzung dieser Ziele nötigen Vorüberlegungen und die erarbeitete Vorgehensweise werden im nächsten Kapitel beschrieben.

1.4 Einflussfaktoren, Untersuchungsziel und –methodik

Wie als Ziel zuvor festgehalten, soll in dieser Arbeit der Effekt der spannungsabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderung möglichst allgemeingültig für Beton beschrieben werden. Zu diesem Zweck ist es von Vorteil, wenn der Beton ein Normalbeton mit einer häufig verwendeten Festigkeitsklasse ist, der keine speziellen Anforderungen erfüllt. Daher wird ein Beton mit der Festigkeitsklasse C30/37 und allgemein üblicher Rezeptur ohne besondere Zuschläge, Zusatzmittel und -stoffe gewählt. Dieser Beton soll zur Überprüfung der Wiederholbarkeit der Messergebnisse für die ersten drei Probekörper verwendet werden. Bei einem weiteren Probekörper soll das Größtkorn variiert werden, da anfängliche Mikrorisse vor allen Dingen an Grenzflächen zwischen der Zementmatrix und den Zuschlagkörnern entstehen, und so ein etwaiger Einfluss besonders gut untersucht werden kann. Betonbauwerke werden üblicherweise bewehrt ausgeführt, daher wird ein weiterer Probekörper mit Bewehrung erstellt und damit die Übertragbarkeit auf bewehrte Bauteile überprüft.

Für die zielführende Beobachtung der Eigenschaftsänderungen elastischer Wellen unter Belastung ist es von Vorteil, den lastsensitivsten Wellentyp, d.h. den den Effekt am feinsten abbildenden Wellentyp, zu verwenden und auf deren Eigenheiten angepasste und optimierte Versuchsaufbauten zu erstellen. Deswegen wurde in einem Vorversuch die Intensität des Einflusses der Belastung auf unterschiedliche Wellentypen, Polarisationen und Frequenzen mit unterschiedlichsten Sender-Empfänger-Konstellationen untersucht. Aus diesen Ergebnissen wurden die für die Belastung sensitivsten Wellenarten für eine Reihe von Großversuchen gewählt und spezielle der Fragestellung angepasste Versuchsaufbauten entwickelt. Besonders die, eine ausgeprägte Spannungsabhängigkeit zeigende, einfach und flexibel zu messende, Oberflächenwelle soll in dieser Arbeit beschrieben werden.

Mit den üblichen Ultraschall-Versuchsaufbauten in Durchschallung sind nur wenige Messrichtungen aufgrund geometrischer Randbedingungen von Probekörperform und Kraftaufbringung möglich. Des Weiteren sind Veränderungen der Welle beim Durchlaufen des Materials nicht beobachtbar, da Sensoren nur auf der Oberfläche platziert werden können und damit nur am Beginn und am Ende der Messstrecke gemessen werden kann, aber nicht dazwischen, d.h. im Körper. Bei Oberflächenwellen ist eine freie Positionierung der Sensoren auf der Oberfläche und damit eine beliebige Messrichtung möglich (siehe auch Kapitel 4.1). Des Weiteren können mehrere Sensoren auf einer Messstrecke Änderungen der Welleneigenschaften über deren Verlauf registrieren. Der Mehrwert dieser Art zu messen ist immens. Neben den eben genannten Vorteilen bei der Verwendung von Oberflächenwellen soll zum Vergleich parallel mit den in bisherigen Veröffentlichungen am häufigsten verwendeten Ultraschallwellen gemessen werden. Durchdringende Ultraschallwellen erlauben

nur wenige Messrichtungen, aus diesem Grund wird die Richtung mit der deutlichsten Schallgeschwindigkeitsänderung untersucht. Besonders im Hinblick auf den akustoelastischen Effekt sind die deutlichsten Änderungen für Messungen in Lastrichtung zu erwarten (vgl. Abbildung 1.2 [Saye90]). Der Einfluss der lastabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderung wird für die in der Literatur am häufigsten verwendete Wellenart, die Ultraschalllongitudinalwelle, in genau dieser Lastrichtung geführt. Hierzu wurden zwei unterschiedliche Sensorentypen in die Lasteinleitungsplatten eingelassen (25 kHz und 100 kHz Longitudinalwellen-Prüfköpfe). Die Ergebnisse der in Durchschallung geführten monodirektionalen US-Versuche werden mit den in Lastrichtung gemessenen Ergebnissen der multidirektional messbaren Oberflächenwelle verglichen und die Übertragbarkeit des Effekts überprüft.

Mit beiden Wellenarten sollen die Auswirkungen folgender Szenarien und Einflussfaktoren untersucht werden: Eine kurzzeitige Überlastung kann das innere Gefüge und damit die Tragkraft von Beton schädigen, ohne dass dieses von außen sichtbar ist. Zu untersuchen ist, ob sich diese Überlastung in den Schallgeschwindigkeitsänderungen widerspiegeln und Schädigungen im Gefüge sichtbar gemacht werden können. Hierzu werden exakt gleiche Lastzyklen vor und nach einer Überlastung untersucht und miteinander verglichen. Nicht nur der Extremfall einer Überlastung, sondern generell der Einfluss einer vorangegangenen Belastung auf die folgende Wiederbelastung soll anhand verschiedener Belastungsverläufe untersucht werden. Bei den Versuchen stellte sich ein zeitabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung sowohl während der Belastung als auch im entlasteten Zustand heraus. Der zeitabhängige Effekt wird, soweit es die Versuchsplanung zuließ, zusätzlich untersucht. Des Weiteren wird auf den schon zuvor angesprochenen Einfluss der Betonrezeptur und der Bewehrung eingegangen.

Die Vorteile einer richtungsabhängigen Beobachtung der Ausbreitung der Oberflächenwellen sollen genutzt werden, um die zuvor genannten Einflussfaktoren auch in Hinblick auf eine richtungsabhängige Ausprägung zu untersuchen.

Das durch Spannungen in einem belasteten Körper hervorgerufene bekannte Verhalten der Dehnungen und Mikrorisse legt in Verbindung mit dem akustoelastischen Effekt bzw. der Vermutung des Einflusses von Mikrorissen auf die Schallgeschwindigkeit, ein richtungsabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeit nahe: Normal- und Tangentialspannungen sind abhängig vom Winkel zur Lastrichtung, ebenso ist die Dehnung von der Spannung und somit ebenfalls vom Winkel zur Lastrichtung abhängig. Wird davon ausgegangen, dass beim akustoelastischen Effekt die Spannung bzw. Dehnung einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit hat, so müsste dieser Effekt ebenfalls richtungsabhängig sein. Gleiches gilt für die Mikrorisse, die vornehmlich an den Grenzen der Zementmatrix zu den Zuschlägen entstehen. Mit ansteigender Spannung bilden sich die Risse jedoch zunehmend in Spannungsrichtung aus. Auch bei den Rissen kann damit von einer gerichteten Charakteristik gesprochen werden, was ebenfalls eine Richtungsabhängigkeit implizieren würde. Trifft dieses zu, wären zwei Ursachen für die Schallgeschwindigkeitsänderung bekannt und würden zum weiteren Verständnis beitragen.

Für das Verständnis der Ursachen und Wirkmechanismen der Effekte wird zuerst untersucht, inwieweit die Effekte mit der linearen Theorie erklärt werden können. Danach wird die Erklärung auf die Akustoelastizität erweitert und Stoffparameter höherer Ordnung bestimmt; die Änderung der Stoffparameter bei aufeinander folgenden Lastzyklen gibt einen Hinweis

auf irreversible Vorgänge. Der akustoelastische Effekt ist im Gegensatz zur Rissbildung bisher als reversibel beschrieben worden [Hauk97]. In Versuchen mit mehreren Lastzyklen und unterschiedlichen Maximallasten dieser Zyklen werden die Schallgeschwindigkeitsänderungen auf ihre reversiblen und irreversiblen Anteile hin untersucht. In einem Nachfolgeversuch wird experimentell der Zusammenhang der irreversiblen Schallgeschwindigkeitsreduktion mit der Mikrorissbildung nachgewiesen.

1.5 Gliederung

Die Gliederung der Arbeit unterteilt sich thematisch in die folgenden Kapitel. Die elastischen Wellen und deren Eigenschaften werden in Kapitel 2 zusammengefasst. Die Zusammensetzung der Probekörper, die Belastungsverläufe und die damit verbundenen Untersuchungsziele werden in Kapitel 3 erläutert, sowie die einzelnen Elemente und Begriffe der Versuchsdurchführung definiert. Sämtliche Versuchsaufbauten und -einrichtungen werden in Kapitel 4 beschrieben.

Die an die Eigenheiten des Versuchsaufbaus und den Untersuchungszielen angepasste Laufzeitmessung wird in Kapitel 5 beschrieben; insbesondere in Hinblick auf die Funktionsweise der entwickelten automatischen Auswertung und deren Bestimmungswege zur Laufzeitmessung, welche einen Kernpunkt der Arbeit zu dieser Dissertation bilden.

In Kapitel 6 werden die Messergebnisse vorgestellt, die sich in einen Vorversuchsteil Kapitel 6.1 und einen Versuchsteil Kapitel 6.2, in dem systematisch die einzelnen Effekte untersucht werden, unterteilen lassen. Nach einer Zusammenfassung der Effekte am Ende des Kapitel 6 sollen in Kapitel 7 die Effekte auf ihre Ursachen hin untersucht werden.

In Kapitel 8 wird das Fazit der experimentellen Untersuchung gezogen und ein Ausblick auf weitere Forschungsschwerpunkte gegeben.

Im Anhang werden weitere Messungen zur Bestätigung der beschriebenen Versuche gezeigt und der Einfluss der Kalibrierung des Laservibrometers auf die Messergebnisse beschrieben.

2 Grundlagen elastischer Wellen

2.1 Schwingungen

Eine Schwingung ist die wiederholte Bewegung eines Punktes um seine Ruhelage (Abbildung 2.1). Diese Auslenkung kann durch eine Störung der Ruhelage, z. B. durch eine mechanische Anregung, wie sie einen Hammerschlag hervorruft, ausgelöst werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Anregungen sind in Kapitel 4 beschrieben. Zur Beobachtung des momentanen Schwingungszustandes eines Punktes werden folgende Parameter verwendet:

- ψ [m, V] - Auslenkung bzw. Elongation des betrachteten Punktes gemessen in m oder einer proportionalen Größe, z. B. Volt
- φ [rad] - Phasenwinkel, wobei 2π einer vollständigen Schwingung entspricht
- t [s] - Zeit

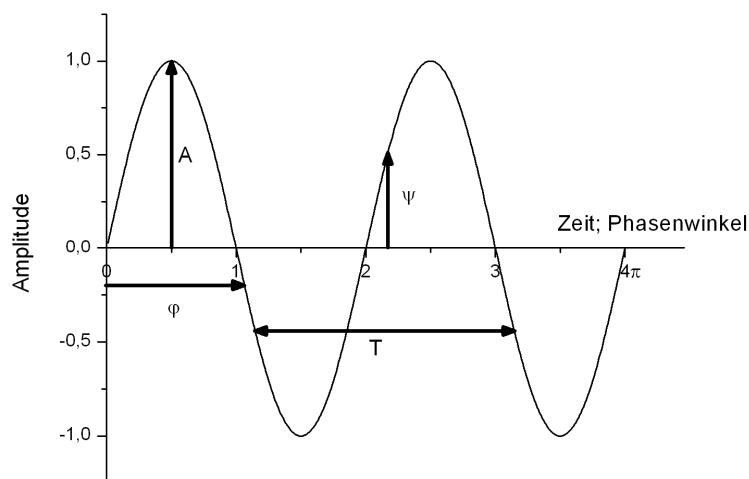


Abbildung 2.1: Schwingung eines Punktes um seine Ruhelage in Abhängigkeit von der Zeit bzw. des Phasenwinkels.

Die Kenngrößen einer Schwingung ergeben sich aus folgenden Zustandsgrößen:

- T [s] - Schwingdauer: Dauer bis der Punkt eine gleiche Position mit gleicher Bewegungsrichtung erreicht (2π)
- f [Hz] - Frequenz, der Kehrwert ist die Schwingdauer $1/T$ [1/s], die Schwingfrequenz kann zur Kreisfrequenz (ω) umgeschrieben werden:
 $\omega = f \cdot 2\pi$
- A [m, V] - Amplitude: Maximum der Elongation gemessen in m oder einer proportionalen Größe, z. B. Volt

Linear harmonische Schwingungen werden mithilfe folgender Schwingungsgleichungen beschrieben:

$$\psi = A \sin(\omega t + \varphi_0) \qquad \psi = A \sin(2\pi f t + \varphi_0) \qquad (\text{Gl. 2.1})$$

Die Phase ist die Verschiebung der Schwingung von ihrem Ausgangszustand. Der Phasenwinkel zum Zeitpunkt t ergibt sich aus:

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0 \qquad (\text{Gl. 2.2})$$

φ_0 [rad] - Nullphasenwinkel, der den Phasenwinkel zum Zeitpunkt $t = 0$ beschreibt

2.2 Wellen

Bei Wellen handelt es sich um gekoppelte Schwingungen, deren Kopplungsbedingungen je nach Medium variieren. Die im Folgenden behandelten elastischen Wellen breiten sich in Festkörpern aus, die sowohl Normal- als auch Schubkräfte übertragen können. Durch die Koppelung ist jeder schwingende Punkt Ausgangspunkt einer Elementarwelle (Huygenssche Prinzip). Wellen können mit der Wellengleichung beschrieben werden, hier für die Ausbreitung in x -Richtung:

$$\frac{\delta^2 \psi}{\delta x^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\delta^2 \psi}{\delta t^2} \qquad (\text{Gl. 2.3})$$

mit:

x [m] - Ort des betrachteten Punktes

V [m/s] - Schallgeschwindigkeit

Die Differentialgleichung kann für harmonische Wellen umgeformt werden und sowohl als eine Sinusfunktion als auch in komplexer Darstellung wiedergegeben werden:

$$\psi = A \sin 2\pi f \left(t - \frac{x}{V} \right) \qquad \psi = A e^{i 2\pi f \left(t - \frac{x}{V} \right)} \qquad (\text{Gl. 2.4})$$

Die Geschwindigkeit des Fortschreitens einer Welle im Körper wird als Schallgeschwindigkeit (V [m/s]) definiert. Der Abstand zwischen zwei Punkten mit gleicher Auslenkung und Phase wird durch die Wellenlänge (λ [m]) beschrieben. Der Zusammenhang zwischen Wellenlänge, Schallgeschwindigkeit und Frequenz bzw. Schwingdauer ergibt sich folgendermaßen:

$$V = f * \lambda = \frac{\lambda}{T} \qquad (\text{Gl. 2.5})$$

In unbegrenzten, festen, homogenen und isotropen Körpern existieren nur zwei Wellenarten - die Longitudinal- und Transversalwelle.

2.2.1 Longitudinalwellen

Bei Longitudinalwellen erfolgt die Auslenkung des Punktes bzw. des Teilchens, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, in Bewegungsrichtung. Durch die Kompression beim Aufeinander zubewegen und der Dekompression beim Entfernen ergeben sich Dichteunterschiede im Material. Das Fortschreiten von Zonen gleicher Dichte ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Longitudinalwellen (c_L) ist die größte der elastischen Wellen in einem Körper und hängt in einem unbegrenzten Körper ab von:

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (\text{Gl. 2.6})$$

mit:

V_L [m/s] - Schallgeschwindigkeit für die Longitudinalwelle

ρ [g/cm³] - Dichte

E [MN/m²] - E-Modul

ν [] - Querdehnzahl

Für Beton können folgende typische Werte angesetzt werden: $V_L = 3\,600 - 4\,600$ m/s;
 $\rho = 2,2$ g/cm³, $E = 25\,000 - 37\,000$ N/mm²; $\nu = 0,1-0,2$

Longitudinalwellen können sich in Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen ausbreiten.

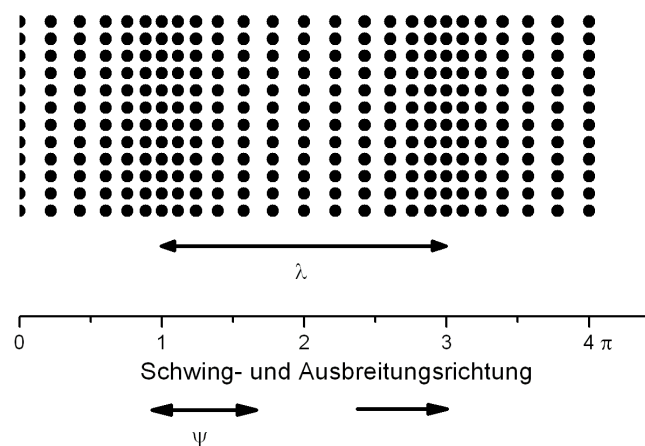


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Teilchenbewegung bei Longitudinalwellen.

2.2.2 Transversalwellen

Die Auslenkung eines Teilchens erfolgt bei Transversalwellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Im Gegensatz zu den Longitudinalwellen erfolgt die Koppelung der Teilchen über Schubkräfte. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Transversalwellen (V_T) berechnet sich in einem unbegrenzten Körper nach:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (\text{Gl. 2.7})$$

Die Transversalwellengeschwindigkeit (V_T) liegt für Beton zwischen 2 000 – 2 800 m/s.

Bei bekannter Querdehnzahl (ν) kann eine Longitudinalwellengeschwindigkeit in eine Transversalwellengeschwindigkeit umgerechnet werden:

$$V_T = V_L \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (\text{Gl. 2.8})$$

Transversalwellen treten nur in Medien auf, die Schubkräfte übertragen können. Dieses sind z. B. Festkörper wie Beton. Transversalwellen verursachen Longitudinalwellen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung.

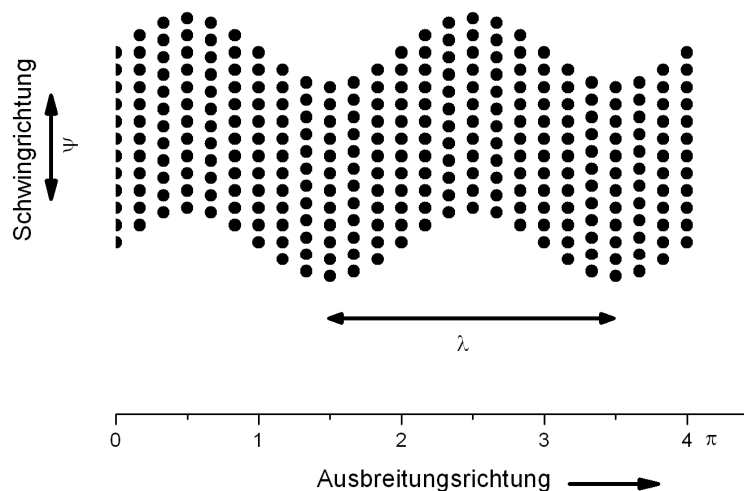


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Teilchenbewegung bei Transversalwellen.

Die Schwingrichtung der Teilchen kann bei Transversalwellen in unterschiedliche Richtungen orthogonal zur Ausbreitungsrichtung erfolgen. Diese Schwingrichtung wird Polarisationsrichtung genannt.

2.2.3 Oberflächenwellen

In begrenzten Medien treten an Grenzflächen zwischen zwei akustisch unterschiedlichen Medien, wie z. B. Oberflächen, weitere Wellenarten auf. Die an diesen Grenzschichten entlanglaufenden Wellen werden Oberflächenwellen genannt. Da die Orientierung der Oberflächen die Ausbreitungsrichtung vorgibt, werden diese Wellen auch geführte Wellen genannt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bildet die Betrachtung von Oberflächenwellen einen Schwerpunkt zur Beschreibung der Spannungsabhängigkeit von Wellen.

2.2.3.1 Rayleighwelle

Die Rayleighwelle setzt sich aus den beiden Grundwellenarten der Longitudinalwelle und der Transversalwelle zusammen. Bei der hier verwendeten akustischen Anregung, siehe Kapitel 4, ist sie die Welle mit der stärksten Amplitude. Die Geschwindigkeit der Rayleighwelle ist etwas geringer als die der Transversalwelle und kann mit der Näherungsgleichung aus der Transversalwellen- oder der Longitudinalwellengeschwindigkeit berechnet werden [Rayl85]:

$$V_R \approx V_T \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad (\text{Gl. 2.9})$$

mit V_T für Beton ca. 2 000 – 2 800 m/s und ν von -1 bis 0,5 [Rayl85]

$$V_R \approx V_L \left(\frac{\sqrt{\frac{1-2\nu}{2-2\nu}}}{1,13 - 0,16\nu} \right) \quad (\text{Gl. 2.10})$$

Aufgrund der Zusammensetzung der Welle aus Longitudinalwelle und Transversalwelle bewegen sich die Teilchen sowohl in als auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, siehe Abbildung 2.4. Die Überlagerung der beiden Bewegungsrichtungen ergibt eine retrograde Bewegung der Teilchen.

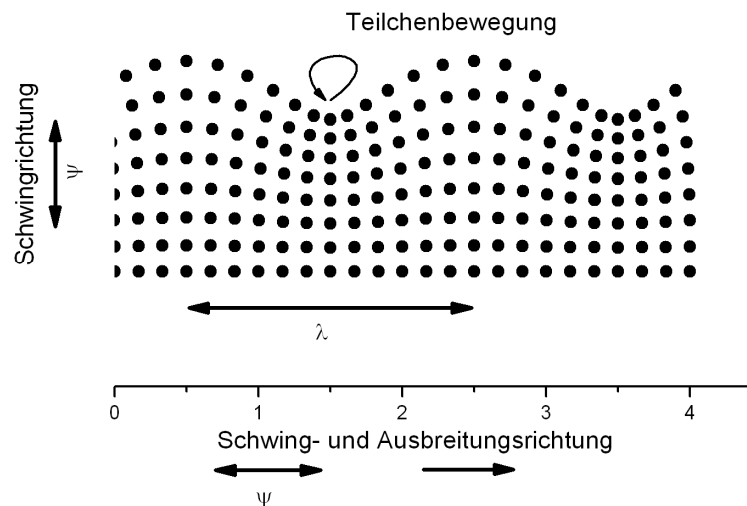


Abbildung 2.4 : Schematische Darstellung der Teilchenbewegung bei Rayleighwellen.

Die in dieser Arbeit verwendeten Sensoren zeichnen nur die Bewegungskomponente senkrecht zur Oberfläche an der Oberfläche auf. Auch wenn die Auslenkungen der Teilchen einer Rayleighwelle an der Oberfläche am größten sind, setzt sich die Auslenkung der Teilchen mit abnehmender Amplitude in den Körper fort. Die Amplituden der beiden Bewegungskomponenten der Rayleighwelle sind in Abbildung 2.5 in Abhängigkeit von der Tiefe abgetragen.

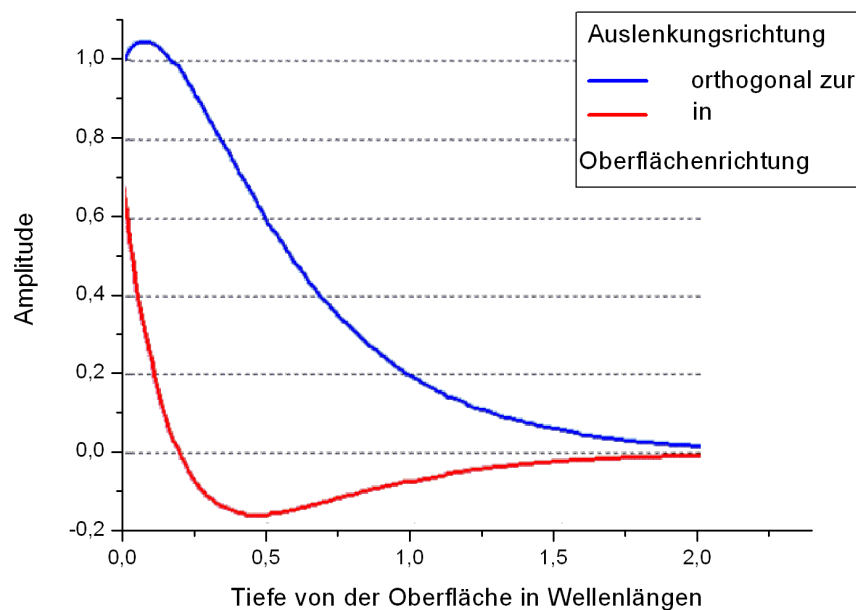


Abbildung 2.5 : Auslenkung der Teilchen beim Durchgang einer Oberflächenwelle in Oberflächenrichtung (rot) und senkrecht zur Oberfläche (blau) über der Eindringtiefe bezogen auf die Wellenlänge, simuliert (modifiziert abgebildet nach [\[Rich70\]](#)).

In Abbildung 2.5 ist auf der x-Achse die Eindringtiefe auf die Wellenlänge bezogen. Dieses bedeutet, dass Wellen mit einer größeren Wellenlänge tiefer in den Körper eindringen und Wellen mit einer niedrigeren Wellenlänge eine geringere Eindringtiefe besitzen. Aus Abbildung 2.5 geht damit hervor, dass hochfrequente Wellen eine geringere Eindringtiefe besitzen als niederfrequente Wellen. Abbildung 2.5 folgend können Veränderungen in tieferen

Schichten nur durch Wellen mit höheren Eindringtiefen, d.h. mit geringeren Frequenzen, wahrgenommen werden, während kurzwellige, höherfrequente Wellen durch diese Schichten nicht beeinflusst werden. Wird eine Änderung der Wellengeschwindigkeit hervorgerufen, die von der Frequenz bzw. Wellenlänge abhängig ist, so wird von Dispersion gesprochen. Durch eine Schichtung im Körper, bei denen die Schichten unterschiedliche akustische Eigenschaften aufweisen, kann Dispersion ausgelöst werden. Dank dieser Eigenschaften von dispergierenden Oberflächenwellen können Aussagen über unterschiedliche akustische Eigenschaften in der Tiefe aufgelöst werden.

2.2.3.2 Kriechwelle

Die Kriechwelle ist eine durch Querdehnung entstehende Auswölbung aus der Oberfläche, die durch die unter der Oberfläche entlanglaufenden Longitudinalwelle hervorgerufen wird. Beide besitzen damit die gleiche Geschwindigkeit. Die Auslenkung einer Kriechwelle senkrecht zur Oberfläche ist sehr gering und damit einhergehend die vom Sensor aufgezeichnete Intensität. Dieses macht die Bestimmung der Kriechwellenlaufzeit mit den vorhandenen Sensoren äußerst schwierig, da die Kriechwelle je nach Sensortyp sogar vollständig im Rauschen verschwindet. Aus diesem Grund werden die Kriechwellen in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Aufgrund der langsameren Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwelle (Rayleighwelle) ist es für die Probekörperdimensionierung wichtig, die Störeinflüsse durch etwaige reflektierte Wellen zu kennen und damit Überlagerungen zu vermeiden.

2.3 Reflexion von Wellen

Um für den jeweiligen Wellentyp die korrekte Laufzeit zu bestimmen, dürfen sich die verschiedenen Wellentypen nicht überlagern. Im unbegrenzten Halbraum würden sich die Wellen stetig von der Anregung fortbewegen. Treffen Wellen auf Grenzschichten mit unterschiedlichen akustischen Eigenschaften, wird ein Teil der Welle reflektiert und ein Teil der Welle transmittiert. Bei den hier geführten Versuchen handelt es sich um die Grenzschicht von Beton zu Luft.

Die Einflussgrößen, die für die Reflexion und Transmission maßgebend sind, sind die Dichte und die Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium. Sie werden zum Wellenwiderstand $Z = \rho V$ zusammengefasst (Z [kg/m²s]). Aus dem Wellenwiderstand wird der Reflexions- (R) und Transmissionsfaktor (T_r) folgendermaßen bestimmt Krautkrämer [Krau86]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \qquad T_r = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \qquad \text{(Gl. 2.11)}$$

mit:

$Z_1; Z_2$ [kg/m²s] - Wellenwiderstand des Ausgangsmediums Z_1 ; des angrenzenden Mediums Z_2

Da Luft keine Transversalwellen übertragen kann, wird die Transversalwelle komplett reflektiert. Werden die typischen Werte für Beton $\rho_B = 2250 \text{ kg/m}^3$, $V_B = 4000 \text{ m/s}$ und Luft $\rho_L = 1,204 \text{ kg/m}^3$, $V_L = 343,4 \text{ m/s}$ eingesetzt, so wird die Longitudinalwellen reflektiert zu:

$$Z_1 = 2250 \text{ kg/m}^3 * 4000 \text{ m/s} = 9 * 10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

$$Z_2 = 1,204 \text{ kg/m}^3 * 343,4 \text{ m/s} = 413 \text{ kg/m}^2\text{s} \text{ (Luft)}$$

$$R = \frac{413 - 9 * 10^6}{413 + 9 * 10^6} = 0,9999 \quad \text{entspricht } 99,99 \%$$

Dies bedeutet, dass an der Grenzschicht von Beton zu Luft die Transversalwelle, die Oberflächenwelle und die Longitudinalwelle (fast) vollständig reflektiert werden. Da die reflektierten Wellen nicht wesentlich geschwächt werden, ist es besonders wichtig, eine Überlagerung der reflektierten Wellen mit der zu messenden Oberflächenwelle zu vermeiden bzw. auszuschließen. Diese Überlagerung wird durch ausreichende Abstände zu den reflektierenden Grenzflächen gewährleistet. Hierzu erfolgten mehrere Rechnungen, um sicherzustellen, dass bei der gewählten Probekörpergeometrie die Oberflächenwelle an allen Messpunkten die zuerst eintreffende ist (vergleiche auch Kapitel 3.2).

2.4 Charakterisierung von Wellen

Im Allgemeinen können Wellen mit ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit, Amplitude und dem Frequenzgehalt beschrieben werden. In dieser Arbeit wurde die Beschreibung der Spannungsabhängigkeit von Welleneigenschaften auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit beschränkt. Die Methodik zur Ausbreitungsgeschwindigkeitsbestimmung bzw. Laufzeitbestimmung wird in Kapitel 5.1 detailliert beschrieben. Auf die Welleneigenschaften Amplitude und Frequenzgehalt wird daher an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

2.5 Anregung von elastischen Wellen

Zur Erzeugung elastischer Wellen im Betonbauteil wird üblicherweise an einer Stelle die Bauteiloberfläche durch eine Anregung aus der Ruhelage gebracht und damit elastische Wellen ins Bauteil emittiert. Damit können alle im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Wellen erzeugt werden.

Im Wesentlichen wird dabei zwischen zwei Anregungstypen unterschieden, die Anregung mithilfe eines Impaktors sowie eine piezoelektrische Anregung. Bei der Anregung mithilfe eines Impaktors wird ein kleiner Hammer oder eine Kugel (Impaktor) auf die Bauteiloberfläche geschlagen und somit ein Impuls mit einer halbsinuswellenförmigen Zeit-Kraft-Funktion erzeugt. Die Kontaktzeit kann nach Sansalone [Sans97] beim Aufprall einer Kugel auf eine Betonoberfläche angegeben werden mit:

$$t_c = 0,0043 \frac{D}{h^{0,1}} \quad (\text{Gl. 2.12})$$

mit:

t_c [s] - Kontaktzeit

D [m] - Kugeldurchmesser

h [m] - Fallhöhe

Dieser Einschlag emittiert ein breites Frequenzspektrum in das Bauteil. Der Frequenzumfang, präziser die maximal für das Impakt-Echo-Verfahren (IE) auswertbare Frequenz $f_{\max}$ - Diese für das IE-Verfahren getroffene Einschätzung wird für die Beispielrechnungen hier übernommen. - hängt von der Kontaktzeit t_c der Kugel mit der Betonoberfläche ab und wird nach Sansalone [Sans97] in Abhängigkeit von der Kontaktzeit angegeben mit:

$$f_{\max} = 1,25/t_c \quad (\text{Gl. 2.13})$$

mit:

$f_{\max}$ [Hz] - maximal auswertbare Frequenz

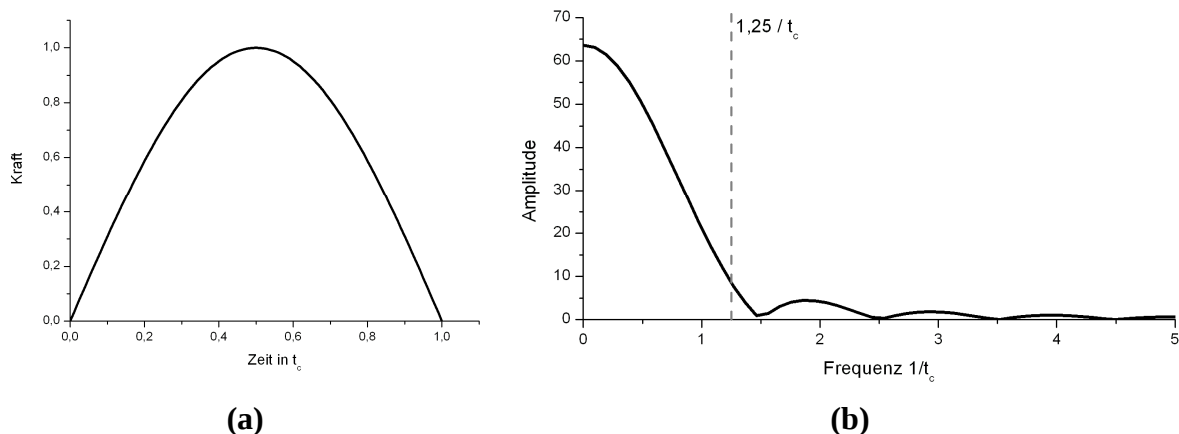


Abbildung 2.6: (a) Zeit-Kraft-Funktion des Kugelaufpralls und (b) Frequenzspektrum der Zeit-Kraft-Funktion.

Diese breitfrequente Anregung wird vornehmlich für das Impakt-Echo-Verfahren verwendet. Aufgrund der zum Beschleunigen des Impaktors benötigten Mechanik, wie z. B. kleine Elektromotoren oder Federn bzw. variierende Abstände des Impaktors zur Oberfläche, ist dieser Anregungstyp für Laufzeitmessungen nicht ausreichend zeitgenau. Die kugelförmige Abstrahlcharakteristik, die Tatsache, dass bei derartigen Anregungen ca. 80 % der Energie als Oberflächenwelle abgegeben werden und der breitbandige Frequenzgehalt sind Vorteile der mechanischen Anregung zur Messung von Oberflächenwellen. Der Nachteil hinsichtlich einer nicht ausreichend zeitgenauen Auslösung des Impakts kann durch eine Messung mit mehreren Sensoren in einer Reihe eliminiert werden. Anregungen mit einem mechanischen Einschlag wurden beim Sensorenarray sowie bei der Zwei-Sensoren-Messwerterfassung realisiert und werden im Kapitel 4.3 und 4.4 näher beschrieben.

Bei der piezoelektrischen Anregung wird durch das Anlegen einer Spannung an einen Piezokristall dieser zum Schwingen gebracht. Bei einer bestehenden akustischen Kopplung mit dem Bauteil wird die Schwingung vom Sender in das Bauteil übertragen und eine elastische Welle emittiert. Die piezoelektrische Anregung ist im Gegensatz zur vorher beschriebenen mechanischen Anregung zeitgenau und wird vornehmlich für Laufzeitmessungen verwendet, wie z. B. Ultraschall. Für diese Art der Anregung ist es üblich, einen kurzen und scharfen elektrischen Puls auf den Piezokristall zu geben, der die Bestimmung der Laufzeit durch eine steile Flanke präziser gestattet. Bei einer dauerhaften Kopplung werden nach dem Puls die Eigenschwingungen des Senders weiterhin in das Bauteil übertragen. Der Nachteil dieser Anregung ist deren Monofrequenz, die vom verwendeten Sender und Anregungspuls abhängig ist. Für die hier vorgestellten Versuche wurden zwei US-Anregungen mit einer Mittenfrequenz von 25 kHz und 160 kHz verwendet. Mit beiden Anregungen wurde die Longitudinalwellengeschwindigkeit klassisch in Durchschallung gemessen. Der eingesetzte Ultraschall-Versuchsaufbau wird in Kapitel 4.5.2 beschrieben.

Zur Kombination der Vorzüge beider Anregungen wurde ein Laservibrometer-Versuchsaufbau erstellt, bei dem ein Linearmotor für die Anregung verwendet wird. Dieser Linearmotor simuliert die Kraft-Zeit-Funktion, wie in Abbildung 2.6 abgebildet, und damit einen zeitkonstanten Kugeleinschlag. Der Versuchsaufbau wird in Kapitel 4.2 detailliert beschrieben.

Für eine präzise Bestimmung der Laufzeit ist eine exakte Bestimmung der Vorlaufzeit unabdingbar. Diese wurde für jeden Versuchsaufbau, Anregungsparameter und jedes Auswertekriterium separat ermittelt und in der Auswertung berücksichtigt.

3 Planung der Versuchsserie

3.1 Fragestellungen

Die zuvor von Feldmann [Feld07] an der BAM durchgeführten Versuche, bei denen an kleinen Probekörpern gemessen wurde, zeigten einen weiteren Untersuchungsbedarf für den Zusammenhang von Druckbelastung und Schallgeschwindigkeitsänderung. Aus diesem Grund wurde eine Versuchsserie geplant, die in diesem Kapitel in ihrer Durchführung und im Aufbau beschrieben werden soll und sich aus folgenden Fragestellungen heraus ergeben hat:

- Sind die Ergebnisse der Voruntersuchung auf Probekörper anderer Größe übertragbar?
- Welche Wellenarten sind besonders sensitiv für eine Spannungsänderung?
- Welchen Einfluss hat eine vorangegangene Belastung auf die Schallgeschwindigkeitsänderung in folgenden Belastungszyklen?
- Wie ändert sich die Schallgeschwindigkeit bei und nach einer Überlastung?
- Lassen sich die Effekte auf andere Betone oder bewehrte Probekörper übertragen?
- Folgt aus dem anisotropen Verhalten von Beton unter Last ein richtungsabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeit?

Um diese Fragestellungen angemessen untersuchen zu können, mussten für die Versuchsserie neue Versuchsaufbauten erstellt werden, die in Kapitel 4 beschrieben werden. Besonders die richtungsabhängige Untersuchung der Schallgeschwindigkeit erforderte aufwändige Versuchsaufbauten, aus denen gewisse Mindestanforderungen an die Probekörpergröße und damit an die Prüfmaschine resultierten. Im folgenden Kapitel wird auf die nötige Mindestgröße eingegangen und in Kapitel 4.8 die für diese Größe benötigte Druckprüfmaschine beschrieben. Der verwendete Beton zur Probekörperherstellung sollte keine speziellen Eigenschaften erfüllen, sondern für die hier durchgeführten ersten Versuche zur generellen Untersuchung der spannungsabhängigen Effekte möglichst allgemeingültig sein. Die Rezepturen sind in Kapitel 3.3 dokumentiert.

Die für den jeweiligen Probekörper festgelegten Untersuchungsschwerpunkte, welche aus den zuvor genannten Fragestellungen bestimmt wurden, werden in Kapitel 3.5 beschrieben. Die aus diesen Untersuchungszielen abgeleiteten Versuchsabläufe sind in grafischer Form im gleichen Kapitel 3.5 dargestellt. Die Versuchsabläufe bestehen aus immer wiederkehrenden Elementen, welche in dem vorangestellten Kapitel 3.4 beschrieben werden.

3.2 Größe der Probekörper

Um die Laufzeit mit dem erstellten Messequipment angemessen bestimmen zu können, musste die Messstrecke eine gewisse Mindestdistanz aufweisen. In Vorversuchen ergab sich eine Mindestdistanz für die Laufzeitmessung für den Laservibrometer-Versuchsaufbau, der bei den Versuchen der Größenbestimmung war, von 10 cm. Um beim Laservibrometer-Versuchsaufbau Änderungen in den Welleneigenschaften, wie z. B. des Frequenzgehalts zu untersuchen, müssen zwei Messpunkte nacheinander gemessen werden. Damit sind ein Mindestradius von 20 cm und ein Durchmesser für die zu messende Fläche von 40 cm

vorgegeben. Die untersuchte Oberflächenwelle ist langsamer als die Longitudinalwelle und die dazugehörige, an der Oberfläche mitlaufende, Kopfwelle (siehe Kapitel 2.2). Reflexionen dieser Wellen dürfen nicht vor der Rayleighwelle an den Messpunkten ankommen, da eine Überlagerung der verschiedenen Wellenarten bei unterschiedlichen Laufwegen das Ergebnis verfälschen würde. Eine Mindestdiefe von 40 cm bis zur Rückwand und eine Minstdistanz von 30 cm bis zum nächsten Rand gewährleistet dieses. Die Probekörpergröße wurde auf $60 \times 40 \times 100 \text{ cm}^3$ (B, T, H) festgelegt.

3.3 Zusammensetzung der verwendeten Betone

Als Druckfestigkeitsklasse für den Beton der Probekörper (PK) wurde die in der Praxis häufig verwendete Druckfestigkeitsklasse c 30/37 gewählt. Als Zement wurde ein reiner Portlandzement (CEM I) verwendet. Der Wasser-Zementwert betrug 0,55. Üblicherweise wird Beton mit einem Größtkorn von 32-64 mm verwendet. Liegt die Wellenlänge im Bereich der Größe des Zuschlagskorns, streuen diese die elastischen Wellen, damit wird das Messsignal beeinflusst und geschwächt. Hohe Frequenzen werden durch die Tiefpassfiltereigenschaften von Beton eliminiert. Um derartige Effekte zu vermeiden, ist es im Labor üblich, das Größtkorn auf 16 mm zu begrenzen, die Grenzfrequenz bei diesem Beton lag bei ca. 125 kHz. Der Größtkorndurchmesser beträgt für den ersten bis vierten Probekörper 16 mm und für den fünften Probekörper 4 mm. In einer ersten Charge wurden der erste und zweite Probekörper hergestellt, in einer zweiten Charge, nach dem gleichen Mischungsentwurf, der dritte und vierte Probekörper und in einer dritten Charge der fünfte Probekörper. Aufgrund des kleineren Größtkorns ist der Zementanspruch beim fünften Probekörper höher, siehe Tabelle 1. Zur Herausarbeitung des Zusammenhangs zwischen Mikrorissentstehung und Schallgeschwindigkeitsänderung wurde ein Nachfolgeversuch mit einem Probekörper (AEPK vgl. Kapitel 3.5.6) der Größe $20 \times 20 \times 60 \text{ cm}^3$ und applizierten Akustische-Emission-Versuchsaufbau durchgeführt. Dieser Probekörper bestand aus Beton mit dem gleichen Mischungsentwurf wie er beim ersten bis vierten Probekörper verwendet wurde.

Tabelle 1: Mischungsentwurf für die verwendeten Probekörper.

	1-4.PK und AE	5.PK
Zement in kg/m^3	330	400
Wasser in kg/m^3	180	220
Sieblinie	B16	A/B4
Zuschlag in kg/m^3	1816	1613

Bei den Probekörpern aus Normalbeton war der erste bis dritte Probekörper unbewehrt und der vierte Probekörper bewehrt. Die Druckfestigkeit wurde nach 28 Tagen bestimmt und sind mit der Rohdichte sowie dem Alter bei Versuchsbeginn in Tabelle 2 eingetragen.

Tabelle 2: Druckfestigkeit der Probewürfel, Rohdichte und Versuchsbeginn nach Herstellung der Probekörper.

Probekörper	Druckfestigkeit nach 28 Tagen in N/mm ²	Rohdichte in g/cm ³	Versuchsbeginn nach Herstellung in Jahre/Monate/Tage
1	42,1	2,25	0/01/01
2	42,1	2,25	1/04/04
3	42,6	2,29	0/05/20
4	42,6	2,29	0/10/16
5	38,3	2,17	0/08/21
AE	42,8	2,31	0/03/15

3.4 Elemente der Versuchsdurchführung

Der Versuchsablauf an einem Probekörper bestand aus mehreren wiederkehrenden Elementen, die im Folgenden beschrieben werden:

Lastzyklus (LZ): Als Lastzyklus wird in dieser Arbeit eine Belastung mit folgender Entlastung oder Bruch bezeichnet. Zumeist konnte ein Lastzyklus an einem Messtag stattfinden. Eine Ausnahme bildet der jeweils letzte Lastzyklus. Bei ca. 80 % der Bruchlast wurden alle Versuchsaufbauten bis auf den Laservibrometer-Versuchsaufbau und den Ultraschall-Versuchsaufbau entfernt. Die Demontage fand über Nacht statt (Ausnahme 5.PK). Am darauffolgenden Tag wurden die Messungen bei der zuletzt gemessenen Last minus einer geringen Überlappung mit den verbleibenden Versuchsaufbauten fortgesetzt. Die Belastung bis ca. 80 % und die darauffolgende Belastung bis zum Bruch wurde zu einem Messzyklus zusammengefasst, da weder bei der Entlastung noch bei der Wiederbelastung gemessen worden ist. Die wesentliche Kenngröße eines Lastzyklus stellt die erreichte Maximallast dar.

Laststufe (LSt): Während der Belastung und Entlastung wurde die Last für die Messungen alle 500 kN konstant gehalten. Diese für die Messungen eingestellten Lastniveaus werden als Laststufe bezeichnet. An Tagen mit besonders großer Laststufenanzahl wurden, um die Messung an einem Tag durchführen zu können, teilweise die Schritte auf 1000 kN erhöht. Während einer Laststufe fand jeweils ein Messzyklus statt. Die Laststufennummer ermöglicht

die eindeutige Zuordnung der Last bzw. der Messwerte zur Position im jeweiligen Lastverlauf. Die wesentliche Kenngröße ist die Last.

Messzyklus (MZ): Nachdem die gewünschte Last in der jeweiligen Laststufe erreicht worden ist, wurde diese für ca. 20 min konstant gehalten. Während dieser Zeit wurden in der immer gleichen Abfolge die einzelnen Versuche mit folgender Reihenfolge durchgeführt: Zuerst die Messungen mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau gefolgt vom linearen Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau, den US-Versuchen und den Messungen mit dem Sensorenarray. Nach erfolgten Messungen wurde die nächste Laststufe angefahren. Das Anfahren einer Laststufe dauerte ca. 1,5 min.

3.5 Untersuchungsschwerpunkte und Belastungsverläufe

Die Belastungsverläufe sind aus den eben beschriebenen Elementen aufgebaut und werden in diesem Kapitel mit den Untersuchungsschwerpunkten vorgestellt. Zu Beginn einer jeden Auswertung werden die Belastungsverläufe bzw. Verlaufsteile, auf die sich die jeweilige Diskussion bezieht, repetiert. In den Belastungsverläufen ist die Druckkraft (Last) über der Laststufe abgetragen. Um die Abszisse proportional zur Last bzw. Bruchlast in % zu halten wurden bei Lastschritten von 1000 kN zwei Laststufen eingetragen. Bei der übersprungenen Laststufe ist kein Balken eingezeichnet, der die Last bzw. Bruchlast in % angibt. Wurden die Lastschritte zur besseren Auflösung unter 500 kN gesenkt, sind diese als halbe Laststufen eingetragen.

3.5.1 Erster Probekörper (1.PK)

In der geplanten Versuchsserie nimmt der erste Probekörper die Stellung eines Vorexperimentes ein, da etliche Versuche nur an diesem Probekörper lediglich zur Optimierung der weiteren Versuche durchgeführt wurden.

Insbesondere sollte geprüft werden, ob sich die neuen Versuchsaufbauten bewähren und ob weitere aufwändige Versuchsaufbauten, bspw. das Einlassen von US-Sensoren in die Lasteinleitungsplatten, gerechtfertigt sind. Dieses war insbesondere in Hinblick auf die Messbarkeit der Richtungsabhängigkeit der Fall (Erstellen des Array-Versuchsaufbaus). Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die verwendete Probekörperdimension und die Lastsensitivität unterschiedlicher Wellentypen waren weitere Untersuchungspunkte. Die verwendeten Aufbauten und Wellentypen sind in Kapitel 4.5.1 beschrieben.

Der Belastungsverlauf wurde am ersten Probekörper bewusst einfach gewählt in Form einer Belastung bis zum Bruch bei einer vorangegangenen Belastung bis 3,5 MN, bei der untersucht werden sollte, ob ein Unterschied zwischen der Erst- und der Wiederbelastung besteht.

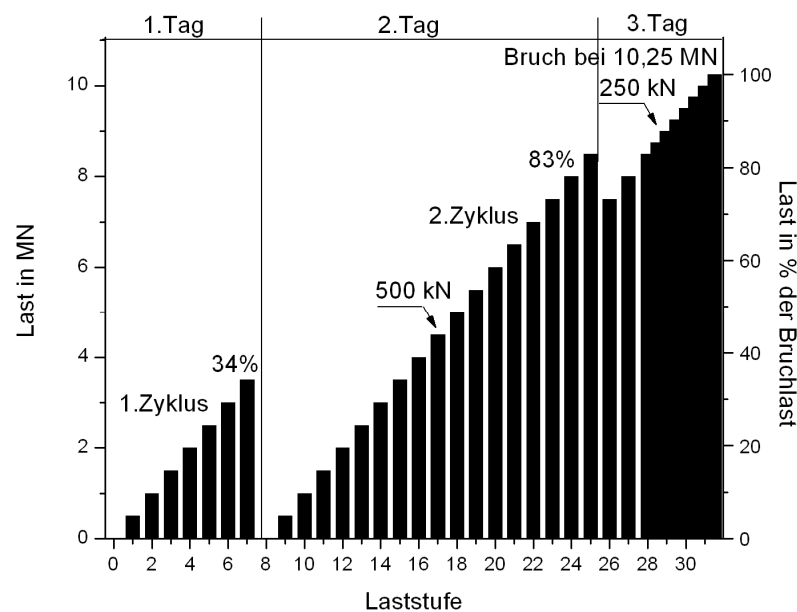


Abbildung 3.1: 1.PK mit 2 LZ, nach LSt 25 wurden die zerstörungsgefährdeten Versuchsaufbauten abgebaut.

3.5.2 Zweiter Probekörper (2.PK)

Die Ziele am zweiten Probekörper dienten hauptsächlich der Bestätigung der Ergebnisse des ersten Probekörpers, inwieweit diese reproduzierbar sind. Im Gegensatz zum Belastungsverlauf am ersten Probekörper wurde am zweiten Probekörper auch bei der Entlastung gemessen. Bei den Versuchen an diesem Probekörper stellte sich heraus, dass die Lasteinleitungsplatten nicht planparallel zur Probekörperoberkante waren. Die daraus resultierende außermittige Belastung konnte jedoch bei der Auswertung der Messungen eindeutig bestätigt werden.

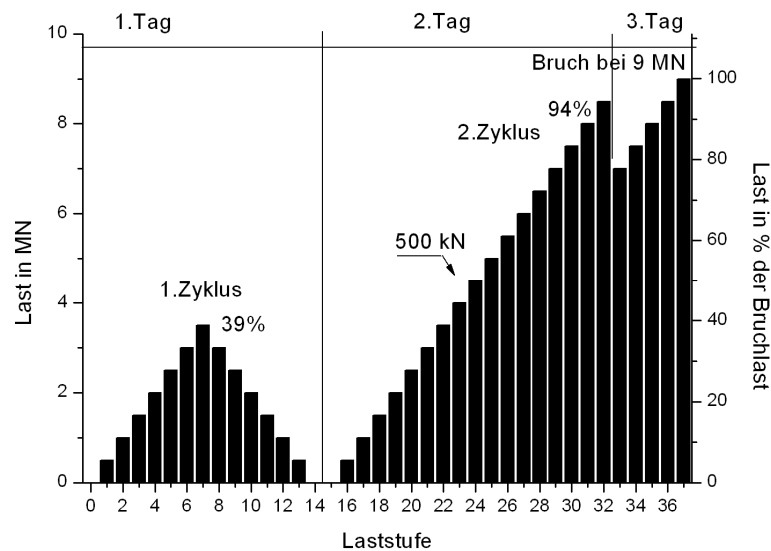


Abbildung 3.2: 2.PK mit 2 LZ; nach LSt 32 wurden die zerstörungsgefährdeten Versuchsaufbauten abgebaut.

3.5.3 Dritter Probekörper (3.PK)

Das Hauptuntersuchungsziel bei diesem Probekörper bestand darin, dem Probekörper eine Überlastung, d.h. eine Belastung oberhalb der Dauerstandsfestigkeit aufzuzwingen, die nur durch die kurze Zeit des Aufbringens nicht zum Zerschlagen führt. Nach einer derartigen Belastung ist die Mikro- als auch Makrorissbildung derart fortgeschritten, dass der Probekörper, obwohl er noch als ganzes erscheint, erheblich geschädigt ist. Der bei allen Probekörpern zuerst durchgeführte Lastzyklus bis 3,5 MN wurde nach der Überlastung wiederholt, um die Auswirkungen der Überlastung zu dokumentieren und der Frage nachzugehen, ob eine vorangegangene Schädigung des Betons im Nachhinein erkannt werden kann. Im vierten Lastzyklus wurde der Probekörper bis zum Bruch belastet. Ein weiterer Vorteil der Belastung bis zum Lastmaximum ohne Zerstörung ist, dass alle Versuchsaufbauten am Probekörper appliziert bleiben konnten. Eine derartige Belastung bis zum Maximum muss genau kontrolliert werden. Ein Brechen des Probekörpers, welches die in der Prüfmaschine durch Verformungen gespeicherte Energie schlagartig freisetzt, lässt den Probekörper quasi explodieren (Siehe Abbildung 4.15). Eine Belastung in diesen Lastbereich wurde wegen des hohen Beschädigungsrisikos für die Messsensorik bei den nachfolgenden Experimenten nicht wiederholt.

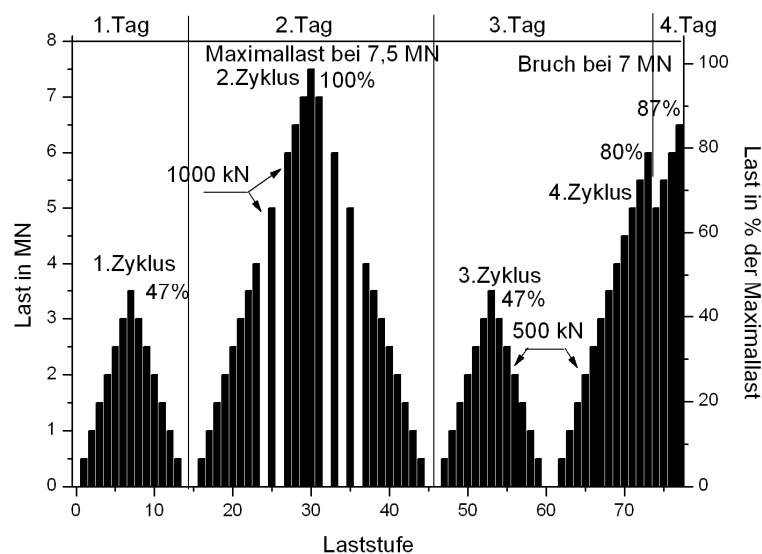


Abbildung 3.3: 3.PK mit 4 LZ, nach LSt 73 wurden die zerstörungsgefährdeten Versuchsaufbauten abgebaut.

3.5.4 Vierter Probekörper (4.PK)

Der überwiegende Anteil von Betonbauteilen wird als Stahlbeton, also mit Bewehrung, ausgeführt. Ziel der Untersuchung am vierten Probekörper ist die Übertragbarkeit der an unbewehrtem Beton gefundenen Erkenntnisse auf bewehrten Beton. Durch die Bewehrung wird der Lastabtrag des Probekörpers dahingehend verändert, dass die Bewehrung in Lastrichtung Druckkräfte aufnimmt und den Beton entlastet. Die einen inhomogenen Spannungszustand hervorrufende Lasteinleitung in die Längsbewehrung liegt beim Probekörper jeweils in den Ecken außerhalb der für die Messungen herangezogenen Bereiche.

Diese Art der Bewehrung wurde konstruktiv berücksichtigt, jedoch mit einem für Stützen untypischen geringen Durchmesser von 12 mm. Damit ist ein Einfluss auf die Effekte hervorgerufen durch die Längsbewehrung nicht zu erwarten. In die senkrecht zur Längsbewehrung verlegte Bügelbewehrung wird aufgrund der Querdehnung (Ausdehnung orthogonal zur Last) eine Zugspannung eingetragen. Diese wiederum vermindert die Querdehnung und ändert damit den Spannungszustand, sodass ein Querdruck aufgebaut wird. Bewehrung verursacht immer eine Diskontinuität sowohl in den akustischen Eigenschaften als auch im Spannungszustand. Um den Einfluss der Bewehrung möglichst gleichmäßig über die Messfläche zu verteilen, wurden Bügel mit einem geringen Durchmesser von 6 mm gewählt und der Bewehrungsabstand auf 5 cm begrenzt.

Der erste und dritte Lastzyklus wurde wie zuvor bis 3,5 MN ausgeführt. Der zweite Lastzyklus wurde aus Gründen des hohen Risikos (vgl. Kapitel 3.5.3) auf 5,5 MN begrenzt. Im vierten Lastzyklus wurde der Probekörper bis 7 MN belastet, danach die Sensorik demontiert und mit einer kleinen Überlappung von 1 MN bis zum Bruch belastet.

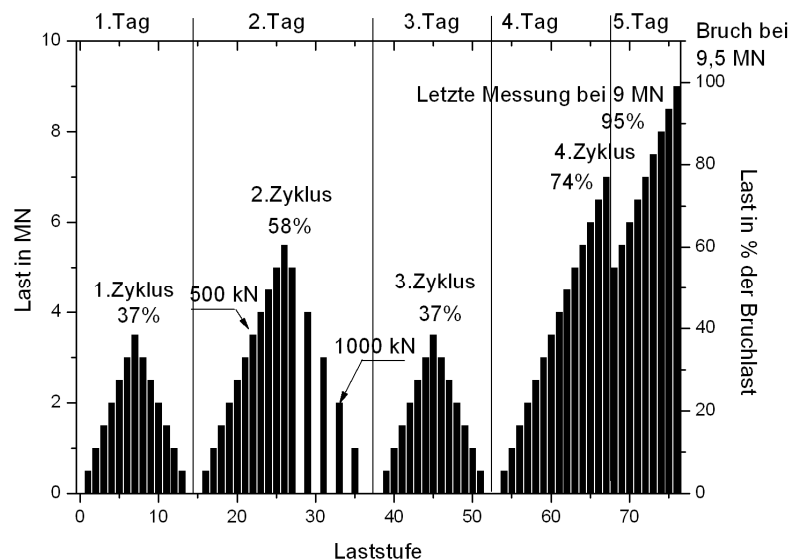


Abbildung 3.4: 4.PK mit vier LZ, nach LSt 67 wurden die zerstörungsgefährdeten Versuchsaufbauten abgebaut.

3.5.5 Fünfter Probekörper (5.PK)

Die Übertragbarkeit des Effekts in Abhängigkeit vom Größtkorn stand bei diesem Probekörper im Vordergrund. Dazu wurde das Größtkorn auf 4 mm begrenzt. In bisherigen Veröffentlichungen ist ebenfalls an Mörtelproben mit geringen Größtkorn gemessen worden [Nogu01]. Die genaue Rezeptur ist in Kapitel 3.3 hinterlegt. Insbesondere die Änderung des Größtkorndurchmessers könnte einen Einfluss auf den Effekt haben, da diese sowohl eine veränderte Mikrorisstruktur zufolge hat (Mikrorisse bilden sich zu Belastungsbeginn vor allem an Korngrenzen aus.), als auch ein abweichendes Verformungsverhalten hervorruft (Betone mit einem geringen Größtkorndurchmesser haben die Eigenschaft einer größeren plastischen Verformung.) Beides könnte einen Einfluss auf die Schallgeschwindigkeitsänderung haben. Des Weiteren werden die elastischen Wellen an den

Korngrenzen reflektiert und gestreut; auch dieses kann durch die Wahl eines kleineren Größtkorns minimiert werden.

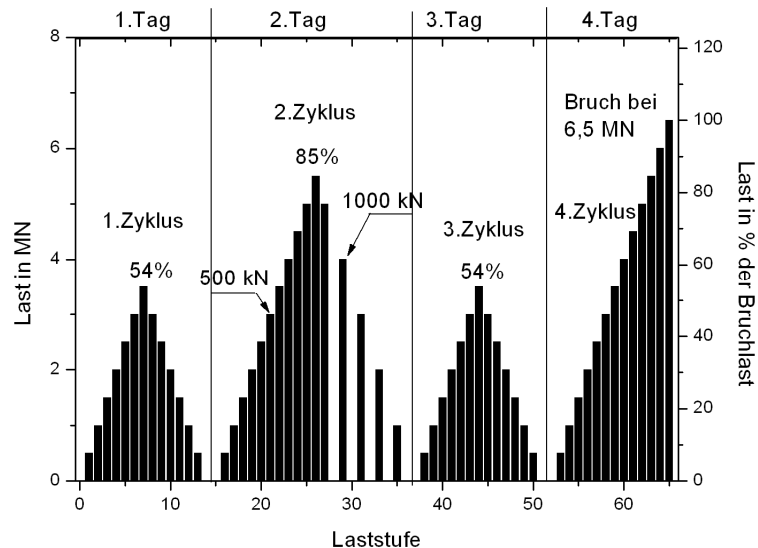


Abbildung 3.5: 5.PK mit 4 LZ, nach LSt 51 wurden die zerstörungsgefährdeten Versuchsaufbauten abgebaut.

Der Belastungsverlauf entspricht bis auf den 4.LZ dem des 4.PK. Im 4.LZ wurde der gesamte Messzyklus ohne fest angekoppelte Sensoren gemessen.

3.5.6 Akustische-Emission-Probekörper (AEPK)

Je nach Stärke einer Belastung unterscheiden sich die Rissentstehungs- und Wachstumsphasen. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit zeigte in den Versuchen deutliche Koinzidenzen zu den beobachteten und allgemein bekannten Phasen der Rissentstehung und -wachstum. Im Verlauf der Versuchsserie wurde immer deutlicher, dass eine simultane „Rissmessung“ für die Identifikation des Zusammenhangs zwischen der Änderung der Schallgeschwindigkeit und der Rissbildung von großem Wert ist, da insbesondere eine Reduktion der Schallgeschwindigkeit den Mikrorissen zugeschrieben wird. Zur Messung des Risswachstums und -entstehung wurde das Akustische-Emissions-Verfahren (AE; siehe Kapitel 4.7), oder auch Schallemission-Verfahren genannt, verwendet, welches hohe Ansprüche an die akustischen Eigenschaften der Prüfmaschine stellt. Die Groß-Prüfmaschine (GPM; siehe Kapitel 4.8) erzeugt für AE-Messungen zu viele Störgeräusche und konnte daher nicht verwendet werden. Aus diesem Grund wurde eine kleinere Prüfmaschine mit geringerer Geräuscentwicklung ausgewählt. Die Probekörpergröße und die Anzahl der bisher applizierten Versuchsaufbauten konnte damit nicht beibehalten werden, sodass die Größe auf 20*20*60 cm³ reduziert wurde. Bei dieser reduzierten Probekörpergröße war nur noch die Messung in Lastrichtung möglich. Diese Messungen wurden mit dem Sensorenarray-Versuchsaufbau bei veränderter Sensoranordnung durchgeführt. Durch den geringeren Messaufwand war eine Erhöhung der Lastzyklenzahl möglich. Aufgrund der geringeren Größe und damit verbundenen Bruchlast wurden die Laststufen für die Belastung

4 Messapparaturen und Geräte

4.1 Messmethoden

Ziel dieser Arbeit ist es, die durch unterschiedliche Belastungen hervorgerufenen Veränderungen der Welleneigenschaften beim Durchlaufen des Probekörpers herauszuarbeiten und die im Kapitel zuvor beschriebenen Untersuchungsziele umsetzen zu können. Insbesondere soll ein Augenmerk auf die Oberflächenwellen gelegt werden, da diese zum Einen eine deutliche Empfindlichkeit für eine Spannungsänderung besitzen sowie zum Anderen einseitig an der Oberfläche gemessen werden können (siehe Abbildung 4.1). Bei der Oberflächenwellenmessung wird damit im Gegensatz zur klassischen Reflexions- oder Transmissionsmessung eine beliebige Orientierung der Messstrecke ermöglicht. Bei Reflexionsmessungen wird zudem die reflektierte Welle - hier die zu messende Welle - am Messpunkt durch mitausgelöste Oberflächenwellen überlagert, wodurch eine exakte Bestimmung der Laufzeit erschwert wird.

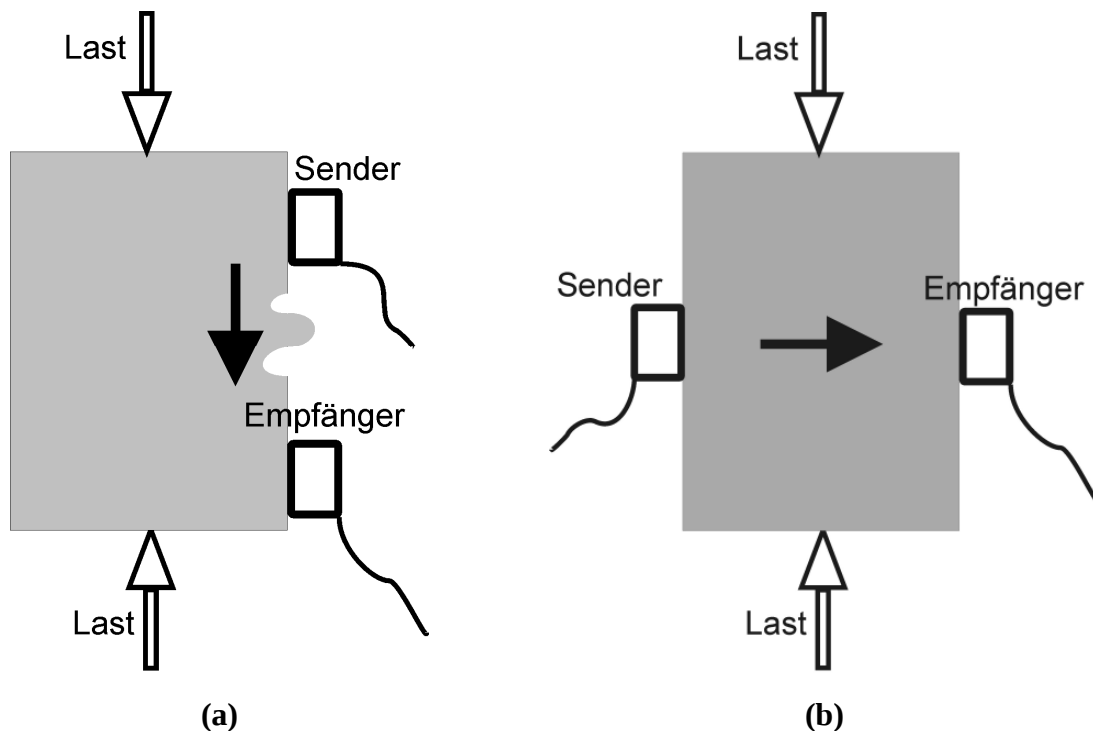


Abbildung 4.1: Messprinzip zur Messung (a) der Oberflächenwelle und (b) der durchdringenden Welle in Transmissionsanordnung.

Bei zeitgenauer Anregung kann die Geschwindigkeit einer Welle sowohl an der Oberfläche als auch in Reflexions- und Transmissionsmessungen aus der Zeit zwischen Anregung und Wellendurchlauf am Sensor bestimmt werden. Da bei Oberflächenwellenmessungen im Gegensatz zu Reflexions- und Transmissionsmessungen auch mehrere beliebige Sensorpositionen zwischen Anregung und letztem Messpunkt abtastbar sind, ist es möglich, auf eine zeitgenaue Anregung zu verzichten. Generell kann zwischen zwei Messprinzipien unterschieden werden:

- **Exakt reproduzierbare Anregung:** Ist die Anregung exakt reproduzierbar, kann jeder einzelne Messpunkt direkt mit den benachbarten verglichen werden. Es ist nur ein Sensor nötig, der an beliebig vielen Positionen nacheinander messen kann. Die einzige Begrenzung ist in diesem Falle die Dauer des Messzyklus bei einer Laststufe.
- **Nicht exakt reproduzierbare Anregung:** Ist die Anregung gewissen Schwankungen unterworfen, müssen je Richtung mindestens zwei aufeinanderfolgende Sensoren miteinander verglichen werden, um z. B. die Laufzeit feststellen zu können. Soll dieses richtungsabhängig geschehen, muss das Sensorenpäarchen je Richtung umgesetzt werden oder die zu messenden Richtungen mit mehreren Sensorenpäarchen bestückt und synchron gemessen werden. Die Anzahl der Messpunkte ist bei diesem Messaufbau durch die Anzahl der Sensoren und der gleichzeitig aufnehmbaren Kanäle begrenzt.

Jede der beiden Varianten hat gewisse Vor- und Nachteile. Um die Nachteile zu umgehen, wurden ab dem zweiten Probekörper beide Messprinzipien auf gegenüberliegenden Seiten appliziert. Die Einsensorenlösung wurde mit einem Laservibrometer umgesetzt (Kapitel 4.2), die Mehrsensorenlösung mit einem Sensorenarray (Kapitel 4.3) und der Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau aus den Vorversuchen als Referenz (Kapitel 4.4) übernommen.

Wie in dieser Arbeit gezeigt wird (Kapitel 6.1.4.1 ff.), ist die Oberflächenwellengeschwindigkeit in Lastrichtung u. a. von der Last und damit von den Spannungen im Körper abhängig. Die Spannungen in der Probekörperseitenansicht sind bei einer einachsigen, zentrischen Belastung doppelt symmetrisch (Volumen dreifach), die Spiegelachsen sind sowohl die horizontal teilende als auch die vertikal teilende. Aufgrund dieser Symmetrie würde das Messen in nur einem Quadranten einer Oberfläche ausreichen. Die Hauptspannungsrichtung liegt in der Belastungsrichtung, in der im Vorversuch der Effekt der Oberflächenwellengeschwindigkeitsänderung beobachtet worden ist. Die daraus resultierende Frage war, ob sich senkrecht dazu ebenfalls eine Änderung ergibt und wie sich diese im Vergleich zu den in Lastrichtung gemessenen Ergebnissen verhält. Zur Bestimmung der Richtungsabhängigkeit sind demnach Messungen in mehrere Richtungen notwendig. Eine Vergrößerung der Messpunktanzahl zwischen der Lastrichtung und der orthogonalen Richtung ergibt eine bessere Auflösung der winkelabhängigen Eigenschaftsänderungen.

4.2 Laservibrometer (LVib)

Zur Anregung der Welle wurde ein Linearmotor (Aktor) in Form eines Piezotranslators der Firma Physik Instrumente (P244.20) verwendet (Abbildung 4.2). Dieser Linearmotor wird wie die US-Sender ebenfalls durch einen Piezokristall angetrieben. Im Gegensatz zur flächigen Kopplung der US-Sender wird vom verwendeten Linearmotor eine Stahlkugel mit einem Durchmesser von 6 mm angekoppelt. Die Stahlkugel emittiert unter definierter Vorspannung die Welle ohne Koppelmittel ins Bauteil. Durch die Kugelform des Kontaktkörpers kann wie bei der mechanischen Anregung mit einer Kugel von einem hohen Oberflächenenergieanteil ausgegangen werden. Um einen Kugeleinschlag wie beim Impakt-Echo-Verfahren zu simulieren erfolgte die Anregung mit einer sinushalbwellenförmigen Spannung mit 25 kHz.



Abbildung 4.2: Piezotranslator (P244.20) der Firma Physik Instrumente (Aktor).

Als Sensor wurde ein Laservibrometer der Firma Polytec verwendet mit einem Messbereich von 20 Hz bis 250 kHz. Die Besonderheit des Laservibrometers ist es, die Auslenkungsgeschwindigkeit der Oberflächen mit hoch präziser Genauigkeit auch mit einer Distanz von einigen Metern - hier 3,5 m - messen zu können. Dieses ist von entscheidender Bedeutung für die durchgeführten Versuche, um die Eigenschaftsänderungen bis zum Bruch verfolgen zu können. Die Verwendung eines optischen Sensors in einigen Metern Entfernung schließt die Gefahr der Zerstörung der Messapparatur aus. Ein weiterer Vorteil im Gegensatz zu fest applizierten Sensoren ist, dass der Abstand der Messpunkte nicht von der Verformung des Probekörpers beeinflusst wird.

Zur Ansteuerung der Messpunkte sind Spiegel vor dem Laservibrometer positioniert, die den Laserstrahl zu den gewünschten Punkten umlenkt. Zur Laufzeitbestimmung werden sowohl die vom Laservibrometer in eine Spannung umgesetzte Oberflächengeschwindigkeit als auch der elektrische Anregungspuls aufgezeichnet. Die analogen Signale sind mit einer Abtastezeit von 10 MS/s und einer Auflösung von 12 Bit aufgezeichnet worden. Ein handelsüblicher PC kontrolliert den Versuchsablauf sowie die Positionierung des Laserstrahls und die Datenaufzeichnung.

Um den Piezotranslator herum sind in zwei Kreisen jeweils 36 Messpunkte positioniert mit einem daraus resultierenden Winkelabstand von 10° . Der erste Kreis befindet sich in einem Abstand von 10 cm, der zweite in einem Abstand von 20 cm von der Anregung entfernt. An jedem Punkt wurden 36 Messungen durchgeführt. Die Messung startete im inneren Kreis links von der Anregung (270°) und tastete die Punkte nacheinander im Uhrzeigersinn ab. Nach dem inneren Kreis wurde der äußere Kreis gemessen. Damit ergeben sich für einen Laservibrometer-Durchlauf 2592 Messungen, die eine Dauer von ca. 8 Minuten des 20 minütigen Messzyklus beanspruchen.

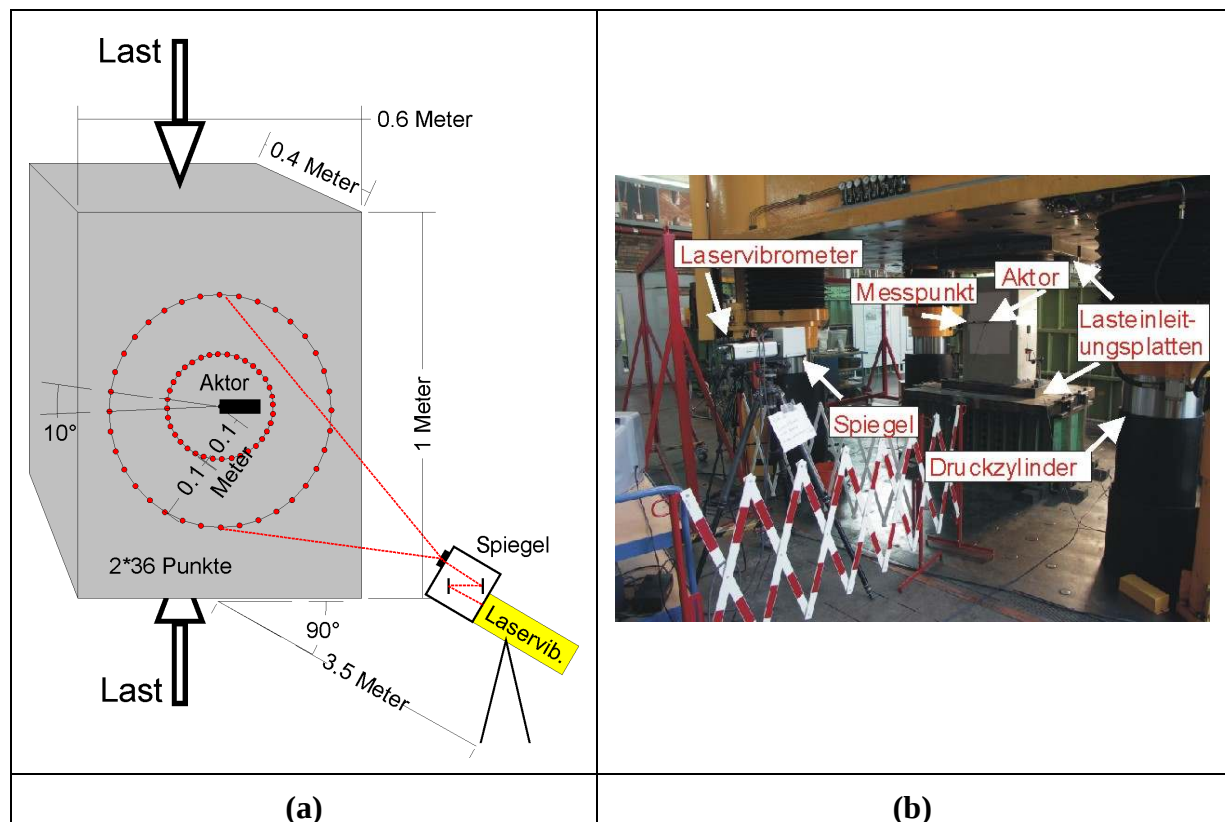


Abbildung 4.3: Laservibrometer-Versuchsaufbau als (a) Skizze und (b) Bild.

Zur eindeutigen Zuordnung der Messstrecke werden diese mit dem Winkel der Messrichtung bezeichnet. Die Winkel werden von der nach oben zeigenden senkrechten Messrichtung aus im Uhrzeigersinn alle 10° von 0° - 350° bezeichnet, wobei die Richtungen 0° und 180° die in Lastrichtung gemessenen sind und die Messrichtung 90° und 270° orthogonal dazu liegen. Die Benennung ist in Abbildung 4.4 schematisch illustriert. Die beiden Messkreise werden mit innen und außen bezeichnet.

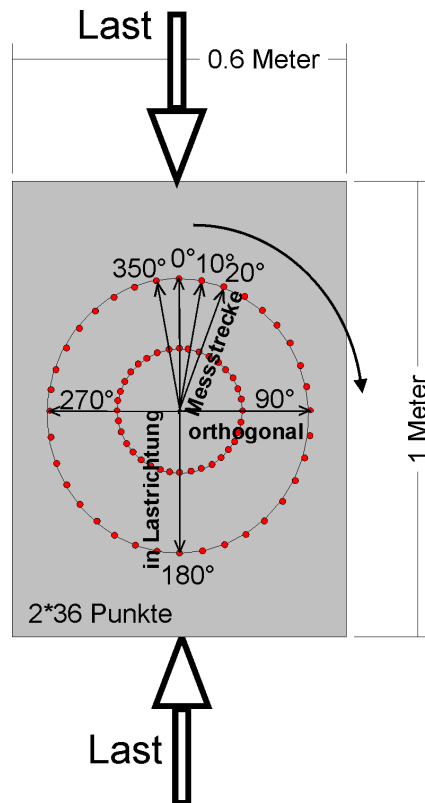


Abbildung 4.4: Benennung der jeweiligen Messrichtungen beim Laservibrometer-Versuchsaufbau.

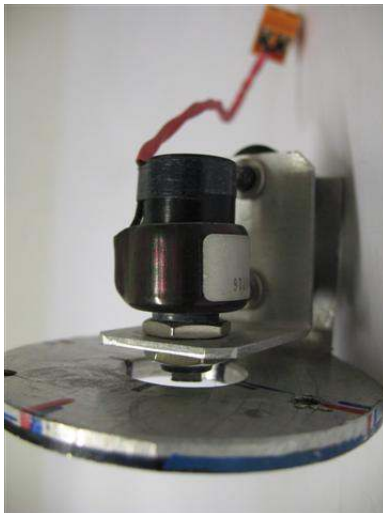
Die Nachteile der Messungen mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau bestehen darin, dass für eine korrekte Entfernung der Messpunkte von der Anregung eine direkt senkrechte Positionierung des Lasers über dem Anregungspunkt notwendig ist. Ist dieses der Fall, so beschreibt der Laserstrahl einen exakten Kreis um den Anregungspunkt. Diese exakte Positionierung ist aus mehreren Gründen nicht möglich: Zuerst ist der exakt senkrechte Punkt über der Anregung nur in gewissen Grenzen der Genauigkeit zu finden und das Laservibrometer dort positionierbar. Des Weiteren verschiebt sich die Anregung durch die lastbedingte Stauchung des Probekörpers, dieses kann durch Nachjustieren des Laserstrahls vor jedem Messzyklus ausgeglichen werden.

Neben der Problematik der Positionierung besteht ein weiterer Nachteil darin, dass bei jeder Initialisierung, d.h. zu Beginn jedes Messtags, das Laservibrometer neu kalibriert werden muss. Trotz exakt der gleichen Position wie am Vortag und langer Aufwärmzeit muss die Ausrichtung des Laserstrahls nachjustiert werden, dieses hat eine leichte Abweichung der Messpunktentfernungen im Vergleich zum vorangegangenen Tag zur Folge. Aufgrund dieser Abweichung können Ergebnisse nicht direkt von einem Messtag auf den anderen übertragen werden (siehe Anhang Kapitel 2 und Abbildung 2.1).

Das Laservibrometer kann immer nur an einem Punkt messen. Daraus resultiert eine lange Messzeit von ca. 8 min pro Laststufe, da die Messpunkte nacheinander gemessen werden müssen. Das Signal-zu-Rauschverhältnis des Laservibrometers ist im Vergleich zu piezoelektrischen Sensoren gering. Des Weiteren können Störfaktoren, wie durch den Laserstrahl fliegende Partikel, auftreten und durch die fehlende direkte Kopplung können gegenläufige Schwingungen von Probekörper und Laservibrometer das Ergebnis verfälschen.

4.3 Sensorenarray (SA)

Beim Sensorenarray erfolgte die Anregung über einen elektromagnetisch beschleunigten Stahlhammer, der die Form einer Halbkugelscheibe mit 3 mm Durchmesser hat. Der Stahlimpaktor regt Frequenzen von ca. 1 kHz bis ca. 20 kHz an und ist mittig auf den Probekörper geklebt. Der mechanische Hammer ist nicht ausreichend zeitgenau, sodass die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur über den Vergleich von mindestens zwei Sensoren in einer Reihe erfolgen kann.



(a)



(b)

Abbildung 4.5: (a) Impaktor der Firma Olson und (b) Impakt-Echo-Sensor der Firma Acsys.

Als Sensoren wurden zwölf piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer der Firma Acsys Moskau verwendet. Der Messbereich der Sensoren umfasst den Frequenzbereich von 2 kHz bis >55 kHz. Zur Aufzeichnung der Oberflächenwelle müssen diese auf die Betonoberfläche angedrückt werden. Die Sensoren waren in einer Platte eingelassen, die über den gesamten Versuch konstante Sensorabstände gewährleistete und die Sensoren an den Probekörper andrückte. Die Sensoren waren in vier Reihen von je drei Sensoren in einem Winkel von 90° um die Anregung herum verteilt, woraus sich eine richtungsabhängige Auflösung von 30° zwischen den Sensorreihen ergab. Die Abstände betrugen am zweiten und dritten Probekörper von der Anregung zum ersten Sensor 7,5 cm, zwischen erstem und zweiten Sensor 5 cm und zwischen zweitem und dritten Sensor 10 cm. Beim vierten und fünften Probekörper betrugen alle Abstände 7,5 cm. Das Sensorenarray konnte vom Probekörper abgehoben werden und um den Anregungspunkt gedreht werden. In jeder Laststufe konnte mithilfe einer viertel Drehung im oberen und unteren linken Quadranten, bezogen auf die mittige Anregung, gemessen werden (siehe Abbildung 4.6). Vor jeder Messung wurde das Sensorenarray für die

Messungen an den Probekörper erneut angedrückt, sodass eine Übertragung der belastungsbedingten Dehnung auf die Messdistanz verhindert wird.

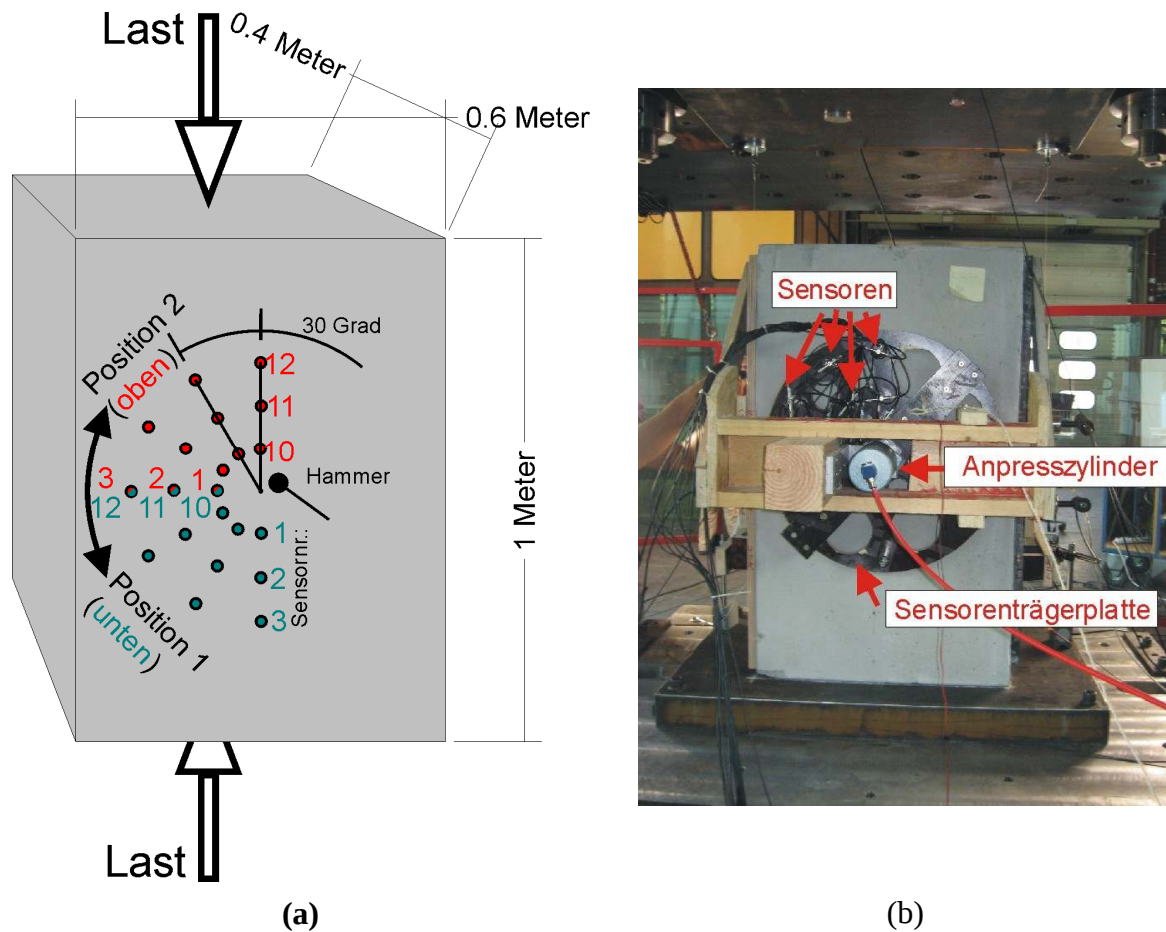


Abbildung 4.6: Das Sensorenarray als (a) Skizze und (b) Bild.

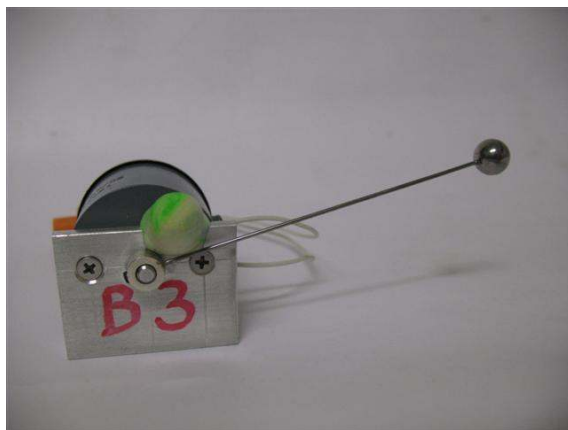
Beim Bruch des Probekörpers besteht die Gefahr der Zerstörung des Sensorenarrays, sodass der gesamte Versuchsaufbau vor dem Bruch entfernt werden muss.

Schon während der Anregung wurden alle zwölf Sensoren synchron mit einer Abtastrate von 1MS/s und einer Auflösung von 16 Bit aufgezeichnet. Bis auf das Umsetzen des Sensorenarrays wurde der gesamte Messablauf vom PC gesteuert. In beiden Positionen (unten links und oben links) wurden jeweils 36 Messungen durchgeführt. Die Messzeit betrug für beide Quadranten inklusive Umsetzen ca. 2 min.

4.4 Zwei-Sensoren (ZS)

Die Vorversuche fanden mit dem Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau an schmalen, hohen Probekörpern ($10 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$) statt (siehe Abbildung 4.8 (a)). Um die Ergebnisse der Vorversuche mit den hier beschriebenen vergleichen zu können, wurde der Versuchsaufbau beibehalten. An den Probekörpern zwei und drei wurde dieser Aufbau beidseitig platziert, um die Beeinflussung durch aufgetragene Putzschichten untersuchen zu können.

Wie in Abbildung 4.8 eingezeichnet, wurde ein Impaktor gefolgt von zwei Sensoren in vertikaler Ausrichtung an den schmalen Seiten des Probekörpers angebracht. Die verwendeten Sensoren waren fest montiert. Die durch die Belastung hervorgerufene Stauchung verkürzt die Messdistanz und wird um die im Dehnungsversuchsaufbau gemessenen Werte korrigiert. Der Impaktor besteht aus einer Stahlkugel mit einem Durchmesser von 12 mm, der von einer Federstahlstange geführt und mit einem Drehmagneten beschleunigt wird. Diese Anregung ist dem idealen Impaktor in Form einer frei fliegenden Kugel nachempfunden. Die Fallhöhe h hat nach Gl. 2.12 einen geringen Einfluss auf die Kontaktzeit. Sie geht mit der zehnten Wurzel ein und kann für den hier verwendeten Hammer auf etwa 1 m gesetzt werden. Die maximale Frequenz für den verwendeten Hammer und eine 12mm Kugel beträgt nach Gl. 2.12 und Gl. 2.13 ca. $f_{\max} = 25 \text{ kHz}$.



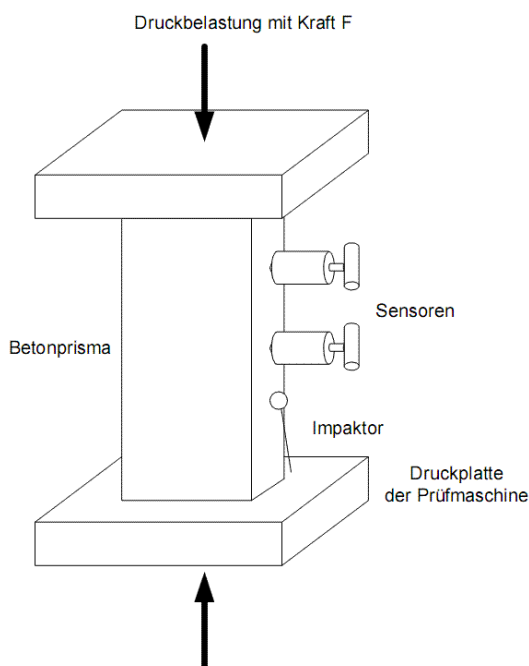
(a)



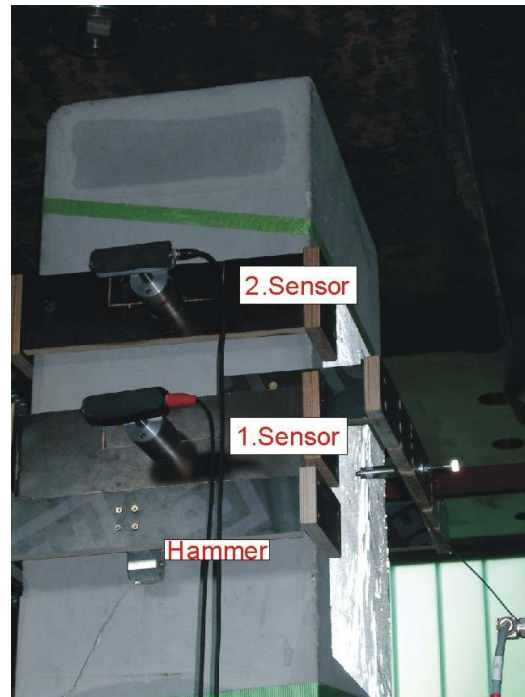
(b)

Abbildung 4.7: Mechanische Anregung und Sensor des Zwei-Sensoren-Versuchsaufbaus: (a) Elektrisch betriebener Hammer und (b) Germann IE-Sensor MarkIV.

Auf den Impaktor folgten in einem 10 cm-Abstand zwei Sensoren mit einem Abstand von 20 cm untereinander. Bei den Sensoren handelt es sich um breitbandige Beschleunigungsaufnehmer, die einen Frequenzbereich von 1,6 bis 25 kHz umfassen (MarkIV von Germann Instruments). Die Aufzeichnung des Messsignals erfolgte mit einer Abtastrate von 600 kS/s und einer Auflösung von 12 bit. In jeder Laststufe wurden 36 Messungen durchgeführt bei einer Versuchsdauer von ca. 3 Minuten pro Sensorenpaar.



(a)



(b)

Abbildung 4.8: Linearer Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau mit Anregung (Hammer unten) und zwei Sensoren als (a) Skizze und (b) Bild.

Da der Versuchsaufbau nicht automatisiert ausgeführt wurde, musste jede Messung einzeln ausgelöst werden. Nach jeder Messung gab es die Möglichkeit, die Messung zu wiederholen, um sicherzustellen, dass keine Fehlmessung das Messergebnis verfälscht. Der lineare Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau ist der einzige, der aufgrund der geringen Datenmenge während des Experiments eine Schallgeschwindigkeitsauswertung zuließ. Mit dem linearen Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau wurde während des Versuchs die Versagenslast prognostiziert und mit Hilfe der Daten entschieden, wann aus Sicherheitsgründen die Versuchsaapparaturen abgebaut werden mussten.

4.5 Ultraschall (US)

Die Versuche am ersten Probekörper wurden als Vorversuch zur Ermittlung der zweckdienlichsten Polarisierung, Frequenzbereichs und Sensoranordnung für die Ultraschallversuche durchgeführt. Es wurde am ersten Probekörper mit standardisierten Messaufbauten gemessen; spezielle Anfertigungen kamen erst bei den Versuchen vom zweiten bis zum fünften Probekörper als Folgeentwicklung der Versuche des ersten Probekörpers zum Einsatz. Die unterschiedlichen Versuchsausbaustufen werden im Folgenden getrennt voneinander beschrieben.

4.5.1 Vorversuch (PK 1)

Bisherige Versuche hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Schallgeschwindigkeit und Spannungszustand wurden mit Ultraschallwellen senkrecht zur Belastungsrichtung geführt (siehe Kapitel 1.2). Zum Vergleich der bisherigen Arbeiten mit den hier geführten Versuchen wurde beim ersten Probekörper ebenfalls senkrecht zur Lastrichtung an den nicht durch die Lasteinleitungsplatten belegten Seiten gemessen. Die Reichweite der hochfrequenten Longitudinalwellen (G02R, Abbildung 4.11) ist wesentlich geringer als die der niederfrequenten Transversalwellen (A1220 Abbildung 4.9 (b)). Aus diesem Grund konnten die Messungen mit den Transversalprüfköpfen in Reflexionsanordnung durchgeführt werden, während bei den Longitudinalwellenprüfköpfen die Messungen nur in Durchschallung durchgeführt werden können.

Die Anregung der US-Longitudinalwellen in Transmissionsanordnung (Abbildung 4.9(a); Position 1) erfolgte mit einer Mittenfrequenz von 160 kHz (6 dB Grenze: 75-340 kHz), eine genauere Beschreibung des Prüfkopfes erfolgt im Kapitel 4.5.2.2. Die Longitudinalköpfe der Firma Krautkrämer (G02R) wurden an den sich gegenüberliegenden Längsseiten angebracht. Für die Prüfköpfe musste Vaseline zur akustischen Kopplung verwendet werden. Die durchschallte Strecke betrug 0,4 m.

Die Anregung der US-Transversalwellen in Reflexionsanordnung (Abbildung 4.9(a), Position 2 und 3) erfolgte mit einer Mittenfrequenz von 48,8 kHz (6 dB Grenze: 28-64 kHz). Die Transversalprüfköpfe bestehen aus jeweils 12 Punktkontaktköpfen zum Senden und Empfangen und sind in einem Prüfkopf zusammengefasst; ein Koppelmittel ist nicht nötig. Die beiden Transversalprüfköpfe der Firma Acsys (A1220) wurden an der Stirnseite befestigt. Die durchschallte Strecke betrug 1,2 m und entspricht zweimal der Probekörperbreite. Es wurde mit zwei Polarisationsrichtungen gemessen. Die Transversalwelle des einen Prüfkopfes war in Lastrichtung (Abbildung 4.9 (a) Position 3), die des anderen orthogonal zur Lastrichtung (Position 2) polarisiert.

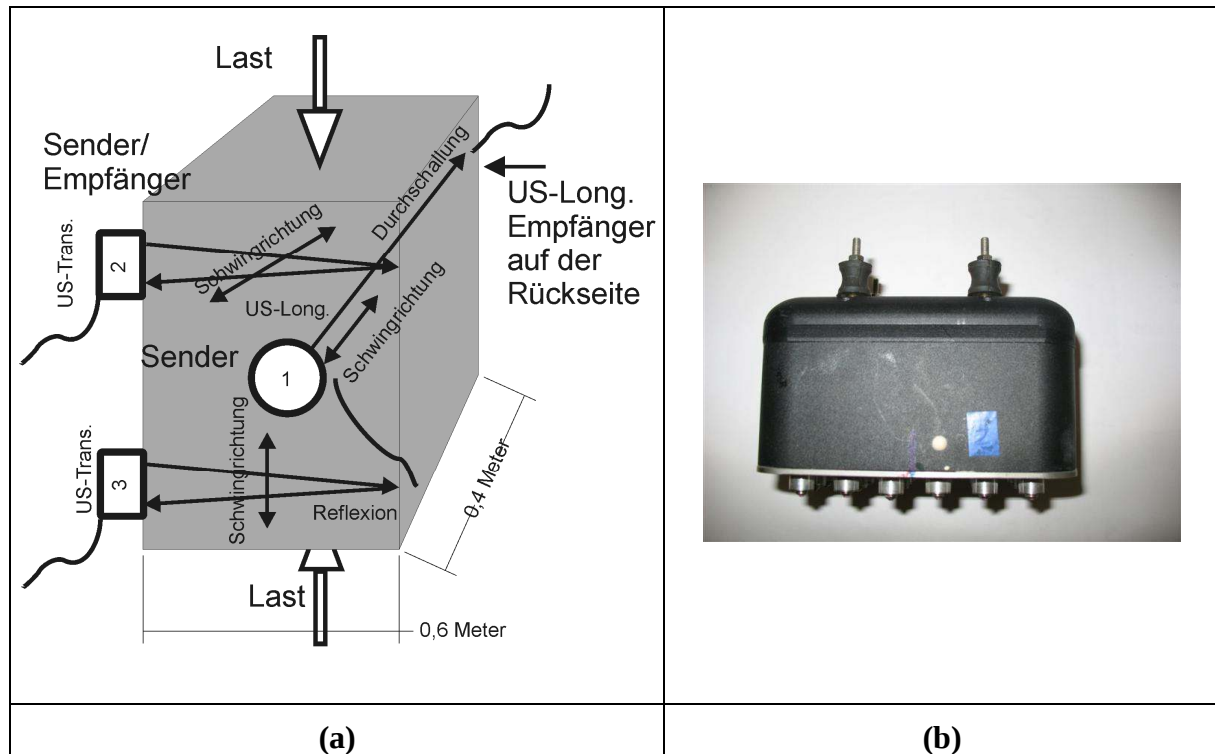


Abbildung 4.9: (a) Anordnung der Ultraschall-Versuche mit Longitudinalwellen (Position 1) und Transversalwellen (Position 2 oben und Position 3 unten). (b) Transversalprüfkopf der Firma Acsys.

Die Abtastrate für alle Prüfköpfe betrug 1 MS/s bei einer Auflösung von 12 Bit. Um eine Zerstörung der Sensoren zu vermeiden, wurden diese bei 80 % der erwarteten Bruchlast entfernt.

4.5.2 Versuchsserie (PK 2-5)

Für die restlichen Probekörper sind US-Longitudinalprüfköpfe des Typs So205 und G02R zur durchschallenden Messung in Lastrichtung in jede Lasteinleitungsplatten eingelassen worden.

4.5.2.1 Prüfkopf So205

Der in Abbildung 4.10 abgebildete Prüfkopf von Acsys Moskau ist für Ultraschall mit einer Mittenfrequenz von 22,8 kHz (6 dB Grenze: 10,6-36,6 kHz) ein ungewöhnlich niederfrequenter US-Sender, der sich durch einen hohen Energieeintrag auszeichnet. Durch

die niederfrequente Anregung der Longitudinalwelle, die bis in den Hörschallbereich hinein reicht, bildet der Prüfkopf die untere Grenze des Ultraschallverfahrens ab und stellt damit ein Bindeglied zu den akustischen Methoden im Hörschallbereich dar.



Abbildung 4.10: Prüfkopf So205 der Firma Acsys Moskau

4.5.2.2 Prüfkopf G02R

Die für diese Versuche maximal auswertbaren Frequenzen der Ultraschallwelle werden durch den in Abbildung 4.11 abgebildeten Prüfkopf G02R von Krautkrämer abgedeckt. Dieser besitzt eine Mittenfrequenz von 160 kHz (6 dB Grenze: 75-340 kHz), emittiert jedoch ebenfalls Frequenzen unterhalb der Mittenfrequenz. Dieses ist insofern entscheidend, da aufgrund der Tiefpassfilterung von Beton hohe Frequenzen gedämpft werden. Für den hier verwendeten Beton ist die Dämpfung bei einer Messstrecke von einem Meter derart ausgeprägt, dass praktisch keine Frequenzen oberhalb von 125 kHz messbar sind. Die im unteren Frequenzbereich emittierten Frequenzen reichen jedoch aus, um einen ausreichenden Puls empfangen zu können. Die höchste Amplitude am Empfänger wird bei ca. 85-100 kHz erreicht. Die Anregung erfolgte mit einem Nadelpuls. Im Folgenden wird vom 100kHz-Prüfkopf gesprochen, da in diesem Bereich der relevante Frequenzbereich für die Auswertung liegt.



Abbildung 4.11: Prüfkopf der Firma Krautkrämer G02R.

Beide Anregungen decken den sinnvollen Bereich für Messungen an Beton mit Ultraschall ab, sodass der Einfluss der verwendeten Frequenz für die Schallgeschwindigkeitsänderung untersucht werden kann. Für die Prüfköpfe wurden passgenaue Aussparungen in die Lasteinleitungsplatten gefräst und die Prüfköpfe für einen konstanten Prüfdruck darin federnd gelagert. Um Übertragungen von der Maschine auf den Prüfkopf und umgekehrt zu unterbinden, wurden die Köpfe mit schwingungsdämpfendem Material umgeben. An den Probekörper wurden die US-Köpfe mit Vaseline als Kontaktmittel gekoppelt.

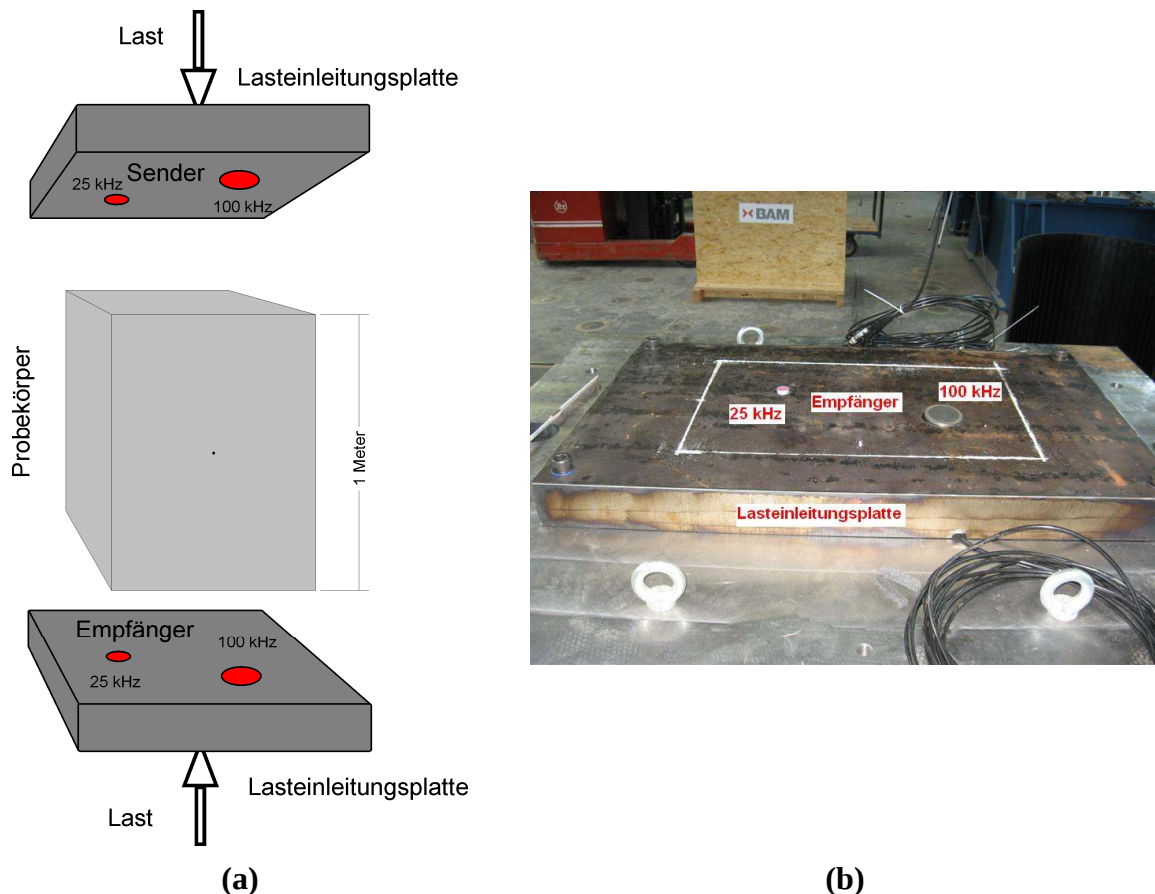


Abbildung 4.12: (a) Prüfkopfpositionierung der Ultraschallprüfköpfe für den 2.PK-5.PK; (b) Bild der unteren Lasteinleitungsplatte mit beiden Sensoren.

Die Abtastrate betrug bei den 100kHz-Prüfköpfen 12,5 MS/s und bei den 25kHz-Prüfköpfen 2,5 MS/s mit einer jeweiligen Auflösung von 16 Bit. Fünf Messkurven, die aus jeweils zehn gemittelten Messungen bestanden, wurden zusammen mit dem Anregungspuls für jede Laststufe aufgezeichnet und gespeichert. Die Messzeit für beide Sensorenpaare betrug ca. 4 min. Die Sensoren waren geschützt eingebettet und konnten somit bis zum Bruch messen.

4.6 Dehnungsmessung

Die Dehnung wird mit zwei sich gegenüberliegenden induktiven Wegaufnehmern gemessen, deren Werte als Mittelung in den folgenden Diagrammen eingetragen sind. Gemessen wurde von der oberen zur unteren Lasteinleitungsplatte. Der Nullpunkt der Dehnungsmessung ist der Punkt, an dem die obere Lasteinleitungsplatte den ersten Kontakt mit dem Probekörper herstellt. Bei einer Belastung kann die Prüfmaschine nur sehr kleine Nichtparallelitäten

zwischen Lasteinleitungsplatte und Probekörper ausgleichen. Vom ersten Kontakt der Lasteinleitungsplatten bis zum vollständigen, flächigen Anliegen der Lasteinleitungsplatten an der Probekörperoberfläche wird ein Weg gemessen, der größer ist als der durch die Dehnung tatsächlich verursachte. Dieses ist in den ersten Laststufen an der anfänglich stärkeren Steigung der Dehnungskurve zu erkennen. Über Nacht muss das obere Querhaupt in seine Ruheposition gefahren werden, sodass beim nächsten Lastzyklus die Dehnung wieder neu auf null justiert wird und etwaige bleibende Verformungen so von einem Tag auf den anderen nicht übertragen werden können. Die Aufzeichnung der Dehnungen erfolgte alle 0,5 s und wurde mit der zugehörigen Last in einer Datei gespeichert.

4.7 Akustische-Emission (AE)

Um eine etwaige Schallgeschwindigkeitsänderung in Zusammenhang mit Mikrorissbildung und Risswachstum zu bringen, wurde ein Akustische-Emmission-Versuchsaufbau (oder auch in der deutschsprachigen Literatur häufig Schall-Emission genannt) selbst entwickelt und in einem Ergänzungsversuch eingesetzt.

Während des Versuchs wurden die Ereignisse mit einem Versuchsaufbau, bestehend aus einem Sensor der Firma Acsys (Abbildung 4.9) mit einem hochempfindlichen piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer mit Keramikspitze und eingebautem Verstärker, aufgezeichnet. Die Aufzeichnung begann beim Überschreiten eines Schwellwertes, wobei das gesamte Signal des Ereignisses aufgezeichnet wurde.



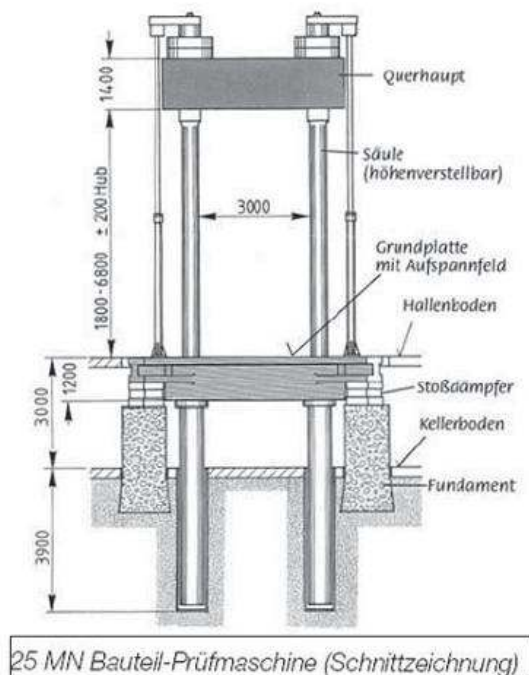
Abbildung 4.13: AE-Sensor der Firma Acsys.

Die Programmierung erlaubte es, dass vom aufgezeichneten Signal 10 % der Werte vor dem eigentlichen Schwellwert lagen. Die Abtastrate betrug 625 kS/s bei einer Auflösung von 12 Bit. Die eigentliche Auswertung erfolgte getrennt von der Aufzeichnung nach der Versuchsdurchführung. Um Geräusche, die nicht durch einen Riss hervorgerufen wurden, von den tatsächlichen Rissgeräuschen zu trennen, wurden alle aufgezeichneten Ereignisse analysiert und die tatsächlichen Rissereignisse für jede Laststufe gezählt. Die Ursachen für aufgezeichnete Signale, die nicht durch Risse hervorgerufen wurden, bestanden vor allem aus den Geräuschen der Prüfmaschine und aus elektromagnetischen Störimpulsen durch schaltende Relais. Eine Trennung dieser Ereignisse ist aufgrund der unterschiedlichen Signalcharakteristika möglich und erfolgte nach mehreren Kriterien sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich.

Eine örtliche Zuordnung der Ereignisse war nicht möglich, da der Versuchsaufbau nur einen Sensor umfasste. Es konnte nicht unterschieden werden, ob das Schallereignis im Probekörper stattfand oder von außerhalb eingeleitet wurde. Damit war ein Aussortieren ähnlicher Ereignisse, wie sie in der Kontaktfläche von Lasteinleitungsplatte zu Probekörper durch Eindrückungen von Unebenheiten und Schmutzpartikeln in die Probekörperoberfläche stattfinden, nicht möglich. Diese Eindrückungen traten insbesondere zu Belastungsbeginn auf, wenn die Lasteinleitungsplatten sich an den Probekörper anlegten, mit der Folge, dass zu Belastungsbeginn mehr Ereignisse gezählt wurden als tatsächlich im Probekörper stattfanden.

4.8 Belastung

Die in diesen Versuchen zur Belastung eingesetzte Groß-Prüfmaschine (GPM, siehe Abbildung 4.14) ist zur Prüfung ganzer Bauteile konstruiert worden. Die maximale Kraft der Maschine beträgt 25 MN sowohl in Form von Zug- als auch Druckkräften; ein Wechsel zwischen maximaler Druck- und Zugkraft kann mit maximal 2 Hz erfolgen.



(a)



(b)

Abbildung 4.14: Bauteilprüfmaschine: (a) Skizze und (b) Foto mit hochgefahrenem Querhaupt und eingebautem Probekörper (helle Reflexion von der Reflexionsfolie für das Laservibrometer).

Zum Einbau der Ultraschallsensoren für die Messung in Lastrichtung wurden zwei speziell angefertigte Lasteinleitungsplatten mit Prüfkopfaufnahme angefertigt, die zwischen Querhaupt und Probekörper sowie Probekörperaufständerung und Probekörper montiert wurden. Um Querdehnungsrisse im Lasteinleitungsbereich zu vermeiden, wurde die Oberfläche der Stahlplatten nicht mit Gleitmitteln behandelt und die Stahloberfläche mit einer Rauigkeitskennzahl RZ25 gefertigt.

Aus der gewählten Probekörpergröße folgend, deren Mindestkriterien im Kapitel 3.2 besprochen wurden, der damit benötigten Lasteinleitungsplattengröße und der daraus resultierenden zu erwartenden Bruchlast war die GPM als einzige in der BAM für die Versuche geeignet. Aufgrund der Maschinensteuerung konnten die Versuche nur lastgesteuert durchgeführt werden. Normalerweise wird die Betonprüfung weggesteuert durchgeführt, wenn dabei der Probekörper nachgibt, bleiben die Lasteinleitungsplatten an einem konstanten Ort, womit sich die Last reduziert. Im Gegensatz dazu bleibt bei einer lastgesteuerten Versuchsdurchführung die Kraft auf den Probekörper konstant, der Probekörper kann sich der Belastung durch Stauchung nicht entziehen und zerspringt plötzlich, hinzu kommt die durch Verformung im Querschnitt gespeicherte Energie, die sich beim Bruch des Probekörpers ebenfalls schlagartig entlädt.

Beide Faktoren zusammen haben ein plötzliches, fast explosionsartiges Versagen des Probekörpers zur Folge. In Abbildung 4.15 ist dieses plötzliche Versagen als Bildsequenz festgehalten.

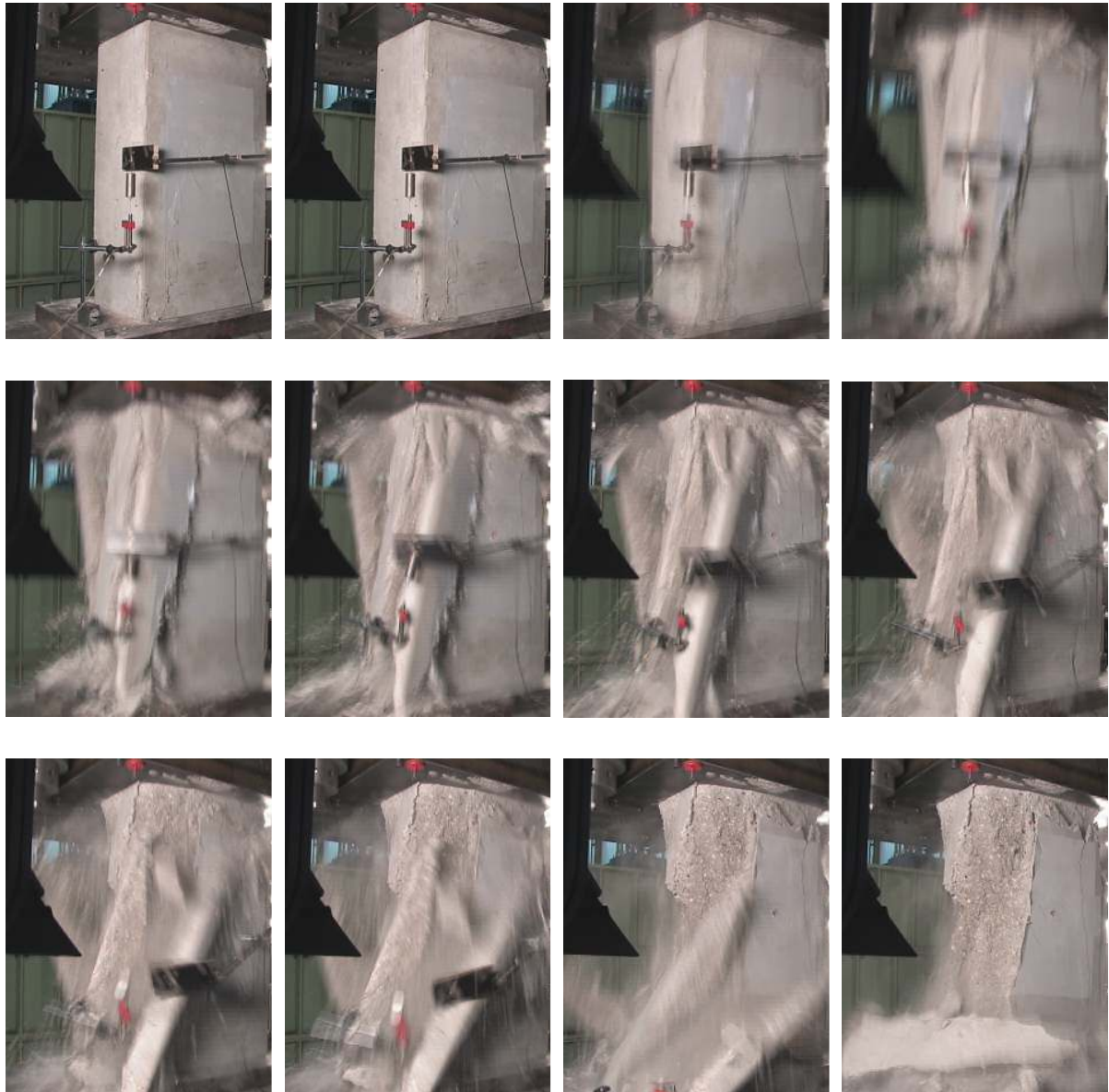


Abbildung 4.15: Bildfolge des Bruchs am 3.PK an der Messfläche des Laservibrometer-Versuchsaufbaus; die Unschärfe zeigt die hohe Geschwindigkeit der abplatzenden Teile. Die Bilder sind der Bruchfilmsequenz mit einer Dauer von 0,64 s entnommen..

Eine Demontage aller direkt an der Oberfläche applizierten Versuchsaufbauten kurz vor dem zu erwartenden Bruch ist damit nötig, um deren Zerstörung zu vermeiden.

5 Auswertungsprinzipien

5.1 Die Laufzeitmessung

Dem Thema dieser Arbeit folgend wird der Effekt der Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen in Beton anhand der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, d.h. anhand der Schallgeschwindigkeit, diskutiert. Die Messgröße der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Zeit, die eine Welle benötigt, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen. Im Idealfall ist die Laufzeit die Zeitdifferenz zwischen dem Durchgang der Welle an Punkt A (Sensorenarray- und Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau, siehe Kapitel 4) bzw. dem Einkoppeln des Signals in den Probekörper an Punkt A (US- und Laservibrometer-Versuchsaufbau, siehe Kapitel 4) bis zum Durchgang der Welle an Punkt B. Idealerweise wird die Laufzeit zwischen identischen Phasen der Welle bestimmt. Diese Art der Laufzeitbestimmung kann jedoch nur für Versuchsaufbauten wie dem Sensorenarray- und dem Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau angewendet werden, da in diesem Falle die Welle zuvor erzeugt wurde und beide Sensoren den zeitlich versetzten Durchgang der gleichen Wellen an unterschiedlichen Positionen aufzeichnen. In Abbildung 5.1 ist diese Art der Laufzeitbestimmung schematisch dargestellt; die Welle bzw. der Puls wurde zur Vereinfachung auf ein Dreieckssignal reduziert.

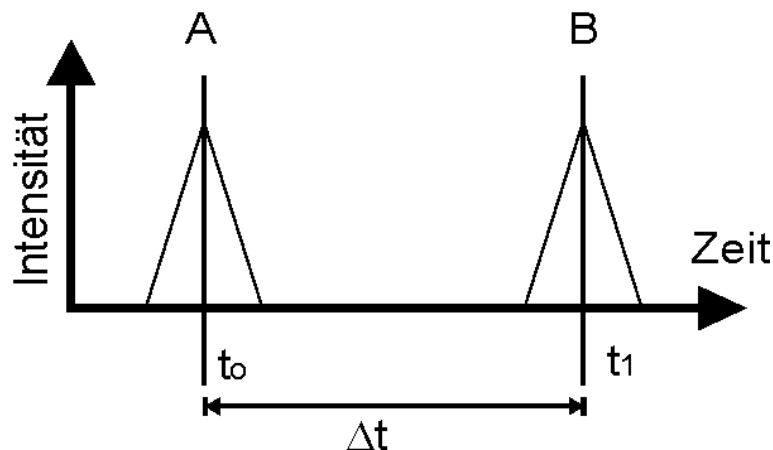


Abbildung 5.1: Bestimmung der Laufzeit aus der Zeitdifferenz Δt aus t_0 und t_1 an den Punkten A und B.

Wird im Gegensatz dazu die Welle an Position A erzeugt (US- und Laservibrometer-Versuchsaufbau), ist dort nur der Anregungspuls bekannt. Der Zeitpunkt des Anregungspulses entspricht aufgrund der Verzögerung der Umsetzung des elektrischen in einen mechanischen Puls nicht dem des Welleneintrittes in das Bauteil, d.h. das hier gewählte Maximum des Anregungspulses liegt vor dem Zeitpunkt t_0 . Diese abzuziehende Zeit wird als Vorlaufzeit (t_{vor}) bezeichnet und muss für jeden einzelnen Versuchsaufbau gesondert bestimmt werden.

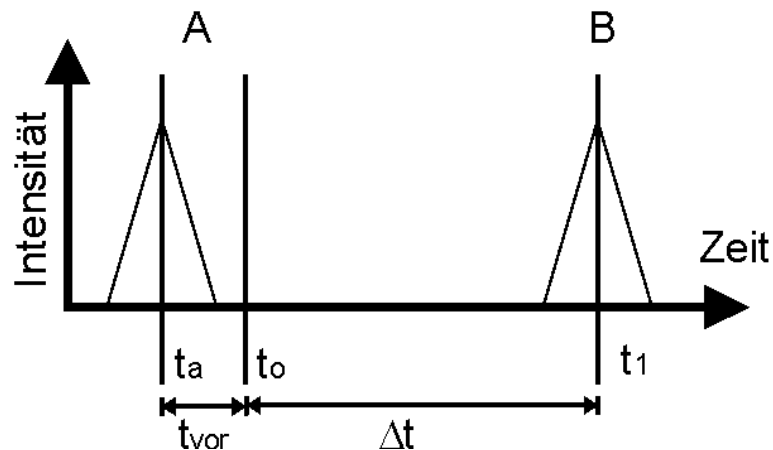


Abbildung 5.2: Vorlaufzeit t_{vor} : Differenz zwischen der elektrischen Anregung (t_a) und der eigentlichen Wellenanregung t_0 sowie die wahre Laufzeit Δt zwischen t_0 und t_1 an den Punkten A und B.

Die Wellenform des Anregungspulses entspricht aufgrund seiner mechanischen Trägheit und dem Nachschwingen nicht der Wellenform der ausgesendeten Welle, sodass ein Abgreifen identischer Phasen nicht möglich ist. Des Weiteren kann die Wellenform beim Durchlaufen der Strecke AB, z. B. durch die Tiefpass-Eigenschaften von Beton, verändert werden. Zum Umgehen der beiden eben genannten Einflüsse wird häufig der Ersteinsatz zur Laufzeitbestimmung herangezogen (Abbildung 5.3).

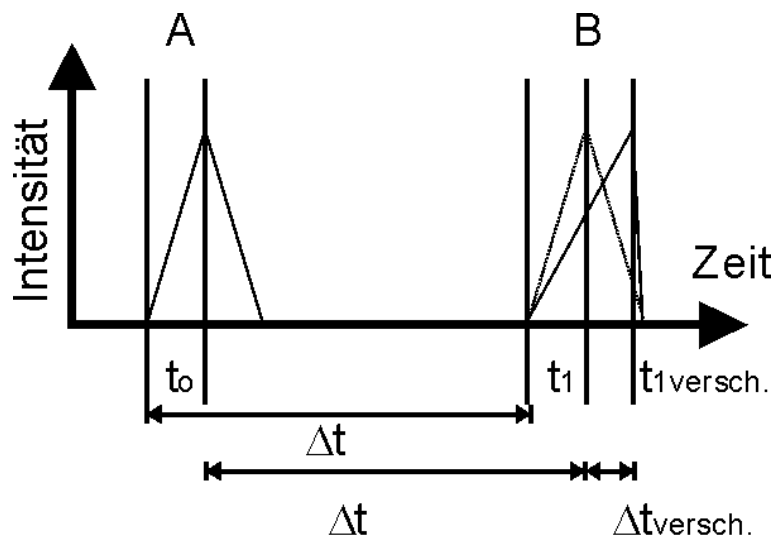


Abbildung 5.3: Bestimmung der Laufzeit aus der Zeitdifferenz von t_0 und t_1 an den Punkten A und B; für den Ersteinsatz hat das verschobene Maximum keinen Einfluss auf die Laufzeit, für die Messung von Maximum zu Maximum ändert sich die Laufzeit um $\Delta t_{\text{versch.}}$.

Für die Bestimmung der Laufzeit anhand des Ersteinsatzes ist ein Signal ohne Auslenkungen vor dem eigentlichen Messsignal Voraussetzung. Wie in Abbildung 5.4 zu erkennen ist, ist der Ersteinsatz für die Anregung (rot) einfach zu bestimmen. Der Ersteinsatz des Messsignals ist aufgrund des Rauschens (Abbildung 5.4 (a)) oder von Artefakten im gefilterten Signal (Abbildung 5.4 (b)) vor Beginn des eigentlichen Signals nicht eindeutig zu bestimmen.

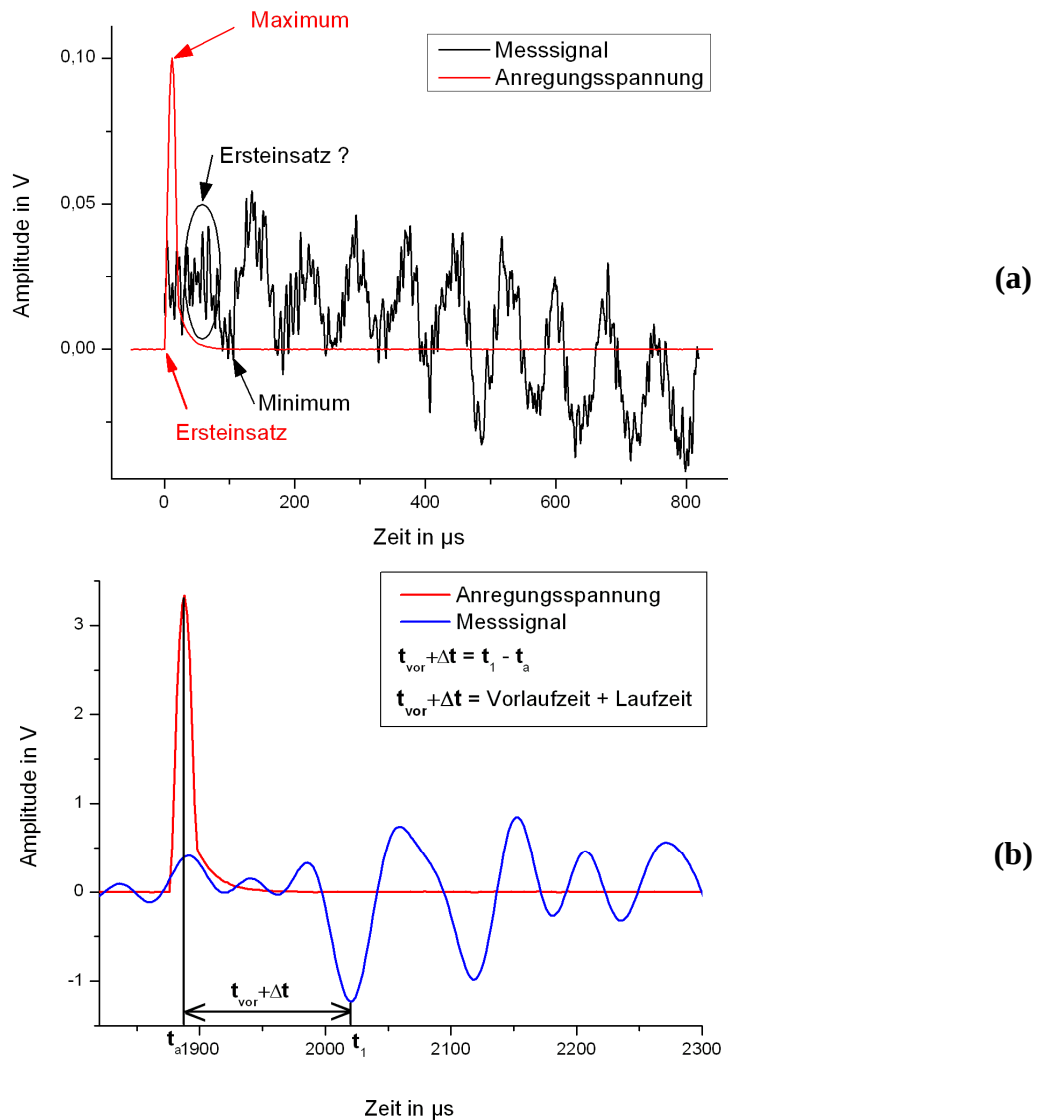


Abbildung 5.4: Aufzeichnungen des Anregungssignals und des Messsignals, (a) ungefiltert und (b) gefiltert mit den Zeiten t_0 und t_1 bestimmt am Signalmaximum; die Zeit Δt ist eingezeichnet.

Die unterschiedlichen Versuchsaufbauten differieren erheblich in Bezug auf die Signalqualität. Um alle Versuche miteinander vergleichen zu können, wurde für die hier durchgeführten Messungen das erste Minimum der Oberflächenwelle (B) als t_1 verwendet. Als t_0 wurde bei den Versuchsaufbauten Sensorenarray und Zwei-Sensoren das erste Minimum der Oberflächenwelle am ersten Sensor (A) und bei den Versuchsaufbauten Ultraschall und Laservibrometer das Maximum der Anregungsspannung t_a minus der Vorlaufzeit t_{vor} verwendet. Die unterschiedlichen Kriterien zur Bestimmung des ersten Minimums werden im Folgenden ausführlich behandelt.

5.2 Kriterien zur Bestimmung der Laufzeit

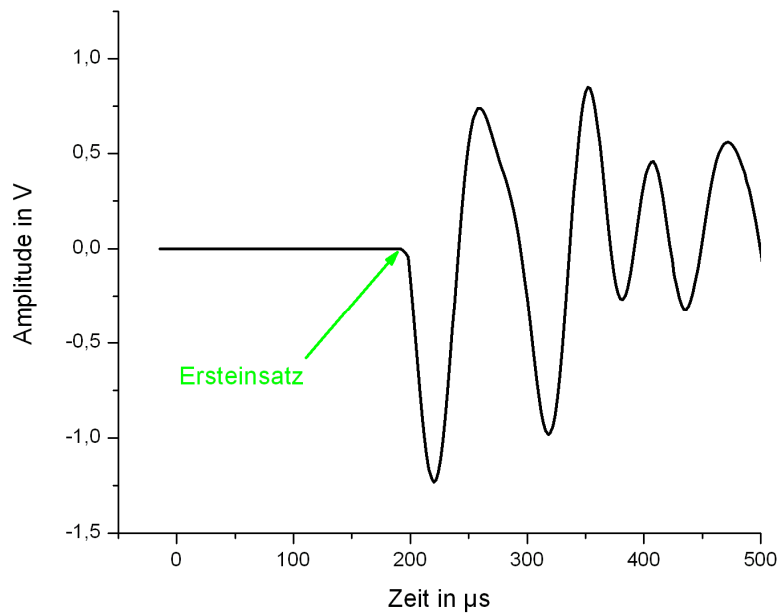
Wie zuvor erläutert, wird zur Bestimmung der Laufzeit der Oberflächenwelle das erste Minimum der Rayleighwelle herangezogen. Die schneller laufende Kriechwelle hat eine sehr geringe Amplitude und ist in den vom Laservibrometer aufgenommenen Daten durch das schlechte Signal-zu-Rauschverhältnis nicht bestimmbar. Anhand einer typischen Messung soll die Messdatenauswertung diskutiert werden.

An jedem Messpunkt bei jeder Laststufe wurden 36 Messungen durchgeführt. Die Anzahl der Messungen an einem Punkt kombiniert mit der Anzahl der Messpunkte und den Laststufen ergibt eine nicht mehr händisch auszuwertende Anzahl an Messkurven. Bei den Versuchen am dritten Probekörper sind an die 400 000 Messkurven aufgezeichnet worden. Aus diesem Grund wurden für diese Versuche spezielle Programme zur automatischen Auswertung implementiert. Die Implementierung der Bestimmungswege (Algorithmen) zur Bestimmung des ersten Minimums sowie die Programme zur Messdatenaufzeichnung, Auswertung und Darstellung wurden in LabView 8.6 geschrieben. Weder auf die Programmiersprache noch auf die Programmierung der Auswertungsalgorithmen soll hier näher eingegangen werden, sondern vielmehr auf die verwendeten Kriterien und deren Funktionsweise, die von der Programmiersprache unabhängig sind.

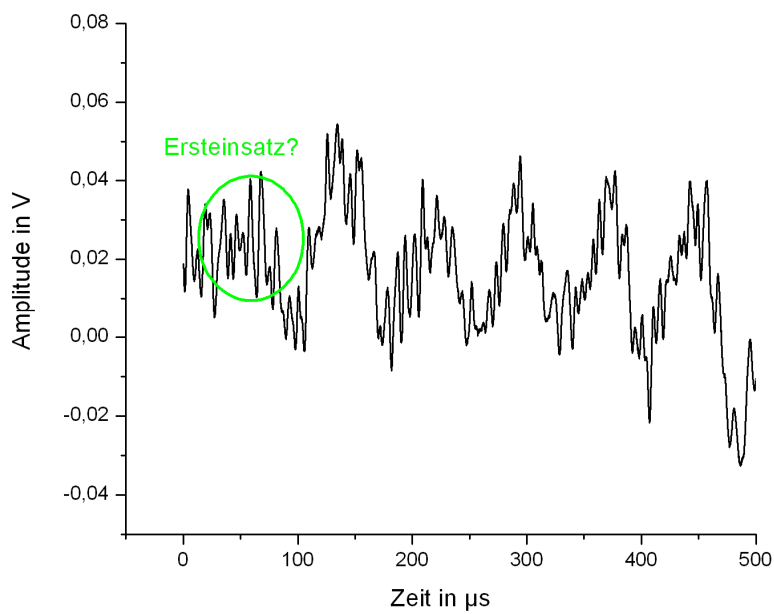
Mehrere Kriterien können zur Bestimmung des ersten Minimums und damit zur Laufzeitbestimmung verwendet werden. Die jeweiligen Vor- und Nachteile werden im Folgenden analysiert.

5.2.1 Ersteinsatz

Der Ersteinsatz ist der Punkt im Signal, an dem das Messsignal aus der Nulllage ausgelenkt wird (in Abbildung 5.5 ist der Ersteinsatz grün gekennzeichnet). Wie hier an einer typischen Messung des Laservibrometers gezeigt wird, lässt sich durch das Rauschen auch visuell nicht genau die Lage des Ersteinsatzes bestimmen. Die Bestimmung des Ersteinsatzes ist demnach vom Rauschpegel beeinflusst. Bei den hier durchgeführten Laservibrometer-Messungen differiert der Rauschpegel für die verschiedenen Messpunkte bei unterschiedlichen Laststufen erheblich (zum Vergleich sind Signale mit unterschiedlichen Rauschpegeln in Abbildung 5.13 gezeigt). Damit konnten keine einheitlichen Kriterien für die Bestimmung des Ersteinsatzes, die zu vergleichbaren und präzisen Laufzeiten führen, gefunden werden. Daher wird das Kriterium des Ersteinsatzes in dieser Arbeit nicht verwendet. Des Weiteren machen niederfrequente Störungen eine Unterscheidung zwischen Störung und beginnender Auslenkung schwierig.



(a)



(b)

Abbildung 5.5: Ersteinsatz (a) im rauschfreien Signal und (b) Bereich des Ersteinsatzes im verrauschten Signal.

5.2.2 Schwellwert

Der Schwellwert ist der Punkt im Signal, an dem das Messsignal eine gewisse Elongation überschreitet. Dieser Schwellwert muss so gewählt werden, dass er über dem Rauschpegel liegt, aber unter der Amplitude des Signals. Differiert der Betrag der Amplituden der Wellen, hier des ersten Minimums, und ist der Schwellwert fest, so liegt der bestimmte Zeitpunkt an unterschiedlichen Phasenwinkeln der Welle (Abbildung 5.6 (a)). Damit ist die Laufzeit nicht mehr präzise bestimm- und vergleichbar. Durch eine Normalisierung, hier auf das erste Minimum, kann dieser Phasenversatz eliminiert werden. Der Schwellwert liegt damit immer bei einer konstanten Elongation bezogen auf die Amplitude. Dieses gilt, solange die Signale die gleiche Form besitzen. Ist das Signal mit einer niederfrequenten Störung überlagert, kann der Schwellwert erreicht werden, ohne dass die eigentliche Welle erkannt worden ist. Bei einer Überlagerung in entgegengesetzte Richtung wird die Amplitude der Welle durch eine niederfrequente Störung soweit minimiert, dass selbst das erste Minimum unter dem Schwellwert liegt und ein anderes Minimum als das erste bestimmt wird. In Abbildung 5.8 (b) ist dieser Fall hellblau markiert. **Eine filterbasierte Unterdrückung der niederfrequenten Störungen könnte Abhilfe schaffen.**

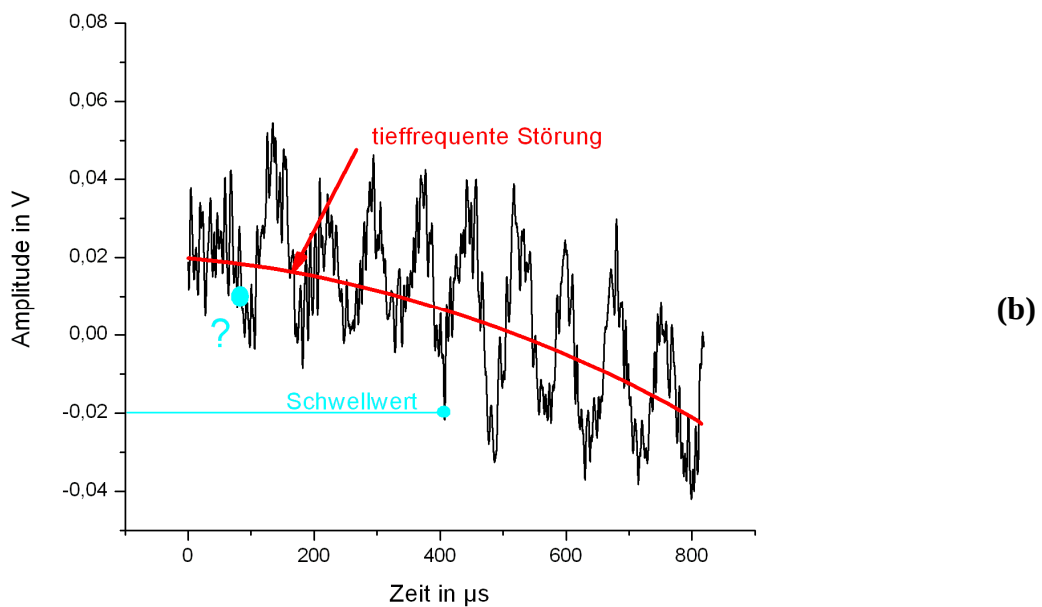
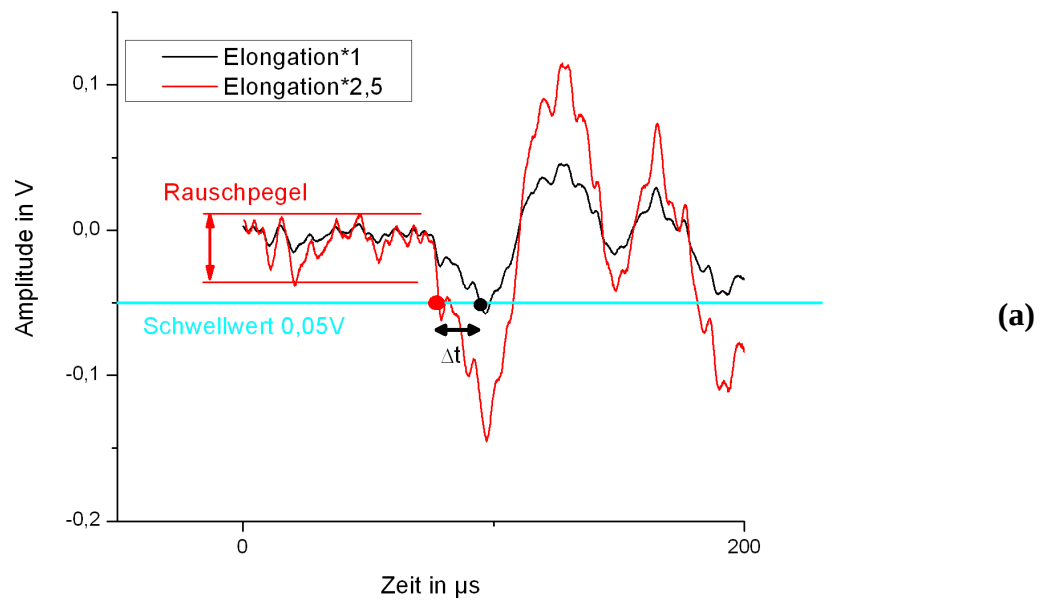


Abbildung 5.6: Verschiebung des Schwellwerts für die gleiche Messung bei (a) unterschiedlicher Skalierung und (b) Erfassung eines folgenden Minimums durch die Überlagerung des Messsignals mit einer niederfrequenten Störung.

5.2.3 Minimum

Das Minimum ist der Punkt, an dem das Messsignal den kleinsten Wert erreicht. Ist das Signal mit einem hochfrequenten Rauschen überlagert (z. B. als reitende Welle) kann es durch die Überlagerung zu einer Verschiebung des Minimums kommen (siehe Abbildung 5.7). Im vorliegenden Beispiel ist das Minimum im Bereich der ersten negativen Auslenkung durch das Rauschen nach rechts vom eigentlichen Minimum verschoben. **Eine Eliminierung der hochfrequenten Rauschteile ist hier sinnvoll.** Stellt die erste negative Auslenkung der Oberflächenwelle nicht das absolute Minimum dar, wird die Laufzeit für einen anderen Punkt der Oberflächenwelle bestimmt, sei es, dass die erste negative Auslenkung nicht die betragsgrößte der Welle ist oder das Signal durch eine tieffrequente Schwingung überlagert ist. Durch die absinkende Elongation der tieffrequenten Störung wird die letzte aufgezeichnete negative Auslenkung das absolute Minimum, wie im Beispiel zu sehen ist. Eine Eingrenzung des Bestimmungsbereichs auf die erste negative Auslenkung, wie in Abbildung 5.7 blau eingezeichnet, kann nur geschehen, wenn die Laufzeitverschiebung hervorgerufen durch den Spannungsunterschied geringer ist als eine Wellenlänge. Jenes ist in den hier vorgestellten Versuchen nicht der Fall und damit ist eine Bereichseingrenzung unterhalb einer Wellenlänge nicht möglich. **Eine Unterdrückung der tieffrequenten Störungen würde diese Probleme beseitigen.**

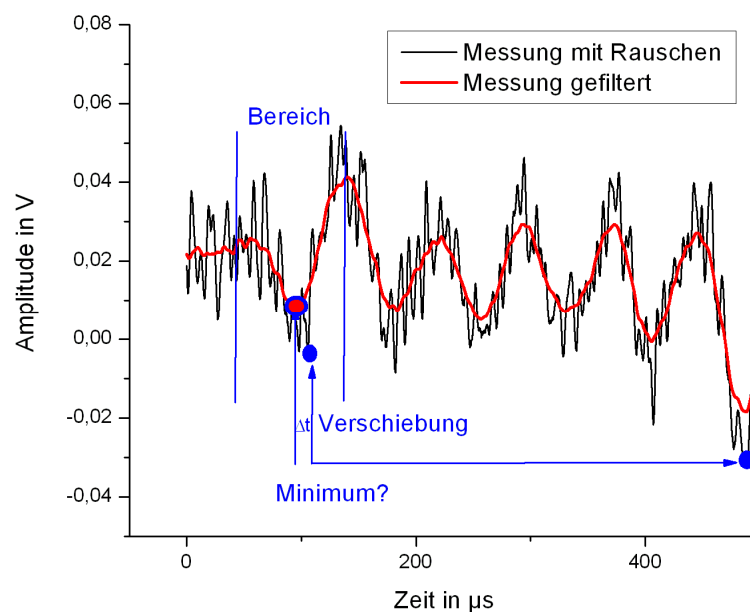


Abbildung 5.7: Verschiebung des Minimums durch das Rauschen und weiteres betragskleinstes Minimum.

5.2.4 Spitzenwerterkennung

Die Spitzenwerterkennung kann über die drei Parameter Schwellwert, Weite und Maximum bzw. Minimum gesteuert werden. An jedem Datenpunkt wird eine Parabel mit mindestens der „Weite“ entsprechenden Datenpunkten mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate in das Signal gelegt. Der Scheitelpunkt der Parabel wird als Zeit- und Amplitudenwert ausgegeben sowie durch die Ausrichtung (Scheitelpunkt als Minimum bzw. Maximum der Parabel, d.h. Spitze oder Tal) charakterisiert. Des Weiteren muss dieser Scheitelwert oberhalb eines zuvor angegebenen Schwellwerts liegen. Sind alle Kriterien erfüllt, gilt der Spitzenwert als erkannt. Werden in einem Bereich für mehrere Punkte die Kriterien erfüllt, wird nur der Wert mit dem geringsten Fehlerquadrat der Kurvenanpassung ausgegeben. Durch die Interpolation können Werte auch zwischen zwei Abtastzeitpunkten des Messsignals liegen und die angegebene zeitliche Auflösung übersteigt damit die zeitliche Auflösung der Messwerterfassung. In Abbildung 5.8 sind für die ersten drei Minima die Parabeln in das Messsignal eingezeichnet. Da bei diesem Kriterium mehrere Minima gefunden werden, muss mit weiteren Kriterien abgeglichen werden, welches das relevante ist. Aufgrund der aus dem Kriterium „Weite“ resultierenden erforderlichen Mindestdauer der Überschreitung, ist das Kriterium robust gegenüber kurzen intensiven Störungen, wie sie bei Messungen mit dem Laservibrometer durch schaltende Relais, Ventile oder Staubkörner vorkommen können. Da dieses Kriterium ebenfalls schwellwertabhängig ist, ergeben sich die gleichen Probleme wie im Punkt Schwellwert 5.2.2 angesprochen. **Auch bei diesem Kriterium ist die Anwendung eines Filters zur Eliminierung der hoch- als auch tieffrequenten Störanteile sinnvoll.** Im Gegensatz zum Schwellwertkriterium werden beim Minimum und Spitzenwertkriterium die Laufzeiten immer zum gleichen Phasenwinkel bestimmt.

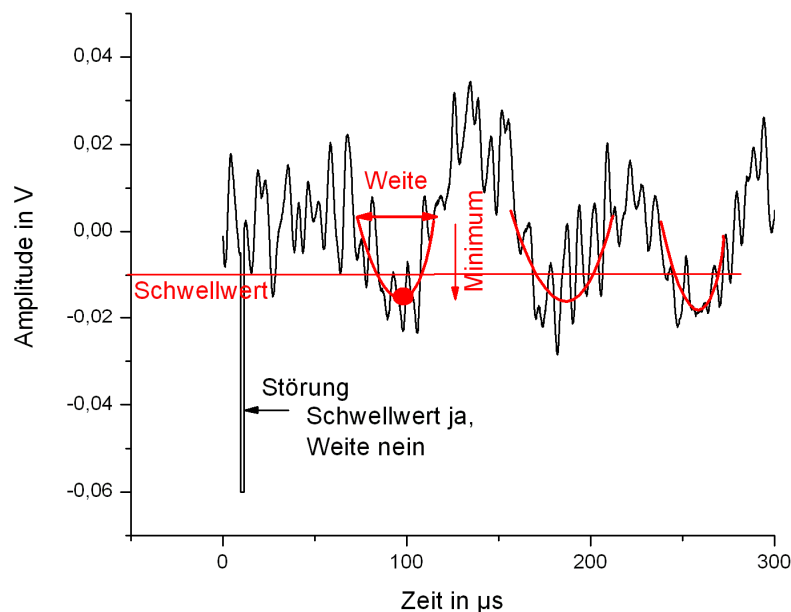


Abbildung 5.8: Bestimmung der Laufzeit mit dem Spitzenwertkriterium.

5.3 Klassifizierung von Störungen

Bei allen Kriterien wirken sich die Störungen negativ auf die Laufzeitbestimmung aus, sei es durch eine Verschiebung der Laufzeit oder durch die Bestimmung der Laufzeit an einem falschen Punkt im Signal. Aus der Beschreibung der Bestimmungskriterien kann abgeleitet werden, dass die beschriebenen Kriterien dann angewendet werden können, wenn es möglich ist, die tieffrequenten sowie hochfrequenten Störungen zu eliminieren und wenn das Signal normiert wird. Hier sollen drei Störungsarten nach Frequenzen unterschieden werden. Die Bereiche befinden sich unterhalb, innerhalb und oberhalb des Frequenzbereichs der an der Oberfläche gemessenen elastischen Wellen. Dieser Bereich soll so weit wie möglich gehalten werden, um bei der Signalfilterung nicht Teile des eigentlichen Signals zu unterdrücken oder zu verfremden.

5.3.1 Störungen unterhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle

Ein auf einer niederfrequenten Störung reitender Signalverlauf, wie in diesem Falle die Oberflächenwelle, wird vom menschlichen Auge sofort erkannt; die rechnergestützte Auswertung jedoch kommt ohne eine Filterung zu fehlerhaften Ergebnissen. Wie oben beschrieben, können Schwellwerte durch die Überlagerung entweder gar nicht, manipuliert (verschobene Phase) oder als Falschanzeige erkannt werden. Ebenso sind die Amplituden durch die Überlagerung verfälscht. Typische Störungen sind mechanische Schwingungen der Prüfmaschine ($< 1 \text{ kHz}$), Übersprechen der Stromnetzfrequenz (50 Hz) oder Schwingungen im Stativ des Laservibrometers ($< 100 \text{ Hz}$).

Die mechanischen Schwingungen sind niederfrequenter als das zu messende Signal. Ein Filter, der nur die Frequenzen oberhalb einer Grenzfrequenz durchlässt, ist ein Hochpassfilter. Dieser Filter kann sowohl analog als auch digital umgesetzt werden. Da jede Filterung das Messsignal beeinflusst, wurde auf eine Filterung des Signals vor der Digitalisierung bewusst verzichtet, um das Messsignal unbeeinflusst aufzuzeichnen. Digitale Filterungen beeinflussen ebenfalls das Messsignal, jedoch bleiben die ursprünglichen Daten erhalten. Dieser Filter wird digital derart umgesetzt, dass das Signal mit einer FFT in den Frequenzraum transformiert wird, die unerwünschten Frequenzanteile auf null gesetzt werden und das Signal dann mit einer inversen FFT in den Zeitbereich zurückgeführt wird. Je nachdem wie der Übergang von gesperrtem zu ungesperrtem Frequenzbereich gestaltet wird, können nach der Rücktransformation störende Artefakte im gefilterten Messsignal auftreten (siehe Kapitel 5.4.1).

5.3.2 Störungen innerhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle

Diese Störungen werden insbesondere durch akustische Ereignisse hervorgerufen, wie beispielsweise Rissbildung und -wachstum oder auch die Eindrückungen von Unebenheiten und Schmutzpartikeln an den Kontaktflächen zur Prüfmaschine. Diese Störungen treten jedoch nicht wie die hoch- und tieffrequenten über mehrere Messungen auf, sondern sind transient und von der Dauer auf eine Messung beschränkt. Eine Filterung im Frequenzbereich ist nicht möglich, da sonst auch das eigentliche Signal entfernt würde. Liegt eine Störung des Messsignals mit ausreichender Stör-Amplitude vor, werden diese Messungen aussortiert. Da diese Störungen mit einer geringen Häufigkeit auftreten, bleiben ausreichend ungestörte Messungen zur Auswertung erhalten.

5.3.3 Störungen oberhalb des Frequenzbereiches der Oberflächenwelle

Hochfrequente Störungen können z. B. durch elektromagnetische Felder hervorgerufen werden, die von verschiedenen elektronischen Bauteilen mit unterschiedlicher Intensität erzeugt werden. Eine Schirmung der Messkette ist unerlässlich; ein gewisses Übersprechen lässt sich jedoch nicht vermeiden. Generell können zwei Arten von hochfrequenten Störungen unterschieden werden: zum einen dauerhafte, die während der gesamten Messung auftreten, auch Rauschen genannt, und transiente, die zum Beispiel beim Schalten von Relais zur Steuerung von Ventilen auftreten. Das Signal- zu Rauschverhältnis gibt das Verhältnis der Amplituden vom Signal zum Rauschen an und wird als Verhältniswert in dB gemessen. Bei Ultraschall-Untersuchungen im Bauwesen wird üblicherweise eine Überschreitung eines Wertes von 6 dB als hinreichend für die Auswertung von Messungen angesehen. Ein Wert von 6 dB bedeutet, dass die Amplituden des Signals eine doppelt so hohe Amplitude wie die des Rauschens aufweisen. Würde dieses Kriterium hier angewendet werden, könnte eine große Anzahl der Messungen nicht ausgewertet werden. Um das Verhältnis zu verbessern, können mehrere Messungen gemittelt (Abbildung 5.14 ff.) oder das Signal tiefpassgefiltert werden. Analog zur Hochpassfilterung ist auch bei der Eliminierung von hochfrequenten Störungen eine Tiefpassfilterung möglich. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass die hochfrequenten anstatt der tieffrequenten Anteile im Frequenzraum auf null gesetzt werden. Im Gegensatz zur Hochpassfilterung gibt es bei einer Tiefpassfilterung die Möglichkeit, auch ohne eine Transformation in den Frequenzbereich, nur im Zeitbereich zu filtern. Hierdurch können nach der Rücktransformation auftretende Artefakte, wie sie für die Transformation und Bearbeitung im Frequenzbereich typisch sind, vermieden werden.

Nachdem die Störungen klassifiziert sind und Filterungsoptionen diskutiert worden sind, soll im nächsten Kapitel die Vorgehensweise zur Filterung des Signals an einem Beispiel gezeigt und die Auswirkungen der Filteralgorithmen auf das Signal diskutiert werden.

5.4 Signalkonditionierung durch Filterung

5.4.1 Filterung des Messsignals

Da jede Filterung das Messsignal beeinflusst, wurde beim Versuchsaufbau und der Versuchsdurchführung generell Wert darauf gelegt, die Störungen im Vorfeld zu unterdrücken. Dies ist jedoch nicht möglich bei unvermeidlichen Störungen, wie z. B. Störungen durch das Lastaufbringen der Prüfmaschine und nicht beeinflussbaren Störungen, wie Partikel im Laserstrahl.

Anhand einer typischen Messung (siehe Abbildung 5.9, entnommen aus Abbildung 5.13 (b)), soll exemplarisch die Methodik der Messdatenfilterung und deren Problematik aufgezeigt werden. Das am zweiten Probekörper aufgenommene Signal ist sowohl mit einer niederfrequenten Störung (rote Linie) als auch einer hochfrequenten Störung überlagert. Zur Verdeutlichung wurde in Abbildung 5.9 ein Bereich mit ausschließlichem Rauschen (blau) markiert, der vor dem Einsetzen der Oberflächenwelle liegt. Die nach diesem Bereich folgende Oberflächenwelle ist zu erkennen, auch wenn sie sich nur geringfügig aus dem Rauschen heraushebt. Die Amplitude der Oberflächenwelle ist durch die Überlagerung mit einer tieffrequenten Störung um diese verschoben, sodass das erste Minimum der

Oberflächenwelle weder durch das Schwellwertkriterium noch durch das Minimumkriterium erkannt wird (siehe Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7).

Durch das Rauschen sind die Täler soweit eingeengt, dass die Spitzenwerterkennung aufgrund des Parameters Weite das erste Minimum nicht als dieses erkennt.

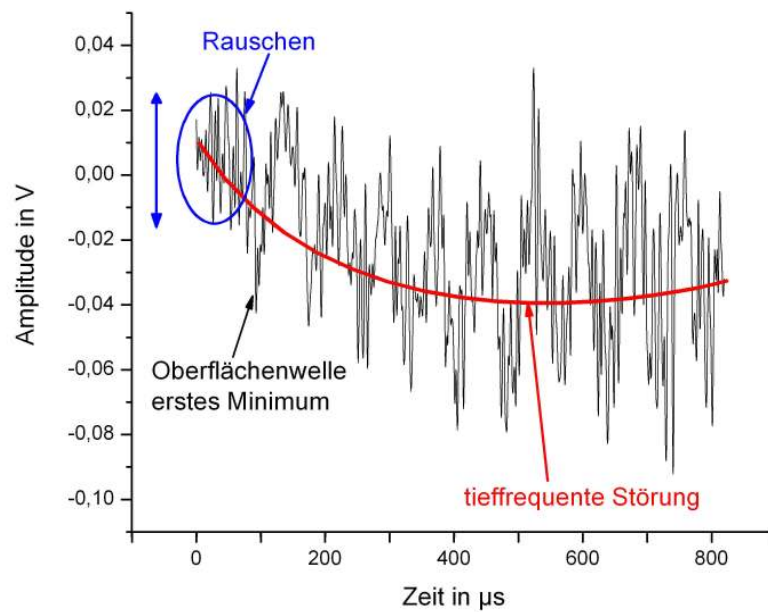


Abbildung 5.9: Messsignal vom 2.PK.

Der Hochpassfilter wurde von den gesperrten Frequenzen zu den ungesperrten mit einer Sprungfunktion bei einer Grenzfrequenz von 2500 Hz ausgeführt. Dieser Übergang wird auch Rechteckfilter genannt. Durch die Filterung ist die die Messung überlagernde tieffrequente Störung aus dem Signal entfernt worden. Das gefilterte Ergebnis (rot) und die ursprüngliche Messkurve (schwarz) sind in Abbildung 5.10(a) gezeigt. Im zweiten Schritt wird das Signal mit einem gleitenden Mittelwert über 250 Datenpunkte geglättet. In Abbildung 5.10(b) sind das hochpassgefilterte Ausgangssignal (rot) und das geglättete Signal übereinander eingezeichnet.

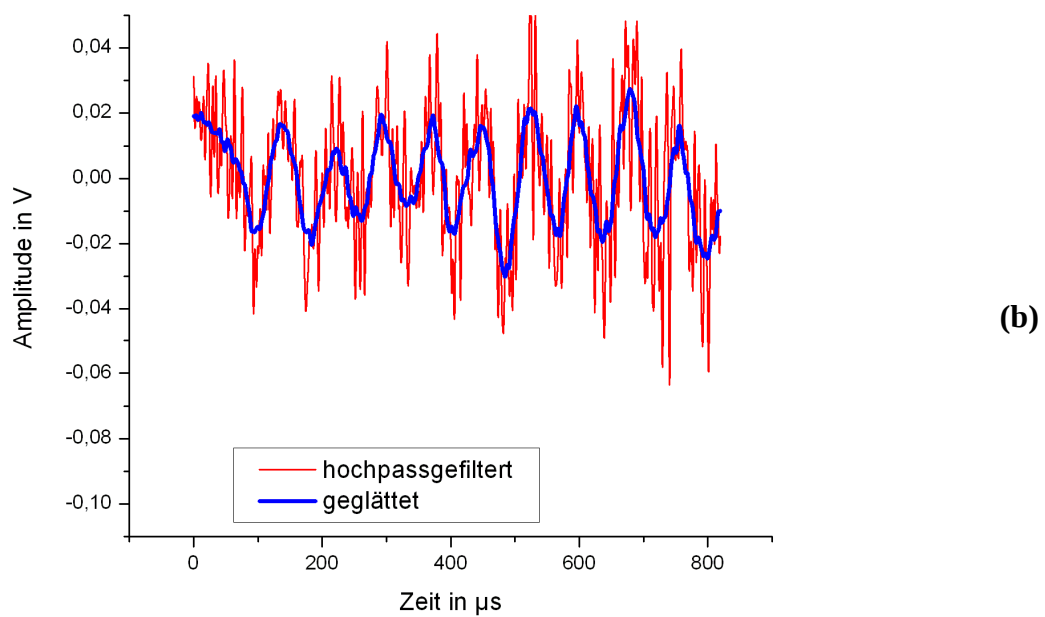
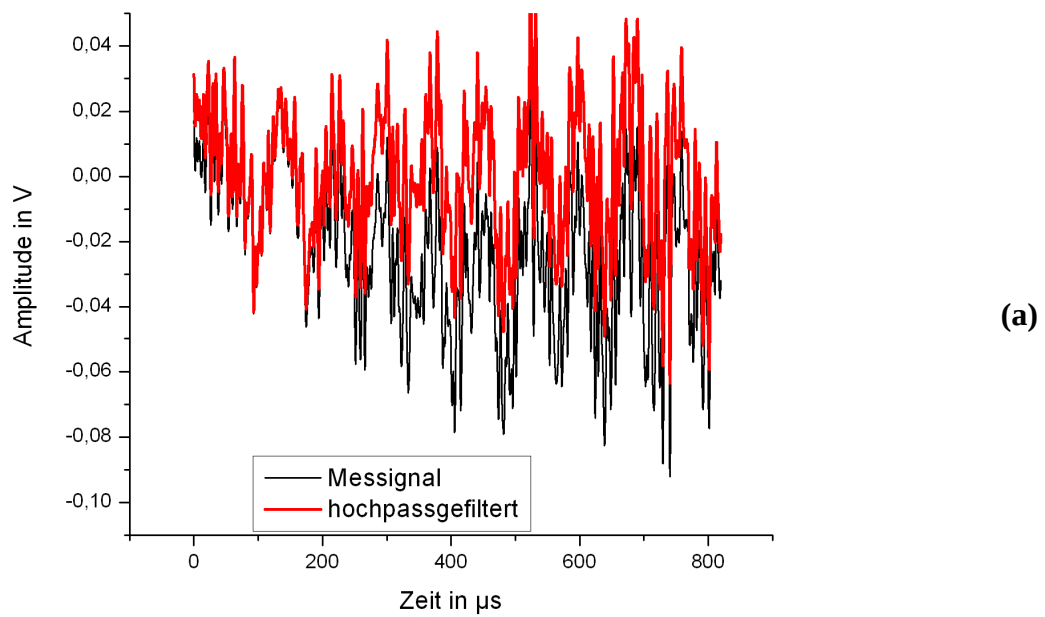


Abbildung 5.10: (a) Messsignal (schwarz) und (a+b) mit einer Grenzfrequenz von 2500 kHz hochpassgefiltertes Signal (rot); (b) mit einem gleitenden Mittelwert von 250 Punkten geglättetes Signal (blau).

Das gefilterte Signal aus Abbildung 5.10 (b) ist in Abbildung 5.11 über dem ursprünglichen Messsignal (schwarz) eingezeichnet. Die Minima und Maxima der gefilterten Welle stimmen zeitlich mit denen des ursprünglichen Messsignals überein; eine Laufzeitbestimmung kann demnach auch am gefilterten Signal erfolgen. Die Wellenform schwingt im gefilterten Signal um die Nulllage. Die niederfrequenten Anteile, die sich zur Elongation der Oberflächenwelle hinzuaddierten, sind entfernt.

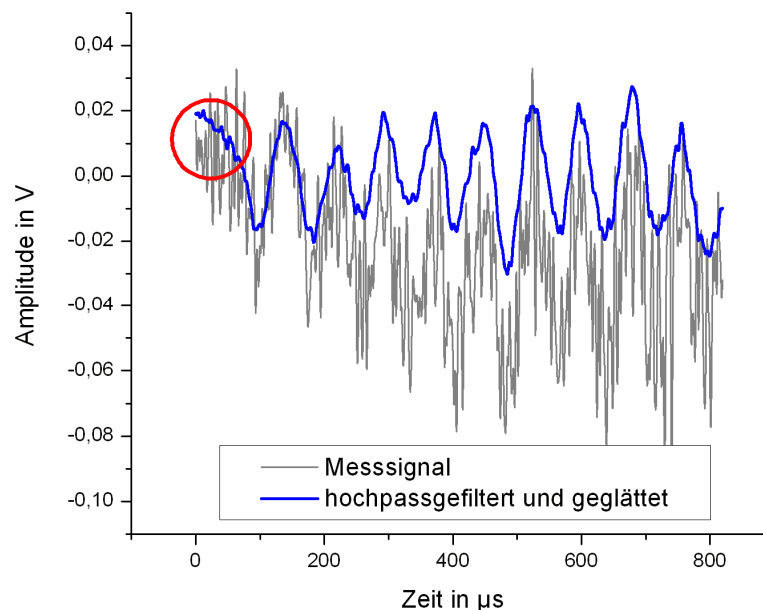


Abbildung 5.11: Im Vergleich zum ursprünglichen Messsignal (schwarz) sind im gefilterten Signal (blau) Artefakte zu Beginn der Messung zu erkennen (rot umrandet).

Damit ist die Voraussetzung zur Anwendung für das Schwellwertkriterium erfüllt und die Messungen nach einer Normalisierung miteinander vergleichbar. Durch die Entfernung des Rauschens sind auch die beiden weiteren Kriterien Spitzenwert und Minimum bestimmbar. Der Einfluss der Filterung auf das Messsignal, insbesondere auf mögliche Änderungen der Laufzeitmessung durch die Filterung, soll im nächsten Kapitel diskutiert werden.

5.4.2 Einfluss der Filterung auf die Laufzeitmessung

Im vorangegangenen Kapitel wurde das Signal derart bearbeitet, dass die Laufzeit nach mehreren Kriterien bestimmt werden kann. Bei der genauen Betrachtung des Anfangsbereichs des gefilterten Signals in Abbildung 5.11, fällt ein Unterschied im ersten Abschnitt (rot umrandet) zwischen ungefiltertem und gefiltertem Signal auf. Das gefilterte Signal beginnt mit einer höheren Elongation als das ungefilterte und zeigt des Weiteren einen Signalverlauf, der in dieser Art nicht zu Aufzeichnungsbeginn vorhanden sein dürfte, d. h. vor dem Durchlaufen der Oberflächenwelle.

Da die Oberfläche vor dem Durchgang der Oberflächenwelle als unausgelenkt zu betrachten ist, sollte die Messkurve mit Werten um null Volt beginnen. Die Elongation im gefilterten Signal ist im Anfangsbereich größer als im gestörten, ungefilterten Signal. Die Filterung vergrößert damit die Abweichung vom idealen Signal im markierten Bereich. Die Wellenform

des Signals der Oberflächenwelle wird durch den Hochpassfilter in den Bereich vor dem Eintreffen der Oberflächenwelle vorgezogen.

Die im Beispiel verwendete Sprungfunktion erzeugt durch die Unstetigkeit in Form eines plötzlichen Wechsels vom gesperrten zum durchgelassenen Frequenzbereich Artefakte im rücktransformierten Signal. Je plötzlicher der Übergang an der Grenzfrequenzfrequenz ist, desto ausgeprägter sind die Artefakte. Eine Funktion, um den Übergang gleitend zu gestalten, ist zum Beispiel die in dieser Arbeit verwendete Butterworthfunktion. Bei der Messdatenfilterung kam eine Butterworthfunktion 3.-Ordnung zum Einsatz. Die Ordnungszahl gibt die Anzahl der Glieder an, die zur Berechnung der Funktion des Überganges verwendet werden; je höher die Ordnung, desto steiler ist der Übergang und desto deutlicher sind die Artefakte ausgeprägt. In Abbildung 5.12 sind die ursprünglichen Messdaten und die mit unterschiedlichen Ordnungen gefilterten Signale eingetragen.

Wie zu erkennen ist, wird die Abweichung vom ungefilterten Signal (schwarz) mit zunehmender Ordnung größer. Das Minimum wird zeitlich nicht verschoben und damit ändert sich die Laufzeit für das Minimumkriterium zwar nicht, jedoch ändert sich die Ausformung des ersten Wellentales. Die stärksten Änderungen sind genau in dem Bereich zu erkennen, der für das Schwellwertkriterium entscheidend ist. Wird die Parabel für das Spitzenwertkriterium in das Wellental gelegt, verschiebt sich durch die flacher sinkende linke Flanke die Position des Spitzenwerts. Da die Filterung bei allen Messungen exakt gleich verlief, bilden auch die durch die Filterung verschobenen und somit beeinflussten Werte den Effekt ab.

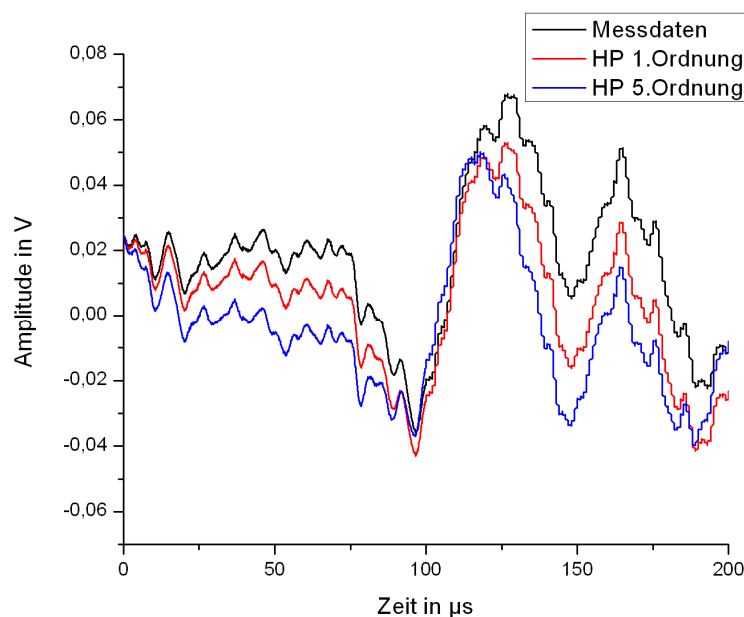


Abbildung 5.12: Ursprungssignal (schwarz) und mit einem Butterworthfilter gefiltertes Signal erster (rot) und fünfter (blau) Ordnung.

Ganz gleich, welche Filter zur Konditionierung eines Signals verwendet werden, ein Einfluss auf die Messergebnisse ist nicht auszuschließen. Aus diesem Grund wurde der Weg einer Zweischrittauswertung gewählt, bei der auf eine Filterung und die damit verbundenen Hin- und Rücktransformation in den Frequenzbereich verzichtet werden konnte, diese wird im Folgendem beschrieben.

5.5 Eliminierung von Fehlmessungen

5.5.1 Klassifizierung von Messungen

Die im Kapitel zuvor beschriebene Signalkonditionierung, die nötig ist, um das Messsignal auswerten zu können, stößt bei Störungen mit zu hohen Amplituden an ihre Grenzen. Diese Störungen treten wiederholt auf und können z. B. hervorgerufen werden durch Vibrationen der Prüfmaschine. Die rechnergestützte Auswertung kann z. B. beim Schwellwertkriterium nicht unterscheiden, ob der Schwellwert durch die zu messende Welle überschritten worden ist oder eine Störung hierfür verantwortlich war. Damit kann es passieren, dass ein Wert bestimmt wird, der nicht dem ersten Minimum der zu messenden Welle zugeordnet werden kann. Eine fehlerhafte Interpretation des Messsignals liegt damit vor. Ein weiterer Fehler-typus, bei dem die relevante Laufzeit nicht bestimmt werden kann, tritt dann auf, wenn im aufgezeichneten Signal die durchgehende Welle nicht abgebildet ist. Dieses kann z. B. durch eine Unterbrechung des Laserstrahls oder durch Fehler im Versuchsablauf geschehen. Eine korrekte Bestimmung der Laufzeit der zu messenden Welle ist damit ausgeschlossen. Es gibt demnach zwei Typen von Fehlmessungen, die zu falschen Messergebnissen führen: zum Einen kann die Laufzeit nicht ausgewertet werden, da die zu messende Welle nicht aufgezeichnet werden konnte; zum Anderen ist das Signal so mit Störungen überlagert, dass die Bestimmung der Laufzeiten am relevanten Minimum nicht durchgeführt werden kann. Bei beiden Typen von Messungen werden jedoch Werte bestimmt, die nicht zum Kontext der Messaufgabe passen und damit eine falsche Eingangsgröße sind. Diese Messungen werden im Folgenden Fehlmessungen genannt. Damit ist ebenfalls das Risiko von Einzelmessungen beschrieben, dass aufgrund einer Fehlmessung der Messpunkt nicht ausgewertet werden kann. Aus diesem Grund bieten sich Mehrfachmessungen an. Werden jedoch die Fehlmessungen mit zur statistischen Auswertung herangezogen, wird das Messergebnis verfälscht. Demzufolge müssen diese Messungen aussortiert werden, bevor z.B. der Mittelwert oder die Standardabweichung bestimmt wird. Bei der Auswertung muss demnach festgestellt werden welche, Messungen Fehlmessungen sind, damit diese aussortiert werden können und die verbleibenden statistisch auswertbaren Messungen herangezogen werden können. Damit für eine Auswertung ausreichend Messungen zur Verfügung standen, wurde an jedem Messpunkt 36-mal gemessen. Die Herangehensweise zum Erkennen von Fehlmessungen ist in Kapitel 5.5.3 beschrieben.

Insbesondere die Messungen mit dem Laservibrometer sind gekennzeichnet durch eine sehr geringe Amplitude der gemessenen Oberflächenwelle und ein schlechtes Signal-zu-Rauschverhältnis, sodass ein durch den Laserstrahl fliegendes Partikel eine wesentlich höhere Amplitude als die Oberflächenwelle erzeugt. Hier seien kurz ein paar typische Messungen vorgestellt: Eine gute Messung (a) zeichnet sich durch eine klare Abzeichnung des Oberflächenwellendurchganges aus, bei dem das erste Minimum gut erkennbar ist und nicht durch hochfrequentes Rauschen überlagert wird. In Abbildung (b) ist eine typische Messung abgebildet, bei der der Durchgang der Oberflächenwelle mit dem ersten Minimum ebenfalls gut zu erkennen ist, auch wenn das Messsignal mit einem hochfrequenten Rauschen überlagert ist. In Abbildung (c) ist eine schlechte aber noch bestimmbar Messung abgebildet, bei der das Rauschen dominanter ist als die eigentliche Welle. Das erste Minimum ist nicht mehr klar zu erkennen. Nur mit einer geeigneten Filterung wird das Messsignal auswertbar. Eine durch eine tieffrequente Störung überlagerte Messung mit einer massiven Störung am Ende des Signals ist in Abbildung (d) dargestellt. Da die massive Störung am Ende des

Signals ist, kann diese Messung ebenfalls ausgewertet werden. Ist eine derartige massive Störung mit einer Amplitude, die um ein Vielfaches größer ist als das eigentliche Messsignal, über den gesamten Aufnahmebereich vorhanden wie in Abbildung (e) gezeigt, kann die Messung nicht mehr ausgewertet werden und wird demzufolge aussortiert. In Abbildung (f) ist eine Fehlmessung zu erkennen, bei der das Signal der Oberflächewelle im Zeitfenster nicht vorhanden ist. Eine derartige Messung muss ebenfalls aussortiert werden.

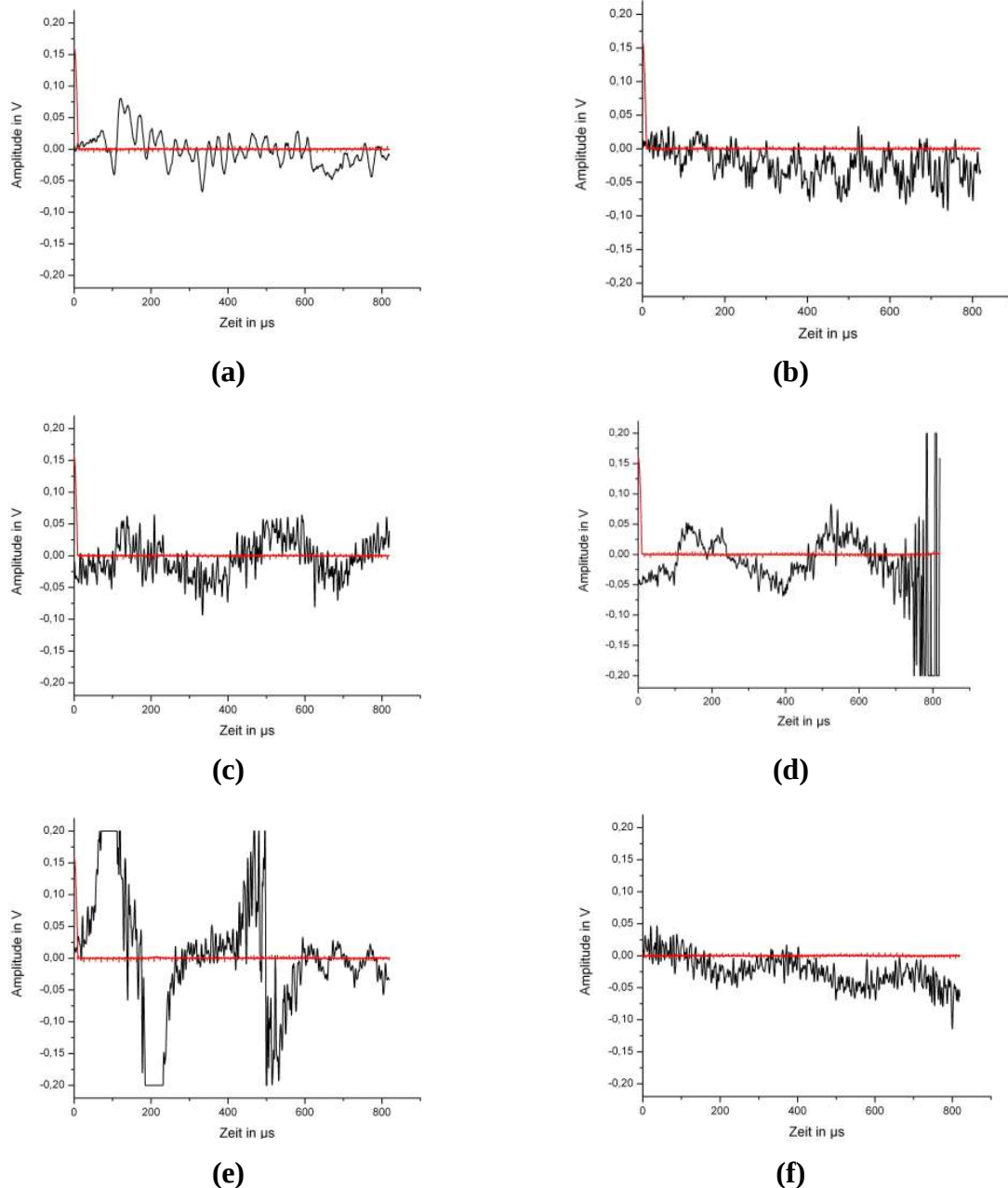


Abbildung 5.13: Typische Messkurven des Laservibrometers: Signal des Laservibrometers (schwarz), Anregungsspannung (rot); (a) gute Messung; (b) typische Messung; (c) noch bestimmbare Messung; (d) bestimmbar mit Störung; (e) gestörte Messung; (f) Fehlmessung.

Eine weitere Möglichkeit der Signalverbesserung und der Minimierung von Störungen ist die Überlagerung mehrerer Messungen. Damit kann zum Beispiel ein Rauschen, welches beliebig auftritt, vermindert und das eigentliche Signal, welches reproduzierbar auftritt, herausgehoben

werden. Eine Überlagerung (Addition mehrerer Messungen) ohne vorheriges Aussortieren von Fehlmessungen birgt das Risiko, dass Störungen, die zumeist eine weit höhere Amplitude besitzen, (vgl. Abbildung 5.13 Messung (e)), das Signal bei der Überlagerung dominieren. Im nächsten Kapitel soll anhand eines Beispiels die Problematik aufgezeigt werden.

5.5.2 Mittelung ohne die Eliminierung von Fehlmessungen

Ein möglicher Weg ein Messsignal ohne Filterung von den zuvor beschriebenen Störungen zu befreien und sämtliche Einflüsse einer frequenzbasierten Filterung zu eliminieren, besteht in der Addition mehrerer Messungen. An einem Beispiel soll gezeigt werden, unter welchen Randbedingungen eine Mittelung von Messungen zur Eliminierung von Störungen geeignet ist. Aus den 36 Messungen an einem Punkt sind in Abbildung 5.14 zehn Messungen eingetragen. Sowohl eine Fehlmessung (blau), bei der ein Fehler in der Messdatenerfassung vorlag, als auch eine gestörte Messung (magenta) sind zu erkennen. Die Amplitude des gestörten Signals ist um ein Vielfaches höher als die der korrekten Messungen.

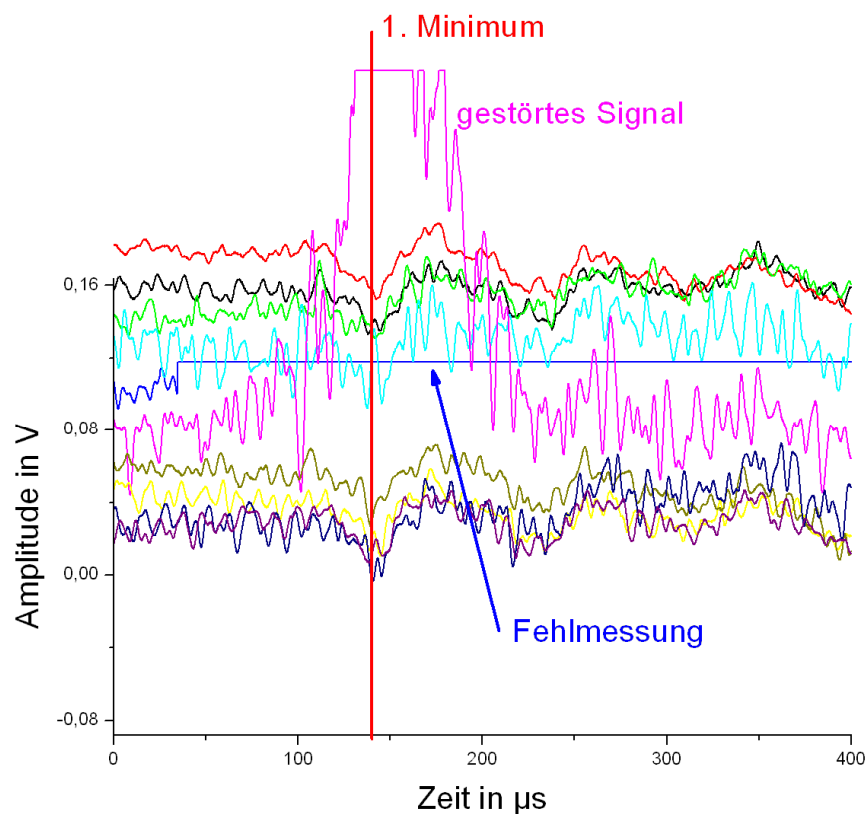


Abbildung 5.14: Zehn Laservibrometer-Messungen an einem Punkt bei gleicher Laststufe.

Werden diese zehn Messungen gemittelt, so ist das erste Minimum der Oberflächenwelle nicht mehr zu erkennen (siehe Abbildung 5.15), da es von dem gestörten Signal überlagert und aufgrund der höheren Amplitude des gestörten Signals dominiert wird.

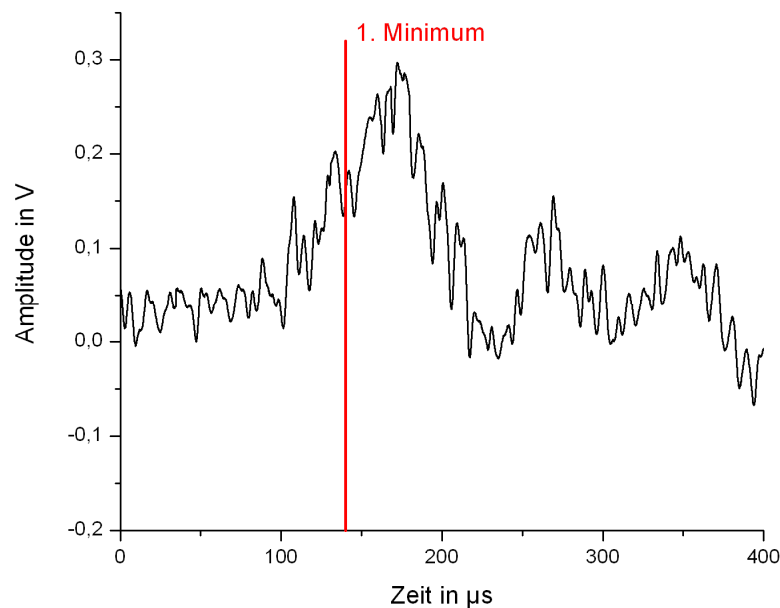


Abbildung 5.15: Mittelwert der zehn Messungen aus Abbildung 5.14.

Eine Mittelung aller Messungen ohne Bewertung der Qualität ist, wie in Abbildung 5.15 gezeigt, nicht zielführend.

5.5.3 Kriterien zur Erkennung von Fehlmessungen

Zum Erkennen von fehlerhaften Messungen werden mehrere Kriterien verwendet. Diese Fehler können sowohl durch eingetragene Störungen als auch durch Fehler im Zeitablauf des Versuchs entstehen. Bei jeder Messung wird das Messsignal mit dem Signal der Anregung zusammen aufgezeichnet. Die korrekte Anregung ist Voraussetzung zur Laufzeitbestimmung und wird anhand mehrerer Kriterien kontrolliert. Ein weiterer Kriterienblock beschäftigt sich mit der Auswertung der Laufzeitmessungen auf deren Plausibilität. Dazu wird z. B. kontrolliert, ob die bestimmten Laufzeiten in einem gewissen Zeitfenster liegen. Dieses Zeitfenster muss mindestens den zu messenden Effekt umfassen. Dieser geht im Maximum von -10 % bis +25 % der Laufzeit und umfasst damit mehrere Wellenlängen, sodass damit nur grobe Ausreißer eliminiert werden können. Da das Zeitfenster mehrere Wellenlängen umfasst, ist es nicht ausgeschlossen, dass z. B. das Schwellwertkriterium beim ersten Minimum ausgelöst wird, das Minimumkriterium oder die Spitzenwerterkennung jedoch an einem weiteren dahinter liegenden Minimum ausgelöst werden und so falsche Werte bestimmt werden. Um dieses zu unterbinden, werden die bestimmten Laufzeiten miteinander verglichen. Ist die Abweichung zwischen den Werten zu groß, gilt die Messung als Fehlmessung und wird aussortiert. Die Differenzen, die zu einer Aussortierung der Messungen führten, wurden dabei für jeden Probekörper separat bestimmt. Die Anpassung der Kriterien an die einzelnen Probekörper ist mit der Messdatenqualität verbunden. Die Zeitspanne, die nicht überschritten werden durfte, lag beim Abgleich des Minimumkriteriums mit dem Spitzenwertkriterium zwischen 6 μs und 8 μs . Der gleiche Wert für die maximale Abweichung wurde zum Vergleich zwischen Spitzenwertkriterium und Schwellwertkriterium verwendet mit einem konstantem Δt von 25 μs , da der Schwellwert vor dem Spitzenwert erreicht wird. Als weiteres Kriterium wurde die Standardabweichung herangezogen: Liegen die Messwerte außerhalb der doppelten Standardabweichung, werden diese ebenfalls

verworfen. Nur Messungen, die jedes Kriterium erfüllen, werden anschließend addiert. Wurden von 36 Messungen weniger als 20 korrekt erkannt, ist der Messpunkt verworfen worden. Je nach Messdatenqualität lag der Durchschnitt der erfolgreichen Messungen bei über 30 Messungen.

5.5.4 Zweischrittauswertung

Die eben genannten Kriterien zur Qualitätskontrolle enthalten neben den Kontrollen des korrekten Versuchsablaufs auch Plausibilitätsbewertungen anhand der Messwerte. Diese können nur am gefilterten und damit veränderten Signal bestimmt werden. Um eine filterbedingte Verfälschung auszuschließen, wurde eine Zweischrittauswertung eingeführt: In einem ersten Durchlauf der Messdatenauswertung werden die Fehlmessungen aussortiert. Dazu werden an den gefilterten und erfolgreich durchgeführten Messungen die Amplituden und Laufzeiten mit ihren Standardabweichungen bestimmt und zu stark fehlerbehaftete Messungen aussortiert. Alle Fehlmessungen, deren Amplitude die Amplitude einer erfolgreichen Messung bei weitem übersteigen könnte, sind damit aussortiert. Hierdurch können die Messsignale aller erfolgreich durchgeführten Messungen ohne Filterung addiert und durch die Anzahl geteilt werden. In einem zweiten Programmdurchlauf werden am gemittelten Messsignal erneut alle Messwerte bestimmt, ohne dass diese jedoch durch eine Filterung beeinflusst werden.

5.5.5 Mittelung nach der Eliminierung von Fehlmessungen

Nach Aussortierung von gestörten Messungen und anschließender Mittelung ist, wie in Abbildung 5.16 eingetragen, die Oberflächenwelle gut zu erkennen. Die für die Laufzeitbestimmung notwendige Normierung ist durchgeführt worden. Die Laufzeit kann nun an der gemittelten Kurve bestimmt werden, ohne dass die Signale gefiltert werden mussten.

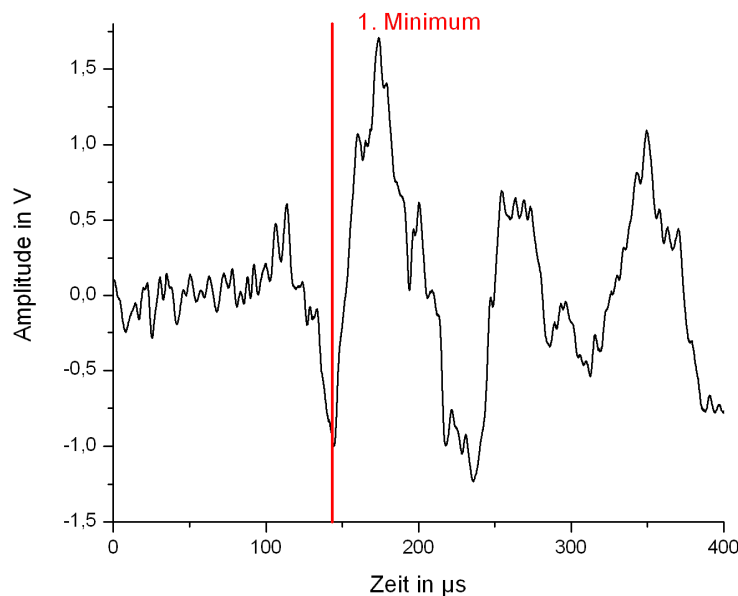


Abbildung 5.16: Mittelung aller gültigen Messungen (hier 33) an einem Messpunkt.

Eine Hin- und Rücktransformation der Messungen in den Frequenzbereich ist nicht mehr nötig, da durch die Überlagerung insbesondere die tieffrequenten Störungen gut eliminiert werden. Ein gewisses Restrauschen ist auch in der gemittelten Messung vorhanden. Ein gleitender Mittelwert, der im Zeitbereich durchgeführt werden kann, kann dieses wirkungsvoll unterdrücken (siehe Abbildung 5.17). Eine Änderung der Kurvenform, wie dieses nach der Filterung im Frequenzbereich in Abbildung 5.12 zu erkennen war, ist nicht mehr zu beobachten. Auf den gleitenden Mittelwert konnte aufgrund der Messdatenqualität zumeist verzichtet werden.

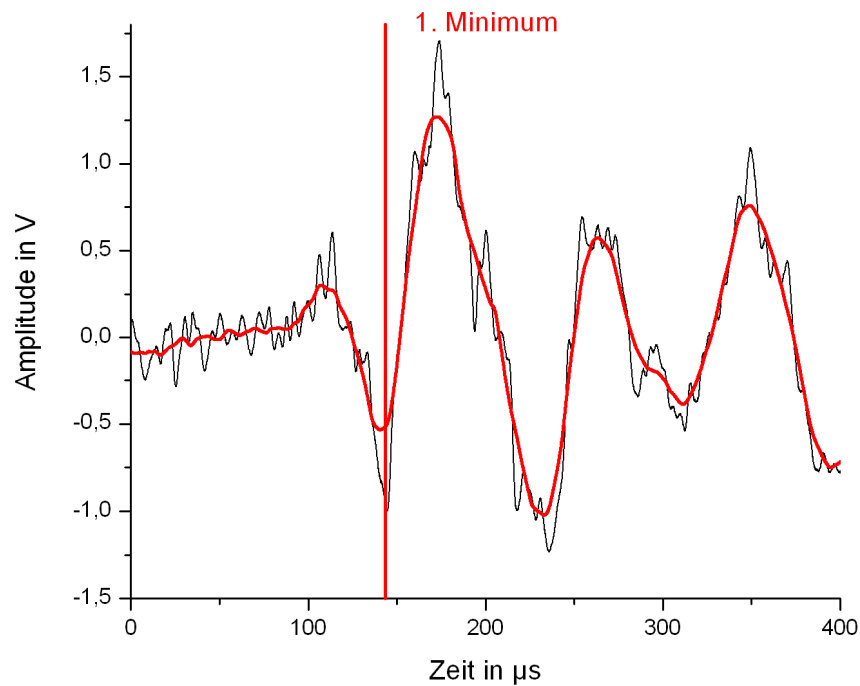


Abbildung 5.17: Gemittelte Kurve (schwarz) und zusätzlich mit einem gleitenden Mittelwert geglättete Kurve (rot).

Da alle Messungen zu einer gemittelten zusammengefasst wurden, kann die Standardabweichung bei der Zweischrittauswertung nicht mehr bestimmt werden.

In Abbildung 5.18 sind im Polardiagramm (a) die an den Einzelmessungen bestimmten und dann gemittelten Werte für den ersten Durchlauf und die an der gemittelten Kurve bestimmten Werte (b) für den zweiten Durchlauf eingetragen. Es ist an dem glatteren Verlauf der Kurve ersichtlich, dass die Ausreißer erfolgreich (z. B. in 280°, 0° und 60° Richtung) eliminiert werden konnten und sich die Qualität damit entscheidend verbessert hat.

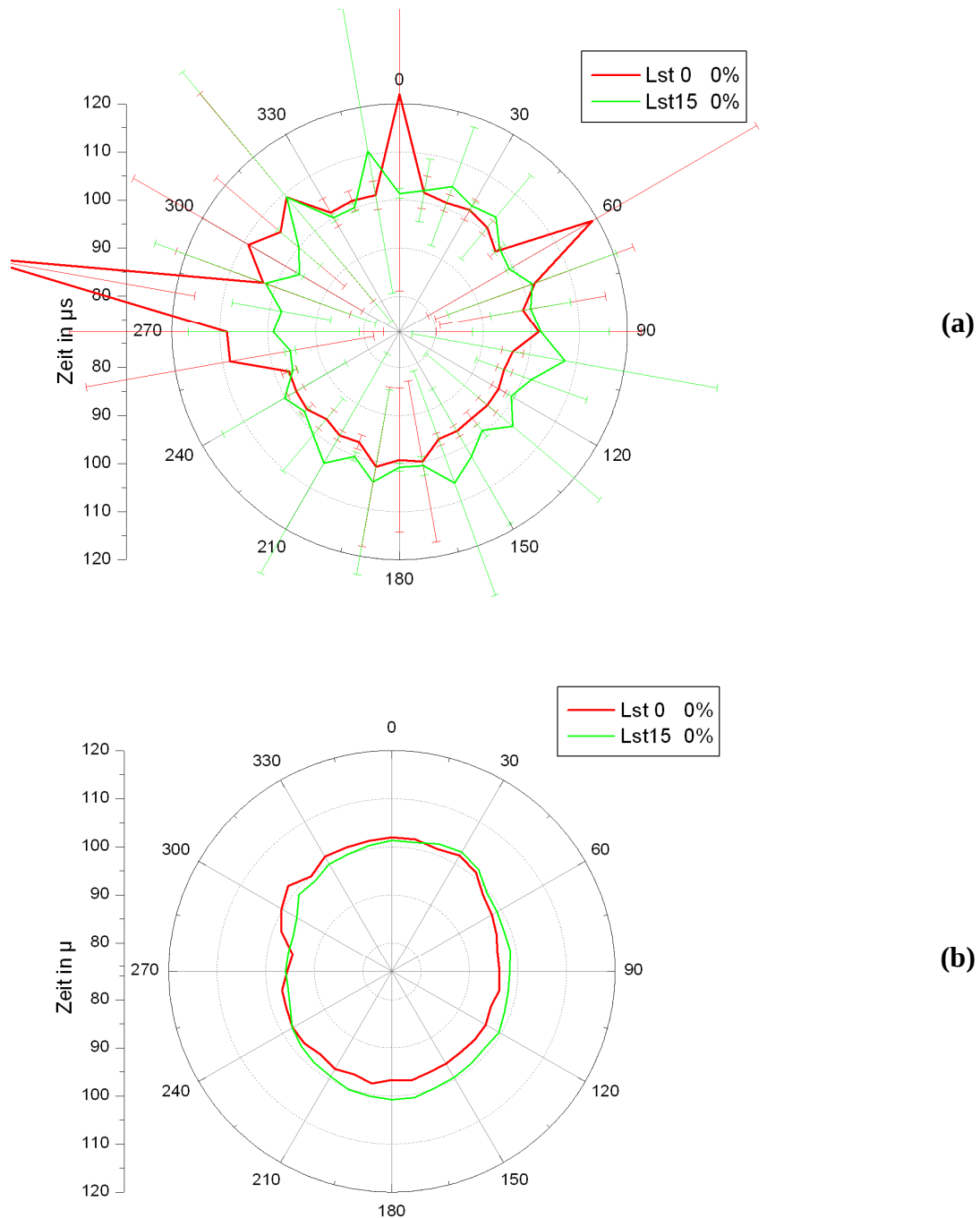


Abbildung 5.18: Vergleich der Laufzeiten beim (a) ersten und (b) zweiten Durchlauf (rechts) der Auswertung für LSt 0 (rot) und 15 (grün).

5.6 Laufzeitmessung mit Piezosensoren

Die beim Sensorenarray, bei den Ultraschallversuchen und im linearen Versuchsaufbau verwendeten Sensoren sind piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. Bei diesen Sensoren wird die von einer durchlaufenden Welle hervorgerufene Oberflächenbeschleunigung von einem Piezokristall in eine Spannung gewandelt und von der Messwerterfassung aufgezeichnet. Typisch für diese Art von Sensoren ist eine frequenzabhängige Dämpfung, die im Frequenzraum nur einen gewissen Messbereich zulässt. Bei den hier verwendeten Sensoren ist dieser Bereich so eingestellt, dass sowohl tieffrequente als auch hochfrequente Störungen ausreichend gedämpft sind und damit ohne Filterung ausgewertet werden konnten. Auf eine Mittelung und die damit verbundene Zweischrittauswertung konnte bei den Piezosensoren verzichtet werden, sodass bei den Versuchen im Hörschallbereich 36 Messungen zur Verfügung standen, eine statistische Auswertung möglich war und die Standardabweichung in die Graphen eingetragen werden konnte. Bei den Ultraschallversuchen wurden für ein abgespeichertes Signal zehn Messungen gemittelt und fünf dieser Mittelungen aufgezeichnet. Aufgrund der geringen Anzahl von fünf einzeln abgespeicherten Signalen wurde auf die Eintragung der Standardabweichung bei den US-Versuchen verzichtet.

Die Kriterien zur Laufzeitbestimmung (Minimum, Schwellwert und Spitzenwerterkennung) sind zum besseren Vergleich analog zu denen des Laservibrometers verwendet worden. Durch das geringe Rauschen wären auch andere Auswertungen, wie z. B. der Ersteinsatz, möglich gewesen. Trotz des geringeren Rauschens wurden die Kriterien für erfolgreiche Messungen ebenfalls angewendet, um die hier zwar seltener vorkommenden, aber dennoch auftretenden Fehlmessungen, die z. B. durch Fehler im Versuchsablauf entstanden, zu eliminieren.

6 Messergebnisse

6.1 Spannungssensitivität in Abhängigkeit von Wellenart, Mess- und Polarisationsrichtung

6.1.1 Einleitung

In den von Feldmann durchgeführten Versuchen wurde an Quadern ($10 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$) eine Spannungsabhängigkeit der Oberflächenwellengeschwindigkeit in Lastrichtung gezeigt. In diesen Versuchen wurde der Probekörper in einem ersten Zyklus bis 80 % der Bruchlast und in einem zweiten Zyklus bis zum Bruch belastet. Die in Abbildung 6.1 gezeigte Messung umfasst den zweiten Lastzyklus. Nach einem indifferenten Bereich bis ca. 15 % der Bruchlast ist danach ein steiler Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu erkennen. Mit zunehmender Last nimmt die Steigung ab und der Gradient wird negativ ab 70 % der Bruchlast.

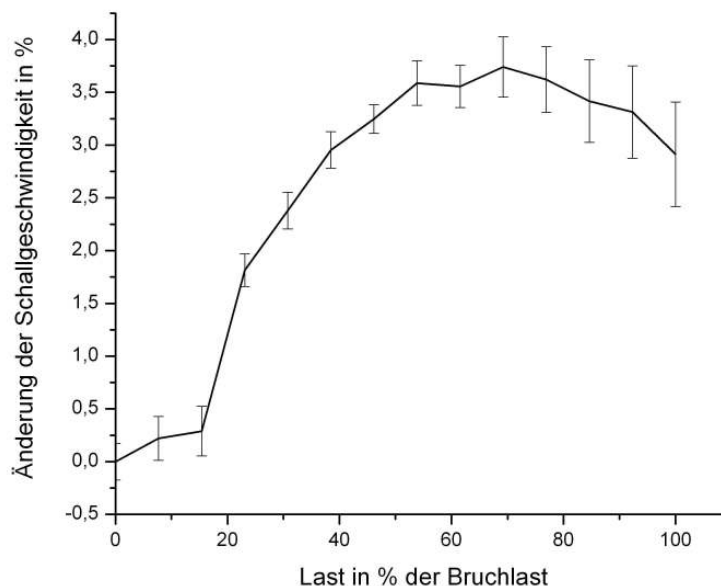


Abbildung 6.1: Messungen mit Zwei-Sensoren in Lastrichtung an einem Probekörper mit $20 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ nach [Feld07].

Im Mittelpunkt der Messungen am ersten Probekörper stand sowohl die Wiederhol- und Übertragbarkeit der von Feldmann gemessenen Ergebnisse auf andere Probekörper als auch die Messbarkeit des Effekts bei der Verwendung unterschiedlicher Wellentypen. Des Weiteren sollten in diesem Versuch neue Versuchsaufbauten getestet und für die Erstellung zukünftiger Versuchsaufbauten Erfahrungen gesammelt werden, bevor die Versuche auf eine Serie an Probekörpern ausgeweitet wurden. Damit setzen sich die Untersuchungsziele von denen des zweiten bis fünften Probekörpers aufgrund des experimentellen Charakters deutlich ab. Daher wird dieser Versuch als Vorversuch bezeichnet. Aus diesem Grund sollen in diesem Kapitel die gemessenen Effekte weder analysiert noch auf deren Deutung eingegangen werden, sondern nur auf die generelle Messbarkeit des Effekts bei unterschiedlichen Wellenarten und Messmethoden.

6.1.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsaufbauten erfolgten wie in Kapitel 4 beschrieben. Ein Unterschied zwischen dem ersten und den darauffolgenden zweiten bis fünften Probekörpern bestand für die Ultraschall-Versuchsaufbauten darin, dass die zur durchschallenden Messung in Lastrichtung verwendeten Versuchsaufbauten noch nicht gefertigt waren (vgl. Kapitel 4.5). Das Sensorenarray war ebenfalls noch nicht erstellt. Beim Laservibrometer-Versuchsaufbau lag der Unterschied in einer geringeren Abtastrate von 500 kS/s bei der Messdatenaufzeichnung.

6.1.3 Versuchsdurchführung

Der Probekörper wurde in zwei Zyklen belastet. Der erste Belastungszyklus erreichte mit 3,5 MN 34 % der Bruchlast. Danach wurde der Probekörper entlastet und in einem zweiten Zyklus bis zum Versagen belastet (Bruch bei 10,5 MN). Die Belastungszyklen sind in Abbildung 6.2 gezeigt. Die Vorhersage der Bruchlast erfolgte in diesem Experiment sowohl mithilfe der gemessenen Oberflächenwellengeschwindigkeit als auch anhand der Dehnung sowie der zuvor an Prüfwürfeln bestimmten Festigkeit. Die Belastung wurde jeweils in Laststufen von 500 kN (2,1 MPa) erhöht. Ab einer Last von 83 % der Bruchlast wurden die Belastungsschritte auf 250 kN (1,05 MPa) gesenkt. Dieses geschah, um eine bessere Auflösung im Bruchbereich zu erzielen. Die Messungen wurden bei jeder Laststufe durchgeführt, während die Last konstant gehalten wurde. Jede Laststufe wurde für circa 20 Minuten gehalten. Des Weiteren wurden bei 83 % der Bruchlast alle Versuche bis auf das Laservibrometer abgebaut, um eine Zerstörung der Sensoren beim Bruch auszuschließen. Zum Abbau der Sensoren musste der Probekörper entlastet werden, die weiterführende Belastung erfolgte mit einer geringen Überschneidung der Belastung.

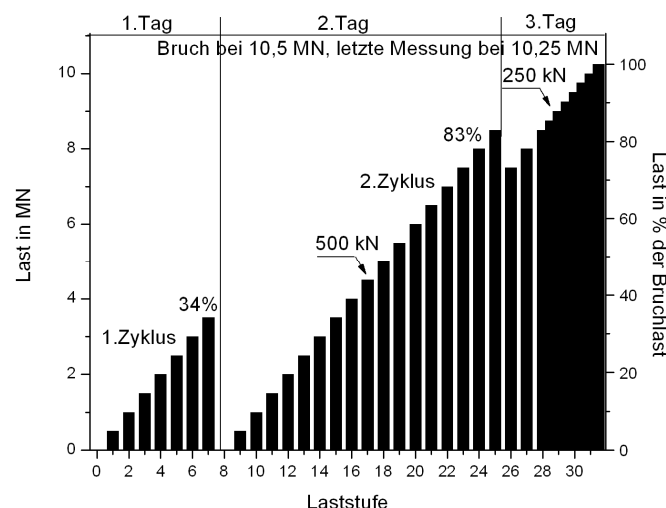


Abbildung 6.2: Belastungszyklen für 1.PK. Die Last wurde bei jeder Laststufe für ca. 20 Minuten konstant gehalten.

Die im nächsten Kapitel beschriebenen Untersuchungsziele des Vorversuchs werden im Nachfolgenden anhand des zweiten Lastzyklus diskutiert.

6.1.4 Oberflächenwellen

6.1.4.1 *Monodirektional*

6.1.4.1.1 Untersuchungsziel

Das Ziel der folgenden vergleichenden Versuche ist es, zunächst die Übertragbarkeit der an einem Probekörper mit der Dimension $10 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$ gemessenen und in Abbildung 6.1 abgebildeten Ergebnisse auf einen Probekörper mit anderer Dimension und Zusammensetzung zu überprüfen sowie in einem zweiten Schritt die Übertragbarkeit der mit dem Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau gemessenen typischen Verlaufsform der Schallgeschwindigkeit über der Last mit der des neu erstellten Laservibrometer-Versuchsaufbaus zu vergleichen. Der Laservibrometer-Versuchsaufbau unterscheidet sich sowohl durch die Anregung mit einem Piezoaktor als auch durch die Messung mit dem Laservibrometer als Sensor vom Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau mit Stahlkugelhammer und Piezosensoren. Der klassische Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau bestimmt die Laufzeit zwischen den beiden gleichzeitig aufgenommenen Sensoren. Im Gegensatz dazu wird die Laufzeit beim Laservibrometer-Versuchsaufbau durch die Zeitdifferenz der zeitkonstanten Anregung mit dem Piezoaktor und dem Messsignal des Laservibrometers bestimmt.

6.1.4.1.2 Messergebnisse

Am ersten Probekörper ist mit beiden Verfahren parallel gemessen worden. Die Änderung der Schallgeschwindigkeit der Oberflächenwelle in Lastrichtung ist in Abbildung 6.3 für die Laservibrometermessung (schwarz) und die des aus den Vorexperimenten unveränderten Zwei-Sensoren-Versuchsaufbaus (rot) über der Bruchlast in % aufgetragen.

Für beide abgebildeten Kurven folgt nach einem kurzen Absinken der Schallgeschwindigkeit bis ca. 5 % der Bruchlast ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit mit abnehmender Steigung. Ab ca. 70 % der Bruchlast nimmt die Schallgeschwindigkeit ab. Die Kurve für den Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau stimmt mit der des Laservibrometer-Versuchsaufbaus bis zur Demontage des Zwei-Sensoren-Versuchsaufbaus überein. Über den gesamten Bereich sind die Abweichungen bei gleicher Last geringer als die Standardabweichung der Messwerte.

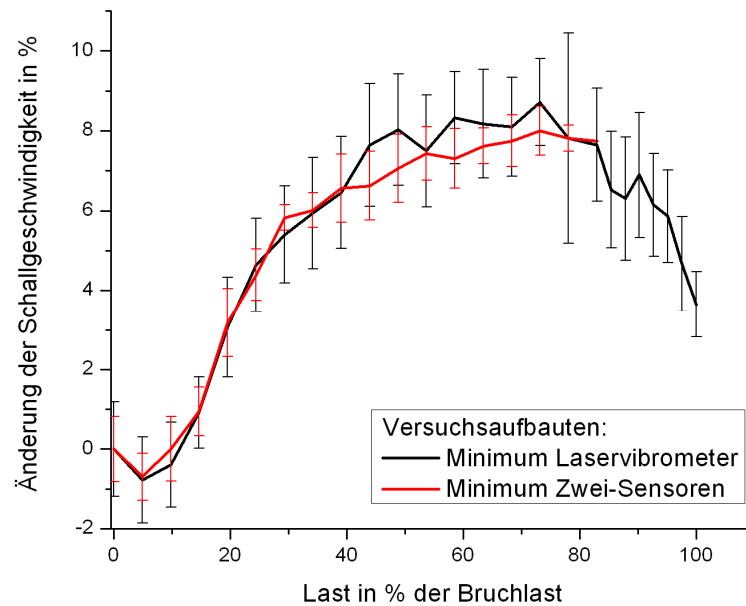


Abbildung 6.3: Vergleich Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau mit Laservibrometer-Versuchsaufbau, aufgenommen im 2.LZ am 1.PK.

Die in den vorangegangenen Versuchen festgestellten Geschwindigkeitsänderungen wurden mit anderen als in dieser Arbeit vorgestellten Kriterien bestimmt und ausgewertet, ebenso ist die Vorbelastung nicht vergleichbar. Aus diesem Grund ist ein relativer Vergleich der Kurvenformen möglich, nicht jedoch ein Vergleich der Beträge der prozentualen Änderungen. Für die hier aufgeführten Versuche (erster Probekörper und Quader mit $10 \times 20 \times 50 \text{ cm}^3$) und für beide Messmethoden ist die Kurvenform der Oberflächenwellengeschwindigkeit über der Last ähnlich mit einem abflachendem Anstieg der Schallgeschwindigkeit bis circa 70 % und einem darauf folgendem Absinken. Die Messungen mit dem Laservibrometer entsprechen denen vom linearen Zwei-Sensoren-Versuchsaufbau. Wird am selben Probekörper gemessen, stimmen auch die prozentualen Änderungen der Schallgeschwindigkeit überein.

6.1.4.2 Richtungsabhängigkeit

6.1.4.2.1 Untersuchungsziele

Die einaxiale Belastung ruft einen Spannungszustand mit einer in Lastrichtung liegenden Hauptspannungsrichtung hervor. Je nach Schnittwinkel unterscheiden sich die Anteile an Normal- und Tangentialspannung. Normal- und Tangentialspannungen interagieren in unterschiedlicher Weise mit dem Medium (hier Beton: z. B. Richtung des Risswachstums, Dehnung). Hat eine Spannung, z. B. die Normalspannung, wie zuvor festgestellt eine Auswirkung auf die Schallgeschwindigkeit, so könnte die richtungsabhängige Änderung des Normalspannungsanteils ein richtungsabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung nahelegen.

In einem Vorversuch sollte geklärt werden, ob diese Vorüberlegungen auch für Oberflächenwellen zutreffen, der Richtungsunterschied ausreichend prägnant ausfällt und der Aufwand mit großen Probekörpern zur Messung der Schallgeschwindigkeit in Richtungsabhängigkeit gerechtfertigt ist, da die richtungsabhängige Betrachtung der Schallgeschwindigkeit an kleinen, „stabförmigen“ Probekörpern nicht möglich ist.

6.1.4.2.2 Messergebnisse

Von den Messergebnissen des Laservibrometers ist in Abbildung 6.4 eine Messung in Lastrichtung (schwarz) und eine Messung orthogonal dazu (rot) eingetragen. Wie oben für die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung diskutiert, zeigt auch die Schallgeschwindigkeit orthogonal zur Lastrichtung eine prägnante Abhängigkeit von der Belastung des Probekörpers. Das anfängliche Absinken der Schallgeschwindigkeit setzt sich orthogonal bis 10 % fort und damit etwas länger als in Lastrichtung mit 5 %. Der folgende Anstieg der Schallgeschwindigkeit ist etwas geringer, wodurch sich ein größer werdender Schallgeschwindigkeitsunterschied zwischen den beiden Messrichtungen ausbildet. Ab ca. 50 % der Bruchlast ist das Maximum erreicht und ein zunehmend negativer Gradient der Schallgeschwindigkeit in orthogonaler Richtung ist zu beobachten. Im Gegensatz dazu steigt die Schallgeschwindigkeit für die Lastrichtung bis zu ihrem Maximum bei 70 % an; damit nimmt der Abstand der beiden Kurven in diesem Bereich (50-70 %) weiter zu und vergrößert sich im nachfolgenden Bereich durch das deutlichere Absinken der Schallgeschwindigkeit in orthogonaler Richtung. Bei der Bruchlast erreicht die Differenz ihr Maximum mit 10 %.

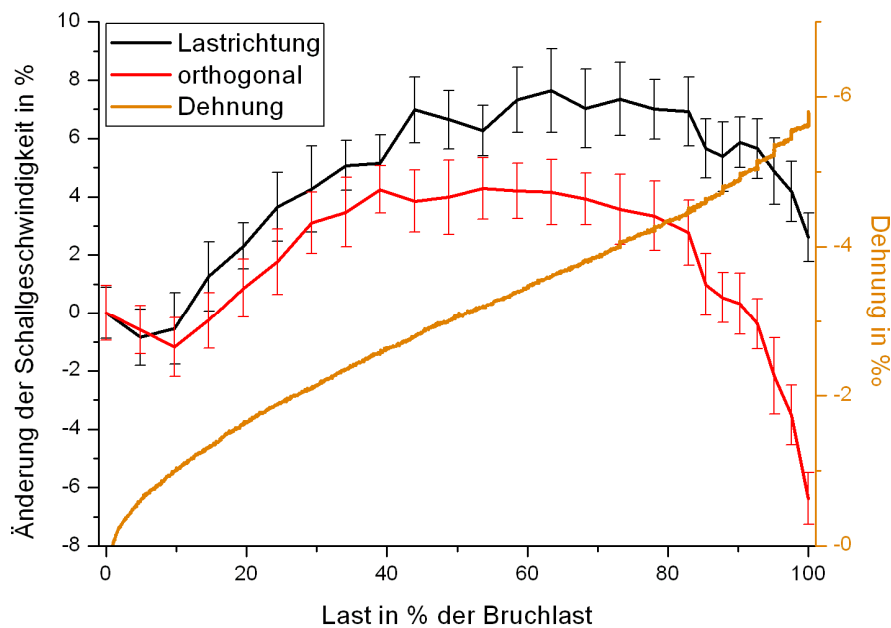


Abbildung 6.4: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % und Dehnung in Lastrichtung in % über der Bruchlast in % am 1.PK.

Es kann festgehalten werden, dass die Oberflächenwelle ein richtungsabhängiges Verhalten aufweist. Die beiden Messrichtungen unterscheiden sich sowohl von den erreichten Maxima und Minima als auch von der Kurvenform, die dazwischen liegenden Richtungen sind im Anhang 1.2 gezeigt. Ab ca. 40 % liegen die gemessenen Werte außerhalb der Standardabweichung der jeweils anderen Richtung. Der unterschiedliche Verlauf ist demnach nicht auf etwaige Messunsicherheiten zurückzuführen. Weitere Versuche zu dem Thema sind lohnend und auch die dafür benötigten größeren Probekörper. Eine weitere Optimierung des Versuchsaufbaus gerade in Hinblick auf eine bessere zeitliche Auflösung ist anzustreben.

6.1.5 Ultraschallwellen

6.1.5.1 *Untersuchungsziel*

In der Literatur sind bisherige Versuche zur Lastabhängigkeit von Schallwellen in Probekörpern unterschiedlichsten Materials mit Ultraschall meistens orthogonal zur Lastrichtung durchgeführt worden, siehe hierzu auch Kapitel 1.2. Dies ist damit begründet, dass eine Einleitung der Schallwellen im Bereich der Lasteinleitung schwer zu realisieren ist und damit Messungen in Lastrichtung für durchschallende Wellen nur unter bestimmten Randbedingungen und speziellen Lasteinleitungsplatten möglich sind. Um den für die Durchschallung in Lastrichtung größeren Aufwand des Versuchsaufbaus zu rechtfertigen, sollte erst einmal im Vorversuch am ersten Probekörper orthogonal zur Lastrichtung gemessen werden. Sind orthogonal zur Lastrichtung Effekte messbar, so ist dieses auch in Lastrichtung zu erwarten. Des Weiteren sollte untersucht werden, welche Wellenart und Polarisierung - longitudinal (100 kHz) oder transversal (50 kHz) mit einer Schwingrichtung in- und orthogonal zur Lastrichtung- sensitiver auf eine Belastungsänderung reagiert, gerade auch in Hinblick auf den Vergleich von Wellen im Ultraschallbereich und den Oberflächenwellen im Hörbereich. Bei den Transversalmessungen lag das Hauptaugenmerk auf der Ausprägung des Effekts bei unterschiedlichen Polarisationsrichtungen.

6.1.5.2 *Messergebnisse*

6.1.5.2.1 Longitudinal

Für eine erste qualitative Abschätzung von Veränderungen im Messsignal sind Visualisierungen des Messsignals gut geeignet. Eine übliche Art der Visualisierung ist die aus dem Ultraschall bekannte B-Bild-Darstellung. Bei dieser Darstellungsmethode werden die Messkurven farbkodiert über der Zeit aufgetragen und die Messpunkte nebeneinander. Auf diese Weise kann der gesamte Verlauf der Wellenform über der Zeit üblicherweise an verschiedenen Orten betrachtet werden. Wird anstelle des Messpunktes (Ort) die Laststufe abgetragen, kann die Änderung des Wellenverlaufs bei unterschiedlichen Belastungen verglichen werden (siehe Abbildung 6.5).

Die Spannungsverläufe der einzelnen Messungen der US-Longitudinalwelle sind in Abbildung 6.5 farbkodiert als B-Bild über den Laststufen abgetragen. Diese visuelle Art der Darstellungen von Messsignalen vermittelt einen schnellen ersten Eindruck über die Änderungen des Signals, in diesem Fall über die Last, anstatt wie sonst üblich über den Ort. Das erste Minimum ist in Abbildung 6.5 orange markiert. Eine Krümmung der Farbbanden ist besonders zu Beginn der Belastung hin zu geringeren Laufzeiten gut zu erkennen; dieses bedeutet eine Laufzeitänderung und zeigt, dass die Laufzeit der US-Longitudinalwelle ebenfalls lastsensitiv reagiert.

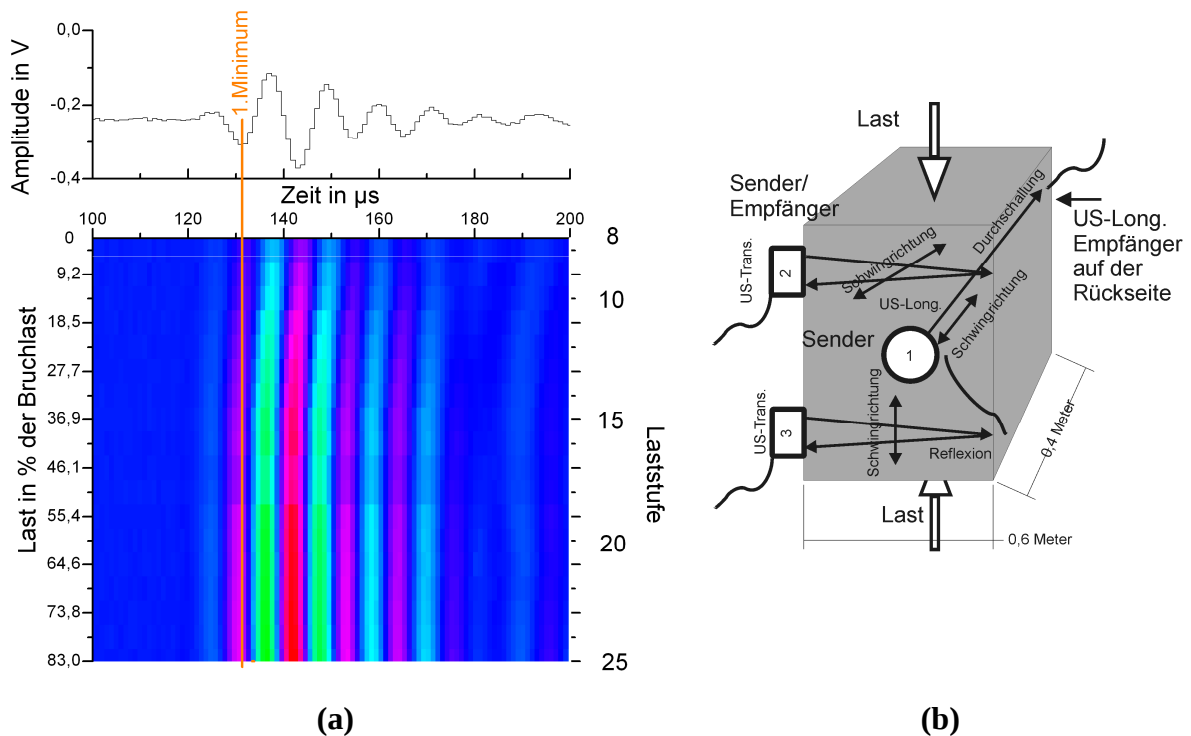


Abbildung 6.5: Longitudinalwellenmessung am 1.PK orthogonal zur Lastrichtung für Position 1. (a) Einzelne Messung (oben) und B-Bild (unten) über Bruchlast in %. Das erste Minimum ist orange markiert. (b) Skizze der Messposition.

Die Auswertung der US-Longitudinalwellen in Durchschallung erfolgt mit den gleichen Kriterien zur Auswertung wie bei den Laservibrometer-Messungen. Die gleichen Bestimmungswege wurden angewendet. Die Abtastrate der Messwerterfassung betrug 1 MS/s. Das Minimumkriterium kann nur für Werte bestimmt werden, die der zeitlichen Auflösung von 1 MS/s entsprechen. Im Gegensatz dazu können beim Spitzenwertkriterium auch Zeiten zwischen den Abtastzeitpunkten interpoliert werden. In Abbildung 6.6 ist die Bestimmung der Schallgeschwindigkeitsänderung mit dem Minimumkriterium (rot) und dem Schwellwertkriterium (schwarz) eingetragen. Da der Effekt für Longitudinalwellen orthogonal zur Lastrichtung sehr gering ausfällt, ist die Auflösung des Minimumkriteriums bei gegebener Messstrecke nicht ausreichend. Aus diesem Grund ist nur ein Wertwechsel in der Schallgeschwindigkeit von LSt 11 zu 12 zu sehen, Zwischenwerte können im Gegensatz zum Spitzenwertkriterium nicht aufgelöst werden. Beim Spitzenwertkriterium (schwarz) erfolgt nach einem verhaltenen Anstieg in den ersten drei Laststufen ein steiler Anstieg der Schallgeschwindigkeit, auf den ein Bereich mit sich wenig ändernder Schallgeschwindigkeit folgt. Kurz vor der Demontage bei ca. 80 % der erwarteten Bruchlast beginnt ein Absinken

der Schallgeschwindigkeit. Die prozentuale Änderung der Schallgeschwindigkeit fällt wesentlich geringer aus als bei den beiden Versuchen mit Oberflächenwellen in Lastrichtung.

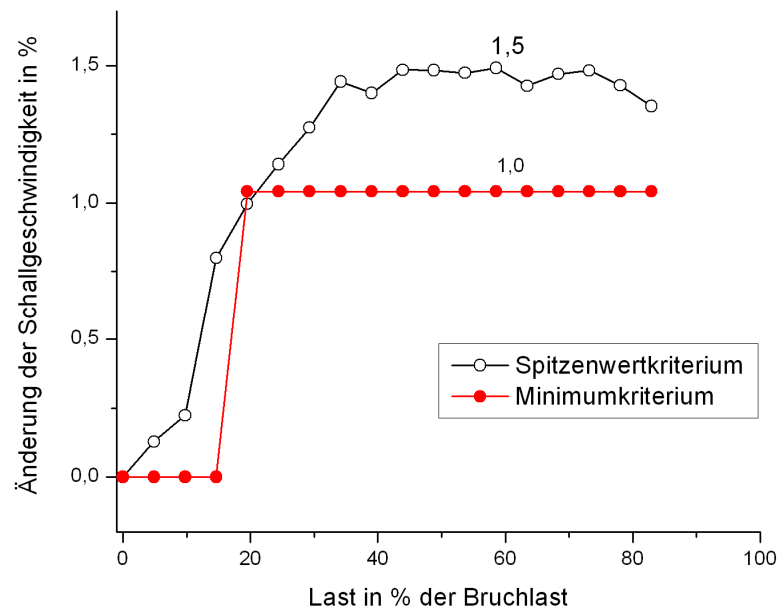


Abbildung 6.6: Änderung der Schallgeschwindigkeit über der Last in % bezogen auf die Bruchlast. Gemessen wurde die US-Longitudinalwelle am 1.PK im zweiten Lastzyklus orthogonal zur Lastrichtung in Durchschallung. 0 % entspricht einer Schallgeschwindigkeit von 4052 m/s.

Die mit dem Spitzenwertkriterium ermittelte Schallgeschwindigkeitskurve bildet den Effekt, analog zu den Oberflächenwellen ab.

6.1.5.2.2 Transversal

Die US-Transversalwellenmessungen wurden in Reflexionsanordnung durchgeführt. Dieses bedeutet, dass Wellen an dem Punkt angeregt werden, an dem auch gemessen wird. Die zu messende Welle kommt also nicht wie bei der Durchschallung als erste an, sondern muss in einem angeregten Bereich herausgefiltert werden. Daher kann das Minimum nicht mit dem Spitzenwertkriterium wie bei den anderen Versuchen bestimmt werden, sondern wird mithilfe des Kriteriums des absoluten Minimums bestimmt. Aufgrund der längeren Messstrecke (1,2 m) ist bei gleicher Abtastrate des Messequipments die Auflösung des Effekts feiner und kann damit präziser als bei der Longitudinalwellenmessung erfolgen; die Stufigkeit der Kurve bleibt jedoch aufgrund der Eigenschaft des Minimumkriteriums, das die Laufzeiten nur an den Abtastzeitpunkten bestimmen kann, bestehen.

Für beide Polarisierungen der Transversalwelle sind in Abbildung 6.7 die Messungen für den zweiten Lastzyklus abgebildet. Das Rückwandecho erscheint für beide Polarisationsrichtungen zwischen einer Laufzeit von 500 und 600 μ s. Zur Bestimmung der Laufzeit wurde das erste Maximum verwendet (orange markiert). In Abbildung 6.7 (1 a+b) ist das Rückwandsignal sowohl in der Einzelmessung als auch im B-Bild gut zu erkennen.

Die Krümmung der Rückwandsignalbanden ist geringfügig und im B-Bild damit schlecht auszumachen; die bestimmten Laufzeiten sind darunter über der Last eingetragen. Für beide Polarisationsrichtungen (Abbildung 6.7 (2 a+b)) ist nach einem Absinken in den ersten Laststufen ein Schallgeschwindigkeitsanstieg zu erkennen, der mit zunehmender Last abnimmt. Aufgrund der Stufigkeit bzw. Schwankung der Messwerte kann eine Schallgeschwindigkeitsreduktion kurz vor der Demontage der Prüfköpfe nicht eindeutig festgestellt werden. Der Effekt beträgt bei einer Schwingrichtung orthogonal zur Lastrichtung 0,9 % und bei einer Schwingrichtung in Lastrichtung 1,3 % und bleibt damit geringfügig niedriger als der der Longitudinalwelle mit 1,5 % aus Abbildung 6.6.

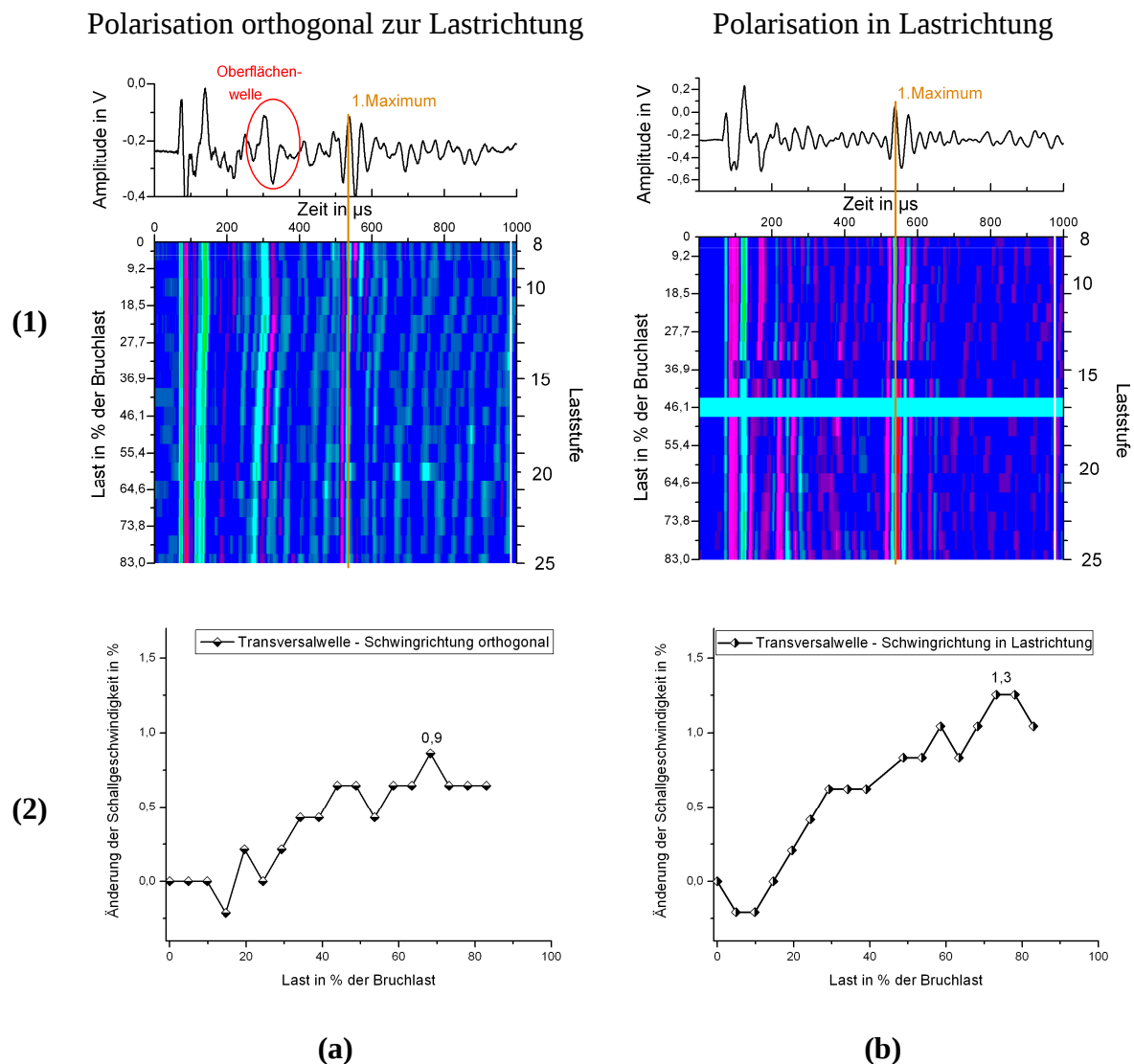


Abbildung 6.7: (1) A-Bild und B-Bild der Transversalwellenmessungen für die (a) orthogonal zur Lastrichtung schwingende Welle (Pos. 2) und die (b) in Lastrichtung schwingende Welle (Pos. 3). (2) Die dazugehörige Änderung der Schallgeschwindigkeit über der Last in % bezogen auf die Bruchlast als Graph. 0 % entspricht (a) 2564 m/s und (b) 2479 m/s. Gemessen am 1.PK im 2.LZ. Der blaue Balken im B-Bild (1 b) bei LSt 17 ersetzt eine Fehlmessung.

In Abbildung 6.7 (a) ist zusätzlich zur Rückwandreflexion eine weitere Bande bei ca. 300 μ s zu erkennen, die eine deutliche Laufzeitverschiebung bei zunehmender Belastung zeigt.

Bei dieser Bande handelt es sich um eine Oberflächenwelle, die an der Probekörperkante reflektiert worden ist. In Abbildung 6.8 ist die Laufzeitkurve für die reflektierte Oberflächenwelle (aus Abbildung 6.7 (a)) eingetragen. Nach einem Schallgeschwindigkeitsabsinken in den ersten Laststufen nimmt die Geschwindigkeit mit zunehmender Last bis zur Demontage mit abnehmender Steigung zu. Der Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung ist wesentlich größer als für die sonstigen Ultraschallwellen und liegt im Bereich des Effektes der Oberflächenwellen im Hörschallbereich.

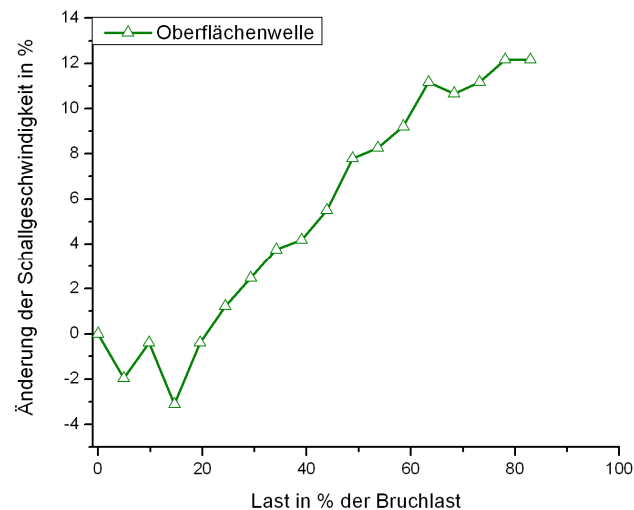


Abbildung 6.8: Änderung der Schallgeschwindigkeit der Oberflächenwelle angeregt durch einen Transversalprüfkopf an Position 2 über der Last in % bezogen auf die Bruchlast. Gemessen am 1.1.PK im 2.LZ an.

In Abbildung 6.9 (a) sind die drei durchdringenden Wellen zum Vergleich in einem Graphen eingetragen. Die Longitudinalwelle (100 kHz) zeichnet den Effekt am deutlichsten ab. Wird die reflektierte Oberflächenwelle in den Graphen hinzugenommen (Abbildung 6.9 (b)) wird deutlich, dass der Effekt der Oberflächenwelle um ein Vielfaches größer ausfällt als bei den senkrecht zu Lastrichtung gemessenen durchdringenden Wellen.

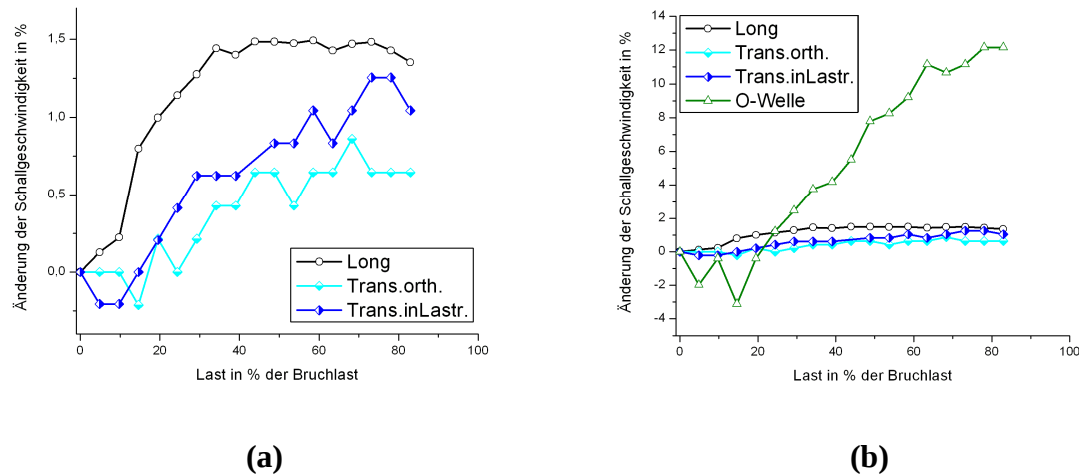


Abbildung 6.9: Änderung der Schallgeschwindigkeit über der Last in % bezogen auf die Bruchlast. Für (a) die durchdringenden Wellen und (b) die durchdringenden Wellen zusammen mit der Oberflächenwelle bei neuer Skalierung.

Für alle orthogonal zur Lastrichtung gemessenen durchdringenden Wellen ist der Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung im Vergleich zu den Oberflächenwellen gering. Eine Untersuchung der Wellengeschwindigkeit mit dem hier für die US-Wellen beschriebenen Versuchsaufbau bringt wenig Mehrwert und die Sensoren müssen vor dem Bruch demontiert werden. Der Unterschied für die beiden Polarisationsrichtungen der Transversalwelle fällt gering aus und liegt im Bereich der Messungenauigkeit; eine Aussage über den Einfluss der Polarisationsrichtung kann mit diesem Versuchsaufbau nicht getroffen werden. Bei dem Transversalwellenaufbau zeigte lediglich die ungewollte Oberflächenwellenreflexion vom Probekörperrand eine deutliche Lastabhängigkeit, welche zwar in einem anderen Frequenzbereich liegt, aber mit den Laservibrometer-Versuchsaufbau und Sensorenarray-Versuchsaufbau untersucht werden kann. Zu untersuchen bleibt, wie der Effekt für durchdringende US-Wellen in Lastrichtung ausfällt.

Aufgrund der in diesem Kapitel gefundenen geringen Effekte für orthogonal zur Lastrichtung gemessene Ultraschallwellen werden diese Messungen nicht weiter verfolgt; dafür soll an den nachfolgenden Probekörpern mit Longitudinalwellen (100 kHz und 25 kHz) in Lastrichtung gemessen werden. Die Messungen mit Oberflächenwellen im Hörschallbereich werden mit einem optimierten Versuchsaufbau und einem neu erstellten Sensorenarray weiter verfolgt. Für die weiteren Versuche ist nach obigen Erkenntnissen ein gleichbleibender Versuchsaufbau für den zweiten bis fünften Probekörper erstellt worden. Die Ergebnisse für die Messungen an diesen Probekörpern werden im folgenden Kapitel beschrieben.

6.2 Spannungsabhängige Effekte der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen

6.2.1 Einleitung

In diesem Kapitel soll der Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeitsänderung und der Spannung im Beton beobachtet und dokumentiert werden. Dieses erfolgt unter Berücksichtigung und Untersuchung der auf diesen Zusammenhang Einfluss nehmenden Faktoren wie: vorangegangene Be- oder Überlastungen, Be- und Entlastungsdauer sowie die Betonart.

Bei der Belastung kann zwischen einer Erst- und Wiederbelastung unterschieden werden. Zur Untersuchung der Wiederbelastung in einem baupraktisch relevanten Bereich wurde in einem ersten Zyklus jeder Probekörper bis 3,5 MN belastet. Dieses diente dem Vergleich der Effekte an unterschiedlichen Probekörpern. Eine Versuchsdurchführung, bei der in einem Zyklus von unbelastet bis zum Bruch belastet wurde, entfiel somit, weil bei begrenzter Probekörperanzahl und Prüfmaschinenbenutzungsdauer ein Kompromiss zu finden war. Zur Darstellung der Messergebnisse für Belastungsverläufe mit mehreren Lastzyklen wurde für die eindeutige Zuordnung der Messwerte zur x-Achse die Einheit Laststufe gewählt. Dieses hat mehrere Vorteile: Die Laststufennummer gibt genau an, welcher Punkt auf der x-Achse gemeint ist. Eine Abtragung der jeweiligen Last oder Bruchlast in Prozent wäre insofern irreführend, da die gleiche Last in verschiedenen Lastzyklen mehrfach auftritt. Dennoch liegt das Interesse in der Zuordnung der jeweiligen Schallgeschwindigkeit zur erreichten Last bzw. Bruchlast. Aus diesem Grund wurde über den Laststufen zusätzlich die Last als Balken eingezeichnet, die sich auf die zweite y-Achse bezieht (in den Diagrammen rechts abgetragen).

In diesem Kapitel sollen zuerst die in Lastrichtung mit Oberflächenwellen geführten Messungen diskutiert werden, die sowohl mit dem Laservibrometer als auch mit dem Sensorenarray durchgeführt wurden, gefolgt von den Ultraschallmessungen, die nur in Lastrichtung stattfanden. Die richtungsabhängigen Effekte werden anhand des Laservibrometer-Versuchsaufbaus diskutiert. Im darauffolgenden Abschnitt 6.2.5 soll auf den Einfluss von vorangegangenen Belastungen insbesondere der einer Überbelastung des Betons eingegangen werden. Im Kapitel 6.2.6 soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Dauer der Belastung hat und wie sich die Schallgeschwindigkeit nach einer Belastung auch im lastfreien Zustand ändert.

6.2.2 Versuchsdurchführung

Die Untersuchung der Spannungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit wird hier exemplarisch anhand des ersten und zweiten Lastzyklus bis zu einer maximalen Last von 7,5 MN (31,3 MPa) des dritten Probekörpers gezeigt. Die maximale Last im zweiten Lastzyklus übersteigt die Bruchlast im vierten Lastzyklus mit 7 MN (29,2 MPa) (siehe Abbildung 6.10). Der dritte Probekörper wurde gewählt, da alle Versuchsaufbauten bis zur maximalen Last am Probekörper appliziert waren und nicht, im Gegensatz zu anderen Probekörpern, kurz vor dem Bruch abgebaut wurden.

Die Belastung wurde im ersten Lastzyklus in Schritten von 0,5 MN (2,1 MPa) bis 3,5 MN (14,6 MPa), welches 47 % der Maximallast entspricht, erhöht und ebenfalls in 0,5 MN

Schritten bis zur vollständigen Lastfreiheit entlastet. Im zweiten Lastzyklus wurde der Probekörper bis 4 MN und ab 6 MN in 0,5 MN Schritten belastet, zwischen 4 MN und 6 MN betrug die Laststeigerung 1 MN je Belastungsschritt.

Im rechten Diagramm sind die Dehnung und die Last über den Laststufen angegeben. Während der ersten Laststufen steigt die Dehnung sowohl im ersten als auch im zweiten Lastzyklus etwas steiler an und geht dann über in einen weitgehend linearen Anstieg bis ca. 6 MN (80 %). Bei höherer Last nimmt die Dehnung überproportional zu und verlässt damit den linearen Bereich.

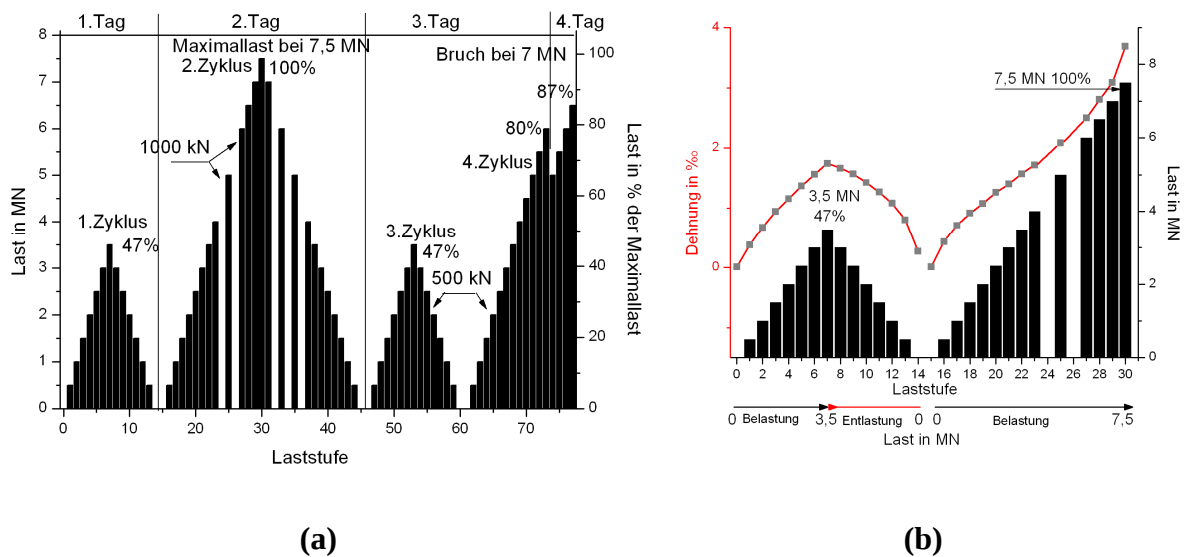


Abbildung 6.10: Lastzyklen und Belastungsschritte (i. d. R. 500 kN) des 3.PK über den zugehörigen Laststufen. Für (a) alle Lastzyklen und (b) ausgewählter Bereich bis zur maximalen Last mit zugehöriger Dehnung in Promille.

6.2.3 In Belastungsrichtung

6.2.3.1 Oberflächenwelle

Die Spannungsverläufe der einzelnen Oberflächenwellenmessungen sind in Abbildung 6.11 schwarz-weiß-codiert als B-Bild über den Laststufen abgetragen. Diese visuelle Art der Darstellungen von Messsignalen vermittelt einen schnellen ersten Eindruck über die Änderungen des Signals, in diesem Fall über die Last, anstatt wie sonst üblich über den Ort. Das obere schwarze Band im B-Bild stellt das erste Minimum dar, das mit einem grünen Pfeil markiert. Eine Verschiebung des Bandes nach oben entspricht einer Laufzeitverkürzung. Im ersten Lastzyklus ist dieses bis zu einer maximalen Last von 3,5 MN (LSt 7; 47 %) zu beobachten (1) (Die im Text beschriebenen Eigenschaften sind mit Nummern versehen, zur besseren Verdeutlichung und Zuordnung dieser Eigenschaften sind im Diagramm diese Nummern zusammen mit darauf hinweisenden Pfeilen in orange eingetragen). Mit beginnender Entlastung nimmt die Laufzeit wieder zu (2). Die Bande beschreibt im ersten Lastzyklus einen leicht nach rechts schiefen Bogen; die Schiefe wird dabei durch die längeren Laufzeiten bei der Entlastung hervorgerufen, die unter den korrespondierenden Werten der Belastung liegen. Im zweiten Lastzyklus ist in den ersten Laststufen eine deutliche

Verschiebung der Bande hin zu kürzeren Laufzeiten zu erkennen (3). Es folgt ein horizontal verlaufender Bereich (LSt 22-27; 50-80 %), in dem sich die Laufzeit nur wenig ändert (4). Die letzten Laststufen (LSt 27-30; 80-100 %) zeigen einen Anstieg der Laufzeiten (5).

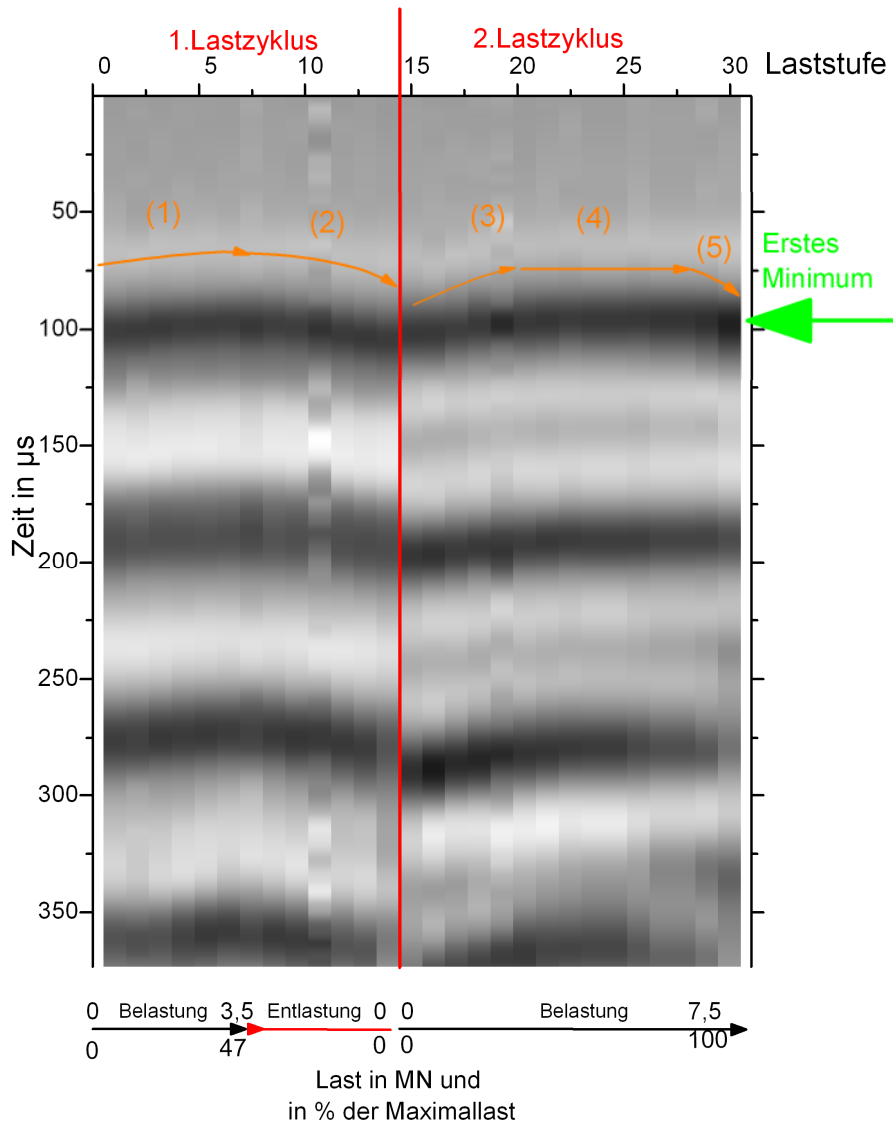


Abbildung 6.11: Schwarz-Weiß-Codiertes Messsignal im Zeitbereich aufgetragen über den Laststufen des 1. und 2.LZ am 3.PK mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau gemessen in Lastrichtung (0°). Die orangenen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

Der Effekt der lastabhängigen Laufzeitverschiebung trifft sowohl für das erste Minimum als auch für die darauf folgenden Maxima und Minima zu, d.h. der Effekt wirkt sich auf die gesamte gezeigte Welle aus. Aus obiger Beobachtung können Bereiche mit unterschiedlichem Verhalten der Schallgeschwindigkeit bei einer Laststeigerung beobachtet werden. Im Bereich bis ca. 50 % ist ein deutlicher Anstieg, im Bereich von 50-80 % ein Verharren und im Bereich über 80 % eine rapide Reduktion der Schallgeschwindigkeit zu erkennen. Diese Einteilung in drei Bereiche (I-III) soll im Folgenden weiter verwendet werden. Hinzu kommt, wie im Weiteren gezeigt wird, ein Bereich unterhalb von 10-15 % der Bruchlast, in dem die Schallgeschwindigkeit leicht absinkt - dieser Bereich soll als 0 Bereich bezeichnet werden.

Neben der eben durchgeführten visuellen Abschätzung soll im Folgenden die Schallgeschwindigkeitsänderung anhand der Laufzeitverschiebung des ersten Minimums ermittelt werden. Der Einfluss der Last wird anhand des Kriteriums der Spitzenwerterkennung diskutiert, da dieses Kriterium, wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, die Laufzeit robuster und mit einer zeitlich besseren Auflösung abbildet. Die Messungen des Sensorenarrays für das Spitzenwertkriterium (schwarz) sind in Abbildung 6.12 eingezeichnet. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung aller gültigen Messungen (max. 36; siehe Kapitel 5). Die Schallgeschwindigkeitskurve zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der aufgetragenen Last, die wie folgt beschrieben werden kann:

Erstbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Mit beginnender Belastung sinkt für die ersten drei Laststufen die Geschwindigkeit leicht ab (1).

Bereich I (15-50 %) : Für die Erstbelastung bis 3,5 MN (47 %) nimmt die Schallgeschwindigkeit mit steigender Last bei abnehmenden Gradienten zu (2).

Entlastung:

Bei der Entlastung nimmt die Schallgeschwindigkeit ab, der negative Gradient wird mit abnehmender Last größer (3). Die Schallgeschwindigkeiten liegen unter den korrespondierenden Werten der Belastung. Die Schallgeschwindigkeit am unbelasteten Probekörper ist nach dem ersten Lastzyklus geringer als vor Beginn der Belastung (4).

Wiederbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Die Oberflächenwellengeschwindigkeit ist am unbelasteten Probekörper vor Belastungsbeginn des zweiten Lastzyklus höher als im unbelasteten Zustand am Ende des ersten Lastzyklus einen Tag zuvor, aber niedriger als im noch nie belasteten Zustand vor dem ersten Lastzyklus (5) (siehe hierzu Kapitel 6.2.5). Zu Beginn des zweiten Lastzyklus tritt wie im ersten eine Schallgeschwindigkeitsminderung auf (6). Im Vergleich zum ersten Lastzyklus fällt diese jedoch deutlicher aus.

Bereich I (15-50 %) : Der Gradient des Schallgeschwindigkeitsanstiegs ist bis etwa zur vorangegangenen Maximalbelastung größer als im ersten Lastzyklus und fällt im Gegensatz zum gekrümmten Verlauf des ersten Lastzyklus linear aus (vgl. (2) und (7)). Erreicht die Wiederbelastung den Wert der Vorbelastung, kann für die darauf folgenden Laststufen von einem Beton ausgegangen werden, der sich ähnlich verhält wie ein nicht vorbelasteter (vgl. Kaisereffekt [[Kais50](#)]). Die Schallgeschwindigkeit erreicht an diesem Punkt mit der Einschränkung der zeitabhängigen Effekte etwa den gleichen Wert wie bei der Vorbelastung (8) (siehe Kapitel 6.2.6) und steigt mit geringerem Gradienten weiter an, der in diesem Bereich in den Wert der Erstbelastung übergeht (9).

Bereich II (50-80 %) : Der Gradient der Schallgeschwindigkeit nimmt fortlaufend ab und wird ab ca. 70 % negativ; die Schallgeschwindigkeit ist in diesem Bereich nur geringen Änderungen unterworfen (10).

Bereich III (>80 %) : Die Schallgeschwindigkeit nimmt rapide mit abnehmendem Gradienten ab (11). Der Wert unterschreitet kurz vor der maximalen Last sämtliche Werte der vorangegangenen Laststufen. Der Bereich der rapiden Schallgeschwindigkeitsreduktion fällt mit demjenigen Bereich zusammen, in dem die Dehnung den linearen Bereich verlässt und überproportional ansteigt (siehe Abbildung 6.10 (b)).

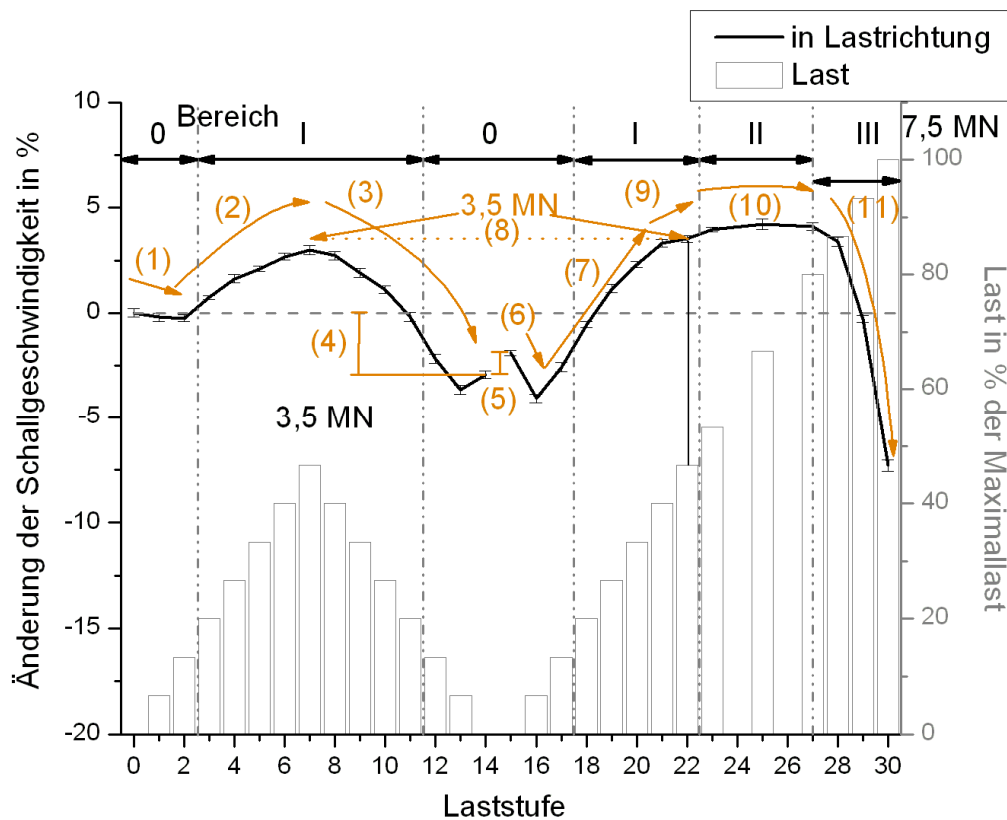


Abbildung 6.12: Messungen mit dem Sensoren-Array am 3.PK als Änderung der Schallgeschwindigkeit in % für das Spitzenwertkriterium und deren Standardabweichung (schwarz) mit der Last bezogen auf die Maximallast in % (als Balkendiagramm in grau) über der Laststufe. Die Schallgeschwindigkeitsänderungen sind auf den lastfreien Zustand vor Belastungsbeginn normiert. Die orangenen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

6.2.3.2 Ultraschall

Für die mit Ultraschall in Durchschallung durchgeführten Versuche soll die Geschwindigkeitsänderung analog zu den mit Oberflächenwellen geführten Versuchen beschrieben werden. Zusätzlich zur Auswertung am dritten Probekörper werden der zweite und vierte Probekörper betrachtet, da am dritten Probekörper untypische Messwerte zu Beginn der Messung im Bereich 0 auftraten, die auf ein Kontaktproblem zwischen Probekörperoberfläche und Sensor bei geringen Lasten hindeuten. Aus diesem Grund wird der dritte Probekörper im Bereich 0 nicht betrachtet. Alle Probekörper besitzen die Festigkeitsklasse C30/37 bei gleicher Rezeptur (siehe auch Kapitel 3.3). Probekörper drei und vier waren aus einer Charge. Der vierte Probekörper war zusätzlich mit Bewehrung ausgeführt. Der zu Beginn gleiche Belastungsablauf beim zweiten bis vierten Probekörper mit einem ersten Lastzyklus bis 3,5 MN und Anstieg im zweiten Lastzyklus bis 5,5 MN soll hier analysiert werden. Ab 5,5 MN unterscheiden sich die darauf folgenden Belastungsverläufe. Die Einteilung in die vier Bereiche (0-III) wird für die Ultraschallwellen unverändert übernommen. Für den Bereich III kurz vor dem Bruch, der oberhalb von 5,5 MN liegt, werden die Ergebnisse des dritten Probekörpers ausgewertet. Dieser ist der einzige, der ohne mehrfach vorangegangene Lastzyklen bis zur maximalen Last belastet wurde. Die Bruchlasten der Probekörper unterscheiden sich dahingehend, dass jede Laststufe einem unterschiedlichen Ausnutzungsgrad entspricht. Jedoch überschreitet der erste Lastzyklus mit 3,5 MN bei keinem Probekörper 50 % der Maximal- bzw. Bruchlast. Im zweiten Lastzyklus ist diejenige Laststufe, bei der 50 % der Maximal- bzw. Bruchlast erreicht wurden, mit einem roten Kreis markiert (siehe Abbildung 6.13); der Unterschied beträgt maximal zwei Laststufen.

Erstbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Im Gegensatz zu den Oberflächenwellenmessungen ist für die ersten Laststufen und beide Frequenzen keine Geschwindigkeitsreduktion zu erkennen. Die Geschwindigkeit steigt für den ersten und zweiten Probekörper vom Belastungsbeginn an, die Steigung ist nur geringfügig geringer als in der folgenden Laststufe (1).

Bereich I (15-50 %) : Für die Erstbelastung bis 3,5 MN nimmt die Schallgeschwindigkeit mit steigender Last zu, wobei sich der Anstieg mit zunehmender Last verlangsamt (2). Der Anstieg ist bei den 25kHz-Prüfköpfen wesentlich größer und daraus resultierend ebenfalls das erreichte Maximum.

Entlastung:

Bei der Entlastung nimmt die Schallgeschwindigkeit mit sinkender Last ab, wobei die Reduktion der Schallgeschwindigkeit mit abnehmender Last größer wird (3). Die Schallgeschwindigkeiten liegen unter den korrespondierenden Werten der Belastung. Der größere Anstieg der Schallgeschwindigkeit für die 25kHz-Prüfköpfe kehrt sich in eine deutlichere Minderung bei der Entlastung um und die Schallgeschwindigkeit sinkt unter die der 100kHz-Prüfköpfe. Für beide Frequenzen und alle Probekörper ist die Schallgeschwindigkeit im lastfreien Zustand nach der Entlastung geringer als vor dem ersten Lastzyklus (4).

Wiederbelastung:

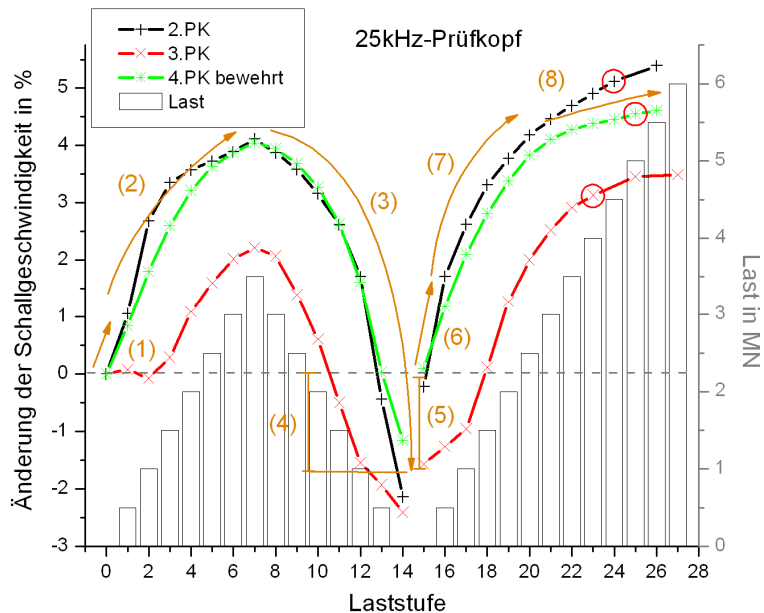
Bereich 0 (<10-15 %) : Die Schallgeschwindigkeiten sind für den unbelasteten Zustand zu Beginn des zweiten Lastzyklus höher als im unbelasteten Zustand zum Ende des ersten Lastzyklus (5). Dieses war ebenfalls bei den Oberflächenwellenmessungen im Kapitel zuvor zu beobachten. Auch bei der Wiederbelastung steigt in den ersten Laststufen die Schallgeschwindigkeit an (6).

Bereich I (15-50 %) : Der Schallgeschwindigkeitsgradient ist bis etwa zur vorangegangenen Maximalbelastung von 3,5 MN (LSt. 22) größer als im ersten Lastzyklus (7). Beim Erreichen der vorangegangenen Maximalbelastung geht der Gradient in das Niveau der Erstbelastung über und nimmt mit zunehmender Last ab (8). Ein Vergleich der Schallgeschwindigkeitsänderung zwischen Erst- und Wiederbelastung zeigt (siehe Tabelle 3), dass beim Erreichen der vorangegangenen Maximalbelastung ähnliche Werte erreicht werden.

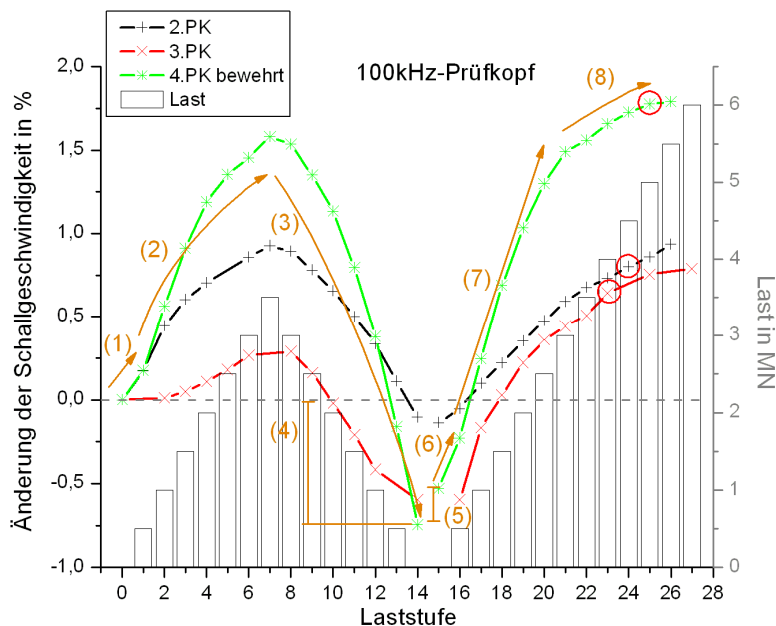
Tabelle 3: Schallgeschwindigkeitsänderung in % jeweils bei 3,5 MN für die Erst- und Wiederbelastung in Abhängigkeit vom Prüfkopftyp.

jeweils bei 3,5 MN	25kHz-Prüfköpfe		100kHz-Prüfköpfe	
PK Nr.	1. Lastzyklus LSt 7	2. Lastzyklus LSt 22	1. Lastzyklus LSt 7	2. Lastzyklus LSt 22
2	4,1	4,7	0,9	0,7
3	2,2	2,9	0,3	0,5
4	4,1	4,2	1,6	1,6

Bereich II (50 %) : Beim bewehrten, dem vierten Probekörper ist die Steigung der Schallgeschwindigkeit bei 50 % der Maximal- bzw. Bruchlast (mit roten Kreisen markiert) geringer als beim zweiten und dritten Probekörper. Die Abflachung des Anstiegs beginnt früher, obwohl der bewehrte Probekörper die höchste Bruchlast (9,5 MN) aufwies.



(a)



(b)

Abbildung 6.13: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % und Belastung in MN aufgetragen über den Laststufen; für den 2.PK (schwarz), 3.PK (rot) und 4.PK (grün) für die Messungen mit (a) dem 25kHz-Prüfkopf und (b) dem 100kHz-Prüfkopf. Die roten Kreise markieren 50 % der Bruchlast. Jedes Kreuz repräsentiert eine Messung der Schallgeschwindigkeit. Zur besseren Darstellung ist die y-Achse im rechten Diagramm um das Dreifache vergrößert. Die orangenen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

Die weiteren Laststufen über 50 % der Maximallast (ab LSt 23) werden im Folgenden am dritten Probekörper im zweiten Lastzyklus diskutiert (siehe Abbildung 6.14).

Bereich II (50-80 %) : Der Schallgeschwindigkeitsgradient geht ab 50 % fortlaufend zurück und wandelt sich ab ca. 70-80 % für beide Frequenzen in einen negativen Gradienten um (10). Die Schallgeschwindigkeit ist in diesem Bereich nur geringen Änderungen unterworfen.

Bereich III (>80 %) : Die Schallgeschwindigkeit nimmt rapide mit deutlich zunehmendem Gradienten ab (11). Der Wert unterschreitet kurz vor der maximalen Last sämtliche Werte der vorangegangenen Laststufen. Der Bereich mit der deutlichsten Schallgeschwindigkeitsminderung fällt mit dem Bereich zusammen, in dem die Dehnung den linearen Bereich verlässt und überproportional ansteigt (siehe Abbildung 6.10 (b)).

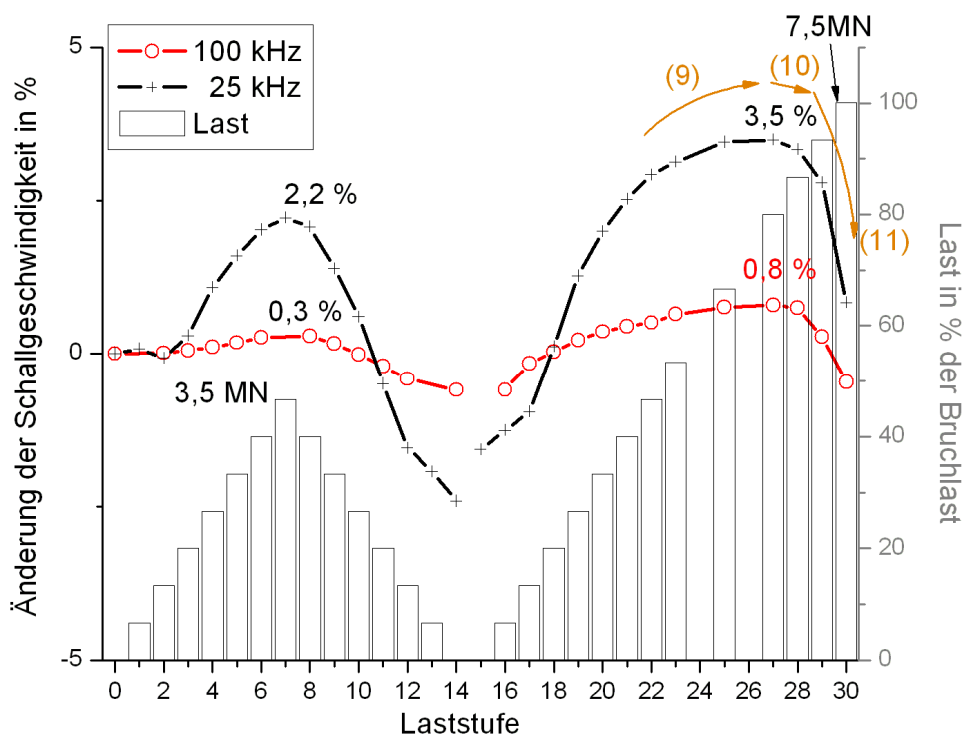


Abbildung 6.14: US-Laufzeiten in Durchschallung in Lastrichtung für die 25kHz-Prüfkopf (schwarz) und 100kHz-Prüfköpfe (rot), bestimmt mit dem Spitzenwertkriterium am 3.PK.

Neben der zuvor beschriebenen qualitativen Ausbildung des Effekts soll im Folgenden die quantitative Ausprägung anhand der erreichten Maxima im ersten und zweiten Lastzyklus diskutiert werden (siehe Abbildung 6.14). Bei ähnlicher Kurvenform ist der erreichte Maximalwert für die 25kHz-Prüfköpfe mit 2,2 % im ersten und 3,5 % im zweiten Lastzyklus deutlich höher als für die 100kHz-Prüfköpfe mit 0,3 % und 0,8 %. Werden die in Tabelle 3 eingetragenen Werte für den zweiten und vierten Probekörper bei 3,5 MN im ersten und zweiten Lastzyklus hinzugezogen, wird die stärkere Ausprägung bei einer Frequenz von 25 kHz bestätigt. Ein fester Faktor zwischen beiden Frequenzwerten scheint nicht gegeben.

6.2.3.3 Effekte in Lastrichtung

Bei den Messungen der Schallgeschwindigkeitsänderung in Lastrichtung konnten für die Oberflächen- und Ultraschallwellen folgende Eigenschaften beobachtet werden.

Im lastfreien Zustand vor und nach einem Lastzyklus fällt für beide Wellenarten auf:

- Die Schallgeschwindigkeit ist für den lastfreien Zustand nach Durchlaufen eines Lastzyklus geringer. Weitere Beobachtungen zu diesem Thema sind in Kapitel 6.2.5 und 7.3 zu finden.
- Die Schallgeschwindigkeit steigt in einer Lastpause wieder an und ist damit am nächsten Messtag höher. Eine genaue Betrachtung der Lastpausen findet in Kapitel 6.2.6 statt.

Hier ist zu untersuchen, inwieweit die Differenz der Schallgeschwindigkeit vor und nach der Belastung reversibel bzw. irreversibel ist. Untersuchungen zu den Materialeigenschaften befinden sich in den Kapitel 7.2 und 7.3.

Der Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeitsänderung und der Spannung im Beton verhält sich in den einzelnen Bereichen wie folgt:

Markante Unterschiede bestehen im Bereich 0 (<10-15 %):

- Die Schallgeschwindigkeit für die Longitudinalwelle fängt mit beginnender Belastung an zu steigen, wenn auch bei einigen Probekörpern mit verminderter Steigung.
- Im Gegensatz dazu ist für die Oberflächenwellen ein Absinken zu beobachten.

Die Beobachtungen im Bereich 0 für die Oberflächenwelle widersprechen damit den Beobachtungen von Feldmann in Abbildung 6.1 und denen des Nachfolgeversuchs (AEPK) in Abbildung 7.7 und scheinen vom Probekörper abhängig zu sein. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit der Bereich 0 nur beobachtet, aber die gefundenen Effekte nicht weiter verfolgt, da eine allgemeine Übertragbarkeit nicht gegeben zu sein scheint.

Für die weiteren Bereiche I-III bestehen die Gemeinsamkeiten in:

Bei der Erstbelastung und Entlastung im Bereich I (15-50 %) ist zu beobachten:

- Die Schallgeschwindigkeit steigt mit abnehmendem Gradienten bei steigender Last.
- Bei der Entlastung sinkt die Schallgeschwindigkeit. Der Gradient wird mit abnehmender Last zunehmend negativ.
- Die Werte der Entlastung liegen unter den korrespondierenden Werten der Belastung

Für die Wiederbelastung im Bereich I (15-50 %) sind beiden Wellen gemein:

- Der Schallgeschwindigkeitsanstieg ist bei der Wiederbelastung bis zum Bereich der vorangegangenen Maximallast steiler.
- Der Anstieg fällt geradliniger aus.

Beim Erreichen der vorangegangenen Maximalbelastung:

- Erreicht die Schallgeschwindigkeit ähnliche Werte wie bei der Erstbelastung.
- Der Gradient der Schallgeschwindigkeit geht in das Niveau der Erstbelastung über.

Im Bereich (50-80 %) ist zu beobachten:

- Für beide Wellenarten ist ein ähnliches Verhalten mit abflachendem Anstieg bis ca. 70-80 % der Bruchlast zu beobachten.
- In diesem Bereich ist die Schallgeschwindigkeit nur geringen Änderungen unterworfen.

Im Bereich III (>80 %) sind die Gemeinsamkeiten:

- Die Schallgeschwindigkeit sinkt mit zunehmendem Gefälle rapide ab, dieses geht einher mit dem Verlassen des linearen Bereichs der Dehnung.

Als Unterschied ist zu beobachten:

- Kurz vor dem Bruch unterschreitet die Schallgeschwindigkeit in diesem Versuch nur für die Oberflächenwelle alle zuvor gemessenen Werte.

Sowohl Oberflächen- als auch Ultraschallwellen in Durchschallung bilden den in Lastrichtung gemessenen Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung unter Last mit ähnlichen Kurvenformen ab. Die Beträge der Änderungen zeigen bei den Ultraschallwellen eine Frequenzabhängigkeit, bei der niedrigeren Frequenz der 25kHz-Prüfköpfe sind die Änderungen der Schallgeschwindigkeit größer. Ebenso unterscheiden sich die erreichten Beträge hinsichtlich des Wellentyps; der Effekt erreicht für die Oberflächenwelle höhere Werte als für die Ultraschallwellen.

Der in Kapitel 4.2 und 4.3 für Oberflächenwellen beschriebene Versuchsaufbau lässt Messungen auch in von der Lastrichtung abweichenden Richtungen zu. Die in diesem Kapitel beschriebenen Effekte sollen im folgenden Kapitel auf eine richtungsabhängige Ausprägung hin untersucht werden.

6.2.4 In Richtungsabhängigkeit

Die schon im Vorversuch in Kapitel 6.1.4.2 festgestellten Unterschiede zwischen den Messrichtungen sollen in diesem Kapitel näher untersucht werden. Analog zu den im B-Bild in Abbildung 6.11 visualisierten Messergebnissen, die über die Laststufe variiert wurden, wird in Abbildung 6.15 über die Messrichtung variiert und die einzelnen Messungen (A-Bilder) eines Vollkreises farbcodiert dargestellt. Zur Darstellung im B-Bild wurde in diesem Beispiel die Laststufe mit den größten relativen Schallgeschwindigkeitsänderungen gewählt (LSt 30). Die markierte Bande entspricht dem bei allen Messungen ausgewerteten ersten Minimum.

Von der in Lastrichtung geführten Messung bei 0° bis zur Richtung bei 45° ist eine Verschiebung der Bande mit zunehmendem Gefälle zu erkennen, ab 45° nimmt das Gefälle wieder ab und erreicht bei 90° ein relatives Minimum (1); dies entspricht einem Laufzeitmaximum. Von 90° - 180° findet diese Verschiebung in entgegengesetzter Richtung als Anstieg statt (2). Zwischen 180° - 270° ist bei ähnlicher Kurvenform das Absinken der Schallgeschwindigkeit (Verschiebung der Bande nach unten) wesentlich ausgeprägter (3) als zwischen 0° - 90° . Bei 270° ist eine Diskontinuität in der Verschiebung zu erkennen (5). Diese Diskontinuität ist auf zeitabhängige Effekte zurückzuführen, die in Kapitel 6.2.6.2 beschrieben werden. Wie schon im Abschnitt 90° - 180° zu beobachten war, nimmt auch von 270° bis zur Lastrichtung bei 360° die Laufzeit ab (4) und erreicht gleiche Werte wie in 0° Richtung. Die im B-Bild beobachtbaren Laufzeitminima in Lastrichtung und Laufzeitmaxima in orthogonaler Richtung zeigen deutlich die Richtungsabhängigkeit des Effekts. Der Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung ist nicht auf das erste Minimum beschränkt, sondern setzt sich über den Wellenverlauf fort, dieses war ebenfalls in Abbildung 6.11 zu beobachten, in der über die Laststufen variiert wurde.

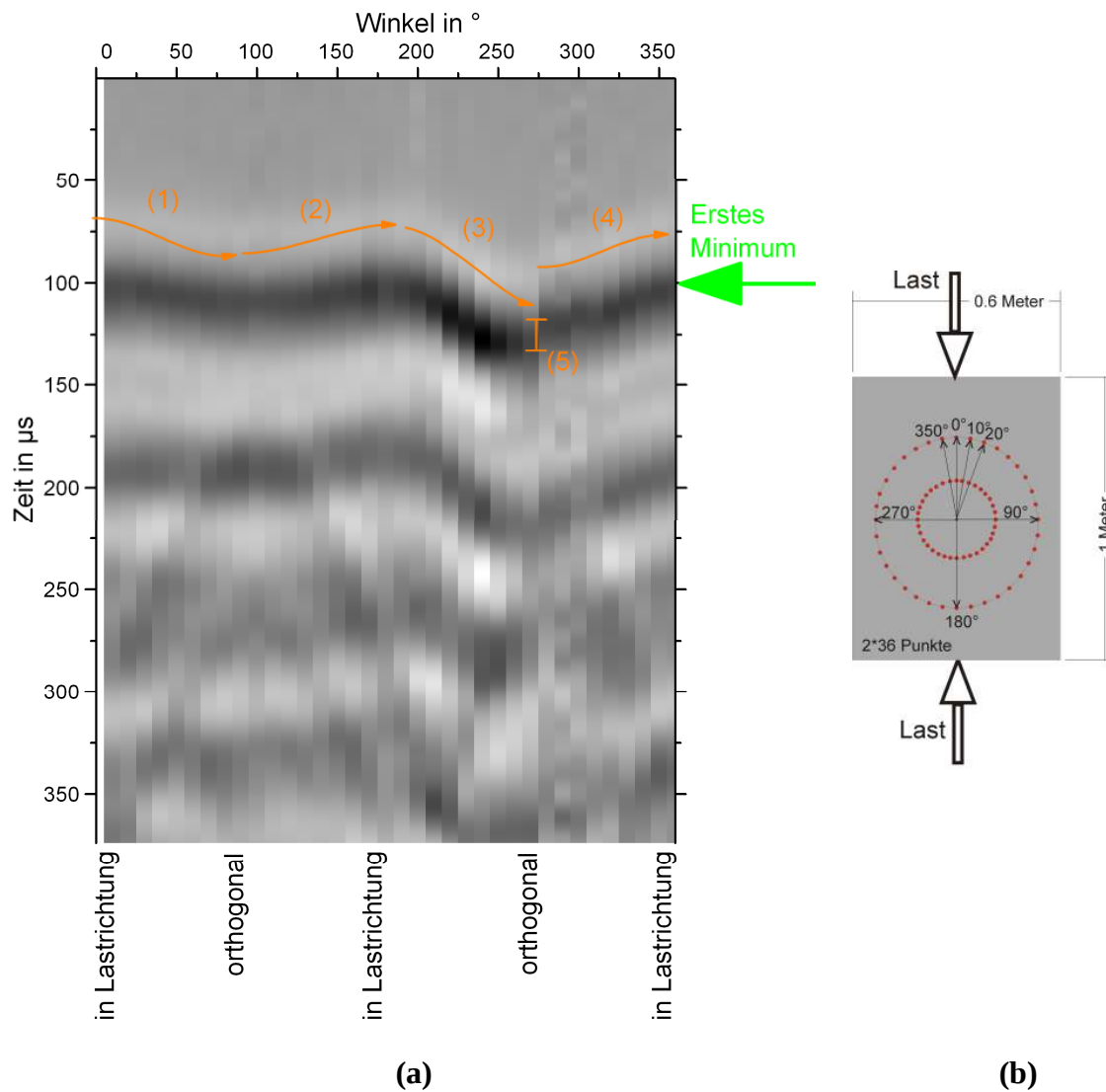


Abbildung 6.15: (a) Schwarz-Weiß codiertes Bild der gemittelten Messdaten im Zeitbereich für den jeweiligen Messwinkel in μs für die LSt 30 bei 7,5 MN im 2.LZ des 3.PK. Die orangen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert. (b) Winkelzählung beim Laservibrometer-Versuchsaufbau.

Zunächst sollen die im vorangegangenen Kapitel in Lastrichtung festgestellten Effekte mit denen orthogonal zur Lastrichtung gemessenen verglichen werden. Die schon in Kapitel 6.2.3.1 beschriebene Kurve der Schallgeschwindigkeitsänderung in Lastrichtung (schwarz) ist in Abbildung 6.16 um die orthogonal zur Lastrichtung gemessene Kurve (rot) ergänzt worden. Die Beschreibung der Effekte erfolgt in gleicher Unterteilung in die vier Bereiche, wie sie in Kapitel 6.2.3.1 eingeführt wurden. Die Laststufenabfolge entspricht der aus dem vorangegangenen Kapitel bekannten mit zwei Lastzyklen.

Erstbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Auch in orthogonaler Richtung sinkt die Schallgeschwindigkeit ab (rote Kurve). Dieses Absinken geht bis LSt 3 (20 %) im Gegensatz zur Messung in Lastrichtung mit LSt 2 (13 %) (1).

Bereich I (15-50 %) : Der für die Erstbelastung in Lastrichtung beobachtete abflachende Anstieg ist für die orthogonale Richtung kaum ausgeprägt (2). Es bildet sich damit eine größer werdende Differenz zwischen den Richtungen aus. Das Maximum der orthogonalen Richtung ist folglich mit 0,4 % niedriger als das für die Lastrichtung mit 3,0 %.

Entlastung:

Im Gegensatz zu dem kaum ausgeprägten Anstieg in orthogonaler Richtung während der Belastung ist das Absinken während der Entlastung mit zunehmendem Gefälle deutlich ausgeprägt (3). Die Schallgeschwindigkeitsminderung fällt jedoch geringer aus als in Lastrichtung. Damit nimmt die Differenz der Schallgeschwindigkeiten für beide Kurven ab und unterscheidet sich im unbelasteten Zustand LSt 14 nur noch geringfügig. Der Anstieg der Schallgeschwindigkeit zum Ende des ersten Lastzyklus (LSt 13-14) in Lastrichtung (schwarz) ist bei der Kurve in orthogonaler Richtung (rot) nicht vorhanden; hier ist ein Rückgang des Gefälles der Schallgeschwindigkeit zwischen LSt 12-14 zu beobachten.

Wiederbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Die Schallgeschwindigkeit der orthogonalen Messrichtung ist im Gegensatz zur in Lastrichtung gemessenen nur minimal höher als zum Ende des ersten Messzyklus, liegt aber ebenso wie die in Lastrichtung gemessene deutlich unter den Werten vor dem ersten Lastzyklus (4). Im zweiten Lastzyklus tritt ebenso wie im ersten zu Beginn eine Schallgeschwindigkeitsminderung auf, diese fällt für die orthogonale Richtung weniger prägnant aus und ist im Vergleich zum ersten Lastzyklus auf eine Laststufe begrenzt (5).

Bereich I (15-50 %) : Der Schallgeschwindigkeitsanstieg ist für die orthogonale Richtung bei der Wiederbelastung deutlich ausgeprägt. Dieses ist der Fall bis zum Bereich der vorangegangenen Maximalbelastung. Der bei 3,5 MN erreichte Maximalwert der Schallgeschwindigkeitsänderung wird im zweiten Lastzyklus in etwa wieder erreicht (7).

Bereich II (50-80 %) : Während die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung mit geringer Krümmung bis zum Scheitelpunkt bei LSt 25 (67 %) ansteigt und danach innerhalb weniger Laststufen in ein steiles Gefälle übergeht, ist der Scheitelpunkt in orthogonaler Richtung

früher erreicht (LSt 23; 53 %) und die Schallgeschwindigkeit geht mit einer geringen Krümmung über mehrere Laststufen in eine rapide Schallgeschwindigkeitsreduktion über (7). Die am unbelasteten Beton gemessene Schallgeschwindigkeit wird in orthogonaler Richtung als Maximum erreicht aber nicht überschritten, im Gegensatz zum Maximum in Lastrichtung, das die unbelasteten Werte übersteigt.

Bereich III (>80 %) : Die Schallgeschwindigkeit nimmt für die orthogonale Messrichtungen früher und rapider ab (8). Die orthogonale Messrichtung unterschreitet ebenfalls früher (LSt 29) und deutlicher alle zuvor gemessenen Werte. Bei 100 % der Maximallast liegt die Schallgeschwindigkeitsänderung in orthogonaler Richtung bei -19 % im Vergleich zur in Lastrichtung gemessenen mit -7,3 % (9).

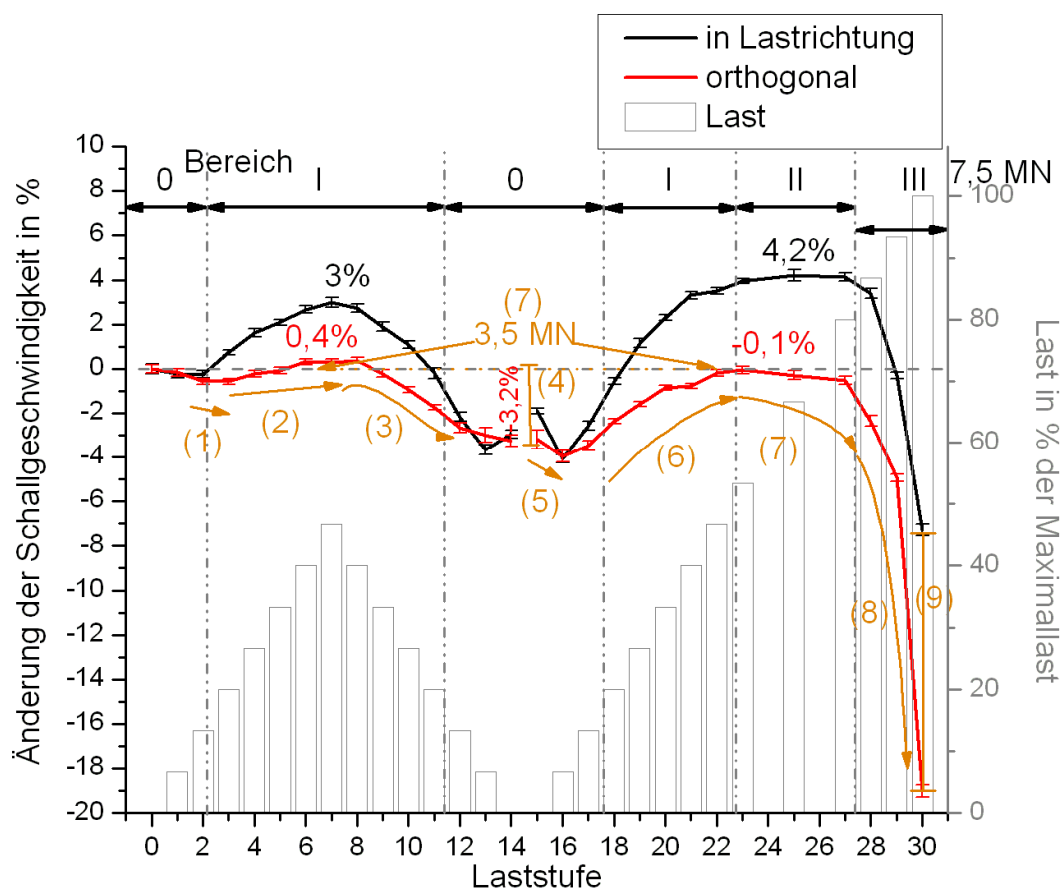


Abbildung 6.16: Vergleich der Änderung der Schallgeschwindigkeit in % mit der Last in % der Bruchlast über der Laststufe für die Messung am 3.PK mit dem Sensorenarray in Lastrichtung (schwarz) und orthogonal zur Lastrichtung (rot). Die orangen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

Die aus den Messungen mit dem Sensorenarray abgeleiteten Erkenntnisse konnten mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau bestätigt werden, dieses ist im Anhang in Kapitel 1.1 beschrieben.

Exemplarisch für die Richtungsabhängigkeit wurden bisher jeweils nur die in und orthogonal zur Lastrichtung gemessenen Schallgeschwindigkeitsverläufe diskutiert. Die Messungen mit dem Laservibrometer umfassen jedoch 36 Messpunkte in einem Kreis, sodass die Schallgeschwindigkeitsänderungen mit einem Winkelabstand von 10° aufgelöst werden können. Die bisher erfolgte Darstellung der Schallgeschwindigkeitsänderung über der Laststufe ist mit 36 Kurven nicht mehr übersichtlich. Aus diesem Grund wurde die Darstellung als Polardiagramm gewählt. Der Winkel von 0° befindet sich in Lastrichtung oben und zählt im Uhrzeigersinn hoch (siehe Abbildung 6.17 (b)). Für die bisher verwendete Einheit - Änderung der Schallgeschwindigkeit in % - sind die Werte mit dem lastenfreien Zustand in der jeweiligen Richtung normiert, analog zur Darstellung in den Graphen. Aus dieser Normierung resultiert, dass die erste eingetragene Kurve bei LSt 0 für den unbelasteten Zustand ein exakter Kreis ist. Die Geschwindigkeiten sind in ihrer ursprünglichen Messrichtung eingetragen. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde nur eine Auswahl der gemessenen Laststufen eingetragen. In Abbildung 6.17 (a) ist für den ersten Lastzyklus die Be- und Entlastung mit den Belastungen von 0 %, 27 %, 47 %, 27 % und 0 % und damit der Bereich 0-I abgebildet.

Erstbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Die Effekte in diesem Bereich können aufgrund der Streuungen beim Laservibrometer-Versuchsaufbau nicht in Form von Polardiagrammen geführt werden, da die Abweichungen für den hier vorliegenden Probekörper größer sind als der anfängliche Effekt.

Bereich I (15-50 %) : Mit der Erhöhung der Last ist die Zunahme der Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung für die Kurven LSt 4 (4 MN; 27 %; grün) und LSt 7 (3,5 MN; 47 %; blau) am stärksten ausgeprägt und nimmt zur orthogonalen Messrichtung hin ab. Dort ist kein bzw. nur ein geringer Schallgeschwindigkeitsanstieg zu beobachten. Daraus resultiert, dass mit zunehmender Last eine Änderung der Kurvenform von der eines Kreises zu einer elliptischen Form stattfindet. Die größere Achse der Ellipse bildet sich hervorgerufen durch den größeren Geschwindigkeitsanstieg in Lastrichtung ebenfalls in Lastrichtung aus. Für die 90° - Richtung liegen die Werte für LSt 0, LSt 4 und LSt 7 auf einem Niveau. Das Absinken der Werte für die 270° - und besonders 280° - Richtung ist auf eine fehlerbehaftete Messung im lastfreien Zustand zurückzuführen (siehe Abbildung 5.18 (b) rote Kurve). Durch die Normierung folgt daraus eine Verschiebung der weiteren Kurven in diesem Bereich zu niedrigeren Werten.

Entlastung:

Von der maximalen Last im ersten Lastzyklus LSt 7 (3,5 MN; 47 %; blau) zur Kurve LSt 10 (2 MN; 27 %; türkis) reduziert sich mit der Last die Schallgeschwindigkeit. Diese Reduktion findet vornehmlich in Lastrichtung statt und wird zur orthogonalen Richtung hin geringer, wodurch auch die elliptische Ausprägung der Kurve abnimmt. Werden die bei gleicher Last gemessenen Kurven der Belastung LSt 4 (2 MN; 27 %; grün) und der Entlastung LSt 10 (2 MN; 27 %; türkis) verglichen, so ist eine deutliche Ähnlichkeit der Kurven zu erkennen. Wird die Last bis zum lastfreien Zustand abgesenkt, fällt die Geschwindigkeitsabnahme erneut in orthogonaler Messrichtung geringer aus. Die Kurve LSt 14 (0 MN; 0 %; schwarz) unterschreitet in allen Richtungen die zuvor erzielten Geschwindigkeiten inklusive der im

lastfreien Zustand gemessenen vor Beginn des ersten Lastzyklus. Die Elliptizität der Kurve LSt 14 (0 MN; 0 %; schwarz) für den lastfreien Zustand ist weiter zurückgegangen.

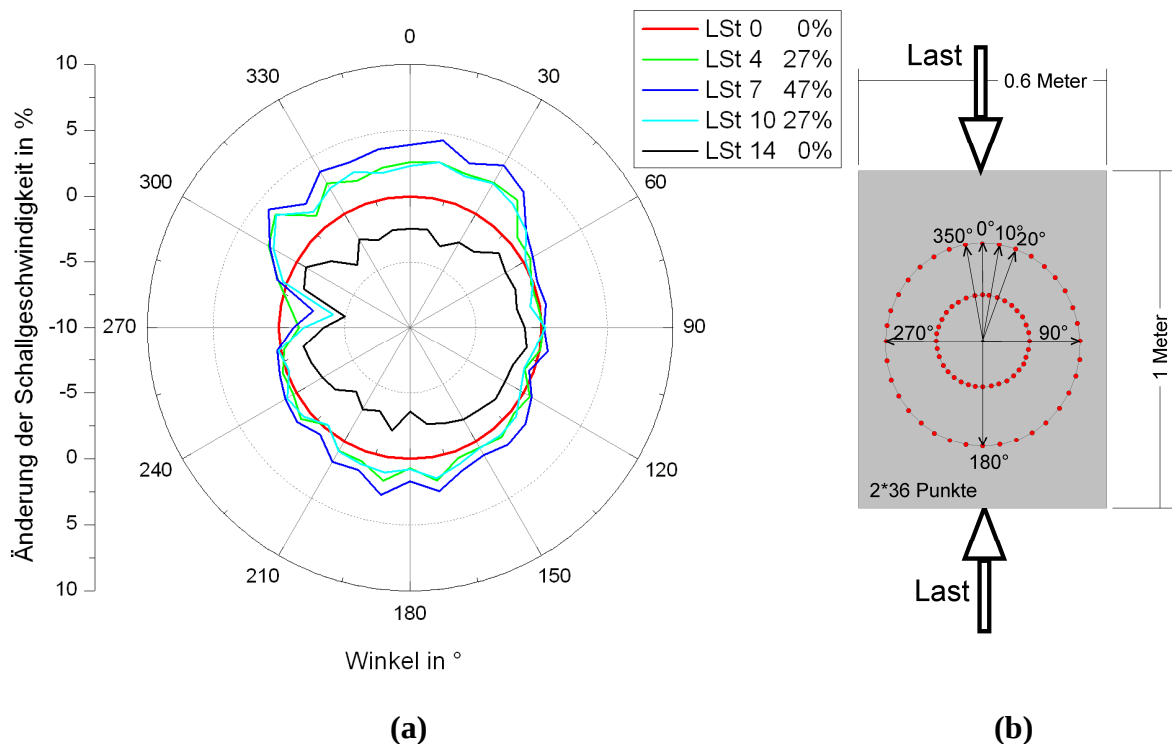


Abbildung 6.17: (a) Polardiagramm für den 1.LZ des 3.PK gemessen mit dem Laservibrometer; auf LSt 0 (lastfrei) normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %, (b) Winkelzählung beim Laservibrometer-Versuchsaufbau.

Die Wiederbelastung im zweiten Lastzyklus wird anhand von Abbildung 6.18 diskutiert. Zum besseren Vergleich wurden für den ersten Lastzyklus (Abbildung 6.17 mit LSt 0, 4 und 7) und den zweiten Lastzyklus (Abbildung 6.18 (a) und (b) mit LSt 15, 19 und 22) im Bereich 0-I Kurven mit der gleichen Last von 0 MN, 2 MN und 3,5 MN gewählt und farblich identisch codiert. Im ersten Polardiagramm (a) sind die Kurven für die Laststufen 15 (0 MN; 0 %; rot), 19 (2 MN; 27 %; grün), 22 (3,5 MN; 47 %; blau), 25 (5 MN; 67 %; lila) und 27 (6 MN; 80 %; türkis) eingetragen; die Kurve bei 100 % (7,5 MN) der Maximallast ist zur besseren Übersicht nicht eingetragen, sodass im Diagramm (a) eine feinere Skalierung analog zu Abbildung 6.17 verwendet werden konnte. Im zweiten Polardiagramm (b) ist Kurve LSt 30 (7,5 MN; 100 %; schwarz) bei einer gröberen Skalierung eingezeichnet sowie erneut die Kurven für die Laststufen 15 (0 MN; 0 %; rot), 19 (2 MN; 27 %; grün), 22 (3,5 MN; 47 %; blau), 27 (6 MN; 80 %; türkis). Für den zweiten Lastzyklus wurden die Werte auf die Laststufe 15 (0 MN; 0 %; rot) neu normiert. Eine ausführliche Behandlung zur Problematik der Normierung ist im Anhang 2 hinterlegt.

Wiederbelastung:

Bereich 0 und I (0-50 %) : Bei der Wiederbelastung von LSt 15 (0 MN; 0 %; rot; neu normiert) zu LSt 19 (2 MN; 27 %; grün) steigt für alle Richtungen die Schallgeschwindigkeit an, wobei der Anstieg größer als im ersten Lastzyklus ist. Der Anstieg nimmt von der Lastrichtung zur orthogonalen Richtung hin ab. Im Gegensatz zur Erstbelastung ist der

Anstieg in orthogonaler Richtung deutlicher ausgeprägt. Der Anstieg in orthogonaler Richtung ist für die Richtung 270° höher als für die 90°-Richtung; ein gewisses Vorlaufen der 270°-Richtung kann auch im Anhang in Abbildung 1.1 beobachtet werden. Mit fortschreitender Belastung steigt die Schallgeschwindigkeit für alle Richtungen weiter an (Kurve LSt 22 (3,5 MN; 47 %; blau)). Durch den stärkeren Anstieg in Lastrichtung bildet sich für die Kurve von LSt 19 (2 MN; 27 %; grün), wie im ersten Lastzyklus, eine Elliptizität aus, die sich mit Erreichen der LSt 22 (3,5 MN; 47 %; blau) verstärkt. Im Unterschied zum ersten Lastzyklus übersteigt die Schallgeschwindigkeit auch in orthogonaler Richtung die Geschwindigkeit des lastfreien Zustands in LSt 15 (0 MN; 0 %; rot).

Bereich II (50-80 %) : Von der Messkurve LSt 22 (3,5 MN; 47 %; blau) zur Messkurve LSt 25 (5 MN; 67 %; magenta) ist kein einheitlicher Trend nach Lastrichtungen zu beobachten. In 180°- Richtung ist ein leichter Geschwindigkeitszuwachs zu erkennen, während dieses in 0°- Richtung nicht auftritt. Orthogonal ist in 90°- Richtung die Schallgeschwindigkeit für LSt 25 (5 MN; 67 %; magenta) auf gleichem Niveau wie bei LSt 22 (3,5 MN; 47 %; blau), wohingegen in 270°- Richtung eine Reduktion zu erkennen ist. Die Schallgeschwindigkeitsänderungen sind in diesem Bereich gering (siehe auch Abbildung 6.16 und Anhang Abbildung 1.1). Daher liegen beide Kurven im Polardiagramm auf einem ähnlichen Niveau, sodass die Elliptizität in diesem Bereich nicht zunimmt. Feine Tendenzen, wie sie in Abbildung 6.16 mit dem Sensorenarray festgestellt werden konnten, können mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau nicht aufgelöst werden. Bei weiterem Lastanstieg ist für die Kurve LSt 27 (6 MN; 80 %; türkis) für die Lastrichtung daher kein eindeutiger Trend im Vergleich zur Kurve LSt 25 (5 MN; 67 %; magenta) zu beobachten. In orthogonaler Richtung ist dagegen ein Absinken der Schallgeschwindigkeit zu beobachten, das in 270°-Richtung wesentlich deutlicher als in 90°-Richtung auftritt, die Werte unterschreiten in der 270°-Richtung alle zuvor gemessenen Werte. Die 270°-Richtung ist weiterhin vorläufig. Die Elliptizität nimmt, nachdem sie von LSt 22 (3,5 MN; 47 %; blau) zu LSt 25 (5 MN; 67 %; magenta) konstant blieb, wieder zu.

Bereich III (>80 %) : In Abbildung 6.18 (b) unterschreitet die Kurve LSt 30 (7,5 MN; 100 %; schwarz) für alle Messrichtungen die Werte der vorangegangenen Kurven und insbesondere auch die Kurve LSt 15 (0 MN; 0 %; rot) zu Beginn des zweiten Messzyklus. Die Geschwindigkeitsreduktion ist erneut in orthogonaler Richtung größer als in Lastrichtung. (Dieses Verhalten ist analog zu den Beobachtungen aus Abbildung 6.16 und Anhang Abbildung 1.1.) Im Bereich um die Richtung 270° ist die beobachtete Abminderung weiterhin deutlicher als in 90°- Richtung.

Des Weiteren fällt für die Kurve LSt 30 (7,5 MN; 100 %; schwarz) zwischen den Werten bei 260° und 270° ein deutlicher Unterschied von 8 % auf. Bei den zuvor gemessenen Laststufen waren keine Differenzen zwischen 260° und 270°, die die üblichen Abweichungen überstiegen, beobachtbar. Die Messung startet im Uhrzeigersinn bei 270° und endet mit der Messung bei 260°. Die Messdauer für einen Kreis betrug ca. 4 min. Die Messstrecke und der Ablauf der Messungen war bei allen Laststufen gleich. Dieser Unterschied gibt einen Hinweis auf ein zeitabhängiges Verhalten, das besonders bei hohen Spannungen im Bruchbereich auftritt; dieser Effekt wird in Kapitel 6.2.6 genauer beschrieben.

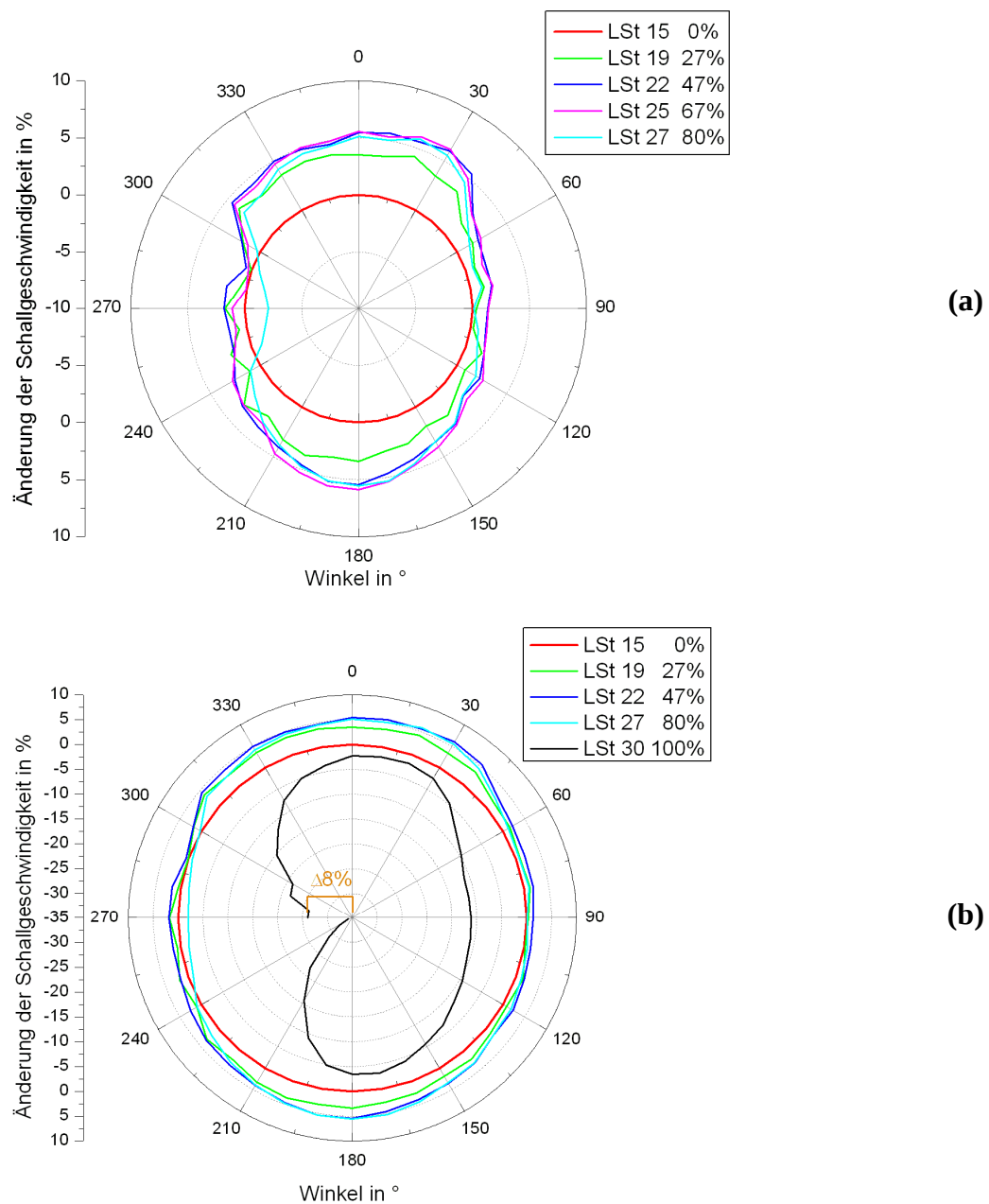


Abbildung 6.18: Polardiagramm für den 2.LZ des 3.PK gemessen mit dem Laservibrometer; auf LSt 15 (lastfrei) normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %; Laststufen: (a) 15 (0 %), 19 (27 %), 22 (47 %), 25 (67 %) und 27 (80 %); (b) 15 (0 %), 19 (27 %), 22 (47 %), 25 (67 %), 27 (80 %) und 30 (100 %).

Richtungsabhängige Einflüsse:

Es wurde gezeigt, dass sich die in orthogonaler und die in Lastrichtung gemessenen Schallgeschwindigkeiten unterscheiden. Aus den in Richtungsabhängigkeit geführten Messungen kann folgendes abgeleitet werden:

Bei einer Erstbe- und Entlastung liegen die Unterschiede zur Lastrichtung in:

Im Bereich 0 (<10-15 %) :

- Das anfängliche Absinken der Schallgeschwindigkeit stoppt in orthogonaler Richtung erst bei einer höheren Last als in Lastrichtung.

Im Bereich I (15-50 %) :

- Die Steigung der Schallgeschwindigkeit und das erreichte Maximum sind für die orthogonale Messrichtung wesentlich geringer.
- Es findet im Polardiagramm nur ein geringes Wachstum der Achse 270° - 90° statt.
- Durch die zunehmende Schallgeschwindigkeitsdifferenz bildet sich eine Ellipse mit der größeren Achse (Hauptachse) in Lastrichtung aus (0 - 180°).
- Bei der Entlastung ist die Abnahme der Schallgeschwindigkeit in orthogonaler Richtung geringer, damit reduziert sich die Differenz der beiden Richtungen und die Elliptizität geht zurück.

Die Unterschiede bei einer Wiederbelastung:

Im Bereich 0 (<10-15 %) :

- Bei der Wiederbelastung geht die Schallgeschwindigkeitsreduktion wie bei der Erstbelastung bis zu einer höheren Last.

Im Bereich I (15-50 %) :

- Der Gradient der Schallgeschwindigkeit ist in orthogonaler Richtung geringer als in Lastrichtung, jedoch stärker ausgeprägt als bei der Erstbelastung.
- Damit findet im Polardiagramm ein wahrnehmbares Wachstum der Achse 270° - 90° statt.
- Da der Anstieg in Lastrichtung größer ist, bildet sich auch im zweiten Lastzyklus im Polardiagramm eine Ellipse aus.

Im Bereich II (50-80 %) :

- Bei der Wiederbelastung steigt das erreichte Maximum der orthogonalen Messrichtung über die Werte des unbelasteten Zustandes zu Beginn des Lastzyklus.
- Der Scheitelpunkt in orthogonaler Messrichtung liegt vor, d.h. wird bei geringeren Lasten als in Lastrichtung erreicht. Die Reduktion der Schallgeschwindigkeit setzt in orthogonaler Richtung zwar langsamer, jedoch früher, ein als in Lastrichtung.
- Beide Schallgeschwindigkeiten unterliegen in diesem Bereich geringen Änderungen, damit ändert sich die Elliptizität ebenfalls nur geringfügig.

Im Bereich III (>80 %) :

- Der drastische Schallgeschwindigkeitsrückgang setzt für die orthogonale Richtung früher ein.
- Die Schallgeschwindigkeit erreicht damit deutlich niedrigere Werte als in Lastrichtung.
- Die Elliptizität nimmt in diesem Bereich erneut und am deutlichsten zu.

Nachdem in diesem Kapitel auf die Effekte der lastabhängigen Geschwindigkeitsänderung für die Erstbelastung, Entlastung und Wiederbelastung aus einer geringen Last eingegangen worden ist, soll im nächsten Kapitel auf die Wiederbelastung nach höheren Lasten, in Form einer Überlastung, eingegangen werden.

6.2.5 Ent- und Wiederbelastung nach einer Überlastung

Die im zweiten Lastzyklus erreichte Maximallast konnte ohne Bruch nur kurz gehalten werden und stellt damit eine Überlastung dar. Der Einfluss dieser Überlastung soll anhand der folgenden Lastzyklen diskutiert werden. Daher sind am dritten Probekörper nach dem Erreichen der maximalen Last weitere Messungen, die zwei weitere Lastzyklen umfassen, durchgeführt worden. Der weitere Lastverlauf ist Abbildung 6.10 (a) zu entnehmen. Die in diesem Kapitel diskutierten Graphen umfassen damit bis zum Lastmaximum im zweiten Lastzyklus den schon im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Versuchsteil und die Kurven in Abbildung 6.19 entsprechen bis zum Lastmaximum des zweiten Lastzyklus den Kurven, die im Anhang 1.1 diskutiert werden. Nach dem Erreichen der maximalen Last von 7,5 MN in LSt 30 wurde der Probekörper entlastet und in einem dritten Lastzyklus erneut bis 3,5 MN belastet. Der dritte Lastzyklus entspricht vom Belastungsverlauf exakt dem ersten Lastzyklus, sodass die gemessenen Schallgeschwindigkeitsänderungen miteinander verglichen werden können. Im vierten Lastzyklus wurde der Probekörper bis zum Bruch, der bei 7 MN (93 %; 29,2 MPa) erfolgte, belastet. Der Bruch trat ein, bevor mit dem Laservibrometer gemessen werden konnte, sodass die letzte Messung bei 6,5 MN in LSt 74 erfolgte. Die Bruchlast lag unter der maximalen Last von 7,5 MN im zweiten Lastzyklus.

In Abbildung 6.19 sind die Schallgeschwindigkeitsänderungen für die Lastrichtung und die orthogonale Richtung für alle Lastzyklen am dritten Probekörper eingetragen. Im zweiten Lastzyklus setzt sich das rapide Absinken der Schallgeschwindigkeit nach Erreichen des Lastmaximums bei LSt 30 (100 %) für beide Lastrichtungen auch bei der Entlastung fort. Dieses Absinken setzte schon ab einer Last von ca. 80 % ein und hält bis zur LSt 31 (93 %) an. Bei LSt 31 liegt der orthogonal zur Lastrichtung gemessene Wert mit -20,35 % unterhalb der ursprünglichen Schallgeschwindigkeit bei LSt 0 (0 %) und deutlich unter dem in Lastrichtung gemessenen Wert mit -13,78 %. Ab dieser Laststufe geht das rapide Absinken in ein wesentlich geringeres über und die Schallgeschwindigkeit nimmt in Lastrichtung mit zunehmendem Gefälle ab (1), ähnlich der Abnahme im ersten Lastzyklus nach Erreichen der maximalen Last des Lastzyklus. In orthogonaler Richtung fällt die Abnahme wesentlich geringer aus und ist weitestgehend linear (2). Im unbelasteten Zustand nach dem zweiten Lastzyklus haben sich die Schallgeschwindigkeiten für beide Richtungen bis auf 0,44 % angenähert (3).

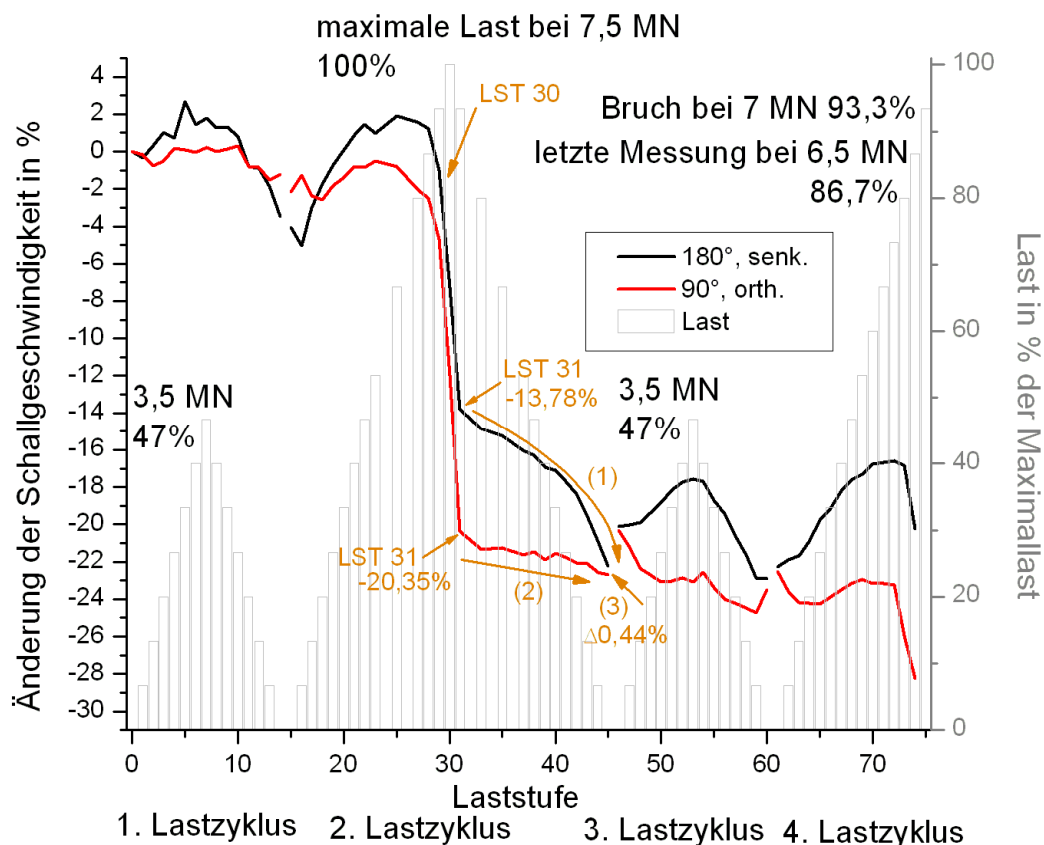


Abbildung 6.19: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % und Last in % der Maximallast über der Laststufe am 3. PK mit dem Laservibrometer gemessen. Die orangenen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

Um die Richtungsabhängigkeit besser visualisieren zu können und zur Auflösung aller gemessenen Richtungen, soll, wie schon zuvor, die Schallgeschwindigkeitsänderung nach der Überlastung ebenfalls anhand von Polardiagrammen diskutiert werden. Das Polardiagramm in Abbildung 6.20 ist auf den lastfreien Zustand bei LSt 15 zu Beginn des zweiten Lastzyklus normiert, analog zu Abbildung 6.18.

Nach dem Schallgeschwindigkeitsanstieg in alle Richtungen von Laststufe 15 (0 MN; 0 %; rot) zu Laststufe 22 (2 MN; 53 %; grün), der schon in Kapitel 6.2.4 diskutiert wurde, ist bei Laststufe 30 (7,5 MN; 100 %; blau) ein deutliches Absinken der Schallgeschwindigkeit in alle Richtungen zu erkennen. Dieses Absinken ist in orthogonaler Richtung deutlicher ausgeprägt und die Elliptizität nimmt für Laststufe 31 (7 MN; 93 %; türkis) weiter zu. Die im unbelasteten Zustand gemessene Kurve bei Laststufe 45 (0 MN; 0 %; schwarz) liegt in allen Richtungen unter den zuvor gemessenen Werten. Zwischen LSt 31 und LSt 45 fällt das Absinken der Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung deutlicher aus als orthogonal zu dieser und damit nimmt die Elliptizität ab.

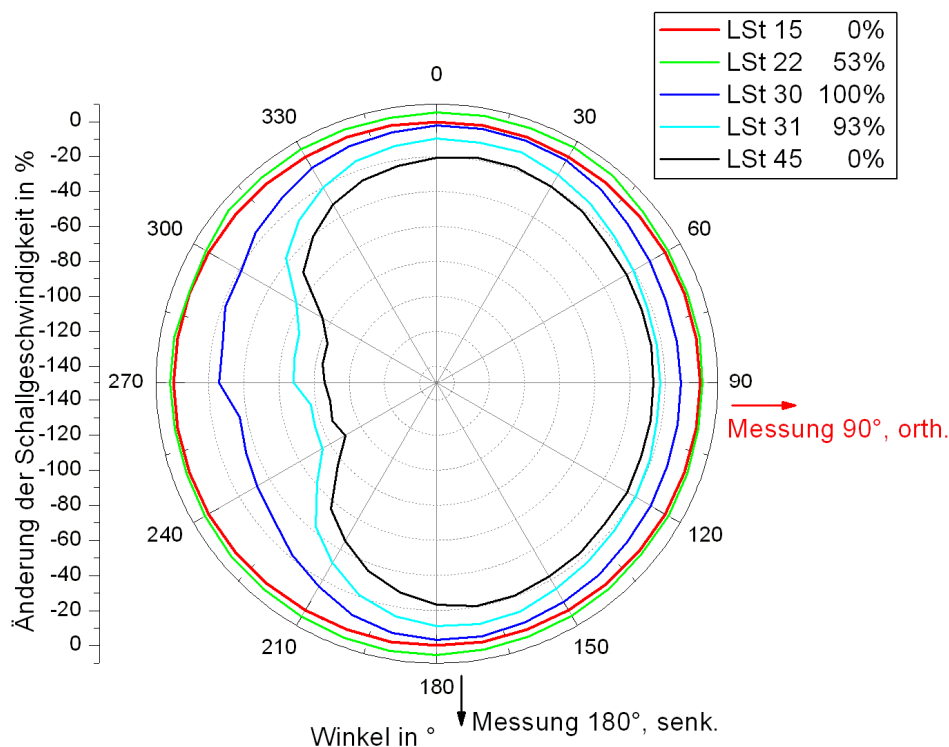


Abbildung 6.20: Polardiagramm für den 2.LZ des 3.PK gemessen mit dem Laservibrometer; auf LSt 15 (lastfrei) normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %; Laststufen: 15 (0 %), 23 (53 %), 30 (100 %), 31 (93 %) und 45 (0 %).

Im Polardiagramm sticht die Geschwindigkeitsreduktion in 270°-Richtung (diese Richtung war in Abbildung 6.19 nicht eingetragen) besonders deutlich hervor. Während die Geschwindigkeitsminderung von LSt 15 zu LSt 45 in die anderen Richtungen zwischen 20 und 26 % beträgt, geht die Änderung im Bereich zwischen 240° und 300° an die 90 % heran. Eine Änderung von 100 % bedeutet eine Verdoppelung der Laufzeit der Oberflächenwelle.

Während des zweiten Lastzyklus konnte visuell im linken Bereich des dritten Probekörpers eine Rissbildung beobachtet werden (siehe Abbildung 6.21). Hier ist zu untersuchen inwieweit ein Umlaufen der Risse für die sehr deutliche Schallgeschwindigkeitsminimierung verantwortlich war.

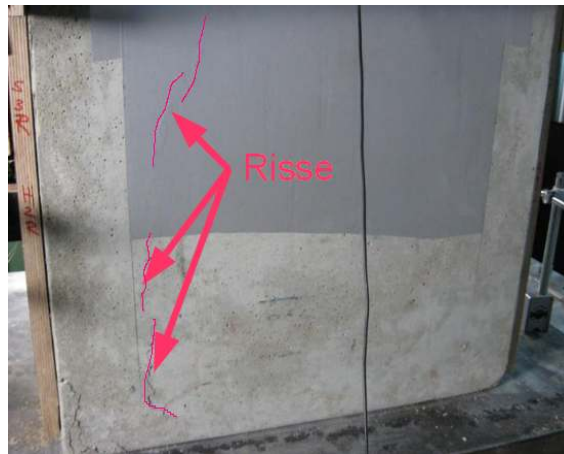


Abbildung 6.21: Dritter Probekörper mit hervorgehobenen Rissen, nach LSt 45 fotografiert.

Nach der erfolgten Entlastung und der beobachteten Schallgeschwindigkeitsreduktion soll nun das Verhalten der Schallgeschwindigkeit bei einer erneuten Belastung in ein geringeres Lastniveau beobachtet werden. Hierzu wurde ein dritter Lastzyklus mit exakt dem gleichen Belastungsverlauf wie im ersten Lastzyklus gemessen.

Die Schallgeschwindigkeiten für den ersten und dritten Lastzyklus sind in Abbildung 6.22 über den einander entsprechenden Laststufen abgetragen. Nach der Überlastung ist zu Belastungsbeginn zwischen beiden Lastzyklen eine Schallgeschwindigkeitsreduktion von ca. 20 % vorhanden. Mit beginnender Belastung steigt in den ersten zwei Lastschritten die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung im Gegensatz zum ersten Lastzyklus verhalten (1) und nach dem zweiten Lastschritt deutlicher an; danach geht sie in einen Anstieg mit abnehmender Steigung über (2), analog zur Erstbelastung. Beim Lastmaximum wird die maximale Schallgeschwindigkeit erreicht und fällt nach diesem mit zunehmendem Gefälle ab (3), wieder analog zum ersten Lastzyklus. Werden die maximal erreichten Schallgeschwindigkeitsdifferenzen verglichen, so sind diese im ersten Lastzyklus mit 1,7 % geringer als im dritten Lastzyklus mit 2,5 %. Die Kurvenform ist oberhalb von Bereich 0 (0-15 %) ähnlich.

In orthogonaler Richtung sinkt vom Beginn an die Schallgeschwindigkeit mit abnehmendem Gefälle (4), ein Anstieg nach Bereich 0 wie im ersten Lastzyklus ist nicht zu erkennen. Im Bereich des Lastmaximums bei 3,5 MN verharrt die Schallgeschwindigkeit auf einem Niveau und fällt nach dem Erreichen des Lastmaximums weiter ab (5). Erst im letzten Lastschritt ist ein Anstieg zu erkennen, indem sich die Schallgeschwindigkeit der in Lastrichtung gemessenen annähert. Während im ersten Lastzyklus die Schallgeschwindigkeit minimal auf 0,2 % anwächst, sinkt sie von Lastschritt 0 bis zum Lastmaximum um -2,8 % bei sich deutlich unterscheidender Kurvenform.

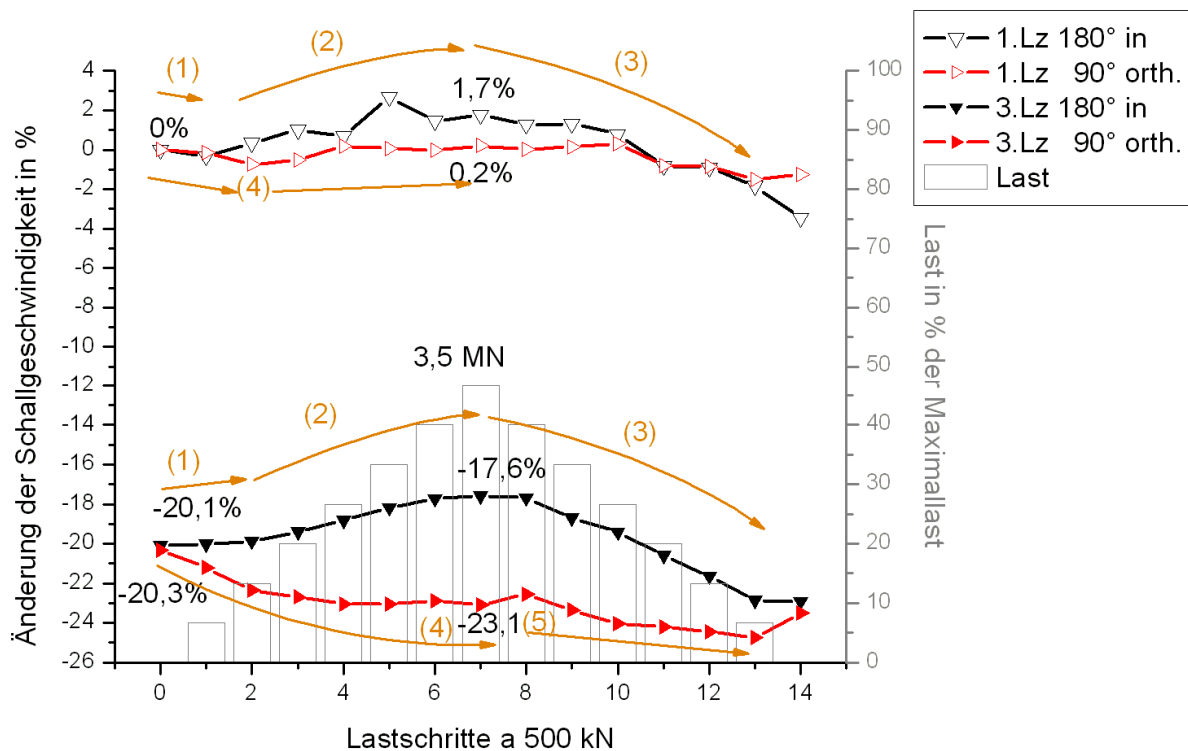


Abbildung 6.22: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % von der Maximallast, im 1.LZ und im 3.LZ, in Lastrichtung (schwarz) und orthogonal zur Lastrichtung (rot) eingetragen über den Lastschritten a 500 kN; für den 1.LZ entsprechen die LSt 0-14 den LSt 44-59 im 3.LZ. Die orangen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

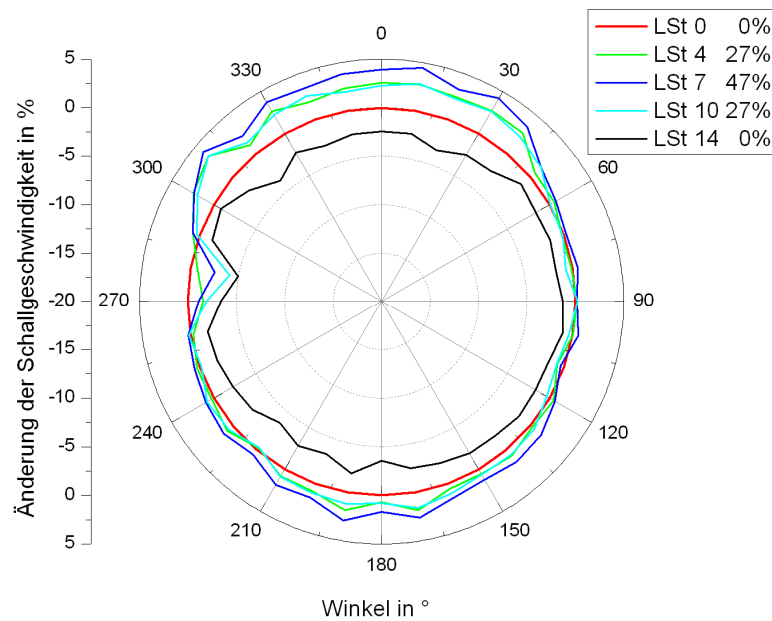
Auch die Überlastung soll anhand von Polardiagrammen untersucht werden.

Im Polardiagramm in Abbildung 6.23 (b) ist der dritte Lastzyklus in exakt der gleichen Weise dargestellt wie schon der erste Lastzyklus aus Abbildung 6.17 (a) und wird zum besseren Vergleich parallel in Abbildung 6.23 (a) gezeigt (die Skalierung wurde angepasst). Von besonderem Interesse sind die Unterschiede zwischen Erstbelastung und Wiederbelastung sowohl für den ungerissenen Probekörperteil im rechten Teil des Polardiagramms als auch im gerissenen linken Bereich.

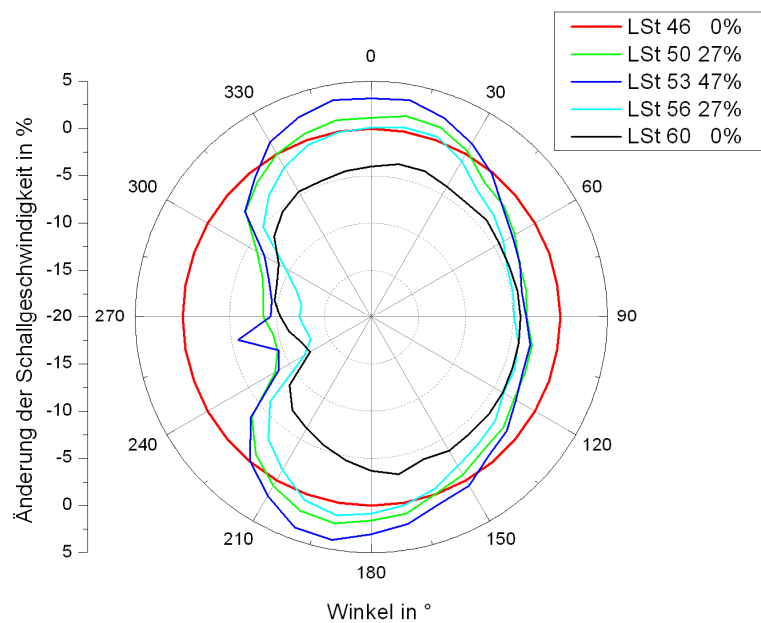
In Abbildung 6.23 ist bei einer Erhöhung der Last von LSt 46 (0 MN; 0 %; rot) über LSt 50 (2 MN; 27 %; grün) zu LSt 53 (3,5 MN; 47 %; blau) zu erkennen, dass bei der Wiederbelastung (b) in Lastrichtung ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit, wie schon bei der Erstbelastung (a), vorhanden ist. In orthogonaler Richtung (90°) sinkt mit beginnender Belastung die Schallgeschwindigkeit ab und dieses im Gegensatz zum ersten Lastzyklus deutlich unterhalb des Ausgangsniveaus. Die Elliptizität bildet sich damit klarer aus als bei der Erstbelastung. Das Absinken der Schallgeschwindigkeit ist in Richtung 270°, wo am Probekörper sichtbare Risse entstanden sind, mit um die 10 % am größten.

Mit der Entlastung von LSt 53 (3,5 MN; 47 %; blau) zu LSt 56 (2 MN; 27 %; türkis) sinkt die Schallgeschwindigkeit in alle Richtungen und liegt in Lastrichtung nur noch geringfügig über der LSt 46, dem unbelasteten Zustand vor Beginn des dritten Lastzyklus. Dieses Absinken ist deutlicher als im ersten Lastzyklus. Werden die Kurven bei jeweils 2 MN verglichen, so

liegen diese beim ersten Lastzyklus für die Be- und Entlastung auf einem Niveau, im dritten Lastzyklus dagegen liegt die Schallgeschwindigkeit der Entlastung deutlich unter der der Belastung. Ist der Probekörper nach dem dritten Lastzyklus bei LSt 60 (0 MN; 0 %; schwarz) entlastet, sinkt die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung deutlich unter das Niveau der vorangegangenen Kurve bei LSt 56 (2 MN; 27 %; türkis) und liegt für alle Richtungen unter der Schallgeschwindigkeit vor Beginn des dritten Lastzyklus LSt 46 (0 MN; 0 %; rot). Für beide Messungen in orthogonaler Messrichtung ist bei der vollständigen Entlastung zwischen der Kurve LSt 56 (2 MN; 27 %; türkis) und LSt 60 (0 MN; 0 %; schwarz) ein leichter Schallgeschwindigkeitsanstieg zu verzeichnen; dieser konnte im ersten Lastzyklus nicht beobachtet werden. Im ungerissenen Bereich (rechts) geht die Elliptizität der Kurve LSt 60 zurück, während sich im gerissenen Bereich eine Einschnürung ausgeformt hat.



(a)



(b)

Abbildung 6.23: Polardiagramm für den (a) 1.LZ und (b) 3.LZ des 3.PK gemessen mit dem Laservibrometer; auf den lastfreien Zustand vor dem jeweiligen Lastzyklus ((a) LSt 0 und (b) LSt 46) normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %, die Farben der Kurven entsprechen den jeweils korrespondierenden Lasten.

In Abbildung 6.24 ist zum Vergleich der dritte Lastzyklus aus Abbildung 6.23 (b) dargestellt; die Kurven sind jedoch auf den lastfreien Zustand des noch nie belasteten Probekörpers vor dem ersten Lastzyklus LSt 0 (0 MN; 0 %; pink) bezogen. Im gerissenen Bereich (links) ist für die 270°-Richtung im Polardiagramm eine niedrigere Schallgeschwindigkeit schon vor Beginn des dritten Lastzyklus zu erkennen, LSt 46 (0 MN; 0 %; rot). Damit wird deutlich, dass im Bereich mit sichtbaren Rissen eine markantere und irreversible Schallgeschwindigkeitsminderung aufgetreten ist. Trotz der geringeren Anfangsgeschwindigkeit sinkt in diesem Bereich die Schallgeschwindigkeit mit -16,5% auffälliger als für alle anderen Messrichtungen, z. B. in die gegenüber liegende 90°-Richtung mit -4,5 %.

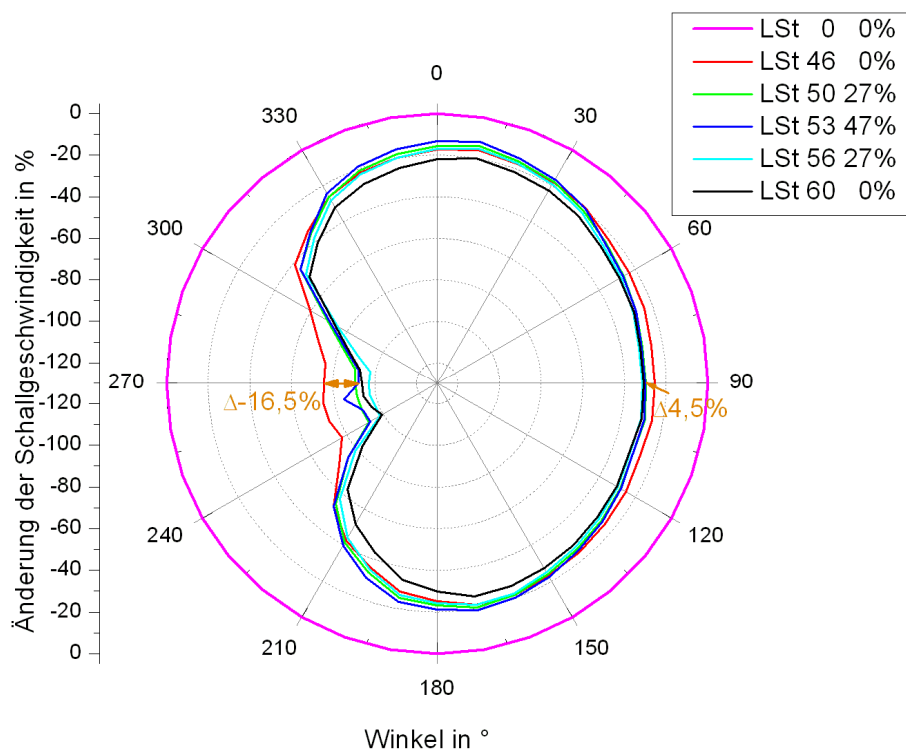


Abbildung 6.24: Polardiagramm für den 3.LZ, bezogen auf den lastfreien Zustand (LSt 0; 0 %; lila) vor Beginn des 1.LZ.

Nach der Analyse der Wiederbe- und Entlastung in ein geringes Lastniveau (1.LZ vs. 2.LZ) soll der vierte Lastzyklus, der bis zum Bruch belastet wurde, zum Vergleich der Schallgeschwindigkeitsänderungen bei der Wiederbelastung in ein höheres Lastniveau dienen und mit dem zweiten Lastzyklus verglichen werden (siehe Abbildung 6.25).

Die Schallgeschwindigkeitsänderungen in den ersten Lastschritten des zweiten und vierten Lastzyklus gestalten sich in Lastrichtung uneinheitlich. Während im zweiten Lastzyklus die Schallgeschwindigkeit sinkt, steigt diese für den vierten Lastzyklus verhalten an (1). Dieses war auch für den ersten und dritten Lastzyklus zu beobachten. Nach den ersten Lastschritten steigt die Schallgeschwindigkeit mit abnehmender Steigung an und behält im Bereich zwischen 60 und 80 % (Lastschritt 9 – 12) der Maximallast ein ähnliches Niveau (2).

Die Schallgeschwindigkeitsdifferenzen zwischen Anfangswert und Maximum liegt in etwa gleich auf mit 6 % im zweiten Lastzyklus und 5,7 % vierten Lastzyklus. Ab Lastschritt 12 sinkt die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung bis zum Lastschritt 13 - dem letzten gemessenen Wert des vierten Lastzyklus – mit großem Gefälle ab (3). Die Schallgeschwindigkeiten im zweiten und vierten Lastzyklus verhalten sich in diesem Bereich ähnlich. Eine deutliche Schallgeschwindigkeitsreduktion tritt jedoch erst einen Lastschritt später bei Lastschritt 13 ein (3).

In orthogonaler Messrichtung ist für beide Lastzyklen ein Absinken der Schallgeschwindigkeit, mit Ausnahme des ersten Lastschritts im zweiten Lastzyklus, zu verzeichnen; dieses Absinken geht im zweiten Lastzyklus bis zum dritten (1,5 MN, 20 %) und im vierten Lastzyklus bis zum vierten Lastschritt (2 MN; 27 %) (4). Danach steigt für beide Lastzyklen die Schallgeschwindigkeit bis zum achten Lastschritt leicht an (4MN; 53 %) (5). Die Steigung ist im vierten Lastzyklus geringer als im zweiten und kaum wahrnehmbar. Die Werte im zweiten Lastzyklus übersteigen den Anfangswert um 1,7 %, im vierten Lastzyklus bleiben die Werte mit 0,4 % unter denen der unbelasteten Messung. Ab dem achten Lastschritt sinkt die Schallgeschwindigkeit ab und geht im zweiten Lastzyklus bei Lastschritt 13 und im vierten Lastzyklus bei Lastschritt 11 in ein steiles Gefälle über. Das Absinken der Schallgeschwindigkeit ist im zweiten Lastzyklus deutlicher ausgeprägt (6).

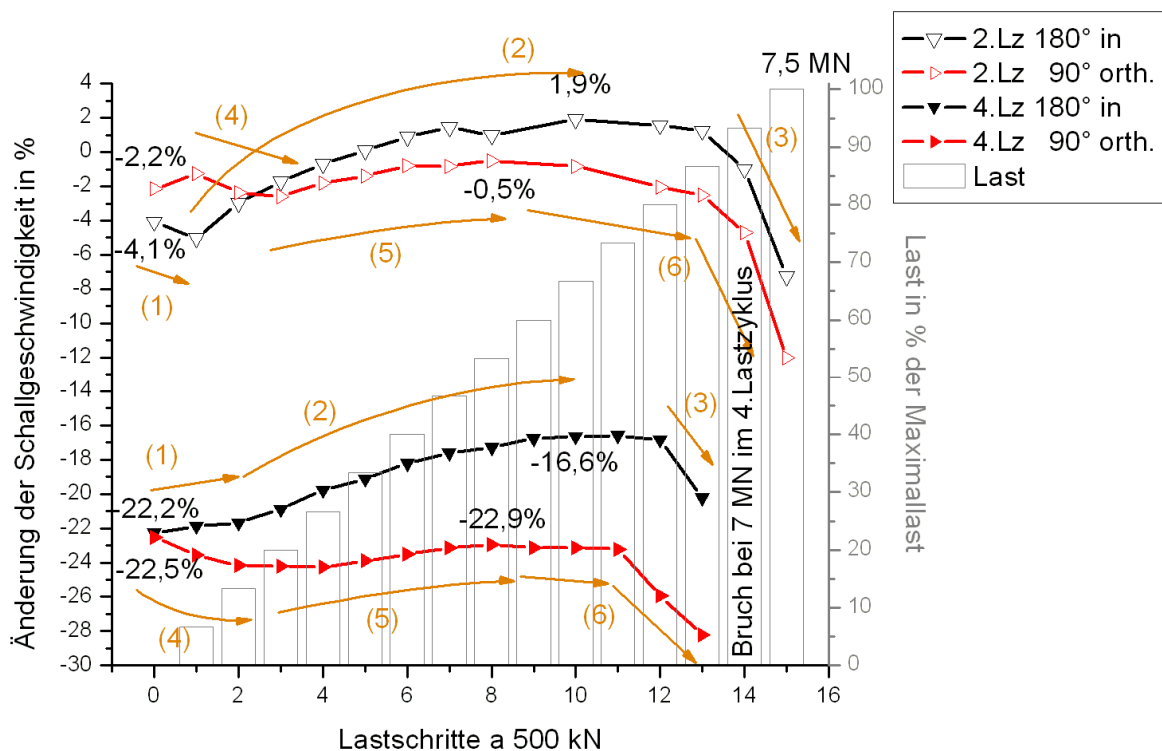
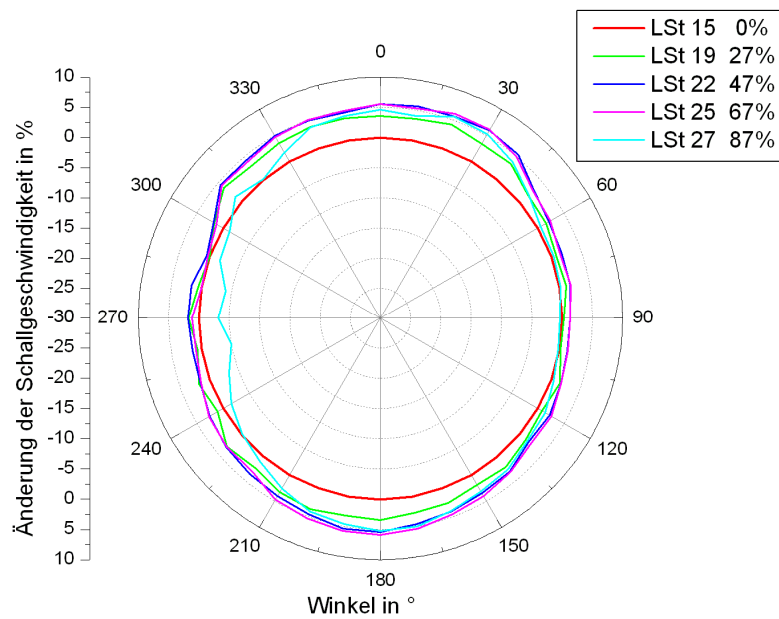


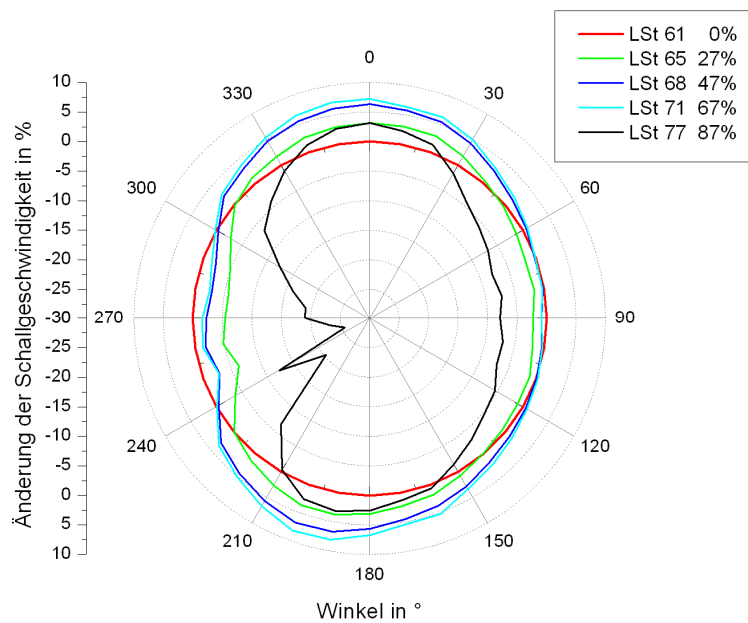
Abbildung 6.25: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % im 2.LZ und 4.LZ, in Lastrichtung (schwarz) und orthogonal zur Lastrichtung (rot) eingetragen mit der Last in % der Maximallast über den Lastschritten a 500 kN; für den 2.LZ entsprechen die LSt 15-30 den LSt 61-74 im 4.LZ. Die orangen Markierungen sollen den Trend verdeutlichen und sind unter der angetragenen Nummer im Text erläutert.

Der Vergleich des zweiten und vierten Lastzyklus soll im Folgenden mit Hilfe von Polardiagrammen weitergeführt werden. In Abbildung 6.26 (b) ist der vierte Lastzyklus abgebildet. Es wurden lediglich die Kurven bis LSt 77 (6,5 MN) eingetragen, da danach bei 7 MN der Bruch erfolgte. In Abbildung 6.26 (a) ist zum Vergleich der zweite Lastzyklus mit den korrespondierenden Kurven für die Belastung eingetragen.

Wie schon im dritten Lastzyklus beobachtet werden konnte, stieg auch im vierten die Schallgeschwindigkeit nur in Lastrichtung über die Anfangswerte des jeweiligen Lastzyklus. Dieser Anstieg geht für die Lastrichtung bis LSt 71 (5 MN; 67 %; türkis). In orthogonaler Richtung sinkt die Schallgeschwindigkeit mit beginnendem Lastanstieg unter den Anfangswert bei LSt 61 (0 MN; 0 %; rot). Mit LSt 77 (6,5 MN; 87 %; schwarz) - der letzten vor dem Bruch bei 7 MN gemessenen Laststufe - sinkt die Schallgeschwindigkeit für alle Richtungen unter die Schallgeschwindigkeit der vorangegangenen Kurve LSt 71 (5 MN; 67 %; türkis). Die Reduktion fällt in orthogonaler Richtung deutlicher aus und die Elliptizität nimmt zum Bruch hin zu. Die Schallgeschwindigkeit unterschreitet nur in Lastrichtung nicht die Werte des unbelasteten Zustandes LSt 61 (0 MN; 0 %; rot) vor Beginn des vierten Lastzyklus.



(a)



(b)

Abbildung 6.26: Polardiagramme für die Belastung im (a) 2.LZ und (b) 4.LZ des 3.PK; auf den lastfreien Zustand vor dem jeweiligen Lastzyklus normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %. Der Bruch erfolgte nach LSt77 bei 7 MN.

Trotz neuer Normierung in LSt 61 ist die Schallgeschwindigkeitsreduktion in 270°- Richtung erneut mit Abstand die größte. Die Risse haben sich in diesem Bereich verbunden und klaffen weiter auf.

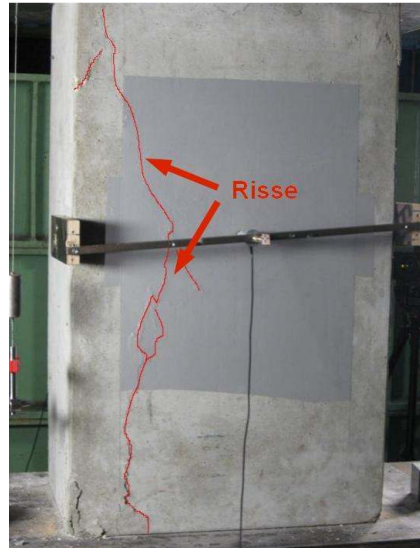


Abbildung 6.27: Dritter Probekörper mit hervorgehobenen Rissen, nach LSt 73 fotografiert.

Für das Verhalten der Schallgeschwindigkeit nach einer Überlastung kann wie folgt festgehalten werden:

- Nach einer Überlastung zeigt das Verhalten der Schallgeschwindigkeit bei Ent- und Belastung für die Lastrichtung ein ähnliches Verhalten wie vor der Überlastung, jedoch bei reduzierter Schallgeschwindigkeit.
- In orthogonaler Richtung unterscheidet sich das Verhalten. Mit beginnender Laststeigerung sinkt die Schallgeschwindigkeit zunächst, der darauf folgende Anstieg ist minimal, sodass die vor dem Lastzyklus gemessenen Schallgeschwindigkeiten nicht erreicht werden.
- Das Absinken der Schallgeschwindigkeit mit großem Gefälle ist bei Lasten über 70 % auch nach einer Überlastung zu beobachten.
- Die Geschwindigkeitsreduktion ist im Bereich mit sichtbaren Rissen wesentlich deutlicher ausgeprägt, hier -80% bis -90 %.
- Die deutliche Geschwindigkeitsreduktion von 20-25 % bei hohen Lasten bleibt nach der Entlastung und in weiteren Lastverläufen bestehen; nur ein geringer Teil bildet sich bei längeren Messpausen im unbelasteten Zustand zurück (siehe Kapitel 6.2.6.1).

Dieser Rückgang der Schallgeschwindigkeitsminderung in den Messpausen soll im folgenden Kapitel näher untersucht werden.

6.2.6 Zeitabhängige Effekte

6.2.6.1 Entlastung

Zwischen den Messungen im unbelasteten Zustand am Ende eines Messtages und zu Beginn des nächsten Messtages ist immer eine gewisse Schallgeschwindigkeitsdifferenz aufgetreten. Diese Differenz lag über den Einflüssen der Kalibrierung und entsprach generell einer Schallgeschwindigkeitszunahme. Um diesen Effekt näher zu untersuchen, wurde der Laservibrometer-Versuchsaufbau derart modifiziert, dass in den nächtlichen Versuchspausen jede halbe Stunde ein kompletter Messzyklus gemessen werden konnte. Die Schallgeschwindigkeitsänderungen sind in Abbildung 6.28 demnach über der Zeit in Stunden, anstelle der Laststufen, aufgetragen worden. Der Probekörper war während der gesamten Zeit unbelastet und die Prüfmaschine (GPM) abgeschaltet. Die Messungen gehören zu den Versuchen am dritten Probekörper. Die erste Nacht wurde nach dem ersten Lastzyklus (3,5 MN, 47 %) gemessen (siehe Abbildung 6.10), die zweite Nacht nach dem zweiten (7,5 MN, 100 %) und dritten (3,5 MN, 47 %), sowie die dritte Nacht nach dem Abbau der Sensorik im vierten Lastzyklus (6 MN, 80 %).

Für die erste Messnacht ist nach einer Maximalbelastung von 3,5 MN (47 %) im Bereich der ersten Stunde ein geringer Anstieg der Schallgeschwindigkeit für beide Messrichtungen zu erkennen danach bleiben die Schallgeschwindigkeiten bis zur zehnten Stunde in etwa auf einem Niveau. Bei der vorliegenden Streuung der Messwerte ist keine klare Tendenz in diesem Bereich zu erkennen und damit keine Aussage für die erste Nacht möglich, der Anstieg der Schallgeschwindigkeit nach zehn Stunden ist mit 0,6 % in und 0,1 % orthogonal zur Lastrichtung zu gering.

Für die darauffolgenden Nächte fiel der Effekt, nach den höheren zuvor erreichten Lasten, deutlicher aus. Für die beiden Messrichtungen ist in der zweiten Nacht, nach einer vorangegangenen Maximalbelastung bis 7,5 MN (100 %), zu Beginn ein steiler Anstieg zu verzeichnen, der sich mit zunehmender Dauer abschwächt. Der in orthogonaler Richtung gemessene Wert des Schallgeschwindigkeitszuwachses von 3,5 % nach 12 h liegt deutlich über dem in Lastrichtung gemessenen Wert von 2,1 %.

Vor der dritten Nacht wurde ohne schrittweise Entlastung, wie bei den vorangegangenen Lastzyklen üblich, direkt vom Maximum bei 6 MN (80 %) bis zum lastfreien Zustand entlastet und anschließend gemessen. Wie schon in der zweiten Messnacht beobachtet, steigt die Schallgeschwindigkeit erst steil und dann mit abnehmender Steigung an. Die in orthogonaler Richtung gemessenen Werte von 4,6 % nach 12 h übersteigen erneut die in Lastrichtung gemessenen Werte von 2,7 % nach 12 h.

Bei den hier durchgeführten Messungen über Nacht muss folgendes beachtet werden: Zwischen Tagesmessungen und den verschiedenen Nachtmessungen können aufgrund der Kalibrierung des Laservibrometers die Werte nicht übertragen werden. Das Zeitfenster von maximal 12 h ist zu gering, um den gesamten Prozess der Schallgeschwindigkeitssteigerung zu beobachten. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass die Schallgeschwindigkeitserhöhung aufgrund der abflachenden Steigung ein gewisses Maximum nicht überschreitet. Der maximale zeitabhängige Anstieg lag, auch bei Messungen die durch ein Wochenende

unterbrochen waren, deutlich unter den durch die Belastung erfolgten Schallgeschwindigkeitsminderungen. Der Anstieg in der zweiten Nacht betrug 2,1 % in Lastrichtung und 3,5 % in orthogonaler Richtung, während die Schallgeschwindigkeitsminderung durch die Überlastung im zweiten Lastzyklus -18,2 % in Lastrichtung und -20,5 % in orthogonaler Richtung betrug, d.h. die Schallgeschwindigkeitsminderung ist nur zum Teil reversibel.

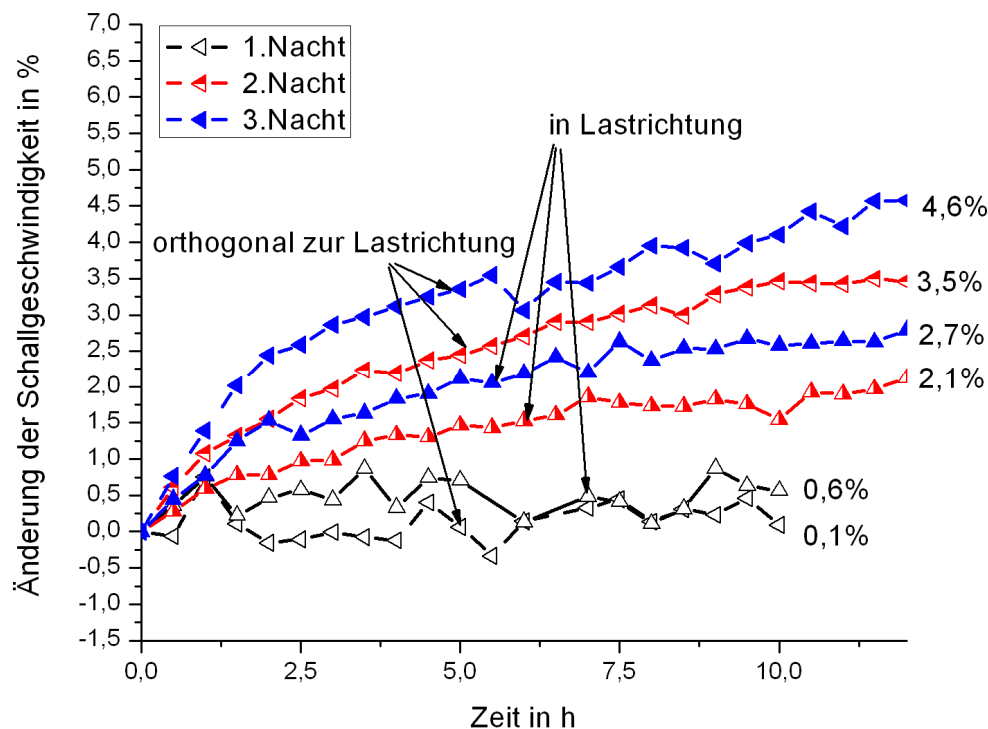


Abbildung 6.28: Änderung der Schallgeschwindigkeit für die erste Nacht (schwarz), die zweite Nacht (rot) und die dritte Nacht (blau) über der Zeit. Bei den in Lastrichtung gemessenen Kurven zeigt das Dreieck an den Messpunkt nach oben, bei den orthogonal gemessenen nach links. Gemessen wurde mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau am 3.PK.

Das zeitabhängige Verhalten der Schallgeschwindigkeit nach einer Belastung kann zusammengefasst werden zu:

- Die Schallgeschwindigkeit steigt direkt nach der Entlastung steil an. Der Gradient geht mit zunehmender Zeit zurück.
- In orthogonaler Richtung ist der Schallgeschwindigkeitsanstieg ausgeprägter.
- Die vorangegangene Belastungshistorie und die daraus resultierende Schallgeschwindigkeitsminderung bestimmt die Ausprägung dieses Effekts.
- Die beobachtete Schallgeschwindigkeitsminderung nach einer Belastung ist nur teilweise reversibel.

Ein zeitabhängiges Verhalten der Schallgeschwindigkeit nach einer Belastung, wie hier beschrieben, legt ein zeitabhängiges Verhalten während der Belastung nahe, auf das im folgenden Kapitel eingegangen werden soll.

6.2.6.2 Belastung

Im Gegensatz zu den Schallgeschwindigkeitsmessungen nach einer Belastung, bei denen über einen relativ langen Zeitraum gemessen werden kann, war es im Rahmen dieser Versuchsreihe nicht möglich, lange Zeit unter Belastung zu messen; hierzu sind die Kosten für die GPM zu hoch und die Maschine ist des Weiteren nicht für hohe Dauerlasten ausgelegt.

In den bisher diskutierten Messergebnissen gab es jedoch Hinweise auf ein derartiges Verhalten, besonders bei Lasten im Bereich kurz vor dem Bruch, wenn die Dauerstandfestigkeit überschritten ist. Die Dehnung, die während aller Versuche protokolliert wurde, nimmt während des Haltens einer Laststufe zu; auch dieses geschieht besonders deutlich in hohen Lastbereichen. Wie in Kapitel 7.2 über den akustoelastischen Effekt geschrieben wird, gibt es einen Zusammenhang zwischen Dehnung und der Schallgeschwindigkeitsänderung, bzw. Laufzeitänderung.

Im Polardiagramm in Abbildung 6.29 wurde zur besseren Darstellung die Laufzeitänderung in % anstelle der Schallgeschwindigkeitsänderung eingetragen. Die Messung eines jeden Messzyklus begann immer in Richtung 270° und ging dann in zehn Grad Schritten im Uhrzeigersinn weiter. Die Messung eines Kreises dauerte 4 min. Dies bedeutet, dass sich das Beobachten des zeitabhängigen Verhaltens auf nur 4 min beschränkt und damit der Effekt deutlich ausgeprägt sein muss, um ihn in dieser kurzen Zeit zu messen. Des Weiteren ist nicht ein Punkt über diese Dauer gemessen worden, sondern 36 in einem Kreis. Aufgrund der Symmetrie der Schallgeschwindigkeitsänderung können die sich gegenüberliegenden Messpunkte miteinander verglichen werden. Um diesen Vergleich der gegenüberliegenden Messpunkte führen zu können, wird anstelle vom dritten Probekörper, bei dem eine deutliche Schädigung im linken Bereich auftrat und damit die Symmetrie nicht mehr gegeben war, die Diskussion am vierten Probekörper (bewehrt) geführt. Im Polardiagramm wird die letzte Laststufe vor dem Bruch (LSt 76, 95 %) bezogen auf die Laststufe null (LSt 0, 0 %) diskutiert.

In orthogonaler Messrichtung bei 270° beträgt der Anstieg der Laufzeit 11,4 %, für den korrespondierenden Punkt in 90° -Richtung, der 2 min später gemessen worden ist, beträgt der Laufzeitzuwachs 15,7 %; dieses ist eine Differenz von 4,3 %. In Lastrichtung liegt die Laufzeitänderung des Punktes in 0° -Richtung bei 0,4 % und in 180° -Richtung bei 3,1 %. Der in 2 min erreichte Unterschied liegt mit 2,7 % unter dem in orthogonaler Messrichtung gemessenen mit 4,3 %. Wird zudem der zuletzt gemessene Punkt bei 260° (17,2 %) mit dem zwei Minuten zuvor in orthogonaler Richtung gemessenen Punkt bei 90° (15,7 %) verglichen, die Abweichung von der orthogonalen Richtung ist mit 10° gering und damit der Unterschied der richtungsabhängigen Laufzeitänderung, so liegt die Differenz von 1,5 % deutlich unter beiden zuvor festgestellten Differenzen.

Eine Aussage über eine richtungsabhängige Ausprägung des Effekts lässt sich mit dieser Art der Messung nicht feststellen, da die Vermutung nahe liegt, dass wie schon im Kapitel zuvor beschrieben, die Laufzeitänderung zu Beginn deutlicher ausfällt und mit fortschreitender Zeit abnimmt und damit einen Einfluss auch bei einer Messdauer von 4 Minuten hat. Bei den drei beobachteten Messstrecken fiel die Differenz mit zunehmender Zeit geringer aus. Der maximale Zeitunterschied liegt mit vier Minuten zwischen der 270° -Richtung (11,4 %) und der 260° -Richtung (17,2 %) ebenso wie die maximale Differenz der

Schallgeschwindigkeitsänderung mit 5,8 %. Ein Sprung zwischen der 270°- Richtung und der 260°- Richtung ist ebenfalls in Abbildung 6.18 (b) für die Messungen am dritten Probekörper bei Kurve LSt 30 (100 %) gut zu erkennen.

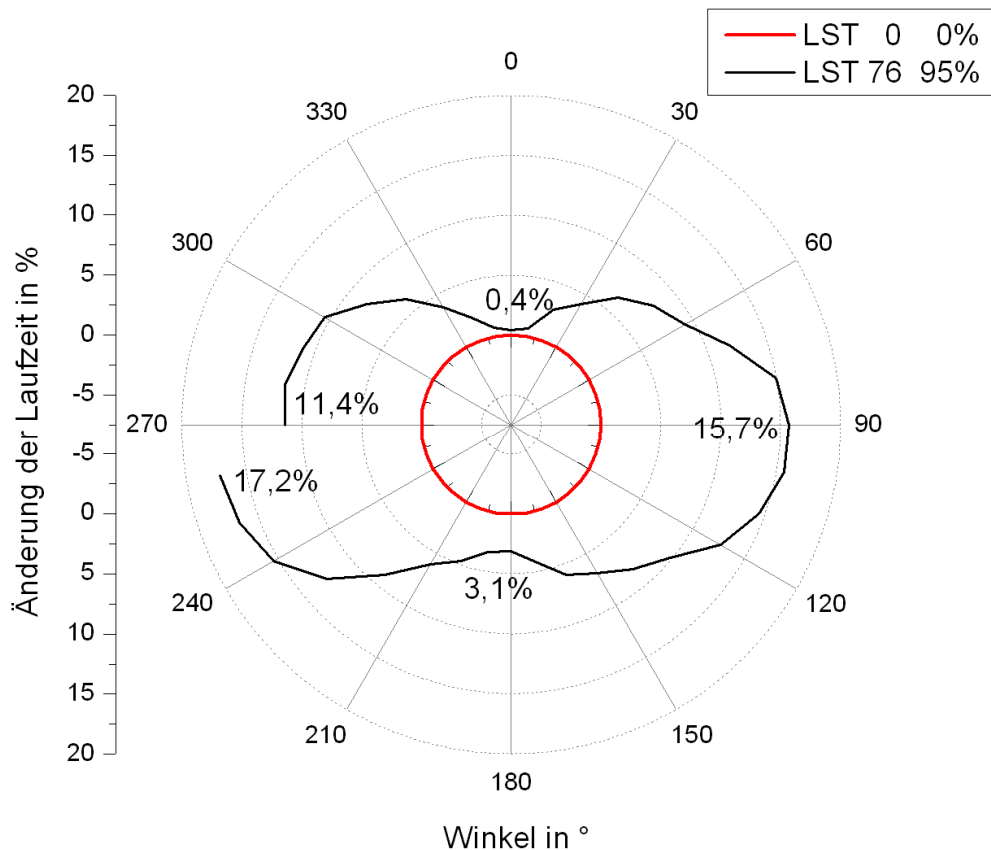


Abbildung 6.29: Polardiagramm der Messung bei LSt 0 (0 %, rot) und der letzten vor dem Bruch LSt 76 (95 %, schwarz); gemessen mit dem Laservibrometer am 4.PK; eingetragen ist die Änderung der Laufzeit in % beim jeweiligen Winkel.

Wie gezeigt werden konnte, haben die Effekte der Schallgeschwindigkeitsänderung unter Last einen zeitabhängigen Anteil. Aufgrund der Beobachtung dieser Problematik bei Versuchen, die ein anderes Ziel verfolgten, können daraus lediglich folgende Schlüsse gezogen werden:

- Eine zeitabhängige Komponente der Schallgeschwindigkeitsänderung ist auch bei der Belastung zu beobachten
- Bei den hier vorliegenden Messungen über einen kurzen Zeitraum kann ein zeitabhängiger Laufzeitanstieg (Schallgeschwindigkeitsreduktion) nur für Laststufen kurz vor dem Bruch beobachtet werden.
- Dieser Effekt ist verantwortlich für die in anderen Messungen beobachtete Differenz zwischen der 260°- und 270°-Richtung bei hohen Lasten.

Inwieweit dieser zeitabhängige Anteil auch bei geringeren Lasten auftritt, ist zu untersuchen, ebenso wie die Ausprägung in Abhängigkeit von der Messrichtung. Der in Abbildung 6.29 beschriebene Probekörper war im Gegensatz zu den bisher beschriebenen mit Bewehrung ausgeführt. Im nachfolgendem Kapitel soll auf den Einfluss unterschiedlicher Betone auf den Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung unter Last eingegangen werden.

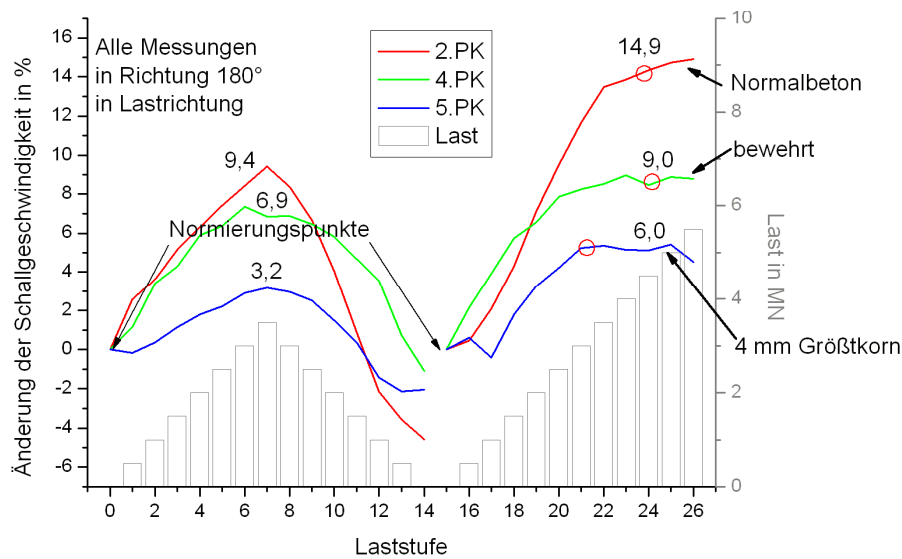
6.3 Vergleich mit anderen Betonen

Bisher wurde der Effekt exemplarisch am dritten Probekörper beschrieben. Der dritte Probekörper war unbewehrt und mit einem Beton der Festigkeitsklasse C30/37 mit einem Größtkorn von 16 mm hergestellt worden. Im baupraktischen Alltag werden jedoch die meisten Betonbauteile bewehrt ausgeführt. Am vierten Probekörper, einem mit oberflächennaher Querbewehrung (Bügel) ausgeführten, soll die Übertragbarkeit der Effekte auf Stahlbeton untersucht werden. Des Weiteren wurde am fünften Probekörper das Größtkorn auf 4 mm begrenzt. Anstelle des dritten Probekörpers, dessen Schallgeschwindigkeitsverläufe in den Kapiteln zuvor bereits diskutiert worden sind, ist der zweite Probekörper als Normalbetonprobekörper abgebildet. Der zweite Probekörper ist nach dem gleichen Mischungsentwurf wie der dritte Probekörper hergestellt worden, jedoch aus einer anderen Charge. Zwischen Herstellung und Versuchdurchführung lag beim zweiten Probekörper die größte Zeitspanne von einem Jahr und vier Monaten. Die genaue Zusammensetzung der Probekörper ist in Kapitel 3.3 beschrieben.

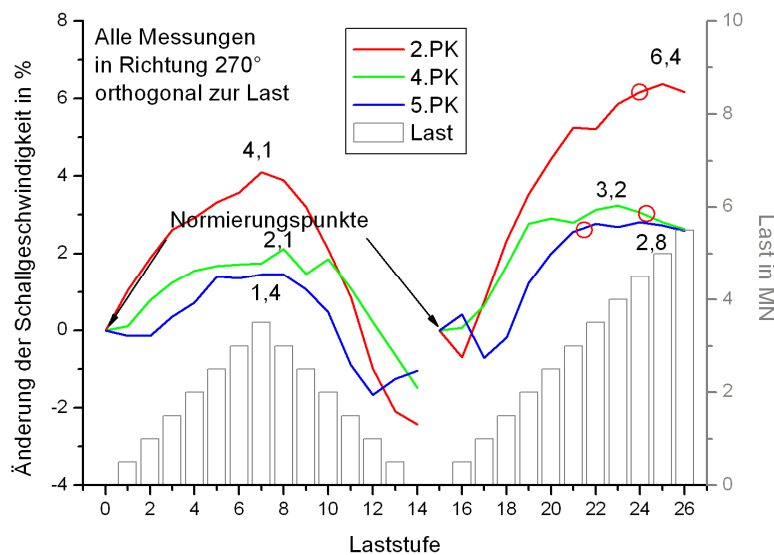
Zum Vergleich der Probekörper wurde in Abbildung 6.30 die Änderung der Schallgeschwindigkeit für den identischen Belastungsverlauf bis zu einer Last von 5,5 MN im zweiten Lastzyklus, sowohl für die Lastrichtung (a) als auch für die orthogonale Richtung (b) eingetragen. Die Bruchlasten der Probekörper waren: 2.PK 9 MN, 3.PK 7 MN (7.5 MN maximale Last), 4.PK 9,5 MN und 5.PK 6,5 MN. Da die Kurvenverläufe vom zweiten, vierten und fünften Probekörper weitestgehend den zuvor am dritten Probekörper (Normalbeton) gemessenen Kurvenverläufen entsprechen, soll auf eine erneute Diskussion der schon zuvor beobachteten Effekte verzichtet und nur auf Unterschiede eingegangen werden.

Der auffälligste Unterschied für beide gezeigten Richtungen ist, dass trotz ähnlicher Kurvenform und ähnlichem Verhalten die Beträge der Schallgeschwindigkeitsänderung erheblich variieren. Dieses fällt Besonders für den zweiten Probekörper auf, der mit 9,4 % im ersten Lastzyklus in Lastrichtung die Werte der anderen Probekörper bei weitem übersteigt. Der dritte Probekörper erreichte bei identischer Rezeptur 4 % (Abbildung 6.30 (a)).

In der Ausbildung der Kurvenform sind leichte Unterschiede zu beobachten: Im Bereich 0 sinkt am zweiten und vierten Probekörper die Schallgeschwindigkeit nicht ab (Ausnahme 2.PK orth. 2.LZ). Dieses ist für den vierten Probekörper für alle Richtungen und die weiteren, hier nicht dargestellten Lastzyklen ebenfalls zu registrieren. Beim Vergleich des zweiten und vierten Probekörpers, weisen beide ähnliche Bruchlasten auf (9 MN zu 9,5 MN), jedoch hält der Schallgeschwindigkeitsanstieg für den zweiten Probekörper wesentlich länger an. Beim vierten Probekörper setzt das Abflachen des Anstieges früher ein und demzufolge wird das Maximum im zweiten Lastzyklus früher erreicht; dieses konnte auch bei den Ultraschallwellen in Kapitel 6.2.3.2 beobachtet werden.



(a)



(b)

Abbildung 6.30: Änderung der Schallgeschwindigkeit im 1.LZ und 2.LZ bis zu einer Last von 5,5 MN für den 2.PK (unbewehrt, rot), 4.PK (bewehrt, grün) und 5.PK (4 mm Größtkorn, blau) über der Laststufe abgetragen mit der jeweiligen Belastung in MN; (a) für die Lastrichtung und (b) orthogonal zur Lastrichtung. Die roten Kreise markieren 50% der Bruchlast. Die eingetragenen Werte sind die maximale Änderung der Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Lastzyklus.

Die verschiedenartig zusammengesetzten Probekörper unterscheiden sich hinsichtlich:

- Im Bereich 0 zeigen der zweite und vierte Probekörper kein Absinken der Schallgeschwindigkeit (Ausnahme 2.PK orth. 2.LZ).
- Die erreichte Schallgeschwindigkeitsänderung ist für den zweiten Probekörper trotz gleicher Rezeptur wie beim dritten Probekörper wesentlich größer.
- Beim vierten Probekörper (bewehrt) geht der Gradient des Geschwindigkeitsanstieges früher zurück und das Schallgeschwindigkeitsmaximum wird früher erreicht.

Der Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung zeichnet sich deutlich auch bei verändertem Größtkorn ab und kann ebenfalls auf bewehrten Beton übertragen werden.

6.4 Abschlussbetrachtungen zu den Messungen

In diesem Kapitel ist die Änderung der Schallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher Randbedingungen anhand einer Diskussion der Messergebnisse beobachtet und die beobachteten Effekte am Ende eines jeden Kapitels in Stichpunkten zusammengefasst worden. In der Ausbildung der Kurvenform konnte ein ähnliches Verhalten für alle gemessenen Probekörper beobachtet werden.

Die Einteilung in die Bereiche 0-III zeigte, dass in den jeweiligen Lastbereichen I-III ein ähnliches Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung bei unterschiedlichen Probekörpern vorliegt. Für Bereich 0 konnte kein einheitliches Verhalten festgestellt werden. Das Verhalten im Bereich 0 variiert je nach Probekörper und verwendeter Prüfmaschine, unterschiedlichste Gründe können, die hier jedoch nicht näher bestimmt werden konnten, dafür vorliegen: eine Vermutung wären die Bedingungen der Lasteinleitung. Derartige Bedingungen sind abhängig vom Versuchsaufbau und der Durchführung und sind damit vom beobachteten Effekt getrennt zu betrachten. Aus diesem Grund wird der Bereich 0 nicht weiter betrachtet und im weiteren Verlauf wird ausschließlich von den drei Bereichen I-III gesprochen.

Trotz ähnlicher Kurvenformen sind die erreichten Beträge der Schallgeschwindigkeitsänderungen äußerst unterschiedlich und variieren, wie im Kapitel zuvor gezeigt, zwischen zwei Probekörpern gleicher Rezeptur, aber unterschiedlicher Herstellungsladung, deutlicher als zwischen den hier verwendeten Probekörpern unterschiedlicher Rezeptur. Eine Aussage über quantitative Effekte konnte daher mit Ausnahme bei den Wellenarten nicht getroffen werden. Bei den Ultraschallwellen konnte eine deutlichere Ausprägung des Effekts für niedrigere Frequenzen beobachtet werden, jedoch kein fester Faktor z.B. zwischen den beiden Ultraschall-Messfrequenzen von 25 kHz und 100 kHz.

In diesem Kapitel sind die Mechanismen, die zu den Schallgeschwindigkeitsänderungen führen, nicht näher betrachtet und untersucht worden. Dieses soll im folgenden Kapitel geschehen. Die Einteilung in die drei Bereiche I-III soll auch bei der Suche nach den Wirkmechanismen beibehalten werden. So zeigt der Schallgeschwindigkeitsanstieg in Bereich I Ähnlichkeiten zu dem in Kapitel 1.2 genannten akustoelastischen Effekt, der in Kapitel 7.2 näher untersucht wird. Im Versuchsteil konnten schon erste Hinweise für Ursachen, so z. B. der Zusammenhang von drastischer Schallgeschwindigkeitsreduktion im Bereich III und dem sichtbaren Entstehen von Rissen, als Indiz für einen Wirkmechanismus gewertet werden. Inwieweit Risse und insbesondere Mikrorisse für die Reduktion der Schallgeschwindigkeit verantwortlich sind, soll mit einem hierzu erfolgten Nachfolgeexperiment in Kapitel 7.3 analysiert und nachgewiesen werden. Doch zunächst sollen im nächsten Kapitel die beobachteten Effekte dahingehend mit der linearen Theorie abgeglichen werden, ob Erklärungsansätze mit dieser Theorie zu finden sind.

7 Analyse der Ursachen des Effekts

7.1 Vergleich des gemessenen Effekts mit der linearen Theorie

Der in dieser Arbeit beschriebene Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung unter Druckbelastung soll, als theoretischer Versuch, mithilfe der Gleichungen der linearen Theorie zur Ausbreitungsgeschwindigkeit aus Kapitel 2.2 auf seine mögliche Ursache hin untersucht werden. Da das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit auf den Oberflächenwellen lag, soll anhand von Gl. 7.1 diskutiert werden, welche Parameter die beobachteten Effekte auslösen könnten und ob eine Erklärung nach der linearen Theorie möglich ist. Die Näherungsgleichung für die Rayleighwellengeschwindigkeit (V_R) setzt sich aus (Gl. 2.9 und Gl. 2.7 wie folgt zusammen.

$$V_R \approx \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)} \frac{0,87+1,12\nu}{1+\nu}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Die drei in Gl. 7.1 verwendeten Materialparameter E-Modul (E), Querdehnzahl (ν) und Dichte (ρ) sind in dieser Gleichung nicht mit der Spannung oder Dehnung korreliert. Sowohl Querdehnzahl als auch E-Modul sind jedoch abhängig vom Belastungszustand des Betons, Beton zeigt im Gegensatz zu linear elastischen Stoffen ein wesentlich komplexeres Verhalten. Im Allgemeinen wird für die Berechnung der Schallgeschwindigkeit nach Gl. 7.1 ein linear elastisches Verhalten vorausgesetzt und davon ausgegangen, dass die drei Parameter konstant sind. Im Folgenden soll jedoch der Einfluss aufgrund der bekannten Änderungen der drei Parameter unter Lasteinfluss auf die Schallgeschwindigkeit untersucht werden (siehe Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2). Durch Einsetzen und Variation eines der Materialparameter bei Konstanthalten der anderen beiden Parameter soll nach Gl. 7.1 der mögliche Einfluss auf die spannungsbedingte Änderung der Oberflächenwellengeschwindigkeit hin untersucht werden. Zur Klärung, ob die lineare Theorie zur Deutung des in dieser Versuchsserie beobachteten Verhalten geeignet ist, soll im Anschluss verglichen werden, ob die so festgestellten Änderungen mit dem Effekt - einem Anstieg der Schallgeschwindigkeit bis ca. 50 % der Bruchlast im Bereich I und die rapide Schallgeschwindigkeitsabnahme ab 70-80 % in Bereich III - übereinstimmen.

E-Modul:

Der dynamische E-Modul ergibt sich aus der Steigung der Spannungs-Dehnungslinie. Für die Schallgeschwindigkeitsbestimmung ist der dynamische E-Modul ausschlaggebend. Genormte Werte werden nach modifizierten Regeln bestimmt. Wie in Abbildung 7.1 erkennbar ist, nimmt der E-Modul mit zunehmender Stauchung d. h. mit steigender Spannung ab. Demzufolge müsste bei konstanter Querdehnzahl und Dichte die Schallgeschwindigkeit nach Gl. 7.1 bei abnehmenden E-Modul ebenfalls abnehmen. Nach den hier geführten Versuchen nimmt die Schallgeschwindigkeit jedoch bis ca. 50 % der Druckfestigkeit zu.

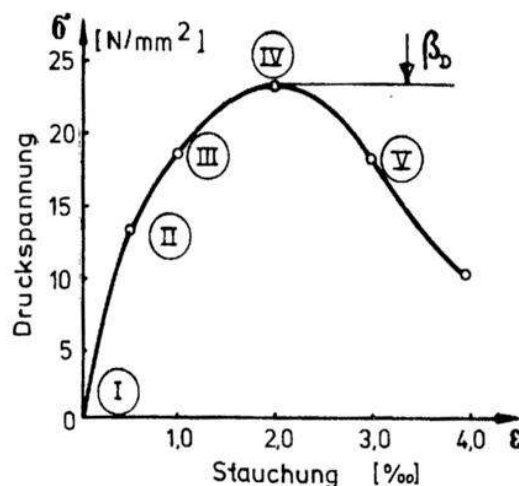


Abbildung 7.1: Spannungs-Dehnungs-Diagramm von Beton [Hil81].

Dichte:

Wie in Abbildung 7.2 abzulesen ist, nimmt bis zum Umkehrpunkt bei 80 % der Bruchlast das Volumen bei konstanter Masse ab und demzufolge die Dichte zu. Im Bereich bis 80 % der Bruchlast hätte der Anstieg der Dichte eine Schallgeschwindigkeitsabnahme zufolge. Nach dem Umkehrpunkt nimmt das Volumen bei steigender Belastung zu und damit die Dichte ab damit sollte nach Gl. 7.1 die Schallgeschwindigkeit nach der linearen Theorie zunehmen. Das gemessene Verhalten der Oberflächenwellengeschwindigkeit ist im Bereich vor und nach dem Umkehrpunkt jedoch genau entgegengesetzt. Zudem liegt die Änderung der Dichte im zehntel Promillebereich und damit wäre ihr Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit um ein Vielfaches kleiner als der beobachtete Effekt.

Querkontraktion:

Im Bereich I (bis 50 % der Bruchlast), in dem die Druckspannungen zur Stauchung weitgehend linear sind, ist im Diagramm ebenfalls ein linearer Zusammenhang von Volumenabnahme und Druckspannung abgetragen. Verhalten sich beide Zusammenhänge linear ist damit die Querdehnzahl konstant und hat demnach in diesem Bereich keinen Einfluss auf eine Schallgeschwindigkeitsänderung. Im Bereich III (>80 % der Bruchlast) geht die Volumenabnahme ($\nu < 0,5$) bei steigender Belastung bis 100 % der Festigkeit zur Volumenkonstanz über ($\nu = 0,5$), d. h. nach dem Umkehrpunkt steigt die Querdehnzahl an. (Der nachfolgende Bereich der Volumenzunahme wird nicht betrachtet, da bei lastgesteuerten Versuchen der Bruch vorher erfolgt und Gleichung (Gl. 7.2) nur bis $\nu = 0,5$ definiert ist). Ein

Ansteigen der Querdehnzahl bedeutet nach Gl. 7.1 ein Absinken der Rayleighwellengeschwindigkeit für Spannungen, die 80 % der Bruchspannung überschreiten. Die Änderung der Rayleighwellengeschwindigkeit durch den Querkontraktionsanstieg ist den beobachteten Effekten entsprechend und könnte als Erklärung dienen.

Wird in Gl. 7.1 der gesamte für die Querkontraktion zu erfassende Bereich mit ν von 0 bis 0,5 eingesetzt (Der definierte Bereich geht von -1 bis 0,5 [Rayl85], ein Materialverhalten, dass eine negative Querdehnzahl hervorruft ist hier nicht gegeben), ergibt sich ein maximaler Schallgeschwindigkeitsunterschied von -10 %, für einen realistischen Bereich für ν von 0,2 bis 0,5 ergibt sich eine Änderung von -6,5%. Der in dieser Arbeit gemessene Effekt ist jedoch größer.

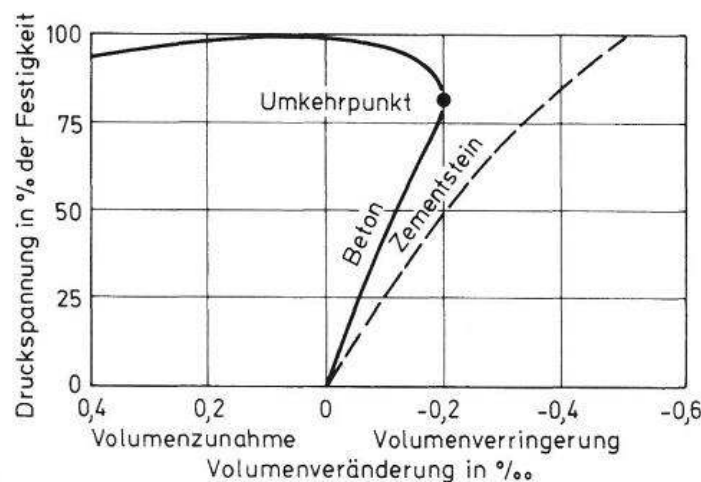


Abbildung 7.2: Druckspannung in % der Festigkeit über der Volumenänderung in ‰ für Beton und Zementstein [Grüb01].

Mit der linearen Theorie kann der Schallgeschwindigkeitsanstieg bis 50 % der Bruchspannung im Bereich I mit keinem Parameter erklärt werden, dieses ist ebenfalls für die anderen Wellenarten der Fall. Im Bereich III konnte der Rückgang der Schallgeschwindigkeit aufgrund der bekannten lastabhängigen Änderungen von E-Modul und Dichte nicht nachvollzogen werden. Lediglich die Änderung der Querdehnzahl zeigt beim Einsetzen eine Geschwindigkeitsminderung, aber trotz einsetzen der maximal möglichen Werte entspricht dieses nicht dem Umfang des gemessene Effekts. Im nächsten Kapitel soll die lineare Theorie verlassen und auf den akustoelastischen Effekt als Erklärungsansatz für den Bereich I eingegangen werden.

7.2 Akustoelastischer Effekt

Der Einfluss von Spannungen in einem Körper auf die Schallgeschwindigkeit wurde bereits theoretisch und experimentell nachgewiesen und als akustoelastischer Effekt an Stoffen mit elastischem Verhalten, vornehmlich Metallen [Hauk97], beschrieben. Die im vorherigen Kapitel 7.1 verwendeten linear elastischen Gleichungen mit den Konstanten E-Modul, Dichte und Querkontraktion können diesen Zusammenhang jedoch nicht wiedergeben.

Die lineare Theorie kann sowohl mit den zuvor genannten Konstanten oder auch mit den Lamé-Konstanten μ und λ beschrieben werden:

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Mit:

V_L [m/s] - Longitudinalwellengeschwindigkeit;

$\mu; \lambda$ [Pa] - Lamékonstanten;

Die Lamékonstanten können u.a. zur Querkontraktion und dem E-Modul in Beziehung gesetzt werden:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{Gl. 7.4})$$

Wird diese Theorie um die Spannungsabhängigkeit erweitert, müssen weitere Konstanten in Form der Murnaghan-Konstanten l , m und n , zur Beschreibung des Materialverhaltens eingeführt werden.

Für einen einaxialen Spannungszustand in einem elastischen Stab mit einem nicht linearelastischen Materialverhalten kann nach Takahashi et al. [Tak87] die Schallgeschwindigkeit $V_{11}^{\sigma_1}$ in Spannungsrichtung näherungsweise angegeben werden mit:

$$\rho_0 (V_{11}^{\sigma_1})^2 = \rho_0 (V_{11}^0)^2 - \frac{\sigma_1}{E} [(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)] \quad (\text{Gl. 7.5})$$

Mit:

σ_1 - aufgebrachte Spannung

V_{11}^0 - Longitudinalwellengeschwindigkeit im unbelasteten Zustand

$l; m; n$ [Pa] - Murnaghan-Konstanten

und ρ_0 - Ausgangsdichte; ν - Querdehnzahl.

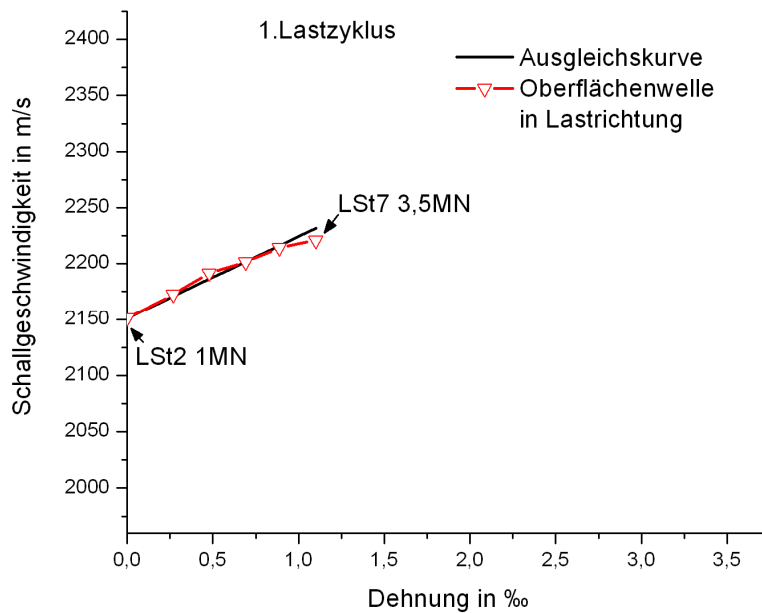
Gl. 7.5 kann umgeschrieben werden zu:

$$V_{11}^{\sigma_1} = \sqrt{(V_{11}^0)^2 - \frac{\sigma_1}{\rho_0 E} [(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)]} \quad \left| : \rho_0 \quad \sqrt{\quad} \right. \quad (\text{Gl. 7.6})$$

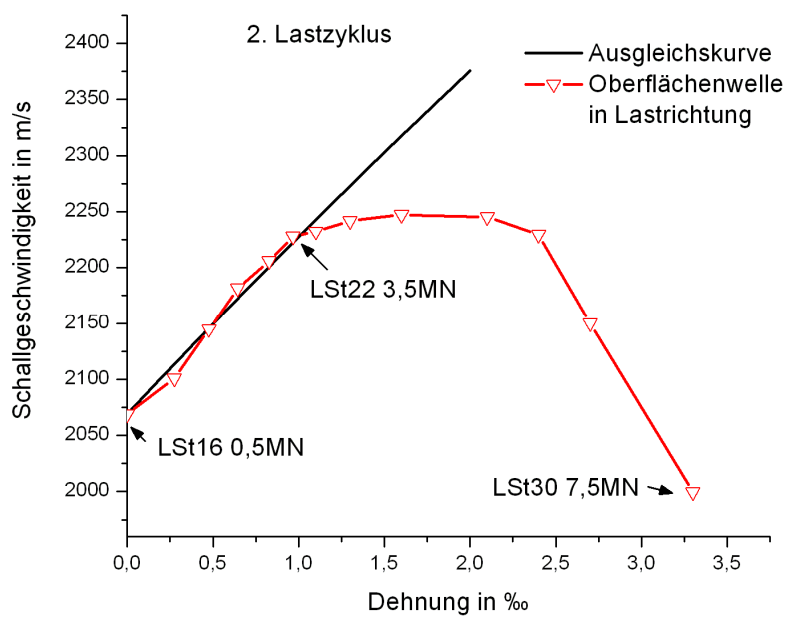
oder nach dem Hookeschen Gesetz umgeformt werden zu:

$$V_{11}^{\sigma_1} = \sqrt{(V_{11}^0)^2 - \frac{\varepsilon}{\rho_0} [(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)]} \quad \left| \frac{\sigma}{E} = \varepsilon \right. \quad (\text{Gl. 7.7})$$

Für die am dritten Probekörper erfolgten Messungen soll abgeglichen werden, ob und in welchem Bereich die Gleichungen für die Akustoelastizität nach der Theorie dritter Ordnung mit den gemessenen Änderungen übereinstimmen. Die Oberflächenwellengeschwindigkeit ist, wie in Kapitel 2.2.3.1 beschrieben, eine Funktion der Longitudinalwellengeschwindigkeit und kann mit (Gl. 2.10) umgerechnet werden. Für die an diesem Probekörper gemessenen Schallgeschwindigkeiten der Oberflächenwelle (Sensorenarray mit $v_L = 2157$ m/s) und der Longitudinalwelle (Ultraschallköpfen So205 mit $v_L = 4321$ m/s) besteht ein Verhältnis von 0,50. Der Bereich 0, wird aufgrund des Absinkens der Schallgeschwindigkeit hier nicht betrachtet und die Betrachtung mit dem Beginn von Bereich I begonnen. Damit muss die Dehnung für den ersten Wert im Bereich I auf null gesetzt werden, um die Gleichungen anwenden zu können. Im Folgenden wird als Einheit der x-Achse die Dehnung (zuvor Laststufe) verwendet, dieses hat mehrere Vorteile: Dem Titel dieser Arbeit folgend wäre die Spannung wünschenswert nur dann müsste nach (Gl. 7.6) zusätzlich der E-Modul für die einzelnen Werte bestimmt werden, dieses kann umgangen werden indem die Spannung und der E-Modul mit der bei allen Versuchen gemessenen Dehnung ersetzt wird, siehe Gl. 7.7. Der erste eingetragene Wert in Abbildung 7.3 (a) ist im ersten Lastzyklus die Messung bei Laststufe 2 mit 1 MN; im zweiten Lastzyklus in Abbildung 7.3 (b) ist es Laststufe 16 mit 0,5 MN. In beiden Lastzyklen wurde jeweils nur die Belastung bis zum Maximum im jeweiligen Lastzyklus betrachtet (LZ1: LSt7 mit 3,5 MN und LZ2: LSt 30 mit 7,5). Sowohl für den ersten als auch den zweiten Lastzyklus wurden nach Gl. 7.7 eine Ausgleichskurve in den Bereich 0-1% der Dehnung gelegt. In diesem Bereich steigt die Schallgeschwindigkeit weitgehend linear über der Dehnung an. Auch die Ausgleichskurve zeigt ein lineares Verhalten und kann in diesem Bereich den Verlauf der Schallgeschwindigkeit gut abbilden. Der abnehmende Gradient der Schallgeschwindigkeit im zweiten Lastzyklus kann jedoch nicht mit der Theorie der Akustoelastizität erklärt werden, da diese nur für einen Bereich bis ca. 30 % der Bruchlast Gültigkeit besitzt.



(a)



(b)

Abbildung 7.3: Mit dem Sensorenarray am 3.PK gemessene Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung (rot) und die nach Gl. 7.7 bestimmte Ausgleichskurve (schwarz) für den ersten (1-3,5MN) (a) und den zweiten Lastzyklus (0,5-7,5 MN) (b) über der Dehnung.

Da die nach der akustoelastischen Theorie bestimmten Schallgeschwindigkeitsverläufe für den hier verwendeten Wertebereich weitgehend linear sind ($V_{11}^0 \gg 1$; ca. 2000-2800 m/s), kann Gl. 7.7 vereinfacht werden, wie u. A. schon bei Hauk [Hauk97] gezeigt, und auf einen linearen Zusammenhang nach Shokouhi [Sho10] in den folgenden Schritten umgeformt werden:

Solange die spannungsinduzierten Änderungen sehr klein sind, kann aus der Taylorreihenentwicklung näherungsweise angenommen werden:

$V_{11}^{\sigma_1^2} = V_{11}^{0^2} + (V_{11}^{\sigma_1} - V_{11}^0)(2V_{11}^0)$ und in Gl. 7.5 eingesetzt werden.

$$\rho_0 V_{11}^{0^2} + \rho_0 (V_{11}^{\sigma_1} - V_{11}^0)(2V_{11}^0) = \rho_0 (V_{11}^0)^2 - \frac{\sigma_1}{E} [(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)] \quad (\text{Gl. 7.8})$$

$$\rho_0 + 2\rho_0 \frac{(V_{11}^{\sigma_1} - V_{11}^0)}{V_{11}^0} = \rho_0 - \frac{\sigma_1}{E} \left[\frac{(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)}{V_{11}^{0^2}} \right] \quad \left| \begin{array}{l} : V_{11}^{0^2} \end{array} \right. \quad (\text{Gl. 7.9})$$

Des Weiteren ist $V_{11}^0 = V_L$ die Longitudinalwellengeschwindigkeit und kann mit den Lamé-Konstanten angegeben und ersetzt werden.

$$\rho_0 + 2\rho_0 \frac{(V_{11}^{\sigma_1} - V_{11}^0)}{V_{11}^0} = \rho_0 - \frac{\sigma_1}{E} \left[\frac{(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)}{\lambda + 2\mu} \rho_0 \right] \quad \left| \begin{array}{l} V_{11}^0 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_0}} \end{array} \right. \quad (\text{Gl. 7.10})$$

$$\frac{V_{11}^{\sigma_1} - V_{11}^0}{V_{11}^0} = -\frac{\sigma_1}{2E} \left[\frac{(7\lambda + 14\mu - 6l) - 2\nu(3\lambda - 6l - 2m)}{\lambda + 2\nu} \right] \quad \left| \begin{array}{l} : \rho_0 \\ : 2 \end{array} \right. \quad (\text{Gl. 7.11})$$

Werden die Querdehnzahl, Lamé- und Murnaghan-Konstanten als dimensionsloser Parameter β_{11} zusammengefasst, so ergibt sich ein einfacher linearen Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeitsänderung und aufgebrachter Spannung.

$$\frac{\Delta V_{11}^{\sigma_1}}{V_{11}^0} = \frac{-\sigma_1}{E} \beta_{11} \quad (\text{Gl. 7.12})$$

Zur Bestimmung des Parameters β eignet sich ein Ersetzen der Spannung und des E-Moduls nach dem Hookeschen Gesetz durch die während des Versuchs gemessene Dehnung.

$$\frac{\Delta V_{11}^{\sigma_1}}{V_{11}^0} = -\epsilon \beta_{11} \quad \left| \begin{array}{l} \epsilon = \frac{\sigma}{E} \end{array} \right. \quad (\text{Gl. 7.13})$$

In Abbildung 7.4 sind die Bereiche, für die der Parameter β im ersten und zweiten Lastzyklus bestimmt werden soll, grün markiert. Die verwendeten Laststufen weisen in beiden Lastzyklen jeweils die gleiche Belastung von 1 MN, 1,5 MN und 3 MN auf. Diese Belastung entspricht einer Last in Prozent der Maximallast von 13 % bis 26 %, sodass der Bereich oberhalb von 30 % unberücksichtigt bleibt.

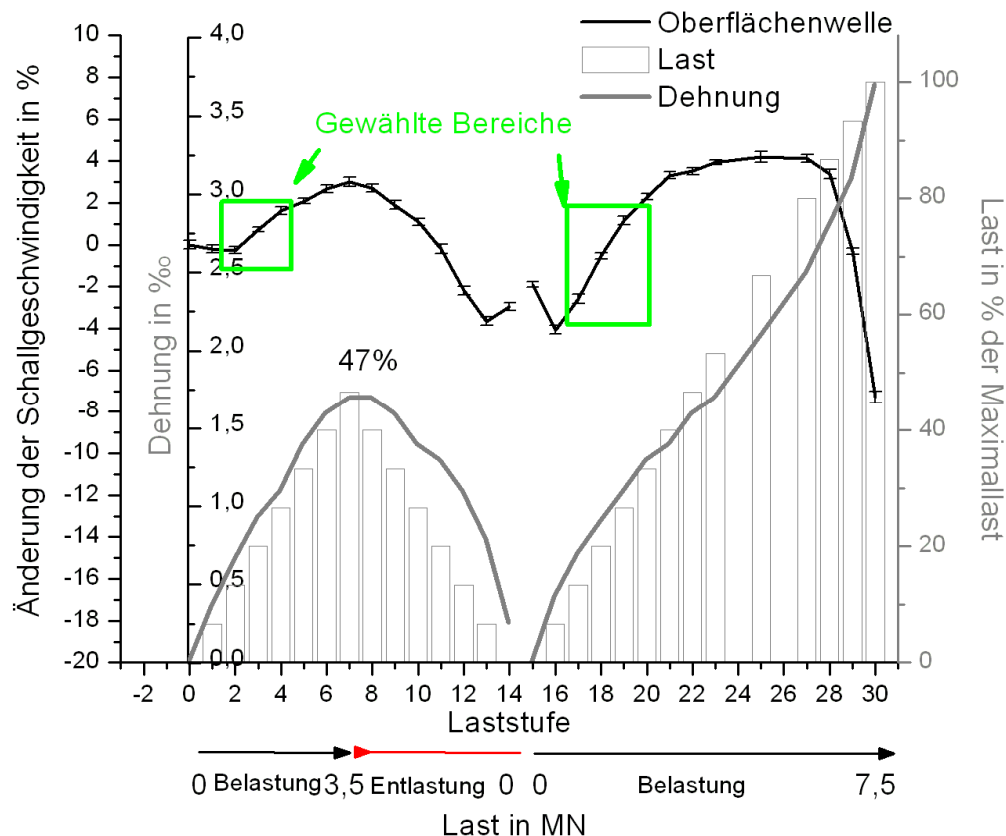


Abbildung 7.4: Änderung der Schallgeschwindigkeit gemessen mit dem Sensorarray am 3.PK in Lastrichtung (schwarz) mit den zur Bestimmung von β grün markierten Bereichen, sowie die Dehnung in Promille (grau) und die jeweilige Last in Prozent der Maximallast eingezeichnet über der jeweiligen Laststufe.

In Abbildung 7.5 sind für die drei Messwerte (1.LZ oben und 2.LZ unten) die Ausgleichsgeraden und der quadratische Fehler eingetragen. Der quadratische Fehler ist für die hier gewählten Beispiele sehr gering. Der dimensionslose Parameter β wurde für den ersten Lastzyklus bestimmt zu:

$$\beta_{1.LZ} = 39,48$$

$$\beta_{2.LZ} = 106,02$$

Obwohl beim ersten Lastzyklus 47 % der Maximallast nicht überschritten worden sind, unterscheidet sich β deutlich zwischen dem ersten und zweiten Lastzyklus. Dieses ist auch an der größeren Steigung in Abbildung 7.5 zu erkennen.

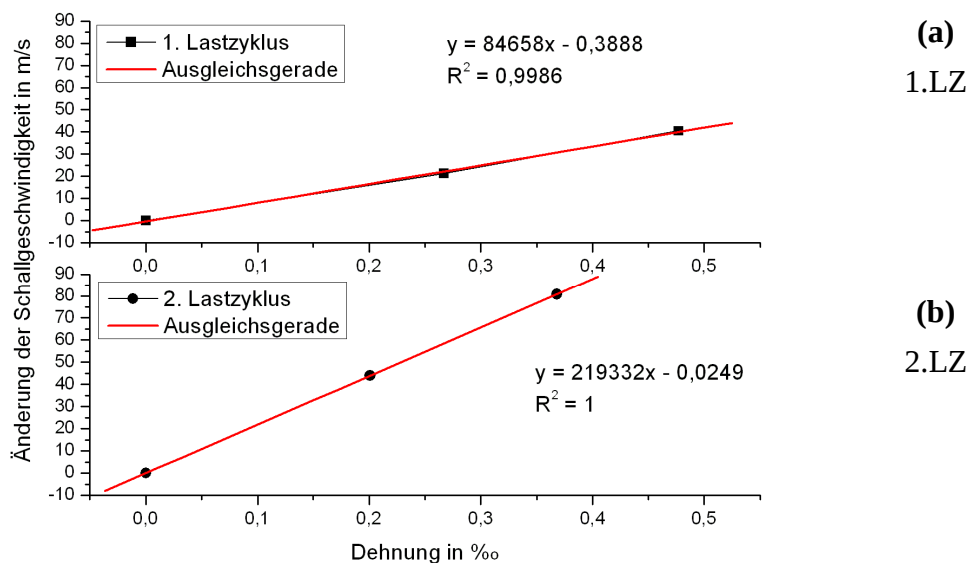


Abbildung 7.5: Für den (a) ersten und (b) zweiten Lastzyklus sind die gemessenen Werte der Schallgeschwindigkeitsänderung (schwarz) und die Ausgleichsgerade (rot) über der Dehnung eingetragen. Ergänzt wird dieses durch die Bestimmungsgleichungen der Ausgleichsgerade und dem quadratischen Fehler.

Zum Einen bedeutet dies, dass die Änderung der Oberflächenwellengeschwindigkeit in einem Bereich zwischen 10-30 % der Maximallast, in einem linear Zusammenhang mit der Dehnung und, solange der E-Modul konstant ist nach dem Hookeschen Gesetz $\sigma = E \cdot \varepsilon$ auch mit der Spannung steht. Ist dieser Bereich überschritten und demzufolge die Schallgeschwindigkeitssteigerung nicht mehr proportional zur Dehnung bzw. aufgetragenen Last, können die zuvor verwendeten Gleichungen nicht mehr angewendet werden.

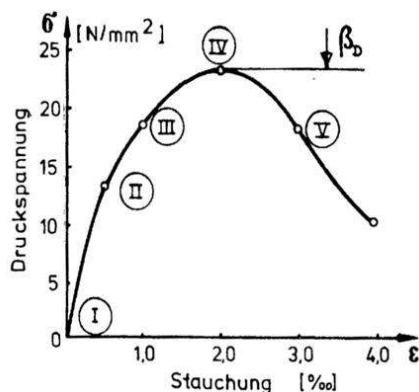
Zum Anderen ist der akustoelastische Effekt in der Literatur als reversibel beschrieben. Der deutliche Unterschied des Parameters β in den beiden Lastzyklen, zeigt jedoch, dass sich an Beton eine irreversible Materialänderung, auch bei einer Belastung bis 47 %, einstellen. Es muss also getrennt werden zwischen einem von der Akustoelastizität hervorgerufenen Komponente und einen durch eine Materialänderung hervorgerufenen Komponente. Die Akustoelastizität kann demnach nur einen Teil des Effekts widerspiegeln.

Die Abnahme der Steigung der Schallgeschwindigkeit ab ca. 50 % der Bruchlast und das rapide Absinken ab ca. 80 % kann hiermit nicht erklärt werden. Die Theorie der Akustoelastizität gilt demnach vorallem für linear elastische Materialien und ist demzufolge für Beton nur eingeschränkt und bei insbesondere bei höheren Lasten nicht einsetzbar.

Wie in Kapitel 6.2.5 festgestellt werden konnte, war die Reduktion der Schallgeschwindigkeit bei einer Rissbildung am deutlichsten; im nächsten Kapitel soll dieser Zusammenhang von Rissentstehung und Schallgeschwindigkeitsänderung mit Hilfe eines Nachfolgeversuchs experimentell nachgewiesen werden.

7.3 Mikrorisse

Neben den angesprochenen sichtbaren Rissen, die wie in diesem Fall bei hohen Lasten auftreten, sind bereits im unbelasteten Zustand Mikrorisse im Beton vorhanden. Weitere Rissentstehung und -wachstum finden mit zunehmender Last statt. Dieses Risswachstum wurde z. B. von [Hil81] in unterschiedliche Entstehungs- und Wachstumsphasen unterteilt, deren Phasen in Abbildung 7.6 beschrieben sind.



Bereich I: Wegen der Behinderung des Schwindens von Zementstein durch die Zuschläge entsteht ein innerer Spannungszustand, der schon im unbelasteten Beton zu Mikrorissen in der Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung führt.

Bereich II: Bei etwa 50 % von β_D wachsen die Risse entlang der Kontaktzone weiter.

Bereich III: Bei etwa 80 % von β_D treten auch in der Zementsteinmatrix Risse auf.

Bereich IV: Kleinere Risse vereinigen sich. Es entstehen größere Risse kritischer Länge. Es tritt spontanes Risswachstum auf und die Bildung einer Bruchfläche ist möglich.

Bereich V: Durch Verringerung der Belastung kann die Bruchflächenbildung verhindert werden. Die Mikrorisse wachsen langsam weiter. Das führt zum Anwachsen der Betonverformung bei sinkender Spannung.

β_D – einachsige Druckfestigkeit für Beton

Abbildung 7.6: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [Hil81] und Phasen der Rissbildung [BSKII03].

Bei jeder Rissentstehung und jedem Risswachstum wird die freigesetzte Energie als elastische Welle abgeleitet. Diese Ereignisse können an der Probekörperoberfläche gemessen werden, dazu müssen während der Mikrorissentstehung, d.h. während der Belastung und einen gewissen Zeitraum danach, die Ereignisse registriert werden können. Da die Ereignisse eine geringe Amplitude aufweisen, muss ein hochsensibler Sensor verwendet werden (Der Versuchsaufbau ist in Kapitel 4.7 beschrieben). Je mehr nicht durch Mikrorisse hervorgerufene Geräusche an der Probekörperoberfläche registriert werden, desto ungenauer wird trotz der Trennung von Mikrorissereignissen und anderen Geräuschen, die Erkennung der tatsächlichen Mikrorissereignisse. Störgeräusche, die zumeist eine wesentlich höhere Amplitude als die Mikrorissereignisse aufweisen, können durch Überlagerung die zu zählenden Mikrorissereignisse überdecken und nicht mehr erkennbar machen. Dieses ist insbesondere der Fall, wenn die Störgeräusche dauerhaft auftreten, wie z. B. durch eine Druckprüfmaschine. Die richtungsabhängigen Messungen an großen Probekörpern sind an der BAM nur in der GPM möglich, diese emittiert jedoch zu viele Störgeräusche. Aus diesem Grund wurde ein Folgeversuch mit einem kleineren Probekörper und einer weniger Geräusche emittierenden Druckprüfmaschine durchgeführt.

In Abbildung 7.7 ist die gemessene Schallgeschwindigkeitsänderung in Prozent zusammen mit der Anzahl der akustischen Ereignisse (blau) eingetragen. Zur besseren Darstellung des

Zusammenhangs zwischen Anzahl der Ereignisse und dem Absinken der Schallgeschwindigkeit ist die rechte Achse, die Anzahl der Ereignisse, invertiert mit dem größten Wert nach unten abgebildet. Der Belastungsverlauf ist unterhalb in Prozent der Bruchlast eingezeichnet. Jeder Belastungsschritt entspricht 50 kN (3,78 %; 1,25 MPa), jeder Entlastungsschritt 100 kN (7,55 %; 2,5 MPa). Die Zeit, in der Ereignisse registriert werden konnten, begann mit dem Beginn der Lasterhöhung zur jeweiligen Laststufe. Die Ereignisse wurden solange aufgezeichnet bis über einen Zeitraum von 10 s keine weiteren Ereignisse mehr eintraten, wobei die Mindest-Registrierdauer 45 s nach Erreichen der Laststufe betrug. Es ging in diesem Versuch nicht darum, die exakte Anzahl der Ereignisse zu zählen, da während der Schallgeschwindigkeitsmessungen und der Belastung aufgrund der eingetragenen Schalls nicht gemessen werden konnte, sondern vielmehr um eine Abschätzung des generellen Risswachstums bei der jeweils erreichten Last in Abhängigkeit von der durchlaufenen Lastzyklenzahl.

Die Anzahl der Ereignisse (blau) steigt mit der beginnenden Belastung steil an bis zum Erreichen des Lastmaximums des ersten Lastzyklus bei 23 % der Bruchlast. Die hohe Anzahl an Ereignissen ist hier, wie schon in Kapitel 4.7 beschrieben, auf das Eindringen von Unebenheiten an der Kontaktfläche von Probekörper zu Lasteinleitungsplatte zurückzuführen. Die Schallgeschwindigkeit liegt nach dem ersten Lastzyklus deutlich (-0,86 %) unter dem Wert vor dem Lastzyklus. Mit Überschreiten der Last des ersten Lastzyklus (markiert mit einer roten Strichlinie) werden im zweiten Lastzyklus wieder Ereignisse registriert, mit dem Ergebnis, dass die Schallgeschwindigkeit am Ende des zweiten Lastzyklus erneut niedriger liegt als zu Beginn (-0,52 %). Die maximale Last im dritten Lastzyklus (23 %) übersteigt nicht die vorangegangene Maximallast (38 %), es werden nur wenige Ereignisse registriert und die Absenkung der Schallgeschwindigkeit fällt geringer aus (-0,33 %). Im vierten Lastzyklus wird die vorangegangene Maximallast (2.LZ 38 %) geringfügig mit 45 % überschritten, exakt zu diesem Zeitpunkt werden erneut Ereignisse registriert, die Schallgeschwindigkeit unterschreitet erneut die Schallgeschwindigkeit zu Beginn des Messzyklus (-0,32 %).

Im fünften Lastzyklus werden ab der zuvor erreichten Maximallast von 45 % eine hohe Anzahl von 28 Ereignissen bis zur maximalen Last von 60 % registriert; die Schallgeschwindigkeit steigt in diesem Bereich nicht mehr weiter an und beginnt trotz Laststeigerung an sinken. Die Schallgeschwindigkeitsdifferenz zwischen Beginn und Ende des fünften Lastzyklus fällt mit -1,68 % besonders deutlich aus. Der sechste Lastzyklus überschreitet mit 42 % nicht die zuvor erreichte Maximallast. Es werden nur wenige Ereignisse registriert ($n = 7$) und das Sinken der Schallgeschwindigkeit fällt mit -0,19 % gering aus. Ab der Maximallastüberschreitung im siebten Lastzyklus wird wieder eine hohe Anzahl von Ereignissen registriert und der Schallgeschwindigkeitsanstieg geht an diesem Punkt direkt in ein Gefälle über. Die maximal erreichte Schallgeschwindigkeit entspricht in etwa der im fünften Lastzyklus erreichten. Die Differenz zwischen Anfangswert und Endwert der Schallgeschwindigkeit beträgt -1,03 %. Im achten Lastzyklus treten erste Ereignisse schon ab 38 % der Bruchlast und damit vor dem Erreichen der vorangegangenen Maximalbelastung auf. Ist die vorangegangenen Maximallast von 72 % überschritten, nimmt die Anzahl rapide zu. Die Schallgeschwindigkeit steigt bis 50 % der Bruchlast steil an um dann bis zum Erreichen der vorangegangenen Maximallast verhalten weiter zu steigen. Das erreichte Schallgeschwindigkeitsmaximum liegt mit -0,13 % nur knapp unter dem des beim Lastmaximum in Lastzyklus 7 gemessenen Werts, aber deutlich unter dem im gleichen

Lastzyklus erreichten Maximalwert (-1,9 %). Mit der rapide zunehmenden Ereignisanzahl beim Überschreiten der vorangegangenen Maximalbelastung nimmt die Schallgeschwindigkeit rasch ab. Bei einer Last von 87 % der Bruchlast wurden die Sensoren abgebaut und der Probekörper bis zum Bruch belastet.

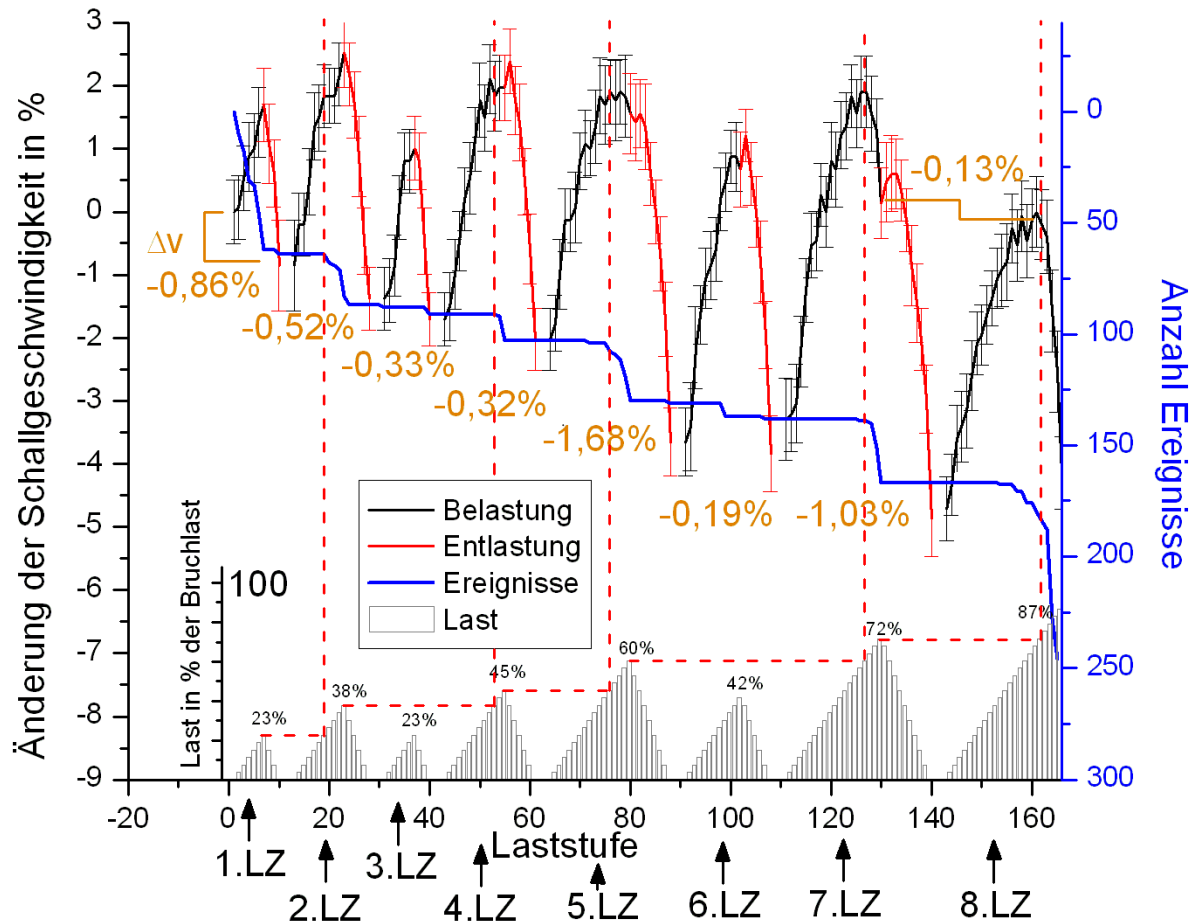


Abbildung 7.7: Am AEPK mit einem modifizierten Sensorenarray in Lastrichtung gemessene Änderung der Schallgeschwindigkeit in % (linke Achse), Anzahl der akustischen Ereignisse (rechte Achse blau; größter Wert unten), unten Belastungsverlauf in Prozent der Bruchlast über der Laststufenanzahl.

In der eben geführten Diskussion ist die Differenz der Schallgeschwindigkeit vor und nach der Belastung mit den akustischen Ereignissen, die während dieser Belastung auftraten, verglichen worden. In Abbildung 7.8 werden diese Informationen zusammengefasst und in komprimierter Form derart gezeigt, dass: Die zum Ende des jeweiligen Lastzyklus aufgetretenen Schallgeschwindigkeitsminderung wird über der im dazugehörigen Lastzyklus erreichten Maximallast abgetragen (schwarze Kurve) und analog dazu werden alle bis zum Ende des jeweiligen Lastzyklus aufgetretenen Ereignisse summiert (blaue Kurve) und ebenfalls über der im jeweiligen Lastzyklus erreichten Maximallast als Kurve aufgetragen. Für beide Kurven wurden die Werte für die Lastzyklen, die nicht die Belastung der Vorangegangenen überschritten (3.LZ und 6.LZ) weggelassen, da dieses einer eindeutigen Zuordnung der Werte zur x-Achse widersprechen würde; die in diesen nicht abgetragenen Lastzyklen erzielten Werte wurden für die Werte der folgenden Lastzyklen berücksichtigt.

Wie in Abbildung 7.8 an der Schallgeschwindigkeitskurve (schwarz) zu erkennen ist, geht mit dem Ansteigen der erreichten Maximalbelastung des jeweiligen Lastzyklus ein Absinken der Schallgeschwindigkeit einher, ab 40 % der Bruchlast verstärkt sich dieses Absinken. Die Kurve für die Anzahl der Ereignisse (blau) sinkt mit zunehmender Last mit zunehmendem Gefälle ab. Eine Ausnahme bildet der Abschnitt bis zum ersten Lastzyklus, dieser fällt durch die Ereignisse, hervorgerufen durch die Eindrückungen von Unebenheiten zu Beginn der Belastung, steiler aus als der Folgende.

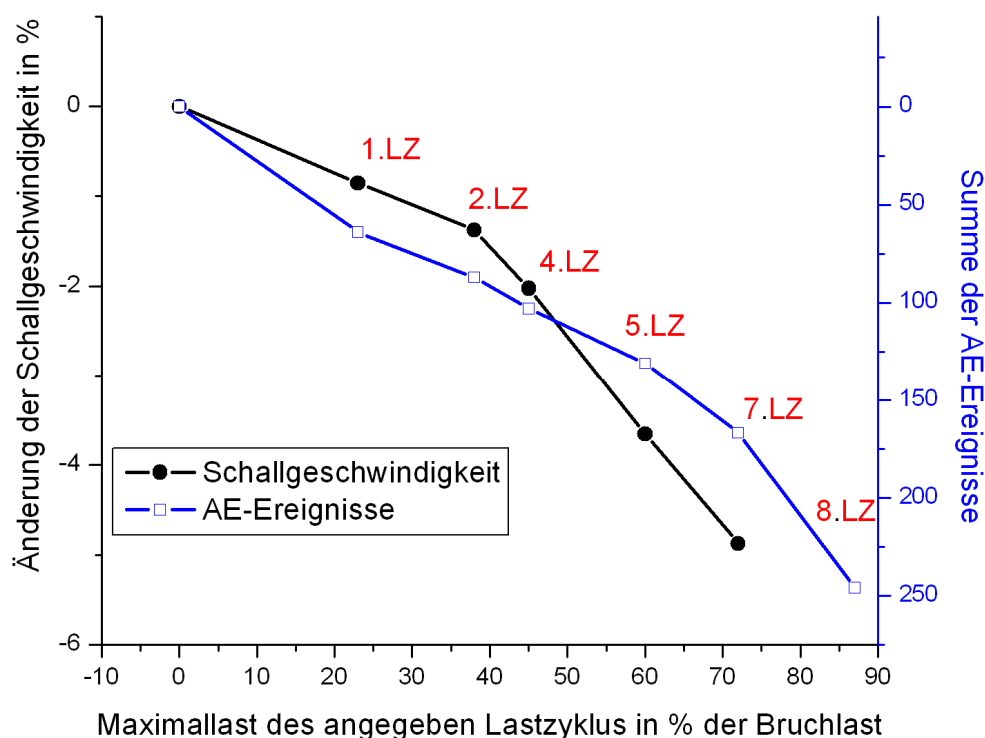


Abbildung 7.8: Schallgeschwindigkeitsänderungen gemessen im lastfreien Zustand nach dem angegebenen Lastzyklus (schwarz) und die Anzahl der AE-Ereignisse (blau) bis zum angegebenen Lastzyklus (rot) über der maximal im LZ erreichten Last in % der Bruchlast.

Zwischen der maximalen Last eines Messzyklus und der Anzahl der Ereignisse, sowie der Schallgeschwindigkeitsminderung kann damit ein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Diese beiden eben festgehaltenen Zusammenhänge sollen nun direkt miteinander verknüpft und untersucht werden. In Abbildung 7.9 ist die Änderung der Schallgeschwindigkeit im lastfreien Zustand über der Anzahl der Ereignisse einschließlich der des jeweiligen Lastzyklus eingetragen. Für diese Kurve kann mit steigender Anzahl der Ereignisse eine Reduktion der Schallgeschwindigkeit mit zunehmendem Gefälle beobachtet werden, d. h. für jeden Lastzyklus geht ein Absinken der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Ereignisanzahl einher. In Abbildung 7.9 sind die Messungen vom 3.LZ und 6.LZ, die nicht die vorangegangene Belastung erreichten, im Gegensatz zu Abbildung 7.8 mit eingetragen, da eine Änderung der Einheit der x-Achse dieses zulässt. Die Werte sind eindeutig zuordenbar.

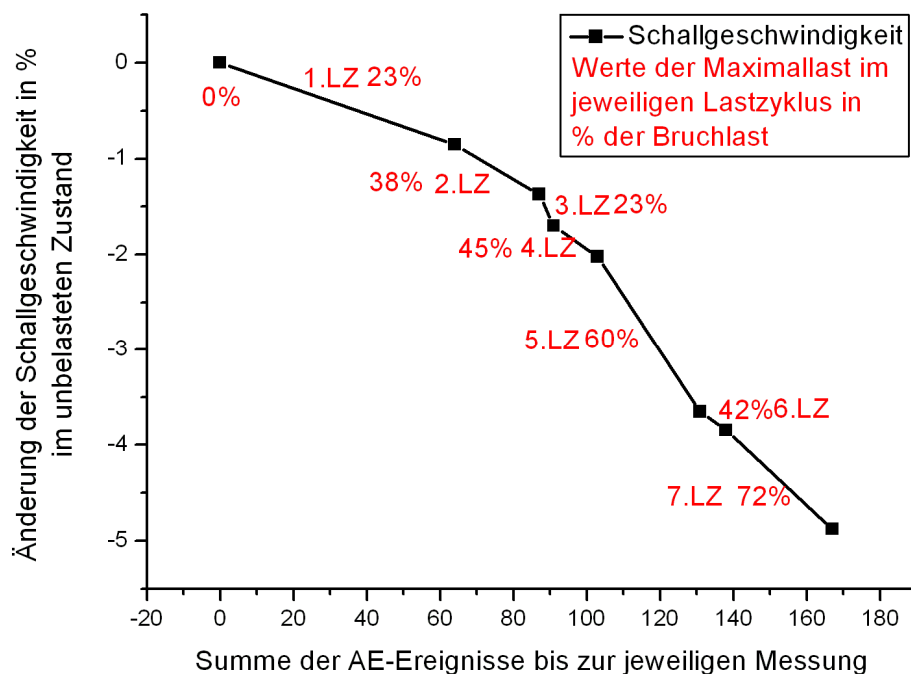


Abbildung 7.9: Schallgeschwindigkeitänderung im lastfreien Zustand nach dem angetragenen Lastzyklus über der Anzahl der AE-Ereignisse bis zur jeweiligen Messung (rot). Ebenfalls in rot ist die maximal erreichte Last in Prozent der Bruchlast eingetragen.

Die in diesem Kapitel diskutierten Messergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Mikrorissereignisse und der Reduktion der Schallgeschwindigkeit. Dieses kann in folgenden Punkten zusammengefasst werden.

Im unbelasteten Zustand:

- Wie in Abbildung 7.7 zu erkennen ist, verhält sich die Differenz zwischen der Schallgeschwindigkeit vor und nach dem Durchlaufen eines Messzyklus proportional zur Anzahl der Rissereignisse.
- Die Reduktion der Schallgeschwindigkeit im unbelasteten Zustand geht mit der vorangegangenen Ereigniszahl, d. h. der Rissanzahl einher.

Während der Belastung:

- Mit einsetzendem Risswachstum beim Erreichen der vorangegangenen Maximallast nimmt die Steigung der Schallgeschwindigkeit ab und in Lastbereichen über ca. 60 % geht der Anstieg in eine Reduktion der Schallgeschwindigkeit über.
- Mit dem deutlich zunehmenden Risswachstum im Bereich über 70 % - 80 % der Bruchlast geht ein rapides Absinken der Schallgeschwindigkeit einher.

Die hohe Lastzyklenzahl in diesem Versuch erlaubt zudem eine weitere Aussage zur Schallgeschwindigkeitsänderung bei einer Wiederbelastung:

- Ist der Körper zuvor in den Bereich von über 60-70 % belastet worden und eine Schallgeschwindigkeitsreduktion hat bereits stattgefunden, kann bei einer weiteren Belastung der Wert der Schallgeschwindigkeit nicht über den bei der vorangegangene Maximalbelastung erreichten ansteigen.

Die irreversible Auswirkung des Risswachstums auf die Schallgeschwindigkeit kann mit der zuletzt genannten Aussage gut belegt werden.

Experimentell konnte in diesem Kapitel das Risswachstum als verantwortliches Element für die Schallgeschwindigkeitsreduktion herausgearbeitet werden. Das Risswachstum dominiert den in Kapitel 7.2 beschriebenen akustoelastischen Effekt ab Lasten von ca. 50 % der Bruchlast deutlich und führt zu einem verminderten Anstieg und einem darauffolgendem Absinken der Schallgeschwindigkeit.

8 Fazit

8.1 Ziel und Umsetzung

Das Ziel dieser Arbeit bestand in der Beobachtung, Dokumentation und Ursachenanalyse der „Spannungsabhängigkeit von Eigenschaften elastischer Wellen im Beton“. In einer Versuchsserie sollte dieses insbesondere anhand der lastabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderung erfolgen.

Zur Auswahl geeigneter Versuchsaufbauten und Messmethoden für die Versuchsserie wurde ein Vorversuch durchgeführt, bei dem verschiedene Messprinzipien auf ihre Eignung sowie unterschiedliche Wellenarten auf ihre Lastsensitivität untersucht worden sind. Hierbei stellte sich die Oberflächenwelle im Hörschallbereich als eine der lastsensitivsten heraus. Beim Messprinzip von Oberflächenwellen liegt ein entscheidender Vorteil darin, dass das Entlanglaufen der Oberflächenwelle an der Probekörperoberfläche in beliebige Richtungen beobachtet werden kann. Dank der aus diesen Erkenntnissen entwickelten Versuchsaufbauten konnte eine Beobachtung der spannungsabhängigen Eigenschaftsänderungen in Richtungsabhängigkeit erfolgen. Die in der bisherigen Literatur für ähnliche Messungen am häufigsten beschriebene Ultraschalllongitudinalwelle wurde zum Vergleich zusätzlich gemessen. Dank speziell gefertigter Lasteinleitungsplatten konnten die Ultraschallwellen mit Frequenzen von 25 kHz und 100 kHz in Lastrichtung gemessen werden.

8.2 Beobachtungen und Dokumentation

Mit diesen Versuchsaufbauten wurde an mehreren sowohl bewehrten als auch unbewehrten Probekörpern gemessen. Die bei unterschiedlichen Lastszenarien beobachteten Änderungen der Schallgeschwindigkeit wurden dokumentiert und für die verschiedenen Einflussfaktoren – Vorbelastung, Überlastung, Betonart und zeitlicher Verlauf - zusammengefasst.

Die wichtigsten beobachteten Zusammenhänge zwischen Last- und Schallgeschwindigkeitsänderung seien hier kurz vorgestellt:

Die Änderung der Schallgeschwindigkeit zeichnet einen charakteristischen Kurvenverlauf über der Belastung ab. Sowohl für Oberflächenwellen als auch für Ultraschallwellen ist in Lastrichtung je nach Belastungsgrad ein typisches Verhalten zu beobachten, dieses kann in drei Bereiche unterteilt werden:

- Bereich I bis ca. 50 % der Bruchlast: Mit der Last steigt in diesem Bereich die Schallgeschwindigkeit mit abnehmenden Gradienten an.
- Bereich II ca. 50-80 % der Bruchlast: Die Schallgeschwindigkeit ist in diesem Bereich nur geringen Änderungen unterworfen und geht von einem verhaltenen Anstieg in eine Schallgeschwindigkeitsreduktion über.
- Bereich III ab ca. 80 % der Bruchlast: Die Schallgeschwindigkeit sinkt rapide ab.

Aufgrund des typischen Verhaltens der Schallgeschwindigkeit je nach Auslastungsgrad konnte in den Versuchen die Bruchlast vorhergesagt werden.

Das kennzeichnende Verhalten zeigt unter Zunahme der von der Lastrichtung abweichenden Messrichtung eine richtungsabhängige Ausprägung mit folgenden Unterschieden für die orthogonal zur Lastrichtung geführten Messungen:

- Bereich I: Der Gradient des Schallgeschwindigkeitanstieges ist geringer als in Lastrichtung. Damit bildet sich in diesem Bereich eine zunehmende Schallgeschwindigkeitsdifferenz aus, die ein geringeres Schallgeschwindigkeitsmaximum zufolge hat.
- Bereich II: Das Maximum ist früher erreicht und damit setzt die Schallgeschwindigkeitsreduktion früher ein. In diesem Bereich ist aufgrund der geringen Änderungen kaum eine Zunahme der Schallgeschwindigkeitsdifferenz zu beobachten.
- Bereich III: In diesem Bereich setzt die rapide Schallgeschwindigkeitsreduktion in orthogonaler Richtung früher und deutlicher ein. Die Schallgeschwindigkeitsdifferenz nimmt deutlich zu.

Anhand der richtungsabhängigen Ausbreitungseigenschaften kann die Richtung des Lastabtrages bestimmt werden. Wird in einem Polardiagramm die Schallgeschwindigkeitsänderung bei konstanter Last über der Messrichtung abgetragen, so zeigt sich der richtungsabhängige Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit in einer visuell auffälligen elliptischen Kurvenform. Die größere Achse entspricht der Lastrichtung.

Der Einfluss der vorangegangenen Lasthistorie wurde mit unterschiedlichen Belastungsverläufen untersucht und weitere Zusammenhänge identifiziert. Bei der Entlastung konnte festgestellt werden:

- Wird an einem Probekörper auch bei einer Entlastung gemessen, so liegen die Schallgeschwindigkeiten bei gleicher Last unter denen der Belastung.
- Die Schallgeschwindigkeit im unbelasteten Zustand nach der Entlastung ist niedriger als im unbelasteten Zustand vor der Belastung.

Bei einer erneuten Belastung, einer Wiederbelastung, zeigen sich folgende Unterschiede:

- Die Schallgeschwindigkeit steigt bei der Wiederbelastung steiler an und dieses besonders deutlich in orthogonaler Richtung.
- Nach dem Erreichen der vorangegangenen Last entspricht das Verhalten der Schallgeschwindigkeit dem Verhalten an einem Probekörper ohne Vorbelastung.

Wird ein Probekörper derart belastet, dass die Last nur kurze Zeit gehalten werden kann, ohne dass ein Bruch erfolgte, so rufen die dabei entstandenen Schädigungen charakteristische Änderungen der Schallgeschwindigkeit hervor:

- Die Schallgeschwindigkeit ist nach der Überlastung deutlich reduziert.
- Bei erneuter Belastung zeigt die Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung eine ähnliche Charakteristik; die durch die Überlastung entstandene Schallgeschwindigkeitsreduktion bleibt jedoch bestehen.
- In orthogonaler Richtung findet bei einer Wiederbelastung nach einer Überlastung, im Gegensatz zu einer Wiederbelastung ohne vorangegangene Überlastung, kein Anstieg der Schallgeschwindigkeit statt.

Des Weiteren konnte während der Versuche ein zeitabhängiger Einfluss auf die Schallgeschwindigkeit beobachtet werden:

- Nach einer Entlastung aus höheren Lastbereichen steigt die Schallgeschwindigkeit im entlasteten Zustand mit abnehmenden Gradienten an.
- Nur ein Teil der Schallgeschwindigkeitsreduktion ist damit reversibel.
- Bei Belastungen nahe der Bruchlast, oberhalb der Dauerstandsfestigkeit, konnte trotz des konstant Haltens der Last (für ca. 20 min) eine Schallgeschwindigkeitsreduktion bei zunehmenden Dehnungen (Kriechen) beobachtet werden.

In dieser Versuchsserie wurden sowohl Probekörper mit gleicher als auch unterschiedlicher Rezeptur sowie ein mit Bewehrung ausgeführter Probekörper miteinander verglichen. Dieser Vergleich führte zu folgenden Feststellungen:

- Der Effekt bildet sich an allen Probekörpern trotz unterschiedlicher Rezeptur oder Bewehrung mit ähnlicher Kurvenform aus.

Die hier beschriebenen Änderungen der Schallgeschwindigkeiten wurden anhand der Laufzeitverschiebung des ersten Minimums bestimmt. Es konnte anhand von B-Bildern gezeigt werden, dass die Schallgeschwindigkeitsänderung nicht nur das erste Minimum der Oberflächenwelle betrifft, sondern das gesamte folgende Signal, inklusive dem ausklingenden Signal, der sogenannten Coda. Die Auswertemethode der Coda-Wave-Interferometrie kann ebenfalls zum Nachweis der Schallgeschwindigkeitsänderung eingesetzt werden; im Gegensatz zu den hier geführten Messungen ist dabei aber keine Zuordnung der Änderung zu den einzelnen Wellentypen möglich. Die Auswertemethode wurde ebenfalls für die hier gemessenen Versuchsdaten angewendet und ist u. a. in [Sho10b] veröffentlicht worden.

8.3 Ursachenanalyse

Die gefundenen und beschriebenen Effekte wurden auf Ihre Ursachen hin untersucht. Hierzu wurde zunächst geprüft, ob sich mit der bekannten linearen Theorie Erklärungsansätze finden lassen. Die lineare Theorie konnte jedoch den Zusammenhang von Schallgeschwindigkeitsänderung und Belastung definitionsgemäß nicht abbilden.

Wird diese Theorie um die Spannungsabhängigkeit erweitert, müssen weitere Materialparameter, wie die Murnaghan-Konstanten, zur Beschreibung eingeführt werden. Da in gewissen Grenzen ein lineares Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung vorlag, konnte die Theorie auf einen linearen Zusammenhang vereinfacht und sämtliche Konstanten zum dimensionslosen Parameter β zusammengefasst werden. Diese Gleichung bildet das Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung in dem Bereich 10 - 30 % der Bruchlast gut ab. Der sowohl für die Erst- als auch Wiederbelastung bestimmte Parameter β fällt unterschiedlich aus, dieses ist gleichbedeutend mit einer irreversiblen Materialeigenschaftsänderung. Der akustoelastische Effekt ist jedoch als reversibel beschrieben worden, womit ein anderer Mechanismus für den irreversiblen Anteil verantwortlich sein muss.

In einem weiteren Belastungsversuch wurden sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch die Rissentstehung mit Hilfe des Akustische-Emissions-Verfahren im Beton gemessen.

Beim Vergleich der Schallgeschwindigkeit vor und nach einer Belastung zeigte sich ein weiterer Zusammenhang:

- Je höher die Anzahl an gezählten Rissen während eines Lastzyklus ist, desto größer ist die Schallgeschwindigkeitsreduktion.
- Steigt die Anzahl an Rissen im Bereich III deutlich an, geht damit eine rapide Schallgeschwindigkeitsreduktion einher.

Neben der durch Risse verursachten Schallgeschwindigkeitsminderung ist im Umkehrschluss ein Schließen von Rissen mit einer Schallgeschwindigkeitssteigerung verbunden; Untersuchungen in diese Richtung wurden von Berthaud [Bert91] unternommen. Genau dieses Zusammendrücken der im Beton auch ohne Belastung vorhandenen Risse findet in Lastrichtung statt, und zwar in der Richtung, in der auch die größten Schallgeschwindigkeitssteigerungen gemessen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte eine Vielzahl an neuen Erkenntnissen über den Zusammenhang von Schallgeschwindigkeitsänderung und Spannungsbelastung von Beton festgestellt werden.

Besonders die verwendeten Oberflächenwellen ermöglichten im Vergleich zu bisher üblichen durchschallenden Messungen erweiterte Einsatz- und Aussagemöglichkeiten. Die flexiblen und vielfältigen Möglichkeiten der Sensorpositionierung bei Oberflächenwellen zeichneten sich hierfür verantwortlich. Dank dieser Flexibilität der Oberflächenwellenmessungen war eine richtungsabhängige Betrachtung der Eigenschaftsänderungen elastischer Wellen an Beton möglich.

Die in dieser Arbeit reichlich gefundenen qualitativen Aussagen zum Verhalten der Schallgeschwindigkeitsänderung konnten nicht durch quantitative Aussagen hinterlegt werden. Es konnte zwar gezeigt werden, dass die hier verwendeten Oberflächenwellen die sensitivsten für eine Spannungsbelastung von den betrachteten Wellen sind und sich die niederfrequenten Ultraschallwellen mit 25 kHz ebenfalls sensitiver als die 100 kHz Wellen verhalten, jedoch konnten keine festen Faktoren zwischen den einzelnen Wellenarten und Frequenzen oder den unterschiedlichen Richtungen gefunden werden.

8.4 Ausblick

Die Kenntnisse über den Zusammenhang von Schallgeschwindigkeit und Spannungsbelastung konnten in dieser Arbeit qualitativ beschrieben werden. Ein Punkt weiterer Forschung bleibt hier die Quantifizierbarkeit der Messergebnisse. Anhand der typischen Kurvenverläufe konnte der Auslastungsgrad nachvollzogen werden, jedoch kann aus einem gemessenen Wert der Schallgeschwindigkeit nicht auf die aktuell vorliegende Druckspannung im Beton oder auf dessen Auslastungsgrad geschlossen werden.

Die Anzahl an Parameter, die einen Einfluss auf die Eigenschaften von Beton haben, wie Rezeptur, Zuschläge, Verarbeitung und Nachbehandlung, werden aufgrund der Vielfalt des Betons eine Quantifizierung des Zusammenhangs zu Sisyphos-Arbeit ausufern lassen. Für die Schallgeschwindigkeiten an Beton kann nur ein Wertebereich angegeben werden; alle bisherigen Klassifizierungen der Schallgeschwindigkeiten zu Eigenschaften an Beton konnten

nicht allgemein gültig gefasst werden. Dementsprechend wird das Ableiten einer Druckspannung aus einem einzelnen gemessenen Schallgeschwindigkeitswert ein Wunsch bleiben. Die quantitative Ausprägung des Effekts scheint aus den eben genannten Gründen schwierig, wenn bedacht wird, dass schon in dieser Versuchserie die Beträge der Schallgeschwindigkeit bei einem Beton aus dem gleichen Werk, bei gleichen Zuschlägen und bei gleicher Rezeptur, wie in dieser Arbeit gezeigt, um mehr als das Doppelte differieren. Zwischen der Herstellung und der Prüfung der beiden Probekörper bestand in diesem Fall eine erhebliche zeitliche Differenz, auch dieser Einfluss des Alters des Betons kann zu den unterschiedlichen Materialien einen zusätzlichen Einfluss haben.

Ist demnach die direkte Zuordnung einer Eigenschaft zu einem Schallgeschwindigkeitswert fraglich, könnten im Gegensatz dazu vergleichende Messungen erfolgversprechend sein, die das typische Verhalten und die typische Kurvenform nutzen. Der deutliche Schallgeschwindigkeitsunterschied nach einer Überlastung könnte zur Identifizierung von zerstörten Teilen einer Betonstruktur dienen, da an bestehenden Strukturen immer Bereiche geringer Auslastung dem Ingenieur bekannt sind und diese mit den hochbelasteten Bereichen verglichen werden können. Neben den Untersuchungen zu einem Zeitpunkt könnte ein Monitoring, d. h. eine dauerhafte Überwachung interessante Aufschlüsse geben, hier kann der Ausgangszustand mit dem zeitlichen Verlauf der Schallgeschwindigkeitsänderung verglichen werden. Des Weiteren sind Messungen bei Probelastungen denkbar, da hier die Schallgeschwindigkeit auf den Ausgangszustand bezogen werden kann und dann anhand der gemessenen Kurvenform weitere Rückschlüsse, wie in dieser Arbeit geschehen, gezogen werden können.

Die Betrachtung der spannungsabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderung und den nichtlinearen Ausbreitungseigenschaften elastischer Wellen in Beton zeigen eine Vielzahl an Möglichkeiten, um neue Verfahren im Rahmen der Zerstörungsfreien Prüfung zu entwickeln. Des Weiteren konnten im Rahmen dieser Versuchsserie nicht nur Effekte in Bezug zur Ausbreitungsgeschwindigkeit bei einer Spannungsbelastung, sondern ebenso Effekte hinsichtlich der Amplitude und der Frequenz je nach Last, z. B. eine deutliche Frequenzverschiebungen der gemessenen Welle, aufgezeigt werden. Eine weitere Untersuchung der Spannungsabhängigkeit von Eigenschaften elastischer Wellen erscheint damit lohnend.

Anhang

Begriffseinführung

Schallgeschwindigkeit	Bezeichnet in dieser Arbeit die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elastischen Wellen in einem Körper, auch Körperschall genannt.
Impakt-Echo-Verfahren	Methode der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen bei der durch einen mechanischen Impakt eine resonante Frequenz im Bauteil angeregt wird, welche zur Bauteildicke in Beziehung steht. Der Frequenzbereich dieses Verfahrens deckt sich mit dem Hörschallbereich.
Zeitbereich	Ein Signal liegt im Zeitbereich vor, wenn das Signal als Funktion der Zeit abgetragen wird. Alle in dieser Arbeit gemessenen Signale wurden im Zeitbereich aufgezeichnet.
Frequenzbereich	Ein Signal kann als Summe von unterschiedlich frequenten Sinus- und Cosinusschwingungen aufgefasst werden. Werden die Intensitäten dieser Sinus- und Cosinusschwingungen über der Frequenz aufgetragen liegt, das Signal im Frequenzbereich vor.
FFT	Schnelle (Fast)-Fourier-Transformation ist ein Algorithmus zur Überführung eines Signals aus dem Zeit- in den Frequenzbereich.
Filter	Filter sind Schaltungen, Algorithmen oder Körpereigenschaften die ein Signal in Abhängigkeit von der Frequenz in seiner Amplitude und Phase ändern. Ein Signal kann sowohl im Zeitbereichbereich als auch im Frequenzbereich gefiltert werden.
Hochpassfilter	Lässt nur die Anteile eines Signals oberhalb einer definierten Grenzfrequenz durch, z. B. zum Entfernen der Stromnetzfrequenz.
Tiefpassfilter	Lässt nur die Anteile eines Signals unterhalb einer definierten Grenzfrequenz durch, z. B. zum Entfernen eines Rauschens.
Gleitender Mittelwert	Ein Wert im Signal zum Zeitpunkt t wird aus dem Mittelwert der umgebenden Messwerte berechnet. Für den Zeitpunkt $t+1$ werden die zur Mittelwertbildung heranzuziehenden Messwerte ebenfalls um 1 verschoben. Ein gleitender Mittelwert weist damit die Eigenschaft auf ein Signal zu glätten und kann als Tiefpassfilter im Zeitbereich gedeutet werden.
Wichtung	Der Einfluss eines Wertes auf das Ergebnis entspricht der Wichtung. So können Teile eines Signals hervorgehoben oder vermindert werden. Hierzu können z. B. Funktionen, auch Fensterfunktionen genannt, wie Rechteck-, Dreieck-, Hanning-, etc. verwendet werden.

Signal-zu-Rauschverhältnis	Verhältnis der Amplitude des Rauschens zu der des Nutzsignals. Im Allgemeinen wird ein Verhältnis von 6 dB (2:1) als ausreichend für eine Laufzeitbestimmung anerkannt.
Kaisereffekt [Kais50]	Ein (metallisches) Material gibt erst dann wieder Geräusche ab, wenn es über die vorangegangene Belastung hinaus belastet wird.
Eingangsgröße	Messgröße (hier Zeit), aus der die Ergebnisgröße (Schallgeschwindigkeit) berechnet wird, z. B. die Zeit des Durchgangs des Minimums an einem Messpunkt. Wird eine abweichende Eingangsgröße (z. B. Zeit des Maximums) verwendet, wird damit auch die Ergebnisgröße falsch bestimmt.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AE	Akustische-Emission
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
C xx/xx	Festigkeitsklasse von Beton nach DIN 1045-1
FFT	Schnelle-Fourier-Transformation
Gl.	Gleichung
GPM	Groß-Prüfmaschine
IE	Impakt-Echo
LSt	Laststufe
LVib	Laservibrometer
LZ	Lastzyklus
MZ	Messzyklus
orth.	orthogonal zur Lastrichtung
PK	Probekörper
SA	Sensorenarray
SASW	Spectral Analysis of Surface Waves
senk, in	in Lastrichtung
US	Ultraschall
ZfP	zerstörungsfreie Prüfung
ZS	Zwei-Sensoren
β_b	einachsige Druckfestigkeit für Beton, nur verwendet in Abbildung 7.6

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Ggf. Einheit
A	Amplitude, hier in der zur Auslenkung proportionalen Größe Volt	m, V
D	Kugeldurchmesser	m
E	E-Modul	MN/m ²
f	Frequenz	Hz
f _{max}	maximal auswertbare Frequenz	
h	Fallhöhe	m
l, m, n	Murnaghan-Konstanten	Pa
$\mu; \lambda$	Lamé-Konstanten	Pa
R	Reflexionsfaktor	
ρ	Dichte	g/cm ³
T	Schwingdauer	s
t, Δt	Zeit und Zeitdifferenz	s
T _r	Transmissionsfaktor	
V	Schallgeschwindigkeit	m/s
V _L	Longitudinalwellengeschwindigkeit	m/s
V _R	Rayleighwellengeschwindigkeit	m/s
V _T	Transversalwellengeschwindigkeit	m/s
V ⁰ ₁₁	Longitudinalwellengeschwindigkeit in Spannungsrichtung im unbelasteten Zustand	m/s
V ^{σ} ₁₁	Longitudinalwellengeschwindigkeit in Spannungsrichtung im belasteten Zustand	m/s
Z	Wellenwiderstand	kg/m ² s
β	dimensionsloser Parameter zur Zusammenfassung der Lamé- und Murnaghan-Konstanten	
λ	Wellenlänge	m
ε	Dehnung, relative Längenänderung $\varepsilon = \Delta l / l_0$	
ν	Querdehnzahl dimensionslose Größe zum Beschreiben der Querkontraktion $\nu = -\varepsilon_q / \varepsilon$	
φ	Phasenwinkel	rad
ψ	Auslenkung bzw. Elongation, hier in der zur Auslenkung proportionalen Größe Volt	m, V
ω	Kreisfrequenz (ω)	1/s
	Anzahl der Messungen	S
	Abtastrate oder Abtastfrequenz in S/s bzw. Hz	S/s, Hz
	Hilfsmaßeinheit zum Vergleich von zwei Pegeln	dB

Literaturverzeichnis

- Bert91 Berthaud, Y.: Damage Measurements in Concrete Via an Ultrasonic Technique-Part I Experiment, ACI Materials Journal, 1991, 21, S.73-82, 0889-325X.
- Chaix08 Chaix, J.-F., Lillamand, I., Ploix, M.-A., Garnier, V., Corneloup, G.: Study of acoustoelasticity behavior of concrete material under uniaxial compression, Hrsg.: Acoustics 08 Paris: Acoustics 08 Paris, Band 08, Paris, 2008, S.6267,
- Feld07 Feldmann, R.: Untersuchung des Lasteinflusses auf die Laufzeit von Rayleigh Wellen bei Messung mit dem Impact-Echo-Verfahren, Hrsg.: TU-Berlin: Untersuchung des Lasteinflusses auf die Laufzeit von Rayleigh Wellen bei Messung mit dem Impact-Echo-Verfahren, Berlin, 2007,
- Grüb01 Grübl, P., Weigler, H., Karl S.: Hrsg.: Ernst & Sohn Verlag: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2, Berlin, 2001,
- Hauk97 Hauk, V.: Hrsg.: Herfried, H.: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods , 1, Amsterdam, Elsevier, 1997, 0444824766.
- BSKII03 Hillemeier, B.: Die Festbetoneigenschaften, Hrsg.: Fachgebiet Baustoffkunde und Baustoffprüfung: Baustoffkunde, Baustoffprüfung und Bauchemie II Skriptum , Berlin, 2003, S.54,
- Hil81 Hilsdorf, H.: Hrsg.: TH Karlsruhe: Baustofftechnologie (Skriptum), Band II, Karlsruhe, 1981, S.58,
- Kais50 Josef Kaiser: Untersuchungen über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch, Hrsg.: Technischen Hochschule München (TUM): München, 1950,
- Krog06 Kroggel, O., Wilhelm, T.: Stress-Memory of Concrete - ultrasonic Investigations, Hrsg.: Rilem Publications SARL: Proceedings of the 2nd 30 International RILEM Symposium, Band 2nd 30,
- Krau86 Krautkrämer, J+H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall, 5, Berlin, Springer-Verlag, 1986, 3-540-15754-9.
- Nogu01 Noguera, N., William, K.: Ultrasonic Testing of Damage in Concrete under Uniaxial Compression, Hrsg.: American Concrete Institute: ACI Materials Journal, 2001, 98 No.3, S.265-275, 0889-325X.
- Rayl85 Rayleigh, J. W. S.: On waves propagated along the plane surface of an elastic, Proc.Lond.Math.Soc., 1885, 17, S.4-11,

Rich70 Richart, F. E., HALL, J. R., Woods, R. D.: Hrsg.: Prentice Hall: Vibration of Soils and Foundations, Englewood Cliffs New Jersey, Prentice Hall, 1970, 978-0139417160.

Sans97 Sansalone, M.J.; Streett, W.B.: Impact-Echo, 1, Ithaca, N.Y., Bullbrier Press, 1997, 0-9612610-6-4.

Saye90 Sayers, C., Van Munster, J., King, M.: Stress-induced Ultrasonic Anisotropy in Berea Sandstone, int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., 1990, 27 No.5, S.429-436,

Sho10 Shokouhi, P., Zoëga, A., H. Wiggenhauser: Nondestructive Investigation of Stress-Induced Damage in Concrete , Advances in civil engineering , 2010, Article ID 740189, S.1-9, 1687-8094, 1687-8086 .

Sho10b Shokouhi, Parisa; Niederleithinger, Ernst; Zoëga, Andreas; Barner, Andreas; Shokouhi, Parisa; 8.2: Using ultrasonic coda wave interferometry for monitoring stress-induced changes in concrete , Hrsg.: Environmental and Engineering Geophysical Society : 23rd SAGEEP Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (Proceedings) , Band 2010, S.650-654, 1554-8015.

Soko29 Sokolov, S.Y.: About ultrasound vidicon, Elecir. Nachr. Tech. 6, 1929, 6, S.pp. 454–461,

Suar87 Suaris, W, Fernando, V.: Detection of Crack Growth in Concrete from Ultrasonic Measurements, Materials and Structures, 1987, 20, S.214-220,

Tak87 TAKAHASHI, S., MOTEGI R.: Stress dependency on ultrasonic wave propagation velocity, Journal of Material Science, 1987, 22, S.1850-1856, 0022-2461.

Publikationsliste

Veröffentlichungen des Autors zum Themenbereich: „Spannungsabhängigkeit elastischer Wellen in Beton“.

Eine vollständige Publikationsliste des Autors ab 2007 wird in der BAM-Datenbank PUBLICA geführt:

- Zoëga, A., Wiggenhauser, H.:
Propagation time of elastic surface waves on concrete specimens under uniaxial loads
Beitrag zu einem Sammelwerk: NDE/NDT for Highways and Bridges - Structural Materials Technology (SMT) (2008), 161-167; Hrsg.: The American Society for Nondestructive Testing (ASNT)
ISBN 978-1-57117-180-1

- Zoëga, A., Shokouhi, P., Wiggenhauser, H.:
Propagation time of elastic surface waves on concrete specimens under uniaxial loads
Zeitschriftenartikel: Journal of structural engineering 36 (2009) 1, 11-15; Hrsg.:
Structural Engineering Research Centre
ISSN 0970-0137
- Shokouhi, P., Niederleithinger, E., Zoëga, A., Barner, A., Schöne, D.:
Using ultrasonic coda wave interferometry for monitoring stress-induced changes in concrete
Beitrag zu einem Tagungsband: 23rd SAGEEP Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems (Proceedings) (2010), 650-654; Hrsg.: Environmental and Engineering Geophysical Society
ISSN 1554-8015
- Shokouhi, P., Zoëga, A., Wiggenhauser, H.:
Nondestructive evaluation of damage in concrete under uniaxial compression
Beitrag zu einem Sammelwerk: Review of progress in quantitative nondestructive evaluation (AIP Conference Proceedings 1211) 29B (2010) CP 1211, 1525-1532; Hrsg.: American Institute of Physics
ISBN 978-0-7354-0748-0
- Shokouhi, P., Zoëga, A., Wiggenhauser, H.:
Nondestructive Evaluation of the State of Damage in Concrete under Uniaxial Compression
Poster: QNDE- Review of Progress in Quantitative NDE
Kingston, Rhode Island, USA, 26.07.2009 bis 31.07.2009
- Shokouhi, P., Zoëga, A., Wiggenhauser, H.:
Nondestructive investigation of stress-induced damage in concrete
Zeitschriftenartikel: Advances in civil engineering 2010 (2010) Article ID 740189, 1-9; Hindawi Publ. Corp.
ISSN 1687-8094, 1687-8086
- Shokouhi, P., Zoëga, A., Wiggenhauser, H., Fischer, G.:
Macro-effect of microcracks on sonic surface wave velocity in concrete under compression
Beitrag zu einem Tagungsband: 89th TRB Annual Meeting (2010), 1-17; Hrsg.: Transportation Research Board
ISBN -; ISSN -

1 Weitere Messergebnisse zu Kapitel 6.2

1.1 Messungen mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau analog zu den Messungen mit dem Sensorenarray-Versuchsaufbau

Im folgenden Abschnitt sollen die mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau am dritten Probekörper gemessenen Kurven für die orthogonalen und senkrechten Richtungen (siehe Abbildung 1.1) analog zu denen mit dem Sensorenarray in Kapitel 6.2.4 geführt diskutiert und verglichen werden. Dieser Vergleich soll die Übertragbarkeit zwischen den Versuchsaufbauten zeigen und damit, wie ab Abbildung 6.17 geschehen, die Diskussion der richtungsabhängigen Messungen anhand von Polardiagrammen ermöglichen. Polardiagramme konnten nur mit den Daten des Laservibrometer-Versuchsaufbaus erstellt werden, da die Messungen mit dem Laservibrometer den Vorteil aufweisen, dass mit einer feineren Unterteilung der Richtung - von 10° im Vollkreis im Gegensatz zu 30° im Halbkreis beim Sensoren-Array - gemessen werden konnte. Im Gegensatz zu den Messungen mit dem Sensorenarray weisen die Messungen mit dem Laservibrometer den Nachteil auf, dass durch das verrauschte Messsignal die Auswertung wesentlich schwieriger und die bestimmten Laufzeiten vernehmlicher streuen. In Abbildung 1.1 sind die Messungen in Lastrichtung (oben 0° und unten 180°) sowie orthogonal zur Lastrichtung (links 270° und rechts 90°) eingetragen. Auf diese Weise kann die jeweilige Messrichtung mit der gespiegelten Position verglichen werden.

Erstbelastung:

Bereich 0 (<10-15 %) : Das Absinken der Schallgeschwindigkeit kann für alle Kurven bis auf die Kurve 0° beobachtet werden. Ebenso bestätigt sich, dass das Absinken der Schallgeschwindigkeit für die Messungen orthogonal zur Lastrichtung erst bei einer höheren Belastung in einen Anstieg übergeht.

Bereich I (15-50 %) : Für die in Lastrichtung erfolgten Messungen ist bis zum Lastmaximum von 3,5 MN ein Anstieg der Schallgeschwindigkeit zu beobachten. Das erreichte Maximum der 0° und 180° Kurve unterscheidet sich deutlich. Für die orthogonal zur Lastrichtung gemessenen Geschwindigkeiten ist nach dem Bereich 0 ein verhaltener Anstieg der Schallgeschwindigkeit bei höherer Streuung der Messwerte zu erkennen. Die im Bereich 0 erfolgte Absenkung der Geschwindigkeit wird für die in 90° -Richtung gemessene Kurve wieder ausgeglichen; der Anstieg geht jedoch nicht deutlich über die im lastfreien Zustand ermittelte Geschwindigkeit hinaus. Aufgrund der deutlicher ausgeprägten Reduktion für die 270° -Richtung bleibt die Schallgeschwindigkeit hinter der des unbelasteten Zustandes zurück. Beide Kurven zeigen eine ähnliche Ausbildung, wenn auch mit einer deutlichen Betragsdifferenz und liegen beide unterhalb der in Lastrichtung gemessenen. Nur die in Lastrichtung gemessenen Schallgeschwindigkeitsänderungen überschreiten den Anfangswert vernehmlich. Eine Aussage über einen abflachenden Verlauf des Anstieges, wie bei den Sensorenarray-Messungen in Abbildung 6.12 zu erkennen war, ist aufgrund der stärkeren Streuung der Messwerte beim Laservibrometer-Versuchsaufbau nicht möglich.

Entlastung:

Mit zurückgehender Last sinken für die in Lastrichtung gemessenen Kurven die Schallgeschwindigkeiten deutlicher ab, sodass die Schallgeschwindigkeitsdifferenz zwischen den Richtungen abnimmt. Die Schallgeschwindigkeiten liegen für alle Richtungen im lastfreien Zustand bei LSt 14 unterhalb derer von LSt 0 vor dem ersten Lastzyklus.

Aussagen über Beträge und damit der Vergleich der Abstände zweier Kurven sind in der hier vorliegenden Datenaufbereitung kritisch zu betrachten. Um die einfach abzulesende Schallgeschwindigkeitsänderung zu erhalten, werden die Werte mit dem ersten Wert normalisiert. Weist dieser Wert eine Abweichung vom tatsächlichen Wert auf, wird die gesamte Kurve um diese Abweichung verschoben. Dieses ist insbesondere bei den Laservibrometer-Messungen durch die höhere Streuung der Werte der Fall.

Wiederbelastung:

Im Gegensatz zum Sensorenarray können die Schallgeschwindigkeiten zwischen dem ersten und zweiten Lastzyklus nicht verglichen werden, da zu Beginn des zweiten Lastzyklus das Laservibrometer neu kalibriert werden musste. Die Schallgeschwindigkeitänderung ist bei Laststufe 15 neu normiert und beginnt bei 0 %. Eine detaillierte Beschreibung des Problems ist im Anhang in Kapitel 2 zu finden.

Bereich 0 (<10-15 %) : Für die Messrichtung 180° (Lastrichtung) ist das typische Verhalten einer Schallgeschwindigkeitminderung zu Beginn der Belastung zu erkennen; dieses tritt für die orthogonale Richtung bei 90° verzögert auf. Für die Messrichtungen 270° und 0° ist keine Absenkung vorhanden, sondern ein verminderter Anstieg.

Bereich I (15-50 %) : Der Anstieg der Schallgeschwindigkeit mit abnehmender Steigung ist für alle Richtungen zu beobachten und fällt für die Lastrichtung deutlicher aus.

Bereich II (50-80 %) : Die Kurven in Lastrichtung zeigen sowohl in dem Betrag des Effekts als auch im Verlauf des Effekts im zweiten Lastzyklus eine gute Übereinstimmung. Bei den in orthogonaler Richtung gemessenen Kurven stimmen die Beträge des Effekts ebenfalls gut überein, jedoch sind die Kurven um rund eine Laststufe verschoben. Wie bei den Sensorenarray-Messungen erreichen die orthogonal gemessenen Schallgeschwindigkeiten das Maximum früher - bei Laststufe 22 (270°, 47 %) bzw. bei 23 (90°, 53 %) - und gehen über in ein über mehrere Laststufen anhaltendes Absinken mit geringerer Krümmung als in Lastrichtung. Ebenso kann der längere Anstieg in Lastrichtung bis zum Schallgeschwindigkeitsmaximum bei Laststufe 25 (0° und 180° bei 67 %) mit einer schnell in ein steiles Absinken übergehenden Schallgeschwindigkeit bestätigt werden.

Bereich III (>80 %) : Analog zu den Beobachtungen mit dem Sensorenarray kann ein früheres Unterschreiten der vorangegangenen Werte und stärkeres Absinken in orthogonaler Richtung beobachtet werden.

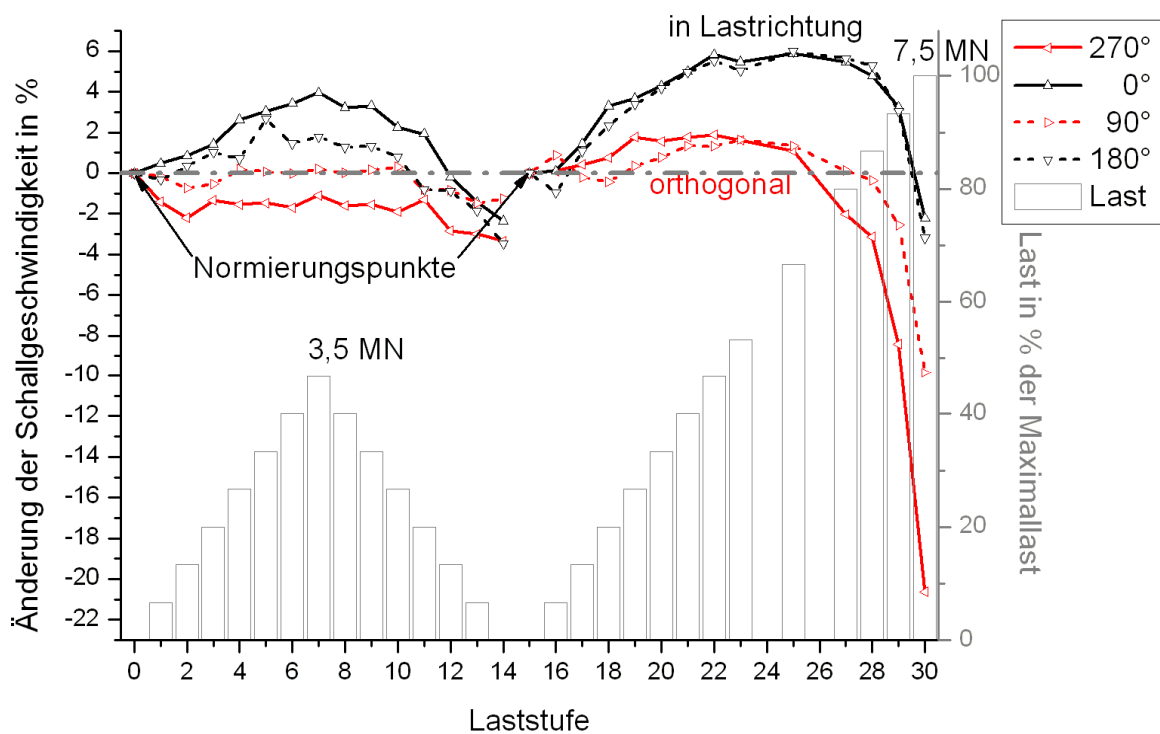


Abbildung 1.1: Änderung der Schallgeschwindigkeit in % für die Lastrichtung mit 0° und 180°, sowie die orthogonale Richtungen mit 90° und 270° und die Last in % der Bruchlast (grau) bei der jeweiligen Laststufe mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau am 3.PK im 1. und 2.LZ gemessen.

Die Messungen mit dem Laservibrometer weisen insbesondere im ersten Lastzyklus eine größere Messungenauigkeit als beim Sensorenarray-Versuchsaufbau auf. Trotzdem kann der Effekt, wie gerade gezeigt, mit dem Laservibrometer-Versuchsaufbau ebenfalls adäquat abgebildet werden.

1.2 Messung der Richtungsabhängigkeit am ersten Probekörper

Die richtungsabhängigen Schallgeschwindigkeitsänderungen, wie in Abbildung 6.18 am dritten Probekörper diskutiert, wurden auch an anderen Probekörpern beobachtet. Hier ist zur Bestätigung der Messungen am dritten Probekörper die Messungen des zweiten Lastzyklus am ersten Probekörpers in Abbildung 1.3 gezeigt.

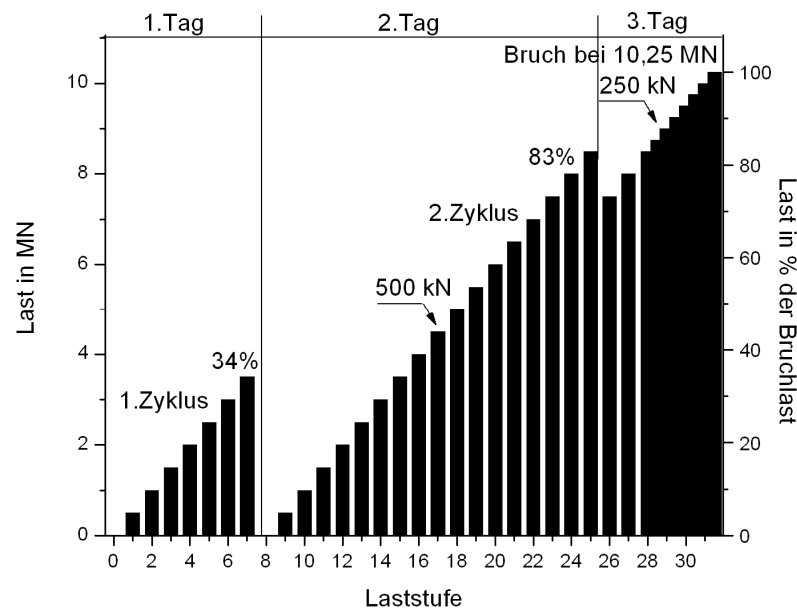


Abbildung 1.2: Belastungszyklen für den 1.PK; ab Laststufe 28 wurden die Lastschritte auf 250 kN gesenkt.

Zum besseren Vergleich wurden die gezeigten Kurven zum einen mit ähnlichen relativen Belastungen, wie bereits am dritten Probekörper verwendet, gewählt sowie zum anderen die Achse gleich skaliert. Die Werte wurden auf den lastfreien Zustand bei Laststufe 8 (0 %; rot) zu Beginn des zweiten Lastzyklus normiert.

Wiederbelastung:

Bereich 0 + I (0-50 %) : Mit steigender Last steigen die Schallgeschwindigkeiten für die Kurve LSt 13 (25 %; grün) an; dieses setzt sich für die Kurve LSt 18 (50 %; lila) fort. Der Anstieg ist besonders deutlich in Lastrichtung. Eine Ellipse mit einer längeren Achse in Lastrichtung bildet sich aus. Gleiches konnte auch am dritten Probekörper beobachtet werden.

Bereich II (50-80 %) : Von der Kurve LSt 18 (magenta; 50 %) zur LSt 23 (türkis; 75 %) sind die Schallgeschwindigkeitsänderungen gering die beiden Kurven liegen auf einem Schallgeschwindigkeitsniveau und die Elliptizität bleibt weitgehend gleich. Es ist nur noch ein geringer Anstieg der Schallgeschwindigkeit in Lastrichtung zu erkennen. In orthogonaler Richtung unterscheiden sich die beiden Richtungen 90° mit einer geringen Reduktion der Schallgeschwindigkeit und 270° mit einem leichten Anstieg der Schallgeschwindigkeit.

Bereich III (>80 %) : Zwischen der Kurve LSt 23 (75 %; türkis) und der Kurve LSt 35; (100 %; schwarz) ist, analog zum dritten Probekörper eine deutliche Schallgeschwindigkeitsreduktion für alle Richtungen zu beobachten. Dieser ist in orthogonaler Messrichtung besonders deutlich und lässt die Kurvenform, wie auch am dritten Probekörper beobachtet, elliptischer werden. Im Gegensatz zum dritten Probekörper, bei dem alle Geschwindigkeiten der 100 % Kurve unter den Werten des lastfreien Zustandes zu Beginn des zweiten Lastzyklus lagen, ist dieses am ersten Probekörper nur für die orthogonale Richtung der Fall.

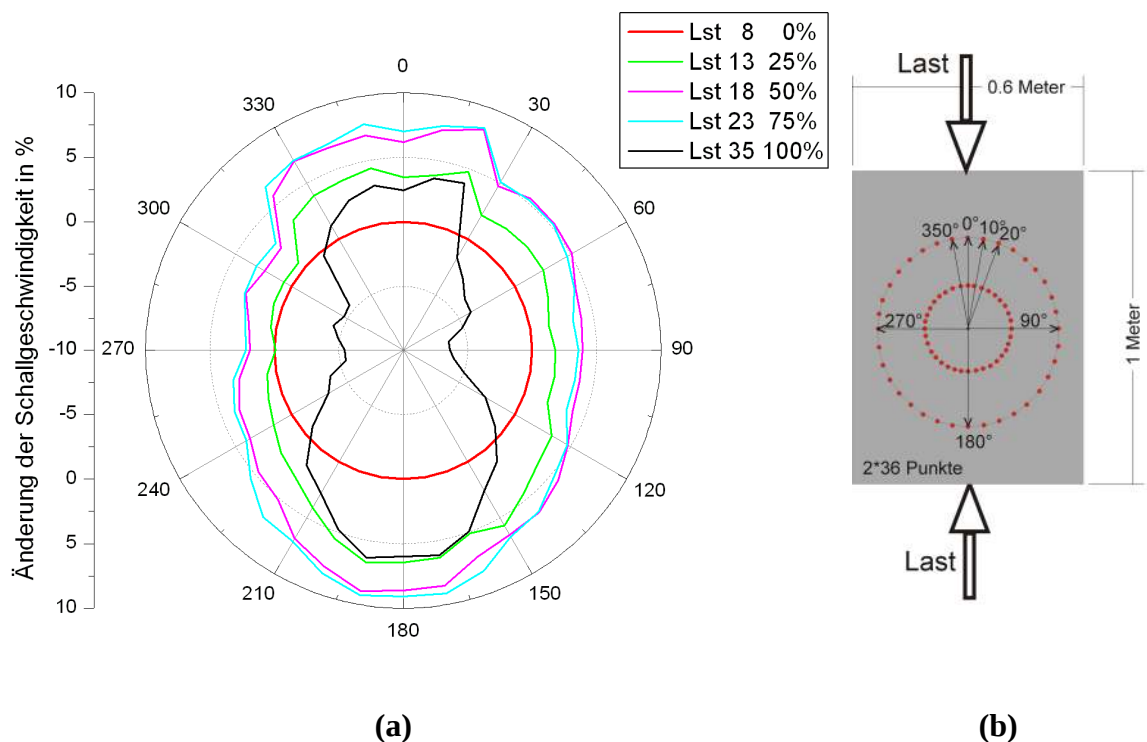


Abbildung 1.3: (a) Polardiagramm für den 2.LZ des 1.PK gemessen mit dem Laservibrometer; auf LSt 8 (lastfrei) normierte Änderung der Schallgeschwindigkeit in %, (b) Winkelzählung beim Laservibrometer-Versuchsaufbau.

Wie hier gezeigt werden konnte, bildet sich der Effekt der Schallgeschwindigkeitsänderung in Richtungsabhängigkeit an verschiedenen Probekörpern in gleicher Weise aus.

2 Einflüsse der Kalibrierung des Laservibrometers

Wie bereits mehrfach angesprochen, muss der Laservibrometer-Versuchsaufbau zu Beginn eines Messtages neu kalibriert werden. Durch die Kalibrierung kann sich die Messstrecke geringfügig ändern und damit einhergehend die erreichten Laufzeiten und Schallgeschwindigkeiten. Ist ein durch die Kalibrierung verursachter Laufzeitunterschied vorhanden, so tritt dieser in entgegen gesetzter Messrichtung mit umgekehrten Vorzeichen auf und erscheint im Polardiagramm als Verschiebung der Kurve in Bezug zum Nullpunkt. Um diese Kalibriereinflüsse zu umgehen, bietet sich wie in Abbildung 1.1 geschehen eine erneute Normierung zu Beginn eines jeden Messtages an. Inwieweit es möglich ist, Messergebnisse von einem Tag zum anderen zu übertragen, soll im Folgenden anhand der Messungen im lastfreien Zustand diskutiert werden.

Im Polardiagramm in Abbildung 2.1 sind die gemessenen Laufzeiten eingetragen. Die rote Kurve, gemessen am noch nicht vorbelasteten Probekörper, ist umschrieben von der nach dem ersten Lastzyklus gemessenen schwarzen Kurve. In alle Richtungen ist ein durch den ersten Lastzyklus hervorgerufen Laufzeitanstieg, zu erkennen. Der Laufzeitzuwachs beträgt hier durchschnittlich 2,24 %. Die am nächsten Tag gemessene grüne Kurve zeigt zum Vergleich zu den beiden anderen hingegen im oberen linken Quadranten eine Laufzeitminderung und im unteren rechten Quadranten eine Laufzeitzunahme und erscheint damit nach unten rechts verschoben: eine derartige Verschiebung ist typisch nach der Kalibrierung des Laservibrometers. Eine Aussage über eine Schallgeschwindigkeitsänderung hervorgerufen durch z. B. eine Belastung ist mit der Verschiebung der Kurve durch die Kalibrierung überlagert. Würden die Werte des zweiten Lastzyklus mit einer Messung aus dem ersten Lastzyklus normiert werden, so würde durch die Kalibrierung eine Asymmetrie in den zweiten Lastzyklus übertragen werden und die gemessenen Effekte verfälschen. Aus diesem Grund wurden die weiteren Lastzyklus auf den lastfreien Zustand zu Beginn des jeweiligen Lastzyklus bezogen.

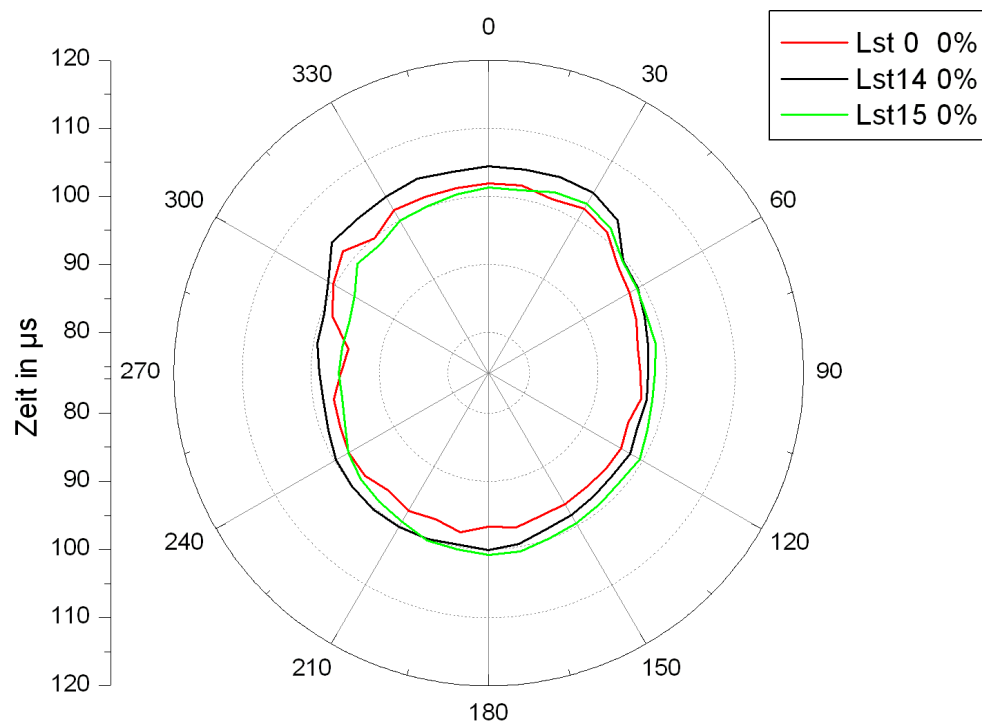


Abbildung 2.1: Vergleich der Laufzeiten im lastfreien Zustand zu Beginn (rot) und Ende (blau) des 1.LZ und vor Beginn (grün) des 2.LZ am 3.PK.

Wird, wie eben beschrieben erneut der Durchschnitt aus allen Richtungen gebildet und die Differenz von 0,96 % zwischen Kurve LSt 15 und LSt 0 betrachtet, so fällt auf, dass die Änderung im Vergleich zur Kurve bei LSt 14 mit 2,24 % über Nacht zurückgegangen ist. Auch hier ist wieder eine zeitabhängige Komponente zu beobachten; siehe hierzu Kapitel 6.2.6.